

INFORMATION TECHNOLOGY
AND INFORMATIZATION

ISSN 1672-9528

CN37-1423/TN

信息技术与信息化



核心期刊(遴选)数据库

万方数据——数字化期刊群

<http://www.wanfangdata.com.cn>

第 3 期 总第300期

2025

创新引擎 赋能产业升级 科技强音 奏响时代华章

ISSN 1672-9528



03>

9 771672 952256

中国期刊网

中国学术期刊(光盘版)

中国学术期刊综合评价数据库来源期刊

中国期刊全文数据库(CJFD)全文收录期刊

中文科技期刊数据库

主办: 山东电子学会

欢迎投稿



《信息技术与信息化》是由山东省科学技术协会主管、山东电子学会主办的科技期刊，主要从信息技术的研究和应用角度，展现信息行业的发展与科技进步，是全国高校、科研院所、企业发表信息学术研究、技术应用成果的园地，知网、万方、维普收录，欢迎踊跃投稿。

刊登内容：

计算机应用、电子与通信技术、网络与信息安全、信息化教学、智能技术、数据科学与技术等。

投稿要求：

1. 投稿邮箱：xxjs-ed@sdie.org.cn；咨询 QQ：3462645092。

2. 来稿要求重点突出，论述严谨，内容 4 版以上，重复率 15% 以下。论文排序为：中文标题、作者姓名、姓名拼音、工作单位（包括所在城市和邮政编码）、中文摘要、中文关键词（3 ~ 8 个）、正文、参考文献（按引文的先后顺序）、作者简介（姓名、出生年份、性别、籍贯、学历、职称、职务、研究方向、通信地址）、基金项目或课题，勿将内容置于页眉页脚，避免遗漏。

3. 论文题目要求简短精炼，且能概括文章核心内容，不宜超过 20 字，尽量不设副标题。摘要为独立于正文的文字，包括目的、方法、结果、结论，且用第三人称书写，200 字左右。

4. 来稿用 Word 排版，格式为：纸张大小选“A4”；页边距选“适中”即上下 2.54 cm、左右 1.91 cm；标题二号字，单倍行距；其他文字小五号字，行距为固定值 16 磅；标题、摘要、关键字不分栏，正文分两栏；公式、图表单倍行距，其中文字不要大于正文字号，且不易过小。

5. 插图尽量少而精，文中图表应有自明性，务必保证图片清楚、规范。插图绘制要大小适宜（半栏或通栏，尽可能用半栏），坐标图中横纵坐标须标明变量名称及单位，单位尽量使用符号，格式为“变量名称 / 单位”，如“时间 / s”或“t / s”。图中文字用 Times New Roman 及宋体字，所有图号、表号应在正文中提及，且文先图后。

6. 如有公式或特殊字符编辑，可用 MathType 公式编辑器，字体统一用 Times New Roman 及宋体。数字、运算符、词汇缩写、字母组合、单位等用正体；单字母变量或函数名用斜体，多字母变量或函数名用正体，下标同变量处理；向量、矩阵、矢量用单字母粗斜体； π 、e、转置 T、共轭转置 H、三角函数、对数 lg、微积分 d 等用正体；整数集 Z、实数集 R、复数集 C 等用加粗正体或空心体。* 在计算机程序中表示乘号，在数学公式中表示卷积，数学公式中的乘号用叉乘或点乘表示；数字和单位之间留空隙，数字小数点前 / 后每 3 位加千分空。

7. 投稿前请确认无误后再投稿，一经投出，除需按审稿意见修改外，不得反复调整，本刊有权对文稿进行适当删改。

8. 请在文稿后注明稿件联系人姓名、地址及联系方式等，以便寄送刊物。

9. 不接受“论文中介”所投的稿件。

10. 凡向本刊所投稿件，即默认为作者同意将该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网进行网络出版或提供信息服务。



邮寄地址：山东省济南市历下区趵突泉北路 24 号（250011）

联系电话：0531-88981208 86126238

微信扫一扫
关注公众号



XINXI JISHU YU XINXIHUA

2025 年第 3 期 总第 300 期

国内统一连续出版物号 CN 37-1423/TN

国际标准连续出版物号 ISSN 1672-9528

主管单位

山东省科学技术协会

主办单位

山东电子学会

创刊时间

1976 年

特邀顾问

杨少军 廉 凯 关卫华 赵树岭 李英峰 禹金涛

编委会主任

曹茂永

编委会副主任

刘培德 袁东风 朱友芹 高 暘

编委（按姓氏笔画顺序）

于东晓 王存祥 王 良 王 凯 王经坤 王 禹
王美玉 王 锋 王新胜 史玉良 史 骏 毕丛福
刘方爱 齐艳红 闫奕名 孙 杰 李子月 李 军
李 博 杨柱天 吴俊峰 邹丰义 张 军 林粤伟
俞山青 宣 琦 耿玉水 夏 辉 徐从安 徐政伟
崔立真 崔超然 崔 璨 寇 亮 宿 南

主编

刘培德

副主编

高 暘

责任编辑

高 暘

编辑

胡聪聪 徐凡淞

电话：0531-88981208

投稿邮箱：xxjs-ed@sdie.org.cn

美术编辑

王 蕊

广告发行

林华健

电话：0531-86126238

邮箱：xxjs@sdie.org.cn

广告业务许可证

鲁广发登字 3700005052 号

编辑出版：《信息技术与信息化》编辑部

地址：山东省济南市历下区趵突泉北路 24 号 414 室

邮编：250011

出版日期：2025 年 3 月 25 日

印刷：山东顺心文化发展有限公司

定价：40.00 元

CONTENTS 目次

行业资讯

Industry Information

- 聚焦两会科技强音 锚定创新发展路径..... 1
- 深耕学术前沿 荣登全球榜单——《信息技术与信息化》杂志主编
- 刘培德入选 ScholarGPS 2024 “全球前 0.05% 顶尖学者”榜单 ... 2

学术研究

Academic Studies

计算机应用

- 基于 M-Net 的微地震信号初至拾取方法..... 王向雨 3
- 基于改进 YOLOv8 的无人机视角下小目标检测模型 谢明宏 7
- 基于 YOLOv7-tiny 的轻量化森林火灾烟雾检测算法.....
- 黄星宇 陈正雄 12
- 基于深度学习的学习者情感识别技术算法优化研究..... 曾光辉 18
- 大模型函数调用机制下的计算优化..... 肖明魁 张 亮 22
- 基于图神经网络用于预测原子相互作用研究..... 贺浩杰 29
- 基于计算机视觉红外热波板材内部孔洞检测方法.....
- 李铁军 葛新强 34
- 基于深度学习的低照度遥感图像智能分割方法.....
- 兰海涛 吴文玲 38
- 基于 PYNQ 的轻量化实时目标检测技术 郭向楠 42
- 工程建设项目审批系统 API 网关设计..... 方钟亮 45
- 基于深度学习的车载视频图像动态识别算法与应用研究.....
- 郑爱玲 许艳艳 51
- 多阈值 Kaniadakis 熵的简化表达和递推方法 何 熠 55
- 可动态扩展的机载网络服务数据通信方法.....
- 加达宇 张杨阳 孙豪杰 60
- 基于改进隐马尔可夫模型的藏文分词研究... 贡保加 安见才让 64
- 多注意力机制在遥感图像语义分割中的应用..... 张磊杰 68

- 一种非接触式 FPGA 配置 Flash 快速烧写方法
- 王 博 张瑜莹 高 鹏 李飞飞 71
- 基于改进 YOLOv7-tiny 飞行员表情识别算法研究..... 杨一豪 75
- 基于 GAN-DLNA 深度学习算法的计算机软件缺陷预测分析研究
- 韩 倩 79

电子与通信技术

- 面向认知无线电应用的四端口 UWB-NB 天线设计 任林源 83
- 基于 FPGA 的智能化串口通讯模块设计
- 王永国 印 通 刘媛媛 李 爽 87
- 高速以太网交换机中的无损传输技术研究.....
- 王怡琳 李玉发 杨思远 91

网络与信息安全

- 基于优化遗传算法的恶意软件漏洞检测方法..... 陈宇翔 95
- 基于 TCM-KNN 算法的多级网络访问安全控制方法.....
- 张创基 林伟烜 许景民 99
- 基于生成对抗网络的人脸微表情皮沟识别方法..... 王长清 103
- 一种基于网络配置文件的光纤通道网络时延特性模拟方法.....
- 王 萌 李 雯 张潘昀 107
- 基于禁忌搜索算法的实验室局域网数据安全交换方法.....
- 赵 云 111
- 基于 GCS-YOLOv8n 模型的煤矸石识别方法... 王林海 徐善永 115
- 基于邻居优先级的区块传播优化方法..... 贾志龙 张 虹 119

数据科学与技术

- 工业大数据多集群通信传输节点调度方法..... 张晓辉 123
- 基于 RCM-cycleGAN 的跨模态眼底图像重建
- 王聪茹 史铭宇 李婷雪 李 妍 张艳珠 127
- 基于改进孤立森林算法的审计数据异常主动预警研究.....
- 蔡玲嘉 李 雄 王泽涌 陈哲瀚 131

民航运价搜索服务平台云化改造研究.....	
..... 张宏海 杨光亮 贾永强 田 丰 崔斌豪 刘中一	135
基于超导重力仪数据采集系统的智能补数与安全加密.....	
..... 修宏祥 陈玉秀	139
基于 K-means 的不平衡数据过采样研究方法.....	杨云熙 143
基于改进 U-Net 的牙齿图像分割和抑噪研究.....	
..... 张 磊 滕开良	146
设备疲劳断裂检测的数据采集分析优化方法.....	
..... 黄 啸 叶序彬	150
基于深度文本聚类的关键词语义多模态挖掘方法.....	
..... 周春良 杨畅畅 李晓辉	153
基于分数傅里叶变换的单次测量相位恢复算法.....	毛宇龙 158
一种基于微组件架构的前端低代码平台.....	
..... 张钢岭 陈 聪 郭凌云	162
基于分布式表示的知识图谱推理研究.....	陈光希 冯 峰 166

自动驾驶中变道的局部路径规划... 白俊卿 张红猛 魏雪涛	171
基于 Faster-YOLO11 的危险驾驶行为检测算法.....	马 骁 175
基于声誉分数的改进 PBFT 共识算法	
..... 徐莹臣 田 野 景 莹 袁富江	179
器件重叠检查方法的研究.....	
..... 薛长青 李彦祯 于洪真 李发春	184

智能技术

基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制研究.....	
..... 王 鑫 李泽锐 何发猛	188
Android 车载系统启动优化研究	曾炫榕 192
基于区块链的智能交通信号灯估算系统研究.....	
..... 袁富江 梁 波 高 洁	196

著作权使用声明

本刊已许可中国知网、万方数据和维普以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明（本刊不再另行支付费用）。如有异议，请在投稿时说明，本刊将另行处理。

特此声明！

《信息技术与信息化》编辑部

标准化管理与服务

STANDARDIZED MANAGEMENT AND SERVICES

团体标准立项、审查、制定和发布

指导并协助企业参与国家、行业、地方标准的立项、编写、审查和发布等工作

受政府有关部门委托，承担标准化领域的管理和技术工作，组织有关活动

标准查新

标准化政策宣贯和相关标准化工作培训

普及标准化知识，培训标准化人员

指导并协助企业建立标准化体系

01 背景意义

2016年4月，国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会印发《关于培育和發展团体标准的指导意见》的通知，要求通过市场主导、政府引导、创新驱动和统筹协调四原则，推动团体标准化工作健康有序发展。

2016年5月，《山东电子学会团体标准管理办法》正式印发，同年11月正式通过全国团体标准信息平台备案。2017年1月正式成立山东电子学会标准化管理委员会。2018年4月，学会入选“国家级团体标准建设试点单位”。2020年11月，牵头成立“山东省电子与通信标准化技术委员会”。聚焦市场需求，规范行业行为，解决标准缺失、增加标准有效供给，推动山东省电子信息产业发展。组织编写《电子税务第三方安全接入指南》《税务征收非税收入数据应用指南》地方标准，成功推动《信息技术类科技成果评价规范》等17项团体标准发布。

02 制定原则

1、立足于行业和市场对创新标准的迫切需求，重点在技术创新速度快的领域提出团体标准项目；

2、着眼于从最终用途角度提出项目，制定融通产业链和跨领域标准，满足市场贸易需要；

3、制定行业管理型标准，服务行业科技、品牌、可持续以及人才发展战略管理创新；

4、目前尚无国家、行业标准或计划，产业发展急需配套的项目，包括材料、工艺、技术、产品、服务等。

03 工作流程

立 项

起 草

征求意见

审 查

报 批

批准发布

聚焦两会科技强音 锚定创新发展路径



在“十四五”规划收官与“十五五”规划谋篇布局的关键节点，科技创新再次成为全国两会的核心议题。习近平总书记在参加团组审议时多次强调“科技创新和产业创新是发展新质生产力的基本路径”“必须坚定不移走自主创新道路”。这一重要论述为中国现代化产业体系建设指明了方向。

回顾 2024 年，“新质生产力”首次写入《政府工作报告》。一年来，各方积极推动科技创新与产业创新的深度融合，大力推动产业的高端化、智能化、绿色化转型，促进科技的创造力向社会的生产力转化，全国新质生产力稳步发展，为高质量发展注入了源源不断的动能……

展望 2025 年，《政府工作报告》提出一系列具有前瞻性与战略性的规划。其中，因地制宜发展新质生产力、加速建设现代化产业体系成为工作重点。具体而言，将进一步推动科技创新与产业创新协同发展，大力推进新型工业化，做大做强先进制造业，积极发展现代服务业，促使新动能不断积累、传统动能实现升级。

在培育壮大新兴产业与未来产业方面，将深入推进战略性新兴产业融合集群发展。开展新技术、新产品、新场景大规模应用示范行动，推动商业航天、低空经济等新兴产业安全健康发展。建立未来产业投入增长机制，培育生物制造、量子科技、具身智能、6G 等未来产业。深化先进制造业与现代服务业融合发展试点，加快发展服务型制造。加强产业统筹布局与产能监测预警，促进产业有序发展与良性竞争。加快国家高新区创新发展，梯度培育创新型企业，推动专精特新中小企业发展壮大，支持独角兽企业、瞪羚企业发展，助力更多企业在新领域、新赛道实现高速发展。

在推动传统产业改造提升方面，将加快制造业重点产业链高质量发展，强化产业基础再造与重大技术装备攻关。进一步扩大范围、降低门槛，深入实施制造业重大技术改造升级和大规模设备更新工程。加快制造业数字化转型，培育一批既懂行业又懂数字化的服务商，加大对中小企业数字化转型的支持力度。开展标准提升行动，引领传统产业优化升级。深入推进制造业“增品种、提品质、创品牌”工作，加强全面质量管理，打造名品精品与经典产业。

在激发数字经济创新活力方面，将持续推进“人工智能+”行动，更好地融合数字技术与制造优势、市场优势。支持大模型广泛应用，大力发展智能网联新能源汽车、人工智能手机和电脑、智能机器人等新一代智能终端以及智能制造装备。扩大 5G 规模化应用，加快工业互联网创新发展，优化全国算力资源布局，打造具有国际竞争力的数字产业集群。加快完善数据基础制度，深化数据资源开发利用，促进并规范数据跨境流动。促进平台经济规范健康发展，充分发挥其在促创新、扩消费、稳就业等方面的积极作用。

2025 年，在政策的有力推动下，科技创新领域必将取得更为丰硕的发展成果，开启波澜壮阔、充满无限可能的崭新篇章。这不仅将推动中国产业结构持续优化升级，提升国家整体竞争力，更将为全球科技发展与经济增长贡献中国智慧与中国力量。



深耕学术前沿 荣登全球榜单

——《信息技术与信息化》杂志主编
刘培德入选 ScholarGPS 2024 “全
球前 0.05% 顶尖学者” 榜单

近日，国际学术排名机构 ScholarGPS 发布 2024 年全球前 0.05% 顶尖科学家榜单（Highly Ranked Scholars），榜单分为“终身”（Highly Ranked Scholar-Lifetime）和“近五年”（Highly Ranked Scholar-Prior 5 Years）两个类别，中国内地有 286 位学者入选“终身”榜单、1600 位学者入选“近 5 年”榜单。《信息技术与信息化》杂志主编刘培德凭借突出的学术成就和广泛的国际影响力，入选“终身”榜单和“近 5 年”榜单。其中，在模糊控制系统专业“终身”榜单中，全球排名第 24 位；在计算智能专业“近 5 年”榜单中，跻身全球前列。

ScholarGPS 汇集了全球各学科领域 3000 多万名学者的信息档案以及海量论文、专利、书籍等大数据资源。应用人工智能、数据挖掘、机器学习和其他数据科学技术，对学者的研究成果（发表论文数）、影响力（引用次数）和论文质量三项指数进行综合分析，

对全球超过 3000 万学者和 55000 家机构在各个领域、学科和专业方面（14 个领域、177 个学科及超过 35 万个专业）的卓越表现进行排名，识别出“高排名学者”（Highly Ranked Scholars），即在所有学者中、在本领域、本学科和本专业中排在前万分之五的学者。

此次入选，不仅为国内学者树立了可资借鉴的标杆，激励更多科研人员专注学术研究，勇攀科学高峰，在全球学术舞台上展现中国学者的风采与实力。同时，也将进一步提升《信息技术与信息化》杂志的影响力，推动杂志在学术交流、成果传播等方面发挥更为积极的桥梁作用，助力全国信息技术产业与国际先进水平深度接轨，为信息技术的创新发展和实际应用带来更多新的可能与机遇。

基于 M-Net 的微地震信号初至拾取方法

王向雨^{1,2}

WANG Xiangyu

摘要

高效精准地对微地震信号进行初至拾取工作是微地震监测技术中重要环节, 由于微地震信号通常存在震级微弱, 噪声复杂等问题, 导致微地震信号初至拾取工作十分困难。目前对微地震信号初至拾取的方法普遍存在拾取速度慢、拾取精度低的问题, 针对这些问题, 文章提出了一种基于多尺度特征提取的方法来构建的网络模型 M-Net, 首先将微地震信号训练集输入到 M-Net, 通过反向传播算法最小化损失函数, 更新 M-Net 权重参数, 得到拾取效果最优的 M-Net。M-Net 和其他网络在微地震信号验证集进行对比, 实验结果表明, M-Net 在微地震信号初至拾取效率和精度方面均优于其他网络, 验证网络模型 M-Net 的优越性。

关键词

微地震信号; 初至拾取; 多尺度特征提取; 跳跃连接; 信噪分离

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.001

0 引言

在油气藏资源勘探、开采过程中, 微地震监测技术是一种快速、高效的技术手段^[1-2]。通过在地面或井中设置多个检波器, 长时间监测由井下水力压裂产生的微小地震事件, 来分析确定地下油气藏资源储层情况, 是对油气藏资源安全高效地开采开发的保障^[3]。其中对采集到的微地震信号进行初至拾取是微地震监测技术中的关键步骤^[4], 也是后续对油气藏资源定位、地下裂缝预测工作的前提。实际采集到的微地震信号, 往往其中的有效微地震信号占比较低, 导致对微地震信号进行初至拾取的工作十分困难。因此, 一种能够高效、精准地对微地震信号进行初至拾取的方法具有重要意义^[5]。

目前针对微地震信号进行初至拾取有许多相关方法研究^[6]。例如传统拾取方法有长短时窗平均值比(STA/LTA)法^[7]、Akaike 信息准则(AIC)法^[8]、小波变换法^[9]等, 上述这些方法相较于人工拾取方法, 大幅提高了微地震信号初至拾取效率, 但是这些方法需要人为设置具体的特征参数, 往往只适应于某一种特定的微地震信号, 对不同的微地震信号进行初至拾取的泛化性仍有待提高。

随着深度学习的快速发展, 基于深度学习拾取方法逐渐开始应用。神经网络模型对于海量数据可以快速处理学习并提取特征信息, 与传统拾取方法相比, 神经网络模型不仅

对微地震信号数据处理速度更快, 同时不需要人为设置特征参数, 可以通过海量的数据进行训练, 自动更新权重参数, 使拾取效果最优。基于深度学习拾取方法有 UNet^[10], UNet++^[11]等, 这些方法初至拾取的泛化性和精准性均优于传统拾取方法, 但上述拾取方法对低信噪比的微地震信号拾取精度仍有待提高。针对这些拾取方法存在的不足, 本文提出了一种基于多尺度特征提取的网络模型 M-Net 来对微地震信号进行初至拾取。在实验部分将 M-Net 和 UNet 拾取结果进行了对比, M-Net 拾取精度达到了 94.99%, UNet 为 87.50%, 实验说明 M-Net 初至拾取效果和精度均优于 UNet 网络。

1 模型结构和原理

1.1 M-Net 模型结构

M-Net 模型由编码器、解码器、中间跳跃连接层三部分组成。编码器部分由 5 个 M-Block 模块组成, 每个 M-Block 模块之间通过下采样连接, 对微地震信号逐层提取浅层到深层信号特征; 解码器部分由 4 个 M-Block 模块组成, 之间通过上采样连接, 逐层将编码器得到的信号特征复原为原微地震信号特征大小; 中间跳跃连接层部分负责连接编码器和解码器, 避免 M-Net 在编码器提取特征时丢失有效信号特征信息。M-Net 模型结构图如图 1 所示, M-Block 结构图如图 2 所示。M-Block 模块通过将 3×3、5×5、7×7 不同尺度的卷积层融合, 获取不同感受野下的微地震信号特征, 提取更全面丰富微地震信号初至特征, 提高 M-Net 对微地震信号初至拾取结果的精度。

1. 湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室 湖北宜昌 443002

2. 三峡大学计算机与信息学院 湖北宜昌 443000

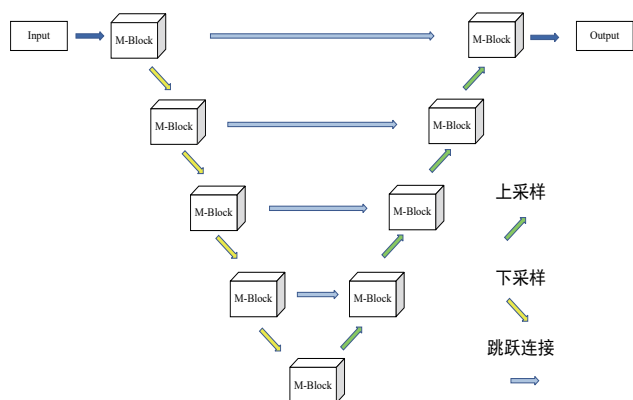


图1 M-Net 模型结构图

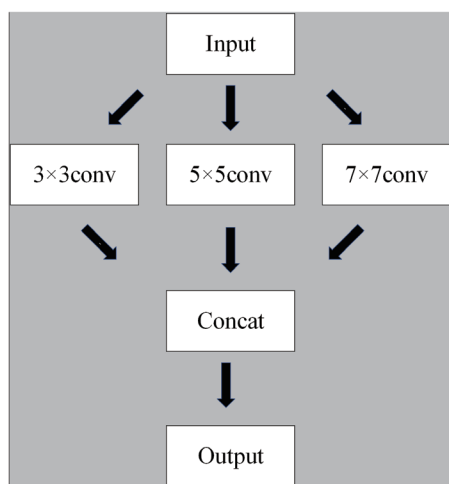


图2 M-Block 结构图

1.2 M-Net 模型原理

将微地震信号训练数据输入到 M-Net，首先经过 M-Net 编码器部分，M-Block 模块对输入的微地震信号数据进行多尺度的初至信号特征提取，然后通过下采样逐层提取浅层到深层的初至信号。编码器中 5 层 M-block 通道数分别设置为 32、64、128、256、512，在编码器最后一层得到序列长度为 $L/16$ 的微地震信号初至特征（ L 是微地震信号序列长度）。

M-Net 解码器部分对编码器提取的微地震信号特征中解调通过上采样，将编码器提取的序列长度为 $L/16$ 的微地震信号初至特征逐层恢复，解码器中 4 层 M-block 通道数分别设置为 32、64、128、256，在 M-Net 最后输出序列长度为 L 的微地震信号特征。

M-Net 中间跳跃层连接编码器和解码器，避免编码器对微地震信号进行特征提取时丢失有效信息细节，使 M-Net 模型输出更准确地微地震信号初至拾取结果。同时将编码器提取的浅层特征和经过解码器得到的深层特征融合，从而 M-Net 提取更全面丰富的微地震信号特征信息，进一步提高微地震信号初至拾取结果精度。

M-Net 最后结果输出将序列长度为 L 的微地震信号特征

经过 Softmax 函数^[12]，输出微地震信号序列上是否为初至点的概率曲线，取输出概率曲线中概率最大值对应的微地震信号序列为微地震信号初至点。

M-Net 中 Softmax 函数计算公式为：

$$y_i(x) = \frac{\exp(x_i)}{\sum_{i=1}^n \exp(x_i)} \quad (1)$$

式中： x 是微地震信号； n 是微地震信号采样点个数； i 是微地震信号序列位置； x_i 是微地震信号序列点为 i 时，该点微地震信号特征； y_i 是地震信号序列点为 i 时，该点是否为初至点的概率。

M-Net 通过最小化损失函数，反向传播^[13]来更新模型权重参数，使 M-Net 可以高效、精准地完成微地震信号初至拾取。

M-Net 中损失函数^[14-15]用公式表示为：

$$L = \min \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N - [y_i \log(p_i) + (1 - y_i) \log(1 - p_i)] \quad (2)$$

式中： L 是 M-Net 损失函数； N 是微地震信号采样点个数； i 是微地震信号序列位置； y_i 是微地震信号序列点为 i 时的标签值（若该点是初至点，取值为 1，否则为 0）； p_i 是地震信号序列点为 i 时，该点是否为初至点的概率。

M-Net 微地震信号初至拾取精度定义为：

$$\text{accuracy} = \frac{T}{S} \quad (3)$$

式中：accuracy 是 M-Net 微地震信号初至点准确拾取百分比； T 是初至点准确的微地震信号拾取数目； S 是所有微地震信号数目总和。

2 微地震信号拾取流程

M-Net 网络模型用于微地震信号初至拾取任务时，拾取流程分为三个步骤完成：微地震信号数据集预处理、微地震信号数据集训练、微地震信号数据集拾取。

微地震信号数据集预处理阶段，将微地震模拟信号通过加入信噪比为 -10 dB 高斯噪声^[16]，和真实微地震信号一起组成 M-Net 训练数据集。添加的高斯噪声定义为：

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \frac{\sigma_S}{\sigma_N} \quad (4)$$

式中： S 是微地震信号； N 是噪声； σ_S 是微地震信号标准差； σ_N 是噪声标准差。

微地震信号数据集训练阶段，将微地震信号训练数据集输入到 M-Net，通过最小化损失函数，反向传播算法更新 M-Net 权重参数，完成 M-Net 对微地震信号训练数据集的训练步骤，得到训练好的 M-Net。

微地震信号数据集拾取阶段，将待拾取的微地震信号数据集样本输入到经过微地震信号数据集训练阶段后的 M-Net，

M-Net 可以自动对待拾取的微地震信号数据集样本输出微地震信号特征和微地震信号初至拾取结果，微地震信号初至拾取流程完成。M-Net 拾取流程图如图 3 所示。

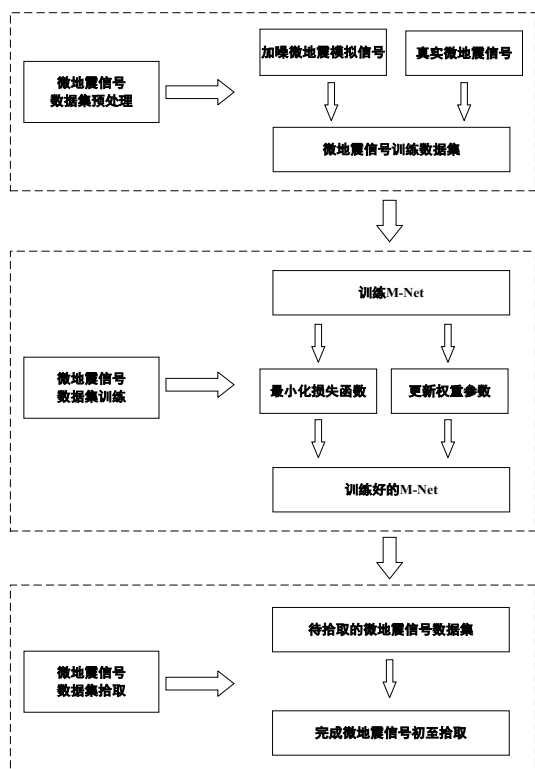


图 3 M-Net 拾取流程图

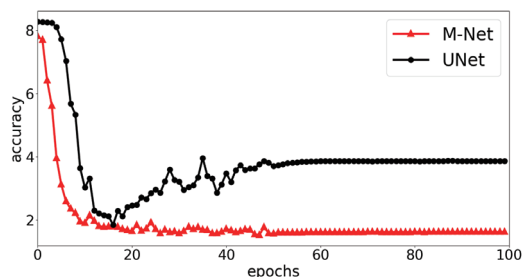
3 实验设置

3.1 实验环境和超参数选择

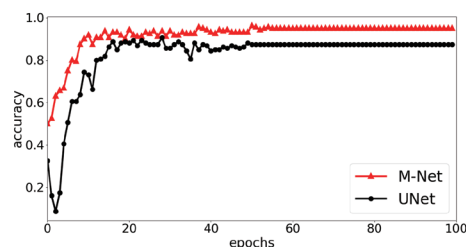
本文实验编程环境实验 Tensorflow2.6，在 Ubuntu 7.5.0 操作系统的 GPU 服务器上训练，硬件设备配有 6 个 NVIDIA GeForce RTX3090 GPU 和 24 GB RAM。M-Net 网络模型 epoch 设置为 100，批次大小为 16，学习率为 0.001，优化器为 Adam，标签平滑化参数为 0.01，Dropout 设置为 0.5，防止 M-Net 在训练阶段出现过拟合现象。

3.2 模型结果对比

为验证 M-Net 较于其他深度学习网络在微地震信号初至拾取的优越性，本文对 M-Net、UNet 模型在微地震信号初至拾取结果上进行对比实验，实验结果如图 4 所示。



(a) 微地震信号拾取 Loss 对比图



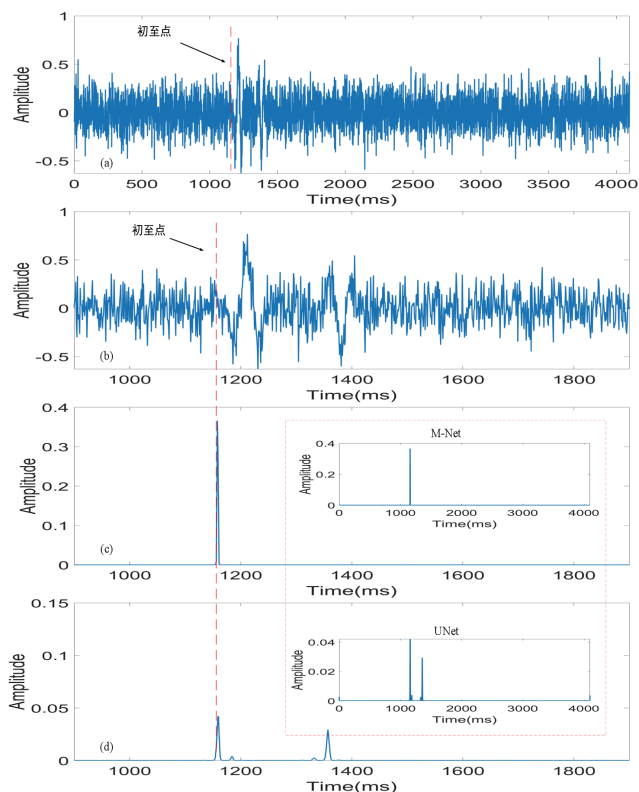
(b) 微地震信号拾取 accuracy 对比图

图 4 不同网络模型结果对比图

图 4 (a) 可以看到 M-Net loss 值比 UNet 更小、更稳定，这说明 M-Net 比 UNet 在对微地震信号数据集的拟合能力更好，更能有效提取微地震信号初至特征；由图 4 (b) 可知，M-Net 微地震信号拾取精度达到了 94.99%，UNet 微地震信号初至拾取精度为 87.50%，M-Net 拾取精度优于 UNet 拾取精度，进一步说明 M-Net 比 UNet 在微地震信号初至拾取的优越性，可以更好地提取微地震信号特征，更有效实现微地震信号和噪声分离，更精准地对微地震信号完成初至拾取工作。

3.3 初至拾取结果对比

本实验利用正演模型生成模拟信号，其中模拟信号的采样点均为 4 096，采样间隔为 1 ms，对添加 -10 dB 高斯噪声的微地震模拟信号进行初至拾取实验。M-Net、UNet 模型的信号初至拾取结果对比图如图 5 所示。



(a) 微地震模拟信号图；(b) 微地震模拟信号图 900 ms 到 1900 ms 局部放大图；(c) M-Net 拾取结果图；(d) UNet 拾取结果图

图 5 添加 -10 dB 高斯噪声的微地震模拟信号拾取结果图

从图 5 对比拾取结果可以看到, 图 5 (a) 是添加 -10 dB 高斯噪声的微地震模拟信号, 图 5 (b) 是模拟信号 900 ms 到 1900 ms 局部放大图。对图 5 中 (c) (d) M-Net、UNet 拾取结果分析可知, M-Net 可以精准找到信号初至点并准确拾取, 而 UNet 初至拾取结果和真实初至点存在较大偏差。结果表明 M-Net 拾取效果和精准性优于 UNet。

上述实验结果表明, UNet 对于低信噪比的微地震信号不能准确进行初至拾取, M-Net 可以准确对低信噪比的微地震信号进行初至拾取, 说明 M-Net 相较于 UNet 在初至拾取效果和精准性更优。

4 结语

本文提出了一种基于多尺度特征提取的方法来构建的网络模型 M-Net。M-Net 和其他深度学习网络模型相比, 在低信噪比微地震信号条件下, M-Net 初至拾取速度和精度均优于其他网络。M-Net 可以很好地解决低信噪比的微地震信号拾取精度低的问题, 通过多尺度特征提取, 获取了更全面更丰富的特征信息, 避免丢失了微地震信号有效特征, 更好地实现微地震信号和噪声分离, 从而精准地完成微地震信号初至拾取工作。在后续研究阶段, 将结合微地震信号去噪网络和微地震信号初至拾取网络, 进一步提升模型的拾取精度, 同时优化网络模型, 高效精准地完成微地震信号初至拾取任务。

参考文献:

- [1] SHU H M, DAWOD A Y. Microseismic monitoring signal waveform recognition and classification: review of contemporary techniques[J]. Applied sciences, 2023, 13(23): 12739.
- [2] FENG G L, YOSHIDA S, LACIDOGNA G. Special issue on new advances in acoustic emission and microseismic monitoring technologies in civil engineering[J]. Applied sciences, 2023, 13(2): 969.
- [3] MENG L B, ZHENG J, YANG R Z, et al. Microseismic monitoring technology developments and prospects in CCUS injection engineering[J]. Energies, 2023, 16(7): 3101.
- [4] QIAN Y N, LI Q G, LIANG Y P, et al. Evaluation of hydraulic fracturing in coal seam using ground microseismic monitoring and source location[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2024, 57(10): 679-694.
- [5] ANIKIEV D, BIRNIE C, WAHEED U B, et al. Machine learning in microseismic monitoring[J]. Earth-science reviews, 2023, 239: 104371.
- [6] XIAO Y X, CHEN S J, LIU L, et al. Determining s-wave arrival times for microseismic monitoring in tunnels based on instantaneous phase difference of sensors[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2023, 57: 1781-1797.
- [7] 邱磊, 李彩华. STA/LTA 方法拾取天然地震波初至及其改进分析[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4): 1497-1506.
- [8] 胡慧江, 李利平, 靳昊, 等. 基于高阶统计量偏斜度和赤池信息准则的突涌水微振信号初至拾取方法[J]. 工业建筑, 2023, 53(5): 132-136.
- [9] 巩佳琦. 基于 Shearlet 变换与 AIC 的微地震初至提取[D]. 吉林: 吉林大学, 2018.
- [10] 李建平, 张硕伟, 丁仁伟, 等. 面向地震波初至智能拾取的超分辨率深度残差方法研究[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(2): 251-262.
- [11] 刘志文, 王进强, 王广鑫. 基于 UNet++ 的地震 P 波初至拾取研究[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(1): 65-72.
- [12] HAN D C, YE T Z, HAN Y Z, et al. Agent attention: on the integration of softmax and linear attention[DB/OL]. (2024-07-15)[2024-09-09]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.08874>.
- [13] 王子华, 叶莹, 刘洪运, 等. 基于脉冲序列标识的深度脉冲神经网络时空反向传播算法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(6): 2596-2604.
- [14] 李伟, 黄鹤鸣. 基于双交叉熵的自适应残差卷积图像分类算法[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(12): 3670-3676.
- [15] 王振, 杨宵晗, 吴楠楠, 等. 基于生成对抗网络的序列交叉熵哈希[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(12): 3536-3546.
- [16] 肖莉. 通信系统中高斯白噪声的性能研究[J]. 传感器世界, 2023, 29(2): 32-36.

【作者简介】

王向雨(1999—), 男, 湖南株洲人, 硕士研究生, 研究方向: 微地震信号处理等。

(收稿日期: 2024-11-14)

基于改进 YOLOv8 的无人机视角下小目标检测模型

谢明宏¹

XIE Minghong

摘要

随着无人机技术的快速发展,无人机在城市管理和灾害监测等领域的应用愈加广泛。无人机拍摄的航拍图像具备广泛视角和高覆盖范围的优势,但也面临小目标检测难度大、背景复杂等挑战。针对这些问题,文章提出了一种基于改进 YOLOv8 的目标检测算法——DAE-YOLO。该模型通过引入 Deformable Attention 机制,实现了动态调整注意力的关键点位置,提升了对小目标的检测能力;采用创新的 Inner Wise-IoU 损失函数,通过引入自适应的辅助边界框优化 IoU 损失计算,提高了边框回归的精度;同时设计了轻量化的 Detect_Efficient 检测头,在保证检测精度的同时提升了模型效率。实验结果表明,DAE-YOLO 在 VisDrone2019 数据集上相较于原始模型有显著性能提升:精确率提升 7.2%,召回率提升 6.9%,mAP50 提升 9.8%,mAP50-95 提升 10.7%。在夜间和白天的复杂场景测试中,DAE-YOLO 都表现出了优异的小目标检测能力。

关键词

改进 YOLOv8; 小目标检测; DAE-YOLO; Deformable Attention; Inner Wise-IoU

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.002

0 引言

随着无人机技术的日新月异,其应用已渗透到农业、交通和城市规划等诸多领域^[1]。无人机凭借卓越的机动性和操控灵活度,能够高效采集大规模实时数据,为各行业带来显著的效率提升。其中,航拍成像以其独特的俯瞰视角和广阔的覆盖范围,在目标检测领域扮演着不可或缺的“角色”。相较于传统的地面拍摄,航拍视角不仅能够获取更宽广的场景信息,还能提供更为直观的空间分布特征,这一优势在城市管理和灾害监测等领域尤为突出。

然而,航拍图像的目标检测也面临着独特的技术挑战。首要问题是小目标识别难度大:航拍图像中的目标往往体积微小,特征不够明显,且分辨率受限。其次,航拍场景常常伴随着建筑物、道路和植被等复杂背景元素,这些因素会干扰目标识别的准确性。另外,由于垂直观测视角的特性,目标之间的上下文关联信息相对匮乏,这进一步增加了检测任务的复杂度。

近年来,目标检测领域已经取得了显著进展,特别是以 YOLO^[2] 系列为代表的单阶段检测算法展现出了优异的性能。其中,YOLOv8 作为最新一代的目标检测算法,通过改进的骨干网络结构和特征融合策略,在通用目标检测任务上取得了显著成果。然而,在面对无人机航拍场景中的小目标

检测时,YOLOv8 的原始模型仍存在一些局限性。

针对上述问题,本文提出了一种改进的目标检测算法 DAE-YOLO。该算法通过引入 Deformable Attention 机制^[3]增强对小目标的特征提取能力,采用创新的 Inner Wise-IoU 损失函数优化边界框回归精度,并设计了轻量化的检测头结构提升模型效率。这些改进使得模型能够更好地适应无人机视角下的目标检测任务需求,为实际应用提供了更可靠的技术支持。

1 算法模型

1.1 YOLOv8

YOLOv8 是 Ultralytics 公司在 2023 年 1 月推出的新一代目标检测算法。根据模型结构的宽度和深度,YOLOv8 提供了从轻量到重量级的 5 个版本:YOLOv8n (nano)、YOLOv8s (small)、YOLOv8m (medium)、YOLOv8l (large) 和 YOLOv8x (xlarge),计算复杂度依次递增,以适应不同的应用场景需求。其骨干网络的设计采用基于 CSPDarknet-53 的架构,包含 53 层卷积层和多个残差块结构。这种设计能够有效提取图像的多层次特征,增强模型对图像细节和上下文信息的理解能力。值得注意的是,YOLOv8 创新性地 将传统的 C3 模块升级为 C2f 模块,这一改进不仅增强了梯度流动,还通过多尺度特征融合提升了特征提取的丰富性。颈部网络采用改进的 PAN-FPN (特征金字塔网络) 结构。在 FPN^[4] 的基础上融入路径聚合网络 (PAN)^[5],实现了深浅

1. 贵州财经大学信息学院 贵州贵阳 550025

层特征的双向互补增强。通过简化 PAN 部分的上采样后卷积层,在保证性能的同时实现了结构轻量化,提高了模型效率。此外,检测头放弃了 YOLOv5 的耦合头,采用的是解耦头。

1.2 DAE-YOLO 算法模型

由于无人机视角下的目标存在背景复杂、目标小、多尺度等问题,导致 YOLOv8 的原始模型结构并不能满足对无人机拍摄图像的目标检测任务。为有效解决以上问题,本文基于 YOLOv8 基础模型提出了目标检测算法 DAE-YOLO, DAE-YOLO 的结构如图 1 所示。首先,通过将可变形卷积^[6]与 Transformer^[7]相结合,实现动态调整注意力的关键点位置。这种数据驱动的稀疏注意力机制不仅降低了计算复杂度,还能自适应地关注图像中的重要区域,提升对小目标的检测能力。结合 Inner-IoU 与 Wise-IoU 的优势,通过引入辅助边界框来优化 IoU 损失计算。对于不同 IoU 值的样本采用不同大小的辅助边界框,有效提升了边框回归的精度,特别是对小目标的定位效果。针对 YOLOv8 检测头计算开销大的问题,提出了 Detect_Efficient 轻量化检测头设计,在保证检测精度的同时提升了模型效率。

1.2.1 Deformable Attention

传统注意力机制在视觉任务中面临着诸多挑战。Vision Transformer 采用的全局注意力机制不仅计算开销巨大,还容易受到图像中无关区域的干扰,导致特征表示效率低下;而 PVT^[8]等模型通过下采样特征图虽然降低了计算量,却造成了严重的信息损失;Swin Transformer^[9]引入的窗口注意力机制虽然在一定程度上缓解了计算压力,但其固定的注意力模

式限制了对大尺度目标的建模能力。

Deformable Attention^[10]巧妙地将可变形卷积的思想与 Transformer 相结合,通过学习共享的偏移量来动态调整注意力的关键点位置。这种数据驱动的稀疏注意力机制不仅大幅降低了计算复杂度,更重要的是能够自适应地关注图像中的重要区域。

具体流程如下:

给定特征值图 $x \in \mathbb{R}^{H \times W \times C}$, 在特征图上均匀分布网格作为参考点 $p \in \mathbb{R}^{H_G \times W_G \times 2}$ 。其中 $H_G = \frac{H}{r}$, $W_G = \frac{W}{r}$, r 是下采样率,将参考点进行归一化。特征图首先通过线性投影生成查询向量 $q = xW_q$ 。轻量级的偏移网络 θ_{offset} 用于预测 $\Delta p = \theta_{\text{offset}}(q)$ 。在变形点的位置对特征进行采样,生成键 (key) 和值 (value) $\tilde{k} = \tilde{x}W_k$, $\tilde{v} = \tilde{x}W_v$ 。变形特征图 $\tilde{x}$ 是通过采样函数 ϕ 获得的,该函数执行双线性插值具体公式为:

$$\tilde{x} = \phi(x; p + \Delta p) \quad (1)$$

其中 ϕ 定义为:

$$\phi(z; (p_x, p_y)) = \sum_{(r_x, r_y)} g(p_x, r_x) g(p_y, r_y) z[r_y, r_x, :] \quad (2)$$

式中: $g(a, b) = \max(0, 1 - |a - b|)$; (r_x, r_y) 表示特征图上的所有位置。

对查询 q 、变形键 $\tilde{k}$ 和变形值 $\tilde{v}$ 应用多头变形注意力。第 m 个注意力头的输出。具体为:

$$z^{(m)} = \sigma \left(\frac{q^{(m)} (\tilde{k}^{(m)})^\top}{\sqrt{d}} + \phi(\hat{B}; R) \right) \tilde{v}^{(m)} \quad (3)$$

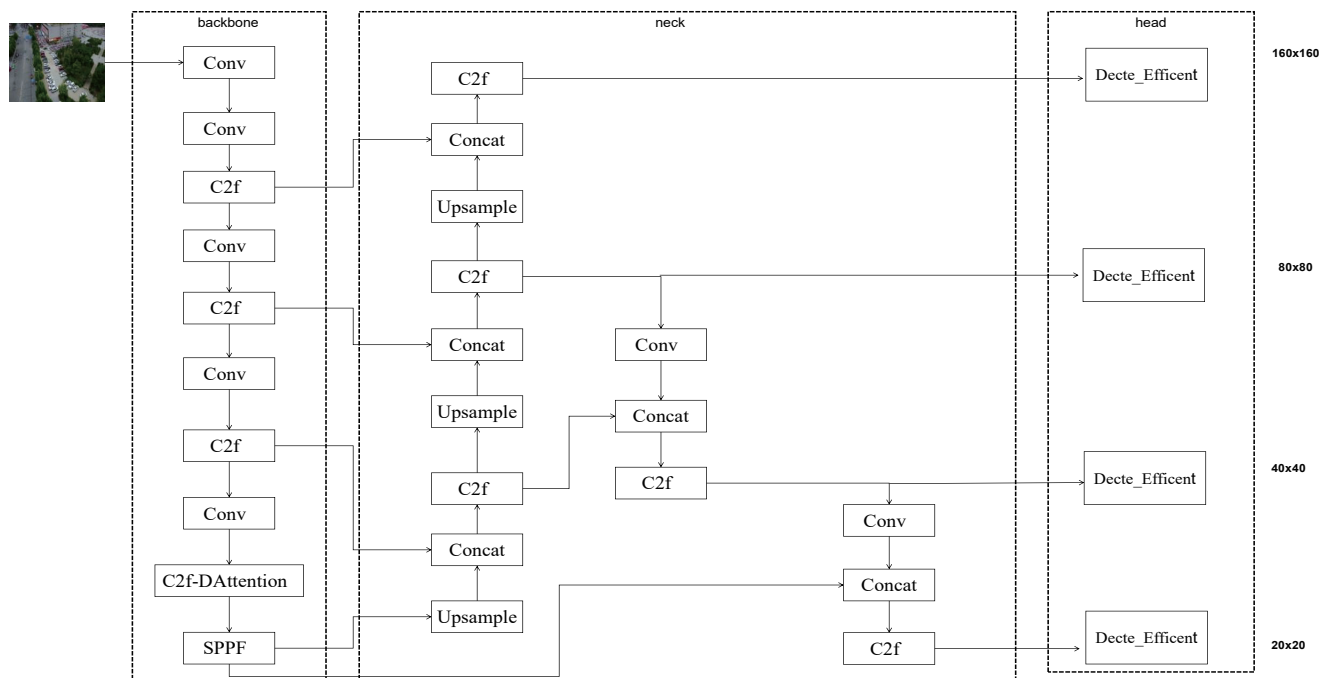


图 1 DAE-YOLO 模型结构

式中: $\phi(\hat{B}; R) \in \mathbb{R}^{HW \times H_0 W_0}$ 表示位置嵌入矩阵, 结合相对位置偏移 R ; σ 表示 softmax。在所有注意力头处理完成后将其拼接在一起通过输出投影层生成最终的特征图 Z 。

1.2.2 Inner Wise-IoU

随着边界框回归 (bounding box regression, BBR) 损失函数不断更新和优化, IoU 表示预测框和目标框的交并比, 然而现有基于 IoU 的 BBR 存在部分局限性, 无法根据不同检测器和检测任务自适应调整。在小目标检测的中, 目标较小导致样本质量参差不齐, 由于检测器过度依赖高质量样本, 导致检测效果不佳, 本文通过采用 Inner-IoU^[10] 与 Wise-IoU^[11] 相结合来解决上述问题。

Inner-IoU 通过引入辅助边界框 (auxiliary bounding box) 来计算 IoU 损失, 对于 IoU 值高的样本使用较小的辅助边界框获得大于实际边框的梯度值。对于 IoU 较小的样本使用较大的辅助边界框, 扩大边框回归的有效范围。

辅助边界框的计算公式分别为:

$$b_l^{\text{gt}} = x_c^{\text{gt}} - \frac{w^{\text{gt}} \cdot r}{2} \quad (4)$$

$$b_r^{\text{gt}} = x_c^{\text{gt}} + \frac{w^{\text{gt}} \cdot r}{2} \quad (5)$$

$$b_t^{\text{gt}} = y_c^{\text{gt}} - \frac{h^{\text{gt}} \cdot r}{2} \quad (6)$$

$$b_b^{\text{gt}} = y_c^{\text{gt}} + \frac{h^{\text{gt}} \cdot r}{2} \quad (7)$$

$$b_l = x_c - \frac{w \cdot r}{2} \quad (8)$$

$$b_r = x_c + \frac{w \cdot r}{2} \quad (9)$$

$$b_t = y_c - \frac{h \cdot r}{2} \quad (10)$$

$$b_b = y_c + \frac{h \cdot r}{2} \quad (11)$$

式中: r 是缩放系数。Inner-IoU 的计算公式为:

$$\text{inter} = (\min(b_r^{\text{gt}}, b_r) - \max(b_l^{\text{gt}}, b_l)) \times (\min(b_b^{\text{gt}}, b_b) - \max(b_t^{\text{gt}}, b_t)) \quad (12)$$

$$\text{union} = (w^{\text{gt}} \times h^{\text{gt}} + w \times h) \cdot r^2 - \text{inter} \quad (13)$$

$$\text{IoU}_{\text{inner}} = \frac{\text{inter}}{\text{union}} \quad (14)$$

Inner-IoU 损失为:

$$L_{\text{Inner-IoU}} = 1 - \text{IoU}_{\text{inner}} \quad (15)$$

在 YOLOv8 模型中采用的是 CIoU, 其计算公式为:

$$L_{\text{CIoU}} = 1 - \text{IoU} + \frac{\rho^2(b, b^{\text{gt}})}{c^2} + \alpha v \quad (16)$$

式中: L_{CIoU} 表示 CIoU 损失; $\rho^2(b, b^{\text{gt}})$ 表示预测框 b 和真实框 b^{gt} 中心点的欧氏距离的平方 c 是包围预测框和真实框的最小

闭包区域的对角线距离; α 表示权重参数; v 表示衡量长宽比相似度的参数。该方法并未考虑宽度和高度与置信度之间的真实差异。因此, 在某些情况下, 可能会影响模型对目标形状的优化。WIoU 分为 v1、v2、v3 三个版本, 本文所使用的是 v3 版本, 计算公式为:

$$L_{\text{WIoUv1}} = R_{\text{WIoU}} \cdot L_{\text{IoU}} \quad (17)$$

$$R_{\text{WIoU}} = \exp\left(\frac{(x - x_{\text{gt}})^2 + (y - y_{\text{gt}})^2}{(W_{\text{g}}^2 + H_{\text{g}}^2)}\right) \quad (18)$$

$$L_{\text{WIoUv3}} = r \cdot L_{\text{WIoUv1}} \quad (19)$$

$$r = \frac{\beta}{\delta \alpha^{\beta - \delta}} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{L_{\text{IoU}}^*}{L_{\text{IoU}}} \quad (21)$$

式中: α 、 δ 是控制聚焦机制的超参数; L_{IoU}^* 是当前 batch 计算得到的 IoU 损失值。

1.2.3 轻量化检测头

目标检测中, 检测头的设计对模型的性能和效率有着重要影响。YOLOv8 检测头采用复杂的三层结构, 导致计算开销的增加。为了解决这个问题, 本文提出了 Detect_Efficient, 一个专注于效率的检测头设计。

传统检测头通常包含三层及更多卷积, 用于增强特征表达能力。然而, 多余的卷积层会带来计算复杂度增加和参数冗余问题。通过观察发现, 深度卷积网络的性能收益在堆叠层数达一定程度后趋于饱和。因此, 本文采用双层卷积设计, 以最小的计算代价获取足够的感受野和特征提取能力。

在目标检测头中, 不同特征层的输入通道数不同, 因此本文提出使用固定通道策略, 所有卷积操作均保持输入和输出通道一致, 避免通道扩张或压缩所带来的额外开销。

2 实验与分析

2.1 数据集

在本文中, 使用了 VisDrone2019 进行实验验证。VisDrone2019 数据集由天津大学机器学习与数据挖掘实验室收集, 是最广泛使用的无人机航拍图像数据集之一。该数据集由多种无人机型号在多个城市中拍摄, 涵盖了多样的环境、目标密度、天气和光照条件。数据集包含 8 599 张图像, 其中训练集有 6 471 张, 验证集有 548 张, 测试集有 1 610 张。图像标注的目标类别包括 10 个类别: 行人、成人、自行车、汽车、面包车、卡车、三轮车、有篷三轮车、公交车和摩托车, 图像分辨率范围为 480 px × 360 px ~ 2 000 px × 1 500 px。

2.2 评价指标

本文采用 4 种评价指标来衡量模型性能，分别是精确率 P (precision)、召回率 R (recall)，以及平均精度 mAP50 和 mAP50-95。精确率 P 和召回率 R 公式为：

$$P = \frac{TP}{TP + FP}$$
 (22)

$$R = \frac{TP}{TP + FN}$$
 (23)

式中：TP 表示在被分类为正确类别的正样本；FP 表示被误认为正确的负样本；FN 表示被错误分类的正样本。

$$AP = \int_0^1 P(r)dr$$
 (24)

$$mAP = \frac{\sum_{i=1}^C AP_i}{C}$$
 (25)

式中：单个类别的 P - R 曲线下的面积即 AP (average precision)；mAP 是多个类别平均准度的综合度量； C 表示类别数。

2.3 实验环境以及参数设置

本实验平台为 Linux，基于深度学习框架 PyTorch-GPU 2.3.1。编译环境为：Python 为 3.8.19，CPU 为 16 vCPU Intel(R) Xeon(R) Platinum 8352V CPU @ 2.10 GHz，GPU 为 RTX 4090 (24 GB)。参数设置如表 1 所示。

表 1 训练参数

参数名称	设置
批量大小 (batchsize)	16
输入图片尺寸 (imagesize)	640
训练轮数 (epoch)	300
初始学习率 (lr0)	0.01
最终学习率 (lrf)	0.01
线程数 (works)	8
学习率动量 (momentum)	0.937
优化器 (optimizer)	SGD

2.4 消融实验

由表 2 实验结果可得，加入的 InnerWIoU、加入的注意力机制以及新增并且轻量化的检测头在 VisDrone2019 数据集上均表现出色。

表 2 总体消融实验

DAttention	P2	InnerWIoU	$P/\%$	$R/\%$	mAP50/%	mAP50-95/%	Para/ 10^6	GFLOPs
			44.6	33.5	33.5	19.5	3.0	8.1
✓			45.0	36.3	36.4	21.6	3.2	8.8
	✓		46.7	36.4	37.2	22.3	3.9	10.1
		✓	45.0	34.0	34.0	19.9	3.0	8.1
✓	✓	✓	47.8	35.8	36.8	22.6	3.9	10.3

相比于 YOLOv8n 的框架，精确率 P 和召回率 R 在指标上分别提升了 7.2% 和 6.9%，在 mAP50/% 和 mAP50-95/% 在指标上分别提升 9.8% 和 10.7%。意味着改进的 DAE-YOLO 模型在检测小目标方面具有更好的性能。

2.5 对比实验

为了进一步验证 DAE-YOLO 模型的检测性能，选用目前较为流行的优秀目标检测算法 DAE-YOLO，在 VisDrone2019 数据集上进行对比。

由表 3 实验结果可得，DAE-YOLO 在对比较为流行的目标检测算法 YOLOv8n、YOLOv9 和 YOLOv10n。精确率 P 、召回率 R 、mAP50 和 mAP50-95 指标都均有领先，对比专门用于检测小目标的 YOLOv8n-P2 和 TPH-YOLOv5 [12]，DAE-YOLO 在计算量 GFLOPs 明显小于该两个算法的情况下部分指标高于该两个算法。

表 3 基于 VisDrone 的实验对比

	$P/\%$	$R/\%$	mAP50/%	mAP50-95/%	Para/ 10^6	GFLOPs
YOLOv8n	44.6	33.5	33.5	19.5	3.0	8.1
YOLOv9t	46.5	33.3	34.4	20.2	1.9	7.6
YOLOv10n	43.6	34.0	34.0	19.7	2.2	6.5
YOLOv8n-p2	46.7	36.4	37.2	22.3	2.9	12.2
DAE-YOLOv8n	47.8	35.8	36.8	22.6	3.9	10.3
TPH-YOLOv5	48.3	39.0	39.0	22.3	41.5	160.1

2.6 可视化结果分析

为了展现本文改进算法在无人机视角下的检测效果，选取了夜晚和白天场景的可视化对比，如图 2、图 3 所示，在夜晚模糊的场景下 DAE-YOLO 对比 YOLOv8 检测到更多的摩托车，在白天密集场景 DAE-YOLO 对比 YOLOv8 检测到更多的行人，YOLOv8 在右下角将自行车检测为摩托车，而 DAE-YOLO 正确检测出自行车。



(a) YOLOv8



(b) DAE-YOLO

图 2 夜晚场景图



(a) YOLOv8



(b) DAE-YOLO

图3 白天场景图

3 结论

本文针对无人机视角下目标检测面临的背景复杂、目标小、多尺度等挑战,提出了基于 YOLOv8 改进的 DAE-YOLO 算法模型。实验结果表明,在 VisDrone2019 数据集上,相比原始 YOLOv8 模型,DAE-YOLO 在各项性能指标上均取得显著提升:精确率提升 7.2%,召回率提升 6.9%,mAP50 提升 9.8%,mAP50-95 提升 10.7%。同时,与其他先进的目标检测算法相比,DAE-YOLO 在计算量较小的情况下仍保持了较好的检测性能。在实际场景测试中,无论是夜间还是白天的复杂场景,DAE-YOLO 都展现出了优异的小目标检测能力。

参考文献:

- [1] 孙佳宇,徐民俊,张俊鹏,等.优化改进 YOLOv8 无人机视角下目标检测算法[J].计算机工程与应用,2025,61(1):109-120.
- [2] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2016:779-788.
- [3] ZHU X Z, SU W J, LU L W, et al. Deformable DETR: deformable transformers for end-to-end object detection[C/OL]//ICLR 2021.Washington DC: ICLR, 2021[2024-08-21].
<https://openreview.net/pdf?id=gZ9hCDWe6ke>.
- [4] LIN T Y, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2017:936-944.
- [5] WANG C Y, LIAO H Y M, WU Y H, et al. CSPNet: a new backbone that can enhance learning capability of CNN[C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Piscataway: IEEE, 2020: 1571-1581.
- [6] DAI J F, QI H Z, XIONG Y W, et al. Deformable convolutional networks[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE, 2017:764-773.
- [7] DOSOVITSKIY A, BEYER L, KOLESNIKOV A, et al. An image is worth 16x16 words: transformers for image recognition at scale[DB/OL].(2021-06-03)[2024-05-11].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>.
- [8] WANG W H, XIE E Z, LI X, et al. Pyramid vision transformer: a versatile backbone for dense prediction without convolutions[C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE, 2021:548-558.
- [9] LIU Z, LIN Y, CAO Y, et al. Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows[C]//Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. 2021: 10012-10022.
- [10] ZHANG H, XU C, ZHANG S J. Inner-IoU: more effective intersection over union loss with auxiliary bounding box[DB/OL]. (2023-11-14)[2024-08-10].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.02877>.
- [11] TONG Z, CHEN Y, XU Z, et al. Wise-IoU: bounding box regression loss with dynamic focusing mechanism[DB/OL]. (2023-04-08)[2024-08-13].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.10051>.
- [12] ZHU X K, ZHAO Q, WANG X, et al. TPH-YOLOv5: improved YOLOv5 based on transformer prediction head for object detection on drone-captured scenarios[DB/OL].(2021-08-26)[2024-06-01].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.11539>.

【作者简介】

谢明宏(1998—),男,贵州六盘水人,硕士研究生,研究方向:计算机应用技术。

(收稿日期:2024-12-18)

基于 YOLOv7-tiny 的轻量化森林火灾烟雾检测算法

黄星宇¹ 陈正雄¹

HUANG Xingyu CHEN Zhengxiong

摘要

烟雾是森林火灾早期阶段的主要特征和信号,其检测识别对于森林火灾预警防控具有重要意义。针对现有目标检测算法参数量、计算量较大且难以部署到计算资源受限的终端设备上的问题,文章自建森林火灾烟雾数据集并提出了一种基于改进 YOLOv7-tiny 的轻量化森林火灾烟雾检测算法。用非线性特性更佳的 SiLU 激活函数替换原模型中的 Leaky ReLU 激活函数;引入更轻量的分布偏移卷积 DSConv 改进 ELAN 模块,用更简洁的 SPPF 模块替换 SPPCSPC 模块,从而降低模型参数量与计算量;在骨干网络引入 SimAM 注意力机制抑制背景噪声和提高关键特征的提取能力。实验结果表明,改进后模型计算量和参数量分别下降了 37.1% 和 4.4%,而准确率、召回率、mAP、检测速度分别提高了 4.2%、0.5%、4.3%、43 帧/s。模型在检测精度、轻量化、实时性三方面相比于其他经典目标检测算法具有一定的优势,这为森林火灾实时检测提供了可行性方案。

关键词

烟雾检测; YOLOv7-tiny; 轻量化; SiLU; DSConv; 注意力机制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.003

0 引言

森林火灾作为一种常见的自然灾害,不仅严重破坏生态环境,还会威胁人民群众的生命财产安全,影响社会可持续发展。根据国家消防救援局官网初步统计数据,仅 2024 年上半年,全国共发生森林火灾 204 起。因此,高效的森林火灾监测方法对于预防森林火灾,降低火灾损失和保障人民群众生命财产安全具有重大意义。在传统的森林火灾监测方法中,卫星遥感监测和直升机巡查成本高且易受天气影响、传感器监测高成本且可靠性不足、瞭望台监测和人工巡查则需大量人力投入。

随着计算机算力及深度学习算法的发展,目标检测算法被广泛应用于森林火灾检测,通过高清摄像头等前端设备采集图像,后端系统识别火情,具有高精度、高自动化、实时性和低成本的优势。在森林火灾刚开始发生时只有微弱的火星,此时并不能被发现;进入初期阶段,树木的不充分燃烧会产生肉眼可见的烟雾,此时较容易扑灭;随着火灾的进一步发展进入盛火阶段,火势开始迅速蔓延出现成片火焰和烟雾,此时已难以扑灭。因此,烟雾作为森林火灾初期阶段的主要的特征和信号,对其进行迅速的检测至关重要。

例如, Pan 等人^[1]提出了一种基于改进 Faster R-CNN

的火灾烟雾检测方法,并引入了知识蒸馏技术来压缩 Faster R-CNN 模型结构,但检测速度仍然较差。杜立召等人^[2]引入通道注意力机制来改进 YOLOv3 的主干网络,并将基于烟雾颜色特征改进的 ViBe 算法输入到改进的网络中,提高了算法的检测效率和在复杂环境下的适应性,但检测精度还可以进一步提高。贾一鸣等人^[3]提出了一种基于多头注意力机制的森林火灾烟雾图像检测方法来解决森林火灾烟雾图像样本获取困难,分布不均的问题,并降低过拟合风险。

通过分析国内外森林火灾检测研究现状,总结以下几个难点需要解决:

(1) 森林火灾烟雾样本难以获取,现有数据集背景单一且图片质量较差,无专用于森林烟雾与火灾检测的标准数据集。

(2) 森林火灾烟雾形态多样,尺度变化较大,且容易受到树木、光照、云层等复杂背景的干扰,特征难以提取,从而导致检测精度较低,漏检误检等问题。

(3) 森林火灾检测要求实时性,大多数方法为追求高精度而导致网络参数变多计算量变大,无法部署到计算资源有限的嵌入式设备中进行实时检测。

因此,本文将自建森林火灾烟雾数据集,并提出一种基于改进 YOLOv7-tiny 的轻量化森林火灾烟雾检测算法,降低模型参数量和计算复杂度提高检测精度和速度,以满足实际应用需求。

1. 武汉轻工大学电气与电子工程学院 湖北武汉 430048

1 YOLOv7-tiny 算法概述

YOLOv7 由 Wang 等人^[4]于 2022 年提出,是单阶段目标检测算法(you only look once, YOLO)^[5]系列不断演进和优化的较新版本,具有出色的性能和运算速度。针对不同的应用场景和不同计算平台性能需求,设计过多个版本。其中,标准版 YOLOv7 面向普通 GPU,平衡了模型大小和模型性能;YOLOv7-X、YOLOv7-W6、YOLOv7-E6、YOLOv7-D6、YOLOv7-E6E 等版本面向云端 GPU,追求较高的性能;而 YOLOv7-tiny 则是针对边缘 GPU 设计的轻量级版本,极具时效性,因此适合森林火灾烟雾检测这一实时性高且计算资源有限的场景。

图 1 展示了 YOLOv7-tiny 的网络结构和主要模块的结构。包括输入端(Input)、骨干网络(Backbone)、颈部网络(Neck)、和头部网络(Head)。其中,输入端用于对输入的图片数据进行预处理从而加快训练速度并提高模型的泛化能力,包括 mosaic 数据增强技术、图片尺寸调整和像素归一化。

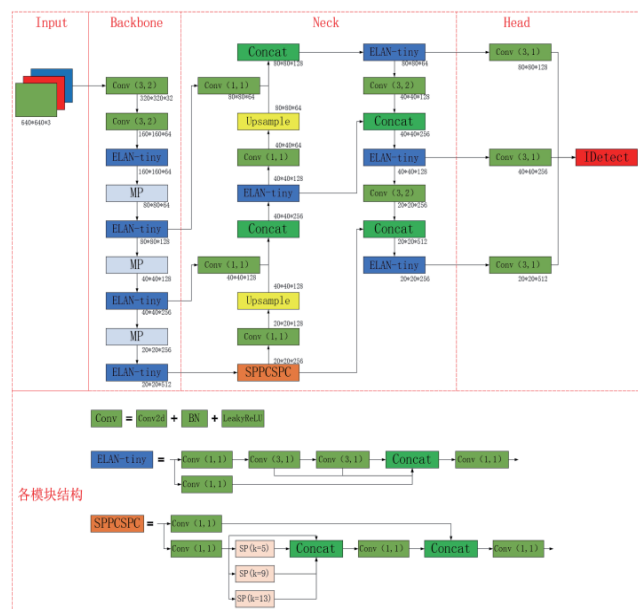


图 1 YOLOv7-tiny 网络及各模块结构

骨干网络则用于对图像进行特征提取,图中的 Conv(3,2)为卷积模块,包括大小为 3×3 、步长为 2 的卷积,批归一化(BN)层和激活函数;与一般卷积层不同,YOLOv7-tiny 模型中卷积层全部使用 Leaky ReLU 激活函数。相比于 YOLOv7 网络中的 E-ELAN 模块,YOLOv7-tiny 网络中的 ELAN-tiny 模块进行了轻量化设计,使用更简洁的结构和更少的卷积层以及 Leaky ReLU 激活函数来减少计算量。MP(MaxPool)是最大池化模块,步长为 2,用于对特征图进行下采样,池化后特征图的尺寸减为原来的一半。骨干网络通过各个模块逐步提取并融合了不同尺度的特征,并最终将 P3、P4、P5 三个不同尺度的特征层输出到颈部网络中。以

$640 \times 640 \times 3$ 的输入为例,则骨干网络输出特征层的大小分别为 $80 \times 80 \times 128$ 、 $40 \times 40 \times 256$ 、 $20 \times 20 \times 512$ 。

YOLOv7-tiny 的颈部网络保留了特征金字塔网络 FPN^[6]和路径聚合网络 PAN^[7],通过 SPPCSPC 模块、conv 模块、ELAN-tiny 模块、上采样模块等进行多层级的特征融合从而提高模型对复杂场景和目标的检测能力。在头部网络部分,使用普通卷积层 Conv 替代 YOLOv7 中的 REPCov 进行通道数调整并采用 IDetect 检测头,用于对大、中、小 3 个尺度的目标进行预测。

2 改进的轻量化 YOLOv7-tiny 算法

YOLOv7-tiny 算法通过简化网络结构提升了检测速度,适用于在终端设备上部署,但仍然存在一些不足。针对 YOLOv7-tiny 算法的不足之处以及森林火灾烟雾检测中的难点和具体问题,本文将进行如下改进:

(1) 激活函数。YOLOv7-tiny 中使用的 Leaky ReLU 激活函数缺少线性表达,在特征向下传输时效果不佳,梯度可能会在传播过程中迅速累积导致梯度值过大,影响检测精度^[8]。因此,将模型中所有 Leaky ReLU 激活函数替换为 SiLU 激活函数。

(2) 轻量化改进。模型中大量使用 ELAN 模块,不仅使网络结构复杂,参数量和计算量增大,还会在特征聚合时导致特征冗余。因此,本文引入更轻量的分布偏移卷积 DSCov^[9]来改进 ELAN 模块,称为 ELAN-DS;同时对颈部网络部分的 SPPCSPC 模块的结构进行改进。经过这些改进,在保持模型原有精度的基础上降低模型的计算量和参数量,使模型更加的轻量化。

(3) 注意力机制。森林火灾烟雾形态多样且尺度变化较大,背景较复杂;导致模型特征学习和表达能力较差,检测效果不佳。因此,在骨干网络部分引入无参注意力机制 SimAM^[10]提高模型的特征提取能力。

2.1 SiLU 激活函数

激活函数是神经网络中的关键组件,其数学表达式通常为一个非线性函数;用于接受前一层神经元的加权和作为输入并输出一个非线性变换后的值,再将这一输出值作为下一层神经元的输入,从而在神经元之间引入非线性关系以增强模型的表达能力和泛化性。Leakey ReLU 和 SiLU 激活函数用公式表示为:

$$\text{LeakeyReLU}(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ \alpha x, & x \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{SiLU}(x) = \frac{x}{(1 + e^{-x})} \quad (2)$$

两个激活函数的曲线对比图如图 2 所示。

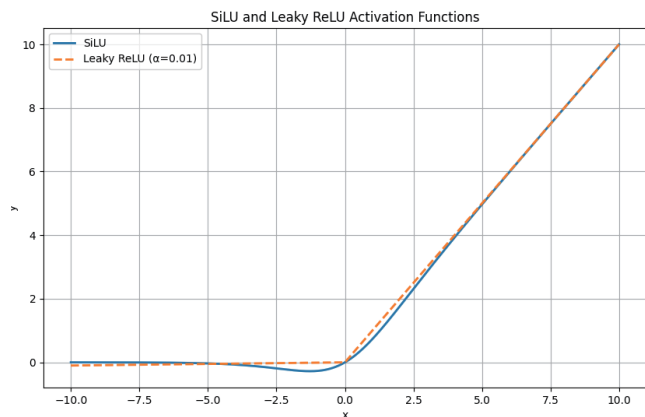
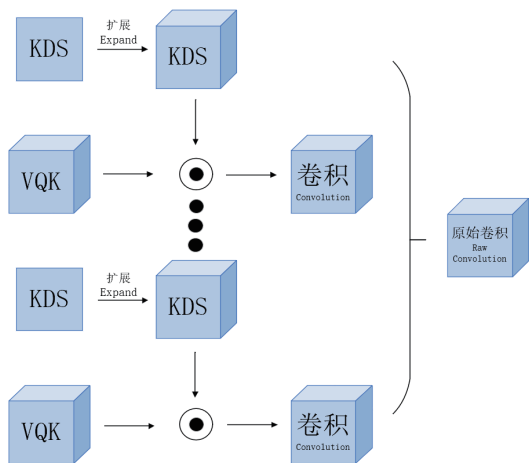


图2 SiLU 和 Leaky ReLU 激活函数曲线对比

Leaky ReLU 激活函数中 x 为输入值, α 称为负斜率, 通常为一个较小的值, 图2中 α 为 0.01; 因与 ReLU 激活函数相似的线性操作, 因此其计算复杂度相对较低。然而其缺少线性表达, 梯度可能会在传播过程中迅速累积导致梯度爆炸影响检测精度。从图2中可以看到, SiLU 是一个非常平滑的函数, 这种非线性特征提高了模型的表达能力和泛化能力; 而在零点附近 SiLU 具有较强可导性, 有助于梯度下降算法在优化过程中稳定更新参数, 提高训练过程的稳定性和收敛速度。基于此, 文章将 YOLOv7-tiny 中激活函数替换为 SiLU, 从消融实验结果可以验证, 有效解决了原有激活函数的不足。

2.2 DSConv 模块与轻量化改进

DSConv (depthwise separable convolution) 模块又称分布偏移卷积, 通过使用量化和分布偏移技术来模拟卷积层的行为动态调整卷积核的大小, 降低内存使用量和计算量, 提高模型的运行效率。DSConv 模块工作示意如图3所示, 将传统的卷积内核分解为可变量化内核 (VQK) 和分布偏移两部分。



注: 同心圆表示哈达玛算子

图3 DSConv 模块工作示意

VQK 是一个仅包含整数值的张量, 根据预训练网络中浮点权重的分布进行计算得出, 确定后不再变化, 同时通过将卷积核的权重从浮点数转换为整数, 可节省计算时间。分布偏移部分包括两个分布偏移张量, 分别是内核中的分布偏移 (KDS) 和通道中的分布偏移 (CDS)^[11], 两个分布偏移张量分别按卷积核和通道进行分布偏移, 使 DSConv 的输出和原始权重张量的值相匹配。分布偏移的目的是通过调整量化后的权重分布, 以尽可能模拟原始卷积核的分布, 从而减少量化过程中的精度损失。

ELAN 模块是 YOLOv7 及 YOLOv7-tiny 模型中被大量使用的一个关键模块, 在提高特征学习能力的同时, 也增加了网络复杂度。YOLOv7-tiny 模型中的 ELAN 模块进行了简化, 但网络结构中 3×3 的普通卷积在进行卷积操作时容易导致参数较大、内存消耗较大等问题。因此, 本文通过引入更轻量化的 DSConv 模块来替换 YOLOv7-tiny 中所有 ELAN-tiny 模块中的 3×3 卷积, 以提高计算效率降低模型计算量, 提升模型推理速度。改进后的 ELAN 模块命名为 ELAN-DS, 图4表示 ELAN-tiny 与 ELAN-DS 模块的结构对比。

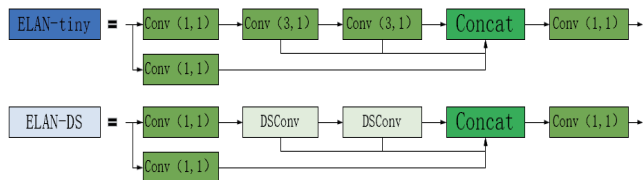


图4 ELAN-tiny 与 ELAN-DS 模块结构对比

SPPCSPC 模块结构分为两部分。其中一部分先进行 1×1 的卷积层, 再并行 3 个不同大小的最大池化层, 卷积核大小分别为 5、9、13。最后将 3 个最大池化层输出的特征图与 1×1 卷积层输出的特征图在通道维度进行拼接; 另一部分是一个 1×1 的卷积, 将两个部分进行合并后通过一个 1×1 卷积层输出。它将空间金字塔池化 (spatial pyramid pooling, SPP) 结构与 CSP-Net 相结合, 利用不同大小卷积核的池化层捕获多尺度的感受野信息, 通过融合不同尺度的特征来增强模型表达能力。但是多层卷积的碎片化操作带来了大量参数, 增加了计算量。因此, 使用更简洁高效的快速空间金字塔池化 SPPF 模块替换 YOLOv7-tiny 中的 SPPCSPC 模块, 将 3 个不同大小的并行池化层替换为 3 个依次进行的相同池化层 ($K=5$), 以进一步减少模型计算量和参数数量。SPPCSPC 模块与 SPPF 模块结构对比如图5所示。

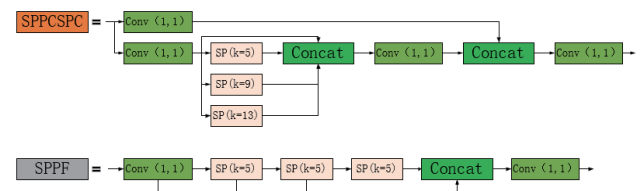


图5 SPPCSPC 模块与 SPPF 模块结构对比

2.3 SimAM 注意力机制

注意力机制的核心思想是模拟人类注意力行为，通过注意力权重使模型能够动态地聚焦于输入数据的关键特征而忽略不相关的冗余信息。在森林火灾烟雾检测的过程中，一些烟雾目标容易受到相似背景和噪声的干扰。因此，本文在骨干网络中引入相似性注意力机制 SimAM，通过引入空间信息和计算目标区域与周围区域之间的相似度赋予重要信息更高的权重，以此提高模型在复杂背景下的检测准确性和定位精度。

SimAM 模块主要的计算过程分别为：

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \tag{3}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \mu)^2 \tag{4}$$

$$e_i^* = \frac{4(\sigma^2 + \lambda)}{(t_i - \mu)^2 + 2\sigma + 2\lambda} \tag{5}$$

$$\tilde{X} = \text{sigmoid}\left(\frac{1}{E}\right) \odot X \tag{6}$$

式中： M 是通道上神经元的数量； μ 是输入特征在通道上的均值； σ^2 是方差； e_i^* 是单个神经元的能量函数，用于计算当前位置与整体均值的相似度，衡量当前位置的重要性； E 是所有能量函数值 e_i^* 构成的能量矩阵；sigmoid 函数用于映射能量矩阵，将其作为注意力权重； $\tilde{X}$ 是输出特征图。

3 实验结果与分析

3.1 实验数据集与实验环境

深度学习模型的训练依赖于数据集，森林火灾烟雾数据集的质量直接影响模型的检测精度和泛化能力，而现存的森林火灾数据集与实际应用场景差距较大。本文将 10 余个公开数据集和网络爬取到的森林火灾烟雾图片进行人工筛选，选择高质量的无人机航拍和摄像头视角的真实森林火灾图片，删除背景相似和重复度较高的图片，加入带有白云等易混淆场景的森林火灾图片来提高模型的区分识别能力，并使用标注工具 LabelImg 重新标注得到本文所使用的数据集。本文数据集共 2 202 张图片，训练集验证集测试集按 7:1:2 的比例划分，共有 2 512 个森林火灾烟雾标注。

在本文中，所有消融实验和对比实验均使用相同的实验环境，在同一森林火灾烟雾数据集上进行训练和验证比较；以保证实验结果的公平性和有效性。实验环境的配置和消融实验超参数的设置如表 1 所示。

表 1 实验环境配置和消融实验超参数设置

实验环境	参数配置	超参数项目	参数
操作系统	Ubuntu18.04	epochs	300
CUDA	11.1	batch-size	16
编程语言	Python3.8	初始学习率	0.01
深度学习框架	PyTorch1.9.0	优化器	SGD
GPU	NVIDIA RTX2080Ti(11 GB)	权重衰减系数	0.000 5
显存	11 GB	Image-size	640 px×640 px

3.2 评价指标

为综合且直观地评估网络改进后的效果，本文采用多个目标检测领域常用的评价指标，分别为准确率 P （precision）、召回率 R （recall）、平均准确率 AP（average precision）、平均准确率均值 mAP（mean average precision）、每秒检测帧数 FPS（frames per second）、模型参数量 Params、模型复杂度计算量 FLOPs。计算公式分别为：

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \tag{7}$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \tag{8}$$

$$AP = \int_0^1 P(R) \text{ d}R \tag{9}$$

$$\text{mAP} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m AP_i \tag{10}$$

$$\text{FPS} = \frac{Q_n}{T} \tag{11}$$

式中：TP（true positive）为真正例，即预测为正样本实际也是正样本；FP（false positive）为假正例，即预测为正样本实际为负样本；FN（false negative）为假负例，即预测为负样本实际为正样本；AP 为所有阈值下的准确率 - 召回率曲线的面积，用于表示单一类别识别的平均精度； m 为类别数量；mAP 为不同类别 AP 的平均值； Q_n 为检测图片的数量； T 为消耗的时间。

3.3 消融实验与对比实验

为验证各改进步骤的有效性、必要性、分析各改进方法对模型性能的影响，本文以 YOLOv7-tiny 模型为基准，在自制森林火灾烟雾数据集和相同的超参数设置下进行消融实验。同时，为了避免预训练权重对实验结果的影响，公平评估不同改进模块对模型性能的贡献，本文所有消融实验均不使用预训练权重。改进 A 表示将模型中所有 Leaky ReLU 激活函数替换为 SiLU 激活函数；改进 B 表示对模型的轻量化改进，即将 ELAN-tiny 模块改进为 ELAN-DS 模块和颈部网络 SPPCSPC 模块替换为 SPPF 模块；改进 C 表示在骨干网

络部分引入无参注意力机制 SimAM。消融实验结果如表 2 所示。

表 2 消融实验结果

模型	P/%	R/%	mAP /%	FLOPs /10 ⁹	参数量 /10 ⁶	FPS /(帧 ·s ⁻¹)
YOLOv7-tiny	84.9	83.7	85.5	13.2	6.015	213
YOLOv7-tiny+A	85.7	83.1	88.3	13.2	6.015	232
YOLOv7-tiny+A+B	85.8	83.9	87.9	8.3	5.751	263
YOLOv7-tiny+A+C	89.1	83.3	89.1	13.2	6.015	232
YOLOv7-tiny+A+B+C	89.1	84.2	89.8	8.3	5.751	256

由表 2 可以分析出:

(1) 相比于 YOLOv7-tiny 基准模型实验结果, 将模型中所有激活函数替换为 SiLU 以后, 模型计算量 FLOPs 和参数量未改变而模型性能有较好的提升; 准确率、mAP、检测速度分别提高了 0.8%、2.8%、19 帧/s。说明 SiLU 激活函数良好的非线性特性有利于提高模型的特征表达能力和检测精度, 改进 A 有效。

(2) 由实验 YOLOv7-tiny+A+B 结果分析, 模型在进行轻量化改进以后, 模型计算量和参数量相比于基准模型分别下降了约 37.1% 和 4.4%, 模型的检测精度相比于实验 YOLOv7-tiny+A 几乎未下降, 检测速度相比于基准模型提高了 50 帧/s。证明了改进 B, 即模型轻量化改进的有效性, 模型计算成本的降低也从一定程度上提高了模型推理速度。

(3) 由实验 YOLOv7-tiny+A+C 结果分析, 引入无参注意力机制 SimAM 并不会增加模型的复杂度和参数量, 相比于实验 YOLOv7-tiny+A 准确率、召回率、mAP 分别提高了 3.4%、0.2%、0.8%。说明 SimAM 模块可以较好的增强关键特征并抑制背景噪声从而提高模型的鲁棒性和检测精度。

(4) 由实验 YOLOv7-tiny+A+B+C 结果分析, 最终改进后的模型相比于基准模型计算量和参数量分别下降了约 37.1% 和 4.4%, 准确率、召回率、mAP、检测速度分别提高了 4.2%、0.5%、4.3%、43 帧/s。说明改进有效平衡了模型精度和轻量化, 为模型在计算资源受限的终端设备部署提供了可行性方案。

为进一步验证本文提出的改进 YOLOv7-tiny 算法在自制森林火灾烟雾数据集上的有效性, 以及本文算法的优越性, 选取经典的一阶段目标检测算法 SSD、YOLOv3-tiny、YOLOv5s 以及二阶段检测算法 Faster R-CNN 等在相同的数据集和实验环境下进行对比实验。不同模型对比实验结果如表 3 所示。由表 3 可知, 本文提出的改进 YOLOv7-tiny 算法

相比于其他经典的目标检测算法模型参数量和计算量最低, 在模型轻量化方面具有巨大的优势。同时, 模型改进后检测精度明显提高, 平均准确率均值 mAP 达到了 89.9%, 可以满足一定的实际应用需求。改进后的 YOLOv7-tiny 算法相比其他经典算法在检测响应速度上也有一定的优势。

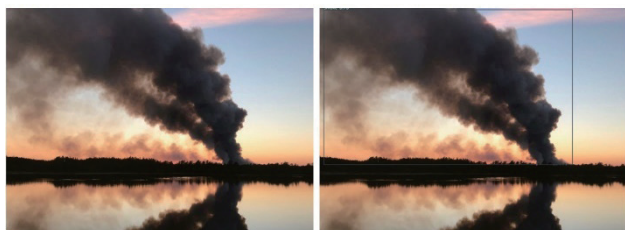
表 3 不同模型对比实验结果

算法	P/%	R/%	mAP/%	FLOPs /10 ⁹	参数量 /10 ⁶	FPS /(帧 ·s ⁻¹)
YOLOv3-tiny	86.5	83.5	87.2	13.0	8.670	303
SSD	86.4	70.1	83.1	187.0	82.200	155
Faster R-CNN	58.7	89.7	87.9	370.4	274.200	86
YOLOv5s	86.5	81.3	86.9	15.9	7.023	434
YOLOv7-tiny	84.9	83.7	85.5	13.2	6.015	213
YOLOv7	88.0	83.1	88.4	105.1	37.197	91
YOLOv7-X	87.9	83.9	89.0	188.9	70.815	59
改进 YOLOv7-tiny(our)	89.1	84.2	89.8	8.3	5.571	256

3.4 检测效果对比

如图 6 所示, 展示了改进前的 YOLOv7-tiny 原模型和改进后的模型在测试集图像上的检测效果。第一行图片中, 在对单个小目标进行检测时, 改进后的检测精度要高于改进前。第二行图片中小目标较为密集, 改进后模型能更多地检测出改进前漏检的目标。第三行图片中目标距离较远, 烟雾轮廓较为模糊且与背景颜色接近, 出现冗余检测框, 而改进后有所改善。第四行图片中烟雾目标尺度较大, 随着模型特征提取的过程中网络深度的增加, 细节信息在深层特征中丢失而无法检测出较大尺度的目标, 改进后此现象有所改善。





(a) YOLOv7-tiny 原模型 (b) YOLOv7-tiny 改进后

图6 模型改进前后检测效果对比

4 结论

针对国内外森林火灾检测研究现状存在的一些问题及 YOLOv7-tiny 模型的不足之处, 本文自建森林火灾烟雾数据集并提出了一种基于改进 YOLOv7-tiny 的轻量化森林火灾烟雾检测算法。将原模型中的 Leaky ReLU 激活函数替换为非线性特性更好的 SiLU 激活函数; 对模型进行轻量化改进, 引入 DSConv 模块来改进 ELAN 模块, 并使用更简洁的 SPPF 模块替换 SPPCSPC 模块, 这极大地降低了模型的参数量和计算量; 在骨干网络引入 SimAM 注意力机制来抑制背景噪声和提高关键特征的提取能力。实验结果表明, 改进后的模型计算量和参数量相比于基准模型分别下降了约 37.1% 和 4.4%, 而准确率、召回率、mAP、检测速度分别提高了 4.2%、0.5%、4.3%、43 帧/s。模型在检测精度、轻量化、实时性三方面相比于其他经典目标检测算法仍有一定的优势。

综上, 改进后的模型不仅提高了检测精度, 也提高了模型对于多尺度目标的检测能力, 改善了较小目标及较大目标漏检与检测框冗余的问题。这为模型在监控摄像头等计算资源受限的环境下部署和实时检测森林火灾提供了依据, 具有一定的实际应用价值。但实际应用场景更为复杂, 未来将进一步扩充森林火灾数据集, 加入“fire”标签及黑夜场景等背景更为多样的图片, 并将模型部署到终端设备, 在实际应用中反馈改进。

参考文献:

- [1] PAN J, OU X M, XU L. A collaborative region detection and grading framework for forest fire smoke using weakly supervised fine segmentation and lightweight Faster-RCNN[J]. Forests, 2021, 12(6):768.
- [2] 杜立召, 徐岩, 张为. 一种双网融合的分阶段烟雾检测算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47(4):141-148.
- [3] 贾一鸣, 张长春, 胡春鹤, 等. 基于少样本学习的森林火灾烟雾检测方法[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(9):137-146.
- [4] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLOv7:

trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[C/OL]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2022[2024-04-02].<https://ieeexplore.ieee.org/document/10204762>.

- [5] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2016: 779-788.
- [6] LIN T Y, DOLLAR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C/OL]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2017[2024-07-11]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8099589>.
- [7] LIU S, QI L, QIN H F, et al. Path aggregation network for instance segmentation[C/OL]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2018[2024-05-25]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8579011>.
- [8] 张光华, 李聪发, 李钢硬, 等. 基于改进 YOLOv7-tiny 的无人机航拍图像小目标检测算法 [J/OL]. 工程科学与技术, 1-14[2024-05-11]. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300593>.
- [9] NASCIMENTO M G D, FAWCETT R, PRISACARIU V. Dsconv: efficient convolution operator [C/OL]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE, 2019[2024-03-13].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9008114>.
- [10] YANG L X, ZHANG R Y, LI L D, et al. SimAM: a simple, parameter-free attention module for convolutional neural networks[C/OL]//Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning. New York: JMLR.org, 2021[2024-06-16].<https://proceedings.mlr.press/v139/yang21o.html>.
- [11] 刘进军, 李磊磊, 张昊宇, 等. 基于改进 YOLOv7 算法的建筑垃圾分类检测 [J]. 环境工程学报, 2024, 18(1):270-279.

【作者简介】

黄星宇 (1999—), 通信作者 (email: 2201914387@qq.com), 男, 湖北钟祥人, 硕士, 研究方向: 深度学习、目标检测。

陈正雄 (1999—), 男, 湖北孝昌人, 硕士, 研究方向: 深度学习、图像分类。

(收稿日期: 2024-11-12)

基于深度学习的学习者情感识别技术算法优化研究

曾光辉¹
ZENG Guanghui

摘要

学习者情感的表现具有模糊性和时空分离特性，情感状态之间的界限不清晰，如反映在频谱图像上时，不同时间的语音对应的频谱特征可能差异较大。传统识别技术算法往往基于较为固定的特征提取模式，难以准确地从复杂多变的频谱图像中提取关键局部特征，如频谱峰值、谷值等，导致加权和未加权准确率较低。为此，文章提出了一种学习者情感识别技术算法的优化方法。利用 K-均值聚类方法，根据语音信号的内在结构，将相似的语音片段进行聚类，生成学习者的语音频谱图像。采用传递函数对生成的语音频谱图像进行加重处理，以改善频谱图的平滑性和均衡性，增强频谱图像中的关键信息。将经过加重处理后的学习者语音频谱图像作为输入向量，输入到深度学习网络的卷积层。在卷积层中，针对加重处理的频谱图像进行特征提取，捕捉频谱峰值、谷值等关键的局部特征。在全连接层，将这些特征映射到情感类别空间，以实现情感分类。根据深度学习网络的输出，将识别样本划分到概率最高的情感类别中，完成学习者情感的识别。经实验证明，经过优化后的学习者情感识别算法，在加权和未加权准确率方面均实现了显著提升，显示出在学习者情感识别领域良好的应用潜力和前景。

关键词

深度学习；K-均值聚类方法；学习者；情感识别；算法优化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.004

0 引言

在数字化教育蓬勃发展的今天，理解学习者的情感状态对于提升教育质量具有至关重要的意义。学习者在学习过程中所经历的情感，如专注、困惑、沮丧或兴奋等，不仅影响着他们的学习体验，还对学习效果、知识吸收以及学习动力有着深远的影响。随着人工智能技术的不断进步，学习者情感识别技术应运而生，可以通过各种传感器和数据挖掘手段，自动识别学习者的情感状态。然而，现有的学习者情感识别技术算法仍面临诸多挑战。一方面，学习者情感表达的复杂性和多样性使得准确识别变得困难。不同的学习者可能在相同的学习情境下表现出不同的情感反应，而且情感的外在表现可能受到多种因素的干扰，如个体性格差异、文化背景以及学习环境等。另一方面，目前的算法在准确性、实时性和普适性等方面存在一定的局限性。在实际的教育场景中，需要能够快速且精准地识别学习者的情感，以实现及时的教学

干预，但现有的算法往往难以完全满足这些要求。因此，对学习者的情感识别技术算法进行优化研究，具有重要的理论意义和实践价值。

目前情感识别技术算法研究已经取得了一定的成果。例如，文献 [1] 提出了基于改进 K-均值聚类的识别技术，优化聚类中心初始化和距离度量来分类语音特征以识别情感。学习者情感模糊时，情感界限不清使语音特征分布复杂、模式难定。该技术聚类中心初始化难以确定代表不同情感的初始中心，可能错分语音特征，影响准确率。文献 [2] 提出了多模态数据融合的识别技术，整合多种数据并提取、融合特征以识别情感状态。在学习者情感具有模糊性和时空分离特性时，不同模态数据在不同时间点情感表达可能不一致，特征融合时会干扰关键局部特征提取，使情感识别准确性下降。文献 [3] 从语音生成的角度重新探讨了声门波与声道特征对语音情感识别的可能性，提出一种基于源-滤波器模型的声门波和声道特征语音情感识别方法。首先，利用 Liljencrants-Fant 和 Auto-Regressive eXogenous (ARX-LF) 模型从语音信号中分离出情感语音的声门波和声道特征；然后，将分离出的声门波和声道特征送入双向门控循环单元 (BiGRU) 进行情感识别。该技术在情感识别时，会受到使用环境的影响，延长识别耗时。

1. 广州工程技术职业学院 广东广州 510900

[基金项目] 2024 年度广东省普通高校特色创新类项目“基于深度学习的在线学习智能评价方法研究”(2024KTSCX318)；2024 年度广州市高等教育教学质量与教学改革工程产教融合实训基地项目“新一代信息技术产教融合实训基地”(2024CJRHJD008)

针对上述方法存在的一些不足,本文提出了一种基于深度学习的学习者情感识别技术算法的优化研究方法。

1 学习者语音频谱生成

语音信号具有时空分离特性,是复杂的非平稳信号,其情感信息多隐藏于频谱特征中。因此,需将语音信号从时域转换到频域来有效提取情感特征,通过生成学习者语音频谱能直观展现语音的频谱特性,像不同频率成分的能量分布、频谱峰值和谷值等,这些特征对情感识别分析极为关键,可反映发音者的情感状态(如高兴、悲伤、愤怒等)。传统情感识别技术用短时傅里叶变换(STFT)处理语音信号得到时频谱图,但包含较多冗余信息,加大了后续计算复杂度。为此,本文提出用K-均值聚类算法生成学习者语音频谱^[4]。先对学习者的音频文件进行切割和标签分配,然后通过K-均值聚类进行分组,生成学习者语音频谱图像,以此提高数据的处理效率和准确性。

在处理学习者音频信号以生成用于情感识别的关键频谱图像时,首先面临的是如何有效地从原始音频中提取出包含情感信息的关键片段。为此,将原始的学习者音频文件切割成多个均匀且相对独立的片段。经过对不同帧持续时间的细致观察与分析,最终优化选择了500 ms作为分割窗口大小,以此将单个学习者的话语转换成多个片段^[5]。同时,为了确保学习者情感信息的一致性和连贯性,本研究为每个话语的所有片段分配了一个统一的标签。这一过程可以形式化地表示为:

$$K_n = \int_{n=1}^S x_n \cdot d \quad (1)$$

式中: K_n 表示被分割的 n 个学习者语音片段; S 表示学习者语音; x_n 表示分割窗口; d 表示分割窗口时间长度,即500 ms。

接下来,利用K-均值聚类算法对这些相似的学习者语音片段进行分组^[6]。具体而言,随机选取 k 个观测值(即语音片段)作为初始的类簇中心点,然后计算每个采样点到这些簇中心点的距离,并将采样点分配给距离最近的簇。在本研究中,采用欧几里得距离矩阵来度量样本间的距离。但考虑到人脑的视觉感知部分是基于非线性处理系统进行语音处理和识别的,引入径向基函数(RBF)来计算两帧之间的差值,以优化学习者情感识别技术算法的性能^[7]。径向基函数的基本思想是通过核函数将向量从线性不可分的低维度空间映射到线性可分的高维度空间^[8]。在本文中,径向基函数的输出用于表示学习者音频中两帧之间的差值,其形式化表示为:

$$y = \sum_{n=1}^{K_n} \omega_n R \quad (2)$$

式中: y 表示输出的差值结果; R 表示权重系数; ω_n 表示径向基函数的一维高斯激活函数。使用径向基函数作为映射函数,可以确定学习者音频片段之间的相似度。当学习者语音信号的特定片段相关性较大时, y 的值会相对较小;如果语音片段不相关,则 y 的值会很大^[9]。根据径向基函数计算出的差值 y ,对学习者的音频片段进行聚类。从每个聚类中选出一个靠近聚类中心的片段作为关键片段,然后采用短时傅里叶变换算法(STFT)将选定的关键片段转化为谱图进行二维表示。这一过程可以形式化地表示为:

$$x = \psi(t) \left[e(c_y + b) \right]^t \quad (3)$$

式中: x 表示关键音频的频谱图; $\psi(t)$ 表示窗函数; e 表示傅里叶变换的复指数; c_y 表示算法输入的学习者语音关键片段; b 表示信号在时间的复数幅度; t 表示信号在频率的复数幅度^[10]。通过以上步骤,成功生成了学习者语音的关键频谱图像,这些图像将用于后续的情感识别分析。

2 学习者语音频谱图像加重处理

在语音信号处理中,特别是针对情感识别任务,高频与低频区域的能量分布差异以及能量波动模式是重要的分析对象。然而,由于个体发声时的口腔辐射特性,高频区域能量衰减较大,低频区域衰减较温和,这种能量分布不均衡现象对语音分析和情感识别构成了挑战。为了缓解这一问题,本文引入了加重技术来调整频谱分布。这一技术的核心目的是通过增强高频区域的能量,以减小高频与低频区域之间的能量差异,改善频谱图的平滑性,使得频谱图像更加均衡,有利于后续的情感特征提取和识别分析。这一过程的实现依赖于传递函数,其公式表示为:

$$x^* = F - ux^{-1} \quad (4)$$

式中: x^* 表示加重处理后的频谱图像; F 表示传递函数; u 表示学习者语音频谱图像低频与高频差值。利用以上公式,可以对生成的频谱图像进行加重处理。通过设计的传递函数 F ,确保高频区域的能量得到显著增强,而低频区域的能量则保持相对稳定,从而改善频谱图的平滑性和均衡性,为后续的情感特征提取和识别分析打下坚实的基础。

3 基于深度学习的情感识别

频谱图中的频谱峰值、谷值等局部特征是反映学习者情感状态的重要线索。深度学习网络中的卷积层能够对加重处理后的频谱图像进行多层卷积操作,通过预设的卷积

核进行点积运算精确地捕捉这些局部特征。这种自动学习特征的方式相较于传统方法更加高效和准确，能够挖掘出频谱图中隐藏的与情感相关的复杂模式。接着，通过池化操作进一步筛选和压缩这些特征，保留最具代表性的信息，同时去除冗余信息和噪声。以提取到的重要情感特征为依据，实现对学习者情感的识别。在这一过程中，深度学习网络的参数通过训练过程来学习获取，目的是最小化损失函数以提高情感分类的准确性，进而完成学习者情感识别技术算法的优化。

深度学习网络由卷积层、池化层和输出层组成，在优化后的学习者情感识别技术算法中，将加重处理后的学习者语音频谱图像作为输入向量，输入到深度学习网络的卷积层中。在卷积层对输入的学习者语音频谱图像进行局部特征的提取^[11]。具体来说，卷积层通过预设的卷积核，在学习者语音频谱图像上滑动并进行点积运算，从而精确地捕捉到如频谱峰值、谷值等关键的局部特征。这些特征反映了学习者语音中的情感状态，是情感识别的重要线索。这一过程可以用公式表示：

$$v(t) = \sum_{k=1}^L f x^*(T-k) \quad (5)$$

式中： $v(t)$ 表示通过卷积层提取的语音频谱图像的局部特征； L 表示卷积层卷积核长度； k 小时输入学习者语音频谱图像维度； f 表示激活函数； T 表示卷积过程的序列索引。

通过卷积操作，深度学习卷积层中的每个卷积核都学习到不同的频谱图像局部特征，这些特征随后被作为池化层的输入。在池化层中，对提取到的学习者语音频谱图像局部特征进行降维处理，以减少计算量并提取最具代表性的特征。通过最大池化操作，保留每个池化区域内的关键信息，同时去除冗余和噪声。这一过程用公式表示：

$$p(t) = \max[v(t) + s] \quad (6)$$

式中： $p(t)$ 表示池化层降维处理后的频谱图像的关键特征； s 表示池化核的索引。经过卷积层和池化层的处理后，学习者语音频谱图像的特征被有效地提取和降维。接下来，全连接层将这些特征映射到情感类别空间，实现情感分类。全连接层通过计算每个情感类别的概率，并应用激活函数进行归一化处理，从而得到最终的情感分类结果。这一过程可以用公式表示：

$$O_j = f[Wp(t) + b] \quad (7)$$

式中： O_j 表示提取的学习者语言频谱图像特征属于第 j 类情感的概率； W 表示深度学习网络全连接层与池化层的连接权重系数； b 表示偏置项。

全连接层的参数（权重和偏置）是通过深度学习网络的训练过程学习得到的。在训练过程中，深度学习网络根据标注的情感标签，不断调整参数，以最小化损失函数（如交叉熵损失），从而提高学习者情感分类的准确性。最终，将识别样本划分到概率最高的情感类别中，以此实现学习者情感识别。

4 实验论证

4.1 实验数据及环境

为了验证优化后的基于深度学习的学习者情感识别技术算法的可靠性与可行性，开展了一项对比实验，将本文算法与现行的两种识别算法进行对比：文献[1]中提出的基于改进K-均值聚类的识别技术算法，以及文献[2]中提出的多模态数据融合的识别技术算法。实验数据来源于某学校学习者语音数据库，该数据集中包含了200名学习者的语音序列，总大小为2.62 GB。

实验环境为：操作系统为Windows KM1.6，处理器为i8-UHNG62，内存容量为32 GB。

4.2 实验流程

在实验过程中，首先利用本文提出的算法对数据集中的200名学习者进行情感识别。为了评估算法的性能，将数据集中的40%数据作为深度学习网络的训练样本，剩余60%作为测试样本。深度学习网络的参数设置为：学习率设置为0.01；输入图像的维度设置为2维，大小调整为512 px × 512 px；全连接层与池化层之间的连接权重初始化为2.62；偏置项设置为0.63。

在预处理阶段，利用式（1）（2）（3）将学习者语音信号转化为频谱图像，并利用式（4）对学习者的频谱图像进行加重处理以改善频谱图的平滑性和均衡性，增强特征。然后，利用式（5）（6）（7）对测试样本进行情感识别。为了全面评估算法的性能，采用了加权准确率和未加权准确率两个指标。加权准确率通过对每个类别的样本量赋予相应的权重来调整准确率，减少了样本数量不平衡对整体算法评估结果的干扰。而未加权准确率则能够平衡算法的整体性能，在计算准确率时，无论某个类别的样本数量多少，其在最终评估结果中的贡献都是相同的。加权准确率和未加权准确率越高，说明算法识别精度越高。

4.3 实验结果与讨论

根据实验中记录的3种算法对学习者的情感识别结果，绘制了图1和图2，分别展示了3种算法的加权准确率和未加权准确率结果。

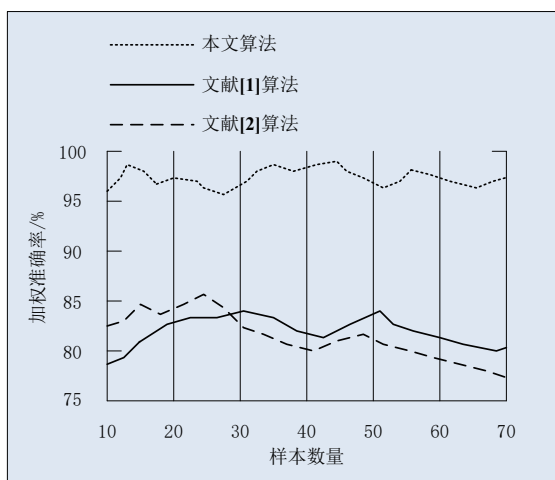


图1 学习者情感识别技术算法加权准确率

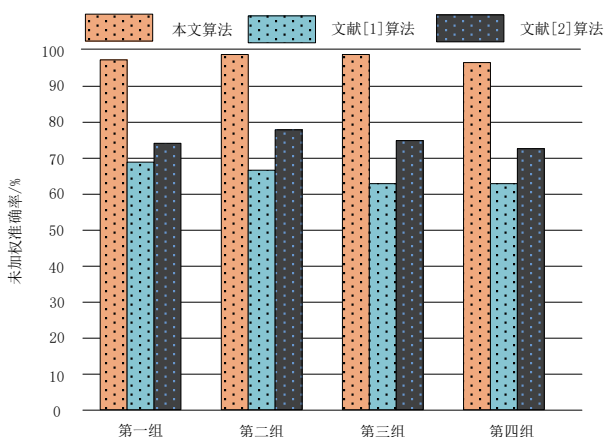


图2 学习者情感识别技术算法未加权准确率

从图1、图2可以看出，在学习者情感识别的场景中，本文提出的优化算法在加权和未加权准确率上均实现了显著的提升。两个准确率指标均稳定地保持在90%以上，这一表现远优于其他算法。因此，实验结果有力证明了本文提出的优化算法在学习者情感识别方面更具优势，所提出的优化方案不仅可行，而且可靠。进一步剖析本文方法的优势能够发现，运用深度学习网络进行多层卷积和池化操作，可高效捕捉频谱图像中的局部特征，例如频谱峰值、谷值等，这些特征对情感识别极为关键。此外，深度学习网络还能自动学习并优化参数，以实现损失函数最小化，进而提升情感分类的准确性，使得算法能够更准确地识别学习者的情感状态。

5 结语

本文提出一种基于深度学习的学习者情感识别技术算法的优化方法，通过集成K-均值聚类与深度学习模型，增强了从复杂频谱图像中提取关键情感特征的能力，显著提高了情感识别的精确度和稳定性。此优化不仅为在线教育领域带来了更加智能、个性化的学习辅助工具，还通过理论分析与

实验验证，深化了对情感识别技术挑战与未来发展趋势的理解。展望未来，随着人工智能技术的持续革新，学习者情感识别技术将迎来更为广阔的发展机遇。进一步深化算法研究，致力于开发更加高效、精确的情感识别解决方案，并强化跨学科合作，推动该技术在在线教育、智能辅导等多个领域的广泛应用，为构建智能化的教育生态系统贡献力量。

参考文献:

- [1] 李巧君, 郭彧. 基于改进K均值聚类的语音情感识别深度学习学习方法[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(9): 224-229.
- [2] 司俊勇, 付永华. 多模态数据融合的在线学习情感计算研究[J]. 图书与情报, 2024(3): 69-80.
- [3] 李永伟, 陶建华, 李凯. 基于声门波和声道特征的语音情感识别[J]. 信号处理, 2023, 39(4): 632-638.
- [4] 张石清, 陈晨, 赵小明. 采用双阶段多示例学习网络的语音情感识别[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(12): 3300-3310.
- [5] 王思丽, 杨恒, 刘巍. 基于混合机器学习的网络舆论情感识别方法研究[J]. 情报工程, 2024, 10(2): 11-26.
- [6] 黄佩瑶, 程慧慧, 唐小煜. 具有互补特征学习框架和注意力特征融合模块的语音情感识别模型[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2024, 41(1): 52-58.
- [7] 李磊, 朱永同, 杨琦, 等. 基于多任务学习与注意力机制的多层次音频特征情感识别研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(1): 85-94.
- [8] 李丹丹, 陈俊. 基于集成算法的在线课程评论情感识别与主题挖掘研究[J]. 北京印刷学院学报, 2023, 31(12): 59-68.
- [9] 苗博瑞, 许云峰, 赵少杰, 等. C-BGA: 结合对比学习的多模态语音情感识别网络[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(16): 168-176.
- [10] 宫岐伟, 禹可, 吴晓非. 基于ERC Roberta的提示学习实现对话情感识别[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(5): 106-111.
- [11] 杨卓东, 金卫, 生慧, 等. 基于深度学习的脑电信号情感识别研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2023, 42(3): 315-321.

【作者简介】

曾光辉(1972—), 男, 湖南长沙人, 本科, 副教授, 研究方向: 智能信息处理。

(收稿日期: 2024-11-08)

大模型函数调用机制下的计算优化

肖明魁¹ 张亮¹

XIAO Mingkui ZHANG Liang

摘要

随着大语言模型技术的快速发展,其在众多领域展现出强大的能力,但也暴露出诸多不容忽视的局限性,尤其是在数学运算方面。因此,文章针对大语言模型在处理复杂数学运算时出现的不准确性问题进行了深入探讨,并提出了一种基于 Function Calling 的解决方案,以期改善模型在数学运算任务中的表现。首先介绍了大语言模型在数学运算中存在的问题,对超长数字的处理能力有限、缺乏精确的计算逻辑等。这些问题极大限制了大语言模型的应用范围,特别是在需要高精度计算的场景下。为更好地解决上述问题,文章重点研究了函数调用 Function Calling 机制,包括如何定义外部函数库、如何配置模型参数以启用 Function Calling 功能,以及如何构建高效的交互流程以确保模型能够准确地识别用户意图并调用正确的函数。通过对实验结果的分析,证明 Function Calling 机制能有效提升大语言模型在数学运算方面的准确性和实用性,其成果为进一步拓展大语言模型的应用场景提供了新的方向和技术支撑。

关键词

机器学习;大模型;函数调用;意图识别

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.005

0 引言

近年来,随着深度学习技术的进步和大规模计算资源的普及,大语言模型(large language models, LLMs)成为自然语言处理领域的一项重要突破。这些模型通常基于 Transformer 架构,通过在海量文本数据上进行无监督预训练,能够掌握丰富的语言知识和模式^[1-2]。自 2018 年 Google 发布 BERT 模型以来,一系列更为先进的模型相继问世,如 GPT-4、GLM-4 等,这些模型的参数规模达到了数十亿乃至千亿级别,展现了前所未有的语言理解和生成能力。

尽管大语言模型在许多方面表现出色,但同样也面临着一些固有的局限性。这些局限性不仅限制了模型的实用性,也阻碍了其进一步发展。其中,最突出的挑战之一是在数学运算方面的不足。尤其在进行复杂数学运算时^[3]。例如,对于超长数字的乘法运算,模型往往会计算出错误的结果。原因是模型内部计算机制并不适合进行精确的数学运算,且模型训练的数据集中包含较少这类特定的数学计算任务。因此,模型倾向于根据上下文推测答案而非进行实际的数学计算。

这种局限性限制了大语言模型在需要高精度计算的场景

下的应用,例如财务分析、科学计算等。为克服这一局限,诸多研究者正在探索不同的解决方案。

1 国内外近年主要技术综述

随着人工智能技术的飞速发展,大语言模型在自然语言处理领域取得了显著成果。LLMs 不仅在文本生成、机器翻译、问答系统等方面表现出色,而且在数值计算领域也展现出巨大的潜力。

Brown 等人^[4]指出,通过提示工程, GPT-3 在简单的数学运算(如加减乘除)中表现出色,尤其是在少样本学习的情况下。例如,在两位数加法和减法中可以达到 100% 的准确率,在三位数运算中也表现出较高准确率。在更复杂的数学运算(如多位数乘法和除法)中准确率较低,但仍然能够进行一些推理和计算。由此证明, GPT-3 在理解数学概念和进行高级数学推理方面存在局限性。

Yuan 等人^[5]评估了多个 LLMs 在算术表达式计算任务上的性能,并提出了 MATH 数据集,用于测试模型在数值计算上的能力。研究认为,大语言模型的算术能力受多种因素的影响,包括分词器、预训练语料库、指令微调、模型参数数量、提示语、上下文学习、思维链和模型架构等,通过优化这些因素,可以提升大语言模型在算术任务上的表现。结果表明, LLMs 在算术任务上表现出色,但仍然存在精度问题和对于某些类型的问题解决能力有限。

1. 江苏经贸职业技术学院信管处 江苏南京 210000

[基金项目] 江苏经贸职业技术学院校级重点课题(JSJMH24005)

Fu 等人^[6]介绍了 KwaiYiiMath 模型, 该模型通过监督微调和基于人类反馈的强化学习来提高数学推理能力。KwaiYiiMath 通过多种方法来提高计算精确度, 包括使用高质量的训练数据、有效的微调方法、数据质量控制、模型设计和提示设计。这些方法共同作用, 使得 KwaiYiiMath 能够在数学推理和计算方面表现出色, 并给出准确的答案。通过实验分析模型在多个数学任务上基准测试结果, 证明了 LLMs 通过适当的训练可以显著提高数值计算精度。

Yang 等人^[7]评估了大型语言模型 (LLM) 在数学推理方面的能力, 并设计了一个名为 MathGLM 的模型来提升 LLM 在数学问题解决方面的表现。MathGLM 将复杂的数学表达式分解成一系列简单的步骤, 逐步计算并得出答案。这种方法与人类解决数学问题的过程相似, 能够有效提高准确性。此外, MathGLM 能够逐步学习更复杂的算术表达式, 使其可以处理更大范围的数字和更复杂的运算。MathGLM 还通过在大量算术数据集上进行预训练, 并针对特定类型的数学问题进行微调, 以提升其解决问题的能力。

Zhao 等人^[8]提出了一种名为 JiuZhang 2.0 的统一中文预训练语言模型, 旨在解决多任务数学问题。研究团队构建了一个混合专家 (MoE) 架构来建模数学文本, 捕捉任务间的通用数学知识。MoE 架构将数学知识分解到不同的专家网络中, 每个专家网络专注于特定类型的数学知识 (例如代数、几何、三角函数等)。当模型遇到新的数学问题时, 会根据问题的类型和内容, 将问题分解成多个子问题, 并分别交给不同的专家网络进行处理。这种知识分解和复用机制有助于提高模型对复杂数学问题的理解和求解精度。

以上研究涵盖了当前大模型领域多项重要技术, 涉及提示工程、思考链、预训练、监督微调以及混合模型等, 充分展示了大语言模型在数学问题解决方面的巨大潜力, 同时也反映了当前模型在精确计算方面的局限性。首先, 模型的计算能力有限, 尤其是在处理复杂的数学问题时, 如多步计算、符号操作和精确的数值计算; 其次, 模型的训练数据集通常缺乏高质量的数学问题样本, 导致模型在实际应用中的表现不如预期; 最后, 大模型在处理复杂计算任务时, 需要消耗大量算力资源, 大幅增加计算成本。

因此, 本文提出一种新型方案, 通过大模型的函数调用 (Function Calling) 机制, 在处理特定任务时调用外部函数库, 使其能够处理更复杂的计算任务, 从而弥补模型在计算能力上的不足。

2 Function Calling 机制

函数调用 (Function Calling) 是一种使大型语言模型能够调用外部函数或服务的功能。通过这种方式, 模型不仅能够根据自身的知识库生成响应, 还能通过调用特定的函数或 API 来执行特定的任务或获取最新的信息。Function Calling 允许用户以 JSON 格式向模型描述函数, 模型则可以根据上下文和问题内容决定是否调用这些函数。

2.1 Function Calling 的发展历程

Function Calling 的概念最初是由 OpenAI 在其 API 更新中引入, 这使得 GPT 等模型能够与外部世界交互。随着时间的推移, 各公司和研究机构也开始采用类似的技术来增强他们的语言模型。在 Function Calling 出现之前, 语言模型主要依赖于其训练数据集来生成响应, 这意味着它们无法访问实时信息或执行特定的操作^[9-10]。随着技术的发展, Function Calling 成为了扩展模型功能的关键。OpenAI 在 2023 年 6 月 13 日的更新中正式推出了这项功能, 而智谱 AI 也在其 GLM-4 模型中实现了类似的功能。Function Calling 机制为大语言模型提供了与外部世界互动的能力, 从而使模型能够执行更多复杂的任务, 并为用户提供更有价值的服务^[11-12]。通过这种方式, 模型不仅可以提供信息, 还可以作为工具帮助用户执行特定的操作, 从而提高了模型的实际应用价值。

2.2 Function Calling 技术实现

Function Calling 的基础框架涉及到几个关键组成部分: 定义外部函数库、函数定义的 JSON Schema 格式、配置模型参数以启用 Function Calling 功能以及 Function Calling 的工作流程。外部函数库可以包括简单的自定义函数, 也可以是封装了外部 API 的服务。例如, 可以是调用 Google 搜索 API 的函数, 或者是获取天气信息的函数^[13]。为使模型能够理解和调用这些函数, 需要以 JSON Schema 格式定义每个函数。JSON Schema 中需要包含函数的名称、输入参数和输出格式等信息。这些信息可以帮助模型了解函数的功能及如何使用^[14-15]。函数参数的定义应当清晰明了, 遵循一致的命名规范, 避免使用相似或易混淆的名称。此外, 函数描述应当尽可能详尽, 以便模型更好地理解函数的功能。

Function Calling 工作流程如图 1 所示, 图中展示了 Function Calling 功能如何在模型中被触发和执行, 以及如何与外部函数库和模型配置交互, 这种机制允许模型利用外部数据或逻辑来增强其生成的文本。在整个流程中, 模型充当中介的“角色”, 不仅需要理解用户的输入, 还需要知道何时以及如何调用外部函数, 并将函数的输出转换为用户可以理解的形式。

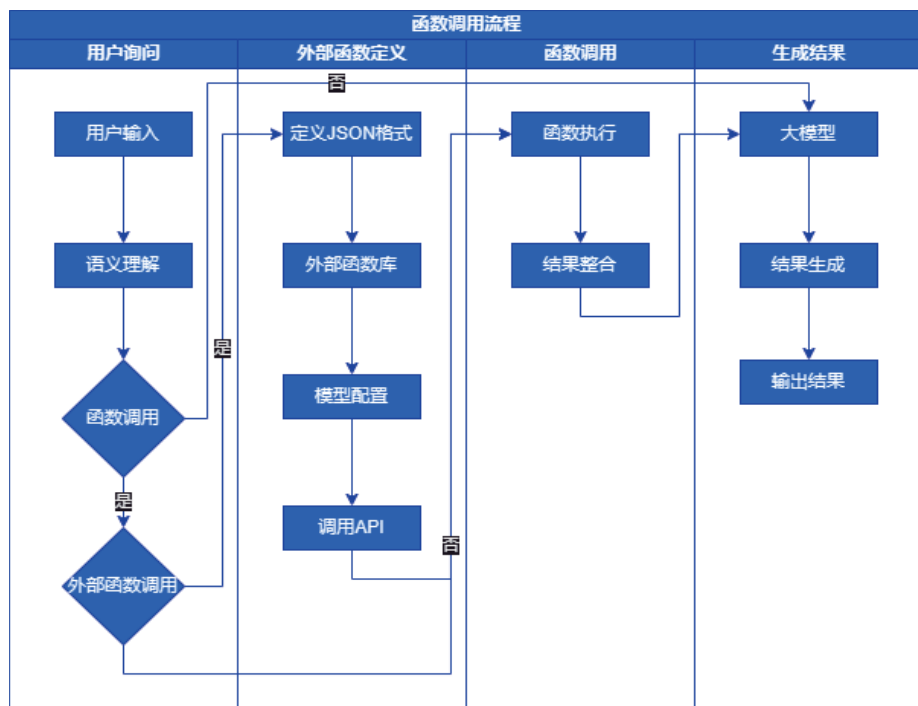


图 1 Function Calling 工作流程

2.3 Function Calling 结构

实现 function calling 功能，需要使用大模型的 `client.chat.completions.create()` 函数，该函数包含两个重新参数：`tools` 参数和 `tool_choice` 参数。

`tools` 参数是一个列表，其中每个元素是一个字典，描述了一个可用的外部函数或工具。每个字典通常包含以下键值对：

name: 函数的名称。

description: 函数的描述。

parameters: 函数所需的参数描述，应遵循 JSON Schema 格式。

`tool_choice` 参数决定了模型是否以及如何调用工具。它有两个主要的取值：

auto: 模型将根据上下文自动选择合适的工具进行调用。

指定工具名称: 模型将直接调用指定名称的工具，而不是自动选择。

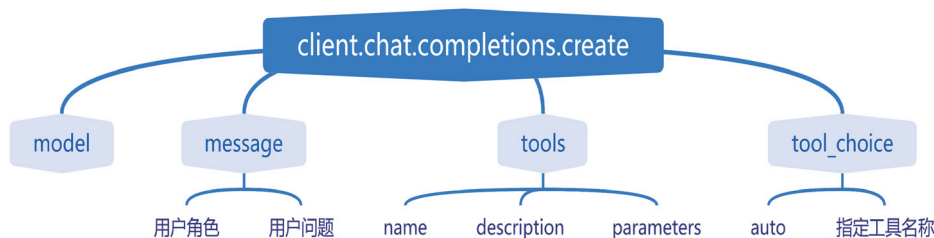


图 2 `client.chat.completions.create` 函数结构

函数结构如图 2 所示。

3 实验与案例分析

为验证 Function Calling 机制对提升大语言模型在处理复杂数学运算任务上的效果，本文选取大语言模型 GLM-4 (general language model-4) 作为研究对象。GLM-4 是一款具备强大语言理解和生成能力的语言模型，但如同其他大型语言模型一样，在处理特定类型的数学运算时可能会遇到挑战。本实验旨在通过引入 Function Calling 机制来解决这些问题，选择涉及复杂数学运算的任务作为测试用例，尤其是传统大语言模型难以直接处理的任务，例如大数值计算。这些任务能够有效地评估 Function Calling 机制的有效性

及其对模型性能的影响。

3.1 实验设计

本实验中，代码将调用两种不同性能的大模型 ("glm-4-flash" 和 "glm-4-plus")，随机生成两个整数，分别进行加法、减法、乘法、除法、平方、开方及绝对值运算，连续计算 3 次并输出结果。实验采用对比研究方法，分别用以验证未启用 Function Calling 和启用 Function Calling 的两种不同情况的结果。

首先，在不使用 Function Calling 的情况下，实验通过直接调用大模型方法计算两个整数的运算结果，小数点保留两位，部分代码如下所示：

```

# 随机生成两个十位整数
num1 = random.randint(1000, 9999)
num2 = random.randint(1000, 9999)

# 构建请求的消息
operations = ["乘以", "除以", "加", "减", "平方", "平方根", "绝对值"]
messages = []

# 添加计算 num1 的二次幂的消息
messages.append({"role": "user",
"content": f"请帮我计算一下 {num1} 的二次幂是多少"})

```

```
# 添加其他操作的消息
for operation in operations:
    if operation in ["平方根", "绝对值"]:
        messages.append({"role": "user", "content": f"请帮我
计算一下 {num1} 的 {operation} 是多少? "})
    else:
        messages.append({"role": "user", "content": f"请帮我
计算一下 {num1} {operation} {num2} 等于多少? "})

# 调用模型并打印结果
models = ["glm-4-flash", "glm-4-plus"]
count = 0
for model in models:
    for message in messages:
        for _ in range(3): # 假设想要重复请求 3 次
            response = client.chat.completions.create(
                model=model,
                messages=[message],
                # 注意这里需要将 message 作为列表传入
            )
            print(response.choices[0].message.content)
```

输出结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 调用“glm-4-flash”大模型的计算结果

	8 722×1 273	8 722 / 1 273	8 722 +1 273	8 722 -1 273
第一次 计算结果	11 090 826	6.88	9 995	7 449
第二次 计算结果	11 069 066	6.886	9 995	7 449
第三次 计算结果	11 006 426	6.88	9 995	7 449
正确结果	11 103 106	6.85	9 995	7 449
准确率	0%	0%	100%	100%
	8 722 ²	Sqrt(8 722)	Abs(8 722)	
第一次 计算结果	75 845 024	93.03	8 722	
第二次 计算结果	76 101 884	93.03	8 722	
第三次 计算结果	7 634 092 504	93.24	8 722	
正确结果	76 073 284	93.39	8 722	
准确率	0%	0%	100%	

表 2 调用“glm-4-plus”大模型的计算结果

	8 722×1 273	8 722 / 1 273	8 722 +1 273	8 722 -1 273
第一次 计算结果	11 070 506	6.845	9 995	7 449
第二次 计算结果	11 064 706	6.849	9 995	7 449
第三次 计算结果	11 047 806	6.845	9 995	7 449
正确结果	11 103 106	6.85	9 995	7 449
准确率	0%	100%	100%	100%
	8 722 ²	Sqrt(8 722)	Abs(8 722)	
第一次 计算结果	75 946 184	93.44	8 722	
第二次 计算结果	75 967 284	93.42	8 722	
第三次 计算结果	75 941 584	93.42	8 722	
正确结果	76 073 284	93.39	8 722	
准确率	0%	0%	100%	

以上结果表明，实验在调用两种不同性能的大模型，直接进行两位整数计算时，只有在处理简单的计算，如加、减和绝对值运算，才能做到 100% 的准确率，而面对更复杂运算，如乘、除、平方和开方运算，计算精确度明显差强人意，即使更换大模型，提升效果依然有限。

接下来，实验将根据前文综述中所提到的提示工程和思考链等模型优化方法，进一步完善本实验，观察实际效果。

尽管大模型根据预先定义的提示工程和思考链方法，对复杂计算分步处理并汇总结果，然而受限于模型本身性能，计算精度无法得到保证，甚至有可能在推理过程出现思考中断现象，从而无法生成答案。实验最终结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 调用“glm-4-flash”大模型的推理结果

	8 722×1 273	8 722 / 1 273	8 722 +1 273	8722 -1273
第一次计 算结果	11 165 926	无	9 795	无
第二次计 算结果	无	无	无	无
第三次计 算结果	无	无	无	7589
正确结果	11 103 106	6.85	9 995	7449
准确率	0%	0%	0%	0%

表 3(续)

	$8\,722^2$	Sqrt(8 722)	Abs(8 722)	
第一次计算结果	无	无	8 722	
第二次计算结果	无	无	8 722	
第三次计算结果	无	无	8 722	
正确结果	76 073 284	93.39	8 722	
准确率	0%	0%	100%	

表 4 调用“glm-4-plus”大模型的推理结果

	$8\,722 \times 1273$	$8\,722 / 1\,273$	$8\,722 + 1\,273$	$8\,722 - 1\,273$
第一次计算结果	11 042 606	6.86	9 995	7449
第二次计算结果	11 109 206	6.85	9 995	7449
第三次计算结果	11 083 406	6.85	9 995	7449
正确结果	11 103 106	6.85	9 995	7449
准确率	0%	66%	100%	100%
	$8\,722^2$	Sqrt(8 722)	Abs(8 722)	
第一次计算结果	76 073 284	93.06	8 722	
第二次计算结果	76 182 084	93.39	8 722	
第三次计算结果	75 973 284	93.42	8 722	
正确结果	76 073 284	93.39	8 722	
准确率	33%	33%	100%	

实验表明，比较两种不同性能的大模型，尤其是高性能模型，加入提示工程和思考链的方式，在一定程度上可以提升复杂运算的精度。然而，对于性能较弱的模型，由于推理能力不足，思考过程中时常出现运行中断现象，不但计算错误率较高，甚至无法生成结果。实验进一步拓展，调用高性能大模型，比较不同位数的两个整数的计算准确率，结果如表 5 所示。

表 5 不同位数的两个整数运算结果

	四位整数	六位整数	八位整数	十位整数
加 / 减	100%	100%	66%	0%
乘 / 除	66%	33%	33%	0%
开方	33%	33%	0%	0%
乘方	33%	0%	0%	0%
绝对值	100%	100%	100%	100%

综合实验表明，未启用 Function Calling 的情况下，调用不同大模型进行数值计算，尤其对于大整数或复杂计算，不仅精度差，每次计算结果也不尽相同，即使通过提示工程和思考链优化，准确率依然无法满足实际工作要求。因而，本文采用函数调用的方法，可以更好地解决大数计算问题。

由于大语言模型本身不具备精确计算大数值的能力，而是通过调用外部计算函数实现运算功能，因此，代码核心设计思想是构建一个包含各种运算功能的外部函数字典，并将其转换为 JSON Schema 格式，而后通过大模型自身的语义理解能力，识别用户输入的计算要求，并从 JSON Schema 格式的字典中检索调用相应的运算功能，最终返回问题答案。原理如图 3 所示。



图 3 大模型运算架构

代码首先定义了 7 个外部运算函数，分别为加、减、乘、除、幂、开方和绝对值 7 种运算功能，参数包括两个浮点数 a 和 b ，函数返回值也为浮点格式，并且每个函数内部增加了计算功能的注释，以下代码所示为其中的加法函数：

```
def add(a: float, b: float) -> float:
    """
    计算两个浮点数的和。

    参数：
    a (float): 第一个加数。
    b (float): 第二个加数。

    返回：
    float: 两个参数的和。
    """
    return a + b
```

由于大模型无法直接解析外部函数意义，需要构建一个转换函数，将 7 个外部运算函数转换为 JSON Schema 格式的

字典，便于大模型识别和理解用户意图。转换函数从 7 个外部运算中提取重要信息，包括函数名、功能描述、参数名等，整理输出为 JSON Schema 格式，并可作为大模型对话函数 `client.chat.completions.create()` 中的 `message` 参数。例如，经过 JSON Schema 格式转换后的加法函数输出结果如下所示：

```
{
  "type": "function",
  "function": {
    "name": "add",
    "description": "计算两个浮点数的和。\\n\\n 参
数 :\\n  a (float): 第一个加数。\\n  b (float): 第二个加数。\\n\\n
返回 :\\n  float: 两个参数的和。",
    "parameters": {
      "type": "object",
      "properties": {
        "a": {
          "description": "Convert
a string or number to a floating point
number, if possible.",
          "type": "<class 'float'"
        },
        "b": {
          "description": "Convert
a string or number to a floating point
number, if possible.",
          "type": "<class 'float'"
        }
      },
      "required": []
    }
  }
}
```

依照上述方法，分别将自定义的 7 种运算函数转换为 JSON Schema 格式，并保存在一个名为 `generate_json_description()` 函数字典之中。用户需要运行计算任务时，可以通过大模型对话函数中的 `tools` 参数，选择字典中相应的计算功能，实现最终计算目标。

完成以上步骤之后，大模型可以根据用户提出的任务，检索和调用字典中对应的运算功能，例如，用户提问，“请帮我计算一下 $1\,250\,908\,070^2$ 等于几”，大模型自动识别并获取参与计算的两个参数，底数 $1\,250\,908\,070$ ，指数为 2，

通过索引函数从字典中调用幂运算函数，计算并得到正确结果 $1\,564\,770\,999\,591\,124\,900$ 。

为确保模型能够充分利用之前调用函数得到的信息来生成最终的回答或执行任务，代码还需进行第二次模型调用，可以让模型基于新的信息做出更准确的判断或给出更具体的回答。二次调用函数 `client.chat.completions.create()` 的用户提示内容是：第一次用户提问 + 第一次模型输出结果，即“请帮我计算一下 $1\,250\,908\,070^2$ 等于几 $1\,564\,770\,999\,591\,124\,900$ ”，代码最终输出结果为：“好的，根据您的要求，我使用了 Python 内置的 `power` 函数来计算 $1\,250\,908\,070$ 的平方。计算结果为 $1\,564\,770\,999\,591\,124\,900$ 。请问还有其他需要我帮忙的地方吗？”程序完整流程如图 4 所示。

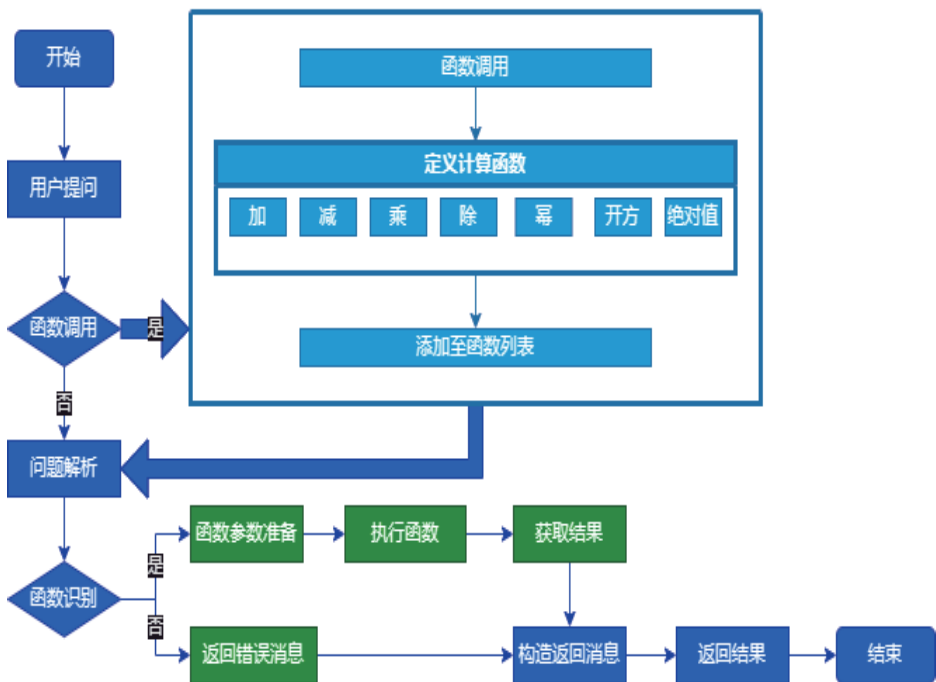


图 4 程序完整流程图

3.2 实验结果

经过大量试验和反复测试，大模型对于大数值计算处理效率得到显著提升，代码随机生成两个九位整数，经过 7 种运算，输出准确率为 100%，并且每次运算结果都保持一致，完全满足实际工作需要。实验结果如表 6 所示。

3.3 讨论分析

Function Calling 机制使大语言模型能够调用外部函数，解决了模型在数学运算、获取最新信息等方面的不足，从而提高了模型的实用性。此外，通过调用外部 API，模型可以实现实时搜索、自动邮件回复等功能，极大扩展了模型的应用场景，使其能够更好地服务于各种实际需求。

表 6 启用 Function Calling 的计算结果

	$823\ 788\ 678 \times 633\ 033\ 558$	$823\ 788\ 678 / 633\ 033\ 558$	$823\ 788\ 678 + 633\ 033\ 558$	$823\ 788\ 678 - 633\ 033\ 558$
第一次计算结果	521 485 877 874 456 324	1.301 334 925 438 502 5	1 456 822 236	190 755 120
第二次计算结果	521 485 877 874 456 324	1.301 334 925 438 502 5	1 456 822 236	190 755 120
第三次计算结果	521 485 877 874 456 324	1.301 334 925 438 502 5	1 456 822 236	190 755 120
正确结果	521 485 877 874 456 324	1.301 334 925 438 502 5	1 456 822 236	190 755 120
准确率	100%	100%	100%	100%
	$823\ 788\ 678^2$	$\text{Sqrt}(823\ 788\ 678)$	$\text{Abs}(823\ 788\ 678)$	
第一次计算结果	678 627 786 000 987 684	28 701.719 077 435 067	823 788 678	
第二次计算结果	678 627 786 000 987 684	28 701.719 077 435 067	823 788 678	
第三次计算结果	678 627 786 000 987 684	28 701.719 077 435 067	823 788 678	
正确结果	678 627 786 000 987 684	28 701.719 077 435 067	823 788 678	
准确率	100%	100%	100%	

然而，Function Calling 机制的局限性也不容忽视，虽然 Function Calling 机制提升了模型的能力，但也增加了对外部 API 和服务的依赖。如果服务不可用或不稳定，会影响到模型的整体性能。并且，调用外部 API 可能会涉及到数据传输和处理，带来了安全性和隐私保护方面的挑战。例如，敏感信息的泄露风险和 API 滥用等问题都需要得到妥善解决。

4 结语

Function Calling 机制为大语言模型提供了一种有效的途径来克服数学运算中的局限性。通过调用外部函数，模型能够在数学运算方面表现出更高准确性和稳定性。实验结果表明，在启用 Function Calling 后，模型能够稳定地执行复杂的数学运算任务，如大数乘法和除法，而无需担心结果的准确性。尽管 Function Calling 已经显示出了其在解决数学运算局限性方面的潜力，但仍有许多方面值得进一步研究。例如，如何设计更智能的函数选择策略，以提高函数调用的准确性和效率；如何解决安全性和隐私保护问题，以确保数据的安全传输和处理；以及如何优化 Function Calling 的性能，使其在大规模部署时更加高效可靠。随着 Function Calling 机制的广泛应用，需要开发更多实用的外部函数来满足各种实际需求。包括金融计算、科学计算、数据分析等领域的专用函数。通过不断丰富函数库，可以进一步扩展大语言模型的应用场景，使其在更多领域发挥重要作用。

参考文献：

[1] 解勉,陈刚,余晓吟.基于大语言模型的论文检索与分析方法研究[J].计算机技术与发展,2024,34(12):116-124.

[2] 荣国伟,孙宝,王文婧,等.大语言模型在数学建模领域的应用探索[J].科技创新与应用,2024,14(22):18-21.

[3] 齐思洋,胡慧云,李洪冰,等.融合大语言模型的领域问答系统构建方法[J].北京邮电大学学报,2024,47(4):50-56.

[4] BROWN T B, MANN B, RYDER N, et al. Language models are few-shot learners[C]//Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems. NewYork: ACM, 2022: 1877-1901.

[5] YUAN Z, YUAN H Y, TAN C Q, et al. How well do large language models perform in arithmetic tasks?[DB/OL].(2023-03-16)[2024-02-22].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.02015>.

[6] FU J Y, LIN L, GAO X Y, et al. KwaiYiiMath: technical report[DB/OL]. (2023-10-19)[2024-03-10].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.07488>.

[7] YANG Z, DING M, LÜ Q S, et al. GPT can solve mathematical problems without a calculator[DB/OL]. (2023-09-12)[2024-02-22].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.03241>.

[8] ZHAO W X, ZHOU K, ZHANG B C, et al. JiuZhang 2.0: a unified chinese pre-trained language model for multi-task mathematical problem solving[C]// Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining.NewYork:ACM,2023:5660-5672.

[9] 赵鑫,窦志成,文继荣.大语言模型时代下的信息检索研究发展趋势[J].中国科学基金,2023,37(5):786-792.

基于图神经网络用于预测原子相互作用研究

贺浩杰¹
HE Haojie

摘要

近年来,利用图神经网络(GNN)模型方法在计算化学(CompChem)中越来越受到研究者的关注。在参考和使用适当的由从头算(Ab Initio)方法训练数据情况下,利用图神经网络模型可以精确地求解化学系统性质,如能量和力场,避免了求解电子薛定谔方程(schrodinger equation, SE)的需求。但图神经网络模型在处理边缘节点效果不佳。基于此,文章基于图神经网络数值预测类任务具有处理复杂关系和依赖性,提出一个深度学习网络模型(external attention newton net, EANTNet)。首先优化图神经网络提取单颗原子的特征方式,让神经网络提取重要的特征。其次,基于外部注意力机制的思想,重新构造能量聚合器,用来聚合图神经网络提取的特征。实验结果表明,在数据集 MD17 中,对比 NewtonNet 网络模型, EANTNet 网络模型不仅在化学系统中提取更好的特征,并且提升了化学系统中的能量和力场的预测精度,分别平均提高了 3.39% 和 1.53%。

关键词

EANTNet; 能量聚合器; 力场; 预测精度

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.006

0 引言

在分子动力学模拟中,一个最新的挑战是:如何构建更精确的力场来描述分子间相互作用^[1]。

正如狄拉克在 1929 年指出的那样,原则上,薛定谔方程包含了描述整个化学过程所必需的一切^[2]。然而,SE 是一个高维方程,变量是化学系统中所有电子的坐标。例如,在一个化学系统中包含 m 颗电子,那么变量的维度就是 $3m$ 维,而一个普通化学系统中,电子数量是以千万为计数单位,需要巨大的算力。超高的计算资源投入和超低的产出是不可接

受的。因此,近似方程被创建来寻找近似解。尽管这些近似方程降低了求解电子 SE 的计算要求,但近似方程所要求的精度是有限的,而且只能处理有限数量的原子。面对大规模系统仿真问题,如何构造力场是解决这一挑战的关键。机器学习在建立力场方面有一个巨大的优势。机器学习方法不依赖于任何预设的化学键或相互作用的知识,而只通过对参考数据的训练,来找到适当的力场^[3]。随着深度学习在机器学习领域的快速发展,特别是图神经网络的发展,为构建精确力场提供了一种新的方案。图神经网络(GNNS)在构建力场方面的优势在于能够直接利用分子和材料的图结构,提供灵活和可扩展的表示,同时通过引入物理先验和有效的学习

1. 贵州财经大学信息学院 贵州贵阳 550025

[10] 宋时磊,杨逸云. 应用场景、风险与前景: ChatGPT 类大语言模型时代的学术出版 [J]. 出版科学, 2023, 31 (5): 76-84.

[11] 陈邦睿,陆雪松. 基于开源代码大语言模型提示的学生代码修复 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2024(5):93-103.

[12] 毛秋力,沈庆飞,李秀红. 面向算力中心的大模型推理优化技术 [J]. 质量与认证, 2024(9):40-44.

[13] 叶国林,郭家文,张晓宇,等. 基于开源大语言模型的智能体算法研究 [J]. 中国信息界, 2024(4):161-163.

[14] 李荣涵,浦荣成,沈佳楠,等. 基于思维链的大语言模型

知识蒸馏 [J]. 数据采集与处理, 2024, 39(3):547-558.

[15] 陈小平. 大模型关联度预测的形式化和语义解释研究 [J]. 智能系统学报, 2023, 18(4):894-900.

【作者简介】

肖明魁(1979—),男,江苏南京人,本科,工程师,研究方向:机器学习、大模型。

张亮(1983—),男,江苏无锡人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:信息化管理。

(收稿日期: 2024-11-13)

策略提高数据效率和预测精度^[4]。这些特性使 GNN 能够保持从头计算方法的准确性，并提供灵活和可扩展的分子和材料表示，提供类似于传统经验力场的计算效率。

然而，基于图神经网络模型的方法在处理边缘节点时，效果并不理想^[5-6]。为解决这一限制，在 NewtonNet^[7] 网络模型的基础上，通过重新构造提取原子特征的结构，使其重点提取分子中的碳、氮、氧原子等重原子特征，忽略氢原子等轻原子特征，然后在能量聚合器重利用外部注意力机制，补全氢原子的特征。通过上述方式来优化图神经网络处理边缘节点效能。

1 机器学习在分子动力学模拟中的现状

此前，机器学习（ML）方法得到了前所未有的发展。由于 ML 结合了 DFT 和经验力场的优点^[8-10]，计算机可以在不显式编程的情况下学习数据中的模式。并用于在参考数据集上训练后估计未知化合物或结构的性质。在这种情况下，特别是能量 E ，从派生的力可以用于驱动分子动力学（molecular dynamics, MD）模拟。而确定 E 所需的所有信息都包含在 $\{Z, r_i\}$ 。因此，必须存在一个精确的映射 $f: \{Z, r_i\} \rightarrow E$ ，它通常被称为势能面（potential energy surfaces, PES）。

消息传递神经网络（message passing neural network, MPNN）^[11] 是图神经网络的一种。MPNN 可以通过迭代的消息传递和图卷积操作，有效捕捉原子之间的局部相互作用和全局上下文信息。在分子表示学习方面，MPNN 可以学习分子的低维表示，将高维的分子结构转化为固定长度的向量表示。这样的表示能够捕捉到分子的结构信息和化学特征，为后续预测任务提供输入。三维结构主要贡献的 MPNN 方法是 SchNet^[12]，利用分解原子间距离与原子属性的卷积，相关方法随后在此基础上成功地结合其他特征来描述原子环境。例如，PhysNet 增加了关于远程静电的先验知识能量预测，而 DimeNet^[13] 利用了角信息和基于贝塞尔函数的更稳定的基函数。

但在标准的 MPNN 中，表示通常被简化为变换相同的特征，例如，对平移和排列不变的量，如能量。但目标不仅是预测能量，而且还预测力向量，并且考虑到向量特征可以受到输入结构变换的影响。具体而言，旋转变换（如通过角位移）是 3D 对象建模中的最大挑战之一，在学习具有许多分子的 MD 轨迹结构的全局方向中说明了这一点，这是非常困难或不可行的。

直到最近，等变欧氏空间的机器学习方法才被开发出来，并且在对各种任务进行评估时的预测性能方面处于最先进的水平，这些任务正在迅速取代纯不变模型。此外，如变量模型减少了对训练数据的需求量，创建了在新时代机器学习中的使用的初始数据。例如，一组机器学习模型引入了多极扩展，如 NequIP^[14] 中使用的，旨在利用使用分子轨道预计计算特征，而 PaiNN^[15] 是满足等变性的 MPNN 模型。尽管将额外的物

理知识注入到机器学习模型中有额外的优势，但球面谐波的计算成本和预计计算特征的可用性和通用性，和缺乏物理可解释性，可能会受到限制。

NewtonNet 通过根据牛顿第三定律创建潜力向量来提高 ML 模型中结构信息的容量。力的方向根据原子在三维空间中相对于彼此的方向位置，有助于描述相邻原子对中心原子的影响。本文通过优化提取化学系统中原子特征，提高图神经网络提取特征的效率，降低在迭代过程中的特征损失，并结合外部注意力机制，提高能量聚合器的聚合能力。

2 EANTNet 模型介绍

给定一组原子特征组 $a_i \in \mathbb{R}^{n_f}$ (n_f 是原子的特征数量) 和原子的边缘属性特征 $e_{ij} \in \mathbb{R}^{n_e}$ ，一个消息传递层就可定义为：

$$m_{ij} = M_l(a_i^l, a_j^l, e_{ij}) \quad (1)$$

$$m_i = \sum_{j \in N(i)} m_{ij} \quad (2)$$

$$a_i^{l+1} = U_l(a_i^l, m_i) \quad (3)$$

式中： M_l 表示消息函数； U_l 表示更新函数； l 表示原子特征迭代的次数，消息传递阶段运行 l 个时间步，由消息函数 M_l 和更新函数 U_l 定义； $N(i)$ 表示分子图中原子 i 的邻域。消息函数 M_l ，更新函数 U_l 都是可微的学习函数。模型的核心思想是通过结合消息函数 M_l 和更新函数 U_l ，获得和更新每一个原子特征组 a_i^l 。

图 1 是 NENTNet 模型的整体结构图，其中包含一层 Embedding 层、一层 RBF 层、三层 Interaction block 层、一层 EA 层、一层 AtomicEnergy 层。

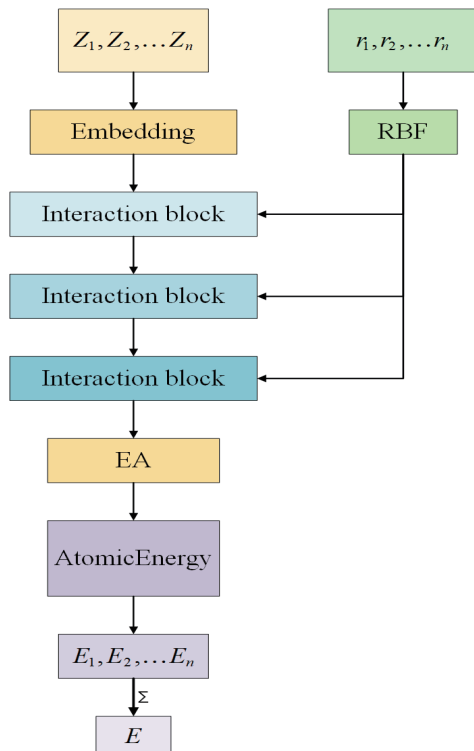


图 1 EANTNet 模型图

模型是由原子序数 $Z_i \in \mathbb{R}^1$ 和相对位置向量 $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \in \mathbb{R}^3$ 定义的无向分子图，在消息传递的阶段，将原子特征组 $\mathbf{a}_i^l$ 输入到消息函数中，并求和，再将求和的结果和原子的特征组作为更新函数的输入，并获得下一个原子特征组 $\mathbf{a}_i^{l+1}$ 。

2.1 原子特征聚合器

第一：嵌入一组可训练的原子序列数 Z_i ，初始化原子特征，即 $\mathbf{a}_i^0 = \mathbf{g}(Z_i)$ 和 $\mathbf{g}: \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^{n_f}$ ，然后去除其中氢原子的特征，即 $\mathbf{b}_i^0 = \mathbf{C}(\mathbf{a}_i^0)$ 和 $\mathbf{C}: \mathbb{R}^{n_f} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r}$ 。其次使用边缘函数表示原子间的距离。为了将三维的数据映射到其他维度，本文引入了径向函数。径向函数的表达式：

$$e_{ij} = \sqrt{\frac{2}{r_c}} \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{r_c} \|\mathbf{r}_{ij}\|\right)}{\|\mathbf{r}_{ij}\|} \quad (4)$$

式中： r_c 表示模型的截止半径； $\|\mathbf{r}_{ij}\|$ 表示原子与原子之间欧式的距离。使用一个相互作用的线性层 $\phi_{rbf}: \mathbb{R}^{n_r} \rightarrow \mathbb{R}^{n_f}$ 将径向函数的输出与其他参数相结合。之后就使用包络函数在每个原子周围实现一个连续的径向截止。在边缘操作中， $\phi_e: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^{n_f}$ 是被定义为截止半径 r_c 中相对原子位置向量的可训练变换：

$$\phi_e(\mathbf{r}_{ij}) = \phi_{rbf}(e_{ij}) e_{cut}(\mathbf{r}_c, \|\mathbf{r}_{ij}\|) \quad (5)$$

式中： ϕ_e 的输出是旋转不变的，只与原子间的距离相关。根据神经消息传递的符号，定义了一个消息函数来收集相邻信息并更新原子特征。在这里，更倾向于在任何一对原子之间传递对称消息，即在原子 i 和原子 j 之间传递的消息在两个方向上都是相同的。因此，在涉及任何二体交互的所有特征数组之间通过原子级乘积引入对称消息传递 n_{ij} ，公式表示为：

$$n_{ij} = \phi_b(b_i^l) \phi_b(b_j^l) \phi_e(\mathbf{r}_{ij}) \quad (6)$$

式中： $\phi_b: \mathbb{R}^{n_r} \rightarrow \mathbb{R}^{n_f}$ 表示第一层后具有非线性激活函数 SiLU 的可训练可微网络。需要注意的是适用于所有原子的相同函数，因此，由于二体交互的两个头部的输出特征的权重共享和乘法，在每一层消息传递中保持对称。为完成特征数组聚合器，使用公式 (2) 简单地求和中心原子从其邻居接收到的所有消息。最后，使用接收消息的总和更新每层的原子特征，公式表示为：

$$\mathbf{b}_i^{l+1} = \mathbf{b}_i^l + \sum_{j \in N(i)} n_{ij} \quad (7)$$

2.2 力特征计算

模型遵循的是旋转不变的消息传递。在力场计算模块中就利用了方向信息。此模块的思想核心是根据牛顿第三定律潜在力向量。牛顿第三定律指出，作用力与反作用力的关系是大小相等，方向相反，即原子 i 对原子 j 的作用力大小相同，方向相反。这就是模型引入消息传递功能的原因。因此，估计对称力的大小作为 n_{ij} 的函数，即 $\|\mathbf{F}_{ij}\| = \phi_f(n_{ij})$ 。力的大小与

单位距离向量的乘积 $\hat{\mathbf{r}}_{ij} = \mathbf{r}_{ij} / \|\mathbf{r}_{ij}\|$ 给出了服从牛顿第三定律的反对称原子间力。

$$\mathbf{F}_{ij} = \phi_f(n_{ij}) \hat{\mathbf{r}}_{ij} \quad (8)$$

式中： $\phi_f: \mathbb{R}^{n_f} \rightarrow \mathbb{R}^1$ 是一个可微的学习函数。原子上每层的总力原子环境中相邻原子的所有维度的力之和，公式为：

$$\mathbf{F}_i^l = \sum_{j \in N(i)} \mathbf{F}_{ij}^l \quad (9)$$

接下来，使用可学习的函数 $\phi_f: \mathbb{R}^{n_f} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r}$ 在每个维度上分解和放缩力向量完成力的运算，公式为：

$$\mathbf{f} = \sum_{j \in N(i)} \phi_f(n_{ij}) \mathbf{F}_{ij}^l \quad (10)$$

因此，所构造的原子间的反作用力被沿各维旋转不变的特征分解，即 $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{3 \times n_r}$ 。根据消息传递策略，在每一层更新反作用力特征向量 $\Delta \mathbf{f}_i$ ，其初始化为零值 $\mathbf{f}_i^0 = \mathbf{0}$ 。

$$\mathbf{f}_i^{l+1} = \mathbf{f}_i^{l+1} + \mathbf{f} \quad (11)$$

2.3 位移特征计算

此模型对位移计算的思想是，位移必须沿着上一步中更新的力的特征进行运动。根据牛顿运动方程，计算受到力的作用所造成的原子位移，并且积累每一层的位移，而不是更新每一层原子的坐标。使用一个可学习的函数 $\phi_d: \mathbb{R}^{n_r} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r}$ 来近似位移因子，该函数作用于由其原子特征 $\mathbf{b}$ 所呈现的每个原子的当前状态 $\mathbf{b}_i^l$ ，公式为：

$$\mathbf{d}_i = \phi_d(\mathbf{b}_i^{l+1}) \mathbf{f}_i^{l+1} \quad (12)$$

利用 $\mathbf{d}_i$ 和前一层所有原子位移的加权和来更新位移特征向量。权重是基于原子间消息的可训练函数 ($\phi'_d: \mathbb{R}^{n_r} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r}$) 来估计的，公式为：

$$\mathbf{D}_i^{l+1} = \sum_{j \in N(i)} \phi'_d(n_{ij}) \mathbf{D}_i^l + \mathbf{d}_i \quad (13)$$

这一步中的重量分量就像注意力机制一样，集中在两体相互作用上，这种相互作用会导致原子的最大运动。由于 $l=0$ 处的力为零，因此位移也初始化为零值，即 $\mathbf{D}_i^0 = \mathbf{0}$ 。

2.4 能量计算

最后一个模块将方向信息压缩到旋转不变的原子特征上。由于此模型是根据牛顿运动方程实施前面的步骤，直接使用 $\mathbf{f}_i^l$ 和 $\mathbf{d}_i^l$ 来近似每一颗原子的势能变化，类似高维空间 $\mathbb{R}^{n_r}$ 中的 $\mathbf{f}_i^l \approx -\mathbf{u} / \mathbf{d}_i^l$ 。因此，能量变化的公式为：

$$u_i = -\phi_u(\mathbf{b}_i^{l+1}) \langle \mathbf{f}_i^{l+1} \mathbf{D}_i^{l+1} \rangle \quad (14)$$

式中： $u_i \in \mathbb{R}^{n_r}$ 和 $\phi_u: \mathbb{R}^{n_r} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r}$ 表示可微的学习函数，操作于原子特征，并预测每个原子的能量系数。两个特征向量的点积将沿着每个维度的特征收缩到单个特征数组。再次使用以原子势能变化表示的收缩方向信息来更新原子特征，公式为：

$$\mathbf{b}_i^{l+1} = \mathbf{b}_i^{l+1} + \mathbf{u}_i \quad (15)$$

2.5 能量聚合计算

能量聚合模块的功能就是将高维的分子能量特征聚合为

表 1 在原始 MD17 数据集上分子的能量和力的平均绝对误差 MAE, 分别以 [meV] 和 [meV/Å] 为单位

Molecule		SchNet	PhysNet	DimeNet	sGDML	PaiNN	NewtonNet	EANTNet
Aspirin	Energy	16.0	10.0	8.8	8.2	6.9	8.06	7.76
	Forces	58.5	26.2	21.6	29.5	14.7	20.68	19.95
Ethanol	Energy	3.5	2.6	2.8	3.0	2.7	2.69	2.57
	Forces	16.9	6.9	10.0	14.3	9.7	9.35	9.26
Malonaldehyde	Energy	5.6	4.1	4.5	4.3	3.9	4.29	4.15
	Forces	28.6	13.8	16.6	17.8	13.8	16.61	16.36
Naphthalene	Energy	6.9	6.2	5.3	5.2	5.0	4.94	4.86
	Forces	25.2	13.4	9.3	4.8	3.3	4.29	4.24
Salicylic acid	Energy	8.7	5.5	5.8	5.2	4.9	5.20	5.04
	Forces	36.9	14.6	16.2	12.1	8.5	10.28	10.19
Toluene	Energy	5.2	4.3	4.4	4.3	4.1	4.38	4.17
	Forces	24.7	8.3	9.4	6.1	4.1	5.12	5.06
Uracil	Energy	6.1	4.8	5.0	4.8	4.5	4.60	4.51
	Forces	24.3	10.8	13.1	10.4	6.0	6.68	6.59
Azobenzene	Energy		8.5		4.0		6.37	6.11
	Forces		20.0		17.3		7.63	7.55
Paracetamol	Energy		7.8		6.6		5.85	5.75
	Forces		22.5		21.3		13.40	13.31

一维的能量。其中特征 b 首先输入到外部注意力机制模块, 目的是通过外部注意力机制自动学习补全氢原子的特征, 公式为:

$$b'_i = \phi_E(b'_i) \quad (16)$$

式中: $\phi_E: \mathbb{R}^{n_f} \rightarrow \mathbb{R}^{n_f}$ 是可微的学习函数, 其目的是为补全氢原子的特征。

3 实验分析

3.1 评测指标

为了评估模型的性能, 本文采用能量的绝对平均误差 (energy MAE) 和力的绝对平均误差 (force MAE)。

3.2 单个小分子

本文利用密度泛函理论 (DFT) 对 9 个小有机分子的分动力学轨迹数据集 MD17^[16] 进行评估, 来测试模型的性能。实验将数据集划分为训练集、验证集和测试集, 其中随机划分 950 条数据当作训练集, 随机划分 50 条数据作为验证集, 剩余的数据全部划分为测试集。根据表 1 数据显示, EANTNet 网络模型评估性能优于 NewtonNet, 这是由于图神经网络提取化学系统中边缘节点特征精度不高, 而 EANTNet 网络模型中更改地特征提取方式, 并且增加外部注意力机制, 可以更好的处理分子的边缘节点, 因此在数据上的表现是能量和力的绝对平均误差 (MAE) 值更小, 预测精度更高。

在一项类似的任务中, 对 5 个小分子的 CCSD/CCSD(T) 数据进行了训练。这个实验的意义在于, 它提供了获取数据的理论黄金标准, 并解决了可接受的训练样本数量下, 以高参考精度评估机器学习模型的最终目标。在表 2 中, 将 EANTNet 网络模型训练的结果与 NewtonNet 模型和 sGDML^[17] 模型训练的结果进行比较, 其中 EANTNet 不仅在五种分子中的 5 种中表现出了最好的预测性能, 并且在剩下的苯分子中, 对力场的预测表现最优。

表 2 在 CCSD 或 CCSD (T) 精度下, 模型在预测分子能量 [meV] 和力 [meV/Å] 的平均绝对误差 MAE 方面的性能

Molecule		sGDML	NewtonNet	EANTNet
Aspirin	Energy	6.85	5.42	5.25
	Forces	33.0	19.38	19.21
Benzene	Energy	0.13	0.22	0.18
	Forces	1.69	0.78	0.71
Ethanol	Energy	2.17	1.30	1.23
	Forces	15.18	7.98	7.84
Malonaldehyde	Energy	10.75	2.12	2.01
	Forces	16.0	12.62	12.47
Toluene	Energy	1.30	1.0	0.94
	Forces	9.11	5.55	5.43

4 结论

在化学和生化系统的研究中,能够高精度地预测分子动力学轨迹的能量和力,但在有效时间尺度上是相当重要的。本文改进提取原子特征的方式,并与原来模型相比,改进后的模型可以更好的处理边缘粒子之间的特征。实验结果表明,在数据集 MD17 数据集上改进后的 EANTNet 网络模型在能量和力场的预测精度上优于 NewtonNet 模型,证明了改变特征提取的方法应用在 NewtonNet 模型上是有效的。未来还可以进一步改进特征提取的方法,让该模型可以更好地处理化学系统中边缘粒子之间的特征。

参考文献:

- [1] UNKE O T, CHMIELA S, SAUCEDA H E, et al. Machine learning force fields[J]. Chemical reviews, 2021, 121(16): 10142-10186.
- [2] UNKE O T, MEUWLY M. PhysNet: a neural network for predicting energies, forces, dipole moments, and partial charges[J]. Journal of chemical theory and computation, 2019, 15(6): 3678-3693.
- [3] ZHANG J, CHEN D, XIA Y J, et al. Artificial intelligence enhanced molecular simulations[J]. Journal of chemical theory and computation, 2023, 19(14): 4338-4350.
- [4] REISER P, NEUBERT M, EBERHARD A, et al. Graph neural networks for materials science and chemistry[J]. Communications materials, 2022, 3(1): 93.
- [5] CHAMBERLAIN B P, ROWBOTTOM J, GORINOVA M, et al. Grand: graph neural diffusion[DB/OL].(2021-09-22)[2024-05-11].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.10934>.
- [6] ALON U, YAHAV E. On the bottleneck of graph neural networks and its practical implications[DB/OL]. (2021-03-09)[2024-06-26].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.05205>.
- [7] HAGHIGHATLARI M, LI J, GUAN X Y, et al. NewtonNet: a newtonian message passing network for deep learning of interatomic potentials and forces[DB/OL].(2021-03-09)[2024-07-11].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.02913>.
- [8] WANG J J, WANG Y, ZHANG H T, et al. E (n)-Equivariant cartesian tensor message passing interatomic potential[J]. Nature communications, 2024, 15: 7607.
- [9] ZHANG L F, HAN J Q, WANG H, et al. Deep potential molecular dynamics: a scalable model with the accuracy of quantum mechanics[DB/OL].(2017-12-12)[2024-04-11].<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.143001>.
- [10] LU D H, WANG H, CHEN M H, et al. 86 PFLOPS deep potential molecular dynamics simulation of 100 million atoms with ab initio accuracy[J]. Computer physics communications, 2021, 259: 107624.
- [11] GILMER J, SCHOENHOLZ S S, RILEY P F, et al. Message passing neural networks[J]. Machine learning meets quantum physics, 2020, 968: 199-214.
- [12] SCHÜTT K T, KINDERMANS P J, SAUCEDA H E, et al. SchNet: a continuous-filter convolutional neural network for modeling quantum interactions[DB/OL]. (2017-12-19)[2024-01-19].<https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.08566>.
- [13] GASTEIGER J, GROSS J, GUNNEMANN S. Directional message passing for molecular graphs[DB/OL].(2022-04-05)[2024-06-23].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.03123>.
- [14] BATZNER S, MUSAELIAN A, SUN L X, et al. E (3)-equivariant graph neural networks for data-efficient and accurate interatomic potentials[J]. Nature communications, 2022, 13: 2453.
- [15] SCHÜTT K T, UNKE O T, GASTEGGER M. Equivariant message passing for the prediction of tensorial properties and molecular spectra[DB/OL].(2021-06-07)[2024-02-22].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.03150>.
- [16] CHMIELA S, TKATCHENKO A, SAUCEDA H E, et al. Machine learning of accurate energy-conserving molecular force fields[J]. Science advances, 2017, 3(5): 3015.
- [17] CHMIELA S, SAUCEDA H E, POLTAVSKY I, et al. sGDML: constructing accurate and data efficient molecular force fields using machine learning[J]. Computer physics communications, 2019, 240: 38-45.

【作者简介】

贺浩杰(2000—),男,江西萍乡人,硕士研究生,研究方向:计算机应用技术。

(收稿日期:2024-11-07)

基于计算机视觉红外热波板材内部孔洞检测方法

李铁军¹ 葛新强^{1,2}

LI Tiejun GE Xinqiang

摘要

针对板材内部缺陷无损检测精度不足,检测模型计算量大问题,文章提出了一种基于红外热波和深度学习相结合的检测方法。首先将 YOLOv5s 模型作为基础网络结构,引入轻量化网络 GhostNetv2 替换原 CSPDarknet 主干网络,减少模型参数量和计算资源需求让网络更加轻量化。其次,引入 ECA 高效通道注意力机制,在保持网络轻量化的同时增强网络对孔洞缺陷区域的关注度,以便更加充分地提取孔洞缺陷特征。最后,将 CIoU 损失函数替换成 Focal-EIoU 损失函数,通过优化边界框的位置和大小,从而提高孔洞缺陷识别的鲁棒性和收敛速度。经验证,改进后的 YOLOv5s 模型,在红外条件下识别孔洞缺陷相比于原始模型,平均精度均值(mAP)提升 2.1%,模型参数量降低 28.5%,检测速度达到 51.42 帧/s,可以满足日常板材生产线的缺陷检测需求。

关键词

红外无损检测;深度学习;YOLOV5;缺陷识别;盲孔检测

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.007

0 引言

板材因其多样性和特殊功能性等优点,成为许多行业不可或缺的材料,被广泛应用于汽车工业、机械制造、航空航天等领域^[1]。但板材在生产过程中容易产生内部孔洞缺陷,进而影响板材的使用时长、力学性能和使用安全性,因此对板材内部孔洞缺陷的无损检测是生产中至关重要的。红外热像仪因其具有非接触性^[2],检测结果直观可视化、高灵敏度与分辨率等诸多应用优势,被广泛应用于材料的无损检测中。随着深度学习的快速发展,国内外学者运用深度学习对材料缺陷检测进行了深入研究,Chen 等人^[3]提出了一种基于深度学习图像的化学复合材料圆孔检测技术,利用深度学习图像识别技术与传统圆孔检测相结合,但仅适用于可视孔洞,未涵盖盲孔检测。李铁军等人^[4]提出了一种基于主动红外热激励的板材内部孔洞的检测方法,使用 YOLOv5 网络对板材内部孔洞的红外检测图片进行训练和检测,从而检测出孔洞位置,但该方法对计算资源要求高。徐振业等人^[5]采用有限元技术建立孔洞缺陷仿真模型,但该方法对于适用范围有限,不能满足工业生产的检测需求。

因此,本文提出一种基于计算机视觉的板材内部孔洞检测方法,用于板材内部缺陷的无损检测。本方法是基于 YOLOv5s 网络,引入 GhostNetv2 轻量化主干网络和 ECA 高

效通道注意力机制,减少模型参数量提高检测精度,同时引进 EIoU-Focal 损失函数,提高模型整体的检测速度。

1 YOLOv5 目标检测算法

本文将 YOLOv5 卷积神经网络作为基础网络模型(图 1 为 YOLOv5 网络结构图),YOLOv5 是一种高性能单阶段目标检测算法,其主要由输入端、骨干网络(Backbone)、颈部网络(Neck)和输出端组成。输入端由 3 个不同的输出层构成,分别用于识别尺度大小不同的检测对象;骨干网络由 CSPDarknet 网络构成,其具有较强的特征提取能力和计算效率,但其模型参数量较大;Neck 网络用于可以融合不同特征图层的的信息,实现浅层图形特征和深层语义特征的融合。相较于传统的 Fast R-CNN、Mask R-CNN 等双阶段目标检测算法^[6],YOLOv5 目标识别算法将检测和分类两个阶段融合在一起,具有较好推理速度和检测性能。

2 YOLOv5s 模型改进

2.1 GhostNetv2 轻量化网络结构

本文在 YOLOv5 算法网络结构的基础上对原始网络结构进行改进,从而获得更优检测效果。其中引入轻量化网络 GhostNetv2 替换原 CSPDarknet 主干网络,在减少模型参数量的同时,解决了模型在检测精度和速度上的主要问题。GhostNetv2^[7]是一种轻量级高效的卷积神经网络架构,由 GhostNet 卷积神经网络和解耦全连接注意力机制(DFC)组成,其中,Ghost Module 模块通过分组卷积和低成本的线性变换

1. 沈阳化工大学装备可靠性研究所 辽宁沈阳 110142

2. 沈阳化工大学材料科学与工程学院 辽宁沈阳 110142

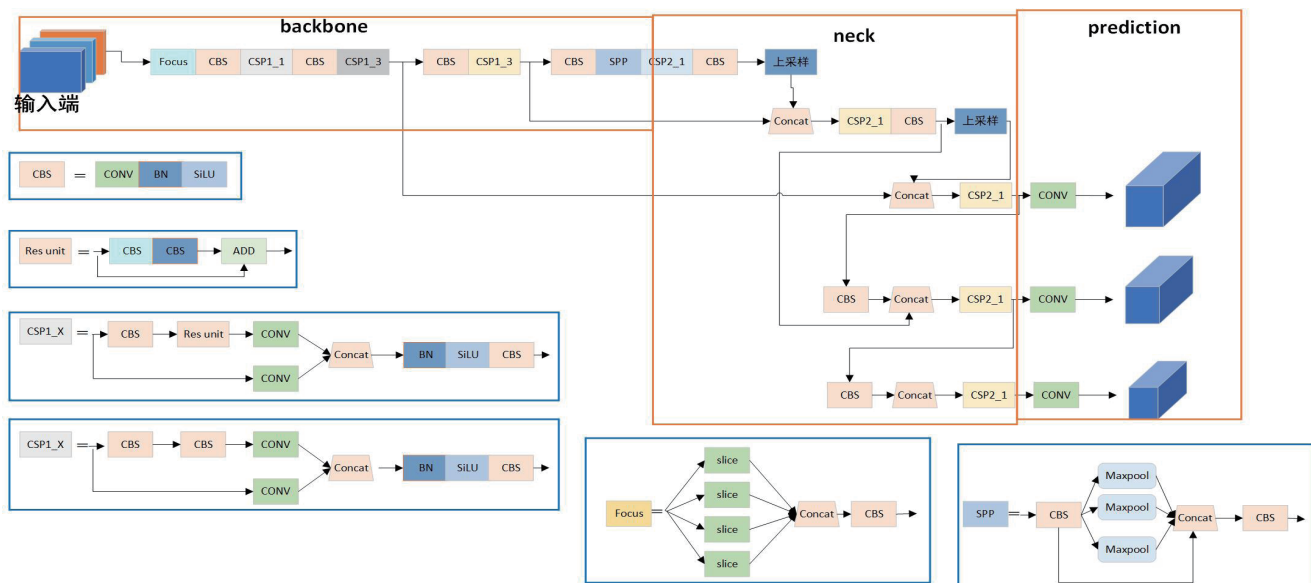


图 1 YOLOv5 网络结构图

来减少计算量，并通过低成本操作生成更多的特征映射来取代原有卷积，保持较高特征表达能力。Ghost 模块将输入特征 $X \in \mathbf{R}^{H \times W \times C}$ (H 、 W 、 C 分别为特征图的高度、宽度和通道数)，并且其将模块输出通道分成两部分进行操作。

(1) 第一部分：主要进行常规的卷积操作，严格控制输出特征图的数量，旨在避免计算量过大，同时确保提取到有效的特征信息。表达式为：

$$Y' = X * F_{1 \times 1} \quad (1)$$

式中： $*$ 代表卷积操作； $F_{1 \times 1}$ 代表 point-wise 卷积； $Y' \in \mathbf{R}^{H \times W \times C_{out}}$ 代表部分输出特征。

(2) 第二部分：Ghost 模块主要通过简单的线性变换生成特征图的廉价副本，以减少计算量。这些操作生成的特征图与常规卷积生成的特征图进行 Concat 操作，共同构成最终的输出。这种方法旨在用更少的计算资源获得丰富的特征表示，其表达式为：

$$Y = \text{Concat}([Y', Y' * F_{dp}]) \quad (2)$$

式中： $*$ 代表卷积操作； F_{dp} 代表 depth-wise 卷积； $Y \in \mathbf{R}^{H \times W \times C_{out}}$ 代表最终输出的特征。

GhostNetv2 在 GhostNetV1 基础上引入 DFC 解耦全连接注意力机制，用来捕捉空间上水平和垂直方向上的长距离像素依赖关系。此外，GhostNetv2 采用两个倒残结构的 Ghost 模块，第 1 个 Ghost 模块与 DFC 注意力相乘，增强通道的特征，然后将增强后的特征输入第 2 个 Ghost 模块，特征图的通道维度被高效压缩减少冗余，增强模型的表达能力。通过 Ghost 模块通过减少冗余计算生成丰富的特征图，为 DFC 注意力提供了高质量的输入；同时 DFC 注意力机制通过捕捉全局信息并生成注意力图，增强了 Ghost

模块生成的特征表示；Ghost 模块与 DFC 注意力的结合使 GhostNetv2 卷积神经网络更加关注图像的缺陷特征，提高检测精度，同时减少检测时计算量。GhostNetv2 Bottleneck 结构如图 2 所示。

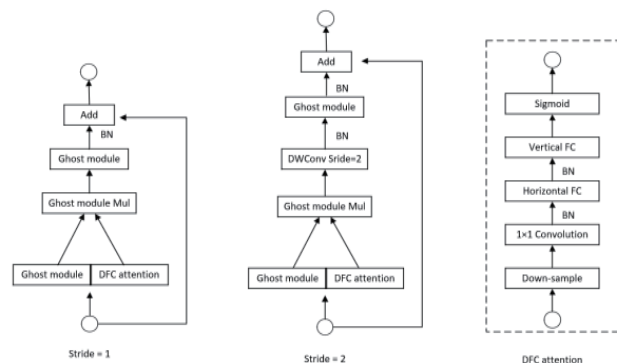


图 2 GhostNetv2 Bottleneck 结构图

2.2 ECA 注意力机制

通过使用 GhostNetv2 网络模块进行板材内部缺陷特征提取时，模型的参数量大大减少和计算速度显著提升，然而尽管 YOLOv5 模型在对于物体识别方面拥有良好检测精度，但在红外条件下，板材内部的孔洞缺陷呈现边缘特征不明显，缺陷部位对比度低和背景噪声的干扰等因素影响，其检测精度也会受到影响，为了提高检测精度，本文引用 ECA 注意力机制。

ECA 注意力机制是一种高效轻量级通道注意力模块^[8]，首先将输入的原始图像进行全局平均池化操作，用来降维特征图减少计算，将每个特征通道的数值取平均，生成一个通道数相同的向量，并保留通道间的全局信息；其次通过全连接层，提取通道的全局上下信息。再由 Sigmoid 激

活函数,对上一阶段进行非线性变换,产生通道注意力权重,并计算对应不同通道的概率。最后动态调整不同通道的响应,具有更高注意力权重的通道将得到更大响应,而具有较低权重的通道将受到抑制。ECA 高效通道注意力机制结构图如图 3 所示。

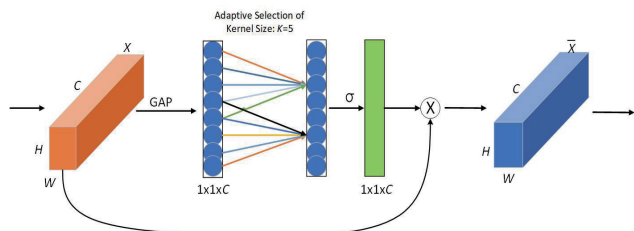


图 3 ECA 高效通道注意力机制模块结构图

其中通道维数和跨通道交互的正相关趋势,卷积内核大小 k 与通道维数 C 关系为:

$$k = \left\lceil \frac{\log_2(C)}{\gamma} + \frac{b}{\gamma} \right\rceil_{\text{odd}} \quad (3)$$

式中: k 表示卷积核大小; C 表示通道维度; γ 和 b 是常数,反应调整函数映射关系。其中, $\gamma=2$ 、 $b=1$; k 向上取整的最小奇数。

2.3 Focal-EIoU 损失函数

Focal-EIoU 损失函数是一种精确边界框回归的高效损失函数^[9],其包括 Focal 损失函数和 EIoU 损失函数。EIoU 损失函数是用于边界回归的损失函数,其注重关注空洞缺陷部分的重叠面积、中心点损失和宽高损失的几何因素,其具有更快的收敛速度和更准确的边框定位效果。EIoU 损失函数计算公式为:

$$L_{\text{EIoU}} = L_{\text{IoU}} + L_{\text{dis}} + L_{\text{asp}} \quad (4)$$

$$L_{\text{EIoU}} = 1 - \text{IoU} + \frac{\rho^2(b, b^{\text{gt}})}{l^2} + \frac{\rho^2(w, w^{\text{gt}})}{l_w^2} + \frac{\rho^2(h, h^{\text{gt}})}{l_h^2} \quad (5)$$

式中: L_{dis} 表示中心损失; L_{asp} 表示宽高损失; l_w 表示最小外接框的宽; l_h 表示最小外接框的高。

Focal 损失函数用于解决正负样本不平衡,高质量和低样本对于损失函数的贡献等问题,有助于模型更加关注高质量样本,提高检测的精确度。Focal-EIoU 损失函数计算公式为:

$$L_{\text{Focal-EIoU}} = \text{IoU}^\gamma L_{\text{EIoU}} \quad (6)$$

式中: γ 为异常值抑制程度的参数,一般取值为 0.5; L_{EIoU} 为 EIoU 损失函数。

3 实验结果分析

3.1 模型的评估指标

本文采用精确率 P 、召回率 R 、平均精度 mAP、参数量

parmes、帧率 FPS 作为评价指标。其中 mAP 反映模型检测效果的指标; parmes 评估模型轻量化重要指标; FPS 评估模型检测速度是否可以满足板材生产线的缺陷检测需求; TP 表示模型预测结果为正样本且正确的个数; FP 表示模型预测为正样本但错误的个数; FN 表示模型预测为负样本但错误的个数。精准率 P 和召回率 R 的计算公式为:

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (7)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

3.2 实验结果和实验对比分析

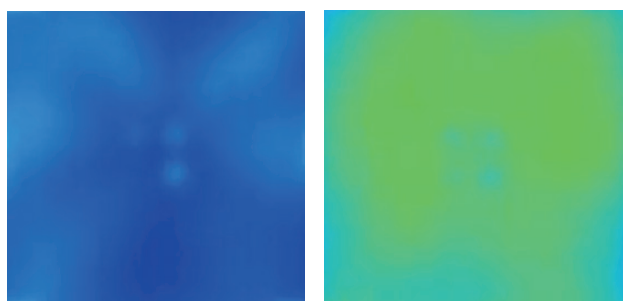
YOLOv5 进行轻量化操作比较经典的模块有 MobileNetv3、ShuffleNetv2、GhostNetv2 模块,根据表 1 实验对比,可以看出在检测速度相差不大的情况下,MobileNetv3 和 ShuffleNetv2 模块虽然可以减少参数量,但是模型的检测精度也随之大大降低。而 GhostNetv2 模块在减少模型 28.5% 参数量的情况下,依然具有很好的检测效果,因此在 GhostNetv2 模块对 YOLOv5 模型轻量化操作的基础上引入 ECA 注意力机制和 Focal-EIoU 损失函数,相较于原模型 mAP 提高了 2.1%,检测速度也有所提升,能够很好地满足日常板材生产中的缺陷检测需求。

表 1 实验对比图

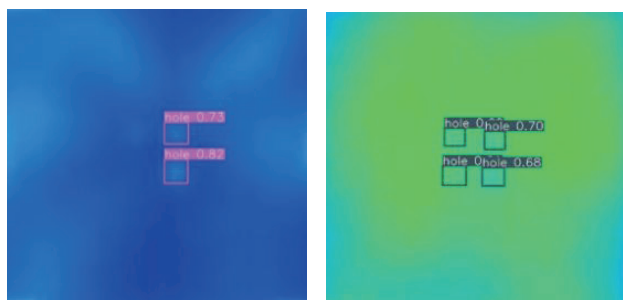
算法模型	P	R	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95	Parmes	FPS (/ (帧 · s ⁻¹))
YOLOV5	0.942	0.948	0.985	0.594	7 053 910	48.54
YOLOV5-MobileNetv3	0.935	0.935	0.978	0.54	3 355 084	45.66
YOLOV5-ShuffleNetv2	0.909	0.968	0.972	0.546	843 078	60.60
YOLOV5-GhostNetv2	0.91	0.981	0.974	0.581	5 147 329	44.24
改进后 YOLOv5s	0.901	1	0.983	0.615	5 147 329	51.42

3.3 板材内部孔洞缺陷检测效果

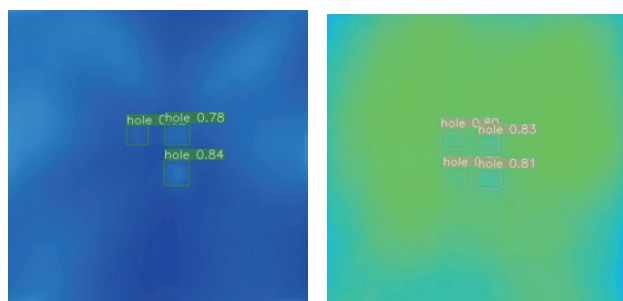
通过使用改进后的 YOLOv5 算法对热波图像进行检测,检测效果如图 4 所示。(a) 图为加热和散热时板材内部孔洞热波图像, (b) 图为原始 YOLOv5 算法检测热波图像的效果图, (c) 图为改进后的 YOLOv5 算法检测热波图像的效果图。从中可以看出原始的 YOLOv5 算法对于孔洞缺陷部分虽然可以检测出,但是检测精度低,并且存在漏检的情况。通过对比可以得出,本文算法相较于 YOLOv5 算法和其改进的轻量化算法在检测精度和速度方面都有提升,漏检和误检也有所降低。



(a) 加热和散热时板材内部孔洞热波图



(b) YOLOv5 算法检测效果



(c) 改进 YOLOv5 算法检测效果

图 4 实验检测效果对比图

4 结论

针对板材内部缺陷无损检测精度不足,检测模型计算量大问题,本文提出了一种基于红外热波和深度学习相结合的检测方法。为了减少模型参数量并提升检测速度,采用了轻量化的 GhostNetv2 网络作为主干网络。同时,为了提高模型检测的准确性,本文结合 ECA 注意力机制和 Focal-EIoU 损失函数。ECA 注意力机制是一种高效轻量级通道注意力模块,在提升模型精度的同时避免了增加模型计算量的负担。Focal-EIoU 损失函数是一种精确边界框回归的高效损失函数,对于孔洞缺陷边框的定位表现出色,有利于提高模型的准确率。实验结果表明,改进后的模型相较于原 YOLOv5 模型精度、模型参数量,都有显著的提升。能满足日常板材生产线上的孔洞缺陷检测需求,并且能满足生产线中的实时性问题,为板材内部热波孔洞缺陷检测提供了新方法。

参考文献:

- [1] 钱小瑜. 中国人造板在改革开放中走向辉煌 [J]. 中国人造板, 2019, 26 (6): 1-8.
- [2] WANG Q, LIU Q H, XIA R C, et al. Defect depth determination in laser infrared thermography based on LSTM-RNN[J]. IEEE access, 2020, 8:153385-153393.
- [3] CHEN J J, ZU Y W, YANG J P, et al. Detection method of compound chemical material hole based on deep learning image[J/OL]. Journal of nanomaterials, 2022[2024-04-15]. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1155/2022/9966145>.
- [4] 李铁军, 王菁鹭. 基于主动红外热激励的板材内部孔洞的检测方法 [J]. 信息技术与信息化, 2024(5): 93-96.
- [5] 徐振业, 刘志浩, 钱恒奎. 石英纤维增强复合材料内部孔洞缺陷的红外热成像检测有限元分析研究 [J]. 纤维复合材料, 2024, 41(3): 77-85.
- [6] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal Networks[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2017,39(6):1137-1149.
- [7] LI Z H, FANG X, ZHEN T, et al. Detection of wheat yellow rust disease severity based on improved GhostNetv2[J]. Applied sciences, 2023, 13(17): 9987.
- [8] WANG Q L, WU B G, ZHU P F, et al. ECA-Net: efficient channel attention for deep convolutional neural networks [C/OL]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2020[2024-06-11]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9156697>. DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.01155.
- [9] KUMAR A, DHANALAKSHMI R. EYE-YOLO: a multi-spatial pyramid pooling and Focal-EIoU loss inspired tiny YOLOv7 for fundus eye disease detection [J]. International journal of intelligent computing and cybernetics, 2024, 17 (3): 503-522.

【作者简介】

李铁军 (1978—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 讲师, 研究方向: 机械设计理论及研究。

葛新强 (2000—), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 研究方向: 材料缺陷检测。

(收稿日期: 2024-11-13)

基于深度学习的低照度遥感图像智能分割方法

兰海涛¹ 吴文玲¹

LAN Haitao WU Wenling

摘要

在低照度遥感图像中,由于光照不足,图像往往呈现出对比度低、细节模糊以及噪声显著增强的特点,这些不利因素直接影响了图像信息的有效提取。低对比度使得目标与背景之间的差异难以辨识,而噪声的增加则进一步干扰了图像中的有用信息,导致分割时阈值、区域生长条件等参数的最优值寻找变得异常困难,严重影响图像分割的准确性和效率。为此,文章提出了一种基于深度学习的低照度遥感图像智能分割方法。借助多尺度 Retinex 算法,对原始低照度遥感图像进行非线性增强处理,借助对比度拉伸的方式进一步改善图像在视觉效果方面的质量;在分割阶段,构建了以各向异性上下文融合网络为核心的深度学习模型,设计多尺度并行空洞卷积模块与各向异性复合条状池化模块对遥感图像中各向异性目标进行识别分割。在测试结果中,设计方法对于测试数据集图像分割的可视化效果中能够完整保留标签信息,且全局准确率和平均交并比均明显高于对照组。

关键词

深度学习;低照度遥感图像;多尺度 Retinex 算法;非线性增强;对比度拉伸;各向异性上下文融合网络为核心;多尺度并行空洞卷积模块;各向异性复合条状池化模块

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.008

0 引言

对于低照度环境下的遥感图像而言,受噪声干扰影响,对其进行边缘进行检测的难度往往较大,当检测精度的过度优化时,受噪声影响,会产生伪边缘,并在此基础上演化出不合理轮廓;而从抗噪性角度进行过度优化则容易导致轮廓漏检和目标位置偏差较大等问题^[1]。在开展遥感图像分割阶段,需要精确标注图像中的每个像素,而低照度遥感的像素状态会导致图像分割数据集的成本较高^[2]。目前分割方法研究中,对图像中的较大目标能够较好地进行分类,但对于图像中的小目标和目标边缘,由于轮廓太小,无法准确定位、识别,容易造成错误分割。其中,文献[3]针对 Segformer 在处理具有复杂空间和频谱特征的遥感影像时存在的局部感受野限制以及深层语义特征损失等问题,提出了在 Segformer 不同层级模块间嵌入不同注意力模块的多级分层编码器网络结构。这一创新性的方法通过增强网络对大尺度特征的空间感知能力,缓解了特征语义损失,从而提高了 Segformer 的分割精度。然而,这一方法也带来了网络深度的增加,进而加剧了分割模型参数选取的复杂度,导致对图像的分割效果不佳。文献[4]则提出以改进马尔可夫随机场为基础的遥感图像分割方法。该方法结合马尔可夫随机场(MRF)模型在

反映地理空间相关性方面的优势,通过对图像标号先验分布的改进,实现对遥感图像的精准分割。然而,该方法在应用过程中未对图像对比度、噪声情况进行良好处理,其参数最优值选取问题难以解决,故其分割效果不佳。

在上述基础上,本文提出一种基于深度学习的低照度遥感图像智能分割方法,设计了对比测试方案,从综合角度对设计分割方法的应用效果进行全面测试与验证。

1 低照度遥感图像智能分割方法设计

1.1 低照度遥感图像非线性增强

为更加精准地分割遥感图像,本文采用多尺度 Retinex (multi-scale retinex, MSR) 算法对低照度遥感图像进行非线性增强^[5]。对原始的低照度遥感图像进行基础的去噪、归一化预处理后,减少噪声对 Retinex 算法的影响,为后续处理的稳定性和准确性提供保障^[6]。在此基础上,为了更加全面地捕捉图像中的不同频率信息,构建多尺度高斯金字塔。设置每个尺度上的图像反映遥感图像在不同频率上的信息分布,本文应用 Retinex 理论计算了对应的反射率图像^[7]。具体可以表示为:

$$R_i(x, y) = \lg(I(x, y) + 1) - \lg(F_i(x, y) \times I(x, y) + 1) \quad (1)$$

式中: $R_i(x, y)$ 表示第 i 个尺度上的反射率图像; $I(x, y)$ 表示原始低照度遥感图像; $F_i(x, y)$ 表示第 i 个尺度上的高斯滤波

1. 四川工商学院 四川成都 611745

器。可以看出,在目标对象固有属性(反射率)恒定的前提下,通过估计光照图像,并从原始图像中进行去除,即可恢复物体的固有反射率^[8]。

对于最终的增强图像,通过将不同尺度上的反射率图像进行融合处理得到。从最大限度保留图像中的细节信息的角度出发,采用最大值选择融合策略^[9],具体的多尺度融合计算可以表示为:

$$R_f(x, y) = \sum_{i=1}^N w_i R_i(x, y) \quad (2)$$

式中: $R_f(x, y)$ 表示最终的反射率图像; w_i 表示第 i 个尺度上的权重,满足 $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ 。

对于融合后的反射率图像,对其进行了后处理,即通过对比度拉伸的方式进一步改善图像的视觉效果。具体的处理方式可以表示为:

$$I_s(x, y) = \frac{I_f(x, y) - I_2}{I_1 - I_2} \times 255 \quad (3)$$

式中: $I_s(x, y)$ 表示对比度拉伸后的遥感图像; $I_f(x, y)$ 表示融合后的反射率图像转换回灰度值后的图像; I_1 和 I_2 分别表示图像中的最大值和最小值。将非线性增强后的遥感图像灰度值拉伸到 0~255 的范围内,以改善图像的对比度。

通过上述操作,利用多尺度 Retinex 算法实现对低照度遥感图像进行非线性增强处理。

1.2 基于深度学习的遥感图像分割

低照度遥感图像增强可使图像细节更加清晰,对比度得以提升,从而更易于后续的图像分析和处理。在该背景下,本次以此为基础,引入深度学习理论,完成遥感图像分割设计。为实现精准分割的目标,需要能够捕捉图像中复杂特征和上下文信息的模型。因此,采用以各向异性上下文融合网络为核心的深度学习模型进行遥感图像分割^[10]。该模型结合多尺度并行空洞卷积模块与各向异性复合条状池化模块,以增强模型对遥感图像中各向异性目标的识别与分割能力,从而实现复杂遥感图像数据的精确分割处理。

首先,输入经过 1.1 部分增强处理后的遥感图像后,将其发送至基干网络 ResNet-18 进行初步的特征提取。为保留更多的空间信息,对 ResNet-18 进行了修改,去除了其第一个卷积块后的最大池化层,从而减少了空间信息的损失。该步骤的具体操作具体可以表示为:

$$F_i(I_s(x)) = \begin{pmatrix} e & -e \\ f & -f \\ g & -g \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$F_i(I_s(y)) = \begin{pmatrix} h & m & n \\ -h & -m & -n \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: F_i 表示初步提取的特征图; e 、 f 和 g 分别表示水平梯

度的卷积参数; h 、 m 和 n 分别表示垂直梯度的卷积参数。

在编解码网络的中间部分,引入多尺度并行空洞卷积模块(MSP-ACM)和各向异性复合条状池化模块(ACP-Module)。设计两个模块串行连接,对遥感图像中高级语义信息进行特征编码。其中,MSP-ACM 通过不同尺度的空洞卷积并行处理特征图,提取多尺度信息,其实现方式可以表示为:

$$F_m = \begin{cases} \alpha_k, k=1 \\ \beta_k(\alpha_k + \alpha_{k-1}), 2 \leq k \leq 3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_m 表示提取的多尺度图像信息; α_k 表示空洞卷积率为齿状结构的状态下,遥感图像的多尺度上下文信息; β_k 表示遥感图像的稠密多尺度特征; k 表示空洞率。

ACP-Module 则对 MSP-ACM 的输出进行各向异性复合条状池化,进一步提取并融合各向异性的上下文信息,表示为:

$$F_a = \frac{1}{H} \sum F_m(c, i, j) \quad (7)$$

式中: F_a 表示融合各向异性上下文后输出的图像信息; H 表示各向异性复合条状池化张量; (c, i, j) 表示遥感图像的多尺度变换参数。

对解码端的设计,以跳跃连接为基础建立了融合编码器的低级语义特征和解码器的高级语义特征的处理架构。这一步骤的具体处理方式可以表示为:

$$F_f = C_1(F_1, F_2) \quad (8)$$

式中: F_f 表示融合后的特征图; C_1 表示跳跃连接函数; F_1 和 F_2 分别表示编码器的低级语义特征和高级语义特征信息。

最后,通过转置卷积模块(transposed convolution module, TCM)对融合后的特征图进行上采样处理,得到最终的分割图像,具体可以表示为:

$$P = \psi(Z + C_1(\psi(F_f))) \quad (9)$$

式中: P 表示分割图; Z 表示残差连接相加的输出; ψ 表示标准池化特征和条状池化映射的拼接函数。

按照上述所示的方式,实现对面向遥感图像分割的深度神经网络模型构建,其中,网络模型中的所有参数均通过端到端的训练方式从数据中自适应学习确定。通过引入多尺度并行空洞卷积模块,提升对遥感图像中各向异性目标的分割精度。

2 测试与分析

2.1 测试数据集准备

(1) 关于 Potsdam 数据集

Potsdam 数据集,作为国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)打造的标准基准数据集之一,展现了高分辨率航空摄影技术的成果。此数据集覆盖了 11 个各具特色的地区,涵盖 38 幅高分辨率遥感图像,每幅图像的分辨率均高达

6 000 px×6 000 px, 展现了地表特征的丰富细节。对图像的光谱波段构成情况进行分析, 其具体包含红色、绿色、蓝色和近红外, 为地表特征的识别提供了全面的信息基础。尽管本研究在实验阶段仅采用了常见的 RGB 波段, 但近红外波段的存在可以为深入研究提供更多可能性。在 Potsdam 数据集中, 地表特征被细致地划分为 6 个类别: 背景、不透明水表面、建筑物、低矮植被、树木和车辆。从提升模型的学习效率和泛化能力角度出发, 对 Potsdam 数据集的测试图像和标签进行了统一的预处理, 将切割成尺寸均为 512 px×512 px 的小块。鉴于原始图像在像素值和亮度分布上的差异性, 采用随机选取的方式构建的训练集和实验集规模分别为 5 400 张和 600 张, 另 600 张作为测试集, 以确保实验结果的可靠性和有效性。图 1 为 Potsdam 数据集的部分示例。



图 1 Potsdam 数据集部分示例

(2) 关于 Vaihingen 数据集

Vaihingen 数据集同样由 ISPRS 提供。该数据集的地物类型分类与 Potsdam 数据集保持一致, 但图像数量和尺寸有所不同, 其包含了 33 幅平均尺寸为 2 494 px×2 064 px 的遥感图像, 图像均通过航拍德国 Vaihingen 市获得的。与 Potsdam 数据集相似, 在光谱波段构成方面, 其包括近红外、红色和绿色, 且离地面采样距离为 9.0 cm, 为地表特征的精细识别提供了有力支持。为与 Potsdam 数据集保持一致性, 本研究同样对 Vaihingen 数据集中的图像和标签进行了尺寸均为 512 px×512 px 的切割处理, 同样采用随机选取的方式, 构建的训练集规模和实验集规模分别为 1 500 张和 400 张。这样的划分方式既保证了训练集的充分性, 又确保了测试集的有效性, 为模型的训练和评估提供了坚实的基础。图 2 为 Vaihingen 数据集的部分示例。



图 2 Vaihingen 数据集的部分示例

2.2 测试方案设计

在具体的测试过程中, 分别采用以注意力机制改进为基础的 Segformer 遥感图像分割方法, 以及以改进马尔可夫随机场为基础的遥感图像分割方法作为测试的对照组。对于具体的评价指标, 除了最基本的可视化效果, 设置全局准确率指标评估遥感图像分割任务执行的有效性, 设置平均交并比指标评价遥感图像分割任务执行的可靠性。其中, 二者的具体计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i + B_i)}{\sum_{i=1}^n (A_i + B_i + C_i + D_i)} \quad (10)$$

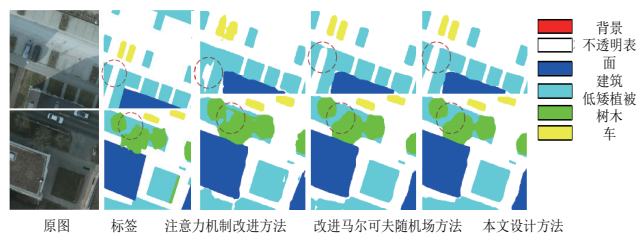
$$U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{A_i + C_i + D_i} \quad (11)$$

式中: A_i 代表第 i 类中被正确分类的像素数量; B_i 代表非第 i 类中被正确分类的像素数量; C_i 代表第 i 类中被错误分类为第 i 类的像素数量; D_i 代表第 i 类中被错误分类为其他类别的像素数量; n 代表类别种类。

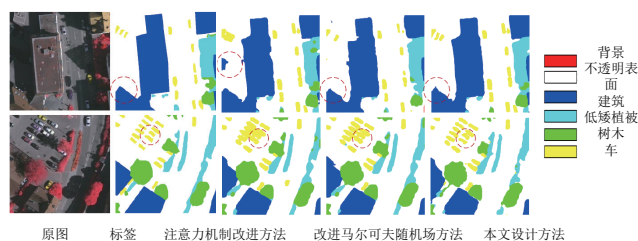
结合式 (10) 和式 (11) 可以看出, 全局准确率主要衡量整个测试集中, 正确分割的像素数量占总像素数量的比例。全局准确率越高, 表示分割方法的性能越好, 能够更准确地识别划分图像中的像素点类别。平均交并比主要体现理想分割结果与真实分割结果之间的重叠程度。平均交并比越高, 表示分割方法的性能越好, 能够更准确地划分图像中的分割区域。

2.3 测试结果与分析

在上述测试环境的基础上, 首先对比 3 种不同方法在 2 个测试数据集上进行图像分割的可视化效果, 具体如图 3 所示。



(a) Potsdam 数据集测试结果



(b) Vaihingen 数据集测试结果

图 3 图像分割可视化效果对比图

结合图3所示的测试结果可以看出,本文设计方法对于不同测试数据集对应图像的分割效果明显更加精准,对应的标签并未出现信息丢失的情况。

对具体分割效果进行细化分析,对应的量化指标如图4和图5所示。

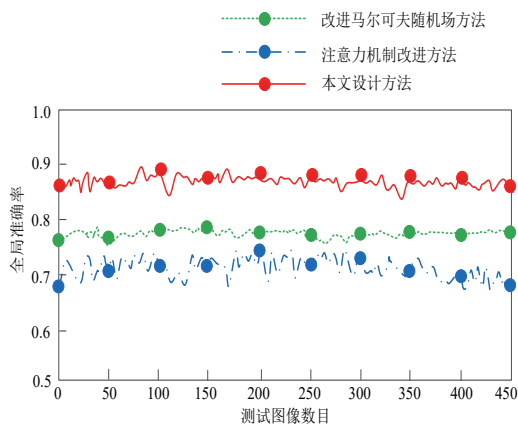


图4 不同测试方法全局准确率对比图

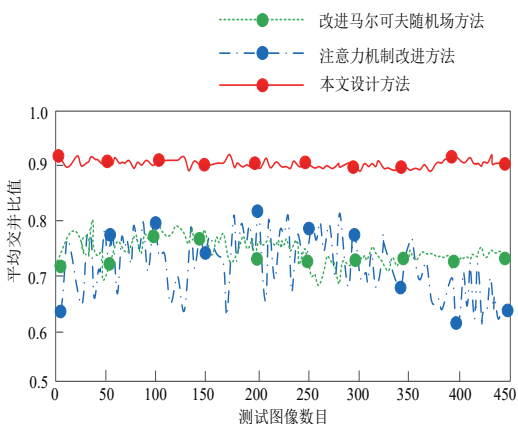


图5 不同测试方法平均交并对比图

结合图4和图5所示的测试结果对3种不同方法的具体分割效果进行分析,可以看出本文设计方法的分割效果最好,对应的全局准确率和平均交并比均明显高于对照组,且从自身角度进行纵向对比,对应的稳定性也相对较高。由此可以看出,本文设计方法可以实现对低照度遥感图像的精准分割处理。

3 结语

从军事侦察角度出发,快速准确地检测和分割飞机、车辆等目标对于军事行动的成功至关重要,可以为军事侦察和目标跟踪提供重要支持;从城市规划角度出发,遥感图像分割技术能够提取出城市中的地物信息和空间布局现状,对于城市规划和土地利用开发而言,具有重要的现实意义和指导价值;从环境监测角度出发,遥感图像分割技术能够用于监测水体、植被等环境要素的变化情况,为环境保护和资源管

理提供有力支持。本文提出一种基于深度学习的低照度遥感图像智能分割方法,对原始低照度图像进行增强处理后,结合多层卷积和池化,对图像中的深层次特征加以分析和提取,实现了有效应对复杂环境对图像分割影响的目的,能够更准确地提取出不同地物边界和特征。

参考文献:

- [1] 侯艳丽,盖锡林.基于注意力机制改进的DeepLabV3+遥感图像分割算法[J].微电子学与计算机,2024,41(8):53-61.
- [2] 贾克斌,何岩,魏之皓.融合多尺度特征的高分辨率森林遥感图像分割[J].北京工业大学学报,2024,50(9):1089-1099.
- [3] 胡涛涛,李屹旭,张俊.基于注意力机制改进的Segformer遥感图像语义分割方法[J].激光杂志,2024,45(7):130-136.
- [4] 袁鹏,刘芳,朱永泰,等.一种改进的马尔可夫随机场遥感图像分割方法[J].地理空间信息,2024,22(6):34-38.
- [5] 张银胜,吉茹,童俊毅,等.基于双模态高效特征学习的高分辨率遥感图像分割[J].遥感学报,2024,28(2):481-493.
- [6] 武锦龙,吴虹麒,李浩,等.基于改进DeepLabV3+的荞麦苗期无人机遥感图像分割识别方法研究[J].农业机械学报,2024,55(5):186-195.
- [7] 李林娟,贺赞,谢刚,等.跨层细节感知和分组注意力引导的遥感图像语义分割[J].中国图象图形学报,2024,29(5):1277-1290.
- [8] 李泽钰,黎立,刘娜,等.基于多源数据和图像分割的地表基质遥感解译方法:以垫江北部地区为例[J].测绘通报,2024(S1):166-171.
- [9] 马翔悦,徐金东,倪梦莹.基于多尺度特征模糊卷积神经网络的遥感图像分割[J].山东大学学报(工学版),2024,54(3):44-54.
- [10] 吴嘉昕,王小鹏,刘扬洋.子空间与KL信息结合的FCM多光谱遥感图像分割[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(8):23-33.

【作者简介】

兰海涛(1977—),男,四川成都人,本科,副教授,研究方向:软件开发。

吴文玲(1994—),女,四川成都人,硕士研究生,讲师,研究方向:教育数据挖掘和图形、图像处理。

(收稿日期:2024-11-14)

基于 PYNQ 的轻量化实时目标检测技术

郭向楠¹
GUO Xiangnan

摘要

针对边缘端设备在资源受限条件下部署深度学习目标检测算法的需求,文章提出了一种基于 PYNQ (python productivity for zynq) 框架的轻量化实时目标检测技术,开展 YOLOv5n 目标检测算法研究及适应 FPGA 部署的模型优化,完成 PYNQ 环境下的软硬件协同设计,并在 ZCU104 开发板上完成了系统验证。结果表明,所提技术能够实现轻量化深度学习目标检测算法的快速部署与验证,具有良好的检测精度与实时性,能效比达到 10.5 帧/(s·W),在低成本实时目标检测领域具有较高的应用价值。

关键词

目标检测; PYNQ; YOLOv5n; 轻量化; 边缘端设备

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.009

0 引言

近年来,人工智能技术在全球范围内飞速发展,已从科技前沿探索阶段,逐步迈入规模化应用阶段。计算机视觉作为人工智能领域的重要分支,在工业检测、医学分析、安防监控及智能驾驶等众多领域发挥着重要作用^[1]。目标检测是计算机视觉的核心任务之一,主要用于识别图像或视频中目标的类别及位置。传统目标检测算法主要通过人工特征提取结合经典机器学习分类器实现^[2]。借助深度学习技术,新型目标检测算法开始具备自动特征提取及训练能力,发展出两阶段检测(two stage detection)、单阶段检测(one stage detection)及无锚框检测(anchor free detection)等多种类型^[3-5]。深度学习目标检测算法相对于传统算法在复杂场景检测精度及新任务的适应能力上具有较大的优势,但由于其处理流程复杂,对硬件及数据的要求较高,在实践应用中需要综合考虑性能、资源及成本等多个因素,同时针对具体使用场景进行优化。本文提出一种基于 PYNQ (python productivity for zynq) 框架的轻量化实时目标检测技术,开展 YOLOv5n 目标检测算法研究、适应 FPGA 部署的模型优化及 PYNQ 环境下软硬件协同设计,实现深度学习目标检测算法在边缘端设备轻量化、高效部署。

1 总体方案

围绕 PYNQ 框架实现深度学习目标检测算法开展总体方案设计。PYNQ 是 XILINX 公司推出的一种开源框架,将 FPGA 的硬件可编程特性与 ARM 的软件灵活性相结合,便于嵌入式系统的敏捷开发。PYNQ 在硬件层(PL 端)将

FPGA 实现的逻辑功能封装成 IP 核形式,在软件层(PS 端)运行 Linux 系统,同时提供可视化交互式开发环境 Jupyter Notebook,使用 Python 调用应用程序编程接口(application programming interface, API)对硬件进行操作。其系统架构如图 1 所示。

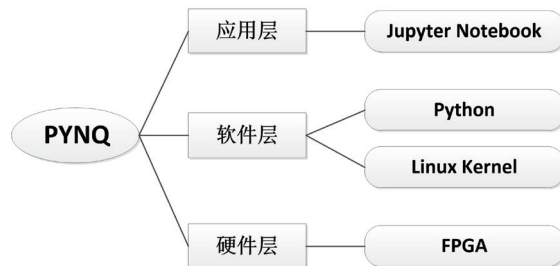


图 1 PYNQ 系统架构

硬件采用 PYNQ 支持的 XILINX ZCU104 开发板,利用四核 Arm Cortex-A53 及双核 Cortex-R5 处理器进行通用计算机逻辑控制,配合具备高密度逻辑资源和 DSP 模块的 UltraScale+ FPGA 进行神经网络加速,同时利用大容量高速 DDR4 及丰富的外设接口实现数据交互,能够满足深度学习目标检测算法的硬件需求。

算法选择上主要考虑边缘端设备的使用需求及部署难度。在各类算法中,以方向梯度直方图(histogram of oriented gradients, HOG)+支持向量机(support vector machine, SVM)组合为代表的传统算法对先验知识依赖高,检测精度及适用场景有限^[6]。以更快速局部卷积神经网络(Faster R-CNN)为代表的两阶段检测算法将目标检测拆分为候选区域生成及分类两个独立阶段,通过高质量筛选降低干扰,比较适合复杂背景及小目标检测^[7],但整体计算量较大,延迟偏高。以 CenterNet 为代表的无锚框检测算法利用关键点直接预测边界

1. 中国空空导弹研究院 河南洛阳 471000

框,降低后处理难度^[8],但相关算子对FPGA的支持性不好。相对而言,YOLO(you only look once)系列的单阶段检测算法无须预先生成候选区域,通过单次向前传播直接预测目标分类及位置,尤其适合应用于实时目标检测^[9]。自2016年诞生以来,YOLO算法不断更新迭代。YOLOv1算法将图像划分为众多网格,通过每个网格预测多个边界框及置信度,其特点是模型简单且易于训练,但处理小目标及复杂场景能力较弱。YOLOv2算法引入锚框机制,支持多尺度训练提升定位精度,但模型复杂性有所提高。YOLOv3算法开始使用Darknet-53主干网络,引入多尺度预测机制,在速度和精度上取得了较好的平衡。YOLOv4算法升级了CSPDarknet53主干网络,减少计算量的同时提升训练效果。YOLOv5算法基于PyTorch框架实现,开始向高速与轻量化发展,尤其适合移动设备及嵌入式系统部署^[10]。因此,本文采用YOLOv5系列中最轻量级YOLOv5n版本,参数量仅1.7MB,计算量约0.5BFLOPs,同时具有良好的检测精度,适合边缘端设备部署。

2 模型转换与优化

YOLOv5n模型主要网络结构如图2所示。其中主干网络Backbone通过卷积(Conv)、跨阶段残差(C3中包含)及空间金字塔快速池化(SPPF)操作提取多尺度特征,颈部网络Neck通过上采样(Upsample)、通道连接(Concat)及跨阶段残差(C3中包含)进行多尺度特征图融合,检测头Head最终生成边界框、类别概率及置信度等检测结果。

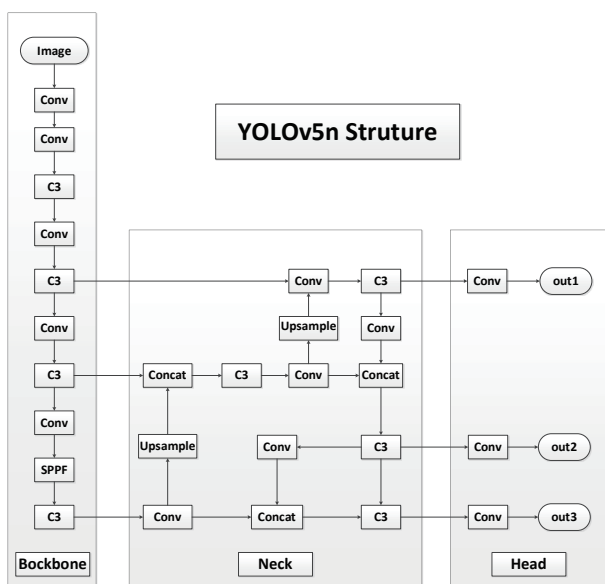


图2 YOLOv5n 网络结构

从网络结构中可以看出,由主干网络及颈部网络完成的特征提取及融合部分存在大量卷积及乘加操作,适合FPGA通过并行处理进行加速,检测头部分较为复杂的特征检测可

由处理器协助完成。

由于YOLOv5n官方开源预训练模型为PyTorch格式,为便于后续FPGA编译及PYNQ环境运行,首先需要将模型向Onnx格式转换。由于Onnx标准算子库不支持SiLU(sigmoid linear unit)激活函数,将模型中全部SiLU函数用Sigmoid函数加Mul乘法器进行替代。卷积层后的BatchNorm2d节点用于加速训练收敛并提升模型泛化能力,用于推理时,将其与之前的卷积层融合为带偏置的卷积,可以减少模型参数量,降低推理时的内存占用,同时不影响模型精度。颈部网络中,用于放大特征图的上采样部分在Onnx中映射为Resize节点,同时将C3结构中的残差连接映射为Add节点。转换前后模型局部对比如图3所示。

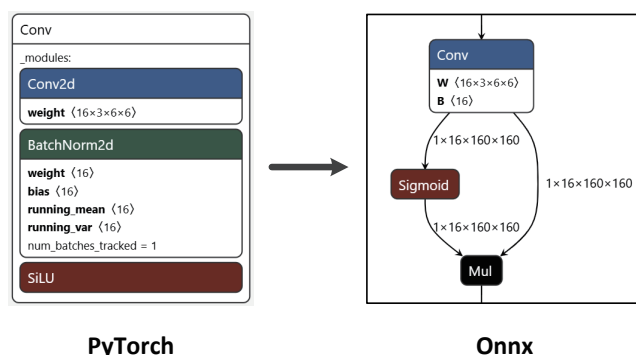


图3 由PyTorch到Onnx模型转换

转换完成后,对模型进行下一步的优化处理。由于本文仅使用FPGA实现主干网络及颈部网络的特征提取部分,检测部分由处理器完成,因此需要将模型进行分割。通过模型可视化工具导入转换后Onnx格式的模型文件,可以查看具体网络结构及节点。找到网络中最后一个卷积节点model.24,可以此为特征提取与特征检测分界点将模型网络分割,如图4所示。

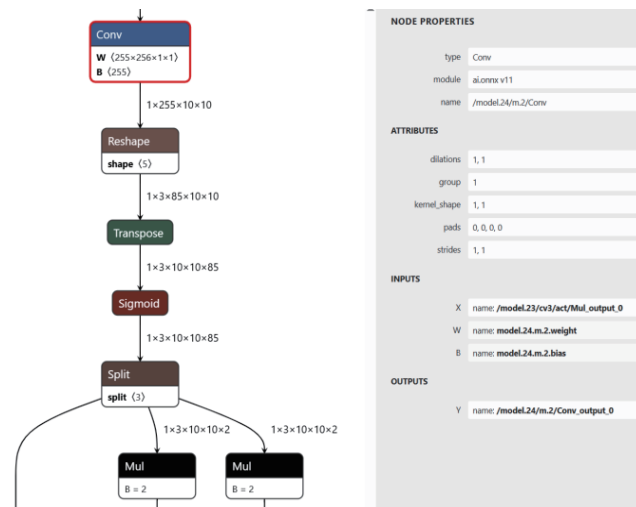


图4 特征提取与特征检测分界点

使用Graphsurgeon库对模型进行编辑,将model.24后的

模型保存为检测头模型, 供处理器使用。同时将 model.24 及之前模型调整输入输出通道的位宽与 FPGA 设计匹配, 生成新的特征提取模型。

3 PYNQ 环境下的软硬件协同设计

为了在 FPGA 上实现特征提取模型的功能, 需要将 Onnx 模型转换为 FPGA 硬件描述文件。首先使用 Parser 库导入特征提取模型进行解析, 同时导入 ZCU104 开发板的硬件配置 toml 文件, 获取 FPGA 硬件资源信息。为确保模型能在 FPGA 上正确部署并提高运行效率, 需要对关键参数进一步优化, 如重新设定输入输出层的位宽及精度, 调整不同卷积层的并行计算单元数量以优化数据流, 根据卷积层参数文件大小分配不同类型的存储资源, 导出模型硬件描述文件、参数文件及查找表, 最终通过 FPGA 工具链生成 BIT 流文件。

在 ZCU104 开发板上配置好 PYNQ 环境, 通过网线与上位机连接, 使用 Jupyter Notebook 浏览器工具将所需文件导入开发板中。通过板上 USB 接口连接外置摄像头, 获取实时图像输入。PYNQ 环境搭建如图 5 所示。



图 5 基于 ZCU104 开发板搭建 PYNQ 环境

PYNQ 的工作流程主要分为初始化配置、图像输入及预处理、特征提取、图像后处理及可视化等。开发板上电后, 从 SD 卡加载预编译的 PYNQ 镜像文件, 进入初始化配置阶段, 完成相关依赖库调用、文件路径设置、配置参数读取及模型初始化等操作。通过硬件驱动模块控制 FPGA 预加载 Bit 流及参数文件, 激活 FPGA 特征提取功能。图像输入及预处理阶段, 调用 USB 摄像头进行实时图像采集, 同时将图像进行尺寸缩放、通道转换及归一化, 确保 FPGA 输入接口的适配。测试时也可修改配置文件, 使用存储的图像作为输入。特征提取阶段, 通过 FPGA 接口程序调配硬件资源, 管理数据传输通道, 使图像在 FPGA 中完成特征提取功能, 并将结果输入处理器运行的检测头模型进一步推理。图像后处理阶段, 对模型推理结果进行非极大值抑制 (non maximum suppression, NMS), 采用置信度阈值过滤低概率的预测框, 采用交并比阈值控制重叠框的抑制程度, 最终输出预测结果。为便于查看目标检测结果, 通过可视化处理在原始输入图像

上绘制最终预测的类别名称及检测框, 同时显示图像处理的总延时。

4 系统验证

使用 COCO128 标准数据集对本文方法与 YOLOv5n 完整 Onnx 模型直接推理方案的检测精度进行对比, 结果如表 1 所示。

表 1 检测精度对比

	Precision	Recall	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95
FPGA	0.591 4	0.344 9	0.372 8	0.223 6
Onnx	0.572 6	0.443 5	0.469 1	0.311 2

其中, 查准率 Precision 代表预测为真样本的正确比例, 查全率 Recall 代表实际为真的样本被正确预测的比例, mAP 代表不同 IoU 阈值下全部类别预测的平均精度。结果表明, FPGA 正确实施了特征提取功能, 在查准率上略微提高, 在查全率及平均精度上有所降低, 与模型转换后的精度下降相关, 后续可通过训练及参数调整进一步提高精度。

对单幅图片进行目标检测测试的结果如图 6 所示。结果表明, 本文方法对复杂场景重合类目标的检测精度良好, 单幅图像推理延迟约 61 ms, 相比 Onnx 模型直接推理延迟降低一半以上, FPGA 并行处理的推理加速效果明显。



图 6 单幅图片目标检测效果

对 USB 摄像头采集图像进行实时目标检测结果如图 7 所示, 能够正确识别常用物品的类别, 检测框位置准确, 处理延迟在 19 ms 左右, 具有较好的实时性。文中使用的 ZCU104 开发板运行功耗约 5 W, 能效比达到 10.5 帧/(s·W), 能够满足边缘端设备的低功耗需求。

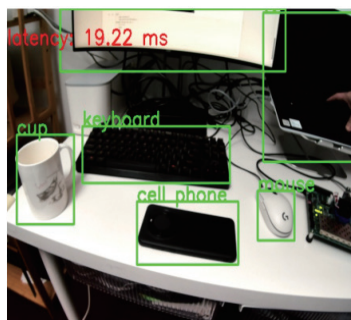


图 7 摄像头采集图像实时检测效果

(下转第 50 页)

工程建设项目审批系统 API 网关设计

方钟亮¹

FANG Zhongliang

摘要

随着数字政府建设深入推进,跨部门、跨层级业务信息系统间协同交互显著增强。随着系统规模不断扩大,传统单体架构模式下的接口集成方式出现局限性,包括数据泄露、维护成本高、无法统一管理。围绕工程建设项目审批系统建设,文章提出通过部署 API 网关来实现 API 接口调用的鉴权服务、加密传输、流量管理和日志管理,对日志数据分析和基于 APIfox 软件对原始接口模拟测试来评估 API 网关开销。通过 API 网关部署可以加强系统间对接的安全性和接口调用的统一管理,为数字政府建设工作提供了一定的参考经验。

关键词

工程建设项目审批; API 网关; 鉴权服务; 加密传输; 日志管理

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.010

0 引言

近年来,政务服务管理部门不断建设完善各类信息系统,在审批服务领域进行了多项改革,包括工程建设审批制度改革、一件事一次办、电子证照互认共享等^[1-2]。

不同的系统所面向的业务场景、技术架构和标准各有区别。传统系统建设为单体模式^[3],系统间交互基于 API 接口的点对点通信,随着需求的增多和业务的扩展,往往伴随数据泄露等安全风险,且维护成本高,并缺少有效的接口调用管理功能。

《关于加强数字政府建设的指导意见》中,明确提出加强系统对接整合、确保数据安全、促进跨业务协同是数字政府建设的目标之一^[4]。本文面向工程建设项目审批管理系统,在服务多方业务功能对接中,将 API 网关和系统建设相结合,实现安全保障和有效管控,促进可靠审批数据应用和功能扩展。

1 建设背景

根据改革要求,江苏省昆山市积极构建工程建设项目审批管理系统(简称工改系统),有效推进审批流程优化与政务服务数字化转型。该系统面向工程建设领域,服务企业工程项目报建,涵盖从立项用地规划到项目竣工验收各阶段的全流程审批功能^[5],是数据汇聚和审批业务协同的枢纽平台。但在具体工作中第三方应用需要对接工改系统,涉及政务服务网旗舰店专区、市民服务 APP、省级条线系统、纪检监察管理、部门个性化业务、数据底座公共基础能力等。

传统的单模块点对点 API 对接,面临如下问题:

(1) 安全问题凸显。针对 API 接口攻击,包括身份认证、未授权访问、数据泄露、注入问题等^[6],严重影响政务信息系统安全。

(2) 维护成本高。以事件为驱动建设 API,各类接口开发、测试和维护呈“碎片化”现象。

(3) 缺少管理功能。无法对 API 调用、流量监控、日志审计等方面,形成统一的管理和数据分析功能。

本文以昆山市工改系统为例,探讨了 API 网关在系统设计中的应用,实现客户端系统在接口调用时的鉴权管理、加密传输、日志分析等功能,加强了审批数据共享的安全性和应用拓展规范化管理。

2 总体设计

2.1 设计思路

(1) 授权模式:目前网关授权模式主要有 OAuth2.0 和 APIKeys 两种方式^[7-8]。OAuth2.0 是一套完备的框架协议,安全性较高,但系统部署实现复杂,使用中存在用户发起认证请求操作的环节,普遍应用在互联网环境的 OpenAPI 调用,如谷歌、脸书等登录服务。APIKeys 授权应用在可信任网络环境,同受信任应用对接,部署实施相对简单,使用中无须用户进行认证操作,只需通过客户端密钥保存、定期更新和 IP 绑定等措施来确保安全,主要面向企业级 API 管理,如阿里云、腾讯云等环境。从应用场景分析,工改系统主要功能是处理审批业务,并提供各类审批服务政务类应用接入,服务器部署在电子政务网和政务云。系统间调用通过服务器之间通信实现,且需要业务管理部门协商确认,因此选择 APIKeys 授权模式开展服务鉴权。

1. 苏州市公共资源交易中心昆山分中心 江苏昆山 215300

(2) 数据加密: 在通过授权接入“工改”平台后, 为确保数据传输安全, 在客户端和 API 网关之间的数据传输以双向加解密和数字签名作为保障, 主要采用 SM2 椭圆曲线公钥算法。

(3) 日志管理: API 接口产生的各类访问日志需要进行存储管理, 用于后续分析监管。Elasticsearch 是在 Apache Lucene 基础上一个分布式实时文档存储库, 支持 RESTful API 的搜索引擎^[9-10]。工改平台的日志管理利用 Elasticsearch 进行部署。

2.2 总体架构

系统的设计包括后端服务、API 网关、前端系统对接三部分。其中, 后端服务部分是平台的支撑, 涉及基础设施、数据管理和工改业务, 主要面向审批人员实现工程建设项目行政审批、数据汇聚分析等功能; 中间层是 API 网关, 连接前端系统对接和后端服务, 提供包括接口审计、接口鉴权、数据加解密、限流处理、熔断处理、监控告警等功能; 前端系统对接部分主要面向报建单位、相关业务监管部门建设各类服务应用, 统一通过 API 网关来访问后端服务, 实现数据的共享应用, 系统的总体设计架构如图 1 所示。

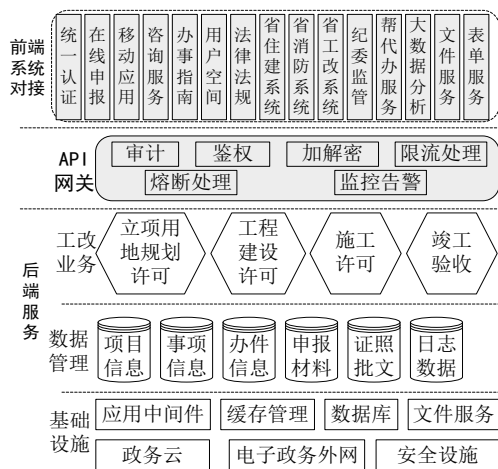


图 1 总体架构

2.3 业务流程

API 网关在应用过程中主要涉及网关应用配置和前端系统调用两部分。对于提供外接服务的后端应用, 首先需要在 API 网关进行注册, 登记服务名称、生成标识、创建网关密钥对和数据密钥对, 分别应用于前端系统调用时的鉴权和数据传输服务, 并提供更新替换功能。在注册同时需完成接口的路径配置, 用于接口地址重定向后, 可拼接生成新访问地址。其次是接口设计规范导入, 在此通过 Swagger 规范^[11], 支持 API 对接和 JSON 文件导入方式, 完成后端应用接口规范在网关同步。最后是网关接口功能配置, 包括鉴权、加密、调试、流量和日志统计等功能, 配置流程如图 2 所示。

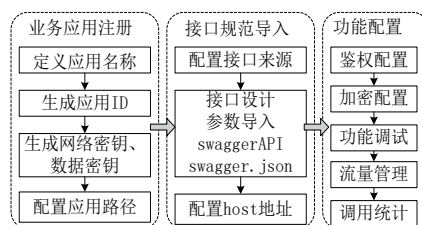


图 2 网关配置

调用 API 网关的流程, 首先, 基于网关密钥, 对 API 进行鉴权申请, 获取票据 ticket。然后, 应用数据密钥加密入参数信息, 同 ticket 一起发送给 API 网关, 网关审核后, 解密请求参数, 路由至后端服务接口, 对获取的数据加密后返回客户端, 客户端对得到的密文再进行解密展示, 网关处理日志将存储到 Elasticsearch 进行统一管理。系统的调用流程如图 3 所示。

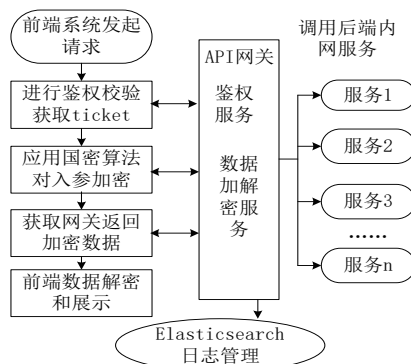


图 3 网关调用流程

3 主要功能设计

3.1 接口鉴权

API 网关需对接口调用进行认证管理, 按客户端分配认证权限, 鉴权过程基于国密算法开展签名和验证, 流程如图 4 所示。

(1) 网关应用注册时, 创建对应客户端标识 ID 和网关密钥对, 并分配至对应客户端系统进行保存, 密钥对保持定期更新。

(2) 客户端系统在发起网关接口调用请求前, 需将自己的请求参数 param 用 SM2 进行签名, 会同客户端标识和参数一起发送给 API 网关。

(3) API 网关进行对客户端标识 ID 和签名进行验证, 通过后用 SM3 对参数进行 hash 处理, 再通过字符串方式拼接客户端 ID 和请求参数, 用 SM2 方式进行加密形成票据 ticket, 返回客户端系统, 同时在缓存数据库中记录票据生成时间戳 timestamp。

ticket=SM2(STR(clientId+', '+SM3(param)+'+', '+QueryType), PublicKey)

(4) 客户端系统获取票据后，再次发送请求参数，并将票据一起发送给 API 网关。后者对票据进行验证，先是判断时间戳有效期，系统设置为 2 min，超期则访问无效，未超期则解码票据，对本次提交参数进行 SM3 验证比对，验证成功则放行调用，否则调用失败。

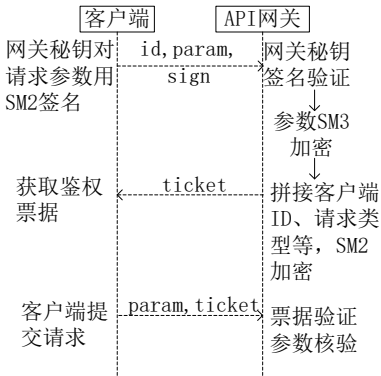


图 4 鉴权流程

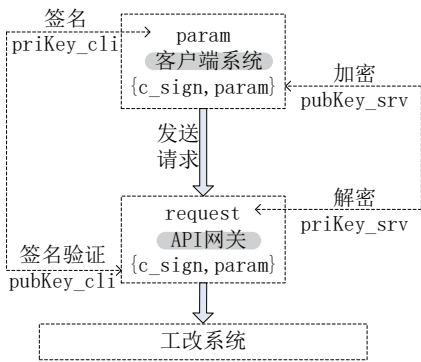
3.2 安全传输

为保障数据安全，在客户端系统和 API 网关之前建设了加密传输功能。在应用接口注册配置过程中，API 网关为每个接口基于 SM2 算法创建两套密钥，定义为客户端密钥 (pubKey_cli, priKey_cli) 和服务端密钥 (pubKey_srv, priKey_srv)，并对前端系统进行提前分配告知。在数据传输中，客户端系统保存客户端私钥和服务端公钥，API 网关则保存客户端公钥和服务端私钥，通过使用不同密钥对进行加密和签名来提升数据传输的安全性。传输过程分为客户端系统请求发送和 API 网关响应值返回两个阶段，如图 5 所示。

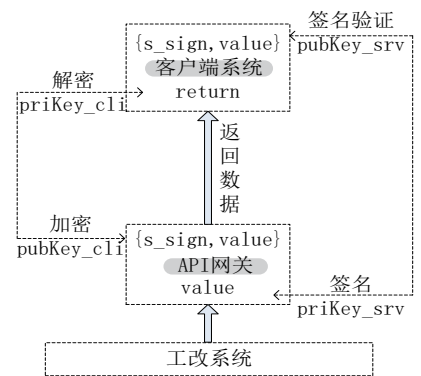
(1) 客户端请求传输：客户端系统在需向 API 网关发送请求过程中，首先利用客户端密钥的私钥 priKey_cli 对请求参数 param 进行签名，形成签名值 c_sign，再用服务端密钥的公钥 pubKey_srv 对请求参数和签名值一起进行加密，形成加密字符串 request 发送 API 网关；API 网关在接收到客户端发送过来的请求信息，先利用服务端密钥私钥 priKey_srv 进行解密，获取请求参数 param 和签名值 c_sign，再用客户端公钥 pubKey_cli 进对参数和签名进行验证。通过验证后，再将请求参数路由至后端接口处理。

(2) API 网关响应传输：后端系统在完成前端请求处理后形成返回值，由 API 网关加密处理后发送客户端系统，首先利用服务端私钥 priKey_srv 对返回值 value 进行签名，形成签名值 s_sign，再用客户端公钥 pubKey_cli 对签名值和返回值一起进行加密，形成返回字符串 return 发送客户端系统；客户端系统对获取的返回值先利用客户端私钥 priKey_cli 对返回字符串解密，获取返回值 value 和服务端签名 s_sign，再用服务端公钥 pubKey_srv 对两者进行签名验证，验证通过后

由系统展示。



(a) 请求传输



(b) 响应传输

图 5 安全传输流程

3.3 流量管理

API 网关对于接口调用流量管理，包括了限流处理、熔断处理和监控告警：

(1) 限流处理，为避免工改系统 API 接口服务的过高负载，防止接口被过度调用，系统提供限流设置，可限定对一个客户端系统在规定时间内，调用某个特定 API 服务的次数，实际工作中根据 API 接口使用特性进行分别设置，超过调用次数则提示告警信息并限制访问；

(2) 熔断处理，在 API 接口服务处于繁忙状态，对接口调用连续出现超时，为防止后续的请求调用给系统增加负载，此时网关系统会启动熔断机制，比如请求超时 5 次以后，熔断 3 min，在 3 min 内请求该接口都会提示：“接口暂时无法访问，请稍后再试”；

(3) 监控告警，为使接口服务在发生异常时，能够及时告知技术人员，API 网关系统开展钉钉 APP 对接，将异常信息实时推送给技术人员，后者可以及时进行故障排查。

3.4 日志管理

3.4.1 网关日志索引

《互联网政务应用安全管理规定》要求网络系统日志保

留不少于 1 年^[12]。API 网关负责将请求信息和响应信息中的关键数据以日志文件的形进行保存，日志以 JSON 文件格式编制，具备一定的扩展性和通用性。一次请求和对应的反馈响应数据组成一个独立的日志文件，存储在 Elasticsearch 搜索引擎中^[13]，日志索引主要数据格式设计如下：

```
{
  "clientAddress": " 客户端地址 ",
  "clientId": " 客户端编号 ",
  "clientName": " 客户端名称 ",
  "requestPath": " 请求路径 ",
  "requestTime": " 请求时间 ",
  "routeAddress": " 路由目标地址 ",
  "routeName": " 调用资源名称 ",
  "method": " 请求方式 ",
  "projectCode": " 工程项目代码 ",
  "requestBody": " 请求 body 内容 ",
  "requestParam": " 请求参数 ",
  "encryptRequestBody": " 请求 body 密文 ",
  "encryptRequestParam": " 请求参数密文 ",
  "requestHeader": " 请求头 "
  {
    "host": " 服务端主机地址 ",
    "ticket": " 票据 ",
    "sign": " 签名 ",
  }
  "encryptResponseBody": " 响应密文 ",
  "responseBody": " 响应明文 ",
  "handlerSituation": " 服务器状态 ",
  "responseContentType": " 响应类型 ",
  "responseStatus": " 响应状态 ",
  "responseTime": " 响应时间 "
}
```

3.4.2 网关日志审计

日志审计功能主要对接口调用产生的日志，通过 API 网关读取 Elasticsearch 引擎数据，开展综合查询，并提供日志全部索引字段详情信息的展示。为应对多种查询场景需求，日志审计功能提供多方面的组合查询：

（1）基础查询，包括按时间段、接口资源路径、客户端系统名称查询。

（2）状态选择，包括服务响应状态：请求成功、重定向、客户端错误、服务端错误；请求方式：GET、POST、OPTION、PUT、DELETE；网关请求失败类型：路由失败、身份认证失败、请求缓存失败、请求限流、服务调用失败。

（3）数据更新，对日志审计查询结果可设定一个更新时间，默认 5 min 进行自动更新。

3.4.3 动态数据监控

通过实时检索 Elasticsearch 引擎日志数据，API 网关系统提供了多个维度的动态数据监控功能，通过图表方式予以展示，包括折线图、柱状图、条形图，可提供直观性能指标。监控功能包含实时流量、日访问量、接口资源访问量、项目访问量、接口异常率和 IP 访问量，功能示意如图 6 所示。实时流量监控是以分钟为间隔，动态统计每分钟网关被访问次数，页面每分钟自动更新一次，统计近 10 min 数据，并以颜色区分不同数值范围，图表实例如图 7 所示；日访问量则是统计每日网关访问总次数，统计近一周数据；IP 访问量统计指定时间段内客户端系统 IP 地址的访问次数，默认为一天；接口访问量，则是统计资源接口被访问的次数；项目访问量，是针对 API 网关除提供工改系统接口外，同时提供其他项目的接口服务，此时以项目为单位，统计被调用次数；接口异常率，是对接口调用时发生故障调用失败的比率统计。

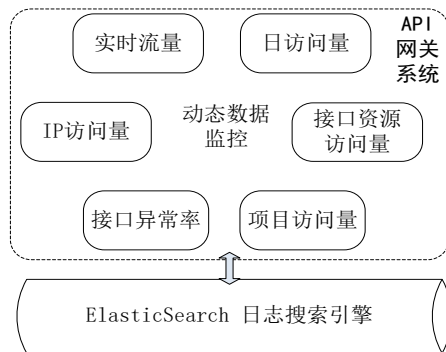


图 6 动态数据监控功能



图 7 实时流量监控图表

4 性能测试

4.1 测试环境

本文利用电脑 PC 端作为测试客户端，CPU 为 Intel i5-

4570 320 GHz，内存 16 GB，安装操作系统 Windows7 x64、数据库 MySQL 5.7.44-log 和管理工具 Navicat Premium 15、编程语言 Python3.8，API 接口测试工具为 Apifox2.6.31。

4.2 数据集和测试方法

本文对 Elasticsearch 搜索引擎所记录的一个月的日志作为数据集进行统计，分析接口资源调用量前 7 个接口。分析过程中，需要对日志中的属性字段进行计算，为便于实时利用 MySQL 作为辅助数据库。通过 Elasticsearch 的字段检索和共享导出功能，将请求时间 reqesTime、响应时间 responseTime、接口资源名称 routeName 和请求路线 requestPath 等字段信息导出成 csv 文件。利用 Python 读取 csv 文件中的数据，通过参数类型转换将日志读取的文本类型时间转换成 datetime 日期型，再用日期运算来获得每次接口调用的时间开销，并将所有的参数存储至 MySQL 数据库，通过 SQL 的去重聚类和平均值计算，获取各接口的调用次数和平均总时间耗，如表 1 所示。

表 1 2024-11 月接口调用前 7 名

序号	接口资源	调用 / 次	总时耗 /ms
1	获取上传材料	288 183	209
2	获取字典列表	192 360	48
3	获取验证码	21 848	139
4	获取企业项目	20 991	149
5	我的空间首页	18 256	55
6	办事指南清单	15 613	126
7	获取事项列表	13 707	396

通过表 1 可知，计算接口总时耗是包括 API 网关和工改系统原始接口处理开销，需要分析 API 网关开销对接口调用的整体开销的影响。本文利用 Apifox 软件模拟客户端对系统原始接口调用，计算在相同参数环境下原始接口的响应开销。主要环节：

- (1) 在已有的网关日志中根据接口资源分类，随机选择访问日志，提取请求 IP、请求路径、提交参数等数据。
- (2) 在 Apifox 中配置每个测试接口的原子操作，根据日志中提取数据，拼接原始接口调用地址和请求参数。
- (3) 利用 Apifox 平台构建自动化测试场景，设置循环数、选定测试接口、休眠时间、用户数和并发数，本文的循环数设置是参照日访问量，由表 1 中的接口月访问量计算而得，循环休眠时间设定为 3 s，模拟单用户访问，未设置并发数。
- (4) 运行测试程序，获取测试结果报告，测试流程如

图 8 所示。

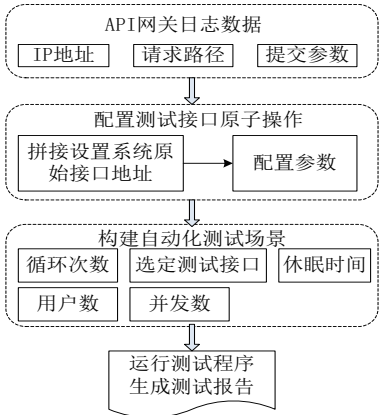


图 8 测试流程

4.3 测试结果

根据测试报告，获得每个接口资源在不经 API 网关处理时，直接被调用的平均响应时耗，用表 1 中的平均总时耗与之求差值，来估算 API 网关在处理接口调用中自身的时间开销，结果如图 9 所示。从结果分析，网关对各接口调用的处理开销最大在 123 ms，7 类接口资源的网关处理平均开销约 57 ms。从实验结果可以看出，在部署 API 网关后接口调用会产生一定时间开销，但这部分时间开销值较小，在实际运行中并不会影响业务系统操作体验，属于可接受范围。

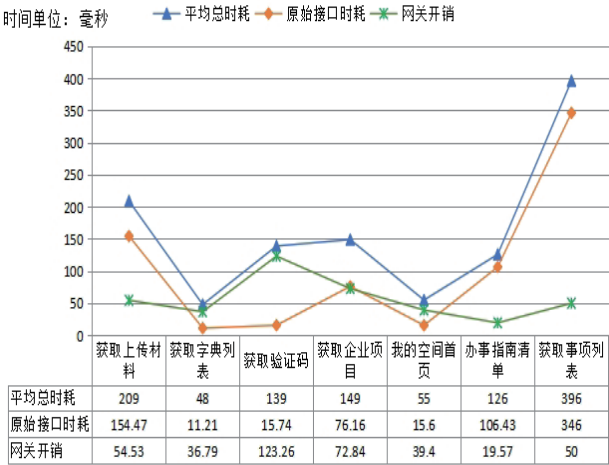


图 9 测试结果

5 结语

本文介绍了在工程建设项目审批系统建设过程中，通过部署 API 网关开展系统对接。系统应用了 APIKeys 授权模式，通过国密算法实现了加密传输，开发了流量管理功能，并基于 Elasticsearch 引擎开展了日志管理，实现了日志审计和监控。通过模拟客户端系统对原始接口的调用实验，评估了部署 API 网关后的开销对系统使用的影响在可接受范围。API 网关的应用为审批系统同第三方应用对接提供了安全保障和

统一规范的监控管理机制。下一步,API 网关将有序拓展应用场景,如一件事系统、电子证照共享平台、不动产登记等各类政务服务系统,将统一基于 API 网关提供接口调用服务,促进跨系统间安全有效的接口调用。

参考文献:

[1] 国务院关于进一步优化政务服务提升行政效能推动“高效办成一件事”的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2024(3): 15-22.

[2] 国务院办公厅关于加快推进电子证照扩大应用领域和全国互通互认的意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2022(7): 31-35.

[3] 卜意磊. 微服务架构应用于市场监管应用支撑中心的研究[J]. 信息系统工程, 2020(12):72-73.

[4] 国务院关于加强数字政府建设的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2022(19):12-20.

[5] 方钟亮. 工程建设项目审批监管系统设计[J]. 现代信息技术, 2024, 8(22):151-155.

[6] 何平, 刘晓毅, 王进, 等. 容器云的 API 安全技术研究[J]. 保密科学技术, 2022(7):41-46.

(上接第 44 页)

5 结语

本文设计并实现了一种基于 PYNQ 环境的轻量化实时目标检测技术,开展了 YOLOv5n 目标检测算法研究及适应 FPGA 部署的模型优化,完成 PYNQ 环境下的软硬件协同设计,并在 ZCU104 开发板上完成了系统验证。结果表明,本方案能够实现轻量化深度学习目标检测算法的快速部署与验证,具有良好的检测精度与实时性,满足边缘端设备的低功耗需求,在低成本实时目标检测领域具有较高的应用价值。

参考文献:

[1] 卢宏涛,张秦川. 深度卷积神经网络在计算机视觉中的应用研究综述[J]. 数据采集与处理, 2016,31(1):1-17.

[2] 李柯泉,陈燕,刘佳晨,等. 基于深度学习的目标检测算法综述[J]. 计算机工程, 2022,48(7):1-12.

[3] 陈超,齐峰. 卷积神经网络的发展及其在计算机视觉领域中的应用综述[J]. 计算机科学, 2019,46(3):63-73.

[4] 陈科圻,朱志亮,邓小明,等. 多尺度目标检测的深度学习研究综述[J]. 软件学报, 2021,32(4):1201-1227.

[7] 普拉巴斯. 西里瓦德纳. API 安全进阶基于 OAuth2.0 框架: 原书第 2 版 [M]. 李伟,译. 北京:机械工业出版社, 2022.

[8] 冯骐,沈富可. 高校能力开放平台中的 API 网关设计与实现[J]. 中国教育信息化, 2021(3):61-66.

[9] 崔庆才. Python3 网络爬虫开发实战: 第 2 版 [M]. 北京:人民邮电出版社, 2021.

[10] 钱红兵,李艳丽,张蕊. WebCollector 和 ElasticSearch 在高校网站群敏感词检测中的应用研究[J]. 电子设计工程, 2019, 27(24): 11-14.

[11] 王志军,姚文达. Web API 后端接口管理与应用[J]. 智能计算机与应用, 2024,14(5):247-251.

[12] 互联网政务应用安全管理规定[J]. 中华人民共和国公安部公报, 2024(3):7-11.

[13] 张虎,张秋萍. 基于 KONG 的 API 集成系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2019,29(8):102-106.

【作者简介】

方钟亮(1980—),男,江苏昆山人,硕士,高级工程师,研究方向:政务信息化建设。

(收稿日期:2024-12-18)

[5] 刘俊明,孟卫华. 基于深度学习的单阶段目标检测算法研究综述[J]. 航空兵器, 2020, 27(3): 44-53.

[6] 徐渊,许晓亮,李才年,等. 结合 SVM 分类器与 HOG 特征提取的行人检测[J]. 计算机工程, 2016, 42(1): 56-60.

[7] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2017,39(6):1137-1149.

[8] 郑婷婷,杨雪,戴阳. 基于关键点的 Anchor Free 目标检测模型综述[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(8): 1-8.

[9] 邵延华,张铎,楚红雨,等. 基于深度学习的 YOLO 目标检测综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(10): 3697-3708.

[10] 杨晓玲,江伟欣,袁浩然. 基于 YOLOv5 的交通标志识别检测[J]. 信息技术与信息化, 2021(4): 28-30.

【作者简介】

郭向楠(1988—),男,河南洛阳人,硕士,工程师,研究方向:嵌入式软件设计与测试。

(收稿日期:2025-02-20)

基于深度学习的车载视频图像动态识别算法与应用研究

郑爱玲¹ 许艳艳¹
ZHENG Ailing XU Yanyan

摘要

在道路环境错综复杂且干扰源众多的场景下, 车辆、行人、交通标志等物体之间的空间关系变得极为复杂。传统方法过度依赖基本的特征提取, 未能充分挖掘图像中物体间的空间关系信息, 难以精准捕捉不同物体间的相对位置、距离等空间特征。这使得模型在图像轮廓识别上精度欠佳, 难以准确把握目标的动态变化。鉴于此, 文章提出一种基于深度学习的动态识别算法研究。该方法先采用深度卷积神经网络(CNN)与循环神经网络(RNN)构建模型, 提取车载视频图像的空间与时序特征。然后融合深层语义与浅层细节信息, 增强检测性能, 实现实时目标检测与跟踪。最后引入图与通道注意力模块, 提升复杂环境下空间特征提取和动作特征表示能力, 实现视频图像动态识别。对比实验表明, 新算法在车载视频图像动态识别方面表现出较高的准确性, 显著提升了车辆行驶的安全性和智能化水平, 为车载视频图像动态识别提供了有效的技术手段, 具有重要的理论意义和实际应用价值。

关键词

深度学习; 车载视频; 视频图像; 特征融合; 动态识别

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.011

0 引言

随着科技的飞速发展, 自动驾驶技术已经成为汽车工业和人工智能领域的研究热点。而车载视频图像动态识别技术是自动驾驶技术的核心, 通过摄像头捕捉路况, 用算法处理视频图像, 为自动驾驶提供环境感知和决策支持。高效准确地提取视频信息, 辅助安全驾驶, 同时助力智能交通建设, 实现车辆信息共享和协同控制, 提高交通效率。同时, 该技术也应用于车辆防盗和追踪系统, 从而保障车辆安全。

目前, 已有多种车载视频图像动态识别算法被提出并应用于实际场景中, 为自动驾驶技术的发展提供了有力支持。例如, 张宗等人^[1]探讨了基于时空图卷积网络(STGCN)的视频图像人体动作轮廓动态识别方法。该研究利用 STGCN 算法对视频图像中人体动作的时空特征进行建模和识别, 取得了良好的效果。然而, 虽然 STGCN 能够处理人体动作的空间特征, 但道路场景中的空间关系更为复杂多样。STGCN 难以适应这种复杂的空间关系变化, 因为空间关系处理能力是基于人体动作相关的图结构设计的, 与道路场景中的物体空间关系结构不完全匹配, 进而导致在识别物体间空间特征

时精度欠佳。费春国等人^[2]则提出了一种基于动态衰减网络的图像识别方法。该方法通过引入动态衰减机制, 提高了模型对图像特征的提取能力和鲁棒性。但在处理道路环境复杂且干扰源众多的场景时, 无法精准地调整其识别过程, 从而难以持续准确地捕捉交通标志与其他物体之间的空间关系, 最终对识别精度产生影响。刘小溪等人^[3]提出针对路牌检测类别少的问题, 对 YOLOv3 进行轻量化改造, 提出了简化的 YOLOv3 (simplified YOLOv3, S-YOLOv3); 为了提高字符分类精度, 对 YOLOv3 进行特征融合策略改进, 提出高精度的字符分类 YOLOv3 (high precision character classification YOLOv3, HPCC-YOLOv3); 分别对 S-YOLOv3 与 HPCC-YOLOv3 进行训练与测试; 按照字符检测结果所处的位置进行字符聚类, 实现字符序列识别; 设计了由车载大恒水星相机, 计算机组成的图像采集, 车牌检测与字符识别, 但该方法主严重受到使用环境的影响。

基于上述分析, 本文提出一种基于深度学习的车载视频图像动态识别算法, 旨在克服传统方法在复杂道路环境下空间特征提取受限、人体动作特征表征能力不足及缺乏高效特征融合策略等挑战, 显著提升视频图像的动态识别性能。

1 基于深度学习的车载视频图像动态特征提取

车载视频图像由连续图像帧构成, 动态特征往往更能反映车辆和行人的运动状态、行为模式等关键信息。因此, 提

1. 郑州工业应用技术学院信息工程学院 河南郑州 451100

[基金项目] 教育部供需对接就业育人项目(2023122163922); 郑州工业应用技术学院 2024 年度省级工程技术研究中心开放课题支持项目(ETRC-240103)

取动态特征有助于识别模型更好地理解视频中的动态场景，提高识别和检测的准确性^[4]。为此，本文提出构建了一个结合 CNN 与 RNN 的深度学习模型。其中，CNN 擅长图像特征提取，RNN 能捕捉时序关系^[5]。结合两者，可全面提取车载视频图像的静态空间特征和帧间动态变化，为精准目标识别和动态跟踪奠定基础。

车载视频图像的本质是动态的，包含了丰富的时序信息，这些信息对于理解视频中的动态变化至关重要。CNN 的特征提取过程可以表示为：

$$F_{\text{CNN}}(x) = \sigma(W_{\text{conv}} \cdot x + b_{\text{conv}}) \quad (1)$$

式中： x 表示车载视频中经预处理后的某一帧图像； W_{conv} 表示卷积层权重； b_{conv} 表示卷积层偏置值； σ 表示激活函数。在 CNN 特征提取过程中，卷积操作的数学公式为：

$$z_{i,j,k} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x_{i+m,j+n} \cdot w_{m,n,k} + b_k \quad (2)$$

式中： $z_{i,j,k}$ 表示第 k 个卷积核在位置 (i,j) 的输出； $x_{i+m,j+n}$ 表示输入图像在位置 $(i+m,j+n)$ 的像素值； $w_{m,n,k}$ 表示第 k 个卷积核在位置 (m,n) 的权重； b_k 表示第 k 个卷积核的偏置。通过多层卷积和可能的池化操作，CNN 能够从图像中提取出高级的空间特征。

RNN 擅长处理时序数据，通过循环连接能够捕捉视频图像序列中的时间依赖性。RNN 的时序特征提取过程可以表示为：

$$h_t = \sigma(W_{\text{nn}} \cdot [h_{t-1}, F_{\text{CNN}}(x_t)] + b_{\text{nn}}) \quad (3)$$

式中： h_t 表示第 t 时刻的隐藏状态； W_{nn} 表示 RNN 的权重； b_{nn} 表示 RNN 的偏置值； $F_{\text{CNN}}(x_t)$ 表示第 t 时刻 CNN 提取的空间特征。在处理每一帧图像时，RNN 会接收 CNN 提取的空间特征作为输入，并结合上一时刻的隐藏状态来更新自己的隐藏状态。这一过程使得 RNN 能够提取出视频帧之间的动态特征。

在道路环境复杂且干扰源众多的情境下，采用 CNN 与 RNN 相结合的架构进行车载视频图像的动态特征提取。这一过程使得模型能够同时利用空间和时间信息，对复杂道路环境下的车载视频图像进行全面深入的理解，为后续更精准的目标识别和动态跟踪等任务奠定基础^[6]。动态特征 y 通过对 RNN 最后一个隐藏状态 h_T 进行变换得到：

$$y = \text{softmax}(W_{\text{fc}} \cdot h_T + b_{\text{fc}}) \quad (4)$$

式中： W_{fc} 表示全连接层的权重； b_{fc} 表示全连接层的偏置值； h_T 表示 RNN 输出的最后一个隐藏状态。

2 特征融合与动态检测

车载视频图像动态识别通常涉及对视频图像序列数据

的实时分析和处理，以捕捉其中的动态变化。动态特征融合可以提供更全面、更丰富的特征表示，有助于模型更准确地捕捉序列数据中的动态变化，实现动态检测。为提升模型的检测性能，特征融合成为一个重要的技术手段。深层特征通常包含更高级的语义信息，对于理解图像中的复杂场景至关重要；而浅层特征则更多地保留了图像中的细节信息，如边缘和纹理等，对于精确捕捉目标的形态和轮廓非常有用。通过融合这些不同层次的特征，能够为动态检测构建一个更加丰富的特征空间，使模型能够更准确地捕捉视频图像序列中的动态变化，进而实现对目标的实时检测和跟踪。

以尺寸为 $5 \text{ px} \times 5 \text{ px}$ 的输入图像为例，通过卷积神经网络提取其动态特征。利用 3×3 的卷积核进行反卷积操作（步长 $S=1$ ，扩充 $P=0$ ，并在特征单元间插入 0 进行上采样），输出特征图大小可通过公式计算：

$$\text{output} = S \times (i-1) + K - 2 \times P \quad (5)$$

式中： output 表示输出特征图大小； i 表示输入图像大小； K 表示卷积核。

在动态检测中，深层特征图（如 Conv11 的 $19 \text{ px} \times 19 \text{ px}$ 和 Conv13 的 $10 \text{ px} \times 10 \text{ px}$ ）蕴含丰富的动态特征，这些特征是通过深层卷积网络逐步提取得到的^[7]。为提升检测性能，采取特征融合策略，将深层特征（Conv11 和 Conv13 层提取的动态特征）与浅层特征（Conv5 层提取的动态特征）进行融合。具体来说，Conv13 层会输出 1 024 个 $10 \text{ px} \times 10 \text{ px}$ 的动态特征图。这些特征图首先经过一个 3×3 卷积核、步长为 2、扩充为 1 的反卷积操作，上采样到 $19 \text{ px} \times 19 \text{ px}$ 的尺寸。接着，通过一个 1×1 卷积核进行降维处理，以便与 Conv11 层的 $19 \text{ px} \times 19 \text{ px}$ 动态特征图进行融合。融合后的特征图采用 3×3 卷积来消除混叠效应，并用于后续的分类和预测任务。

同样，Conv11 层融合后的特征图（512 个 $19 \text{ px} \times 19 \text{ px}$ 的动态特征图）会经过一个 2×2 卷积核、步长为 2、扩充为 0 的反卷积操作，上采样到 $38 \text{ px} \times 38 \text{ px}$ 的尺寸。然后，通过一个 $1 \times 1 \times 256$ 的卷积核进行降维，以便与 Conv5 层的 $38 \text{ px} \times 38 \text{ px}$ 动态特征图进行融合。融合后的特征图同样采用 3×3 卷积来消除混叠效应，并用于分类和预测。

特征融合结合不同层或来源的特征图，提升模型检测性能。在车载视频识别中，融合深层语义与浅层细节信息，构建全面特征空间，对捕捉动态变化至关重要。特征融合的特征图呈现出较高的精度且鲁棒性，是实现动态检测的关键。通过特征融合策略，能够有效地将深层特征与浅层特征相结

合，为车载视频图像动态识别任务提供更加准确和可靠的特征表示，进而提升模型的检测性能^[8]。

3 视频图像轮廓动态识别

复杂道路环境中，传统方法难精确捕捉物体空间关系，影响图像识别和目标动态把握。因此，本文引入图注意力模块和通道注意力模块，弥补此不足。图注意力模块构建物体图结构关系，精确描绘人体动作轮廓和物体空间联系。通道注意力模块聚焦特征图通道维度，重新分配特征权重，减少无用特征影响，增强有用特征表达能力^[9]。这两个模块结合，提升网络空间特征提取能力和人体动作特征表示能力，实现更精准的视频图像动态识别。

采用两个卷积层将输入特征图 f 转换为矢量 R 和 Q 。接着，利用归一化技术生成不同动作骨架的时空图样本。通过学习两个随机关节点之间的权值关系，能够更精确地实现人体动作轮廓的识别。

此外，通道注意力模块的加入进一步增强了 STGCN 网络在人体动作特征表示方面的能力。通过全连接层进行特征升维，并使用 Sigmoid 激活函数获取权值。最后，将这些权值与输入特征图相乘，实现特征权重的重新分配^[10-12]。这一过程有效减少了无用特征的影响，同时增强了有用特征的表达能力^[13]。将权值矢量与输入特征图 f 相乘，实现特征权重的重新分配，可以表示为：

$$f' = w \odot f \tag{6}$$

式中： $\odot$ 表示逐元素相乘操作； f' 表示重新分配权重后的特征图； w 表示权值。通过上述内容，实现对视频图像轮廓的动态识别。

4 对比实验

4.1 实验环境

本文基于深度学习概念，创新性地提出了一种车载视频图像动态识别算法。为了全面且准确地评估该算法的实际效能，设计并实施了一项对比实验。实验中，新算法被用于对车载视频图像进行动态识别，并设为实验组。为确保实验的可比性和公正性，实验同时设置了两个对照组。对照 A 组采用基于时空图卷积网络（STGCN）的识别方法，对相同的车载视频图像进行识别；而对照 B 组则运用基于动态衰减网络和特定算法的图像识别技术，对同一批车载视频图像进行识别。

这三组实验均在相同的实验环境中进行，以保障实验结果的准确性和可靠性。实验环境配置如下：实验平台选用 Ubuntu14.04 操作系统，搭载英特尔酷睿 i5 处理器和

GTX1060 显卡（显存容量 6 GB）。开发环境则使用 Anaconda2 作为管理工具，结合 caffe 深度学习框架及 Python2.7 编程语言，用于构建和运行算法模型。

通过上述实验环境和配置，能够全面客观地评估新提出的车载视频图像动态识别算法的性能，并与现有的识别方法进行对比分析，为后续研究和应用提供有力支持。

4.2 实验数据集

目前，车载视频图像识别中应用较多的数据集包括 INRIA、ETH、TUD、Cityscapes 等。表 1 记录了各个数据集的基本情况。

表 1 数据集基本情况记录表

序号	名称	拍摄场景	数据集分布	图像分辨率/(px×px)
(1)	INRIA	复杂且多姿态动态图像	训练集 1 834 张 测试集 645 张	>100
(2)	ETH	城市白天车载摄像机	训练集 22 356 张 测试集 21 625 张	640×480
(3)	TUD	城市白天车载摄像机	训练集 12 800 张 测试集 12 100 张	640×480
(4)	Cityscapes	城市白天车载摄像机	训练集 7 560 张 测试集 7 512 张	2 048×1 024

满足本次实验需求，选定 Cityscapes 数据集作为实验数据集。Cityscapes 数据集由车载摄像头拍摄自大约 50 个城市街道的视频帧组成，主要覆盖了春夏秋 3 个季节。该数据集因其详尽的标注而适用于道路场景的识别分析，信息被细致划分为 8 大类、30 小类（例如车辆、行人等）。数据集包含 20 000 张粗标注图像和 5 000 张细标注图像，适用于本文的研究要求。图 1 展示了该数据集中行人尺度的分布情况。

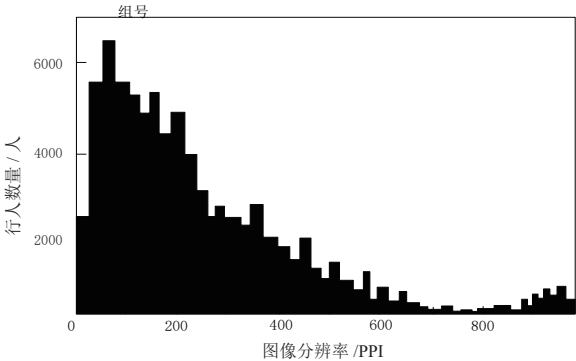


图 1 Cityscapes 数据集行人尺度分布

从图 1 可以看出，在该数据集中行人尺度分布极不均匀，大部分行人尺度集中在 40~60 PPI 的位置。根据图 1 所示，将行人尺度图像分辨率小于 40 PPI 的定义为小目标；将图像分辨率 40~80 PPI 的定义为中目标；将图像分辨率 80 PPI 以上定义为大目标。

4.3 实验结果

图 2 所示为三组方法在实验过程中识别到的行人动态目标。

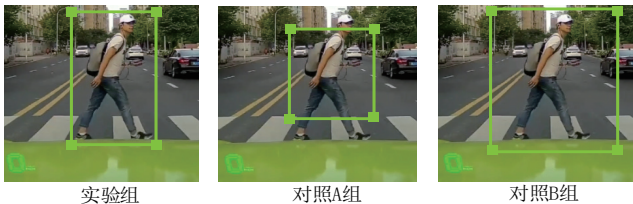


图 2 三组方法识别结果示意图

由图 2 可知，实验组在行人动态目标识别上表现出卓越性能。实验组能精确捕捉行人动态特征并准确框定，体现在位置判断和标记框大小的匹配上，确保了识别结果的可靠性。对照 A 组覆盖不全，易导致识别误差，且标记框放置缺乏统一标准，降低了可靠性。对照 B 组标记框过大，可能纳入无关物体，增加识别复杂性和运行负担。本文方法优势在于引入图注意力模块和通道注意力模块，强化了模型在复杂场景中的空间特征提取能力，提升了模型对人体动作特征的敏感度及识别精度，提高了识别准确性。

在此基础上，记录了三组方法针对不同目标的识别准确率，如表 2 所示。

表 2 三组方法识别结果对比表

类别	实验组		对照 A 组		对照 B 组	
	准确识别数量 / 个	准确率 / %	准确识别数量 / 个	准确率 / %	准确识别数量 / 个	准确率 / %
小目标	49	98.0	26	52.0	18	36.0
中目标	48	96.0	37	74.0	22	44.0
大目标	49	98.0	26	52.0	16	32.0

从表 2 结果可知，实验组对三种目标图像识别准确率高至 95%，准确识别数超过 45 个，远超对照 A、B 组。由此证明本文识别算法实际应用中更准确。优势在于引入的图注意力模块提升了空间特征提取能力，通道注意力模块增强了人体动作特征表示，使模型在复杂场景下鲁棒性、适应性更强，提高了识别准确性。

5 结语

本文聚焦于基于深度学习的车载视频图像动态识别算法，创新性地设计了一种算法框架，并在真实车载视频数据集上完成了实验验证。实验结果显示，该算法在识别精度与运算速度上均实现了显著提升，有效克服了现有技术的局限性。本研究不仅成功解决了这些技术难题，更为车载视频图像动态识别技术的发展注入了新的动力。展望未来，将持续深化研究，致力于开发更加高效、智能的算法，为智能交通系统的广泛应用提供更加可靠的技术保障。

参考文献：

[1] 张宗, 石林. 基于 STGCN 算法的视频图像人体动作轮廓动态识别 [J]. 现代电子技术, 2024, 47 (18): 144-148.

[2] 费春国, 刘启轩. 基于动态衰减网络和算法的图像识别 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36 (7): 230-238.

[3] 刘小溪, 程佳诚, 程咏梅, 顾一凡, 雷鑫华, 汪波. 车载视频图像路牌检测与字符序列识别方法 [J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(8):175-181.

[4] 代勇, 罗四海, 秦政阳, 等. 基于动态图像识别叶轮气动不平衡诊断方法的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2024(13): 172-174.

[5] 李进, 岳华峰, 程生博, 等. 供应链质量追溯的烟草叶片图像帧特征动态识别方法 [J]. 计算技术与自动化, 2024, 43 (1): 111-116.

[6] 肖帅, 郭嘉, 芦天罡, 等. 基于图像识别技术的北京市设施温室动态监测研究 [J]. 农业工程, 2023, 13 (10): 21-26.

[7] 薛薇, 张锋, 凡静, 等. 基于边缘检测及 RBF 神经网络的遥感图像帧特征动态识别技术 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (7): 163-168.

[8] 陈佳鑫, 赵国贞, 程伟, 等. 基于动态称量和图像识别技术的井下煤矸石智能分选装置研发 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43 (2): 178-183.

[9] 赵琰, 赵凌君, 张思乾, 等. 自监督解耦动态分类器的小样本类增量 SAR 图像目标识别 [J]. 电子与信息学报, 2024, 46 (10): 3936-3948.

[10] 叶明, 苏海涛, 高洪章, 等. 基于车牌动态图像识别的电子汽车衡自动称重系统的应用 [J]. 衡器, 2022, 51 (11): 33-37.

[11] 王硕, 孙梦轩, 杨志晓, 等. 基于涡旋电磁波雷达回波时频图像的动态手势识别 [J]. 火力与指挥控制, 2022, 47 (8): 109-115.

[12] 朱木清, 邹欢. 深度学习下动态目标识别算法优化仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(12):321-324.

[13] 王书朋, 贺瑞, 王瑜婧, 等. 中值直方图均衡的动态场景多曝光图像融合算法 [J]. 计算机工程, 2022, 48(10):224-229.

【作者简介】

郑爱玲（1995—），女，河南信阳人，硕士研究生，助教，研究方向：深度学习、目标检测、模式识别。

许艳艳（1995—），女，河南三门峡人，硕士研究生，助教，研究方向：区块链技术、Web 开发、数据分析。

（收稿日期：2024-11-14）

多阈值 Kaniadakis 熵的简化表达和递推方法

何 熠^{1,2}
HE Yi

摘 要

Kaniadakis 熵具有描述图像中非扩展性信息的能力, 曾被用于构建单阈值 Kaniadakis 熵方法。为进一步拓展 Kaniadakis 熵在图像阈值化中的应用, 文章在现有单阈值 Kaniadakis 熵方法的基础上提出了多阈值 Kaniadakis 熵方法。然而, 多阈值 Kaniadakis 熵的表达式相对复杂, 不利于多个阈值的计算。通过分析推导出多阈值 Kaniadakis 熵的简化表达式, 并用数学归纳法证明了简化表达式的正确性。为更快速地确定阈值, 进一步提出了一种基于简化 Kaniadakis 熵的多阈值递推方法。在基于穷举搜索法求解最优阈值的对比实验中, 使用传统 Kaniadakis 熵、简化 Kaniadakis 熵及递推简化 Kaniadakis 熵三种表达式所得最优阈值保持一致, 但简化 Kaniadakis 熵所耗运行时间约为传统 Kaniadakis 熵所耗运行时间的 50%, 递推简化 Kaniadakis 熵所耗运行时间仅为传统 Kaniadakis 熵所耗运行时间的 1%。

关键词

多阈值化; Kaniadakis 熵; 递推方法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.012

0 引言

阈值化方法是一种低层次图像处理技术, 其实现简单、性能稳定, 被广泛应用于医学图像分析^[1]、工业缺陷检测^[2]、农业图像分析^[3]、红外图像处理^[4]等领域。

在众多阈值化方法中, 应用信息论中熵相关概念和理论的熵阈值法颇具代表性。特别是基于 Kaniadakis 熵的图像阈值化方法在处理具有长尾分布直方图的图像时表现出了显著的优势, 广泛适用于工业无损检测、红外图像分割等应用场景。然而, 现有的 Kaniadakis 熵方法主要是单阈值方法, 对包含多个对象的复杂真实世界图像, 单阈值无法有效分离各个对象, 这限制了现有方法的适用范围。

为拓展现有 Kaniadakis 熵阈值方法, 同时也为对图像进行 Kaniadakis 熵多阈值化处理, 在现有单阈值 Kaniadakis 熵方法^[5]的基础上, 根据 Kaniadakis 熵的广义可加性^[6], 提出了多阈值 Kaniadakis 熵方法。由于 Kaniadakis 熵的广义可加性, 多阈值 Kaniadakis 熵方法的目标函数表达式较为复杂, 既不利于多个阈值的计算, 且计算效率较低。针对这一问题, 本文提出了多阈值 Kaniadakis 熵的简化表达式, 并用数学归纳法从理论上证明了该简化表达式的正确性。相比传统表达式, 简化表达式形式简洁, 在大幅降低计算时间复杂度的同时更加易于实现。为进一步降低时间成本,

提出了基于简化 Kaniadakis 熵的多阈值递推方法, 在确保与非递推 Kaniadakis 熵方法选取阈值一致的基础上, 进一步提高了计算效率。

1 本文方法

1.1 多阈值 Kaniadakis 熵方法

首先将单阈值 Kaniadakis 熵方法拓展至多阈值 Kaniadakis 熵方法。对于一幅大小为 $M \times N$, 灰度级为 L 的灰度图像 I , 灰度级为 i 的像素点出现的次数记为 $h(i)$, 则每个灰度值出现的概率可表示为:

$$p(i) = \frac{h(i)}{M \times N}, i = 0, 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

在多阈值情况下, 令阈值个数为 n , 则图像 I 被阈值 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 分为 $n+1$ 类 $C_1, C_2, \dots, C_{n+1}$, 对应的 $n+1$ 个概率分布为:

$$\begin{aligned} C_1: & \frac{p(0)}{P_1}, \frac{p(1)}{P_1}, \dots, \frac{p(t_1)}{P_1} \\ C_2: & \frac{p(t_1+1)}{P_2}, \frac{p(t_1+2)}{P_2}, \dots, \frac{p(t_2)}{P_2} \\ & \dots \\ C_n: & \frac{p(t_{n-1}+1)}{P_n}, \frac{p(t_{n-1}+2)}{P_n}, \dots, \frac{p(t_n)}{P_n} \\ C_{n+1}: & \frac{p(t_n+1)}{P_{n+1}}, \frac{p(t_n+2)}{P_{n+1}}, \dots, \frac{p(L-1)}{P_{n+1}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $P_1 = \sum_{i=0}^{t_1} p(i)$, $P_2 = \sum_{i=t_1+1}^{t_2} p(i)$, $\dots$, $P_{n+1} = \sum_{i=t_n+1}^{L-1} p(i)$ 。

运用 Kaniadakis 熵进行阈值化, 则:

1. 水电工程智能视觉监测湖北省重点实验室 湖北宜昌 443002

2. 三峡大学计算机与信息学院 湖北宜昌 443002

$$S_{\kappa}(C_1) = -\frac{1}{2\kappa} \left\{ \sum_{j=0}^{l-1} \left(\left(\frac{p(i)}{P_1} \right)^{1+\kappa} - \left(\frac{p(i)}{P_1} \right)^{1-\kappa} \right) \right\}$$

$$S_{\kappa}(C_2) = -\frac{1}{2\kappa} \left\{ \sum_{i=l_1+1}^{l-1} \left(\left(\frac{p(i)}{P_2} \right)^{1+\kappa} - \left(\frac{p(i)}{P_2} \right)^{1-\kappa} \right) \right\}$$

$$\dots$$

$$S_{\kappa}(C_{n+1}) = -\frac{1}{2\kappa} \left\{ \sum_{i=l_n+1}^{l-1} \left(\left(\frac{p(i)}{P_{n+1}} \right)^{1+\kappa} - \left(\frac{p(i)}{P_{n+1}} \right)^{1-\kappa} \right) \right\}$$

$$K(C_1) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{j=0}^{l-1} \left(\left(\frac{p(i)}{P_1} \right)^{1+\kappa} + \left(\frac{p(i)}{P_1} \right)^{1-\kappa} \right) \right\}$$

$$K(C_2) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=l_1+1}^{l-1} \left(\left(\frac{p(i)}{P_2} \right)^{1+\kappa} + \left(\frac{p(i)}{P_2} \right)^{1-\kappa} \right) \right\}$$

$$\dots$$

$$K(C_{n+1}) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=l_n+1}^{l-1} \left(\left(\frac{p(i)}{P_{n+1}} \right)^{1+\kappa} + \left(\frac{p(i)}{P_{n+1}} \right)^{1-\kappa} \right) \right\}$$

多阈值 Kaniadakis 熵阈值化方法的目标函数为:

$$S_{\kappa}(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{n+1})$$

$$= \sum_{r=0, \text{step}=2}^n \kappa^r \cdot \sum_{\Omega \subseteq U, |\Omega|=r+1} \left(\prod_{i \in \Omega} S_{\kappa}(C_i) \prod_{j \notin \Omega} K(C_j) \right) \quad (5)$$

式中: $r=2j, j \in \mathbb{Z}, 0 \leq j \leq \lfloor n/2 \rfloor$; 令 U 表示全集, $U = \{1, 2, \dots, n+1\}$; $\Omega \subseteq U, |\Omega|=r+1$ 表示集合 Ω 为全集 U 的子集, 子集的大小为 $r+1$, 即对于每个不同的 r 的取值, 有 C_{n+1}^{r+1} 种情况; $\prod_{i \in \Omega} S_{\kappa}(C_i) \prod_{j \notin \Omega} K(C_j)$ 表示选择集合 Ω 中所对应的几个分类的 Kaniadakis 熵与 Ω 的补集中所对应的其余分类的 Kaniadakis 熵的伴生式相乘。

当 Kaniadakis 熵之和 $S_{\kappa}(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{n+1})$ 达到最大时, 其最优阈值 $\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_n^*\}$ 选取准则为:

$$\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_n^*\} = \arg \max_{0 \leq t_1 < \dots < t_n \leq l-1} \{S_{\kappa}(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{n+1})\} \quad (6)$$

1.2 多阈值 Kaniadakis 熵的简化表达式

多阈值 Kaniadakis 熵的表达式 (6) 具有较高的计算复杂度。以阈值数为 6 为例, 运用 Kaniadakis 熵进行阈值化时需要计算 64 个多项式。随着阈值数 n 的增加, 所需计算的多项式数量呈指数级增长, 具体为 2^n 。因此, 显著增加了多阈值 Kaniadakis 熵方法在阈值计算上的难度。为解决这一问题, 提出了多阈值 Kaniadakis 熵的简化表达式。该表达式通过优化计算过程, 减少了所需计算的多项式数量, 从而有效降低了阈值化的计算难度。多阈值 Kaniadakis 熵的简化表达式推导过程为:

对于一组给定的阈值 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 图像被划分为 $n+1$ 类, 令:

$$Q_1 = \sum_{i=0}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_1} \right)^{1+\kappa}, Q_2 = \sum_{i=l_1+1}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_2} \right)^{1+\kappa}, \dots, Q_{n+1} = \sum_{i=l_n+1}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_{n+1}} \right)^{1+\kappa} \quad (7)$$

$$R_1 = \sum_{i=0}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_1} \right)^{1-\kappa}, R_2 = \sum_{i=l_1+1}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_2} \right)^{1-\kappa}, \dots, R_{n+1} = \sum_{i=l_n+1}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_{n+1}} \right)^{1-\kappa} \quad (8)$$

则每个分类的 Kaniadakis 熵式 (3) 和 Kaniadakis 熵伴生式 (4) 均可通过 Q_i 和 R_i 表示:

$$S_{\kappa}(C_i) = -\frac{1}{2\kappa} (Q_i - R_i), K(C_i) = \frac{1}{2} (Q_i + R_i) \quad (9)$$

据此, 给出两个性质。

性质 1: 当 $n \geq 1$ 时, 多阈值 Kaniadakis 熵可以简化为:

$$S_{\kappa}(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{n+1}) = -\frac{1}{2\kappa} (Q_1 Q_2 \dots Q_{n+1} - R_1 R_2 \dots R_{n+1}) \quad (10)$$

性质 2: 当 $n \geq 1$ 时, 多阈值 Kaniadakis 熵伴生式可以简化为:

$$K(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{n+1}) = \frac{1}{2} (Q_1 Q_2 \dots Q_{n+1} + R_1 R_2 \dots R_{n+1}) \quad (11)$$

证明:

(1) 当 $n=1$ 时, 灰度图像 I 被阈值 t 划分为两类 C_1 和 C_2 。此时表示为:

$$Q_1 = \sum_{i=0}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_1} \right)^{1+\kappa}, Q_2 = \sum_{i=l_1+1}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_2} \right)^{1+\kappa} \quad (12)$$

$$R_1 = \sum_{i=0}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_1} \right)^{1-\kappa}, R_2 = \sum_{i=l_1+1}^{l-1} \left(\frac{p(i)}{P_2} \right)^{1-\kappa} \quad (13)$$

则二分类 Kaniadakis 熵为:

$$S_{\kappa}(C_1 \cup C_2)$$

$$= S_{\kappa}(C_1)K(C_2) + S_{\kappa}(C_2)K(C_1)$$

$$= -\frac{1}{2\kappa} (Q_1 - R_1) \cdot \frac{1}{2} (Q_2 + R_2) - \frac{1}{2\kappa} (Q_2 - R_2) \cdot \frac{1}{2} (Q_1 + R_1) \quad (14)$$

$$= -\frac{1}{4\kappa} (Q_1 Q_2 + Q_1 R_2 - Q_2 R_1 - R_1 R_2) - \frac{1}{4\kappa} (Q_1 Q_2 - Q_2 R_1 - Q_1 R_2 + R_1 R_2)$$

$$= -\frac{1}{2\kappa} (Q_1 Q_2 - R_1 R_2)$$

二分类 Kaniadakis 熵伴生式为:

$$K(C_1 \cup C_2)$$

$$= K(C_1)K(C_2) + \kappa^2 S_{\kappa}(C_1)S_{\kappa}(C_2)$$

$$= \frac{1}{2} (Q_1 + R_1) \cdot \frac{1}{2} (Q_2 + R_2) + \kappa^2 \cdot -\frac{1}{2\kappa} (Q_1 - R_1) \cdot -\frac{1}{2\kappa} (Q_2 - R_2) \quad (15)$$

$$= \frac{1}{4} (Q_1 Q_2 + Q_1 R_2 + Q_2 R_1 + R_1 R_2) + \frac{1}{4} (Q_1 Q_2 - Q_2 R_1 - Q_1 R_2 + R_1 R_2)$$

$$= \frac{1}{2} (Q_1 Q_2 + R_1 R_2)$$

(2) 假设 $n=k$ 时, 结论成立, 则:

$$S_{\kappa}(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{k+1}) = -\frac{1}{2\kappa} (Q_1 Q_2 \dots Q_{k+1} - R_1 R_2 \dots R_{k+1}) \quad (16)$$

$$K(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{k+1}) = \frac{1}{2} (Q_1 Q_2 \dots Q_{k+1} + R_1 R_2 \dots R_{k+1}) \quad (17)$$

当 $n=k+1$ 时, 记 $C = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{k+1}$, 则 $C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{k+1} \cup C_{k+2} = C \cup C_{k+2}$ 。因为 C 和 C_{k+2} 为两个相互独立的子系统, 则:

$$\begin{aligned}
& S_{\kappa}(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{k+1} \cup C_{k+2}) \\
&= S_{\kappa}(C \cup C_{k+2}) \\
&= S_{\kappa}(C)K(C_{k+2}) + S_{\kappa}(C_{k+2})K(C) \\
&= \frac{1}{2}S_{\kappa}(C)(Q_{k+2} + R_{k+2}) - \frac{1}{2\kappa}(Q_{k+2} - R_{k+2})K(C)
\end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
& K(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{k+1} \cup C_{k+2}) \\
&= K(C \cup C_{k+2}) \\
&= K(C)K(C_{k+2}) + \kappa^2 S_{\kappa}(C)S_{\kappa}(C_{k+2}) \\
&= \frac{1}{2}K(C)(Q_{k+2} + R_{k+2}) - \frac{\kappa}{2}(Q_{k+2} - R_{k+2})S_{\kappa}(C)
\end{aligned} \quad (19)$$

应用 $n=k$ 时的结论, 则式 (18) 和式 (19) 可以进一步表示为:

$$\begin{aligned}
& S_{\kappa}(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{k+1} \cup C_{k+2}) \\
&= \frac{1}{2}S_{\kappa}(C)(Q_{k+2} + R_{k+2}) - \frac{1}{2\kappa}(Q_{k+2} - R_{k+2})K(C) \\
&= -\frac{1}{4\kappa}(Q_1 Q_2 \dots Q_{k+1} - R_1 R_2 \dots R_{k+1})(Q_{k+2} + R_{k+2}) \\
&\quad - \frac{1}{4\kappa}(Q_{k+2} - R_{k+2})(Q_1 Q_2 \dots Q_{k+1} + R_1 R_2 \dots R_{k+1}) \\
&= -\frac{1}{2\kappa}(Q_1 Q_2 \dots Q_{k+1} Q_{k+2} - R_1 R_2 \dots R_{k+1} R_{k+2})
\end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
& K(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{k+1} \cup C_{k+2}) \\
&= \frac{1}{2}K(C)(Q_{k+2} + R_{k+2}) - \frac{\kappa}{2}(Q_{k+2} - R_{k+2})S_{\kappa}(C) \\
&= \frac{1}{4}(Q_1 Q_2 \dots Q_{k+1} + R_1 R_2 \dots R_{k+1})(Q_{k+2} + R_{k+2}) \\
&\quad + \frac{1}{4}(Q_{k+2} - R_{k+2})(Q_1 Q_2 \dots Q_{k+1} - R_1 R_2 \dots R_{k+1}) \\
&= \frac{1}{2}(Q_1 Q_2 \dots Q_{k+1} Q_{k+2} + R_1 R_2 \dots R_{k+1} R_{k+2})
\end{aligned} \quad (21)$$

基于性质 1, 多阈值 Kaniadakis 熵的最优阈值选取准则可以简化为:

$$\begin{aligned}
\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_n^*\} &= \arg \max_{0 < t_1 < \dots < t_n < L-1} \{S_{\kappa}(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_{n+1})\} \\
&= \arg \max_{0 < t_1 < \dots < t_n < L-1} \left\{ -\frac{1}{2\kappa}(Q_1 Q_2 \dots Q_{n+1} - R_1 R_2 \dots R_{n+1}) \right\} \quad (22)
\end{aligned}$$

1.3 基于简化 Kaniadakis 熵的多阈值递推方法

本文提出的简化表达式使得实现多阈值 Kaniadakis 熵方法相对更容易, 但其时间复杂度仍然较高。注意到多阈值 Kaniadakis 熵的简化表达式 (22) 的计算代价主要集中在 Q_i 和 R_i , 即式 (7) (8), 接下来将给出基于简化 Kaniadakis 熵的多阈值递推方法。

创建 3 个长度为 L 的一维数组 S 、 V 和 T 。其中 L 为图像的灰度等级; 数组 S 用于记录 $p(i)$ 的累积概率分布, 数组 V 用于记录 $[p(i)]^{1+\kappa}$ 的累积概率分布; 数组 T 用于记录 $[p(i)]^{1-\kappa}$ 的累积概率分布。初始条件为 $S(0) = p(0)$, $V(0) = [p(0)]^{1+\kappa}$, $T(0) = [p(0)]^{1-\kappa}$ 。对于数组的后续元素, 进行递推运算, 表示为:

$$\begin{aligned}
S(i) &= S(i-1) + p(i) \\
V(i) &= V(i-1) + [p(i)]^{1+\kappa} \\
T(i) &= T(i-1) + [p(i)]^{1-\kappa}
\end{aligned} \quad (23)$$

式中: $p(i)$ 为灰度概率, $i = 1, 2, \dots, L-1$; κ 为 Kaniadakis 熵参数。

在求出数组 S 、 V 和 T 之后, P_i 、 Q_i 和 R_i 均可以通过 S 、 V 和 T 表示为:

$$P_i = S(t_i), P_2 = S(t_2) - S(t_1), \dots, P_{n+1} = S(L-1) - S(t_n) \quad (24)$$

$$Q_i = \frac{V(t_i)}{[P_i]^{1+\kappa}}, Q_2 = \frac{V(t_2) - V(t_1)}{[P_2]^{1+\kappa}}, \dots, Q_{n+1} = \frac{V(L-1) - V(t_n)}{[P_{n+1}]^{1+\kappa}} \quad (25)$$

$$R_i = \frac{T(t_i)}{[P_i]^{1-\kappa}}, R_2 = \frac{T(t_2) - T(t_1)}{[P_2]^{1-\kappa}}, \dots, R_{n+1} = \frac{T(L-1) - T(t_n)}{[P_{n+1}]^{1-\kappa}} \quad (26)$$

在计算出 Q_i 和 R_i 后, 应用式 (22) 来选取最优阈值。

在使用简化 Kaniadakis 熵计算一幅输入图像的多个最优阈值时, 选择式 (22) 作为目标函数。然而, 在使用穷举搜索法来更新最优阈值解集时, 计算 Q_i 和 R_i , 会存在重复的幂运算和加法运算, 这无疑会增加大量的时间成本。比较而言, 在提出的基于简化 Kaniadakis 熵的多阈值递推方法中, 数组 S 、 V 和 T 会存储已经计算的结果, 当遇到重复计算时, 程序会直接从数组 S 、 V 和 T 中调用相关数据, 而不是重新进行计算, 这可以有效降低时间复杂度, 并显著提升效率。

2 实验结果与讨论

首先在固定参数下, 对传统 Kaniadakis 熵表达式 (6)、简化 Kaniadakis 熵表达式 (22) 和递推简化 Kaniadakis 熵表达式的计算复杂度进行比较和分析。

假设输入图像的类别数为 $n+1$, 传统 Kaniadakis 熵需要计算每个分类的 Kaniadakis 熵式 (3) 和 Kaniadakis 熵伴生式 (4) 以及不同分类之间的组合运算, 尽管 Kaniadakis 熵和 Kaniadakis 熵伴生式仅在乘积系数和加减符号上有所不同, 但计算的值是重复的, 这表示在使用传统 Kaniadakis 熵时, 计算量是双倍的, 即 Q_i 和 R_i 部分重复计算了一次。与传统 Kaniadakis 熵中涉及的乘法运算相比, 简化 Kaniadakis 熵的乘法运算次数由原来的 2^n 减少到 2 次, 且 Q_i 和 R_i 部分仅需计算一次。由于总体计算代价主要集中在 Q_i 和 R_i 部分, 因此简化 Kaniadakis 熵的时间成本约为传统 Kaniadakis 熵的一半, 降低了约 50%。然而, 无论是传统 Kaniadakis 熵还是简化 Kaniadakis 熵, 时间复杂度还是相对较高。这内在的原因在于 Q_i 和 R_i 项中累积概率的重复计算, 该计算中涉及多次幂运算和多次加法运算。递推简化 Kaniadakis 熵通过递推方式计算出所需的所有累积概率, 在每次计算 Q_i 和 R_i 时, 调用这些预先计算好的累积概率, 然后完成一次幂运算和一次

除法运算, 从而实现对 Q_i 和 R_i 的求解。递推简化 Kaniadakis 熵避免了重复执行多次幂运算和多次加法运算, 从而大大降低了时间复杂度。

为验证本文内容的有效性, 将 3 种表达式结合穷举搜索法进行对比实验。从 Berkeley 数据集中选取 6 幅不同复杂程度的图像作为测试图像, 如图 1 所示, 在 Berkeley 数据集中的图像编号分别为 #24 063、#310 007、#42 049、#61 060、#71 046 和 #8 049, 测试图像的大小均为 $481 \text{ px} \times 321 \text{ px}$ 。对于 Kaniadakis 熵参数 κ 的取值, 文献 [7] 研究表明, 当 $\kappa=0.7$ 时, 相关的 Kaniadakis 熵阈值方法

能获得更佳的阈值化结果图像, 因此在实验中设置 $\kappa=0.7$ 。实验所用的主要软硬件参数如下: Intel Core i7-8550U 1.8 GHz CPU, 16 GB DDR4 内存, Windows 10 64 位操作系统, MATLAB R2021b 64 位。

表 1 显示了 6 幅测试图像在传统 Kaniadakis 熵 (traditional kaniadakis entropy, TKE)、简化 Kaniadakis 熵 (simplified kaniadakis entropy, SKE) 和递推简化 Kaniadakis 熵 (recursive simplified kaniadakis entropy, RSKE) 3 种表达式下, 通过穷举搜索法求解得到的阈值、适应度值和 CPU 运行时间。

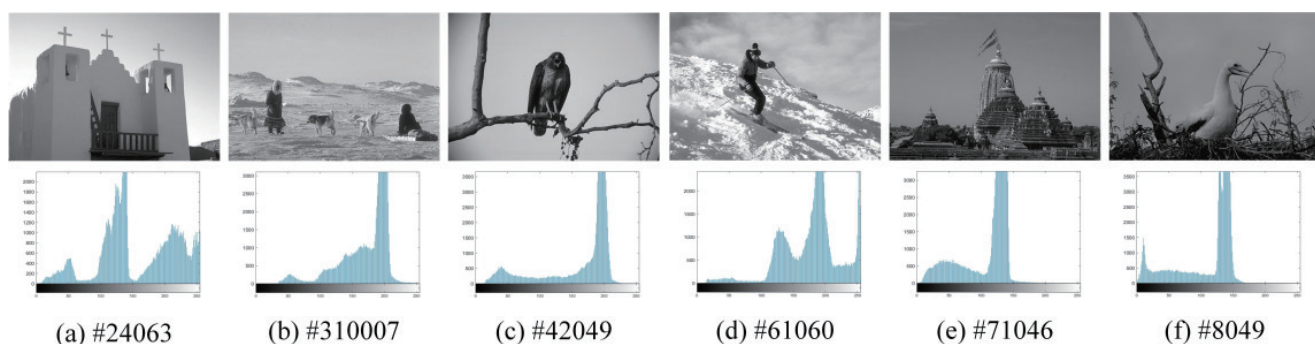


图 1 测试图像及其直方图

表 1 三种表达式下的阈值、适应度值和 CPU 运行时间

Image	n	TKE			SKE			RSKE		
		Threshold	Fitness	Runtime/s	Threshold	Fitness	Runtime/s	Threshold	Fitness	Runtime/s
#24063	1	103	5 248 061	0.140 528	103	524.806 1	0.019 783	103	524.806 1	0.003 648
	2	97 181	6 436.752	4.407 802	97 181	6 436.752	2.192 396	97 181	6 436.752	0.030 824
	3	89 144 198	6.07E+04	412.957 370	89 144 198	6.07E+04	202.410 038	89 144 198	6.07E+04	1.550 453
	4	58 98 144 198	5.20E+05	25 569.825 618	5 898 144 198	5.20E+05	1 269 895 3 92	5 898 144 198	5.20E+05	161.810 304
#310007	1	130	399.268 2	0.031 765	130	399.268 2	0.016 387	130	399.268 2	0.001 796
	2	123 211	4 335.529	3.944 142	123 211	4 335.529	1.966 350	123 211	4 335.529	0.023 871
	3	98 154 211	4.31E+04	355.551 607	98 154 211	4.31E+04	176.008 13	98 154 211	4.31E+04	1.542 795
	4	84 127 169 212	3.23E+05	23 182.461 478	84 127 169 212	3.23E+05	11 448.744 019	84 127 169 212	3.23E+05	144.554 556
#42049	1	123	411.729	0.031 266	123	411.729	0.015 450	123	411.729	0.000 533
	2	86 158	4 717.115	4.052 002	86 158	4 717.115	2.025 543	86 158	4 717.115	0.022 594
	3	67 119 171	4.14E+04	363.560 651	67 119 171	4.14E+04	181.319 403	67 119 171	4.14E+04	1.380 933
	4	64 114 164 212	3.17E+05	24 052.430 988	64 114 164 212	3.17E+05	12 027.498 905	64 114 164 212	3.17E+05	164.090 639
#61060	1	112	541.764 2	0.032 852	112	541.764 2	0.017 156	112	541.764 2	0.001 203
	2	107 177	6 464.957	4.271 455	107 177	6 464.957	2.120 519	107 177	6 464.957	0.024 684
	3	61 110 177	6.04E+04	383.035 343	61 110 177	6.04E+04	190.486 511	61 110 177	6.04E+04	1.446 908
	4	61 109 160 206	5.19E+05	25 375.229 72	61 109 160 206	5.19E+05	12 550.490 26	61 109 160 206	5.19E+05	172.497 226
#71046	1	149	417.018 5	0.034 493	149	417.018 5	0.018 717	149	417.018 5	0.003 165
	2	78 151	4 956.581	4.077 83	78 151	4 956.581	2.033 258	78 151	4 956.581	0.023 855
	3	59 111 160	4.42E+04	364.821 305	59 111 160	4.42E+04	182.213 247	59 111 160	4.42E+04	1.721 432
	4	58 109 146 190	3.82E+05	24 214.418 83	58 109 146 190	3.82E+05	12 085.037 92	58 109 146 190	3.82E+05	175.136 05
#8 049	1	85	294.7865	0.030 109	85	294.786 5	0.014 911	85	294.786 5	0.000 289
	2	62 121	2854.163	3.523 415	62 121	2 854.163	1.737 264	62 121	2 854.163	0.019 860
	3	57 111 153	2.28E+04	319.883 424	57 111 153	2.28E+04	157.296 888	57 111 153	2.28E+04	1.854 198
	4	43 83 124 153	1.67E+05	21 206.881 26	4 383 124 153	1.67E+05	10 525.570 79	4 383 124 153	1.67E+05	148.514 416

表 1 表明, 对于阈值数分别为 1、2、3、4 的情况下, 3 种表达式所得阈值是一致的, 同时适应度值也是一致的。在 CPU 运行时间方面, 使用 SKE 作为目标函数的运行时间比使用 TKE 作为目标函数的运行时间更短, 总体来看, 使用 SKE 作为目标函数的运行时间约为使用 TKE 作为目标函数的运行时间的 50%, 使用 RSKE 作为目标函数的运行时间约为使用 TKE 作为目标函数的运行时间的 1%, 显著降低了时间成本。(注: 随着阈值个数的增加, 穷举搜索法的计算代价也急剧增大。比如, 当阈值个数为 5 时, TKE 计算时间已超过 48 h。故此处不列出 5 个及以上阈值情形下的运行时间比较结果。)

图像多阈值化质量通过峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR)^[8]、结构相似度 (structural similarity index measure, SSIM)^[9] 和特征相似度 (feature similarity index measure, FSIM)^[10] 3 个量化指标进行评价。表 2 展示了使用穷举搜索法对 6 幅测试图像进行阈值化时的 PSNR、FSIM 和 SSIM 值。

表 2 RSKE 表达式求解的 PSNR、SSIM 和 FSIM 值

Image	<i>n</i>	PSNR	SSIM	FSIM
#24 063	1	10.005 167 2	0.671 426 1	0.758 170 8
	2	15.792 825 6	0.802 594 1	0.841 277 4
	3	16.619 420 5	0.804 274 9	0.850 079 7
	4	17.798 002 6	0.828 197 5	0.859 397 9
#310 007	1	11.830 981 7	0.583 278 5	0.575 694 6
	2	11.637 384 5	0.587 430 0	0.581 138 3
	3	16.130 040 1	0.761 198 9	0.742 644 4
	4	18.947 122 7	0.823 101 9	0.832 306 3
#42 049	1	11.322 445 5	0.731 442 8	0.783 402 2
	2	16.056 414 0	0.822 081 0	0.824 967 7
	3	18.812 299 9	0.850 864 9	0.851 421 8
	4	17.914 711 1	0.852 660 8	0.852 946 1
#61 060	1	10.128 828 7	0.485 485 1	0.538 061 4
	2	16.213 118 2	0.726 025 8	0.705 531 9
	3	16.671 069 8	0.736 796 8	0.711 572 6
	4	18.562 433 8	0.826 061 6	0.805 748 0
#71 046	1	7.020 322 2	0.015 976 6	0.613 967 6
	2	14.088 698 1	0.694 862 3	0.753 038 4
	3	19.845 180 3	0.832 193 5	0.805 071 8
	4	19.667 034 8	0.836 863 9	0.812 836 7
#8 049	1	14.175 096 6	0.678 141 8	0.775 324 5
	2	20.643 969 4	0.805 285 1	0.833 517 8
	3	19.252 307 2	0.812 155 4	0.845 161 2
	4	23.203 406 9	0.866 064 6	0.888 304 4

这些结果是使用 RSKE 表达式通过穷举搜索法得到的。随着阈值数量的增加 PSNR、SSIM 和 FSIM 的数值随之上升, 表明多阈值化结果图像质量得到了改善。由此可以推断, 多阈值 Kaniadakis 熵方法更适合处理复杂图像。

3 结论

针对灰度图像的多阈值化问题, 本文在现有单阈值 Kaniadakis 熵方法的基础上, 利用 Kaniadakis 熵的广义可加性, 将其拓展至多阈值情况。考虑到传统 Kaniadakis 熵在多阈值情况下表达式复杂的问题, 分析推导出了 Kaniadakis 熵的简化表达式。为了更快速地确定阈值, 进一步提出了基于简化 Kaniadakis 熵的递推算法。将穷举搜索法和 3 种表达式进行结合, 并进行了对应的阈值确定, CPU 运行耗时等实验。实验结果表明, 在不同的阈值数量下, 3 种表达式在求解最优阈值时结果一致。简化 Kaniadakis 熵在求解最优阈值时的计算代价约为传统 Kaniadakis 熵的一半, 而递推简化 Kaniadakis 熵显著提高了求解的效率, 能够满足图像多阈值化的应用需求。在未来的工作中, 将会考虑通过自适应熵参数选取策略, 为不同类型的图像选择合适的熵参数, 提高方法的适应性和灵活性。

参考文献:

[1] HOUSSEIN E H, ABDALKARIM N, HUSSAIN K, et al. Accurate multilevel thresholding image segmentation via oppositional snake optimization algorithm: real cases with liver disease[J]. Computers in biology and medicine, 2024, 169(2): 107922.

[2] ZHU R H, XIN B J, DENG N, et al. Fabric defect detection using ACS-based thresholding and GA-based optimal gabor filter[J]. The journal of the textile institute, 2024, 115(9): 1432-1446.

[3] SONG H H, WANG J Q, JIN L B, et al. Modified snake optimizer based multi-level thresholding for color image segmentation of agricultural diseases[J]. Expert systems with applications, 2024, 255: 124624.

[4] LEI B, FAN J L. Infrared pedestrian segmentation algorithm based on the two-dimensional kaniadakis entropy thresholding[J]. Knowledge-based systems, 2021, 225(8): 107089.

[5] SPARAVIGNA A C. Shannon, tsallis and kaniadakis entropies in bi-level image thresholding[DB/OL]. (2015-02-23)[2024-06-26].<https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.06556>.

可动态扩展的机载网络服务数据通信方法

加达宇¹ 张杨阳¹ 孙豪杰¹
JIA Dayu ZHANG Yangyang SUN Haojie

摘要

航空电子工程委员会(AEEC)所颁布的ARINC 834-3标准虽然支持基于订阅的数据交换机制,然而该标准在数据源的扩展性方面存在局限,这在一定程度上制约了多数据源间的交互能力,使得在实际应用中难以满足日益增长的数据需求。针对此问题,文章提出了一种创新的、可动态扩展的机载网络服务数据通信方法。该方法基于航空数据广播协议(ADBP),采用订阅-发布机制,并通过引入中间节点,实现了多数据源与多客户端之间动态可扩展的通信。该方法有效解决了在机载环境下,不同网络域以及不同网络协议之间动态可扩展的数据订阅与发布所面临的挑战。

关键词

机载网络;飞机参数;航空数据广播协议;数据通信;数据服务

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.013

0 引言

2012年,航空电子工程委员会(Airlines Electronic Engineering Committee,简称AEEC)正式颁布了ARINC 834-3标准,这一标准详细规定了一整套协议体系。这些协议包括通用航空参数服务(GAPS)、简单文本航空电子协议(STAP)以及航空数据广播协议(ADBP)。特别是ADBP协议中规定了一种基于订阅的服务模式,通过这种模式,数据源(服务器)与客户端之间能够以XML对象的形式高效地交换飞机参数数据。这种机制确保了机载系统内部应用能够顺利访问特定的航空电子网络数据。

美国航空运输协会(Air Transport Association of America,简称ATA)在其《ATA需求100—制造商技术数据需求》的

ATA46章节中,对机载信息系统进行了明确的定义。机载信息系统在航空电子领域扮演着至关重要的角色,在国产大飞机C919和空客A350等先进机型上均有装备^[1],它负责信息的转换和传输等关键任务^[2]。因此现有机载信息系统中,存在机载网络服务系统航电接口应用软件通过采用ARINC 834-3标准实现对飞机参数的高效获取^[3]。在这种架构中,数据源应用充当服务器角色,而航空电子应用则作为客户端。这种服务器与客户端的模型使得机载系统内部的飞机参数获取成为可能。

然而,ARINC 834-3标准在实际应用中也暴露出一些问题。首先,该标准并不支持数据源(服务器)的扩展性,这限制了多个客户端与多个数据源进行交互的灵活性。因为在这种架构下,服务器与客户端之间是一对多的关系,导致了数据交互的局限性。此外,机载信息系统肩负着网络安保的职责^[4],因此数据交换还要有能力处理不同网络域与不同网

1. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所
陕西西安 710076

- [6] SPARAVIGNA A C. On the generalized additivity of Kaniadakis entropy[J]. International journal of sciences, 2015(6): 44-48.
- [7] 聂方彦,李建奇,张平凤,等. 复杂图像的Kaniadakis熵阈值分割方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(8): 1040-1045.
- [8] HORÉ A, ZIOU D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM[C]//2010 20th International Conference on Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2010: 2366-2369.
- [9] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE

transactions on image processing, 2004, 13(4): 600-612.

- [10] ZHANG L, ZHANG L, MOU X Q, et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment[J]. IEEE transactions on image processing, 2011, 20(8): 2378-2386.

【作者简介】

何熠(1999—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向:数字图像处理。

(收稿日期: 2025-02-16)

络协议之间的应用场景^[5]。

为了解决上述技术背景中存在的问题，本文针对航空设备间网络化通信的应用场景，提出了一种新的解决方案。该方案能够实现多数据源（服务器）与多客户端之间的数据通信，基于不同的航空电子网络协议。该方案有效地解决了机载环境下不同网络域之间、不同网络协议之间的动态可扩展的数据订阅与发布问题。通过这种方式，可以确保机载系统内部应用能够更加灵活地访问和交换数据，从而提高整个航空电子系统的效率和安全性。

1 可动态扩展的机载网络服务数据通信方法

1.1 方法概述

本文提出了一种动态可扩展的机载网络服务数据通信方法，该方法涵盖3个核心步骤：构建通信系统、服务器（Server）至中间节点（Proxy）的数据发布流程以及客户端（Client）至中间节点的数据订阅流程。

该方法基于 ADBP 协议，采纳了“基于订阅的服务提供”和“利用 XML 进行数据传输”的策略，并结合订阅发布（Pub-Sub）机制，通过引入中间节点进行数据分发，从而实现了从一对一（1:1）到多对多（N:M）的通信系统的可扩展性。本方法采用了服务器、中间节点和客户端的通信系统模型，其架构示意如图1所示。服务器负责接收航电系统数据，解析并生成飞机参数消息，随后评估消息的可信度。对于确认为可信的飞机参数消息，服务器将主动向中间节点发布，并由后者进行消息合规性验证后，转发至订阅的客户端。客户端则请求订阅飞机参数，并对接收到的消息进行合规性验证。动态扩展性体现在客户端对飞机参数消息的动态订阅能力，以及对来自不同服务器的飞机参数消息的动态订阅能力。中间节点遵循先到先得的原则，发布飞机参数消息。飞机参数消息中包含来源总线、发布者、编号、长度、值、校验码和时间戳等关键信息。

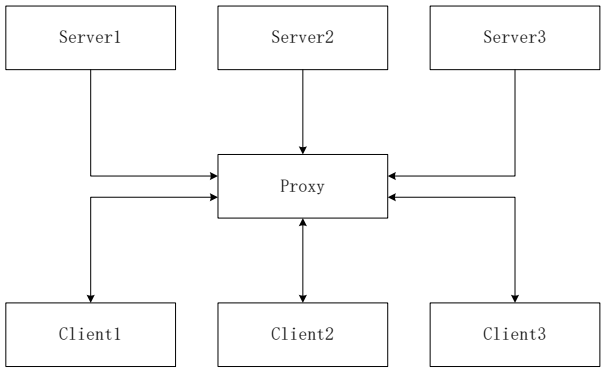


图1 通信系统架构示意图

1.2 具体实现

本文提出的方法实现了机载信息系统与航电网络间服务

器与接收端的动态可扩展性，以及飞机参数信息的订阅与发布机制。在该订阅发布机制中，服务器与客户端之间采用异步通信模式，服务器持续向已知的中间节点发布飞机参数信息，而无需确认客户端是否已开始接收信息。客户端在中间节点处注册所需接收的飞机参数信息，当中间节点接收到服务器的飞机参数信息后，将向订阅了该信息的客户端进行发布。因此，服务器与客户端在不关注对方工作状态及连接状态的情况下，即可完成信息的发布与订阅工作。

本文提出的机制与传统服务器与客户端 1:1 对应关系不同，中间节点的存在使得服务器与客户端的动态扩展性得以实现。这意味着单一客户端能够动态地接收来自多个服务器的飞机参数信息，同时单一服务器亦能向多个客户端动态发布飞机参数信息。此外，不同的服务器可以以不同的启动顺序运行，而不同的客户端亦可在不同的时间向不同的服务器请求飞机参数信息。

1.3 数据通信模型

该方法通过基于中间节点的网络隔离机制，有效实现了服务器与客户端之间的网络隔离。

在该机制中，服务器独立运行，并在接收到航电总线传输的航电数据后，主动将数据转发至中间节点。对于特定的机载设备，中间节点与服务器可共存于同一模块，亦可分别部署于不同的模块。客户端在启动后，通过与中间节点的通信发起对飞机参数的请求，并进入监听状态以接收中间节点发布的飞机参数。客户端能够多次向中间节点请求飞机参数，从而动态地获取飞机参数消息。

该数据通信模型及其通信机制如图2所示。客户端在启动后向中间节点注册其所需订阅的飞机参数，而无需关注服务器是否已启动。服务器启动并开始正常传输飞机参数消息，中间节点将依次向客户端发布这些消息。

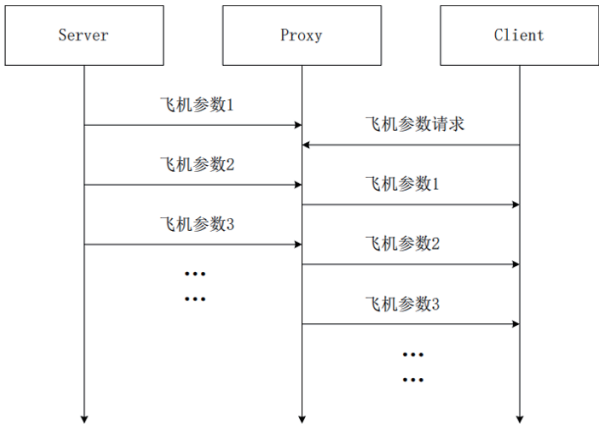


图2 数据传输过程示意图

当客户端需要额外的飞机参数消息时，可以动态地向中间节点提出请求，而不会干扰到之前已订阅的其他飞机参数

消息（如图 2 中的飞机参数 1、2、3）。客户端既可请求来自当前服务器的飞机参数消息，也可请求来自其他服务器的消息，从而实现了服务器的动态扩展性。具体通信方法和模型如图 3 所示。

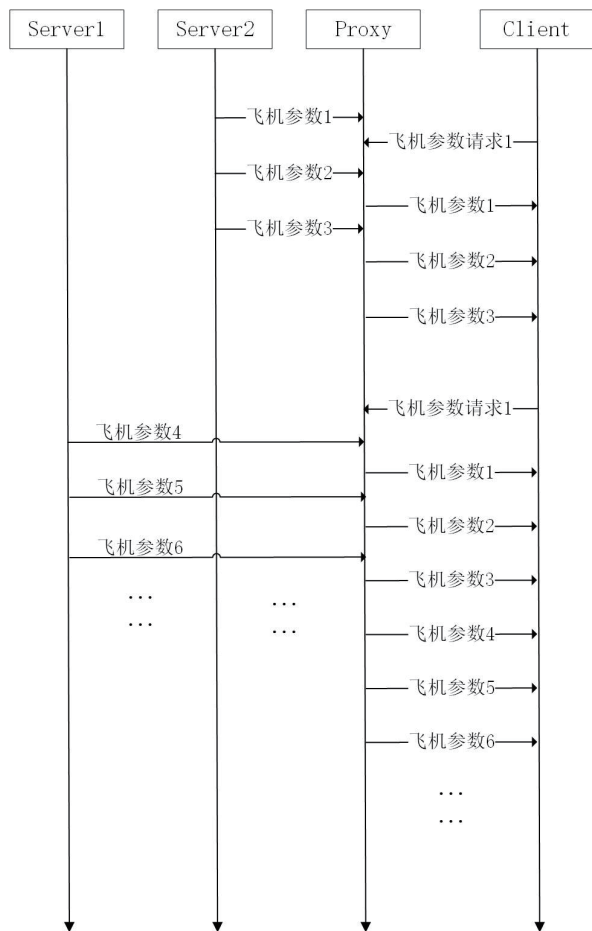


图 3 多服务器数据传输过程示意图

如图 3 所示，首先客户端订阅了来自于服务器（Server 2）的飞机参数 1、2、3 之后，中间节点依照请求向客户端发送飞机参数 1、2、3。若客户端在某一时刻向中间节点请求订阅来自另一个服务器（Server 1）的飞机参数 4、5、6，中间节点将在确认服务器（Server 1 和 Server 2）正常运行的情况下，向客户端发送飞机参数 1、2、3、4、5、6，实现飞机参数的动态请求。这一过程旨在提高客户端程序的运行速度和传输效率。

中间节点在发布飞机参数消息时遵循先进先出（FIFO）的原则。即在客户端订阅周期内，先到达中间节点的飞机参数消息将优先发布给订阅了该飞机参数的客户端。每次发布包含一个飞机参数消息，客户端在接收到中间节点发布的飞机参数消息后，重新进入监听状态，等待下一个飞机参数的发布。

在该过程中若服务器发生故障，如服务器应用未能正常启动或航电总线出现故障，客户端将无法接收到订阅的飞机

参数消息，这种情况下客户端可以将该飞机参数消息的接收时间视为无限大。一旦服务器恢复正常工作，飞机参数消息的发布也将恢复正常，即数据服务器的故障不会影响客户端的工作状态，如订阅时机或启动顺序等，从而简化了开发人员的工作量。

1.4 消息格式定义

针对飞机参数信息的传递，服务端与客户端必须遵循统一的消息格式规范。本方法采纳分层结构化的方法对飞机参数信息进行了定义，涵盖飞机参数信息的来源总线、发布者身份、参数编号、参数长度、参数值等关键要素，以及 CRC32 校验码和消息的时间戳。飞机参数信息的具体结构详如表 1 所示。

表 1 飞机参数消息格式定义

消息内容	含义
飞机参数来源总线	飞机参数的来源，如 ARINC664、ARINC429 或离散量。
飞机参数发布者	发布此飞机参数的应用或设备名称。
飞机参数编号	飞机参数所属编号，同一来源内具有唯一性。
飞机参数长度	飞机参数长度，单位为 Byte。
飞机参数值	飞机参数具体的值。
CRC32	飞机参数消息的 CRC32 校验码。
时间戳	飞机参数消息的时间戳。

对于飞机参数订阅消息，客户端将所需飞机参数打包成一条消息，其中飞机参数长度置为 0，飞机参数值置为空，仅告知中间节点其所需的飞机参数来源、发布者和编号，中间节点在接收到订阅消息后即可获得其所需订阅的飞机参数信息。

对于取消飞机参数订阅消息，客户端将所需取消的飞机参数打包成一条消息，其中飞机参数长度置为 -1，飞机参数值置为空，仅告知中间节点其所需取消的飞机参数来源、发布者和编号，中间节点接收到取消订阅消息后即可获得其所需取消订阅飞机参数信息。

基于上述定义的飞机参数消息格式，通过单一的消息格式即可达成服务端与客户端间的双向通信，并实现对飞机参数的订阅与取消订阅机制。

2 运行流程

如上所述，本文提出的方法首先需要建立通信系统，所述通信系统包括服务器（Server）、客户端（Client），还包括设置在服务器和客户端之间的中间节点（Proxy），且所述的服务器和客户端均至少一个。在此之后的具体操作主要分为两个过程：分别为服务器在接收到航电数据后向中间节点

的主动发布过程与客户端向中间节点的飞机参数订阅及获取过程。具体步骤如下：

(1) 服务器至中间节点的数据发布流程

① 服务器在正常启动后，开始接收来自飞机航电系统的各种数据。不同的服务器可以接收并处理不同类型的航电总线消息，包括但不限于 ARINC664、ARINC429、ARINC717、RS422 以及离散量数据。

② 服务器对各自接收的航电总线消息进行解析，并据此生成飞机参数消息。飞机参数消息包含飞机参数的来源总线、发布者、参数编号、参数长度、参数值、CRC32 校验码以及时间戳。

③ 服务器依据相应的航电总线数据解析规则，判断飞机参数值的可信度。

④ 若飞机参数值可信，则执行步骤⑤，否则执行步骤⑨。

⑤ 服务器将经过验证确认为可信的飞机参数消息主动发布至中间节点。

⑥ 中间节点在接收到飞机参数消息后，通过解析消息中的 CRC32 校验码和时间戳，验证消息的合规性。合规性包括消息的实时性和完整性。

⑦ 若飞机参数消息合规，则执行步骤⑧，否则执行步骤⑨。

⑧ 中间节点将接收到的飞机参数消息转发给订阅的客户端。

⑨ 如果飞机参数消息被判定为不可信或不合规，则该消息会被丢弃，并且会通过日志记录模块记录下相关日志信息。

⑩ 结束本次数据传输过程。

(2) 客户端至中间节点的数据订阅流程

① 客户端在正常启动后，向中间节点发送飞机参数订阅请求。客户端在运行过程中，通过采用可动态扩展的方式请求飞机参数。动态扩展体现在两个方面：一个或多个飞机参数消息能够被不同客户端动态订阅；一个或多个客户端能够动态订阅来自于不同服务器的飞机参数消息。动态订阅包括增加订阅或取消订阅。

② 客户端等待接收来自中间节点的飞机参数消息。若收到消息，则执行步骤③，否则客户端持续处于等待接收飞机参数消息的状态。

③ 客户端接收到中间节点发布的飞机参数消息，并通过解析消息中的 CRC32 校验码和时间戳来验证消息的合规性；

④ 若飞机参数消息合规，则执行步骤⑤，否则执行步骤⑥。

⑤ 客户端获取所有飞机参数值，并返回步骤②循环接收飞机参数消息，直至取消订阅该参数。

⑥ 若飞机参数消息被判定为不合规，则该消息会被丢弃，并通知日志记录模块记录相关日志，随后返回步骤②继续等待接收消息。

3 结语

本文基于 ARINC 834-3 标准的背景，结合民用客机机载信息系统的实际应用，提出了一种可动态扩展的机载网络服务数据通信方法，成功地实现了效率的显著提升。本方法的主要优势体现在：通过引入中间节点（Proxy）技术，实现了服务器（Server）与客户端（Client）间的通信隔离。具体而言，通过该方法，服务器与客户端不再需要关注对方的工作状态，亦不必维护彼此之间的网络连接，从而极大地简化了系统的复杂性，并提高了系统的稳定性和可靠性。此外，本研究方法进一步融合了发布订阅机制，有效弥补了 ARINC 834-3 协议中服务器动态可扩展性方面的缺失。通过增加中间节点，服务器能够在运行过程中实现动态扩展，同时保证客户端的工作不受影响。对于客户端而言，即便服务器发生变更，也无需进行任何调整。客户端仅需与中间节点进行通信，即可获取所需要的飞机参数消息，而这些数据可能源自于多个服务器。中间节点在接收到服务器消息后，将根据客户端的订阅要求，及时分发相应的消息，从而相较于 ARINC 834-3 协议，这种方法显著提升了数据发布的效率，并有效地减少了数据订阅的冗余性，从而进一步优化了整个系统的性能。

参考文献：

[1] 韩康,康乔,王凯悦.机载信息系统故障实时诊断功能的设计与实现[J].航空计算技术,2024,54(2):88-91.
[2] 曹全新.机载信息系统的应用研究及发展趋势初探[J].民用飞机设计与研究,2014(1):72-76.
[3] 刘绚,李莉,张双,等.机载网络服务系统航电接口应用软件的研究与设计[J].电光与控制,2015,22(7):70-74.
[4] 钱宁,张兆晨,黄松华,等.基于任务的机载网络规划研究[C]//中国指挥与控制学会.第三届中国指挥控制大会论文集(上册).北京:信息系统工程重点实验室,2015:4.
[5] 卢韩伟.民机机载网络安全模型设计[J].科技风,2020(16):108.

【作者简介】

加达宇（1996—），男，陕西富平人，硕士研究生，助理工程师，研究方向：航电设备与系统。

（收稿日期：2024-11-15）

基于改进隐马尔可夫模型的藏文分词研究

贡保加¹ 安见才让¹

GONG Baojia AN Jiancairang

摘要

藏文分词是藏语信息处理领域的基础课题,分词是将原始文本数据切分成词的一种技术。分词技术可以应用到自然语言处理领域的许多下游任务中,诸如机器翻译、语义标注、文本分类、自然语言推理等,分词是自然语言处理中极为关键的环节。文章基于隐马尔可夫模型对藏文分词进行研究,首先通过语料库训练模型,获取相应的位置信息和概率,其次在传统隐马尔可夫模型的基础上采集了音节与音节之间的特征信息,结合已有的词的位置信息进行测试。测试结果表明,最终准确率在 86.05%,相较于传统的隐马尔可夫模型提高了 2.3%。

关键词

藏文分词;隐马尔可夫模型;分词算法;未登录词

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.014

0 引言

分词是将连续字符串按照一定的规则重新组合并生成词序列的过程^[1]。分词技术可以应用到自然语言处理领域的许多下游任务中,诸如机器翻译、语义标注、文本分类、自然语言推理等,分词是自然语言处理中极为关键的环节,有重要的应用价值。经过 40 多年的发展,中文分词相关研究已经催生出像 jieba、SCWS、ICTCLAS、盘古分词这类较为成熟的中文分词系统。而藏文由于本身语法结构的复杂性和语料的稀缺性,在分词这一领域目前尚处于发展与探索阶段。

藏文分词研究有着一系列标志性的发展节点与成果。其中,2018 年 6 月国标版《信息处理用藏文分词规范》的正式发布,为整个藏文分词工作提供了重要的标准化规范依据,意义非凡。回顾过往,1999 年,扎西次仁设计并实现了人机互助的藏文分词和词登录系统,开启了藏文分词研究的序幕,是该领域研究起步的重要标志。后续不同阶段也涌现出诸多创新性的研究成果。2003 年,陈玉忠等人提出符合藏文特性的藏文分词方案,聚焦于消除歧义切分和未登录词识别问题,为解决藏文分词中的关键难点进行了积极探索。2009 年,才智杰提出了一种基于规则的“还原法”,有效应对了藏文分词里黏着词这一棘手问题,在藏文分词技术的细化与完善方面迈出了重要一步。2011 年,史晓东等人成功将汉语分词系统 SegTag 移植至藏文上,开发了央金藏文分词标注系统;同年,刘汇丹等人也实现了基于序列标注的藏文分词,从不

同角度拓展了藏文分词的实现路径。2015 年,李亚超等人^[2]基于 CRF,开发了一个名为 TIP-LAS 藏文分词和词性标注系统。2018 年,李博涵等人对各类 RNN(循环神经网络)在藏文分词上的表现加以分析和实验,使得深度学习正式踏入藏文分词领域,为后续研究开辟了新的思路与方向^[3]。2020 年,王莉莉等人提出的基于双向长短时记忆网络加条件随机场(BiLSTM_CRF)的藏文分词方法,凭借其双向长短时记忆网络的独特优势,将网络中学习到的过去输入特征和未来输入特征相加,最终取得了较好的分词效果^[4]。2023 年,尹宗鹤等人提出了基于深度学习的 ASBC 模型,实验中引入藏文音节特征融合的方法,在多主题数据集上验证了预训练模型和音节特征融合对藏文分词的有效性,最终的分词效果也得到了提升^[5]。2024 年格桑加措等人^[6]针对藏文分词任务中的未登录音节问题,优化了 Bi-LSTM 结合 CRF 的藏语分词模型。通过在模型训练和模型推理阶段标记未登录音节从而解决藏文分词任务中未登录音节无法分词的问题。最终其模型提高了对复杂藏文分词任务的处理能力。同年常芳玉等人^[7]提出了一种八词位藏文分词标签集 Tag-8,并且在 BiLSTM_CRF 模型上证明了八词位标签集的有效性。

如今,藏文分词主要运用 3 种不同的方法,分别是基于词表的方法、基于统计的方法以及基于神经网络的方法,它们各具特点,在实际应用中也有着不同的表现。其中,基于词表的方法核心在于预先制定的内部词表来识别藏文文本中的词。但这一方式存在明显的短板,当出现未登录词和新名词时并没有有效的解决方法,只能通过后期人工不断地扩充和完善词表,进而保障分词工作能够正常开展下去。基于统计的分词方法的兴起,很大程度上得益于 SIGHAN 国际中文

1. 青海民族大学智能科学与工程学院 青海西宁 810007

[基金项目] 青海民族大学 2023 年度校级本硕博(学生)项目“基于深度学习的脱机手写藏文识别研究”(09M2023004)

分词评测比赛 Bakeoff 的推动。2003 年, Xue^[8] 通过运用最大熵算法构建了由字构词模型, 这一举措使原本复杂的分词问题可以转化为简单的序列标注问题。具体操作过程中, 采用了 4-tags 标注法, 即针对中文语句里每一个构成词语的汉字, 依据其在词语当中所处的位置, 为其标注上不同的标签, 随后借助这些被赋予了不同含义的词位标签, 从而精准地判断汉字之间的词边界, 最终对文本进行准确分词。后经研究者的不断尝试, 将该方法运用到藏文分词工作当中, 同样取得了十分不错的效果。随着时代的发展, 深度学习逐渐成为热门领域, 众多神经网络模型也随之涌现。神经网络模型在中文分词中的应用已得到了很好的发展, 而藏文由于文本数据较为稀少, 所以神经网络在藏文中应用较少^[9]。

基于传统的词表分词算法针对未登录词和新名词并没有有效的解决方法, 同时受限于文本数据的数量稀少无法应用神经网络方法。因此本文从藏文分词标注入手, 额外标注了藏文黏着词, 采集藏文黏着词特征, 同时采集音节与音节之间的位置信息, 使模型能够更好地学习文本特征从而提高藏文分词的准确率。实验中的语料为小组成员共同建立的一个由 15 000 个句子构成的语料库, 并对其进行人工校对和标注, 最后用于测试和验证。

1 语料库及标注

本文中所使用的训练语料是从各大藏文网站和微信公众号中获取的, 人工对原始语料进行了筛选和校对之后进行分词和文本标注。最终采用的语料有 15 000 个句子, 抽取 12 000 个词条作为模型的训练集, 其中 3 000 个句子作为模型的测试集, 5 000 个句子作为模型的验证集, 具体如表 1 所示。

表 1 语料库及其大小

分类	大小	词条数
训练集	1 697 844 音节	12 000
测试集	472 042 音节	3 000
验证集	654 532 音节	5 000

实验中对使用的语料在进行人工分词之后。对词条的标记方法采用了序列标注中的 BIO 标记法^[10], 因藏文的语法结构跟汉字和英文有所不同, 针对藏文中黏着词的情况本文在 BIO 标记的基础上额外增加了 n 标记, 凡是有 n 标记的都视为黏着词。设每一个词只有 4 个词位信息: 词首(B)、词缀(I)、单个词(O)、黏着词(n)。已分词语料需要经过词位标注才能正式用于模型训练, 而词位标注则是由基于藏文语法规则编写的代码实现, 在经过人工分词的文本基础上, 按照藏文的语法规则对每个词的词首、词缀、黏着词, 还有单个词进行数据标注。通过上述的一系列数据处理之后, 原先的原始语料已被标记如图 1 所示词条。

འུལ་རྩུགས་མཚན་ཉིད་རིག་པའི་ ལྷ་ལྷུབ་ ལྷུང་འཕེལ་ རྩ་སྒྲུབ་པའི་ དཔེ་དེབ་ ཉ་ཙང་
ཁ་གསལ་གྱི་བདེ་ ཞིག་ མེན་ །
འུལ་/B རྩུགས་/I མཚན་/B ཉིད་/I རིག་/I པའི་/n ལྷ་/B ལྷུབ་/I ལྷུང་/B འཕེལ་/I རྩ་/B རྩ་སྒྲུབ་/I པའི་/n དེ་
ཉ་/B དེབ་/I ཉ་/B ཙང་/I ཁ་/B ཁ་གསལ་/I གྱི་/I བདེ་/I ཞིག་/O མེན་/O །O[⌒]

图 1 藏文句子分词

图 1 中字符均为由字构词的基本构成单元。且该分词方法无须依赖词典, 基于此, 便能解决因词典规模问题而引发的部分分词错误问题, 尤其在未登录词以及新名词进行分词时, 效果有着显著提升。本文所使用的 BION 标注法相较于其他标注法, 其单独采集了藏文中黏着词和格助词^[11] 的特征信息, 所以在对待同一个词语判断其是否附带黏着词时可以做到更准确的分析, 同时将藏文中的格助词也标注为 n, 而不是标注为 O, 将其与常规的单个字区分开来以获得文本中格助词的位置信息从而获得更准确的分词结果。

2 隐马尔可夫模型

隐马尔可夫模型(hidden markov model, HMM) 的基本理论形成于 20 世纪 60 年代和 70 年代初期。70 年代, CMU 的 Baker 以及 IBM 的 Jelinek 等把隐马尔可夫模型应用于语音识别。隐马尔可夫过程属于双重随机过程。其中, 观察事件依赖于状态的概率函数, 构成了隐马尔可夫模型中的一个基本随机过程; 而另一个是状态转移过程, 但该过程是隐藏的, 无法被直接观测到, 唯有借助生成观察序列的另一个概率过程, 才能够对其进行间接观察。值得一提的是, 语言过程也是一种双重随机过程^[12]。假设某一可观察符号的状态仅与其上一状态相关, 那么 HMM 模型就相对简单高效, 特别是当标注语料库规模较小的时候, 隐马尔可夫模型具有明显的优势, 只需要关注音节与音节之间的联系即可, 通过提取每个词的上下文语义特征信息, 模型就可以学习到语料库中所涉及的句子的所有特征^[13-14]。

HMM 模型(隐马尔可夫模型)属于统计模型, 主要用于描述连续符号序列的条件概率。该模型涵盖了两个序列以及三个概率矩阵, 其中包括可被观察到的观测序列 O 、处于隐藏状态的状态序列 S , 还有初始的状态概率矩阵 π 、状态转移概率矩阵 A 以及状态生成观测的概率矩阵 B ^[15]。通常, 可将其定义为一个五元组, 记为 $\lambda=(S, O, A, B, \pi)$ 。

- (1) 状态序列 $S=\{a_1, a_2, \cdots, a_N\}$;
- (2) 一组可观察的符号序列 $O=\{O_1, O_2, \cdots, O_M\}$;
- (3) 状态转移矩阵 $A=a_{ij}$, 一个 N 行 N 列的矩阵, 表示在状态 i 时状态 $i+1$ 的输出状态是 j 的概率;

$$P(t_i|t_{i-1})=\frac{\text{训练语料中}t_i\text{出现在}t_{i-1}\text{之后的次数}}{\text{训练语料中}t_{i-1}\text{出现的总次数}} \quad (1)$$

(4) 可观察符号的概率矩阵 $B=b_{ij}$, 一个 N 行 M 列的矩阵, 表示在状态 i 时输出符号 j 的概率;

$$P(w_i|t_i) = \frac{\text{训练语料中 } w_i \text{ 的词位被标记为 } t_i \text{ 的次数}}{\text{训练语料中 } t_i \text{ 出现的总次数}} \quad (2)$$

(5) 初始状态矩阵 π , 句首词位概率分布, 一般记做 $\pi = \{\pi_i\}$ 。

完成模型的训练之后, 最终可得到上述 5 个输出, 分别为 2 个集合与 3 个概率矩阵, 本文在此基础上增加了可观测序列的转移矩阵 $C=C_{ij}$, 一个 M 行 M 列的矩阵, 表示在符号 i 时输出符号 j 的概率;

$$P(w_i|w_{i-1}) = \frac{\text{训练语料中 } w_i \text{ 出现在 } w_{i-1} \text{ 之后的次数}}{\text{训练语料中 } w_{i-1} \text{ 出现的总次数}} \quad (3)$$

由于句子是连续的词按一定规则组成的序列, 所以每个字和词之间都存在一定的联系, 通过可观察序列的转移矩阵获取每个音节与音节之间的上下文语义信息^[16]。至此 HMM 模型已完成对数据的采集和统计。

3 分词算法

经过第一步隐马尔可夫模型对训练语料库进行数据采集和统计, 下一步即可通过分词算法对测试集进行标注。

基于隐马尔可夫模型对藏文文本进行分词的流程图如图 2 所示。

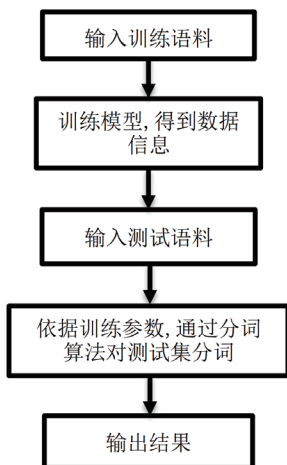


图 2 基于隐马尔可夫模型的藏文分词算法流程图

分词算法的步骤主要分为五步, 与隐马尔可夫模型的可观察符号的概率矩阵, 初始状态矩阵, 状态转移矩阵, 可观测序列的转移矩阵相对应, 具体步骤如下:

(1) 通过读取可观察符号的概率矩阵中的数据检索出每个字相对应的词位信息, 并计算每一个字为词首、词缀、黏着词、单个词的概率集合。

(2) 通过初始状态矩阵确定句首部分的分词情况。

(3) 通过状态转移矩阵依次确定每个状态的前后分词

情况是否准确。

(4) 通过可观测序列的转移矩阵依次确定每个字前后的分词情况是否准确。

(5) 按照已统计的数据概率对测试集中的词条逐行进行标注。

4 总结与展望

4.1 实验结果

本实验中所采用的藏文文本均来自各大藏文网站和微信公众号, 数据集共计 15 000 个句子, 数据集中单句最长为 127 个音节, 单句最短为 4 个音节。实验中分别以 8 000 个句子和 12 000 个句子作为训练语料库进行对比实验, 为检查结果模型是否出现过拟合现象, 二者的测试集分为集内语料 3 000 个句子和集外语料 3 000 个句子, 测试的具体情况如表 2 所示。

表 2 实验结果

语料库	集内测试	集内准确率 /%	集外测试	集外准确率 /%
8 000	3 000	88.37	3 000	86.6
12 000	3 000	90.1	3 000	88.2

实验结果分析: 实验结果中并未出现明显的过拟合现象, 集内测试和集外测试的结果之间误差较小; 语料库的大小在一定程度上影响了实验的结果, 实验的准确率随着语料库中句子的数量增加而逐步提高^[17]。由于语料库中黏着词的只占 0.62%, 再加上其他的藏文音节字的占比较高, 导致测试集中“བཤེད་པལ་མཐོན་མཐོན་”等藏文黏着词的分词结果准确率不高。本实验与传统的最大匹配法和 HMM 模型进行对比, 在同等的实验条件下, 本文提出的基于改进的隐马尔可夫模型的分词结果准确率高于最大匹配法和 HMM 模型, 详细结果如表 3 所示。

表 3 对比实验结果

分词方法	训练集	测试集	准确率 /%
最大匹配法	8 000	3 000	71.67
	12 000	3 000	76.12
HMM 模型	8 000	3 000	82.50
	12 000	3 000	84.25
改进的 HMM 模型	8 000	3 000	83.06
	12 000	3 000	86.05

由实验结果可知, 最大匹配法十分依赖于词表大小, 导致使用小规模数据集实验效果不佳, 且对于藏文黏着词没有精细化处理, 明明是同一个词, 但是分词时出现各种分词结果; 而基于 HMM 模型的分词结果具有较高

的准确率,随着训练集的扩大 HMM 模型的分词准确率有明显的提高,最大匹配法在扩大训练集的情况下准确率也并没有太大的提高。本文提出的改进的 HMM 模型在同等实验条件下准确率为 86.05%。比最大匹配法和传统的 HMM 模型分别提升了 9.93% 和 1.8%。3 种分词方法实例如图 3 所示。

Inputsequence: རེ་མིང་ཡང་གནས་གནས་འབྲུག་པས་ནང་དུ་འཛུལ་ནས་ཐོག་བརྒྱན་ཅི་བཟུ་འདོད་ཐུག་མོང་།
label: རེ་/Bམིང་/Iཡང་/Oགནས་/Bགནས་/Iའབྲུག་/Bཔས་/Iནང་/Oདུ་/Iའཛུལ་/Oནས་/Oཐོག་/Bབརྒྱན་/Iཅི་
 /Oབཟུ་/Bའདོད་/Iཐུག་/Oམོང་/O།O
最大匹配法: རེ་མིང་ ཡང་ གནས་གནས་ འབྲུག་ པས་ ནང་ སུ་ འཛུལ་ ནས་ ཐོག་བརྒྱན་ ཅི་བཟུ་ འདོད་ ཐུག་ མོང་ །
HMM: རེ་/Bམིང་/Iཡང་/Oགནས་/Bགནས་/Iའབྲུག་/Bཔས་/Iནང་/Oདུ་/Iའཛུལ་/Oནས་/Oཐོག་/Bབརྒྱན་/Iཅི་
 /Oབཟུ་/Bའདོད་/Iཐུག་/Oམོང་/O།O
改进的HMM: རེ་/Bམིང་/Iཡང་/Oགནས་/Bགནས་/Iའབྲུག་/Bཔས་/Iནང་/Oདུ་/Iའཛུལ་/Oནས་/Oཐོག་
 /Bབརྒྱན་/Iཅི་/Oབཟུ་/Bའདོད་/Iཐུག་/Oམོང་/O།O

图3 不同方法分词实例

4.2 展望

藏文分词是藏语信息处理研究的一个重要任务^[18]。本文基于隐马尔可夫模型的藏文分词方法,通过加入可观察序列的转移状态矩阵能够有效联系音节与音节之间的上下文语义信息特征,并以 12 000 个藏文句子作为语料库进行了对比实验,经实验结果得出,与最大匹配的藏文分词和传统 HMM 模型的藏文分词相比准确率提高了 2.3%,而且实际的处理操作也相对简单,降低了一些人工处理的难度。实验还有一些可以继续改进和需要克服的困难;例如:极个别未登录词和切分歧义^[19]方面还需要改进算法或者添加藏文语法特征来解决和优化,对于分词的效率和准确度也有上升空间,后续的实验亦可通过扩充语料库,使用更高阶的隐马尔可夫模型^[20]去获得更好的结果。

参考文献:

[1] 于永斌,陆瑞军,尼玛扎西,等.基于长短时记忆和条件随机场藏文分词模型[J].情报工程,2023,9(2):108-116.
 [2] 李亚超,江静,加羊吉,等.TIP-LAS:一个开源的藏文分词词性标注系统[J].中文信息学报,2015,29(6):203-207.
 [3] 李博涵,刘汇丹,龙从军,等.基于深度学习的藏文分词方法[J].计算机工程与设计,2018,39(1):194-198.
 [4] 王莉莉,王宏渊,白玛曲珍,等.基于 BiLSTM-CRF 模型的藏文分词方法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2020,32(4):648-654.
 [5] 尹宗鹤,尼玛次仁,于韬,等.基于 ASBC 模型的藏文自动分词方法研究[J].计算机与数字工程,2023,51(6):1227-1230.

[6] 格桑加措,阿卜杜热西提·热合曼,尼玛扎西,等.Bi-LSTM 和 CRF 结合的藏文分词方法研究[J].中央民族大学学报(自然科学版),2024,33(3):40-46.
 [7] 常芳玉,才智杰.一种基于八词位标签的 BiLSTM-CRF 藏文分词方法[J].中文信息学报,2024,38(10):64-70.
 [8] XUE N W. Chinese word segmentation as character tagging[J].International journal of computational linguistics & chinese language processing, 2003,8(1): 29-48.
 [9] 欧珠,扎西加.藏语计算语言学[M].成都:西南交通大学出版社,2014.
 [10] 洛桑嘎登.藏文自动分词与词性标注研究[D].北京:中央民族大学,2016.
 [11] 刘晓彤,赵小兵.藏文自动分词技术研究[J].中央民族大学学报(自然科学版),2022,31(2):63-66.
 [12] 王佳楠,梁永全.中文分词研究综述[J].软件导刊,2021,20(4):247-252.
 [13] 林游龙.基于隐马尔可夫模型的分词算法的设计与实现[J].网络安全技术与应用,2022(8):27-29.
 [14] 刘洋,余甜,丁艺.一种新的基于最大概率路径的中文分词[J].计算机与数字工程,2022,50(3):591-596.
 [15] 吴帅,潘海珍.基于隐马尔可夫模型的中文分词[J].现代计算机(专业版),2018(33):25-28.
 [16] 王福钊,周雁.藏文分词的前向匹配算法研究[J].电脑知识与技术,2019,15(27):195-197.
 [17] 高定国,杨晓龙,杨宇帆,等.MLWS2021 藏文分词评测报告[J].高原科学研究,2022,6(1):82-89.
 [18] 李亚超,加羊吉,江静,等.融合无监督特征的藏文分词方法研究[J].中文信息学报,2017,31(2):71-75.
 [19] 常芳玉.融合 Attention 的 BiLSTM-CRF 藏文分词技术研究[D].西宁:青海师范大学,2023.
 [20] 李沅静,叶仁玉,冷婷.基于二阶隐马尔可夫模型的中文分词在文本情感分析中的应用[J].安庆师范大学学报(自然科学版),2023,29(3):44-48.

【作者简介】

贡保加(2000—),男,甘肃甘南人,硕士,研究方向:藏文信息处理及应用。

安见才让(1969—),男,青海西宁人,硕士,教授,研究方向:藏文信息处理和分布式网络。

(收稿日期:2024-11-18)

多注意力机制在遥感图像语义分割中的应用

张焱杰¹
ZHANG Yaojie

摘要

为解决遥感图像语义分割中传统注意力机制资源消耗过大的问题,优化分割效果与资源利用效率。文章提出一种创新的多注意力模块,将线性空间注意力与通道注意力相结合,利用多注意力模块构建解码器来完成分割任务。实验表明,所构建的多注意力模块有效提升了遥感图像语义分割的精度,实现了资源效率与分割效果的双重优化。多注意力机制能够在保证资源高效利用的前提下提升分割效果,为后续研究提供了一种可行的注意力机制应用方案。

关键词

深度学习; 语义分割; 注意力机制; 遥感影像

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.015

0 引言

遥感图像语义分割任务是利用遥感技术获取地表信息,并通过图像处理和深度学习等技术对遥感图像进行分析,目的是将图像中的每个像素分配到特定的类别中。与传统的图像分类不同,语义分割不仅关注整体图像类别,而且关注图像中每个像素所对应的具体类别,从而实现更为精细的分析。通过对遥感图像的语义分割,可以有效识别城市、森林、农业用地等不同土地利用类型,帮助监测土地利用变化,支持可持续发展,在土地资源管理、参量估算和经济评估等应用中起着至关重要的作用。

近年来,注意力机制逐渐融入到遥感图像的分割网络中,但普遍存在资源消耗大的问题。为此,本文设计使用线性空间注意力和通道注意力结合的多注意力模块来保持资源利用和图像分割的高效性。具体来说,利用 ResNet101 作为骨干网络来获取上下文信息,然后使用多注意力模块来高效地提取特征。最后在 GID 数据集上进行实验验证,实验结果表明,与遥感图像分割任务中常用的方法相比,分割效果有明显提升,取得了 90.95% 的像素准确率,83.67% 的平均像素准确率,76.72% 的平均交并比。

1 相关工作

遥感图像语义分割任务主要存在以下挑战:首先,遥感图像通常具有高分辨率和大范围的特点,处理和分析这些大规模数据需要强大的计算能力和存储资源。其次,遥感图像中的物体类别往往多样且复杂,如城市建筑、道路、

农田、水体等,导致分割任务中的类间相似性增加。最后,在实际场景中,物体可能被遮挡,或像素可能包含多个类别(混合像素),这使得准确分割更加困难。这些挑战使得遥感图像语义分割任务在技术和应用层面都具有很高的复杂性和研究价值。

为了解决上述问题,研究者进行了多项工作。早期的遥感图像分割方法主要基于像素的光谱特征和空间特征。常见的技术包括基于阈值的方法、区域生长、分水岭算法等。这些方法通常依赖于人工设计的特征,处理速度较快,但在复杂场景下的表现较差。随着机器学习的兴起,基于特征提取和分类器的分割方法逐渐被提出。例如,支持向量机(SVM)、随机森林等方法被广泛应用于遥感图像的分类任务。这些方法在一定程度上提高了分割的精度,但仍然受到特征选择和模型泛化能力的限制。深度学习的兴起为遥感图像的语义分割提供了新的解决方案^[1-2]。其中卷积神经网络(CNN)通过自动学习图像特征,在语义分割中表现出色。近年来,许多基于深度学习的分割网络被提出,其中最具代表性的是全卷积网络(FCN)、U-Net、DeepLab 等^[3-6]。全卷积网络(FCN)通过将全连接层替换为卷积层,使得能够进行端到端的像素级预测。U-Net 最初用于医学图像分割,但其对称的编码-解码结构也适用于遥感图像分割,通过跳跃连接将高分辨率特征与低分辨率特征结合,提高了分割精度。DeepLab 系列模型采用空洞卷积(dilated convolution)和条件随机场(CRF)后处理,有效捕捉多尺度信息,进一步提升了分割效果。最近,注意力机制逐渐被引入遥感图像分割中^[7]。注意力机制能够帮助模型聚焦于重要特征,提高分割精度,但缺点是资源消耗巨大。

1. 长治学院计算机系 山西长治 046000

[基金项目] 长治学院校级科研项目(020/XN0580)

2 多注意力分割网络

2.1 线性空间注意力

空间注意力机制 (spatial attention mechanism) 是深度学习用于计算机视觉任务的一种技术, 其核心思想是让模型能够聚焦于输入图像或特征图中的关键空间区域。空间注意力机制通过学习图像空间上的重要区域, 增强了模型在捕捉关键特征方面的能力, 通过增强与选定位置或物体相关的感知处理并抑制与非选定刺激相关的处理来促进环境中的自适应交互。常见的空间注意力机制基于点积注意力, 如图 1 所示。尽管点积注意力有效, 但它具有巨大的计算和内存成本, 尤其是在大规模输入的情况下。点积注意力的内存和计算成本随输入大小呈二次方增长, 限制了其在高分辨率图像和长序列等大规模场景中的应用。下面介绍由点积注意力推广得到的线性空间注意力 (linear spatial attention mechanism, LSAM)。

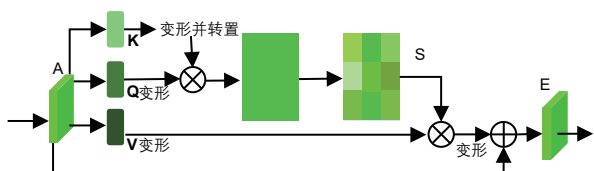


图 1 点积注意力

假设 N 和 C 分别表示输入序列的长度和输入通道的数量, 其中 $N=H \times W$, H 和 W 分别表示输入的高度和宽度。给定一个特征 $X = [x_1, \dots, x_n] \in \mathbb{R}^{N \times C}$, 点积注意力使用 3 个投影矩阵 $W_q \in \mathbb{R}^{D_x \times D_k}$, $W_k \in \mathbb{R}^{D_x \times D_k}$ 和 $W_v \in \mathbb{R}^{D_x \times D_v}$ 来生成相应的查询矩阵 Q 、键矩阵 K 和价值矩阵 V 。需要注意的是 Q 和 K 的维度应该是相同的。因此, 用相同的符号来表示它们的形状。通过一个标准化函数 $\rho(q_i^T k_j)$ 来评估第 i 个查询特征 q_i^T 和第 j 个键特征 k_j 之间的相似性。通常, 由于查询特征和键特征是由不同层生成的, $\rho(q_i^T k_j)$ 和 $\rho(q_j^T k_i)$ 之间的相似性不是对称的。通过计算所有位置对之间的相似性并将其作为权重, 点积注意力模块根据加权求和计算位置 i 的值:

$$D(Q, K, V) = \rho(QK^T)V \quad (1)$$

使用 softmax 来作为标准化函数:

$$\rho(Q^T K) = \text{softmax}(Q^T K) \quad (2)$$

式中: softmax 表示沿着矩阵 $Q^T K$ 的每一行应用 softmax 函数。 $\rho(Q^T K)$ 建模了所有位置对之间的相似性。但是, 由于 $Q \in \mathbb{R}^{N \times D_k}$ 和 $K^T \in \mathbb{R}^{D_k \times N}$, Q 和 K^T 的乘积属于 $\mathbb{R}^{N \times N}$, 导致 $O(N^2)$ 的内存复杂度和 $O(N^2)$ 的计算复杂度。因此, 点积注意力的高资源需求严重限制了其在大规模输入中的应用。

在不改变 softmax 函数的前提下, 点积注意力模块公式

(1) 生成的结果矩阵的第 i 行可以写成:

$$D(Q, K, V)_i = \frac{\sum_{j=1}^N \text{sim}(q_i, k_j) v_j}{\sum_{j=1}^N \text{sim}(q_i, k_j)} \quad (3)$$

式中: $\text{sim}(q_i, k_j)$ 表示 q_i 和 k_j 之间相似度的函数。并且 $\text{sim}(q_i, k_j)$ 可以进一步展开为 $\text{sim}(q_i, k_j) = \phi(q_i)^T \varphi(k_j)$, 其中 $\phi(\cdot)$ 和 $\varphi(\cdot)$ 可以被视为核平滑器, 如果 $\phi = \varphi$ 。因此相应的内积空间可定义为 $\langle \phi(q_i), \varphi(k_j) \rangle$ 。式 (3) 可以进一步被重写为:

$$D(Q, K, V)_i = \frac{\phi(q_i)^T \sum_{j=1}^N \varphi(k_j) v_j}{\phi(q_i)^T \sum_{j=1}^N \varphi(k_j)} \quad (4)$$

取 $\phi(\cdot) = \varphi(\cdot) = \text{softplus}(\cdot)$, 其中:

$$\text{softplus}(x) = \log(1 + e^x) \quad (5)$$

选择 $\text{softplus}(\cdot)$, 而不是 $\text{ReLU}(\cdot)$ 的原因是 softplus 的非零属性使得注意力在输入为负时能够避免零梯度。然后, 相似度函数可以转换为:

$$\text{sim}(q_i, k_j) = \text{softplus}(q_i)^T \text{softplus}(k_j) \quad (6)$$

从而将公式 (4) 重写为:

$$D(Q, K, V) = \frac{\text{softplus}(Q) \text{softplus}(K)^T V}{\text{softplus}(Q) \sum_j \text{softplus}(K)_{ij}^T} \quad (7)$$

由于 $\sum_{j=1}^N \text{softplus}(k_j) v_j^T$ 和 $\sum_{j=1}^N \text{softplus}(k_j)$ 可以预先计算并重用, 基于式 (7) 的注意力机制的时间和空间复杂度仅为 $O(N)$ 。

2.2 整体架构

除了上述空间注意力之外, 通道注意力机制是另外一种常用的注意力机制。通道注意力机制 (channel attention mechanism, CAM) 是一种在深度学习中, 特别是在卷积神经网络中使用的技术, 它通过关注特征图的不同通道来提升模型性能。这种机制的核心思想是, 在一个特征图中, 不同的通道可能捕捉到的信息重要性是不同的, 因此, 通过学习每个通道的重要性, 可以增强模型对关键信息的捕捉能力。

基于线性空间注意力和通道注意力的多注意力模块如图 2 所示。

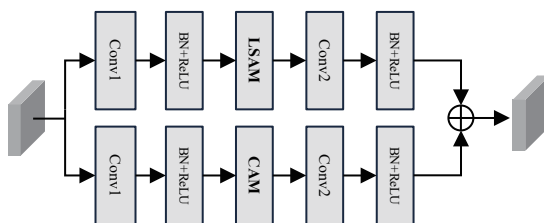


图 2 多注意力模块

对于空间维度, 由于点积注意力机制的计算复杂度与输入大小呈二次方关系, 使用线性空间注意力机制, 如图中 LSAM 所示。对于通道维度, 输入通道数 C 通常远小于特征图中包含的像素数 (即 $C \ll N$)。因此, 根据式 (3), 通道的 softmax 函数的复杂度 (即 $O(C^2)$) 并不大。因此, 使用基于点积的通道注意力机制, 如图 2 中 CAM 所示。然后将这两种注意力机制结合, 设计了一个多注意力模块, 以增强每

一层提取的特征图的区分能力。

方法整体架构如图3所示,利用在 ImageNet 上预训练的 ResNet-101 来提取特征图。具体来说,使用从 ResNet 四个残差块的输出中获取的 4 个不同尺度的特征图,然后被送入一个多注意力模块,最后使用双线性插值方法上采样得到与输入相同分辨率的分割图。

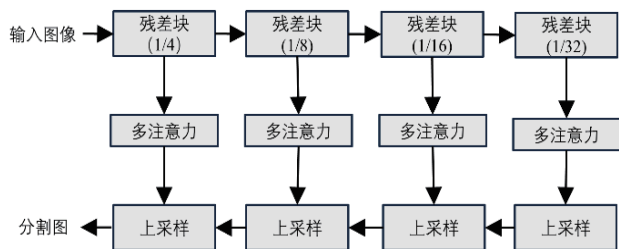


图3 整体架构图

3 实验结果和分析

3.1 实验设置

实验用的数据集是高分辨率的 GID 数据集 (gaofen image dataset)。GID 包含 10 幅 RGB 图像,大小为 7 200 px×6 800 px,由中国 Gaofen-2 卫星拍摄。每幅图像覆盖 506 平方公里的地理区域,并被标记为 15 类土地利用类别。实验将每幅图像分别划分为大小为 256 px×256 px 的不重叠块,并丢弃不能被 256 整除的边缘像素。因此,获得了 7 280 个子图。然后随机选择 60% 进行训练,20% 用于验证,其余 20% 用于测试。

实验采用语义分割常用的评估指标:像素精度 (pixel accuracy, PA)、平均像素精度 (mean pixel accuracy, MPA) 和平均交并比 (mean intersection over union, mIoU) 来评估方法的性能。其中 PA 对少数类别不敏感,而 mIoU 对不平衡数据集中的少数类别过于敏感。

3.2 对比实验

为了全面评估多注意力网络的性能,与经典网络进行了对比,包括 U-Net、DeepLab V3、DeepLab V3+ 和 PSPNet^[8]。所有模型都是用 PyTorch 实现的,使用 Adam 优化器,学习率为 0.000 3,批量大小为 16。所有实验都在配备有 24 GB RAM 的单个 NVIDIA GeForce RTX 3090 GPU 上进行。实验结果如表 1 所示。

表1 对比实验结果

方法	PA	MPA	mIoU
U-Net	86.38	74.53	64.52
Deeplab V3	89.39	80.91	71.81
Deeplab V3+	90.13	81.48	72.67
PSPNet	90.57	82.21	74.80
本文	90.95	83.67	76.72

实验结果表明,所提出的方法在所有定量评估指标上

的表现均超过了其他算法。对实验结果进行分析,由于 U-Net 结构简单且浅层,其特征提取能力有限,因此 U-Net 的性能不足。通过使用扩张空间金字塔池化 (DeepLab V3 和 DeepLab V3+)、金字塔池化模块 (PSPNet) 聚合的多尺度上下文信息,有助于提高最终分割图的准确性。

与通过扩张卷积、池化操作或单独的注意力捕获上下文信息不同,多注意力网络直接在多层上对输入的每对像素建模全局依赖性。由于线性空间注意力显著降低了内存和计算需求,因此可以不考虑输入特征图的大小,利用多层全局上下文信息。因此,所提出的多注意力网络设计,它在四个尺度上对长距离依赖性进行建模,有助于捕获输入的精细特征。

3.3 消融实验

在所提出的多注意力分割网络中,使用 ResNet-101 作为骨干网络来获取全局上下文表示,然后利用注意力机制增强特征提取能力。为了进一步评估注意力块和骨干网络的贡献,在 GID 数据集上使用不同的设置进行了消融实验。结果如表 2 所示。

表2 消融实验结果

骨干网络	注意力	PA	MPA	mIoU
ResNet-50		90.38	83.09	73.86
ResNet-50	√	90.53	83.94	75.27
ResNet-101		90.44	81.94	74.49
ResNet-101	√	90.95	83.67	76.72

ResNet-101 比 ResNet-50 产生了更高的准确率,因为更深的骨干网络使得网络能够捕获更精细的特征。这种深度结构的优势在于能够逐层构建更加抽象且具有辨识能力的特征表示,进而提高模型在复杂任务中的表现。对于不同的骨干网络,注意力机制平均提高了 1% 的 mIoU。这一结果表明,注意力机制通过加强对关键信息的关注,能够有效增强网络在特征选择和信息聚焦方面的能力,从而提高整体性能。注意力机制受生物机制启发,已经成为一种计算效率高且具有可配置灵活性的结构。通过将线性空间注意力和通道注意力的结合,构成的一个复杂度为 $O(N)$ 的多注意力模块,在实验中验证了其有效性和效率。

4 结语

本文针对注意力机制在遥感图像语义分割任务中存在的资源消耗巨大问题,设计了一种多注意力模块,将线性空间注意力与通道注意力两种注意力相结合。其中线性空间注意力将点积注意力机制的复杂度降低至 $O(n)$ 。通过整合该多注意力模块和骨干网络 ResNet-101,设计了一个多注意力网络,用于在不同层级整合语义信息,利用局部特征的上下文依赖性,提高了准确性和计算效率。

(下转第 74 页)

一种非接触式 FPGA 配置 Flash 快速烧写方法

王 博¹ 张瑜莹² 高 鹏¹ 李飞飞¹
WANG Bo ZHANG Yuying GAO Peng LI Feifei

摘 要

文章使用 Xilinx 公司 Artix-7 XC7A100T FPGA 与 Micro 公司 28F00AP30T BPI 配置 Flash 构成 FPGA 配置逻辑,并由 2 片 ESP8266 通讯芯片构建上位机与 FPGA 间的双向无线通信链路,共同组建 Flash 快速烧写实验平台。通过对 Flash 编程特性和无线通讯芯片工作方式的研究,编写基于 FPGA 的 Flash 快速烧写逻辑,设计了一种使用 Wi-Fi 传输的基于 FPGA 的非接触式配置 Flash 快速烧写方法,实现了非接触式更新 FPGA 配置 Flash 中的加载文件,为精简外部接口、提升产品气密性设计提供了一种可借鉴的思路。通过在 Flash 快速烧写实验平台中的验证,文章介绍的非接触式 Flash 快速烧写方法可以高效可靠的完成存储器件中 FPGA 配置文件的更新。

关键词

FPGA; 配置 Flash; 非接触式; 快速烧写

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.016

0 引言

随着航空、航天、通信等领域对计算性能和应用灵活性要求的不断提高,FPGA(field-programable gate array)作为一种非传统、可定制的高性能并行计算器件获得了越来越广泛的关注与应用^[1-5]。其中,FPGA 作为易失型计算芯片需要片外存储器件的配合,通常使用 Flash 来存储 FPGA 的配置信息^[6],而如何灵活、高效且快速的更新 Flash 芯片中的内容成为一项关键的课题。

如图 1 所示,传统的使用 iMPACT 或 Vivado 等 FPGA 厂商的开发软件通过 JTAG 端口进行烧写的方式,需要用到上位机、专用烧写软件、FPGA 仿真器和线缆等多种设备和软件^[7-8]。

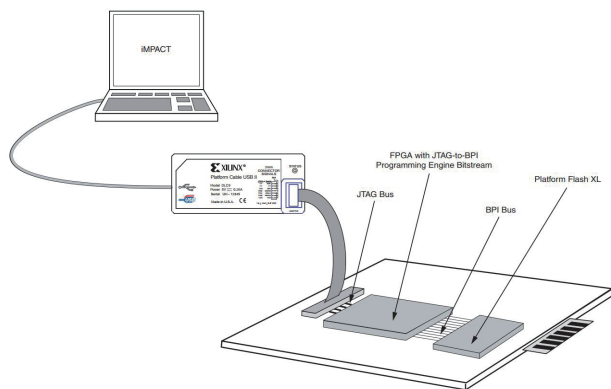


图 1 传统基于 JTAG 端口的 FPGA 编程方式

在开发阶段,该方式因为进行在线调试具有一定的便利性,可以使用成熟的软件和工具快速完成开发任务^[9]。

但这一方式也有不足之处,除需要多种设备和软件配合外,还需要在产品表面添加 6 针/8 针 JTAG 端口,增加了产品引出到外部的端口,不利于产品的气密性设计。当 FPGA 逻辑经过充分验证且功能较为固定后,带有 FPGA 的 PCB 板被装入到产品内,通常还会加上外置罩,使整个产品处于密闭状态。在之后的版本批量升级过程中,如果使用传统 JTAG 端口的方式去烧写 FPGA 的配置 Flash 需要使用的资源开销较大且不够灵活。

本文采用一种基于 Wi-Fi 传输的非接触式 FPGA 配置 Flash 快速烧写方法,可以在产品表面外无实体连接的方式下快速更新 Flash 中存储的配置文件,实现不脱去产品罩子即可快速更新 FPGA 配置加载文件。

1 实验平台设计

如图 2 所示,通过详细研究 Micro 公司 28F00AP30T BPI 配置 Flash 芯片,编写该型 Flash 的 FPGA 烧写校验逻辑,充分利用 Flash 芯片内的 512 字(一字为 16 bit)写缓冲器来进行快速烧写,相比传统字编程的烧写方式大大加速了 Flash 的烧写速率,节省了编程时间。另外,通过建立无线传输数据通道,形成了完整的 FPGA 配置数据下发、校验和烧写完整工作流程。烧写软件的编程基于 XILINX 公司 XC7ASX100T 器件,开发软件使用 Vivado 2016.2 版

1. 中国空空导弹研究院 河南洛阳 471009
2. 中国人民解放军 93160 部队 北京 100071

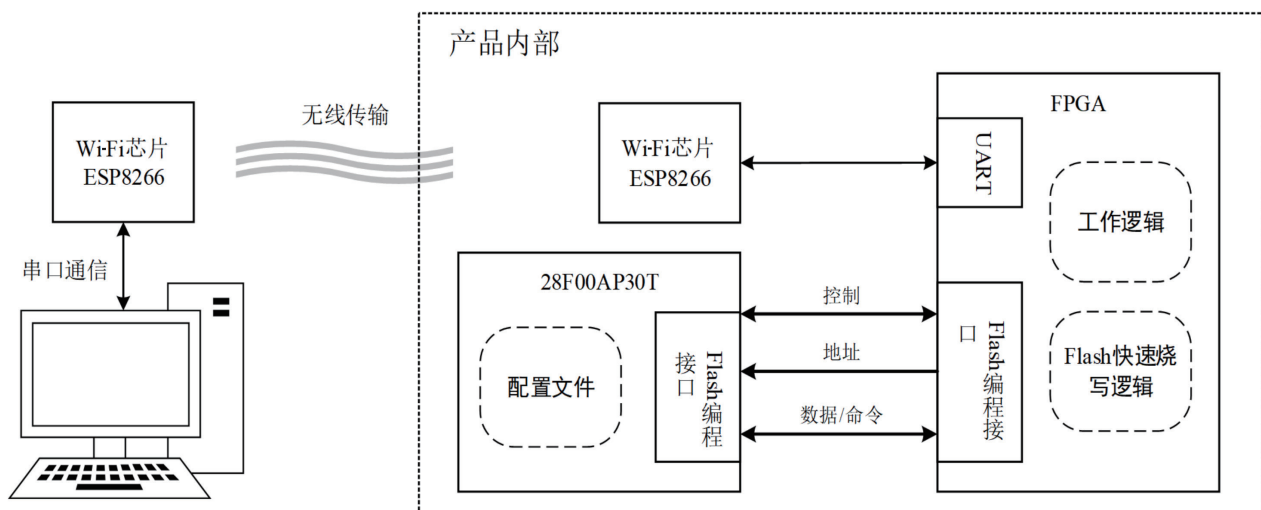


图2 非接触式FPGA配置Flash快速烧写方法原理框图

本，编程语言为 Verilog，整个执行流程在某原理验证用的信号处理 PCB 板上进行了功能测试。

2 无线传输方式介绍

在上位机端（近端）和 FPGA 端（远端）分别使用一片 ESP8266 芯片来构建 Wi-Fi 传输通道，两片 ESP8266 芯片提前经过编程，上电后会自动互相搜索网络并建立连接。近端通过上位机串口与 ESP8266 芯片相连接，串口通信速率 115 200 bit/s，芯片将串口接收到的数据和命令转化为 Wi-Fi 信号向远端发送，同时接收远端的信息反馈。

远端 ESP8266 芯片通过 Wi-Fi 信号接收到相应的命令和数据，通过双向 UART 端口与本地的 FPGA 建立连接并进行通信。FPGA 根据接收的命令和数据执行相应的操作，完成 Flash 的擦除、烧写和回读校验等更新操作。

3 Flash 快速烧写

Flash 本身不具有自我更新能力，需要由外部连接的 FPGA 器件按照 Flash 器件手册的编程要求对其进行更新。Flash 更新逻辑主要包括 5 大部分，分别为：烧写前准备、数据擦除、内容下发与校验、烧写与回读校验、器件锁定。

3.1 烧写前准备

如图 3 所示，FPGA 上电后自动加载带有 Flash 快速烧写逻辑的配置文件，Flash 快速烧写逻辑中的执行状态机对配置 Flash 进行状态校验、配置寄存器重写、模式设定等操作。另外，Flash 上电后默认为锁定状态，执行写操作前，需要对 Flash 的所有分区进行解锁操作，等所有分区的解锁操作完成后进入 Flash 擦除流程。

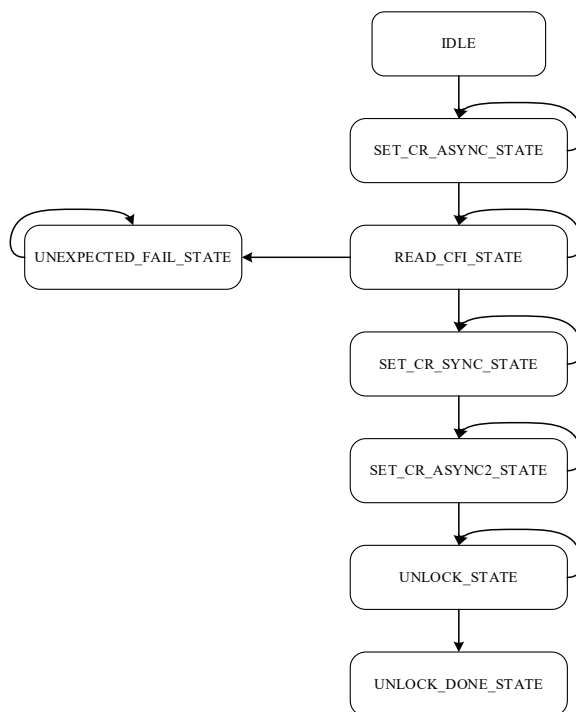


图3 Flash 烧写前准备工作流程

3.2 数据擦除

如图 4 所示，Flash 的擦除需要进行等待和校验，擦除命令从 FPGA 发送给 Flash 后，会进行轮询操作，以确定当前 Flash 的状态。通过定时查询 Flash 的状态寄存器，执行逻辑会判断是否当前分区的擦除操作完成，如果没有则继续等待，如果完成擦除则清空状态寄存器。然后，状态机跳转到擦除完成判断状态，查看是否完成所需分区的擦除操作，没有完成则重复以上操作。如果所需分区的擦除已经完成，则跳转到擦除完成状态，等待进入 Flash 烧写与回读校验工作流程。

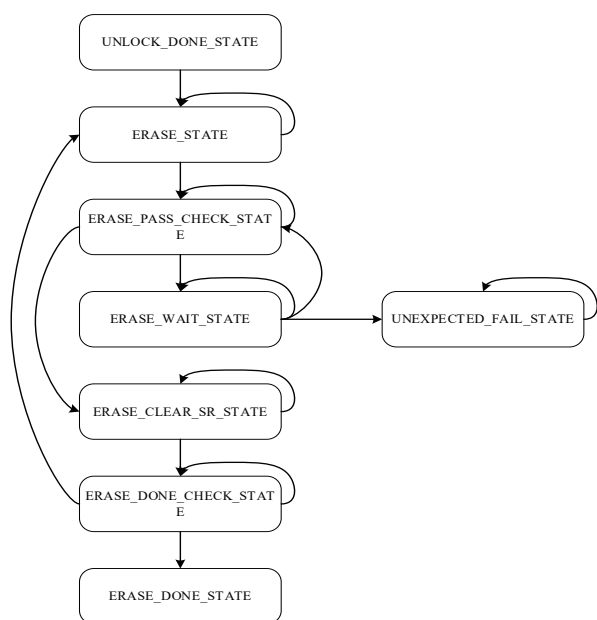


图4 Flash 擦除工作流程

3.3 内容下发与校验

在FPGA完成Flash的擦除工作后，远端会向近端发送数据传输请求包，远端接收到近端的传输请求后会将数据按照每包1 kB的大小进行发送，经近端ESP8266芯片将下发内容转换为无线传输，远端ESP8266芯片接收到发送的数据包后会通过UART传送给远端的FPGA，FPGA计算该数据包的校验和并与包尾附带的校验和进行比对，如果一致则接收该包数据，否则要求重新传输。本实验中设计的最大重传次数为10，即为单一数据包重传10次仍不能通过校验，则认为传送失败，当前网络状态不满足烧写要求，工作流程退出。上位机会择机重新开启Flash的烧写工作。

3.4 烧写与回读校验

本小节是整个Flash快速烧写方法的核心，主要描述Flash快速烧写与回读校验逻辑。Flash在执行完擦除操作并接收到有效数据后，会自主执行Flash快速烧写与回读校验过程，如图5所示。

整个操作流程可分为四步：

(1) FPGA接收远端Wi-Fi芯片通过UART串口传送来的数据并存入FIFO中进行保存，以供回读校验使用。每512个16 bit字为一包，以充分利用28F00AP30T型Flash的512字大小的SRAM缓存空间，大幅提升Flash的写入速率。

(2) FPGA发送SETUP命令，并读状态寄存器确认命令状态。通过控制一次发送的数据字的长度，将接收到的512个16 bit数据字依次写入Flash内。

(3) 发送CONFIRM命令，完成一个512字的烧写操作。

(4) 最后执行回读操作，通过读Flash命令将回读到的数据与FPGA片内FIFO中存储的下发数据进行逐字比对，完成本包的回读校验工作。

重复以上烧写和回读校验过程，直到所有数据都被写入Flash内，并全部通过回读校验，Flash的烧写工作完成。

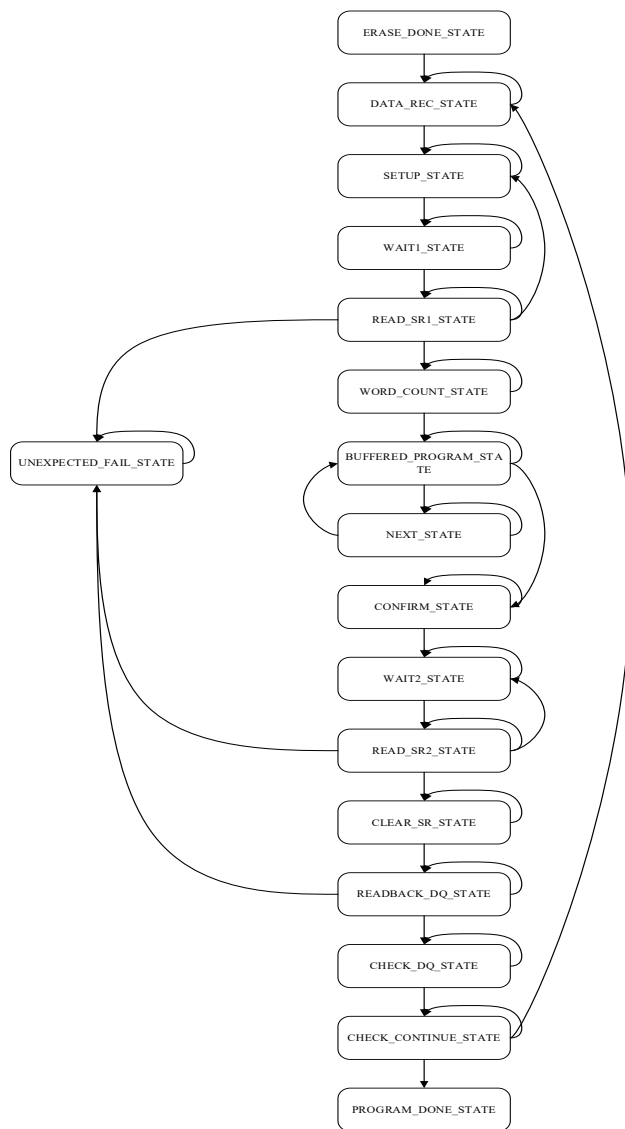


图5 Flash 快速烧写与回读校验工作流程

3.5 分区锁定

Flash烧写完成并经过校验后，将所有分区锁定，以防止误操作可能导致的存储数据的改变，如图6所示。

4 平台验证

通过实际搭建验证平台，并编写FPGA闪灯程序作为实

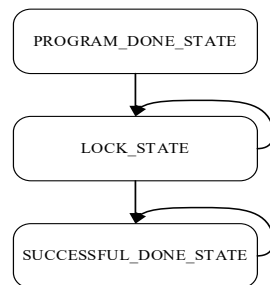


图6 Flash 锁定工作流程

验用Flash快速烧写的上位机下发内容，经多次Wi-Fi传输和Flash快速烧写实验，观察在烧写完成后FPGA重新上电时的LED灯工作状态，与编程要求的1 Hz闪烁频率一致，故而验证Wi-Fi传输和Flash快速烧写的正确性。

5 总结

本文将无线数据传输技术与Flash快速烧写技术相结合,创新性的实现了非接触式FPGA快速烧写方法,可在不脱去外部罩子、不增加裸露的硬件连线的情况下实现FPGA软件的升级,未来可以扩展到更多类型器件中,具有较好的应用意义。

后续还可考虑使用FPGA Multi-boot技术^[10],通过将RS管脚连接到Flash地址线的高两位,使配置Flash划分为多块不同分区,防止意外烧写错误而导致FPGA无法正常加载现象。

参考文献:

- [1] 戴政,陈小敏,廖志忠,等.基于FPGA的随机衰落及硬件实时统计实现[J].航空兵器,2020,27(2):71-76.
- [2] Micron Technology. PC28F00AP30TF datasheet[EB/OL]. [2024-06-21]. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/558688/MICRON/PC28F00AP30TF.html>.
- [3] AMD. 7 series FPGAs configuration user guide (UG470)[EB/OL].(2023-12-05)[2024-06-25]. https://docs.amd.com/v/u/en-US/ug470_7Series_Config.
- [4] NAIK K C, BABU J C, PADMAPRIYA K, et al. Implement-

ing NAND flash controller using product reed solomon code on FPGA chip[J]. International journal of engineering research and applications , 2013, 3(2): 224-229.

- [5] 李鹏,兰巨龙.用CPLD和Flash实现FPGA配置[J].电子技术应用,2006(6):101-103.
- [6] 关珊珊,周洁敏.基于Xilinx FPGA的SPI Flash控制器设计与验证[J].电子器件,2012,35(2):216-220.
- [7] 康嘉.基于FPGA配置的电路系统设计[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [8] 郑吉华.一种FPGA芯片在线更新配置电路及方法:CN202011134086.9[P].2021-02-05.
- [9] 刘宇波,施文韬.基于FPGA和PowerPC的FPGA启动加载Flash升级系统及方法[P].2016-12-7.
- [10] 王群泽,胡方明,林汉成,等.基于Flash和JTAG接口的FPGA多配置系统[J].单片机与嵌入式系统应用,2011,11(4):37-40.

【作者简介】

王博(1993—),男,河南鲁山人,硕士,工程师,研究方向:嵌入式系统与雷达信号处理。

(收稿日期:2024-11-14)

(上接第70页)

实验结果表明,在高分辨率遥感图像的语义分割这一复杂任务中,本文方法在实验指标上展现出良好的性能。在GID数据集上的实验,所提出的方法的性能在所有准确性指标上超过了对比的基线方法。通过消融研究,评估多注意力模块的影响,结果表明多注意力模块能够明显提升分割效率。另外,多注意力模块所展示的资源效率使其能更普遍地应用在多种网络中。

参考文献:

- [1] 马震环.深度学习技术在图像语义分割中的应用研究[D].成都:中国科学院大学,2020.
- [2] 张琛亮.几类基于Transformer的遥感图像语义分割方法研究[D].南京:南京信息工程大学,2023.
- [3] CHEN L C, PAPANDREOU G, SCHROFF F, et al. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation[DB/OL]. (2017-12-05)[2024-06-16].<https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.05587>.
- [4] CHEN L C, ZHU Y K, PAPANDREOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[J].Computer vision ,2018,11211:833-851.

- [5] LONG J, SHELHAMER E, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[J].IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2017, 39(4):640-651.
- [6] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[J]. Medical image computing and computer-assisted intervention, 2015, 9351: 234-241.
- [7] LI R, ZHENG S Y, ZHANG C, et al. Multiattention network for semantic segmentation of fine-resolution remote sensing images [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2021, 60: 1-13.
- [8] ZHAO H S, SHI J P, QI X J, et al. Pyramid scene parsing network[DB/OL]. (2017-04-27)[2024-05-11]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.01105>.

【作者简介】

张焱杰(1993—),男,山西长治人,硕士研究生,助教,研究方向:深度学习、算法设计与分析。

(收稿日期:2024-11-19)

基于改进 YOLOv7-tiny 飞行员表情识别算法研究

杨一豪¹

YANG Yihao

摘要

针对飞行员情绪识别中存在的精度不足和效率受限问题,文章提出了一种基于改进深度学习模型的情绪检测算法。首先,在现有模型中引入了 CBAM 注意力机制,以增强模型对关键特征的关注,抑制非关键区域的干扰;其次,采用 Ghost Conv 模块进行轻量化设计,在显著降低模型参数量和计算复杂度的同时保持高效的特征提取能力。通过实验对比分析了单独引入 CBAM 模块、Ghost Conv 模块以及两者结合使用的效果。实验结果表明,改进后的算法在情绪识别的检测精度上提升了 3.1%,计算复杂度 (GFLOPs) 降低了 21%,模型参数量减少了 10%,在准确性和实时性方面均取得了显著提升。该算法为飞行员情绪监测提供了一种高效、准确的解决方案。

关键词

YOLOv7; 情绪识别; 目标检测; CBAM; Ghost Conv

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.017

0 引言

近年来,随着航空业的快速发展,飞行员在高压环境下的疲劳与情绪波动问题日益严重,成为飞行安全的重要隐患。飞行员的状态直接影响飞行安全,因此实时监测和评估飞行员的情绪水平变得尤为重要。有效监测系统能够及时发现潜在的安全风险,从而提升飞行安全性和飞行员的身心健康^[1-3]。

传统的目标检测方法主要依赖基于特征的算法,如 Haar^[4] 特征级联分类器和 HOG (方向梯度直方图) 特征检测,这些方法通过提取图像中的特征点来进行目标识别。然而,这些方法在处理复杂背景或多样化目标时,常常面临精度不足和速度缓慢的问题。

现代目标检测技术通过深度学习,取得了显著的进展。目标检测方法主要分为两阶段和一阶段两种类型。两阶段方法,如区域卷积神经网络 (R-CNN)、快速区域卷积神经网络 (Fast R-CNN^[5]) 和掩码区域卷积神经网络 (Mask R-CNN^[6]),首先生成候选区域,然后对这些区域进行分类和边界框调整。这些方法通常能够提供更高的检测精度,但处理速度相对较慢。

相比之下,一阶段目标检测方法,如 YOLO (you only look once) 系列,将整个图像直接输入网络,并同时进行检测和定位。这种方法在速度上表现优越,能够迅速完成检测任务,但通常精度较低。为了弥补这一不足,本文使用 YOLOv7-tiny,引入了改进的网络架构和优化技术,进一步提高了检测精度,同时保持其较高的处理速度。

(a) 引入 Ghost Conv^[7] 模块,它通过轻量级卷积操作显著减少了计算量和参数量。这一改进使得网络在保持高效性能的同时,满足了实时性的要求。

(b) 引入 CBAM^[8] (convolutional block attention module),它通过结合通道注意力机制和空间注意力机制,增强了特征表示能力。CBAM 能够有效地突出重要特征并抑制无关信息,从而提升了检测精度和网络的整体性能。

1 YOLOv7-tiny^[9] 算法

YOLOv7 是 YOLO 系列的一个关键版本,相比于前代模型,在网络架构和算法优化上进行了显著改进。YOLOv7-tiny 是 YOLOv7 的一个轻量化版本,在保持高精度的同时也降低了参数和计算量,适用于边缘设备上。在 YOLOv7 中,创新性采用了 ELAN 结构作为骨干与特征提取网络,通过更密集的跳连接和并行下采样 (结合 Max pooling 与步长为 2×2 的卷积) 增强了特征表达能力与计算效率。同时,引入带有 CSP 结构的 SPP 模块,在不显著增加计算量的前提下扩大感受野,优化特征提取,实现了检测精度与速度的显著提升。

2 YOLOv7-tiny 目标检测网络改进

2.1 引入 Ghost Conv (幻影卷积)

在实际的应用场景中,神经网络模型的计算能力和运算速度常常受到硬件环境以及设备空间布局设计的限制。为了应对这些挑战,引入专门为移动设备或资源受限环境设计的网络结构,如 Ghost Conv 网络结构。其核心思想是利用线性操作生成丰富的特征图,同时减少冗余信息的产生,从而降

低模型对硬件存储空间的需求并提升运算速度。使其更加适合在实际部署场景中运行。

与传统的卷积操作相比，Ghost Conv 网络结构通过深度可分离卷积和线性操作生成特征图，显著减少了冗余信息的产生，从而降低了模型的参数量和计算量。这种轻量化设计使得 Ghost Conv 在嵌入式设备或资源受限的环境中具有更高的效率和实时性，尤其适用于对速度和存储要求严苛的应用场景。

图 1 为传统的卷积，传统卷积在特征提取过程中会产生大量的特征图，这些特征图虽然有助于捕捉图像中的复杂信息，但同时也带来了计算量大、参数量多以及硬件存储空间占用高等问题。图 2 为 Ghost Conv，其中 Conv2d 的参数分别为输入维度，输出维度，卷积核大小，stride 和 group。通过图 2 可知，输入的数据首先通过 1×1 的卷积核来调整维度，再通过一个深度可分离卷积来提取特征，最终将二者连接起来就是 Ghost Conv 的整体结构。

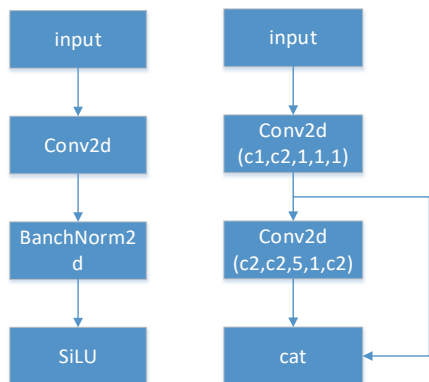


图 1 传统卷积 图 2 Ghost 卷积

普通卷积和 Ghost Conv 的计算量和参数量也存在巨大差异，假设输入数据的 shape 是 $c \times h \times w$ ，分别是输入的 channel、特征图的高和宽。经过第一次卷积后输出的 shape 为 $c' \times h' \times w'$ ，分别是输出的 channel、输出特征图的高和宽。常规卷积核大小为 d ，经过 s 次变换，普通卷积的额计算量和 Ghost Conv 的计算量对比：

$$r_s = \frac{n * h' * w' * c * k * k}{\frac{n}{s} * h' * w' * c * k * k + (s-1) * \frac{n}{s} * h' * w' * d * d} \approx s \quad (1)$$

普通卷积和 Ghost Conv 的计算量对比：

$$r_c = \frac{n * c * k * k}{\frac{n}{s} * c * k * k + (s-1) * \frac{n}{s} * d * d} \approx s \quad (2)$$

2.2 引入 CBAM 注意力机制

CBAM (convolutional block attention module) 注意力机制的优势有多个方面。之前的注意力机制往往只关注通道注

意力或空间注意力中的一个方面，这在一定程度上限制了它们对特征信息的全面捕捉和利用。而 CBAM 则巧妙地结合了通道注意力和空间注意力两种机制，使得模型能够同时关注特征图的通道和空间维度，从而更全面地捕捉和利用特征信息。这种双重注意力的结合不仅增强了模型对特征的感知能力，还提高了模型在不同任务上的适应性和鲁棒性。此外，CBAM 的设计简洁而高效，能够在不显著增加计算成本的前提下，有效提升模型的性能。因此，CBAM 注意力机制相比之前的注意力机制，在特征信息的全面捕捉、模型性能的提升以及计算效率的优化等方面都表现出了更好的性能。

CBAM 模块的核心思想是对输入特征图进行两阶段的精炼：首先通过通道注意力模块关注于“哪些通道是重要的”，然后通过空间注意力模块关注于“在哪里”是一个有信息的部分。这种双重注意力机制使 CBAM 能够全面捕获特征中的关键信息。

图 3 为 CBAM 的总体流程，主干网络的特征图为 $F \in \mathbb{R}^{C \times H \times W}$ ，由 CBAM 产生的 1D 通道注意力特征图为 $M_c \in \mathbb{R}^{C \times 1 \times 1}$ ，2D 空间注意力特征图为 $M_s \in \mathbb{R}^{1 \times W \times H}$ 。

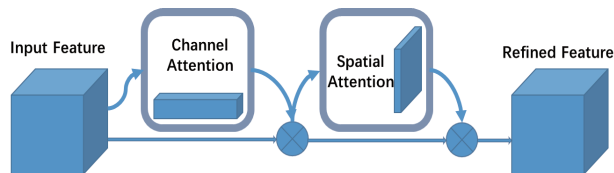


图 3 CBAM 注意力机制

(1) 通道注意力机制

在神经网络中，特征图的每一个通道都可以被视为一个特征检测器，在训练过程中应该给重要的特征层加大的权重，这样才能有效提升检测效率。为了更高效地计算通道注意力特征采用了平均池化和最大池化两种方法，将两种池化的结果送入多层感知机 (MLP) 中提取最终的通道注意力特征图 $M_c \in \mathbb{R}^{C \times 1 \times 1}$ ，如图 4 所示。

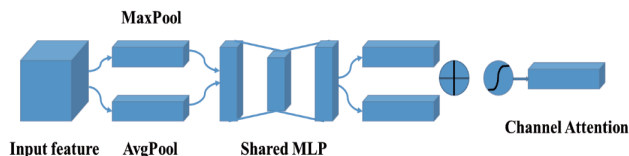


图 4 通道注意力机制

(2) 空间注意力机制

空间注意力主要关注的是在特征图中哪个区域更为重要。空间注意力机制的输入是通道注意力和原始输入，通过压缩特征图的通道得到 $H \times W \times 1$ 的两个特征图，得到这两个特征图后再通过一个卷积核大小为 7×7 的卷积运算得到一个 $H \times W \times 1$ 特征图。最后经过激活层即可得到最终的空间注意力特征，如图 5 所示。

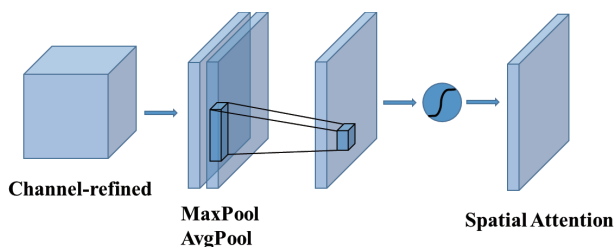


图5 空间注意力机制

3 实验及结果分析

3.1 构建人脸情绪数据集

为了全面评估人脸表情识别算法的性能,本文从多种公开资源中搜集并整合了一个包含约4 000张图片的人脸表情数据集。数据集中涵盖了“愤怒(Angry)”“厌恶(Disgusted)”“高兴(Happy)”“中立(Neutral)”“焦虑(Anxious)”“悲伤(Sad)”“害怕(Scared)”和“惊讶(Surprised)”8种表情类别,充分保证了表情的多样性与代表性。在数据划分上,按照7:2:1的比例分为训练集、验证集和测试集,分别用于模型的训练、参数调优和性能评估。这种划分方式既保证了模型训练的充分性,又增强了实验结果的科学性和可靠性,为评估表情识别算法的实际效果奠定了基础。

3.2 实验环境

本实验使用的深度学习框架为PyTorch,版本为2.1.2的GPU版本;编译语言为Python3.11.9;CUDA版本为12.3;操作系统为Win10专业版;CPU为12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12490F 3.00 GHz;运行内存32 GB;GPU为NVIDIA GeForce RTX3060 12 GB。

3.3 评价指标

在本实验中,为全面评估YOLOv7的目标检测性能,采用了mAP(mean average precision)作为主要评价指标。mAP是目标检测领域广泛应用的评价标准,它综合考虑了模型的精度和召回率,提供了对目标检测效果的全面评估。mAP的计算过程包括以下几个步骤:

- (1) 精度-召回曲线:对于每个类别,绘制精度-召回曲线(precision-recall curve),该曲线显示了在不同置信度阈值下模型的精度和召回率。
- (2) 平均精度(AP):通过计算精度-召回曲线下的面积,得到每个类别的平均精度(AP)。常见方法包括对精度召回曲线进行插值,以确保更稳健的AP计算。
- (3) mAP计算:对所有类别的AP值取均值,得到mAP。mAP值越高,表示模型在所有类别上的整体检测性能越优。

3.4 消融实验结果与分析

本文以YOLOv7-tiny为基准,依次组合添加改进措施,进行一系列消融实验,实验结果如表1所示。

表1 消融实验结果

方法	CBAM	Ghost Conv	P/%	R/%	mAP50 /%	Params /10 ⁶	FLOPS /10 ⁹
base			58.7	78	0.72	6.0	13.2
A	√		61.2	81.3	0.756	6.3	13.7
B		√	59.1	78.4	0.731	5.1	9.9
C	√	√	61.8	82.3	0.759	5.4	10.4

方法A引入CBAM模块后,YOLOv7-tiny模型的精度有所提升,P、R和mAP50分别提高了2.5%、3.3%和3.6%,尽管参数量和计算量略有增加,但整体性能得到了显著提升;方法B通过引入Ghost Conv模块,使得模型的P、R和mAP50分别提升了0.4%、0.4%和1.1%,同时减少了计算量;方法C结合了CBAM和Ghost Conv模块,使得精度进一步提高,P、R和mAP50分别提升了3.1%、4.3%和3.9%,虽然参数和计算量有所增加,但整体性能在精度和效率上达到了最佳平衡。

3.5 对比实验分析

为验证本文算法相比当前算法的优越性,将本文算法与Faster R-CNN、SSD、YOLOv3-tiny^[10]、YOLOv4s^[11]、YOLOv5s^[12]、YOLOv6s^[13]进行比较,实验结果如表2所示。

表2 对比实验结果

方法	P/%	R/%	mAP50 /%	Params /10 ⁶	FLOPS /10 ⁹
Faster R-CNN	60.6	81.3	73.2	41.2	206.7
SSD	55.4	76.8	66.1	24.0	117.1
YOLOv3-tiny	57.1	79.3	69.9	8.8	17.6
YOLOv4s	58.1	80.2	71.5	6.3	14.5
YOLOv5s	59.1	80.8	72.1	7.2	16.5
YOLOv6s	60.2	81.5	73.0	5.8	12.2
Ours	61.8	82.3	75.9	5.4	10.4

从表2实验结果可以看出,本文算法在精度和计算效率上均显著优于其他对比方法。在性能方面,本文算法的精度P、召回率R以及mAP50分别达到了61.8%、82.3%和75.9%,相比主流的Faster R-CNN、YOLOv5s和YOLOv6s均有不同程度的提升,尤其在mAP50上表现尤为突出。同时,在计算效率方面,本文算法的参数量仅为 5.4×10^6 ,FLOPS为 10.4×10^9 ,显著低于Faster R-CNN和SSD等模型,与轻量化模型YOLOv5s和YOLOv6s相比也展现出了更优的效率优势。

4 检测效果

为了更直观展示本文改进算法的检测效果,图6为原始YOLOv7-tiny模型的检测结果,图7为改进版YOLOv7-tiny模型的检测效果。从图像中可以明显看出,改进后的模型在同一幅图片中的检测结果更加精确。具体而言,改进后的模型不仅能更好地识别目标的位置,还显著提高了对物体的检测准确性。这样的改进有效地提升了模型在实际应用中的可靠性,尤其是在复杂环境下的物体检测任务中,表现得尤为突出。



图6 YOLOv7-tiny



图7 改进版 YOLOv7-tiny

5 结语

飞行员情绪识别对于提高航空安全和飞行员健康管理至关重要。为了提高情绪识别的准确性和实时性,本文在现有算法基础上进行了优化。本文改进了特征提取网络,使模型在复杂情绪识别任务中表现更好。同时,采用了轻量化设计,保证了模型在保持高精度的同时,具有较快的处理速度。实验结果表明,改进后的算法在准确性和实时性上都有显著提升,能够满足实际应用的需求。尽管如此,算法在某些复杂情绪的识别精度上仍有改进空间,未来将继续优化并关注其实际应用效果。

参考文献:

- [1] 孙可新,鲁慧民.基于深度学习的人脸识别仿真技术研究与应用[J].计算机仿真,2024,41(9):189-193.
- [2] 邓科豪.基于深度时空网络的面部表情识别[D].西安:西安理工大学,2024.
- [3] 李帅超.注意力机制与特征加权融合策略的微表情识别研究[D].北京:中国人民公安大学,2024.

- [4] 林齐发,吴晨曦,邹鑫.基于 Haar-like 特征的人脸检测算法研究与应用[J].现代计算机,2024,30(17):13-17.
- [5] REN S Q, HE K M, SUN J, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [6] HE K M, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al. Mask R-CNN[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2020, 42: 386-397.
- [7] HAN K, WANG Y H, TIAN Q, et al. GhostNet: more features from cheap operations[C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2020: 1577-15876.
- [8] WOO S, PARK J C, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C]//Computer Vision-ECCV 2018: 15th European Conference. New York: ACM, 2018: 3-19.
- [9] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLOv7: trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[C]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2023: 7464-7475.
- [10] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement[DB/OL].(2018-04-08)[2024-03-19].<https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767>.
- [11] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection[DB/OL].(2020-04-23)[2024-05-13].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.10934>.
- [12] ZHANG Y, GUO Z Y, WU J Q, et al. Real-time vehicle detection based on improved YOLOv5[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12274.
- [13] LI C Y, LI L L, ZHANG B, et al. YOLOv6: a single-stage object detection framework for industrial applications[DB/OL].(2023-09-20)[2024-06-14].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.02976>.

【作者简介】

杨一豪(1999—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向:图像处理。

(收稿日期:2024-11-25)

基于 GAN-DLNA 深度学习算法的计算机软件缺陷预测分析研究

韩 倩¹
HAN Qian

摘 要

针对计算机软件缺陷预测存在的数据类不平衡、冗余或无关数据过多等问题,基于贝叶斯网络(bayesian network)算法、深度学习网络算法(GAN deep learning network algorithm, GAN-DLNA)的软件缺陷预测提取方案,由贝叶斯网络的随机森林模型构建有向无环图,以软件缺陷目标变量节点为中心、用贝叶斯网络分类器(GBNC)感知及处理缺陷的度量元数据样本,利用 GAN-DLNA 深度学习生成对抗网络算法,使用基于均方误差、交叉熵的损失函数对多层深度学习网络进行扩展训练,通过增大源数据训练的误分类权重、减小目标数据训练的误分类权重,以此大大提升软件缺陷数据分类、缺陷数量预测质量。

关键词

大数据深度学习算法; 计算机软件; 缺陷预测分析; 分类与集成

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.018

0 引言

软件缺陷预测为发现计算机软件开发问题的重要方式,常见的缺陷预测模型分为有监督、无监督和半监督模型,通常缺陷样本数据集的数量少、集中度高,更适宜使用无监督聚类算法作出预测分析。如学者崔梦天等人针对报告库提交的软件缺陷报告文件,提出一种自然程序双模式语言的 LDA-BERT 缺陷报告检测模型,多次抽取上下文语义的特征向量作出识别分析。任晓莹等人利用 ReliefF 和 Fisher 判别比度量的特征数据集选择方案。本文面对计算机软件缺陷数据分布不平衡的实际特征,引入应用涵盖判别器和自编码器的深度学习网络算法(GAN deep learning network algorithm, GAN-DLNA)深度生成对抗网络算法,利用自编码器高斯混合模型(gaussian mixture model, GMM)去除被测数据噪声,基于 APE 均方误差、APCE 交叉熵的损失函数作出软件缺陷二分类模型训练,在降低深度学习算法迭代水平同时提高软件缺陷的预测与分类精度。

1 传统神经网络算法的不平衡数据集分类错误问题

计算机软件缺陷预测是对软件开发的组件模块代码、网络代码作出分析,在基于深度学习神经网络算法进行软件缺陷预测过程中,通常涉及软件代码度量、训练集特征提取、预测分析模型建构、缺陷预测等工作执行流程,即先需要将被测的软件代码转换为容易理解的标准化特征

度量元,再进行正常或缺陷训练数据集的特征提取、缺陷预测分析。

当前常用的软件缺陷预测神经网络算法,分为过采样算法、欠采样算法两种技术模式,由于存在软件缺陷的代码数据量、远远小于正常代码的数据量,使用以上两种算法作出数据提取、容易出现不平衡数据集的分类错误问题。如基于随机过采样算法、SMOTE 算法等过采样技术,从软件缺陷的少数类数据集中随机抽取样本作为新样本、重复抽取多次使少数类样本数量接近多数类,但该模式可能存在少数类样本过拟合(重复样本采集)、噪音数据采集的情况,导致模型本身的噪音数据干扰严重、泛化能力下降;而基于随机欠采样、Near Miss 欠采样算法等技术,是从正常的多数类数据中选取部分样本,与少数类样本聚合后作出预测分析,该模式缺点在于丢弃的多数类样本数据中可能包含重要信息,丢弃后的模型预测训练的召回率、精准度都严重下降,由此发生欠拟合情况,软件缺陷预测的召回率、精准度^[1]计算公式为:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

式中: TP 和 TN 分别表示多数类(正常)数据、少数类(缺陷)数据; FP 和 FN 分别表示预测为多数(正常)的少数类数据、预测为少数(缺陷)的多数类数据。由此可见,采用“输入-输出”映射关系模型的神经元欠采样和过采样算法,作出不平衡软件缺陷数据集的预测分析计算,往往更多关注多数类样本数据、忽略少数类样本数据的分类,在数据特征提取与

1. 茂名职业技术学院 广东茂名 525000

分类中容易陷入局部收敛，且泛化能力过差。

2 基于大数据深度学习算法的计算机软件数据转换与特征提取分类

2.1 被测软件代码数据的度量元转换

软件度量是将计算机软件开发产品属性作出数据映射量化，分为软件程序开发过程度量、程序代码度量，涉及代码行数（line of code, LOC）、McCabe 组件模块复杂度、Halstead 代码运算符数量等度量指标，用于反映计算机软件代码的集成度、耦合度和内聚度等属性特征。如基于 NASA MDP 计算机软件缺陷数据集，从 13 个不同数据集中选取 7 个作为待测样本，分别为 CM1、JM1、KC1、KC3、KC4、PC1、PC2 数据集，按照 LOC、McCabe、Halstead 的度量指标设置作出代码数据的度量元转换，得到表 1 的模块度量元统计结果^[2]。

表 1 NASA MDP 软件缺陷数据集

数据集项目	模块总数 / 个	度量元数 / 个	缺陷模块占比 / %
CM1	308	38	9.50
JM1	7 456	2 214	17.31
KC1	2 032	325	16.24
KC3	267	40	48.17
KC4	101	15	9.77
PC1	946	73	7.35
PC2	1 029	124	8.44

2.2 基于贝叶斯网络算法的计算机软件缺陷数据样本特征提取

面向计算机软件开发少数类、多数类样本数据，先将特定软件项目度量元的数据集、按照变量节点的父子关联关系构建有向无环图，其中根节点为软件项目缺陷数据集 X ，子节点为具有多个类别属性的度量元 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，可用 $CF=(LS, SS, n)$ 的三元组公式表示某一软件项目缺陷数据集 X 下的度量元样本集总和、平方和^[3]，计算公式为：

$$\begin{aligned} LS &= \sum_{i=1}^n (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \\ SS &= \sum_{i=1}^n (x_1 + x_2 + \dots + x_n)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中：LS 和 SS 分别表示包含 i 软件缺陷对象的度量元样本集总和、平方和。假设度量元 x_i 样本的类别属性为 C_j ，且 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_m\}$ 中包含着软件缺陷模块（incorrect）、无缺陷模块（Correct）的度量元属性，可用贝叶斯网络算法、对软件项目缺陷数据集 X 的不同度量元作出属性提取与划分^[4]，具体的计算公式为：

$$\begin{aligned} C_j(x_i) &= \arg \max P(C_m | x_i) \\ &= \arg \max \frac{P(C_m) \prod_{j=1}^m p(C_j | C_m)}{\sum_{j=1}^m P(C_m)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $C_j(x_i)$ 表示将度量元 x_i 样本划分至类别属性 C_j 的概率； $P(C_m)$ 和 $p(C_j | C_m)$ 分别表示度量元 x_i 样本出现的先验概率、条件概率。在计算机软件缺陷测试集的 n 个度量元样本分属于 m 个不同的分类属性情况下，基于加权贝叶斯网络的随机森林模型，将 n 个度量元样本分配至 m 个属性类，则在单个根节点下的度量元样本数据 x_i 属于 C_j 的纯度计算公式为：

$$\text{Gini}(C_j, x_i) = \frac{|x_i|}{\sum_{i=1}^n |x_1 + x_2 + \dots + x_n|} \text{Gini}(C_j) \quad (4)$$

式中： $\text{Gini}(C_j, x_i)$ 为将度量元样本数据 x_i 分配至 C_j 属性类的基尼系数； $\text{Gini}(C_j)$ 为将度量元样本数据 x_i 分配至 C_j 属性类的 Gini 基尼指数。 $\text{Gini}(C_j, x_i)$ 基尼系数用于评估软件缺陷度量元样本数据不为同一类的概率， $\text{Gini}(C_j, x_i)$ 值越小则表明度量元样本属于同一属性类的纯度越高，若 $\text{Gini}(C_j, x_i)=0$ 则表明单个根节点下的度量元样本均属于 C_j 属性类，也即某一软件项目缺陷只被归为一个类别，而后作出软件缺陷度量元样本的正则化评估分析，得到不同属性类下样本数据出现的概率，计算公式为：

$$P_{\text{laplace}}(x_i) = \frac{P(C_m | x_i) + \alpha}{N + \alpha P(C_m)} \quad (5)$$

式中： $P_{\text{laplace}}(x_i)$ 为基于拉普拉斯平滑公式，计算软件缺陷度量元样本在特定属性类下的出现概率结果； $P(C_m | x_i)$ 为软件缺陷度量元样本在所有属性类中出现的概率； N 为总的分析评估次数； α 为用于控制平滑程度的正则化参数。

3 基于 GAN-DLNA 深度神经网络算法的软件缺陷去噪与分类结果预测策略

3.1 基于 GAN-DLNA 网络算法判别器的样本数据去噪训练

具体 GAN-DLNA 网络算法结构^[5]如图 1 所示。

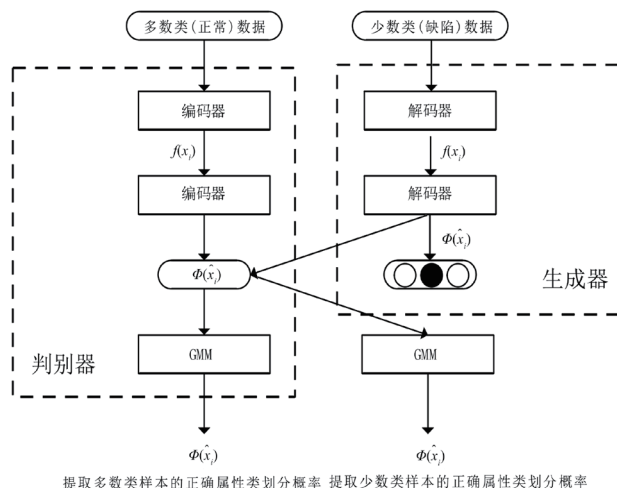


图 1 GAN-DLNA 网络算法结构分类结果预测流程

GAN-DLNA 深度神经网络算法为存在多个隐含层的神经网络结构，根据输入的计算机软件缺陷样本数据集多

少, 设置输入/输出隐含层节点总数 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n\}$ 、以及不同层级之间的神经元连接权重。而后基于深度生成对抗网络的生成器、判别器, 作出不平衡数据分类中被测训练集样本的噪声去除, 判别器分为自编码器、GMM 高斯混合模型的组成部分, 其中自编码器负责对被测训练集样本内噪声的去噪处理。

若计算软件缺陷度量元样本可用 $x_i = (\hat{x}_i, \varepsilon)$ 表示, 其中 $\hat{x}_i$ 和 ε 分别表示不包含噪声的原始代码样本数据、噪声数据, 那么将度量元样本 x_i 输入自编码器作出去噪过程中, 可引入深度生成对抗网络的 f_θ 激活函数、数据去噪激活值 $h_{w,b}(\tilde{x})$ 完成度量元样本的原始数据提取计算, 计算公式为:

$$J_{\text{Dac}}(w, b) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} \left\| h_{w,b}(x_i) - \hat{x}_i \right\|^2 \right) \quad (6)$$

$$h_{w,b}(x_i) = f\left(\sum_{i=1}^n wx_i + b\right)$$

式中: $J_{\text{Dac}}(w, b)$ 和 $h_{w,b}(x_i)$ 分别为深度网络算法隐含层的自编码器代价函数、去噪激活值; w 和 b 分别为深度网络算法参与度量元样本去噪的神经元权重、偏置, k 为参与自编码器噪声去除训练的度量元样本数, $J_{\text{Dac}}(w, b)$ 的值越小表明模型能够更好地从含噪声的输入度量元样本数据中恢复出原始数据。

3.2 基于 GAN-DLNA 网络算法的软件缺陷分类结果预测分析

将自编码器去噪后的输出值作为隐含层的输入值, 基于编解码器的均方误差 (measquare error, MSE)、交叉熵 (cross entropy error, CEE) 的损失函数公式, 作出不平衡数据集原始数据训练值、预测值之间的误差计算, 用 pred 和 real 表示输出层神经元度量元样本分类预测期望、真实结果^[6], 计算公式为:

$$f(x_i)_{\text{MSE}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \frac{1}{O} \left(\text{pred}_{\hat{x}_i} - \text{real}_{\hat{x}_i} \right)^2 \quad (7)$$

$$f(x_i)_{\text{CEE}} = -\frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \frac{1}{O} \left(\text{real}_{\hat{x}_i} - \log \left(\text{pred}_{\hat{x}_i} \right) \right)$$

式中: O 为输出隐含层的网络神经元个数; $\text{pred}_{\hat{x}_i}$ 和 $\text{real}_{\hat{x}_i}$ 分别为输出层神经元度量元样本分类预测期望、真实结果; $f(x_i)_{\text{MSE}}$ 和 $f(x_i)_{\text{CEE}}$ 分别为错分计算的均方误差、交叉熵。由于不平衡分布数据集中多数类样本远远多于少数类样本的数量, 因而通过调整分类器的分类阈值, 可使损失函数倾向于少数类软件缺陷样本的错分误差计算, 得到少数类 (缺陷) 数据分类的错分率 BER ^[7] 公式为:

$$\text{BER} = 1 - \frac{1}{2} (\text{Recall} + \text{Precision}) \quad (8)$$

式中: Recall 和 Precision 分别为计算机软件缺陷样本预测

的召回率、精准度; BER 表示少数类 (缺陷) 数据分类的平均错分率, 则少数类 (缺陷) 数据分类的平均准确率为 $1 - \text{BER}$ 。在基于隐含层编解码器完成少数类 (缺陷) 数据的多次预测分类扩展训练后, 使用 GMM 高斯混合模型对多数类 (正常)、少数类 (缺陷) 样本数据作出经验分布训练, 得到计算机软件缺陷度量元作出正确属性类划分的结果^[8], 计算公式分别为:

$$\text{argmax} \left[E_{\hat{x}_i \sim \chi^+} \log \phi^+(x_i)_{\text{MSE}} + E_{\hat{x}_i \sim \chi^-} \log (1 - \phi^+(x_i)_{\text{MSE}}) \right] \quad (9)$$

$$\phi(\hat{x}_i) = \frac{1}{|\hat{x}_i|} \sum_{i=1}^n \log \left(\omega_i \hat{x}_i (\mu_i, \sigma_i) \right) \quad (10)$$

式中: $E_{\hat{x}_i \sim \chi^+}$ 和 $E_{\hat{x}_i \sim \chi^-}$ 分别为多数类 (正常)、少数类 (缺陷) 样本数据的经验分布; $\phi(\hat{x}_i)$ 为提取软件缺陷度量元训练集作出正确属性类划分的概率; ω_i 为第 j 个数据所属属性类向量的高斯权重; $\hat{x}_i(\mu_i)$ 、 $\hat{x}_i(\sigma_i)$ 分别表示训练集属性分类向量的多维高斯函数均值、向量对角协方差矩阵, 用于描述训练集属性类的分布情况。

在不平衡分布数据集的多数类 (正常)、少数类 (缺陷) 数据量相差不大情况下, 可将自编解码器的分类阈值设为 0.5, 但实际情况是多数类 (正常) 数据量远高于少数类 (缺陷) 数据量, 此时需设置编解码器的分类阈值趋近于 1、 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$, 以此增加错分样本的迭代训练权重值 e 。在基于构造的多个分类器完成计算机软件缺陷数据集的训练后, 将 $\phi_1(\hat{x}_i), \phi_2(\hat{x}_i), \dots, \phi_7(\hat{x}_i)$ 等多个训练子集的正确属性类划分概率作出汇总, 若其满足式 (11) 的判定规则、则表明少数类 (缺陷) 样本数据的正确分类精度满足需求^[9]。

$$\left\{ \left(\phi_1(\hat{x}_i) \geq \text{BER}_1 \right) \cup \left(\phi_2(\hat{x}_i) \geq \text{BER}_2 \right) \dots \cup \left(\phi_7(\hat{x}_i) \geq \text{BER}_7 \right) \right\} \text{ THEN } \hat{x}_i \in \chi^+ \quad (11)$$

$$0.5 \leq \text{BER}_{K/2} \leq \dots \leq 1 \quad \text{ELSE } \hat{x}_i \in \chi^-$$

式中: BER 为少数类 (缺陷) 样本数据分类的错分率, 即在计算机软件缺陷度量元训练集正确属性分类概率 $\phi(\hat{x}_i)$ 大于错分率、至少 $K/2$ 个样本数据错分率值大于 0.5 的情况下, 得到计算机软件少数类 (缺陷) 样本的正确分类精度最高、损失代价最小, 表明使用多个分类器的被测训练集分类与集成、可减轻不平衡分类的倾斜效果。

4 仿真实验及结果分析

4.1 实验环境及指标设置

选用 NASA MDP 计算机软件缺陷数据集作为仿真实验数据, 基于 Matlab2022a 仿真软件对表 1 的模块度量元统计结果作出数据模型预测分析。在 Matlab2022a 仿真软件中设置 GAN-DLNA 深度学习生成对抗网络算法的分类阈值, 利

用自编码器作出训练集的去噪及基分类迭代操作后，使用判别器、生成器设置处理后的缺陷数据集高斯权重，计算少数类（缺陷）样本数据的属性类向量分布情况。引入 CNN 卷积神经网络算法作为对比算法，以均方误差 $f(x_i)_{MSE}$ 、BER 平均错分率等指标作出实验测试结果评估分析。

4.2 实验结果分析

基于半监督学习的 GAN-DLNA 生成对抗网络算法，按照输入表示、生成对抗、生成器和判别器半监督学习的执行流程，使用多个隐含层的神经元作出不平衡多数类（正常）、少数类（缺陷）数据的二分类预测评估，得到软件缺陷数据集训练值、预测值之间的误差分析结果如表 2、图 2 所示。

表 2 实验测试结果评估分析

数据集 项目	GAN-DLNA 深度学习算法		CNN 卷积神经网络算法	
	$f(x_i)_{MSE}$	BER 错分率	$f(x_i)_{MSE}$	BER 错分率
CM1	0.003 57	3.45	0.011 70	12.49
JM1	0.004 83	5.27	0.016 52	19.53
KC1	0.006 25	6.30	0.023 14	26.44
KC3	0.003 84	4.86	0.025 32	30.75
KC4	0.002 29	4.09	0.019 68	23.21
PC1	0.003 77	3.24	0.017 43	22.58
PC2	0.004 98	4.15	0.016 39	20.64

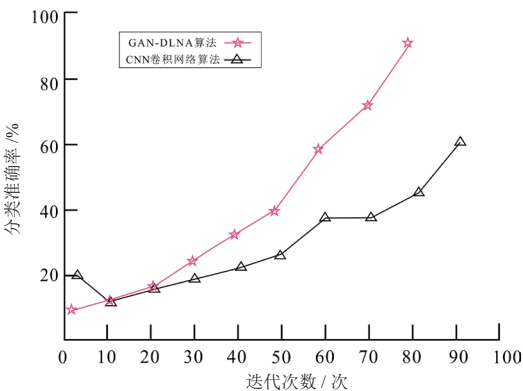


图 2 基于 GAN-DLNA 和 CNN 网络算法的仿真结果

由表 2、图 2 的仿真实验结果可得，基于 GAN-DLNA 深度学习算法的 APCE 损失函数为多数和少数类的软件缺陷样本数据赋予权值，促使输出隐藏层属性类特征提取的数据分类面朝着正确方向移动，得到的软件缺陷代码数值分类预测的均方误差 $f(x_i)_{MSE}$ 均控制在 0.001 以内，满足数据集训练值、预测值之间误差计算的需求，BER 平均错分率控制在 5% 以内，经过多次迭代的分类准确率达到 95% 以上，且多项指标均优于 CNN 卷积神经网络算法的迭代结果，表现出优秀的不平衡数据分类准确率和鲁棒性。

5 结语

“互联网+”环境下计算机软件程序的应用环境日益复杂，软件组件运行的缺陷数据集提取、缺陷问题预测成为软件管理重点。因此基于 GAN-DLNA 深度生成对抗网络算法，对软件项目缺陷数据集 X 中不同度量元作出属性提取的结果，通过增大少数类数据训练权重、减小多数类数据训练权重，由“自编码器-解码器”对度量元样本的输入、输出数据之间差异作出预测分析，将包含多个基特征的数据集作出分类与合并，可使分类面朝正确方向移动，并提高软件缺陷预测分类精准度。

参考文献：

- [1] 崔梦天, 杨善矿, 袁启航. 基于 LDA-BERT 重复缺陷报告检测模型研究 [J]. 西南民族大学学报 (自然科学版), 2023, 49(4): 414-423.
- [2] 田笑, 常继友, 张玉清, 等. 开源软件缺陷预测方法综述 [J]. 计算机研究与发展, 2023, 60(7): 1467-1488.
- [3] 任晓莹, 陈浩, 王淑琴, 等. 基于判别结构向量互补的集成特征选择方法 [J]. 天津师范大学学报 (自然科学版), 2023, 43(4): 57-63.
- [4] 王越, 赵静, 杜冠瑶, 等. 网络空间安全日志关联分析的大数据应用 [J]. 网络新媒体技术, 2020, 9(3): 1-7.
- [5] 崔梦天, 龙松林, 谢琪, 等. 基于量子粒子群混合烟花优化支持向量机的软件缺陷预测研究 [J]. 西南民族大学学报 (自然科学版), 2022, 48(6): 653-659.
- [6] 魏威, 江峰. 基于加权复杂度的 SMOTE 算法及其在软件缺陷预测中的应用 [J]. 计算机与数字工程, 2024, 52(5): 1418-1422.
- [7] 齐莉. 云计算背景下分布式软件系统故障检测技术研究 [J]. 电子制作, 2021(18): 88-90.
- [8] 张莹, 朱丽娜. 一种基于半监督集成学习的软件缺陷预测方法 [J]. 计算机与数字工程, 2023, 51(10): 2390-2394.
- [9] 郭威, 谢光伟, 张帆, 等. 一种分布式存储系统拟态化架构设计与实现 [J]. 计算机工程, 2020, 46(6): 12-19.

【作者简介】

韩倩 (1981—), 女, 山东烟台人, 硕士, 讲师, 研究方向: 计算机应用技术。

(收稿日期: 2024-11-01)

面向认知无线电应用的四端口 UWB-NB 天线设计

任林源¹
REN Linyuan

摘要

文章设计了一款面向认知无线电 (cognitive radio, CR) 系统的四端口 UWB-NB 天线, 旨在通过动态频谱感知与多频段通信协同提升频谱资源利用率。该天线集成于 $51\text{ mm} \times 51\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的 FR-4 介质基板上 (介电常数 4.4, 损耗角正切 0.019), 由 1 个超宽带 (ultra-wide band, UWB) 感知天线与 3 个窄带 (narrow band, NB) 通信天线构成。其中, UWB 天线完整覆盖美国联邦通信委员会 (FCC) 定义的 $3.1\sim 10.6\text{ GHz}$ 标准频段; 3 个 NB 天线通过协同频段规划, 分别覆盖低频 ($2.73\sim 6.15\text{ GHz}$)、中频 ($4.9\sim 8.35\text{ GHz}$) 及高频 ($7.5\sim 10.8\text{ GHz}$), 实现了对 UWB 频段的 100% 无缝覆盖。为突破多天线集成中的耦合瓶颈, 创新性采用准自互补结构 (quasi-self-complementary, QSC), 在不依赖额外去耦措施的情况下, 全频段内端口隔离度优于 15 dB。

关键词

认知无线电; 窄带天线; 超宽带; 准自互补天线; 隔离度

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.019

0 引言

认知无线电 (cognitive radio, CR) 技术由约瑟夫·米托拉 (Joseph Mitola) 于 1999 年提出, 是提升频谱资源利用率的关键技术之一^[1]。其核心在于 CR 系统能够动态感知频谱使用状况, 在不干扰授权用户的前提下, 智能利用空闲频谱进行通信, 从而实现频谱资源的高效利用^[2]。在 CR 系统中, 天线作为信号收发的核心组件, 需同时支持频谱感知和通信功能, 因此通常需配备感知天线和通信天线^[3]。

近年来, 面向认知无线电应用的双端口 UWB-NB 天线设计较为普遍, 其中 UWB 天线用于频谱感知, NB 天线用于通信。然而, 由于 NB 天线的带宽限制, 单个 NB 天线难以完全覆盖 UWB 频段。为此, 文献 [4-5] 提出了将多个 NB 天线与 UWB 天线集成的解决方案。例如, 文献 [5] 在 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$ 的 FR-4 介质基板上集成了 1 个 UWB 天线和 2 个 NB 天线, 通过 2 个 NB 天线的协同工作覆盖了 UWB 频段的 22.4%。

然而, 在有限空间内集成 UWB 天线与多个 NB 天线面临显著的技术挑战, 主要源于天线间耦合效应导致的性能下降^[6]。为减少天线间的耦合, 改善天线间的隔离度。天线设计者们提出了诸多解耦方法如: 缺陷地结构^[7]、添加寄生枝节^[8]、引入中和线^[9]、使用准自互补结构^[10]等。例如文献 [7] 在接地板上蚀刻栅栏型解耦结构, 延长了电

流耦合路径, 使隔离度提升至 25 dB; 文献 [10] 中由 4 个正交排列的准自互补 (quasi-self-complementary, QSC) 辐射单元组成的 UWB MIMO 天线, 天线单元之间无需额外的去耦结构即可实现在工作频带内优于 20 dB 的高隔离度。

本文设计了一款面向 CR 应用的四端口 UWB-NB 天线。该天线集成于 $51\text{ mm} \times 51\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的 FR-4 介质基板上, 由 1 个 UWB 感知天线和 3 个 NB 通信天线组成。其中, 3 个 NB 天线的工作频段分别为低频 ($2.73\sim 6.15\text{ GHz}$)、中频 ($4.9\sim 8.35\text{ GHz}$) 和 高频 ($7.5\sim 10.8\text{ GHz}$), 实现了对 UWB 频段的 100% 全覆盖。为优化天线性能, 采用准自互补结构 (QSC), 无须额外去耦措施即可在工作频段内实现优于 15 dB 的隔离度。

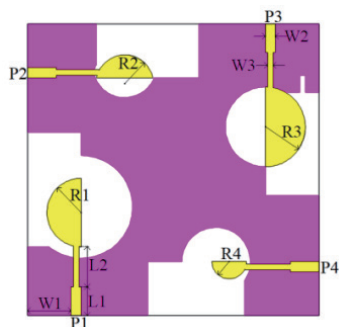
1 四端口 UWB 和 NB 天线设计

四端口 UWB-NB 天线打印在尺寸为 $51\text{ mm} \times 51\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的 FR-4 基板上。该基板的介电常数为 4.4, 损耗角正切为 0.019。四端口天线以 4 元 UWB MIMO^[11] 天线为参考, 保留 1 个 UWB 天线为感知天线, 将其余 3 个 UWB 天线改进为 NB 通信天线。利用 CST 2019 仿真软件对该天线进行设计和改进。最终所得天线尺寸参数由表 1 所示, 模型图如图 1 所示。对图 1 中位于 P1、P2、P3、P4 端口的天线分别命名为 Ant (P1)、Ant (P2)、Ant (P3) 和 Ant (P4)。

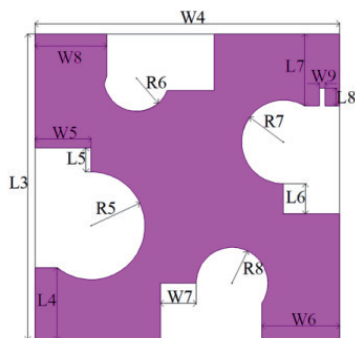
1. 武汉轻工大学电气与电子工程学院 湖北武汉 430023

表 1 天线结构各参数

Parameters	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	W1
Value /mm	5	7	51	12	4	5	12	3	7.6
Parameters	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	R1
Value /mm	1.8	1	51	9.4	13	6	12	1	6
Parameters	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8		
Value /mm	5	7	3	9	5.5	7	6		



(a) 顶部视图



(b) 底部视图

图 1 集成四端口 UWB-NB 天线的几何结构
(所有尺寸均以 mm 为单位)

由图 1 所示, 四端口天线中的 4 个天线单元结构皆是准自互补天线, 由于互补结构的辐射特性^[12], 仅须合理摆放各单元天线位置即可实现天线间的高隔离度, 从图 1 可见, 该天线通过将各天线单元正交摆放以实现各单元天线间的高隔离度。结果由 CST 2019 仿真所得图 2 中的 S 参数: S_{12} 、 S_{13} 、 S_{14} 、 S_{23} 、 S_{24} 和 S_{34} 所示, 各天线单元间的隔离度皆在 15 dB 以上。

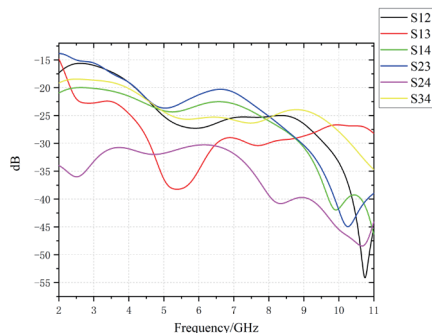


图 2 天线单元间 S 参数

1.1 UWB 感知天线设计

位于 P1 端口的 UWB 天线为准自互补天线, 由一个半圆的天线贴片和一个互补的切割平面构成。该 UWB 天线的半圆天线贴片 (R1) 的半径为 6 mm, 互补切割平面半圆 (R5) 的半径为 9 mm, 如图 3 所示。仿真所得参数 S_{11} 覆盖了频谱 3.0~11.0 GHz, 其中包括联邦通信委员会批准的完整免许可频谱 3.1~10.6 GHz, 如图 4 所示。UWB 天线在不同频率下的峰值增益由图 5 可见。

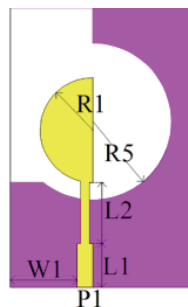


图 3 UWB 天线

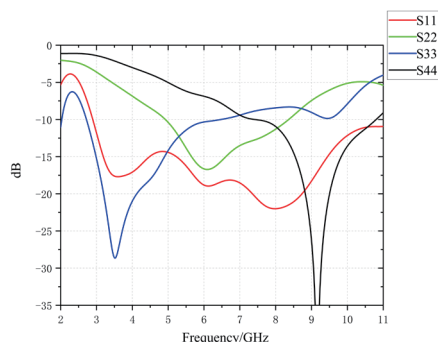


图 4 各天线的 S 参数

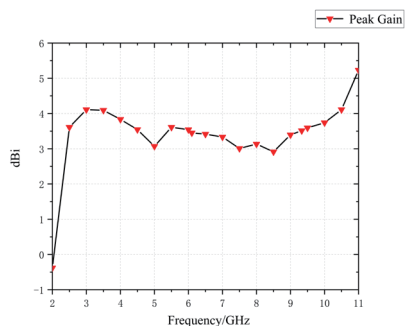


图 5 UWB 天线增益

1.2 NB 通信天线设计

由图 1 所见, 位于 P2 的 NB 天线 Ant (P2) 的天线贴片是半径为 5 mm 的半圆天线贴片 (R2) 裁剪 1 mm 的外圈圆弧, 互补切割平面是半径为 5.5 mm 的半圆 (R6) 裁剪 2 mm 的外圈圆弧。由 CST 2019 仿真所得 Ant (P2) 的工作频段覆盖了 UWB 频段的中频 4.9~8.35 GHz, 谐振频率为 6.1 GHz, 由图 4 所示。

Ant (P3) 的单极子贴片天线半圆 (R3) 半径为 7 mm, 互补切割半圆半径 (R7) 也为 7 mm, 结构由图 1 可见。值得注意的是, Ant (P3) 的互补切割平面切割了一块长 3 mm、宽 1 mm、厚 0.035 mm 的铜片, 切割位置由图 1 (b) 的底部视图可见。切割原因由天线仿真参数图 6 所示, 未切割前, 该天线覆盖了 UWB 中的低频 3.1~5.9 GHz 和高频 9.5~11 GHz。而切割后的 Ant (P3) 工作频段仅为 UWB 天线中的低频 2.73~6.15 GHz, 谐振频率为 3.5 GHz, 如图 4 所示。

位于 P4 端口的 NB 天线 Ant(P4) 结构如下: 单极子天线贴片半圆 (R4) 的半径为 3 mm, 互补切割平面的背板圆 (R8) 的半径大小为 6 mm, 由图 1 可见。由 CST 2019 仿真所得 Ant (P4) 的工作频段覆盖了 UWB 频段中的高频 7.5~10.8 GHz, 谐振频率为 9.2 GHz, 由图 4 可见。

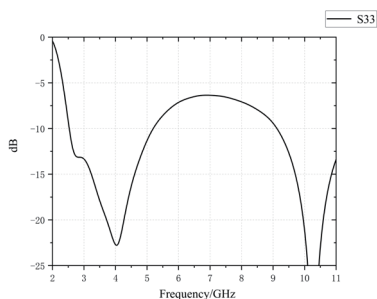
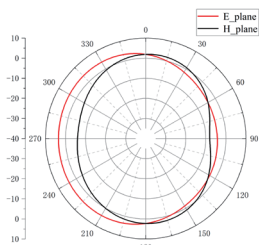


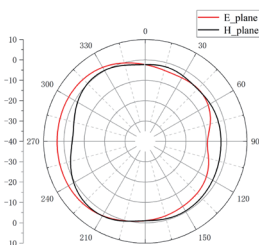
图 6 切割铜片前天线 Ant (P3) S 参数

2 结果分析

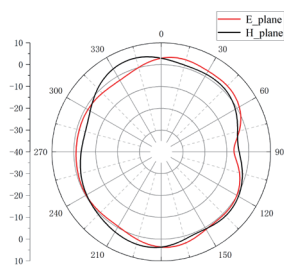
观察各天线的二维辐射方向图后, 发现所设计的 UWB 和 NB 天线皆为准全向天线。UWB 天线在谐振频率的二维辐射方向图如图 7 所示, 在 3.5 GHz、6.1 GHz 和 8.0 GHz 的 XOZ (E 面) 和 YOZ (H 面) 的辐射方向图均具有准全向辐射特性。UWB 天线在 3.5 GHz 的增益为 4.09 dBi, 6.1 GHz 的增益为 3.45 dBi, 8.0 GHz 的增益为 3.13 dBi。



(a) 3.5 GHz



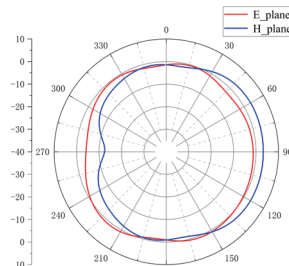
(b) 6.1 GHz



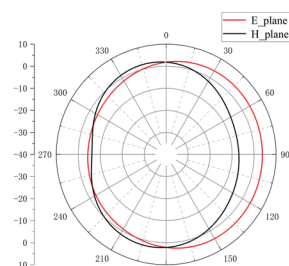
(c) 9.2 GHz

图 7 UWB 天线的二维辐射模式

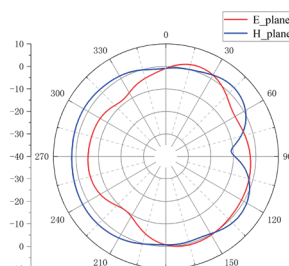
NB 天线的二维辐射方向图也和 UWB 天线类似, 具有准全向辐射特性, 仿真所得二维辐射方向图如图 8 所示, 展示了 (a) Ant (P2) 位于 6.1 GHz、(b) Ant (P3) 位于 3.5 GHz 和 (c) Ant (P4) 位于 9.2 GHz 的二维辐射方向图。Ant (P2) 在谐振频率 6.1 GHz 的增益为 4.1 dBi, Ant (P3) 在谐振频率 3.5 GHz 的增益为 3.9 dBi; Ant (P4) 在谐振频率 9.2 GHz 的增益为 3.5 dBi。



(a) Ant (P2) (6.1 GHz)



(b) Ant (P3) (3.5 GHz)



(c) Ant (P4) (9.2 GHz)

图 8 NB 天线的二维辐射模式

为展示本成果的先进性, 与已发表的类似成果进行了对比, 如表 2 所示, 本文所设计天线较为紧凑, 四端口天线

的尺寸为 51 mm×51 mm；感知天线和通信天线的工作频段 100%覆盖了 UWB 天线频段。

表 2 与已发表的类似成果对比

参考文献	天线尺寸 (mm×mm)	端口数	感知天线 频段 /GHz	通信天线 频段 /GHz	频段覆 盖率 /%
[5]	30×30	3	3.1~10.6	6.36~6.63 8.78~9.23 7.33~7.70 9.23~9.82	22.4
[13]	47×47	2	3.0~11	5.15~5.35	2.67
[14]	60×120	4	0.75~7.65	1.77~2.51	10
[15]	19×17.5	1	3.82~12	3.05~4.16 6.23~7.20 3.02~4.40	31.3
本文设计 天线	51×51	4	2.9~10.8	4.90~8.35 2.73~6.15 7.50~10.8	100

3 结论

本文设计的新型四端口 UWB-NB 天线满足 CR 应用所需，拥有可用于感知的 UWB 天线和 3 个通信的 NB 天线，感知天线和通信天线的工作频段 100%覆盖了 UWB 天线频段，可以作为 CR 环境中频谱感知和通信的良好模块。在结构方面，为保证各天线单元间的高隔离度，各天线单元使用准自互补结构，无需其他去耦结构即可实现各天线单元在工作频段内优于 15 dB 的隔离度。

参考文献：

- [1] 曹华孝, 鲜永菊, 徐昌彪. 认知无线电技术的国内外发展与研究现状 [J]. 数字通信, 2009, 36(2): 51-57.
- [2] 陈兵, 胡峰, 朱琨. 认知无线电研究进展 [J]. 数据采集与处理, 2016, 31(3): 440-451.
- [3] PARIDA R K, ALMAWGANI A H M, MUDULI A, et al. A compact isolated CR antenna system for application in C-band[J]. International journal of antennas and propagation, 2024: 13.
- [4] PAHADISINGH S, SAHU S. Planar UWB integrated with multi narrowband cylindrical dielectric resonator antenna for cognitive radio application[J]. AEU-international journal of electronics and communications, 2017, 74: 150-157.
- [5] KUMAR N A, GANDHI A S. A compact novel three-port integrated wide and narrow band antennas system for cognitive radio applications[J]. International journal of antennas and propagation, 2016(1): 2829357.
- [6] NELLA A, GANDHI A S. A five-port integrated UWB and narrowband antennas system design for CR applications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2018, 66(4): 1669-1676.
- [7] WANG L L, DD Z H, YANG H L, et al. Compact UWB MIMO antenna with high isolation using fence-type decoupling structure[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2019, 18(8): 1641-1645.
- [8] IQBAL A, SARAEREH O A, AHMAD A W, et al. Mutual coupling reduction using f-shaped stubs in UWB-MIMO antenna[J]. IEEE access, 2017, 6: 2755-2759.
- [9] ZHANG S, PEDERSEN G F. Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2015, 15: 166-169.
- [10] ZHU J F, LI S F, FENG B T, et al. Compact dual-polarized UWB quasi-self-complementary MIMO/diversity antenna with band-rejection capability[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2015, 15: 905-908.
- [11] LIU X L, WANG Z D, YIN Y Z, et al. A compact ultrawide-band MIMO antenna using QSCA for high isolation[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2014, 13: 1497-1500.
- [12] 苏晋荣, 李艳玲. 利用科赫分形解耦的四端口紧凑型 QSC UWB MIMO 天线 [J]. 测试技术学报, 2023, 37(2): 170-177.
- [13] EBRAHIMI E, HALL P S. A dual port wide-narrowband antenna for cognitive radio[C]//2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2009: 809-812.
- [14] THUMMALURU S R, AMEEN M, CHAUDHARY R K. Four-port MIMO cognitive radio system for midband 5G applications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2019, 67(8): 5634-5645.
- [15] LI L, JI H Y, NAN J C, et al. Broad-and narrow-band frequency reconfigurable antenna for cognitive radio application[C]//2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). Piscataway: IEEE, 2022: 250-252.

【作者简介】

任林源（2000—），男，重庆开州人，硕士研究生，研究方向：天线设计。

（收稿日期：2025-02-10）

基于 FPGA 的智能化串口通讯模块设计

王永国^{1,2} 印 通¹ 刘媛媛¹ 李 爽³
WANG Yongguo YIN Tong LIU Yuanyuan LI Shuang

摘 要

针对现有串口通讯设计中存在的无法满足高实时、高并行化需求的问题,文章设计了一种基于FPGA的智能化串口通讯模块。通过将双口存储器、串口通讯协议和核心控制逻辑集成到FPGA内部,实现多通道RS422串行数据的高效并行处理。同时,为匹配FPGA设计高并行化的特点,将双口存储器资源根据功能应用进行拆分,结合智能化控制流程原理进行重新组合设计,使得UART各通道可以独立并行工作,各通道串口通信数据通过双口存储器与CPU模块进行交互,从而增加数据并行化处理程度,提高处理器效率。实验表明,智能化串口通讯模块设计正确,在一定程度上提高了处理器效率,满足了设计需求。

关键词

FPGA; 串口通讯; 智能化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.020

0 引言

随着通讯技术的不断发展,现场可编程器件(field programmable gate array, FPGA)因其具有集成度高、体积小、功耗低、高可靠性、高安全性、系统成本低、灵活性好、便于连接等特点,在通讯技术领域中得到广泛应用,常用通讯方法包括串口通讯。

文献[1]基于FPGA技术设计了一种异步串口通信波特率自动检测方法,可实现快速、准确检测异步串口通信的波特率值。文献[2]对串口协议进行研究,介绍串口设计中的关注点,根据目前的项目对基于FPGA的串口设计进行详细说明。文献[3]基于FPGA实现了串口数据接收模块采集多串口数据,并通过控制寄存器达到控制通信数据波特率的目的,实现了8个串口数据的传输,并且具有较高数据接收成功率。文献[4]引入了多路串口数据的同时采集、缓冲及打包的数据流处理思想,采用基于FPGA+多串口+USB的硬件框架结构及总线不同速率的传输软件处理算法,实现了多路串口数据的采集与传输。文献[5]提出一种基于国产化FPGA实现的智能串口通讯方法及系统,详细描述了国产化FPGA中实现串口通讯的设置方法和思路。文献[6]基于zynq架构的控制器能够较好实现单个控制器对多条串行数据通道的并行化控制,同时能够通过软件对底层串口的通讯参数进行配置,其中,zynq处理器集成了CPU功能和FPGA功能,其中智能串口在zynq中的FPGA中实现,传统CPU架构对

于多通道并行性控制较差的问题。此外,相较于波特率等固定参数的串口传输方式更灵活的优势,具备将软件控制端和FPGA控制端集成在一起,可以有效减少器件布板面积。

目前比较通用的串口通讯实现方案有两种。一是采用串口通讯芯片实现串口通讯,使用CPLD实现上位机与串口通讯芯片之间的逻辑控制,完全基于上位机接收和发送数据;二是采用FPGA实现专用串口扩展芯片的功能,通过在FPGA内部集成多路串口控制器,上位机主程序通过控制串口控制器的工作,实现串行数据的接收和发送。当数据量大时,上述两种方案中,上位机主程序需要频繁地进行中断响应或者进行标志位查询操作,控制数据接收流程并缓存收到的数据,占用上位机的时间较长;在发送数据时,需要查询当前串口通讯状态,进行发送流程控制,会占用上位机大量的时间,从而影响上位机的工作效率。在多串口通道设计中,上位机需采用串行方式依次扫描各个通道,当串口通讯速率过低时导致上位机等待时间过长,难以满足实时性要求较高且需要并行处理的实际需求。针对上述问题,本文提供一种基于FPGA的智能化串口通讯模块设计方案。

文献[7]具体涉及一种基于FPGA架构的智能串口通讯模块及控制方法,利用FPGA并行处理的特点,通过设计可复用的串口通道逻辑单元以及智能化控制管理逻辑单元,实现多串口通道通讯数据的并行接收、发送和自测试功能。设计具备完备的BIT策略和接口防护功能,克服了传统串口通讯模块设计CPU负荷重、FPGA引脚数量多的缺点,提高CPU有效利用率和串行总线数据传输带宽,具备较强理论意义和实用价值。本文在文献[7]基础上对FPGA内部实现智能串口的三大部分逻辑(LBE局部总线解析逻辑、命令解析逻辑和UART通道逻辑)进行详细分析和仿真验证。

1. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所
陕西西安 710065
2. 西北工业大学计算机学院 陕西西安 710100
3. 山东省网络安全与信息化技术中心 山东济南 250000

1 硬件结构设计

智能化串口通讯模块实现了 10 路 RS422 串行接口的接口信号处理、协议处理及对数据的智能化管理,其智能化的设计原理是在 FPGA 并行运算的基础上,将双口存储器、串口通讯协议和核心控制逻辑集成到 FPGA 内部,通过核心控制逻辑的设计,实现多通道 RS422 串行数据的并行处理,并将处理结果存放在对应的双口存储器中供 CPU 模块读取。

本模块硬件设计主要由局部总线接口电路、FPGA 可编程逻辑及其外围相关配置电路、RS422 接口驱动和保护电路,以及自测试电路四部分组成,图 1 为本模块电路硬件结构框图。

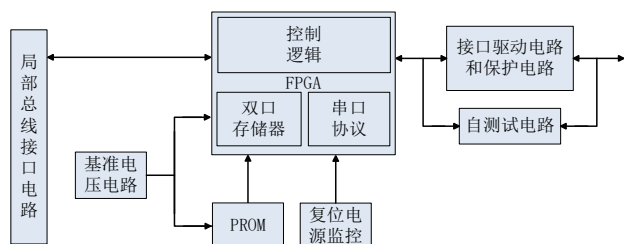


图 1 电路硬件结构框图

总线接口电路采用标准 LBE 总线接口电路,实现与 CPU 之间的通讯。

FPGA 可编程逻辑及其外围相关配置电路主要包括可编程逻辑 FPGA 芯片电路,复位电源监控电路,为 FPGA 提供工作电压的基准电压电路和 PROM 存储器电路。

RS422 接口驱动和保护电路采用开路 and 短路 Fail_safe 端接方式 (open-line and shorted-line fail-safe termination),并在接收端并联端接匹配电阻以消除传输线上的信号反射,减小通讯故障率。开路和短路 Fail-safe 端接方式可以使当接收器端开路或短路时,接收器输入差分电压大于 200 mV,其输出确定状态 (高电平)。

自测试电路完成 UART 通道外回绕测试功能,通道内回绕测试通过 FPGA 内部的串口协议直接进行回绕测试,外回绕测试通过外回绕测试命令控制外部切换开关使得 RS422 收发器的接收端与发送端相连进行回绕测试。

2 逻辑架构设计

2.1 逻辑架构原理

为满足设计要求,同时考虑到 FPGA 逻辑设计并行性的特点,将双口存储器资源根据功能应用进行拆分,结合智能化控制流程原理进行重新组合设计,使得 UART 各通道可以独立并行工作。模块 FPGA 设计原理框图如图 2 所示。基于 FPGA 的智能化串口通讯逻辑原理框图内部主要分为三大部分逻辑: LBE 局部总线解析逻辑、CPU 命令解析逻辑和 UART 通道逻辑。其中虚线框表示双口存储器,设计

中将其按功能进行拆分为不同功能的寄存器和发送 / 缓冲双口存储器。

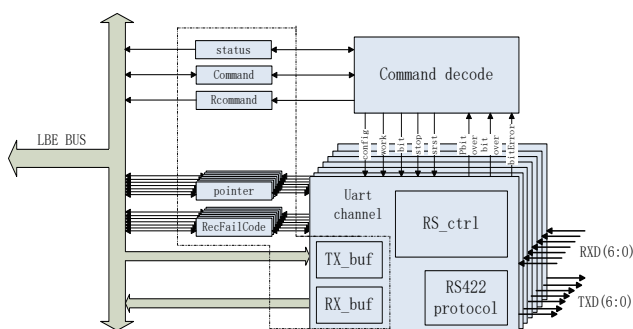


图 2 基于 FPGA 的智能化串口通讯逻辑原理框图

2.2 LBE 局部总线逻辑

LBE 局部总线逻辑完成 LBE 局部总线协议信号的解析功能, CPU 可对本模块进行 8 位数据访问, 该访问数据可以是存储器数据, 也可以是 I/O 数据。

2.3 CPU 命令解析逻辑

CPU 命令解析逻辑完成 CPU 命令的解析功能, 根据解析的命令产生不同的功能信号, 这些信号包括正常工作 (work) 信号、停止 (stop) 信号、自测试 (bit) 信号、软复位 (srst) 信号, 同时根据各 UART 通道返回的状态信息, 完成各状态字寄存器的信息更新。

2.4 UART 通道逻辑

UART 通道逻辑主要完成上电时 UART 配置初始化、上电 BIT 测试, 并在 CPU 命令控制信号的作用下完成相应的功能, 并返回通道状态信息。

串口通道逻辑包括五部分逻辑单元: 发送缓冲区逻辑单元、接收缓冲区逻辑单元、UART IP 核逻辑单元、数据通路选择逻辑单元和通道核心控制逻辑单元。其中通道核心控制逻辑单元在 CPU 命令控制信号下控制通道内各功能逻辑单元之间协同工作, 完成相应的功能。UART 通道逻辑的原理框图设计如图 3 所示。

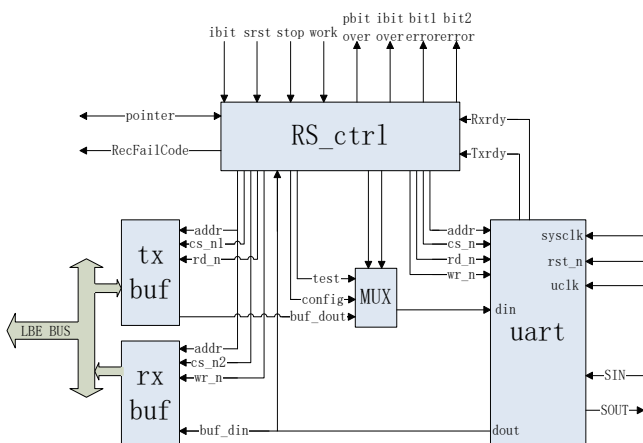


图 3 UART 通道逻辑原理框图

UART 通道逻辑主要包含五部分功能逻辑:

(1) tx_buf 逻辑: 通道发送缓冲区, 缓冲区大小为 256 Byte, 缓存区大小可根据实际使用动态进行配置, 128、256、512 Byte 等都可以, 字节需大于 UART 各通道接收的数量。

(2) rx_buf 逻辑: 通道接收缓冲区, 缓冲区大小为 256 Byte, 缓存区大小可以动态设置。

(3) UART 逻辑: UART 串口通讯协议 IP 核, 该通讯协议 IP 具备可配置波特率、校验方式、数据长度、停止位等信息。

(4) MUX 逻辑: 数据通路选择逻辑, 根据通道的工作状态, 选择不同的数据信息发送至 UART 逻辑, 这些数据信息包括 UART 配置信息、通道自测试数据、正常发送数据。

(5) rs_ctrl 逻辑: 通道核心控制逻辑, 在 CPU 命令解析逻辑产生的控制信号的作用下, 控制通道内各功能逻辑单元之间协同工作, 完成相应的控制功能。

文中设计了通道工作状态机, 包括空闲状态、初始化状态、自测试状态、正常工作和软复位, 以实现通道不同工作状态的控制转换。通道工作状态机如图 4 所示。

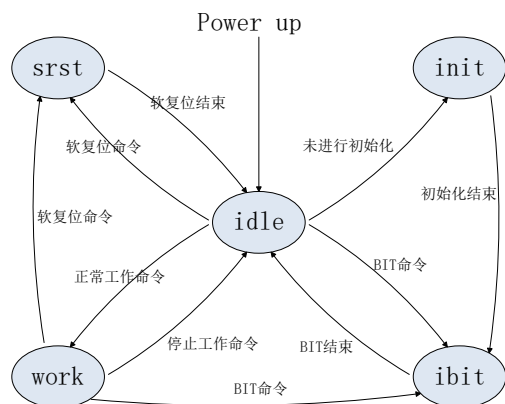


图 4 UART 通道工作状态机

UART 通道工作状态机中共有 5 个工作状态, 分别为 idle 状态、init 状态、ibit 状态、work 状态和 srst 状态。

空闲状态: idle 状态为通道空闲状态, 模块上电后通道的默认状态, 表示当前处于空闲状态, 或者收到 CPU 停止命令后进入 idle 状态表示停止工作状态, 等待 CPU 新的命令进入新的工作状态。

初始化状态: init 状态为通道初始化配置工作状态, 对 UART 波特率等配置信息进行配置初始化。

自测试状态: ibit 状态为通道 BIT 测试工作状态。通道有两种 BIT 测试, 一是上电 BIT(PBIT) 测试, 即通道上电初始化完成后, 进行 UART 通道内循环及外循环测试过程, 并报告 BIT 测试结果; 二是维护 BIT(IBIT) 测试, 即收到 CPU 的 IBIT 命令后, 进行 UART 通道内循环及外循环测试过程,

并报告 BIT 测试结果。由于 PBIT 和 IBIT 的不同点在于启动触发条件和执行次数不一致, 但其测试结果存放在相同的状态字寄存器中, 因此可将 PBIT 和 IBIT 合并到一个状态内, 通过控制信号以区分两种 BIT。

软复位状态: srst 状态为通道软复位状态, 对通道内部资源进行软复位操作, 资源包括: 通道 BIT 状态字、接收发送指针和通道故障寄存器。

正常工作状态: work 状态为通道正常工作状态, 处于此状态下的 UART 通道根据接收和发送指针及 UART 的状态完成相应的 UART 接收和发送过程, 并更新收发指针信息。

通道工作状态机各状态之间的转换关系为:

(1) 当模块上电后各通道默认进入 idle 状态, 然后进入 init 状态对 UART 进行配置。

(2) init 配置工作完成后进入 ibit 状态进行通道上电 BIT 测试, 并上报 BIT 测试结果。

(3) 上电 BIT 测试完成后进入 idle 工作状态, 表示通道处于空闲状态, 等待 CPU 新的命令, 并根据 CPU 新的命令分别进入 work 工作状态、srst 软复位状态、ibit 维护 BIT 状态。

(4) ibit 维护 BIT 测试完成后进入 idle 状态。

(5) srst 复位结束后进入 idle 状态。

(6) 当工作在 work 状态时, 收到 CPU 停止命令则进入 idle 状态, 收到软复位命令则进入软复位状态, 收到 ibit 命令则进入 ibit 状态。

2.5 架构运行方式

本架构基于 FPGA 的智能化串口通讯逻辑工作原理如下:

(1) 上电后, FPGA 逻辑自动完成内部各单元结构的初始化过程, 整个串口模块处于规定的缺省工作模式, 初始化过程包括初始化双口存储器单元和初始化配置串口协议 IP 核, 以及内部各寄存器的初始化配置。

(2) 初始化完成后, 在通道控制逻辑单元的控制下, 各串口通道逻辑自动完成上电自测试过程, 以保证模块工作在正确的方式中, 测试内容主要为 UART 通道内回绕测试和外回绕测试。当上电自测试出错时, 则进行不超过 3 次的自测试过程, 并发送自测试状态信息给 CPU 命令解析逻辑单元。

(3) 上电自测试结束后, CPU 读取上电自测试结果, 并通过局部总线向 FPGA 逻辑发送 CPU 命令字数据。

(4) LBE 局部总线解析逻辑完成局部总线信号的解析, 并将解析后的 CPU 命令存储在命令寄存器中, 供 CPU 命令解析逻辑进行解析处理。

(5) CPU 命令解析逻辑根据解析处理的 CPU 命令, 产生相应的命令控制信号发送给各串口通道逻辑单元, 控制各通道完成相应的工作。命令控制信号包括初始化信号、正常

工作信号、停止工作信号、自测试信号、软复位信号。

(6) UART 通道逻辑根据命令控制信号控制串口通道逻辑内各逻辑单元之间协调工作,完成相应的串口功能,并返回相应的状态信息。UART 通道逻辑实现数据接收,接收数据放在接收缓存区,根据上位机 CPU 读取指令, LBE 局部总线解析逻辑和 CPU 命令解析逻辑将数据取出;根据上位机 CPU 发送数据指令,上位机 CPU 编写数据,将上位机数据发送到 LBE 总线中, LBE 局部总线解析逻辑和 CPU 命令解析逻辑将发送数据写入到 UART 通道逻辑的发送缓存区, UART 通道逻辑将发送缓存区的数据发送出去。

3 仿真实验

对整个逻辑编码设计后,使用 Modelsim 对其进行仿真,通道工作状态机仿真结果如图 5 所示。

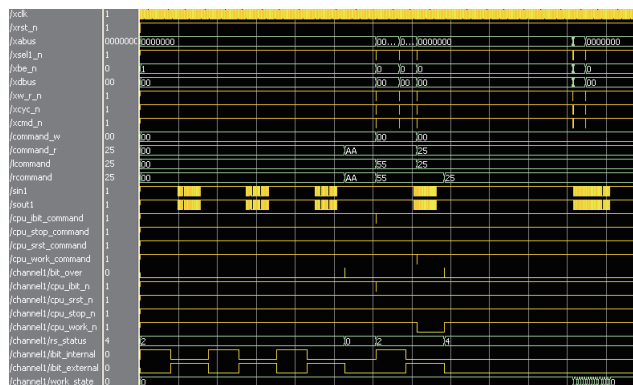


图 5 通道工作状态机仿真

图 5 中,通道上电 BIT 结束后,收到 CPU 的 IBIT 命令,进入 ibit 工作状态,在 ibit 状态期间,收到 CPU 的正常工作命令,则将命令锁存,在 BIT 结束后,再响应 CPU 的正常工作命令,进入正常工作状态。

图 6 为串口通道发送仿真过程,在 UART 工作空闲时,当 CPU 更新了发送指针后,识别到发送缓冲区有待发送数据,且 UART 发送器处于空闲状态,则将发送缓冲区中的数据依次写入 UART 的发送 FIFO 中,并更新发送指针信息。

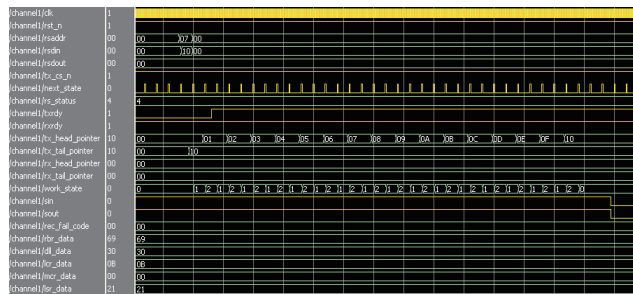


图 6 串口通道发送仿真

图 7 为串口通道接收时仿真,当 UART 工作空闲时,识别到接收缓冲区不满且 UART 接收 FIFO 中有数据,则将接收 FIFO 中的数据读取到接收缓冲区中,并更新接收指针信息。

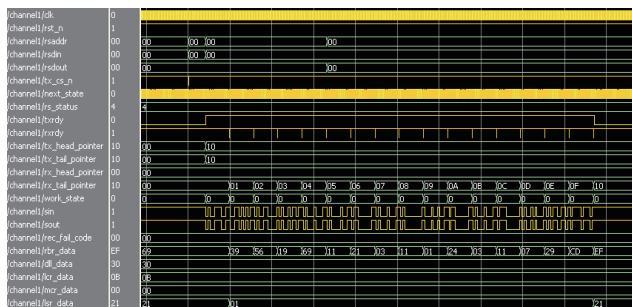


图 7 串口通道接收仿真

从上述三张仿真图中可以看出,仿真结果与预期设计结果一致,满足设计要求。

4 结语

本文提供了一种基于 FPGA 的智能化串口通讯模块设计方案,通过在 FPGA 内部采用智能化管理设计方法,并行处理完成多通道串口通讯数据的接收、发送和自测试过程,从而减少占用处理器时间,提高处理器效率;同时处理结果通过内嵌的双口存储器实现与处理器之间的数据交互,提高数据处理能力。通过功能仿真对该设计进行验证,仿真结果表明,该方法设计正确,可以满足设计要求。

参考文献:

- [1] 陈虎. 基于 FPGA 的异步串口通信波特率自动检测技术[J]. 应用科技, 2023, 50(2):60-65.
- [2] 张诚,孙列鹏,肖薇,等. 基于 FPGA 的串口实现[J]. 软件, 2018, 39(11): 219-223.
- [3] 王春媚. 多串口并行通信数据传输系统设计[J]. 现代电子技术, 2017,40(4):86-90.
- [4] 郭敏,庄信武,王向东,等. 基于 FPGA 的多通道串口数据采集与传输设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(11): 186-189.
- [5] 腾骐科技(北京)股份有限公司. 一种基于国产化 FPGA 实现的智能串口通讯方法及系统:CN202210248837.2[P]. 2023-11-28.
- [6] 天津津航计算技术研究所. 一种基于 zynq 的多通道串口通讯控制器:CN202311181310.3[P]. 2023-12-01.
- [7] 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所. 一种基于 FPGA 架构的智能串口通讯模块及控制方法:CN201611154109.6[P]. 2018-06-29.

【作者简介】

王永国(1988—),男,陕西西安人,博士研究生,高级工程师,研究方向:计算机应用。

(收稿日期:2025-03-08)

高速以太网交换机中的无损传输技术研究

王怡琳¹ 李玉发¹ 杨思远¹
WANG Yilin LI Yufa YANG Siyuan

摘要

随着网络带宽需求的快速增长, 传统的数据传输方法难以满足高性能计算和大规模数据中心的要求, 无损传输技术成为关键。基于此, 文章分析了无损以太网的基本原理及其在交换机架构中的应用, 包括流控机制、缓冲管理和拥塞控制算法等。实验结果表明, 支持无损传输技术的高速以太网交换机能够有效减少数据丢包率, 提高网络吞吐量。

关键词

高速以太网; 交换机; 无损传输; 流量控制; 拥塞控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.021

0 引言

以太网技术自应用以来, 从千兆以太网演进至万兆以太网, 并持续向更高速率发展。传统以太网传输速率最高仅达到 10 Mbit/s, 高速以太网是指传输速率能达到 100 Mbit/s 及以上的以太网^[1], 旨在提供更高的数据传输速率和带宽, 如千兆以太网、万兆以太网^[2](即 10 GB 以太网)、25 GB 以太网、50 GB 以太网乃至 100 GB 以太网。

高速无损以太网是指在高速以太网的基础上, 通过无损传输技术^[3]实现更低的误码率, 从而实现高速、低延迟、高可靠性的数据传输^[4]。其中无损传输技术旨在提供低延迟、高吞吐量和高可靠性的传输服务。高速无损以太网在传统以太网的基础上进行了扩展, 引入了新的流量控制机制和拥塞管理机制, 以避免网络拥塞^[5]和数据包丢失^[6]。

高速以太网可以分为两类, 由共享型集线器组成的共享型高速以太网和由高速以太网交换机构成的交换型高速以太网。共享型高速以太网中所有用户共享带宽, 因此每个用户的实际可用带宽受到用户规模的限制; 而交换型高速以太网中交换机为每个用户提供专用的信息通道, 因此目的端口不同时, 各个源端口与各自的目的端口之间可以同时通信而不会发生冲突。交换型高速以太网中每个用户可用带宽不受用户规模的限制, 由于这一优势, 交换型高速以太网相较于共享型高速以太网得以广泛应用^[7]。

1 无损传输技术

1.1 基于优先级的流量控制

基于优先级的流量控制(priority flow control, PFC)可以逐跳提供基于优先级的调度机制, 以确保数据包不因缓冲区

溢出而丢失, 为应用提供了不同的差异化服务质量保证。与光纤通道(fibre channel, FC)网络的流量控制机制相比^[8], 以太网的流量控制机制从基于端口的流量控制变为基于优先级的流量控制, 进一步细化了流量控制的颗粒度。

PFC 反压机制架构如图 1 所示, 其中, 每个优先级都具备单独的优先级传输队列, 队列内部的数据按照顺序进行发送, 不同优先级队列按照优先级高低进行调度^[9]。

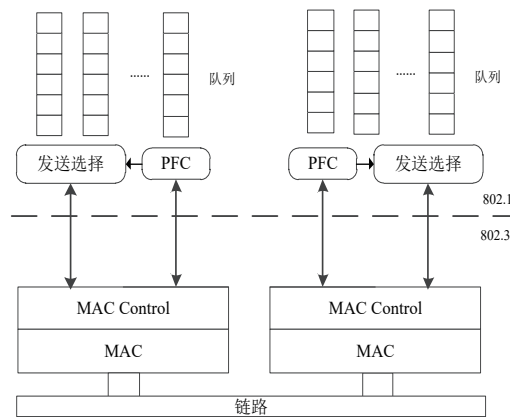


图 1 基于优先级队列的 PFC 流量控制

在链路层 MAC 的基础之上, 建立多个虚拟通道^[10], 分别对应发送或接收端系统硬件上的硬件传输队列, 发送选择基于多队列的严格优先级调度进行输出调度, 通过 PFC 模块来控制队列的输出, 当网络接收端出现某个缓冲区不足时, 通过 STOP 帧来通知源端暂停该队列的消息发送, 其具体机制如图 2 所示。为保证关键业务的缓冲独占, 在缓冲区设计上, 采用固定缓冲区方式, 即为每一个优先级队列和端口分配固定大小的缓存, 为该缓冲区独占。网络发送和接收任务均通过优先级队列进行缓存, 采用先进先出(first in first out, FIFO)模式。通过严格优先级调度方式, 对优先级队列内的数据报文进行发送或接收。

1. 航空工业西安航空计算技术研究所 陕西西安 710065

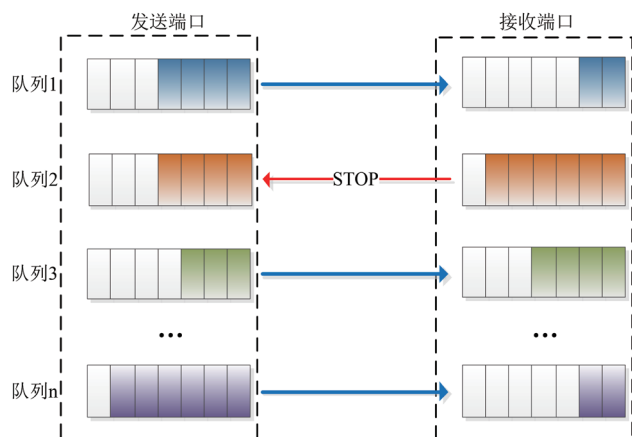


图2 基于缓冲区的反压机制

在网络中流量正常的情况下，PFC 队列与优先级队列一样，作为数据发送或接收的缓存。如果网络中某个接收端系统的接收队列上出现接收突发流量，使得优先级队列接收缓存消耗较快，出现瞬时拥塞情况，PFC 机制发挥其作用，具体实施步骤如下：

接收端根据队列中数据报文的个数是否超过预定阈值判断当前优先级队列是否出现拥塞现象。如果出现拥塞，接收端根据接收优先级队列缓存情况和收到报文的优先级进行判别，确定对报文的处理方式。若报文当前所属优先级使能 PFC 功能，接收端系统向数据进入的方向即上游设备发送 PFC 暂停帧，目的是通知上游设备暂时停止发送该优先级报文；若收到报文的相应优先级没有使能 PFC 功能，则按照正常预定步骤实施接收操作，如果队列满，则丢弃数据；上游设备接收到 PFC 暂停帧后，根据其中的信息指示暂停发送数据，并将数据存储在当前优先级的接收缓冲区内，若缓冲区满，则丢弃新入队的数据；对于接收队列，其依旧正常接收，不受 PFC 暂停帧影响；如果上游设备的接收队列的接收缓存消耗超过阈值，则端口继续向其上游设备发送 PFC 暂停帧，实现对当前优先级流量的逐级反压；通过逐级反压，PFC 暂停帧最终到达网络发送端系统；网络发送端根据收到的 PFC 暂停帧，硬件执行暂缓数据报文发送操作。

每个优先级队列存在一个暂停定时器，仅当设备收到 PFC 暂停帧后，硬件根据 PFC 暂停帧中对应的暂停时间更新对应暂停定时器的到期时间。在暂停定时器到期前，设备不再继续发送数据帧；当暂停定时器到期后，设备将恢复相应优先级报文的发送。

在暂停定时器到期前，设备继续收到 PFC 暂停帧，若 PFC 暂停帧中对应的暂停时间为 0，暂停定时器立即到期，恢复相应优先级报文的发送。若 PFC 暂停帧中暂停时间不为 0，则相当于复位对应的暂停定时器。只要接收端一直拥塞，则上游端系统会因不断收到 PFC 暂停帧

而持续暂停发送相应优先级的报文。PFC 暂停帧格式说明如图 3 所示。

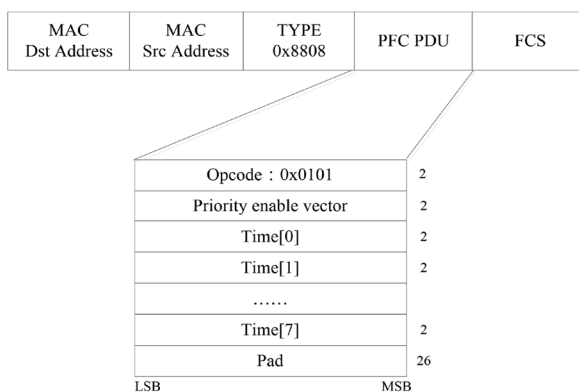


图3 PFC 暂停帧格式

PFC 暂停帧为以太网二层帧，其中各字段的含义说明如下：

DA：目的 MAC 地址，固定为组播地址 01-80-c2-00-00-01。PFC 是点到点的协议，因此，端系统、交换机和网关设备均不对 PFC 报文进行转发。

SA：源 MAC 地址。

Type：报文类型，固定为 0x8808。

PFC PDU：PFC 有效载荷。

Opcode：操作码，暂停帧为 MAC 控制帧的一种，其操作码为 0x0101。

优先级向量：2 字节，高字节置 0，低字节的每个位代表相应的 Time[n] 是否有效，1 为有效，0 标识无效。

Time[n]：包含 0~7 个数组单元，代表发送端优先级 n 的队列应该暂停报文的发送时间。

FCS：帧校验。

1.2 显式拥塞通知算法

显式拥塞通知（explicit congestion notification, ECN）算法与慢启动重启或加性增大与乘性减小（additive increase multiplicative decrease, AIMD）的拥塞控制算法不同，只需要将路由器的拥塞状态通知给发送方，以便发送方采取相应的措施来避免拥塞。网络平台采用 PFC 逐跳提供基于优先级的流量控制，实现网络传输的不丢包，但当网络中流量较大，由于网络拥塞，存在触发大量的 PFC 的反压的情况下，造成网络的吞吐量降低以及传输延迟增大，因此，需要建立网络的拥塞控制机制。通过拥塞控制，尽可能降低 PFC 反压的触发，从而使网络仍能够预设的速率进行数据转发，保证网络的传输性能。

网络平台拥塞控制采用 ECN 通过显式的拥塞通知机制，实现端到端的拥塞控制，该机制运行说明如图 4 所示。

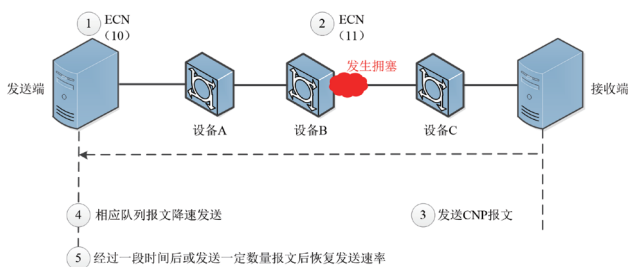


图4 拥塞控制机制

具体工作过程如下：

发送端设置发送消息的ECN域为“10”，告知路径上的设备及接收端，发送端设备支持ECN功能；中间设备发生拥塞并达到门限，拥塞设备将发生拥塞的报文ECN域设置为11，报文正常转发；接收端收到ECN置位为11的报文，由传输层发送拥塞通知报文（congestion notification packet, CNP）通知发送端，在单位时间周期内，周期发送CNP报文，CNP报文中ECN字段为0'b01。接收端对多个被ECN标记为同一个队列对（queue pair, QP）的数据包发送一个单个CNP即可；交换机收到CNP报文后正常转发该报文；发送端收到CNP报文，启动速率限制算法，实施拥塞控制算法，对对应的优先级的队列进行降速处理；经过一段可配置的时间或者发送一定数量数据，发送端恢复原来的速率。

拥塞控制机制基于三层IP帧运行，利用IP头的TOS字段的最后两位来进行ECN标识，具体如图5所示。



图5 ECN 字段标识

如图5所示，TOS字段比特0~2表示Precedence字段，代表报文传输的8个优先级，按照优先级从高到低顺序取值为7、6、5、4、3、2、1和0。

比特0~5为IP报文的差分服务代码点（differentiated services code point, DSCP），比特6~7为ECN字段。协议对ECN字段进行了如下规定：00表示该报文不支持ECN；01或者10表示该报文支持ECN；11表示该报文的转发路径上发生了拥塞。

在交换机上，针对ECN，需要设置触发ECN的低门限和高门限两个门限值，具体运行过程如下：

当实际队列长度小于报文丢包的低门限值时：不对报文进行任何处理，直接进行转发；当实际队列长度处于报文丢包的低门限值与高门限值之间时：若设备接收到ECN字段为00的报文时，对报文按照概率进行丢包处理，若设备接收到

ECN字段为01或者10的报文时，对报文按照概率将ECN字段修改为11后进行转发，若设备接收到ECN字段为11的报文时，对报文不做处理，直接进行转发；当实际队列长度大于报文丢包的高门限值时：若其ECN字段为00的报文时，对报文进行丢包处理，若其ECN字段为01或者10的报文时，对报文将ECN字段修改为11后进行转发，若其ECN字段为11的报文时，对报文不做处理，直接进行转发；当流量接收端收到ECN字段为11的报文时，说明网络上出现了拥塞。这时，流量接收端向流量发送端发送协议通告报文，告知流量发送端存在拥塞。流量发送端收到该协议通告报文后，就会降低报文的发送速率，避免网络中拥塞的加剧。当网络中拥塞解除时，流量接收端不会收到ECN字段为11的报文，也不会往流量发送端发送用于告知其网络中存在拥塞的协议通告报文。此时，流量发送端收不到协议通告报文，则认为网络中没有拥塞，从而会恢复报文的发送速率。

2 整体架构设计

在不同优先级业务的传输和交换过程中，需要进行传输的拥塞控制和流量管理，实现网络业务传输的流量控制，达到在网络中不丢包、高可靠、低延迟、大带宽的无损传输功能^[11]。

网络的拥塞控制及流量管理采用基于优先级队列的反压机制及端到端的拥塞通知机制。PFC逐跳提供基于优先级的流量控制，通过反压机制，避免由于缓冲区不足带来的数据帧丢弃问题；ECN通过显式的拥塞通知机制，在设备发生拥塞时，通过对IP头中ECN域的标识，由接收端向发送端发送降低发送速率的CNP报文，实现端到端的拥塞管理，避免大量PFC反压带来的链路通信效率的下降。

网络平台流量管理及拥塞控制机制如图6所示。

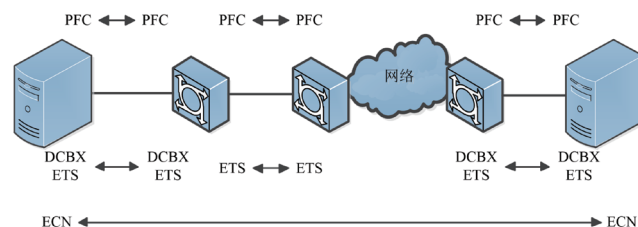


图6 无损传输机制

3 实现与测试分析

3.1 无损传输功能实现

PFC流控用于实现交换机输出、输入端口基于优先级的流量控制，其主要工作流程如下：

下游设备接收缓存满，无法处理，发送PFC暂停帧给交换机；交换机收到下游设备中的数据，送到包分析模块中进行解析，区分出普通的数据帧和流控帧，从流控帧中提取出输入端口号和优先级信息；将提取到的流控信息以开关信

号的形式输送给输出队列管理的先入先出队列（first in first out, FIFO）中，使之压在出队处，使该输端口的该优先级停止物理出队；由于被流控的输出队列无法出队，共享缓存里的队列将越积越多；直到队列调度模块再次进行队列门限查询时发现该队列到达 PFC 水限以上或者降到水限以下，将到达 / 降下水限的目的端口号和优先级信息以及流控开关信息反馈给预警模块；预警模块送出本总线的预整信息，同时汇总本总线和交换机其余总线的流控预警信息，并将其进行分析，写入预警表中；输入处理接收到的每个数据帧在解析完之后都会送入预警模块中，判断目的端口号和优先级信息与前面已经被预警的队列是否形成了命中；命中后对输入端口的这个优先级进行 PFC 暂停帧组帧，组过的帧会进入到 PFC 暂停帧 FIFO 中，与原本的输出队列平行；以公平轮询的方式将 PFC 暂停帧与普通数据帧混合在一起，经过 MAC 发送给上游端设备。

3.2 无损传输功能测试

为测试以太网交换机的无损传输功能，设置以下测试项：

（1）交换机两端口同时向同一端口打流测试，负载均为 80%，模拟接收端口流量过载的场景。观察两个发送端口的降速和丢包情况，结果显示两个发送端口的 8 GB 流量均降速为 5 GB，接收端口接收速率为 10 GB，两条流量均未丢包，抓包显示 PFC 暂停帧暂停时间为 240 ms，如图 7 所示。

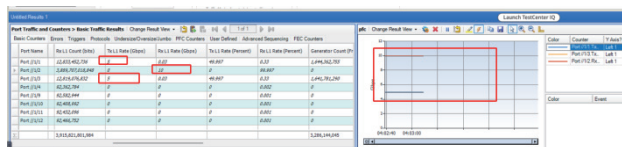


图 7 流量过载测试结果

（2）发送端口向接收端口打流，负载为 80%，接收端口节点主动发送 PFC 暂停帧，模拟接收端口下游端设备处理能力有限的场景。观察流量变化情况，结果显示接收端口发送 PFC 暂停帧时发送端口流量暂停，接收端口停发 PFC 暂停帧之后，发送端口流量恢复，如图 8 所示。

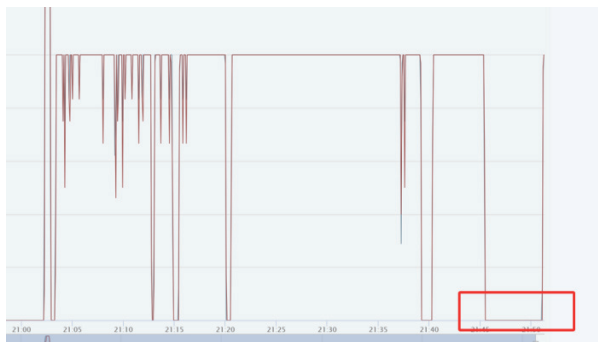


图 8 端节点主动发送 PFC 帧测试结果

4 总结

PFC 逐跳提供基于优先级的流量控制，在以太网链路上可以实现多种类型流量互不影响。ECN 可以实现端到端的拥塞管理，在设备发生拥塞时，接收端识别 ECN 域标识从而向发送端发送拥塞通知报文，减缓拥塞扩散。在构建无损以太网时，需要同时支持 PFC 和 ECN 功能以保证带宽。

参考文献：

- [1] 翟大海, 羊舌荣元. 高速以太网技术的发展现状和趋势 [J]. 现代传输, 2018(1): 58-63.
- [2] 浦江. 万兆以太网技术及应用 [J]. 计算机工程与设计, 2002(12): 73-76.
- [3] 钟小龙. 高速无损数据中心网络传输协议的设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- [4] 罗鉴, 宋晓丽. 无损以太网关键技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2012, 18(4): 27-31.
- [5] ZHANG Y R, MENG Q K, HU C L, et al. Revisiting congestion control for lossless ethernet[C]// Proceedings of the 21st USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. New York: ACM, 2024: 131-148.
- [6] 刘军, 韩骥, 魏航, 等. 数据中心 RoCE 和无损网络技术 [J]. 中国电信业, 2020(7): 76-80.
- [7] 姚作宾, 魏守水, 程明阳. 基于高速以太网技术的应用探讨 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2003(S1): 75-77.
- [8] 魏迎旭. 大容量 FC 交换机的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [9] 李向阳. 面向无损网络的优先化细粒度流调度研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [10] 孙嵩松. 10Gb/s 无损以太网 MAC 控制器的 FPGA 实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [11] 张文杰. 基于网络遥测的无损数据中心网络传输协议研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.

【作者简介】

王怡琳（1998—），女，陕西西安人，硕士，研究方向：嵌入式计算机及网络、人工智能。

李玉发（1984—），男，河北衡水人，硕士，研究方向：嵌入式计算机及网络、计算机体系结构。

杨思远（1998—），男，陕西咸阳人，硕士，研究方向：嵌入式计算机及网络。

（收稿日期：2024-11-12）

基于优化遗传算法的恶意软件漏洞检测方法

陈宇翔¹

CHEN Yuxiang

摘要

恶意软件的攻击技术不断进化,呈现出多态性与变形性的显著特征。这些恶意软件能够灵活地对自身代码结构进行调整,致使每次发起攻击时的形态都各不相同,让人难以预测。传统检测方法依赖静态漏洞评分标准,难以准确评估恶意软件变化攻击下的漏洞威胁,导致检测漏洞数量与实际不符,准确性低。为此,文章提出一种基于优化遗传算法的恶意软件漏洞检测方法。该方法将链路报文进行转化,并与端口报文相结合,通过考虑信息流传输过程中产生的叠加流量,获取恶意软件最终信息流。采用运行码频率提取方法,从信息流中筛选出高频运行码特征,快速定位与恶意软件行为最相关的关键特征。将这些关键特征作为优化遗传算法的初始种群,计算漏洞存在时的最优个体值,并与攻击成功的经验阈值比较,评估漏洞威胁程度。通过实时检测恶意软件攻击的风险态势,及时获取漏洞情况。实验结果表明,在特定时间点(5、11、20、26 s),软件响应频率显著突变,且检测出的漏洞数量与实际完全吻合。这表明此方法能有效检测漏洞,准确获取恶意软件漏洞数量,显著提升检测准确性。

关键词

遗传算法; 优化算法; 恶意软件; 漏洞检测; 高频运行码特征

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.022

0 引言

随着信息技术的飞速发展和互联网技术的广泛应用,恶意软件已成为网络安全领域面临的一大挑战。恶意软件利用软件漏洞进行传播、窃取数据、破坏系统等恶意活动,给个人、企业乃至社会都带来了严重的安全风险。随着恶意软件技术的不断演进,其复杂性和隐蔽性不断提升,使得防御工作越发困难。传统的恶意软件检测方法,如特征码匹配和行为模式分析,在面对不断变异和进化的恶意软件时,已逐渐显露出其局限性。恶意软件开发者通过修改代码、混淆技术或利用新的漏洞等手段,使得恶意软件能够绕过传统的检测机制,继续在网络中传播和危害。为了有效应对这一挑战,准确且高效的漏洞检测方法显得尤为重要。这类方法能够在恶意软件发动攻击之前,及时发现并修复系统中的漏洞,从而显著提升系统的安全防护能力。这不仅能够有力保护个人隐私和企业的商业机密,更能确保国家关键信息基础设施的安全稳定运行。因此,深入研究恶意软件漏洞检测方法,对于提升网络安全防护水平、保障信息系统的持续稳定运行具有深远的意义。

目前,已有多种针对恶意软件漏洞检测的方法被提出并应用于实践中,例如,文献[1]提出基于学习的源代码漏洞检测方法,该方法首先识别并定义了漏洞的特征,随后将这

些特征输入到机器学习算法中进行学习,以识别源代码中的漏洞。然而,由于该方法所定义的漏洞特征局限于已知的攻击模式,当新型恶意软件出现且其攻击特征与已定义特征不完全匹配时,检测方法可能无法准确识别这些新攻击,从而导致检测漏洞数量与实际不符,准确性下降。另一方面,文献[2]提出了一种在确定约束条件下的机器学习框架漏洞检测方法,即 ConFL。该方法能够生成通过合法性校验的有效输入数据,这些数据能够触发框架内部更深层次的代码逻辑,从而增加检测到潜在漏洞的机会。然而,ConFL方法依赖于从框架源代码中自动提取的约束来生成有效输入数据,在面对新型或未知漏洞的攻击时,生成的输入数据可能无法全面覆盖所有可能的攻击场景,导致一些实际存在的漏洞被遗漏,进而降低了检测的准确性。

针对上述问题,本文提出了一种基于优化遗传算法的恶意软件漏洞检测方法,并通过实际实验进行了深入分析与验证。

1 恶意软件漏洞检测

当恶意软件实施多阶段攻击时,会逐步调整其行为模式以适应不同的攻击阶段,并试图躲避检测。在攻击的初期阶段,尽管恶意行为的频率相对较低,但随着攻击的逐步推进,系统区域或网络地址中的信息流动规模和方向会发生显著变化。通过信息流检测手段,可以持续追踪这些动态变化,从

1. 江西财经大学现代经济管理学院 江西九江 332020

而及时发现恶意软件的攻击行为。与此同时,对相关信息流的特征进行提取,并应用优化遗传算法进行针对性地检测,能够进一步提升检测的准确性和效率。

1.1 获取恶意软件的最终信息流

在网络环境下,恶意软件利用信息流机制,通过特定节点或端口未经授权地传输数据,形成系统安全的重大威胁,这些隐匿于复杂网络环境中的漏洞难以轻易发现。为了更有效地获取恶意软件的信息流漏洞,本文提出了一种新方法,该方法将链路报文与端口报文相结合,并全面考虑叠加流量的影响。这种方法能够深入捕获恶意软件在网络传输过程中的更深层次信息流。这些信息流为恶意软件漏洞的检测提供了有力的支持。

在网络环境下,可以参照树结构来具体分析恶意软件中的危险状况,通过解析该结构来获取精确的漏洞信息。树结构能够清晰地展示各节点端口间信息流的传播路径,其中信息的起点位于树结构的根节点^[3]。为了获取精确的漏洞信息,首先将恶意软件中的信息流转化为一维列矩阵表示 N , 具体形式为:

$$S_{N \times 1} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T \quad (1)$$

式中: s_N 为节点在单位时间内发送的信息流数量。根据信息流的具体数量,结合发送时间可以计算出信息流的发送频率^[4]。

在实际操作中,恶意软件的信息流漏洞需要经过所有节点进行运作,才能最终完成节点信息流量的统一。在这一过程中,上级节点转发时可能引发的叠加流量是一个不可忽视的因素。为了准确计算叠加流量,采用了多拓扑生成算法,该叠加流量的计算方式为:

$$Q(\alpha) = x S_{N \times 1} Q(\alpha + t Q_1) \quad (2)$$

式中: Q_1 为信息流漏洞的数量; α 为节点数量; x 为经过节点信息流的节点数目; t 为各节点信息流漏洞产生的时间^[5]。

当恶意软件的各个节点发送消息时,整个 $S_{N \times 1}$ 矩阵中的所有端口都会接收到相应的报文消息。根据报文处理机制,选取最优节点设定为主节点,并将其导入到建立的信息流模型中。通过这一模型,能够构建各节点端口的恶意软件漏洞信息数据集。若恶意软件存在多个漏洞,则信息流模型 $R_{p \times n}$ 会相应地扩展,以反映所有漏洞的信息。其中, p 表示恶意软件存在漏洞的数量。为了将恶意软件的漏洞与链路和端口相对应,设定了端口的数量 k , 并计算链路数量。链路数量的计算公式为:

$$d = \frac{kQ(\alpha)}{2} \quad (3)$$

式中: d 为链路的数量。通过链路数量进行转化链路报文,

将端口报文与链路报文进行结合,再加上信息流传输过程中产生的叠加流量,可以获取软件最终的恶意软件信息流,计算公式为:

$$F_{ij} = \frac{dn_{ij}}{\sum_{k=0}^m n_{kj}} \quad (4)$$

式中: n_{ij} 表示节点 i 在恶意软件信息中出现的次数; $\sum_{k=0}^m n_{kj}$ 表示节点 j 中的恶意软件信息总数。

1.2 提取恶意信息流特征

在获取恶意软件信息流后,恶意软件会通过多种途径(如网络窃取用户数据和 USB 设备接收外部控制指令)进行活动。这些活动会导致信息流特征受到多种来源的干扰,呈现多样化。特别是当恶意软件通过 USB 设备接收控制指令时,信息流中会混入来自 USB 设备的信息流,进一步增加了特征的复杂性。因此,为从复杂的信息流中准确识别出恶意代码,需要对信息流特征进行提取^[6]。为此,本文使用 $N-L$ 方法从加密文件中提取特征图,生成矩阵数据。通过计算候选词概率、特征权重和信息熵,选择特征权重最小的候选词作为特征对象。利用运行码频率提取方法,从恶意信息流中筛选出高频运行码特征,这些特征通常与恶意软件的核心功能和攻击行为紧密相关。通过关注这些高频特征,可以更有效地识别恶意软件的存在和潜在威胁^[7]。

在恶意软件信息流特征的提取中,首先在训练集上统计信息流中的 L 类候选词数量。针对其中一个候选词 a 进行分析,计算其在数据集中出现的概率为:

$$P_A = \frac{a}{nF_{ij}} \quad (5)$$

式中: a 为在数据集中出现的频次; n 为所有候选词的数量。

接着,计算候选词 a 在具体类别 L 中出现的概率为:

$$P_B = \frac{l_a}{nl} \quad (6)$$

式中: l_a 为候选词出现在类别中的次数; l 为样本的类别数量。

然后,计算候选词 a 的特征权重:

$$w(a) = \frac{|P_A - P_B|}{P_A} \quad (7)$$

式中: w 为权重特征。通过上述公式计算得出 $w(a)$ 的特征权重值。为了评估样本集合的精准度,设定了信息熵的概念。在决策树中,根据样本集中的第 L 类数据所占的比例,选择特征词 a 的最大特征权重来对数据集进行划分,获取特征词的信息增益^[8]。通过计算每个类别中所有候选词的特征权重,并对这些数据进行加和,可以得到最终的特征权重总值。然后,针对特征权重具体数据进行排序,选择特征权重最小的候选词作为特征对象。利用这个特征对象对信息流进行特征提取,得到的信息流特征可以表示为:

$$e=-\sum l_k\log_2l_kw(a) \tag{8}$$

式中： e 为信息流特征， e 值越小，表明样本数据精准度越高，特征越准确。

在采用运行码频率提取方法进行特征提取时，根据运行码的频率选择出高频运行码作为最终目标。这些高频运行码通常与恶意软件的核心功能和攻击行为紧密相关，因此能够获得较好的提取效果。通过关注这些高频特征，可以更有效地识别恶意软件的存在和潜在威胁。

1.3 基于优化遗传算法的漏洞检测

恶意软件通过改变函数调用顺序、插入冗余代码、修改逻辑结构等多种方式进行变异，这些变异手段极其复杂且多变。这种变异使得传统的检测方法难以准确识别并应对。遗传算法作为一种优化搜索算法，在漏洞检测领域展现出了一定的潜力，但面对恶意软件的多样变异，其快速适应和策略调整能力仍有待提升。为此，本文提出了一套基于优化遗传算法的漏洞检测方法，该方法将高频运行码特征作为关键输入，这些特征源自恶意软件信息流，与核心功能和攻击行为紧密相关，有助于精确搜索漏洞。在基于路径和分支覆盖的基础上，生成遗传算法的适应度函数，并对遗传算子进行更新。最后，将遗传算法与随机森林等机器学习算法相结合，构成一种整合式的漏洞检测算法，实现对恶意软件的快速准确检测^[9]。具体检测过程如下：

（1）对问题软件的信息流进行随机森林聚类分析，根据信息流特征将数据点划分为不同的簇。然后，从每个簇中选择代表性的个体作为遗传算法的初始种群。这样可以确保初始种群在整个问题空间中具有更广泛的分布，避免初始种群过于集中在某些局部区域。

（2）初始化种群中的每个染色体，以特征数量作为目标函数，将评估过的信息流特征子集保存在数据库中，防止数据丢失。

（3）采用非支配排序方法对种群进行排序，并通过遗传算子生成后代种群。其公式为：

$$\delta=o\cdot\text{ranh}(lk) \tag{9}$$

式中： o 为染色体； ranh 为自定义函数。

（4）在选择过程中，优先考虑拥挤度较低的染色体，经过随机变异，使得父种群与新生的种群进行汇总，从而生成一个新的染色体。在此过程中，对新的染色体进行自主排序，选出排名前一半的染色体构成下一代种群。这样通过平衡算法的搜索能力，选择排序中的首位染色体作为最优个体，计算公式为：

$$k=\frac{t(D+1)}{g} \tag{10}$$

式中： D 为漏洞标识； g 为恶意软件攻击类型。

（5）定义攻击主要影响因素，并给出攻击成功的经验

阈值 λ ，其公式为：

$$\lambda=\frac{1}{y}\sum_{j=1}^yw+\frac{p}{wd} \tag{11}$$

式中： y 为攻击成功概率； p 为关联度。

（6）将软件漏洞存在时的最优个体值与攻击成功的经验阈值进行比较，以此确定漏洞对软件安全的威胁程度^[10]。如果最优个体值 k 小于攻击成功的经验阈值 λ ，则表明软件无漏洞；反之，如果最优个体值 k 大于阈值 λ ，则需进一步分析恶意软件攻击 Δt 的风险态势，确定漏洞检测结果。具体的检测结果可以表示为：

$$H=\frac{E\Delta t}{\lambda e}+\frac{k\delta}{E} \tag{12}$$

式中： E 为关联分析值。通过这一流程，可以对软件进行实时的漏洞检测，实现持续的安全监控和更新，以有效应对不断变化的威胁环境。

2 实验测试与分析

2.1 搭建实验环境

为了验证本文所提检测方法的有效性，在研究过程中结合网络环境，配置了实验平台环境，具体配置如表 1 所示。

表 1 实验环境

配置	参数
处理器	R7
显卡	RTX 1020
内存	8 GB
硬盘	SSD
Python 集成开发环境	PyCharm
Python 版本	3.1.3

在实验中，采用了在漏洞检测领域广泛使用的 SAT 数据集，该数据集包含了各类软件漏洞代码及其相应的补丁信息。文中选用了 C++ 测试用例样本组成的测试套件，这些样本能够代表通用的源代码类型。从数据集中挑选了 1 200 个文件，以此构建测试所用数据集。在此过程中，随机选择了部分数据集用于训练模型，剩余则作为测试集使用。为了确保实验的严谨性，还在数据集中额外添加了 5 个漏洞样本。

2.2 模型结构

在训练阶段，为了优化模型性能，设置了多个关键参数。采用交叉熵为损失函数，以精准衡量模型输出与实际标签之间的差距；同时，选用高效的 Adam 优化器来更新模型参数。设定训练轮次确保模型充分学习。此外，还设定了初始学习率，并在每经过 5 轮训练后，对学习率进行逐步衰减，以促进模型更好地拟合训练集数据，其参数具体如表 2 所示。在训练过程中，为了提升训练速度和效果，对已有数据集进行降采样处理，并融入了新数据。通过迭代训练，不断读取已有模型的数据信息，并基于新数据对数据集进行扩充。经过

多次迭代训练后,保存模型并输出结果。这一训练过程能够提升模型的检测能力和准确性。

表 2 模型训练超参数

项目	参数
损失函数	交叉熵损失函数
优化器	Adam
训练轮次	150
Batch size 大小	120
训练平台	RTX 1020
初始学习率	0.001

2.3 验证指标

在漏洞检测环境下,扰动是对目标系统(如软件、网络等)的输入、配置或者状态进行微小改变的操作,因此实验中采用扰动率作为衡量这种改变程度的指标进行实验验证,计算公式为:

$$D = \frac{m_i}{O_i} \quad (13)$$

式中: m_i 表示对软件进行调用序列修改的函数个数; O_i 表示修改前调用序列的函数个数。

2.4 结果分析

在测试阶段,设定了 30 s 的测试时间窗口,以评估本文方法在限定时间内能够完整检测出的漏洞数量。为了直观展现测试效果,绘制了软件运行过程中的扰动率曲线,并将本文方法与文献[3]方法、文献[4]方法以及实际值进行了对比分析,对比结果如图 1 所示。

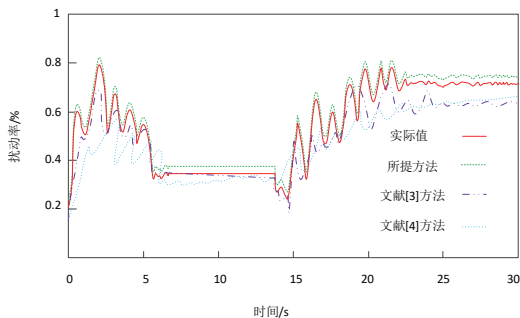


图 1 软件运行中的响应曲线

通过观察图 1 中的扰动率曲线,可以发现,在 0~0.3 s 的时间范围内,3 种方法的扰动率曲线呈现出一定的变化趋势。在对比这 3 种方法的扰动率曲线时,可以清晰地看出,本文所提出的方法的扰动率曲线在绝大多数时间点上与实际值的曲线高度吻合,这充分表明该方法在识别恶意软件及其漏洞方面具有更高的准确性。相比之下,文献[3]方法和文献[4]方法的扰动率曲线与实际值之间存在较为明显的偏差,这进一步说明了这两种方法在识别恶意软件及其漏洞时的能力相对有限。本文所提出的方法通过利用遗传算法的全局搜索能力和优化策略,结合从信息流中提取的关键特征,能够更准

确地评估漏洞的威胁程度,使得该方法在对比中展现出显著优势。

3 结语

本文深入信息安全领域的漏洞检测问题,提出了一种基于优化遗传算法的恶意软件漏洞检测新方法。该方法深入解析信息流传输中的叠加流量,精确捕获恶意软件的最终信息流,并借助运行码频率提取技术,有效识别出与恶意行为密切相关的高频特征。随后,将这些关键特征用作遗传算法的初始种群,通过算法优化计算出漏洞存在时的最优解,并与实际攻击成功的经验阈值进行对比,实现对漏洞威胁程度的精准评估。实验结果显示,该方法在多个关键时间点均能准确识别软件响应频率的显著变化,且检测出的漏洞数量与实际完全相符,显著提升了检测的准确性与响应速度。本文不仅为恶意软件漏洞检测带来了新的技术视角,也为加强网络安全防护能力提供了重要的创新支撑。

参考文献:

- [1] 苏小红,郑伟宁,蒋远,等.基于学习的源代码漏洞检测研究与进展[J].计算机学报,2024,47(2):337-374.
- [2] 刘昭,邹权臣,于恬,等.一种约束制导的机器学习框架漏洞检测方法[J].计算机学报,2024,47(5):1120-1137.
- [3] 董伟良,刘哲,刘遼,等.智能合约漏洞检测技术综述[J].软件学报,2024,35(1):38-62.
- [4] 胡雨涛,王湖远,吴月明,等.基于图神经网络的切片级漏洞检测及解释方法[J].软件学报,2023,34(6):2543-2561.
- [5] 嵇友晴,卢跃,潘世文,等.基于动态切片与预训练模型的代码漏洞检测[J].小型微型计算机系统,2024,45(6):1529-1536.
- [6] 何清林,王丽宏,陈艳姣,等.一种自动实时的物联网在野漏洞攻击检测方法[J].北京航空航天大学学报,2024,50(7):2195-2205.
- [7] 张卓,刘业鹏,薛建新,等.基于数据流传播路径学习的智能合约时间戳漏洞检测[J].软件学报,2024,35(5):2325-2339.
- [8] 杨宏宇,杨海云,张良,等.基于特征依赖图的源代码漏洞检测方法[J].通信学报,2023,44(1):103-117.
- [9] 徐寅森,李红艳,张子栋.基于机器学习的传感网核心节点漏洞检测仿真[J].计算机仿真,2024,41(3):410-414.
- [10] 潘超,吕翹楚,肖巍.基于启发式遗传算法的即时通信网络漏洞检测[J].计算机仿真,2023,40(8):191-195.

【作者简介】

陈宇翔(1989—),男,江西南昌人,硕士,助教,研究方向:软件工程、计算机应用技术。

(收稿日期:2024-10-29)

基于 TCM-KNN 算法的多级网络访问安全控制方法

张创基¹ 林伟烜² 许景民¹

ZHANG Chuangji LIN Weixuan XU Jingmin

摘要

多级网络由多个层级组成, 其中的每一级都需要安全防护, 现有安全策略难以做到既保持一致性又体现差异化。从一致性角度看, 整个多级网络应该遵循基本的安全原则, 但从差异化角度看, 不同层级网络面临的安全威胁可能不同, 因此, 制定合适的安全策略至关重要。对此, 文章研究了一种基于 TCM-KNN 算法的多级网络访问安全控制方法。首先, 针对收集到的用户基础信息进行标准化与数据聚合处理, 以了解用户的基本特征。然后, 将预处理后的用户行为数据作为训练样本引入 TCM-KNN 算法, 进行多级网络的异常检测。并根据入侵检测结果进行安全控制策略制定, 通过用户身份认证确定安全环节上的一致性, 利用 ACL 访问控制列表设置不同层级的访问规则, 确定安全环节上的差异性。最后, 实时监测用户行为, 当行为异常得分超阈值时动态调整用户访问权限, 以此确保网络安全。对比实验结果表明: 该方法可以满足多级网络的安全控制需求, 实现对不同类型访问等级、权限的精准划分。

关键词

TCM-KNN 算法; 异常检测; 身份认证; 安全控制; 访问; 多级网络

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.023

0 引言

随着信息技术的发展, 网络安全问题日益凸显, 尤其是网络访问的安全控制成为一个重要的研究领域。在复杂的网络环境中, 如何有效地识别并阻止非法访问, 保障网络资源的合法使用, 是当前网络安全领域面临的一大挑战。TCM-KNN 算法作为一种先进的机器学习算法, 因其高效、准确的特性, 在网络安全领域展现出了广阔的应用前景。

李文军等人^[1]基于可信度和智能合约, 旨在应对物联网环境中分布式终端面临的多种安全威胁。在研究中, 首先对数据属性进行分级, 并根据用户历史行为计算其可信度。通过利用区块链技术, 动态调整访问控制策略, 确保只有高可信度的用户能够访问高级敏感数据。智能合约的引入, 进一步确保了策略的高效执行。但其策略检索方法可能相对低效, 特别是在处理海量数据时。宋妍龙^[2]结合网络边界区域、传输信道区域及移动终端设备区域, 建立了多个目标函数, 如边界访问控制、安全威胁检测和用户身份认证等。通过 SPEA-II 算法对联合目标函数进行求解, 实现了网络多层次安全访问控制机制的最佳方案。但 SPEA-II 算法的复杂度和计算量较大, 可能导致系统性能下降。吴克河等人^[3]通过

边缘融合终端进行重加密, 既保护数据安全, 又减轻终端设备的通信开销, 在策略授权方面, 使用可扩展的访问控制标记语言设计授权策略和策略匹配算法, 实现对多终端访问控制策略的同时下发, 更高效地解决安全访问控制问题。虽然该方法通过边缘融合终端进行重加密可以减轻通信开销, 但重加密过程本身会带来额外的计算资源消耗。特别是在资源受限的边缘设备上。蔡斌^[4]在现有云计算数据存储安全体系架构基础上使用 AES 对称加密算法对 CDC 中的数据文件进行加密处理从而实现 USER 安全访问, 与传统访问控制技术相比安全, 可靠性更高。然而, AES 对称加密算法虽然具有较高的安全性和加密速度, 但其密钥管理相对复杂。在云计算环境中, 随着数据量和用户数量的增加, 密钥的管理和分发成为一个挑战。为保障网络资源的合法使用, 防范网络攻击, 本文将引进 TCM-KNN 算法, 以多级网络为例, 开展访问安全控制方法的设计研究。

1 用户行为数据采集与处理

为满足多级网络访问的安全控制, 设计方法前, 使用数据挖掘工具, 进行网络数据的检索与扫描, 收集用户的 ID、姓名、年龄、性别、地区等基础信息, 了解用户的基本特征和背景。

对采集数据进行标准化处理, 公式为:

$$Y = \frac{y - \bar{y}}{\hat{y}} \quad (1)$$

1. 广州华立科技职业学院 广东广州 511325

2. 广州华商职业学院 广东广州 511325

[基金项目] 2023 年度广东省普通高校特色创新类项目 (2023KTSCX409)

式中： Y 表示标准化后的数据； y 表示原始数据； $\bar{y}$ 表示 y 的平均值； $\hat{y}$ 表示 y 的标准差。在此基础上，对数据进行汇总统计，实现数据聚合处理。相关系数分析能够量化用户行为数据中各变量之间的关联程度，揭示它们之间的线性关系。这对于理解用户行为模式、识别关键影响因素至关重要。计算公式为：

$$r = \sqrt{(Y - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

式中： r 表示相关系数； $\bar{Y}$ 表示 Y 的均值。基于此，数据的聚合处理过程计算公式为：

$$A = \sum \frac{Y(n)}{Nr} \quad (3)$$

式中： A 表示数据的聚合处理； n 表示第 n 个数据； N 表示数据个数^[5]。并将其归为一类，输出相似性较高的数据，以此种方式，完成用户行为数据的采集与处理。

2 基于 TCM-KNN 算法的多级网络异常监测

基于上述预处理后的用户行为数据，其作为训练样本数据引入 TCM-KNN 算法，进行多级网络的异常检测。此过程旨在通过分析用户行为数据，识别并阻止潜在的网络异常行为。从完成处理的行为数据中提取关键特征，用于 TCM-KNN 算法的训练和预测^[6]。在 TCM-KNN 算法中，计算待检测样本与训练样本之间的距离，此过程计算公式为：

$$d = \Delta A \cdot \sqrt{\sum (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

式中： d 表示待检测样本与训练样本之间的距离； x_i 、 y_i 分别表示第 i 个检测样本与训练样本数据。完成上述计算后，进行样本数据中关键数据的分类^[7]。为确保分类结果的准确性，引入权重分配机制，进行不同类别数据的权重计算。此过程计算公式为：

$$L = \frac{d}{\arg \max (w_i \cdot c_i)} \quad (5)$$

式中： L 表示数据的权重； w 表示数据分配系数； c 表示最大类别。同时，根据 K 个最近邻样本的类别，采用多数投票法或加权投票法进行分类决策，利用 TCM-KNN 算法对用户行为分类决策数据进行实时监测，即可实现对网络异常的检测^[8]。此过程计算公式为：

$$M = \frac{1}{L^2 + (\chi + 1)^2} \quad (6)$$

式中： M 表示异常数据检测结果； χ 表示最近邻样本的类别。基于此，异常检测系统能够识别并标记出潜在的网络攻击行为。

3 用户身份认证与多级网络访问安全控制

多级网络作为复杂且庞大的系统架构，通常由多个相互关联、功能各异的层级构成。每个层级在网络中扮演着不同的角色，承载着不同的数据流量和服务需求，因此也面临着各自独特的安全挑战。针对这种多层次的网络结构，制定一套既能保持一致性又能体现差异化的安全策略显得尤为重要。

根据上述异常检测结果，系统可以动态地调整用户的访问权限，制定具有一致性与差异性安全策略。具体步骤如下：

首先，在多级网络中，用户身份认证是基本的安全原则。通过式（7）进行用户身份认证，无论是哪个层级的网络，都遵循这一基本的安全操作。这确保了整个多级网络在用户身份验证这一关键安全环节上的一致性^[9]。

$$H(M) = \frac{1}{h(p)} \quad (7)$$

式中： H 表示用户身份认证； h 表示哈希函数； p 表示用户输入的密码。除了密码认证外，还可以引入其他认证因素，如生物特征（指纹、面部识别等）或物理设备（如手机验证码）。通过此种方式，进一步提高身份认证的安全性。

完成身份验证后，针对不同层级的网络面临不同的安全威胁，ACL 能够很好地体现这种差异化。因为 ACL 可以针对每个用户在不同层级网络中的情况设置具体的访问规则。例如，对于核心层级网络中的关键资源，ACL 可以设置非常严格的访问权限，只允许少数具有特定身份标识的用户进行非常有限的操作；而对于边缘层级网络中的一些公开资源，ACL 可以设置相对宽松的访问权限，允许更多用户进行读取等操作。

引入 ACL 后，系统能够针对每个用户设置具体的访问规则，从而精确地控制不同层级间的差异性问题。此过程计算公式为^[10]：

$$ACL = H(M) \sum a \cdot \frac{\delta^2}{m+1} \quad (8)$$

式中：ACL 表示访问控制列表设置； a 表示用户身份标识； δ 表示网络资源； m 表示访问控制返回值。对用户行为数据进行实时监测和分析。当用户行为异常得分超过某个阈值时，可以临时降低其访问权限或限制其访问某些敏感资源。用户身份动态权限调整过程计算公式为：

$$Q = \frac{1}{H(M) \cdot ACL} + \frac{1}{f(e)} \quad (9)$$

式中： Q 表示用户身份动态权限调整； f 表示用户当前行为特征的值； e 表示异常值的阈值。通过整合用户身份认证与多

级网络访问安全控制，确保只有合法用户才能访问网络，并实时监测用户行为以防止潜在的网络入侵。

4 对比实验

4.1 实验准备

本次实验选择某大型企业内网作为研究试点，该网络结构复杂，包含多个子网和防火墙，实现了数据的分级存储和访问控制。多级网络的技术参数、规模等进行分析，如表 1 所示。

表 1 多级网络的技术参数、规模

序号	项目	参数
1	网络层级数	4 层（核心层、汇聚层、接入层、隔离层）
2	总节点数	5 000 个节点
3	防火墙数量	10 台高性能防火墙
4	带宽容量	100 Gbit/s
5	并发连接数	500 000 个并发连接
6	VLAN 数量	100 个 VLAN
7	安全策略数量	500 条安全策略
8	入侵检测系统 (IDS)	5 套 Snort IDS
9	日志审计系统容量	1 TB 存储空间
10	平均响应时间	5 ms

4.2 实验步骤

实验中，为了模拟真实的多级网络环境，搭建四层架构环境。核心层负责高速数据传输，汇聚层进行流量控制和安全策略实施，接入层提供用户接入，隔离层则用于保护关键资源。同时，在汇聚层或接入层部署 TCM-KNN 算法，用于实时监测和分析网络流量，识别异常访问行为。为了验证实验的有效性，搭建一个测试环境，包括模拟攻击和合法访问请求，确保测试环境与实际网络环境具有相似的特征和复杂性。测试环境架构如图 1 所示。

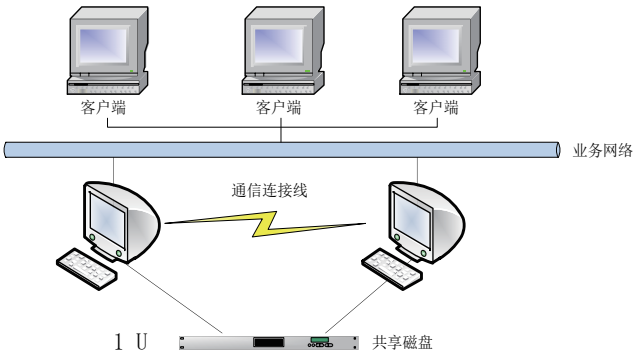


图 1 多级网络访问安全控制方法测试环境架构

启动多级网络环境，并收集一段时间内的网络流量数据。利用收集到的网络流量数据，训练 TCM-KNN 算法模型。模

拟 10 名用户，将其编号 1~10，每名用户在网络中的访问权限不同。具体内容如表 2 所示。

表 2 多级网络访问用户的等级与权限分配

用户编号	多级网络访问等级	访问权限
1	一级	浏览网页
2	二级	深度检索网络、浏览网页
3	0 级（无权限）	无法登录此网站
4	三级	下载文件、深度检索网络、浏览网页
5	四级	上传文件、下载文件、深度检索网络、浏览网页
6	五级（最高）	管理用户账户、上传文件、下载文件、深度检索网络、浏览网页
7	三级	与用户 4 相同
8	二级	与用户 2 相同
9	一级	与用户 1 相同
10	四级	与用户 5 相同

模拟用户 1~10 访问多级网络，引进文献 [1] 提出的基于可信度的安全控制方法、文献 [2] 提出的基于 SPEA- II 算法的安全控制方法，将其作为对照。同时应用 3 种方法，对用户的多级网络访问过程进行安全控制。

4.3 实验指标

在多级网络访问安全控制中，误报意味着将正常的用户行为判定为异常。如果误报率过高，安全系统会将大量的资源浪费在处理这些误判的情况上。使得网络安全访问控制性能大大下降。误报率，将正常行为误判为异常行为的比例。假设在测试集中有 N_n 个正常样本，被误判为异常的样本数为 N_{fp} ，则误报率表达为：

$$FPR = \frac{N_{fp}}{N_n}$$

(10)

4.4 实验结果与分析

三种方法的异常行为误报率结果如图 2 所示。

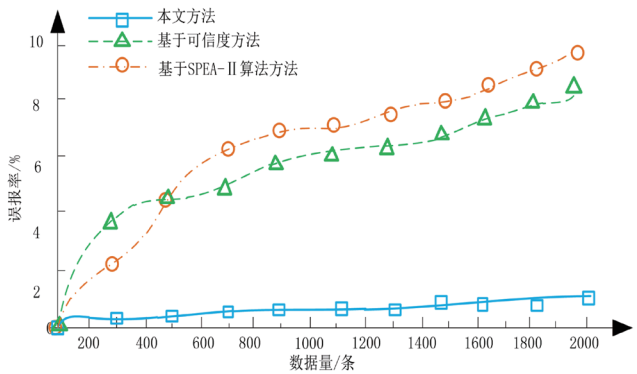


图 2 安全控制结果

根据图2结果可以看出,本文方法的误报率明显低于对比方法,当数据量达到200条时,仅为1.2%。而对比方法误报率最高分别达到8%与9.7%。由此说明本文方法能够有效实现网络异常检测,为后续的安全访问控制提供帮助。

为了验证设计方法的有效性,将控制后用户可访问的内容与其实际访问的内容进行比对。通过模拟用户登录和网络访问行为,观察并记录用户实际能够访问的内容。在此基础上,将实际访问内容与预设的可访问内容进行比对,检查是否存在超出权限的访问行为或未被授予权限的合法访问被阻止的情况。如果实际访问内容与预设的可访问内容高度一致,说明安全控制方法能够有效地限制用户的访问行为,保护网络资源和数据的安全。实验结果如图3所示。

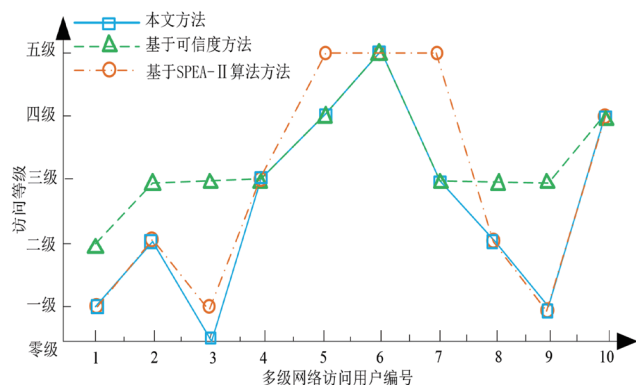


图3 安全控制结果

从图3所示的结果可以看出,应用本文提出的方法进行用户多级网络访问的安全控制,得到的等级划分结果与表1结果一致,说明本文方法可以实现对不同类型访问等级、权限的精准划分。而应用基于可信度与基于SPEA-II算法均存在分配的结果与实际结果均存在不一致的现象,此种现象可能导致部分不法分子入侵网络,从而造成网络数据丢失等异常现象。

综合上述结果可以证明,本文此次设计的方法,可以满足多级网络的安全控制需求,全面保障网络的安全性。

5 结语

本文基于TCM-KNN算法的应用,通过用户行为数据采集与处理、多级网络入侵检测、用户身份认证与多级网络访问安全控制,完成了此次设计。旨在结合TCM-KNN算法的高效分类能力和多级安全策略的精细化控制,实现对网络访问的全面、准确监控。通过本次研究,发现该方法还具有良好的可扩展性和自适应性。随着网络环境的变化和攻击手段的不断更新,该方法能够通过更新训练数据集和优化算法参数,不断提高其检测准确率和适应能力。

参考文献:

- [1] 李文军,李彩玲.基于可信度和智能合约的物联网分布式操作终端安全访问控制研究[J].信息系统工程,2024(8):16-19.
- [2] 宋妍龙.基于SPEA-II算法的网络多层次安全访问控制方法[J].计算机测量与控制,2024,32(6):173-179.
- [3] 吴克河,韩扬,田峥,等.新型电力系统面向云边端架构的安全访问控制技术研究[J].电力信息与通信技术,2024,22(7):1-8.
- [4] 蔡斌.基于属性加密算法的计算机数据安全访问控制技术[J].科技创新与应用,2024,14(10):165-168.
- [5] 徐浩,张侃,刘亚天.云计算平台下属性基数据加密与安全访问控制技术研究[J].软件,2023,44(11):91-93.
- [6] 张迪,曹利,李原帅.车联网环境下基于多策略访问树的安全访问控制算法[J].计算机应用研究,2023,40(11):3394-3401.
- [7] 徐胜超,杨波.基于进化泛函网络的云安全访问控制模型研究[J].云南师范大学学报(自然科学版),2023,43(3):36-40.
- [8] 苗安影.云环境下的数据安全访问控制模型设计及实现[J].信息与电脑(理论版),2023,35(8):63-65.
- [9] 黄海艇,徐盼,唐沸涛.工业互联网感知层多端口安全访问控制系统设计[J].电子设计工程,2023,31(5):153-157.
- [10] 邢慧芬,车辉.基于ACL和防火墙的网络安全访问控制的设计与实现[J].曲靖师范学院学报,2022,41(3):67-74.

【作者简介】

张创基(1983—),男,广东揭阳人,硕士,副教授,研究方向:计算机网络安全、大数据等。

林伟烜(1983—),女,广东汕头人,硕士,副研究员,研究方向:软件设计、数据库、大数据分析与应用。

许景民(1993—),男,广东茂名,本科,助教,研究方向:计算机网络安全、计算机应用等。

(收稿日期:2024-11-07)

基于生成对抗网络的人脸微表情皮沟识别方法

王长清¹

WANG Changqing

摘要

面部表情作为柔性物体,具有变化多样、非线性等特点,且受情绪状态、配合程度等多因素影响,同时具有持续时间短、变化强度弱的特性,导致样本难以有效捕捉。样本规模有限时,传统识别方法只能对现有纹理数据进行旋转、翻转等基本变换,增加的数据量有限,无法涵盖所有微表情皮沟变化,处理未见过的微表情时识别率低。为此,文章提出一种基于生成对抗网络的人脸微表情皮沟识别方法。采用灰度伸缩法对人脸图像进行光照补偿。通过线性拉伸图像的灰度值,增强对比度,以突出微表情皮沟细节。利用形态学运算对光照补偿后的人脸图像进行二值化处理,以有效提取人脸区域并去除背景。引入生成对抗网络(GANs)进行数据增强。将二值化处理后的人脸图像作为条件信息输入到生成对抗网络的生成器中,生成与真实样本极为相似的虚假人脸图像数据,以此扩展数据集规模。将增强后的数据集输入到卷积神经网络(CNN)中,CNN通过卷积、池化操作提取面部微表情皮沟特征,并计算面部图像微表情皮沟特征属于各微表情皮沟类别的概率,基于概率计算结果实现人脸微表情皮沟分类识别。经实验证明,本文方法识别率在95%以上,能够实现对面部微表情皮沟精准识别。

关键词

生成对抗网络;人脸微表情;皮沟;灰度伸缩法;形态学运算方法;卷积神经网络

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.024

0 引言

人脸微表情是人们在面对特定情感、压力或欺骗时,快速且无意识流露的细微面部表情变化,通常持续时间极短,仅为1/25 s至1/5 s之间,且往往不受个体主观控制,因此被认为是情感表达中最真实、最直接的形式之一。包含微小的眼神变化、嘴部动作、眉毛运动以及皮沟(皮肤纹理的微小变化)等,需要借助高精度的技术工具才能有效捕捉和分析。2002年由美国Ekman等人首次提出微表情这一概念以来,微表情在心理学、社会学、医学甚至是安检等领域受到广泛深入的研究。尤其在心理评估和犯罪调查相关的研究中,微表情具有十分重要的应用价值。人脸微表情识别基于人脸表情识别技术,通过检测人脸上的关键特征点(如眼睛、嘴巴、皮沟等)的运动变化来提取微表情特征。然而,由于微表情的复杂性和多样性,其识别仍然是一个具有挑战性的任务。传统的识别方法主要依赖于手工设计的特征提取算法和分类器,难以实现自适应的学习和识别。近年来,随着计算机视

觉和人工智能技术的快速发展,人脸微表情识别技术迎来了新的发展机遇。

当前,人脸表情识别研究已经取得了一定的进展。文献[1]提出了基于深度学习的识别方法,通过卷积神经网络等模型自动提取人脸微表情特征,利用深度学习算法进行特征分类与识别,实现对面脸微妙表情变化的判断与识别。虽然卷积神经网络能够自动提取特征,但在样本有限的情况下,该网络可能无法全面地学习到所有可能的微表情特征,导致在分类识别时出现错误。文献[2]提出了基于注意力机制和Transformer的识别方法,利用注意力机制获取面部微表情关键区域,通过Transformer网络实现特征提取与分类,从而识别人脸微表情。该方法在数据获取与预处理阶段缺乏足够的数据扩充手段,难以涵盖所有微表情皮沟变化,遇到未见过的微表情时,因缺乏对其他关键区域模式的学习,可能会使识别率降低。为此,本文提出一种基于生成对抗网络的人脸微表情皮沟识别方法。

1 人脸图像光照补偿

在人脸微表情皮沟精准识别的过程中,光照条件起着决定性的作用。当人脸图像处于光照不均匀或光照不足的环境下时,会导致图像中的微表情皮沟细节难以被清晰捕捉和识别。这种情况下,就需要对人脸图像进行光照补偿,以提高

1. 广东茂名幼儿师范专科学校 广东茂名 525000

[基金项目] 广东省教育厅2023年度普通高校特色创新项目“基于深度学习的人脸表情识别教学评价反馈系统研究”(2023KTSCX383)

图像的亮度和对比度,使微表情皮沟细节更加突出,从而提高识别的准确性。灰度伸缩是一种简单而有效的图像增强技术,能够通过调整图像的灰度值来改善图像的视觉效果。为此,本文采用灰度伸缩法对人脸图像进行光照补偿。通过线性拉伸图像的灰度值,使原本因光照不足而显得暗淡的细节变得清晰,从而达到增强对比度的目的,使微表情皮沟细节更加突出^[3]。

在实际操作中,首先分别求出图像中的最小像素值和最大像素值,将这两个值作为灰度拉伸的基准。基于这两个基准值,通过线性拉伸的方式确定拉伸后的最小灰度值 NewMin 和最大灰度值 NewMax。利用这两个新的灰度值确定灰度横向伸缩参数 a 和纵向伸缩参数 b ,其公式为:

$$\begin{cases} a = \frac{(N_{\max} - N_{\min})}{(\max - \min)} \\ b = N - a \cdot \min \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 表示人脸图像灰度横向伸缩的参数; $N_{\max}$ 表示拉伸后的人脸图像最大灰度值; $N_{\min}$ 表示拉伸后的人脸图像最小灰度值; $\max$ 表示人脸图像最大灰度值; $\min$ 表示人脸图像最小灰度值; b 表示人脸图像灰度纵向伸缩参数; N 表示拉伸后的人脸图像平均灰度值^[4]。基于上述公式所定义的灰度横向拉伸与纵向拉伸参数,对人脸图像中的每一个像素值实施灰度拉伸处理,其公式为:

$$P = a \times F + b \quad (2)$$

式中: P 表示经过转换处理后所获得的人脸图像的像素值; F 表示原始人脸图像像素值。

通过上述对人脸图像的拉伸处理,可将原本处于 $[N_{\min}, N_{\max}]$ 范围内的像素值重新映射到 $[0, 255]$ 灰度值区间内,以此增强人脸图像的对比度,使人脸图像中的微表情皮沟细节更加突出^[5]。然而,当原始图像中存在噪声时,灰度拉伸会给图像质量带来一定的不良影响。原本微弱的噪声信号会被放大,并且延伸到较高的灰度值区域,致使噪声在图像中变得更为明显。因此,在进行灰度拉伸操作时,需要考虑原始图像的质量状况,同时采取降噪措施,以确保最终人脸图像的清晰度和准确性。

2 人脸区域二值化

在实际应用中,人脸图像往往拍摄于各种复杂背景下,如室内、室外、不同光照条件以及存在干扰物等环境。尽管已经进行了光照补偿,但某些区域仍然存在光照不均匀的情况,导致图像中的亮度差异显著。这种差异可能使人脸与背景的区别变得困难,进而影响微表情皮沟识别的准确性。为克服这一问题,本文提出采用形态学运算(包括腐蚀和膨胀)方法对光照补偿后的人脸图像进行二值化处理,以有效提取

人脸区域并去除背景,为后续微表情皮沟识别提供清晰的前景人脸图像。

在形态学运算中,腐蚀操作被用于消除光照补偿后的图像 P 中的小物体、断开物体间的连接,或使物体边界向内收缩。腐蚀操作的数学表达式为:

$$A_p \odot B_p = \{z | (B_p)_z \subseteq A_p\} \quad (3)$$

式中: A_p 表示用于人脸图像 P 腐蚀操作的结构元; B_p 表示人脸图像 P 被腐蚀集合; z 表示人脸图像 P 腐蚀结构元平移距离^[6]。对光照补偿、腐蚀操作后的人脸图像进行膨胀运算,以扩大图像中的物体、填充物体内部的空洞,或使物体边界向外扩展。膨胀操作的数学表达式为:

$$A_p \oplus B_p = \{z | (\overline{B_p})_z \cap A_p \neq \emptyset\} \quad (4)$$

式中: $\overline{B_p}$ 表示结构元在原点处反转后的集合; $\emptyset$ 表示空集^[7]。

通过上述步骤,光照补偿后的人脸图像中的背景区域被转变为黑色,而人脸区域则被转变为白色,为后续微表情皮沟识别提供了清晰的前景人脸图像基础。

3 基于生成对抗网络的微表情皮沟识别

为解决小规模数据集下人脸微表情皮沟识别难题,本文引入生成对抗网络(GANs)进行数据增强。通过所设计的深度生成器架构生成与真实样本相似的虚假人脸图像数据。将增强后的二值化人脸图像数据输入卷积神经网络,经卷积和池化操作有效提取微表情皮沟特征,计算特征属于各微表情皮沟类别的概率,基于该计算结果实现人脸微表情皮沟识别。

3.1 基于生成对抗网络的数据增强

人脸微表情皮沟识别的数据集规模有限,会导致模型训练过程中容易出现过拟合现象,即模型在训练数据上表现出色,但在面对未见数据时性能却大幅下降。为应对这一问题,需扩大数据集规模以增强模型的泛化能力,直接收集更多真实的人脸微表情皮沟数据不仅耗时而且费力。因此,本文提出采用GANs(生成对抗网络)进行数据增强。将经过二值化处理的人脸图像作为条件信息输入到生成对抗网络的生成器中。该生成器通过构建中等深度的生成器架构,并采用两层双向长短期记忆网络(BiLSTM)生成与真实样本极为相似的虚假人脸图像数据^[8],其生成的数据能够模拟出更多样化的微表情皮沟特征,从而有效增加人脸图像样本的数量。

在实际应用中,生成对抗网络的生成器采用中等深度的架构设计,并融合两层双向长短期记忆网络(BiLSTM),每层含有64个隐藏单元,其后连接一个全连接层。为提升网络的非线性表达能力,选择LeakyReLU作为激活函数。除了随机噪声向量作为输入外,生成器还接收二值化处理后的

脸图像作为条件信息，这些条件信息能够帮助生成器生成与真实样本高度相似的虚假人脸图像。通过生成器的学习过程，随机噪声向量和二值化图像条件信息被共同映射到所需的人脸图像数据空间中。最终输出与真实样本高度相似的虚假人脸图像，其公式为：

$$G(Z, E) \rightarrow X(E) \quad (5)$$

式中： $G(Z, E)$ 表示由生成器所产生的人脸样本的分布情况； Z 表示随机噪声向量； E 表示输入生成器的二值化后的人脸图像样本； X 表示激活函数^[9]。将生成的人脸图像输入到判别器中。鉴于原始人脸图像数据集规模较小，为了避免判别器因结构过于复杂而引发过拟合，采用了结构相对简单的判别器，即一层包含100个隐藏单元的双向长短期记忆网络（BiLSTM）。判别器通过计算生成图像与真实图像之间的Wasserstein距离来评估两者之间的差距，该距离的计算公式为：

$$H = \frac{1}{K} \sup [G(Z, E) - X\epsilon]^{\frac{1}{2\epsilon}} \quad (6)$$

式中： H 表示判别器输出的向量，即生成图像与真实图像的Wasserstein距离； K 表示判别系数； ϵ 表示判别损失； ζ 表示Wasserstein函数^[10]。在判别器中，设定一个阈值，如果计算出的 H 小于该阈值，说明生成器生成的图像质量不高，与真实样本差距较大，此时将结果反馈给生成器，利用式（5）继续生成新的图像。如果计算出的 H 大于阈值，则判别器无法准确区分输入的人脸图像是生成的还是真实的，这些高质量的生成图像将被用于后续的人脸微表情皮沟特征提取和识别任务中。通过这一反复迭代的过程，能够生成足够数量且质量较高的人脸图像样本，以克服原始数据集规模有限导致的过拟合问题，这有助于后续卷积神经网络（CNN）学习到更丰富的特征表示，提高模型的泛化能力。

3.2 基于卷积神经网络的特征提取与分类识别

人脸微表情皮沟识别任务要求对人脸图像中的局部信息进行精确捕捉与识别。卷积神经网络（CNN）凭借其独特的卷积层设计，能够高效地从原始图像中抽取多层次的特征信息。这一特性恰好满足人脸微表情皮沟识别的需求，因为这类识别往往涉及从低级的边缘、纹理特征到高级的眼睛、嘴巴等面部部位细微变化的多层次特征分析。将足够数量且质量较高的人脸图像样本输入到卷积神经网络中，CNN通过应用反向传播算法，能够自动地学习并提取图像中的特征表示，精确地捕捉到人脸不同区域的特征，从而实现人脸微表情皮沟的准确识别。

由于每种微表情都对应着特定的人脸皮沟位置和形态变化，因此在卷积神经网络（CNN）中，设定一个人脸微表情

皮沟集合为 $D\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 。该集合涵盖了各种微表情所对应的皮沟特征，其中，用 d_m 表示第 m 种微表情的皮沟特征。将数据增强后的人脸图像样本集输入到卷积神经网络卷积层中。卷积核通过卷积核（也称为滤波器）在输入图像上滑动，计算卷积核与图像局部区域的点积，从而提取出人脸微表情皮沟的特征向量。这个特征向量可以表示为：

$$f = X[WH(x) - h] \quad (7)$$

式中： f 表示卷积层提取的人脸微表情皮沟特征； W 表示卷积层权重矩阵； h 表示偏置项。

通过多层卷积操作，可以提取出多个特征向量，将这些特征向量输入到池化层中。池化层通过最大池化操作（即在一个局部区域内选择最大值作为输出值）来降低特征图的维度，同时保留重要信息。由此可得到一个池化后的特征图，并将其输入到输出层（或全连接层）中。在输出层中，根据池化操作后的微表情皮沟特征图与模型资源库中存储的参考特征进行对比，计算输入人脸图像微表情皮沟属于第 m 种微表情皮沟的概率，其公式为：

$$p(d_m) = X[Wf - h]^p \quad (8)$$

式中： $p(d_m)$ 表示输入的人脸图像微表情皮沟特征属于第 m 种微表情皮沟类别的概率。将输入样本分类到概率最高的微表情皮沟类别中，以此实现人脸微表情皮沟识别。

4 实验论证

4.1 实验数据集

为了验证本文提出的基于生成对抗网络的人脸微表情皮沟识别方法的有效性和适用性，开展以下对比实验，以凸显本文方法的优势，并为该研究提供参考性和学术性价值。在实验中，将文献[1]提出的基于深度学习的识别方法、文献[2]提出的基于盒注意力机制和Transformer的识别方法设置为对照组，分别用对照组1、对照组2表述。实验所用的人脸图像数据来源于某人脸图像网站，数据集共包含10 000张高清人脸图像，分辨率为1 024 px×1 024 px，数据集在表情、皮沟等方面具有多样性。人脸图像数据集示例部分样本和皮沟检测结果如图1所示。

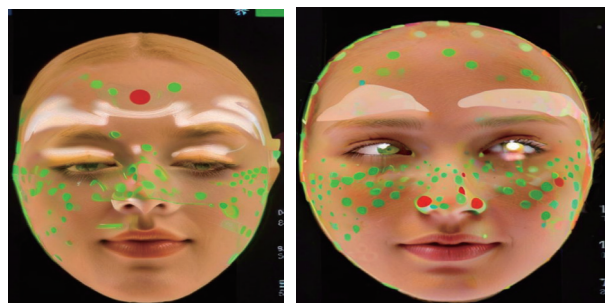


图1 人脸图像数据集示例样本与皮沟检测

4.2 实验设置及指标

在实验设置方面,采用了 Windows XP 操作系统,并使用 Python 1.6.2 版本编辑生成对抗网络和卷积神经网络模型。实验过程中,利用式(1)(2)(3)(4)对人脸图像样本进行光照补偿和二值化处理。实验过程中,生成对抗网络和卷积神经网络的参数设置如表1所示。

表1 实验参数表

生成对抗网络		卷积神经网络	
批次大小	100	卷积核数量	64
训练轮数	1 000	卷积核大小	32×32
学习率	0.05	池化窗口	6×6

将测试样本输入到生成对抗网络中进行数据增强,生成 50 000 张足够数量的人脸图像样本。将图像输入到卷积神经网络中进行人脸微表情皮沟识别。实验选择识别率作为评价指标,识别率=正确识别样本数量/总识别样本数量。识别率越高,说明识别精度越高,方法的性能越好。

4.3 实验结果与讨论

实验设置 4 组,每组实验抽取 2 000 张图像识别结果,图2统计了 3 种方法在人脸微表情皮沟识别场景中的识别率。

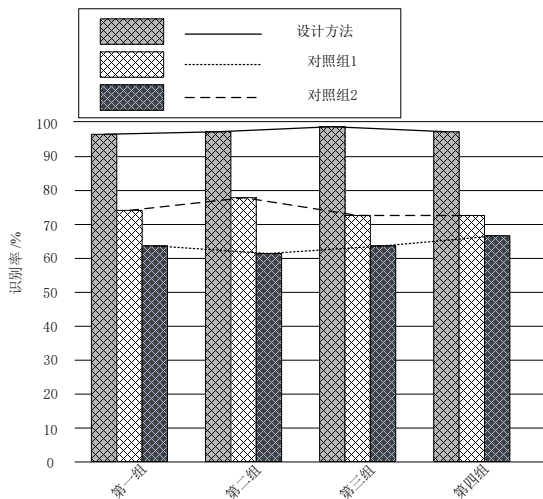


图2 三种方法人脸微表情皮沟识别率对比

分析图2给出的实验结果可知,在人脸微表情皮沟识别场景中,本文方法的识别率最高,达到了95%以上。相比之下,对照组的识别率较低,其中对照组2的识别率与本文方法相差将近35%。这一结果证明本文方法更适用于人脸微表情皮沟识别,具有良好的可行性和可靠性。本文方法借助 GANs 生成虚假人脸图像数据,这一操作不但扩充了数据集的规模,而且增加了数据的多样性,从而使模型能够学习到更多微表情皮沟的特征,对于提高模型在处理未曾见过的微表情时的泛化能力极为关键,使得本文方法在人脸微表情皮沟识别任务中表现优异。

5 结语

本文提出的一种基于生成对抗网络(GANs)的人脸微表情皮沟识别方法,该方法为识别人脸微表情中细微纹理变化的捕捉与分析提供了新途径。GANs 具备卓越的生成与判别能力,可生成优质微表情皮沟图像,在此基础上,结合卷积神经网络(CNN)能够高效提取其中关键特征以精准识别微表情。这一研究推动人脸微表情识别技术发展,为心理学、人机交互和安全监控等领域赋予新的研究视角与工具。虽然已取得初步成果,但本领域仍充满挑战与未知。后续研究将进一步挖掘 GANs 在微表情皮沟识别的潜力,优化模型结构提升识别精度,拓展实际应用场景与范围。

参考文献:

- [1] 熊昊晗,仲鹏飞,钱易,等.基于深度学习的人脸微表情识别及分析研究[J].电脑编程技巧与维护,2024(10):125-127.
- [2] 唐梦瑶,黄江涛.基于盒注意力机制和 Transformer 的人脸微表情识别方法[J].人工智能科学与工程,2023(9):57-67.
- [3] 李昆仑,彭小华,熊婷.基于支持向量机的动态人脸图像微表情识别[J].计算机仿真,2023,40(12):331-336.
- [4] 黄兴禄,苟小珊,陈希.基于混合特征与信息熵的人脸微表情识别算法[J].计算机仿真,2023,40(6):197-201.
- [5] 叶天祺,曾张帆.基于持续时空注意力网络的人脸微表情识别[J].南昌大学学报(理科版),2023,47(1):95-102.
- [6] 蔡臻,李锋,魏楚强.无人驾驶中基于 ResNet 深度模型的人脸微表情识别算法[J].微处理机,2023,44(1):36-39.
- [7] 徐胜超,叶力洪.基于多方向特征融合的动态人脸微表情识别方法[J].计算机与数字工程,2022,50(8):1818-1822.
- [8] 朱原雨润,王艳霞,张领,等.基于关键面纹理特征提取的自动人脸微表情识别[J].电脑知识与技术,2022,18(18):67-70.
- [9] 张爱民.基于优化卷积神经网络的人脸图片微表情识别方法研究[J].内蒙古民族大学学报(自然科学版),2022,37(1):37-42.
- [10] 方明,陈文强.结合残差网络及目标掩膜的人脸微表情识别[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(1):303-313.

【作者简介】

王长清(1981—),男,河南信阳人,硕士研究生,副教授,研究方向:人工智能及大数据应用。

(收稿日期:2024-11-14)

一种基于网络配置文件的光纤通道网络时延特性模拟方法

王萌¹ 李雯¹ 张潘頔¹

WANG Meng LI Wen ZHANG Pandi

摘要

现代航空电子系统对机载网络的可靠性和性能要求日益提高, 光纤通道 (fibre channe, FC) 网络因其高带宽、低延迟的特性成为关键技术。然而, 随着系统复杂性的增加, FC 网络的拓扑结构和数据交互关系变得愈发复杂, 对其时延特性进行准确模拟和分析显得尤为重要。基于此, 文章提出了一种基于网络配置文件 FC 网络时延特性模拟方法, 通过自动化提取 XML 格式网络配置文件中的关键参数 (如端口速率、交换机延迟、链路延迟等), 构建时延模型, 利用仿真技术进行时延特性分析。实验结果表明, 该方法能够有效地模拟不同配置和负载条件下的 FC 网络时延特性, 为优化网络配置、提升系统性能提供了可靠依据, 并为未来 FC 网络的设计和优化提供了重要参考。

关键词

光纤通道网络; 时延特性; 网络仿真; 网络配置文件; 航空电子系统

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.025

0 引言

现代航空电子系统中, 机载网络的可靠性和性能至关重要^[1]。光纤通道 (fibre channel, FC) 网络作为高带宽、低延迟的技术, 广泛应用于机载系统中, 以满足数据传输需求^[2]。FC 网络通常采用星型拓扑, 通过光纤连接交换机与节点机, 实现高效传输。根据数据优先级, FC 网络提供 1 Gbit/s 及以上的传输速率, 保障系统实时性和可靠性。随着功能扩展和设备交联增加, FC 网络拓扑与数据交互愈加复杂, 准确模拟其时延特性对优化配置和提升系统性能至关重要^[3]。网络仿真利用数学建模和统计分析来模拟网络行为, 通过建立设备和链路的统计模型, 模拟流量传输, 以获取网络设计和优化所需的性能数据^[4]。该方法可在实际部署前分析网络性能, 避免高成本的实物测试, 尤其适用于复杂的 FC 网络环境^[5-7]。

随着现代航空电子系统功能的扩展, FC 网络的拓扑结构和数据交互变得更加复杂。在此背景下, FC 网络特性模拟需重点关注以下方面:

- (1) 节点机数据收发特性: 包括数据的发送、接收及优先级处理。
- (2) 网络交互数据特性: 包括数据包的传输路径、延迟和带宽占用。
- (3) 交换机转发特性: 包括数据包在交换机中的转发延迟及处理机制。

大规模 FC 网络模拟需大量共享数据信息输入, 传统方法工作量大且易出错, 影响了模拟效率和准确性。当前 FC 网络时延特性研究集中在三方面:

- (1) 通过仿真模型分析不同配置和负载下的时延特性, 但难以自动适应多变的网络环境^[8]。
- (2) 从网络配置中提取关键参数进行时延分析, 但方法多为单一, 难以全面反映复杂环境^[9]。
- (3) 通过优化交换机配置、端口速率和路由算法来降低时延, 然而优化策略依赖特定环境, 缺乏通用性^[10]。

为解决上述问题, 本文提出了一种基于配置文件 FC 网络时延特性模拟方法。该方法通过自动化解析网络配置文件, 提取端口速率、交换机和链路延迟等关键参数, 构建时延模型, 并利用仿真技术模拟 FC 网络的时延特性。本文的主要贡献包括:

- (1) 自动化参数提取方法;
- (2) 基于关键参数的全面时延模型;
- (3) 通过仿真实验验证方法的有效性, 并分析不同配置对时延的影响。

实验结果表明, 该方法有效模拟了 FC 网络的时延特性, 为网络优化提供了重要参考。

1 FC 网络仿真技术原理

1.1 网络仿真技术原理

网络仿真技术通过建立网络设备 (如路由器、交换机、服务器) 和链路的数学模型, 模拟数据包传输过程, 以反映设备行为和协议运行机制。通过调整模型参数, 仿真可模拟

1. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所
陕西西安 710000

不同的拓扑结构、流量模式和负载条件,从而全面分析网络性能^[11]。FC网络通常采用星型拓扑,由交换机和节点机组成。仿真中需为每个设备建立精确模型,交换机模型包括端口数、端口速率、转发机制等;节点机模型描述其数据收发特性,这些模型共同构成FC网络的虚拟拓扑。如图1所示。

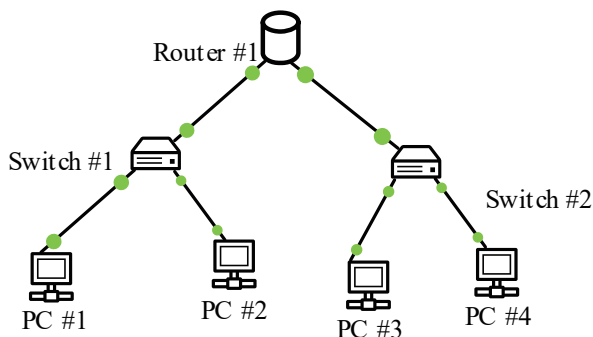


图1 FC网络星型拓扑结构

解析网络配置文件可以自动生成上述模型,配置文件中包含设备连接关系、端口状态、链路特性等关键信息,显著降低手动建模工作量,并确保仿真环境与实际网络高度一致。在网络运行中,数据包在设备间传输并经历以下仿真阶段:

- (1) 数据包生成:节点机按配置文件中的规则生成数据包,并为其分配时间戳;
- (2) 交换机转发:交换机根据优先级处理数据包,计算其输入、转发和输出时延;
- (3) 数据包接收:目标节点机接收数据包,记录到达时间以计算端到端延迟。

这些过程通过事件驱动机制实现,每个事件(生成、转发、接收)均由仿真引擎按特定时间触发并处理。

1.2 XML格式数据

(extensible markup language, XML)是一种用于表示结构化信息的标记语言。被设计为具有良好的人类可读性,同时也可以由机器轻松解析。XML的主要用途包括数据交换、配置文件、文档存储等^[12]。XML文档的基本结构包括声明、元素和属性。总之,XML是一种强大且灵活的标记语言,广泛用于数据存储和交换。了解和掌握XML的基本概念和用法对于处理结构化数据非常有帮助。图2是一个典型的FC网络配置XML文件示例,展示了一个简单的FC网络配置:一个交换机(SW1)与两个节点机(Node1、Node2)的连接关系及其端口配置。此外,还定义了节点机发送消息的优先级、大小及发送间隔。

XML在FC网络仿真中起到了关键的数据载体作用,通过其灵活的结构和可扩展性,将复杂的网络拓扑、设备配置及流量模型以直观的层级形式进行描述。仿真工具通过解析XML文件,可以自动生成网络设备模型、定义流量特性,并

校验网络配置的正确性,从而为时延特性分析提供精准的数据支撑。XML在FC网络仿真中的应用具有以下优势:

首先,其结构清晰,能够有效管理复杂的网络配置;其次,具有良好的可扩展性,可以轻松适应不同的网络需求;最后,作为一种标准化的数据格式,XML便于与各种仿真工具和分析平台高效集成,从而提高仿真工作的自动化程度和可靠性。

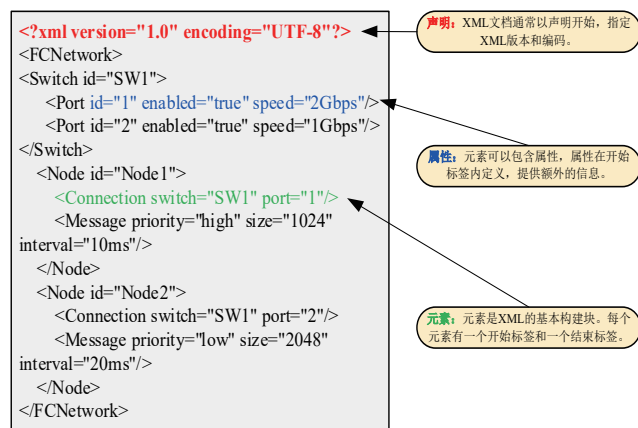


图2 典型的FC网络配置XML文件示例

2 基于配置文件的FC网络时延模拟方法

鉴于此,本文提出一种基于网络配置文件的FC网络时延特性模拟方法,对可扩展标记语言(extensible markup language, XML)格式的FC网络配置文件中FC网络节点机和FC网络交换机的连接关系信息开展正确性校验,对FC网络配置文件进行数据分析和信息提取,建立FC网络节点机和交换机列表,通过对网络数据发送、转发和接收的传输过程进行模拟,实现FC网络特性模拟以及FC网络应用层、链路层端到端时延等的评估。可有效减少手动输入网络设备特性、网络拓扑架构、消息特性等信息的工作量,提高输入文件一致性和正确性,极大地提升了FC网络时延特性模拟的效率。

第一阶段:外部导入和正确性检查。首先支持外部导入XML格式的FC网络配置文件,并对节点机和交换机的关联关系进行正确性检查。具体步骤如下:

步骤1:导入FC网络配置文件。

步骤2:验证连接节点机的交换机对应端口是否在FC交换机中进行端口使能,若有未使能情况,进行报错并提示错误原因。

步骤3:验证需要级联的交换机之间级联端口设置是否正确,不正确则进行报错并提示错误原因。

第二阶段:数据分析与信息提取。具体步骤如下:

步骤1:遍历FC网络配置文件,提取FC节点机信息,建立FC网络节点机列表。

步骤 2：建立节点机发送机制，模拟数据源根据发送消息列表的属性产生仿真消息的发送时间和消息内容；在仿真消息产生时标识仿真消息产生时间戳 MsgGentime ，并将该消息放入对应分区的发送消息队列中；节点按照发送消息的优先级从每个分区读取仿真消息并进行发送，当仿真消息完成发送时，标识该仿真消息发送时间戳 MsgTxtime 。

步骤 3：建立节点机接收机制，仿真消息到达节点后，标识仿真消息到达时间戳 MsgArvtime ，节点按照数据的目的应用 ID，将该消息放在对应分区的接收缓冲区中，并从分区中接收数据，标识仿真消息接收时间戳 MsgRxtime 。

第三阶段：交换机模拟。具体步骤如下：

步骤 1：遍历 FC 网络配置文件，提取 FC 交换机信息，建立 FC 网络交换机列表。

步骤 2：建立交换机转发机制，模拟数据到达交换机物理端口时，标记仿真消息在交换机的到达时间戳 SWInporttime ，判断该消息是单播还是组播消息，进行相应的转发模拟，并将仿真消息存放在对应输出端口的输出队列中。

步骤 3：建立交换机输出机制，交换机每个端口按照仿真消息的优先级从对应输出队列中读取仿真消息并进行输出，标记仿真消息在交换机的输出时间戳 SWOutporttime ，依次轮询交换机全部使能端口读取仿真消息并进行输出。

第四阶段：延迟计算。具体步骤如下：

步骤 1：计算消息应用层端到端的延迟，公式为 $\text{MsgAppEtEDelay} = \text{仿真消息接收时间戳} - \text{仿真消息产生时间戳} \text{MsgGentime}$ 。

步骤 2：计算消息物理链路端到端的延迟，公式为 $\text{MsgLinkEtEDelay} = \text{仿真消息到达时间戳} \text{MsgArvtime} - \text{仿真消息发送时间戳} \text{MsgTxtime}$ 。

步骤 3：计算消息在交换机的延迟，公式为 $\text{MsgSwDelay} = \text{仿真消息在交换机的输出时间戳} \text{SWOutporttime} - \text{仿真消息在交换机的到达时间戳} \text{SWInporttime}$ 。

通过上述技术方案，本文实现了 FC 网络特性模拟和评估，减少了手动输入网络设备特性、网络拓扑架构、消息特性等信息的工作量，提高了输入文件的一致性和正确性，极大提升了 FC 网络时延特性模拟的效率和准确性。

3 仿真结果分析

为了评估本文提出的方法在不同网络配置和负载条件下的性能，本节通过多组仿真实验对 FC 网络的时延特性进行了详细分析。实验采用真实的 FC 网络配置文件作为输入，模拟了节点机数量、端口速率、链路延迟、数据包大小和负

载条件等变量对网络时延的影响。

表 1 展示了节点机的相关属性及其配置，实验设置了不同数量的节点机（10、20、30、40），以评估节点机数量对网络时延的影响。

实验通过模拟不同网络配置和负载条件下的 FC 网络运行情况，评估网络时延特性，并分析不同因素对时延的影响。这些仿真实验在一个基于 Python 的网络仿真平台上进行，使用真实的 FC 网络配置文件作为输入。实验采用星型拓扑结构，包括一个 FC 交换机和多个 FC 节点机。节点机数量分别设置为 10、20、30 和 40，以评估节点机数量对网络时延的影响。FC 网络端口速率设置为 1、2、4 Gbit/s，以模拟不同带宽条件下的网络性能。链路延迟设置为 0.1、0.5、1 ms，反映不同物理链路条件下的延迟特性。数据包大小设置为 512、1 024、2 048 Byte，以评估数据包大小对时延的影响。采用泊松分布模型生成仿真消息，设置不同的消息成功到达率（10、20、50 条/s），模拟不同负载条件下的网络性能。

表 1 FC 网络节点列表

序号	标识	内容
第 1 个节点机列表		
节点机属性列表		
1	NodeName	节点机名称
2	LocalPortID	本地 PortID
分区列表		
3	PartID	分区 ID
4	PartName	分区名称
发送消息列表		
5	MsgID	消息号
6	MsgLength	消息长度
7	Priority	消息优先级
8	ServiceType	服务类型
9	SrcAppID	源应用 ID：本节点的本地 PortID
10	DstAppID	目的应用 ID：该消息目的分区所在节点机的 LocalPortID
接收消息列表		
11	MsgID	消息号
12	MsgLength	消息长度
13	Priority	消息优先级
14	ServiceType	服务类型
15	SrcAppID	源应用 ID：该消息源分区所在节点机的本地 PortID
16	DstAppID	目的应用 ID：本节点的本地 PortID
...		
第 N 个节点机列表		

表 2 展示了不同端口速率对网络时延的影响，是实验中得到的完整数据结果。在节点机数量为 20、链路延迟 0.1 ms、

数据包大小 512 Byte 的条件下, 端口速率从 1 Gbit/s 提升至 4 Gbit/s 时, 平均时延从 4.2 ms 降至 2.0 ms。这表明, 提高端口速率能够显著降低传输时延, 提升网络性能。

实验结果表明, 节点机数量、端口速率、链路延迟、数据包大小和负载条件均显著影响 FC 网络的时延特性。具体而言, 随着节点机数量的增加, 平均时延显著上升; 提高端口速率能显著降低时延, 1、2、4 Gbit/s 端口速率下的平均时延分别为 4.2、3.1、2.0 ms; 链路延迟增加直接导致总时延增加, 从 0.1 ms 增加到 1 ms 时, 总时延从 3.5 ms 增至 8.5 ms; 数据包大小越大, 时延略有增加, 512、1 024、2 048 Byte 的数据包对应的时延分别为 3.0、3.5、4.0 ms; 负载越高, 时延越大, 消息成功到达率在 10 条/s 增加到 50 条/s 时, 时延从 2.8 ms 增至 5.6 ms。这些结果验证了本文方法的有效性和准确性, 为 FC 网络的设计和优化提供了重要依据。

表 2 不同端口速率对网络时延的影响

节点数量	端口速率/(Gbit·s ⁻¹)	链路延迟/ms	数据包/Byte	消息成功到达率/(条·s ⁻¹)	平均时延/ms
10	1	0.1	512	10	2.5
10	1	0.1	512	20	3.0
10	1	0.1	512	50	4.2
20	1	0.1	512	10	3.5
20	1	0.1	512	20	4.2
20	1	0.1	512	50	5.6
30	1	0.1	512	10	4.8
30	1	0.1	512	20	5.8
30	1	0.1	512	50	6.8
40	1	0.1	512	10	6.2
40	1	0.1	512	20	7.5
40	1	0.1	512	50	8.5
20	2	0.1	512	10	3.1
20	2	0.1	512	20	3.8
20	2	0.1	512	50	4.5
20	4	0.1	512	10	2.0
20	4	0.1	512	20	2.5
20	1	0.5	512	10	5.5

4 结语

本文提出了一种基于网络配置文件的 FC 网络时延特性模拟方法, 旨在应对现代航空电子系统中复杂 FC 网络的时延分析需求。通过自动化地收集和解析网络配置文件, 提取关键网络参数并构建时延模型, 实现了对 FC 网络的高效模拟和分析。实验结果验证了本文方法的有效性和准

确性, 为 FC 网络的设计和优化提供了重要的理论和实践依据。未来的研究可以进一步优化仿真模型, 考虑更多实际应用中的复杂因素, 如动态网络拓扑变化和不同类型的网络流量, 以进一步提升 FC 网络时延特性分析的精确度和适用性。

参考文献:

[1] 梁益丰, 许江宁, 吴苗, 等. 光纤时频同步技术的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 45-58.

[2] 郭俊成, 卢麟, 吴传信, 等. 基于时频共传的光纤链路时延测量方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(9): 66-72.

[3] 胡仕川. 新工科背景下计算机网络安全课程教学发展路径 [J]. 网络安全技术与应用, 2023(11): 93-95.

[4] 吴勇文. CPU/GPU 异构集群并行计算模型研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2012.

[5] 苗乾坤. 面向共享存储系统的计算模型及性能优化 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.

[6] 王蒙. 低延时高新鲜度数字传输的跨层设计研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.

[7] 吕恒伟, 李攀东, 张海剑, 等. 多小区 5G 认知无线网络能量有效资源优化 [J]. 信号处理, 2018, 34(12): 1440-1449.

[8] 陈丁, 许江宁, 李振中, 等. 光纤双向比对时间同步技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 57-65.

[9] 高源. 面向大数据处理的并行计算模型及性能优化 [J]. 计算机产品与流通, 2020(3): 105.

[10] 陈强, 刘彩霞, 李凌书. 基于改进式贪婪算法的 5G 网络切片动态资源调度策略 [J]. 网络与信息安全学报, 2018, 4(7): 60-68.

[11] 杨文哲, 杨宏雷, 赵环, 等. 光纤时频传递技术进展 [J]. 时间频率学报, 2019, 42(3): 214-223.

[12] 王志勤, 徐菲. 关于 5G 组网技术路线的分析与建议 [J]. 电信科学, 2019, 35(7): 3-7.

【作者简介】

王萌 (1994—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 航空机载网络 AFDX 的测试验证。

李雯 (1982—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 航空机载网络 AFDX、无线网络的研发、测试和仿真。

张潘頔 (1995—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 无损以太网络的测试验证。

(收稿日期: 2024-11-11)

基于禁忌搜索算法的实验室局域网数据安全交换方法

赵 云¹
ZHAO Yun

摘 要

实验室局域网为提高可靠性大多采用网状拓扑结构,这意味着设备之间存在多条连接链路。在这种情况下,数据交换的路径选择变得更加复杂。现有数据安全交换方法在面临多种路径选择的情况下,会陷入局部最优解。对此,文章引入禁忌搜索算法,开展实验室局域网数据安全交换方法研究。首先,通过强度指标与粒度数据的计算实现实验室局域网数据特征提取;然后,采用数据安全加密机制,有效防止了数据泄露和非法访问;最后,在此基础上引入禁忌搜索算法,通过设定解空间、目标函数、禁忌表等关键要素,来避免算法陷入局部最优解。以选择最优路径实现实验室局域网数据安全交换传输。通过对比实验证明,该方法不仅能够显著提升实验室局域网数据的安全性和传输效率,还能有效避免无谓的数据交换,为实验室数据的安全管理和高效利用提供了有力支持。

关键词

禁忌搜索算法; 局域网; 交换; 数据安全; 实验室

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.026

0 引言

随着信息技术的快速发展,实验室局域网中的数据交换需求日益增加,数据安全成为了一个亟需解决的问题。传统的数据安全交换方法在面对复杂多变的网络环境时,往往存在诸多不足。例如,程子栋^[1]指出,政务信息系统在数据共享开放过程中面临异构系统、权责不清和机制不成熟等问题,导致数据共享缓慢且效率低下。尽管区块链技术在一定程度上可以提高数据共享的安全性和透明度,但在实验室局域网环境中,其复杂的架构和较高的资源消耗限制了其广泛应用。韩路^[2]提出了一种基于改进阻塞判别算法的数据安全交换方法,通过调节局域网数据的传输通道参数和加密参数管理,提高了数据转存率和降低了时延。然而,改进阻塞判别算法虽然提高了数据交换的安全性,但在面对大规模数据交换时,其计算复杂度和资源消耗显著增加,可能导致系统性能下降。高勇等人^[3]提出基于 XML Schema 技术的数据交换方法,文章从身份验证、安全密钥、数据传输、接收以及处理等方面提出基于 XML Schema 的数据安全交换机制。然而,在高并发的数据交换场景下,这些多轮交互会累积大量的延迟,降低整体的数据交换性能。童伟等人^[4]提出基于区块链技术的数据交换方法,通过数据安全沙箱,按照约定的数据计算模型对加密数据进行沙箱内安全计算,并获取数据安全沙箱发送的计算结果,将计算结果发布到区块链,以供数据需求方

通过区块链获取计算结果。然而,区块链的特性之一是数据的分布式存储,每个节点都保存一份完整或部分的账本副本。这意味着数据被多次存储,对于大规模的数据交换,这种冗余存储会占用大量的存储空间。

鉴于上述文献中存在的不足,本文提出了一种基于禁忌搜索算法的数据交换方法。

1 实验室局域网数据特征提取

通过实验室局域网数据特征提取,可以在接收端进行验证,确保接收到的数据与发送的数据在类型、格式和内容上保持一致,从而保证数据的准确性。在实验室局域网环境中,进行数据特征提取时^[5],首先计算强度指标(数据的读写强度)以及粒度数据(数据块的大小)。这些指标对于优化转储策略至关重要,因为能够反应数据的动态变化和存储需求。

强度指标能够揭示数据的读写活动模式,从而帮助识别活跃或静态数据。对于活跃数据,需要更频繁地提取和处理;而对于静态的数据,则可以减少提取频率,以节省资源。则强度指标计算的公式可表示为:

$$I = \frac{R+W}{TG} \quad (1)$$

式中: I 表示强度指标; R 表示读操作次数; W 表示写操作次数; T 表示发送时间。通过合理设置数据块的大小,可以优化数据提取的效率。较小的数据块可能意味着更多的 I/O 操作,而较大的数据块则可以减少 I/O 操作的次数,但可能

1. 苏州信息职业技术学院 江苏吴江 215200

会增加每次操作的延迟。因此,根据实际情况选择合适的数
据块大小。则粒度数据计算公式为:

$$G_d = \frac{D_t}{NI} \quad (2)$$

式中: G_d 表示粒度数据; D_t 表示总数据量; N 表示数据块的数量。

在完成了这两个关键指标的计算后,基于这些信息进行
实验室局域网数据特征提取。这一步骤将充分利用强度指标
和粒度数据所提供的信息,精准地识别出数据中的关键特征,
此过程的数据特征提取遵循公式为:

$$G = e^3 + \sum_{l=1}^{+\infty} \frac{K_{s-l} \times K_l}{K_{s+l} G_d} + \frac{P_l}{IP_s} \quad (3)$$

式中: G 表示最终提取特征数据; K 表示节点阈值取值范
围; s 表示进行转储所需的时间; l 表示分类区域区间特征数
值; P 表示转储的规则指标。将上述公式作为依据,对实验
室局域网数据特征进行提取。从实验室局域网中收集数据,
并提取关键特征。这些特征包括数据的大小、类型、冗余度、
访问频率等。这一步骤是后续处理的基础,掌握了数据的基本
特征。

2 基于禁忌搜索算法的数据安全交换传输

基于上述得到的实验室局域网数据特征,通过一个数据
安全加密机制,综合处理并分析从实验室局域网中收集到的
各类数据特征^[6-7],以有效增强数据加密的严谨性与科学性,
建立安全加密公式:

$$Q = 1 - G \sum_{v=0}^i \frac{L_i^2}{Tv} - \sum_{p=0}^j \frac{T_j^2}{Cp} \quad (4)$$

式中: Q 表示安全加密; L_i 表示不同类型的安全特征; T_j 表
示交换过程中的不同安全相关因素; C 表示相关交换过程特
征参数; v 表示局部数据加密强度值; p 表示处理过滤后的局
域网数据特征^[8]。

在实验室局域网内实现了数据安全加密后,引入禁忌搜
索算法,以实现高性能的局域网数据交换传输^[9-10]。禁忌搜
索算法是一种用于解决组合优化问题的启发式搜索算法,它
通过设定解空间、目标函数、禁忌表和禁忌长度等关键要素,
来避免算法陷入局部最优解。以选择最优路径实现实验室局
域网数据安全交换传输。具体步骤如下:

(1) 解空间与目标函数设定

设组合优化问题的解空间为 S , 目标函数为 $f(x)$, 其
中 $x \in S$ 。目标是找到 $x^* \in S$, 使得 $f(x^*)$ 达到最优。对于解
 $x \in S$, 定义其邻域 $N(x)$ 。邻域是通过当前解 x 进行某种局

部变换得到的一组解^[11-12]。

(2) 禁忌表与禁忌长度设定

设禁忌表为 T , 禁忌长度为 $t_{\max}$ 。禁忌表用于记录最近
访问过的解或者移动操作,以避免算法陷入局部最优解的
循环搜索。当一个解或者移动操作被加入禁忌表后,在接
下来的 $t_{\max}$ 次迭代中,该解或者移动操作将被禁止访问或
执行。

(3) 算法迭代过程

设 x_k 为第 k 次迭代的当前解, x_{k+1} 为下一次迭代的解。
则:

$$x_{k+1} = \arg \min_{x' \in N(x^k)} f(x') Q \quad (5)$$

(4) 限制步长交换传输优化

然而,简单的交换策略可能会忽视数据之间的伪效率
比(即单位重量所带来的价值)差异,导致低伪效率比的
数据被错误地替换掉高伪效率比的数据,进而产生适应度
较低的解。对此,本文提出了一种既简洁又高效的限制步
长交换策略。该策略的核心思想是尽可能地在伪效率比相
近的数据之间进行交换,并设定一个步长限制,以确保交
换的合理性。在数据预处理阶段,已经将所有数据的伪效
率比进行了降序排列。为了促进同一伪效率比水平数据之
间的交换,引入了一个步长参数 L 。只有当两个数据在排
序中的位置相差不超过 L 时,才允许它们进行交换^[13-14]。
设 i 和 j 为两个数据的索引,且 $i < j$, 若 $j - i \leq L$, 则数据
 i 和数据 j 被视为可交换的候选。其中, L 为步长限制参数。
这一过程的表达式为:

$$N(s) = s \oplus S_w(i, j) x_{k+1} \quad (6)$$

式中: $N(s)$ 表示交换结果; s 表示解决方案的编号; $S_w(i, j)$
表示在限制步长范围内交换数据和。通过引入限制步长交
换策略,能够在保持算法简洁性的同时,并减少了无谓交换
的发生。

3 对比实验

3.1 实验环境

为验证本文提出的基于禁忌搜索算法的交换方法在实
际应用中的可行性和有效性,选定一个实验室局域网作为
实验环境和对象,并在该网络环境中实施了数据交换测试。
为确保实验的可对比性,设立两组对照实验:对照 A 组采
用基于区块链的交换方法,对照 B 组则采用基于改进阻塞
判别算法的交换方法。通过对比这 3 种方法的交换结果,
全面检验了其应用性能。实验的具体参数包括:物联网区
域覆盖 $3\,000\text{ km} \times 3\,000\text{ km}$, 整个实验在 15 h 内完成,存

储节点的密度为每平方公里 150 个，每次数据交互的周期为 800 s，最低传输速率设定为 1 024 kbit/s。实验中所涉及的数据局域网拓扑结构如图 1 所示。按照图 1 所示完成对实验环境的建立。

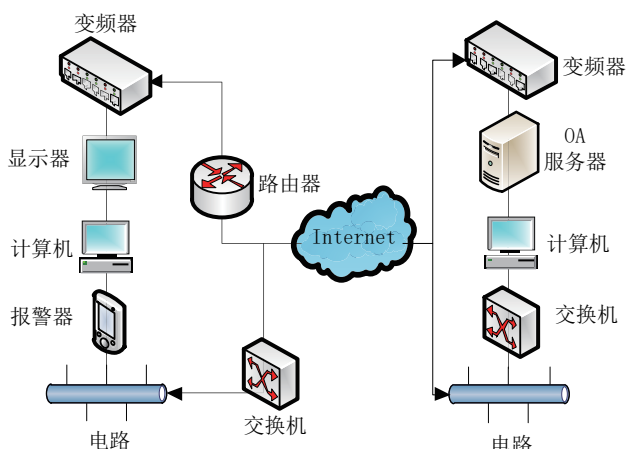


图 1 实验环境拓扑结构图

3.2 实验指标

在该实验环境中，关注并记录在各个不同节点上数据的转存率这一关键指标。转存率作为衡量数据安全交换效率与效果的重要参数，其高低直接反映了数据在传输过程中的完整性和稳定性。

$$R_i = \frac{S_i}{T_i} \times 100\% \quad (7)$$

式中： R_i 表示节点 i 的转存率； S_i 表示成功转存的数据量； T_i 表示转存的总数据量。转存率越高，表示数据安全交换的效果越为理想，数据丢失的风险越小，传输的准确性和可靠性也就越高。

除此之外，为了更加深入地分析 3 种数据安全交换方法在实际应用中的安全性表现，决定进一步记录并比较在不同节点数量下数据的丢包情况。丢包率是衡量数据交换过程中数据丢失程度的重要指标，它直接关系到数据交换的可靠性和完整性。

$$D_i = \frac{L_i}{P_i} \times 100\% \quad (8)$$

式中： D_i 表示节点 i 的丢包率； L_i 表示丢失的数据包数量； P_i 表示传输的总数据包数量。

3.3 实验结果

(1) 数据特征提取

利用上述第 1 小节步骤，进行实验室局域网数据特征提取，结果如图 2 所示。本文方法能够有效区分不同特征，这意味着

数据特征提取方法成功地识别出了数据中的各种关键属性。对后续的数据安全交换传输具有重大意义。

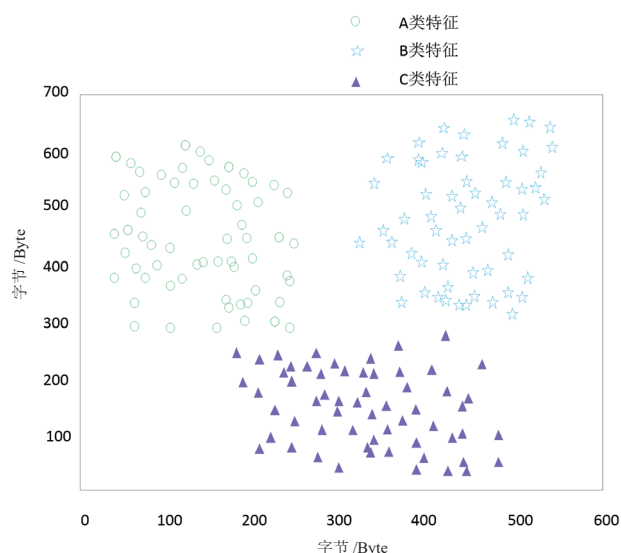


图 2 特征提取效果

(2) 转存率对比

通过转存率实验设计，能够客观地比较基于禁忌搜索算法的交换方法与对照 A 组和对照 B 组在数据安全交换方面的实际表现，从而为选择最适合实验室局域网环境的数据交换策略提供科学依据。将 3 种方法完成交换任务后的转存率绘制成图 3 所示。

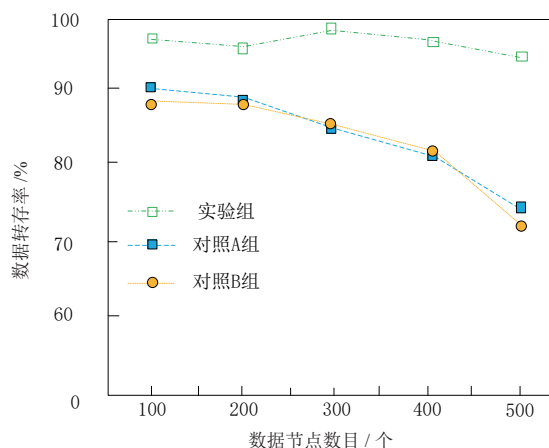


图 3 三种方法交换后转存率对比图

观察图 3 所展示的 3 条曲线，可以清晰地得出以下结论：在实验组所采用的交换方法作用下，数据的转存率始终保持在 90% 以上的高水平。相比之下，对照 A 组和对照 B 组的数据转存率则未能达到这一标准。更为显著的是，随着数据节点数量的不断增多，对照 A 组和对照 B 组的数据转存率呈现出一种明显的下降趋势，而实验组的数据转存率则相对稳定。这一对比结果有力地证明了实验组交换方法在实际应用中的优越性和有效性。

(3) 数据丢包率对比

在实验过程中,将逐步增加网络中的节点数量,以模拟不同规模和复杂度的网络环境。对于每一种数据安全交换方法,将在每个节点数量级别上记录其丢包率,结果如图4所示。

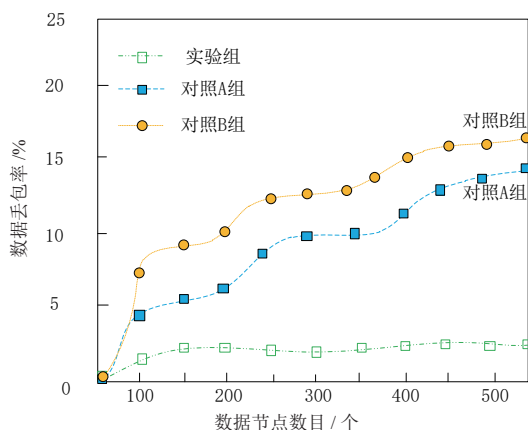


图4 三种方法交换过程中数据丢包率对比图

对比图4中3条曲线,可以观察到随着数据节点数量的增多,3种数据安全交换方法的数据丢包率均呈现出一种递增的趋势。然而,值得注意的是,实验组所采用的方法在数据丢包率方面表现出色,其数据丢包率始终维持在5%以下的较低水平。相比之下,对照A组和对照B组的数据丢包率则相对较高,其中对照A组的数据丢包率超过了10%,而对照B组更是高达15%以上。

这一实验结果有力证明了实验组所采用的基于禁忌搜索算法的交换方法,在数据安全性方面具有显著的优势。即使在节点数量增加、网络负载加重的情况下,该方法依然能够保持较低的数据丢包率,从而确保了数据交换的可靠性和完整性。因此,可以得出结论,基于禁忌搜索算法的交换方法在实际应用中具有更高的可行性和有效性,特别是在对数据安全性要求较高的场景下,其优势更加明显。

4 结语

本文提出的基于禁忌搜索算法的实验室局域网数据安全交换方法,通过引入禁忌搜索算法的智能记忆机制,实现了对数据交换过程的优化。禁忌搜索算法能够灵活应对网络环境的动态变化,实现数据交换策略的快速调整,提高了数据交换的安全性和可靠性。然而,随着网络技术的不断发展,新的安全威胁和攻击手段层出不穷,本文提出的方法需要不断更新和完善,以应对各种新的安全挑战。

参考文献:

[1] 程子栋. 基于区块链的政务信息系统数据安全共享交换研

究[J]. 软件, 2024, 45 (6): 86-88.

[2] 韩路. 基于改进阻塞判别算法的局域网数据安全交换方法[J]. 现代电子技术, 2022, 45 (17): 90-94.

[3] 高勇, 李国强, 李鹏飞. 基于XMLSchema技术的跨网数据安全交换处理机制与研究[J]. 信息通信, 2020(12):181-183.

[4] 童伟, 解欢, 徐丹萍. 基于区块链技术和安全沙箱机制实现数据安全交换的研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35 (8): 185-188.

[5] 郭柯, 师晓敏. 基于区块链的交通数据共享交换模型及经济效益分析[J]. 中国交通信息化, 2024 (4): 90-93.

[6] 李国民, 许继恒, 袁媛, 等. 基于人工智能与物联网设备的市政废物管理数据汇聚与交换研究[J]. 中国设备工程, 2024 (4): 32-34.

[7] 鲁战利, 孙贤雯, 蔡亮, 等. "RPA+移动存储介质"解决政府数据安全跨网交换的方法与实践[J]. 信息安全研究, 2024, 10 (1): 81-87.

[8] 黄瀚. 多模态数据融合处理对数据中心效率提升的影响研究:以浙江省民政数据共享交换中心为例[J]. 办公自动化, 2024, 29 (11): 93-96.

[9] 厉香蕴, 陈春晖. 基础地理信息数据安全交换关键技术及应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45 (12): 88-90.

[10] 陈纯子, 李楠, 王允达. 网闸在气象数据跨网安全交换中的应用测试[J]. 信息系统工程, 2022 (1): 73-76.

[11] 杨芝, 宗欣, 徐晓东, 等. 基于国密算法的跨网数据安全交换技术研究[J]. 中国标准化, 2025(1):41-45.

[12] 郭敬东, 刘文亮, 吴飞, 等. 数字孪生技术下物联网智能终端数据安全交换方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(2): 71-74.

[13] 郁晓庆, 高洁, 姚晓蓉. 基于信创产品的数据安全交换系统研究[J]. 中国新通信, 2025, 27(1):33-35.

[14] 刘娟娟. 大数据背景下高校教育数据开放共享安全体系研究[J]. 计算机应用文摘, 2025, 41(5):188-190.

【作者简介】

赵云(1981—), 男, 江苏句容人, 硕士, 实验师, 研究方向: 计算机科学与技术。

(收稿日期: 2024-11-15)

基于 GCS-YOLOv8n 模型的煤矸石识别方法

王林海¹ 徐善永¹
WANG Linhai XU Shanyong

摘要

针对煤和矸石识别中存在模型参数量大、检测速度慢、精度低等问题，文章提出一种基于 YOLOv8n 轻量化的煤矸石识别方法。通过在检测层增加一个 P6 检测头，可以帮助网络更好地区分目标与背景，减少误检和漏检的情况；使用 GhostConv 可以在减少模型参数的同时，提升模型的检测精度；同时引入 C3Ghost 模块替代原来的特征提取网络中的 C2f 模块，进一步减少计算量和参数数量；在 SPPF 模块后加入 SimAM 注意力机制模块，增强模型学习能力，抑制干扰特征。实验结果表明，文章提出的 GCS-YOLOv8n 模型 mAP@0.5 为 95.1%，与 YOLOv8n 模型相比提高了 1.9%。参数量降低了 10.6%，计算量下降了 38.3%，模型大小被压缩到 5.54 MB，并且该算法的检测速度为 143.1 帧/s。与 YOLOv3-tiny、YOLOv5s、YOLOv7-tiny 等模型对比，具有精度高、参数量少等优点，为后续部署到 Jetson Nano 提供了技术支持。

关键词

YOLOv8；GhostConv；C3Ghost；SimAM 注意力机制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.027

0 引言

煤炭是世界上最重要的能源之一，而原煤中掺杂的矸石占 15~20%，在燃烧过程中矸石会降低其燃烧效率，造成能源浪费，加剧环境的污染^[1]。因此，从煤中分离出煤矸石对资源的高效利用和环境保护具有重要的意义。传统的人工煤矸石分选工作环境恶劣、效率低、重介质法成本高，而且污染环境，射线识别法^[2]可能会损害工作人员的身体健康，而且设备造价高、维护困难。因此，研究一种高效、低资源消耗的煤矸石分选方法具有重要的现实意义。

深度学习算法具有较高的识别率和较强的鲁棒性，在煤矸识别中得到了迅速发展。常见的深度学习的目标识别算法^[3]有两阶段网络 Faster R-CNN^[4]和以 YOLO 系列为代表的单阶段网络，Channappa 等人^[5]提出了一种改进的 Mask R-CNN 方法，通过在 Faster R-CNN 上增加分割层，实现每秒 5 帧的高质量图像分割和对象遮蔽。Li 等人^[6]提出了一种基于深度学习的分层框架，用于煤和矸石的自动检测。方法包括使用高斯金字塔构建多层次数据，设计区域建议网络（CG-RPN）确定候选区域，并用卷积神经网络（CNN）识别目标对象，该方法准确率达到 98.33%。在检测精度、速度和模型尺寸上都有显著提升，满足实时检测需求。这些研究取得了良好的检测效果，然而这些检测方法未考虑在面对实际工业的复

杂环境下得效果。本文提出了一种基于 GCS-YOLOv8n 模型的煤矸石识别方法。首先，收集实际环境下的煤矸石图片构建数据集，用于评估模型性能。再通过以下改进提升模型：在检测层添加 P6 检测头用于小目标检测，用 GhostConv 和 C3Ghost 模块替换标准卷积和 C2f 模块，并加入 SimAM 注意力机制，使模型更轻量化且特征提取更强。

1 改进的 YOLOv8 算法

YOLOv8 模型框架虽然稳定，但在处理光照不均、煤和矸石大量混合等复杂场景时，精度可能不足，且泛化能力较差。改进后的 YOLOv8 算法网络结构如图 1 所示，旨在解决这些问题，提高模型的整体性能。

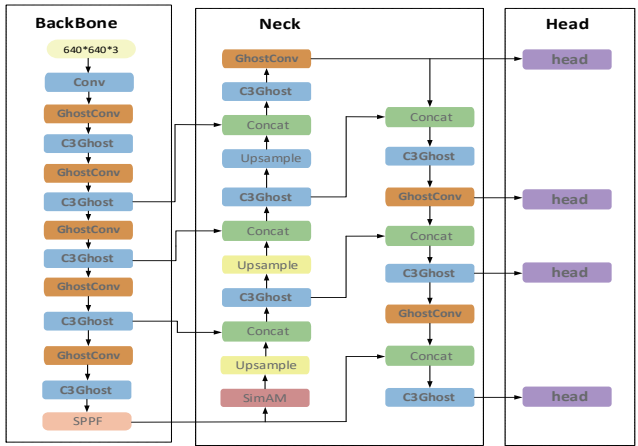


图 1 GCS-YOLOv8n

1. 安徽理工大学电气与信息工程学院 安徽淮南 232001

1.1 GhostConv 模块

GhostNet 是由 Han 等人^[7]提出的轻量级深度神经网络架构。本文用 GhostConv 模块替换了原始网络中的 Conv 模块，GhostConv 通过低成本的线性操作来减少特征冗余，从而降低卷积计算量。GhostConv 先用少量卷积核提取初步特征，然后通过轻量线性变换生成更多特征图。首先生成一半数量的特征图，接着用 5×5 卷积核生成另一半特征图，最后将两部分特征图拼接得到完整输出。此方法既降低了参数量，又提高了检测精度。如图 2 所示。

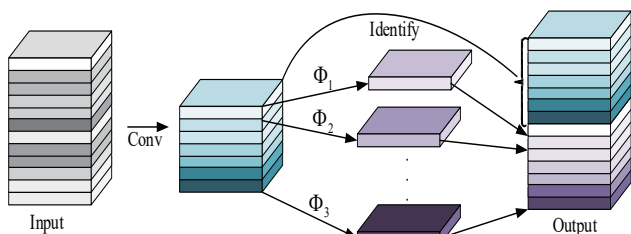


图 2 Ghost 卷积

1.2 C3Ghost 模块

相比于 C2f 模块，C3 模块具有更强的特征提取能力和更好的多尺度适应性。因此，本文用 C3 模块替代 C2f 模块，并在 C3 模块的瓶颈部分加入了 GhostBottleneck，用 Ghost 卷积替换了原网络的 Conv 模块。C3Ghost 模块主要由 3 个标准卷积层和多个 GhostBottleneck 模块组成。GhostBottleneck 模块有两条路径：第一条路径包含两个 Ghost 模块，第一个扩展输入通道数，第二个增加输出通道数。C3Ghost 模块^[8]结合 C3 模块和 GhostBottleneck 模块的优点，使用低成本的线性变换替代部分卷积操作，大幅降低了计算量和参数量，同时保持了强大的特征提取能力，通过跨层的权重共享提升了模型精度和效率，如图 3 所示。

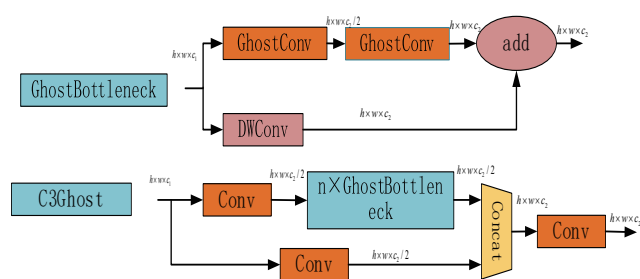


图 3 C3Ghost module

1.3 SimAm 注意力机制模块

在实际监控图像中，由于输煤皮带上的煤和矸石在黑色皮带上传输，实时检测过程中特征检测不够明显，因此改进的模型需要关注图像中的关键区域，忽略非关键区域。为此，本文在 SPPF（空间金字塔池化融合）

模块后加入了 SimAM（simple parameter-free attention module）机制^[9]，以突出煤和矸石的特征，减少无用信息的传播，从而使提取结果更完整。该改进在不增加网络复杂性的情况下，提高了模型的特征捕捉能力，且不影响推理速度。如图 4 所示。

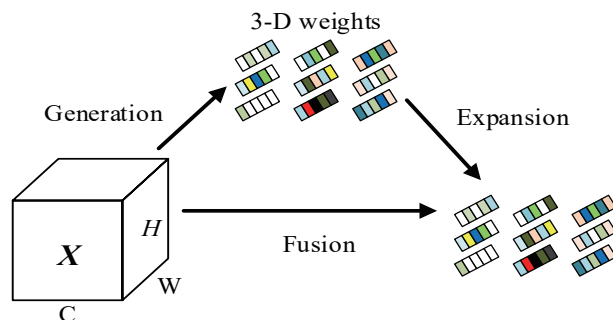


图 4 SimAM 注意力机制

SimAM 模块结合空间注意力和通道注意力来选择信息。该模块通过优化能量函数来计算每个神经元的能量值，并分配独特的权重。为提高效率，使用线性可分的能量函数来评估每个神经元，同时抑制附近其他神经元的影响。每个神经元的能量函数为：

$$e_t(\omega_t, b_t, y, x_t) = (y_t - \hat{t})^2 + \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} (y_0 - \hat{x}_i)^2 \quad (1)$$

式中： ω_t 和 b_t 分别表示第 t 层神经元的权重和偏置； t 和 x_t 分别表示为输入特征的目标神经元和通道中的其他神经元； e_t^* 表示能量函数的值，具体计算方式为：

$$e_t^* = \frac{4(\hat{\sigma}^2 + \lambda)}{(x_t - \hat{\mu})^2 + 2\hat{\sigma}^2 + 2\lambda} \quad (2)$$

式中： λ 为常数； t 为输入特征的神经元； x_t 为目标神经元的输入特征值； $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 分别为去除目标神经元后的该通道内的均值和方差。 e_t^* 的计算值越小，表示能量越低，意味着目标神经元 t 与其周围的神经元区别越大，越具有线性可分性。因此，该神经元越重要，更应受到关注。最终，增强后的输出特征公式为：

$$\tilde{X} = \text{sigmoid}\left(\frac{1}{E}\right) \odot X \quad (3)$$

式中： X 为输入特征图； E 为能量函数的值； $\text{sigmoid}\left(\frac{1}{E}\right)$ 用于将能量函数转换为权重，限制其取值范围。

1.4 目标检测层

多尺度目标检测网络结构在复杂煤矿环境中面临挑战，特别是小目标（如煤块和矸石）容易被背景干扰而误检或漏检。为此，本文在原网络中增加了一个目标检测层 P6^[10]，以更好地捕捉和表示小目标的全局特征。新增的 P6 检测头有 $10 \text{ px} \times 10 \text{ px}$ 的特征图尺寸，位于网络的较深层，能够

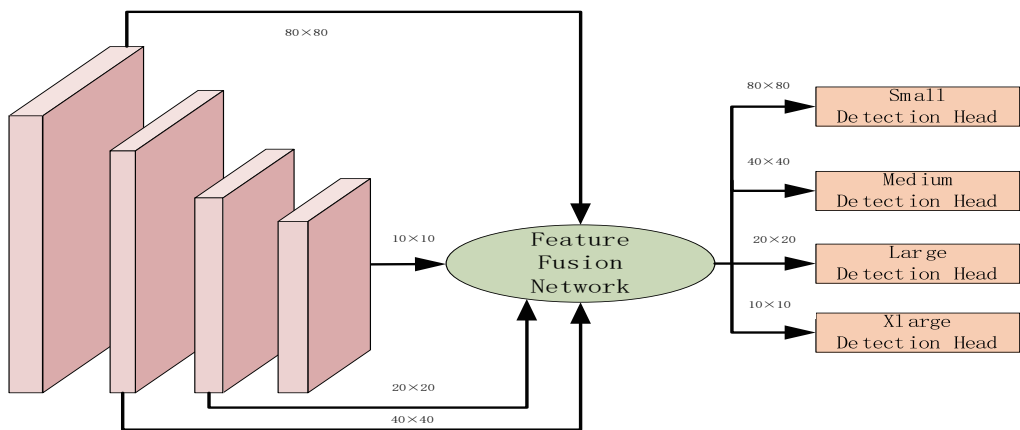


图5 目标检测层

保留煤和矸石的关键特征，减少背景干扰。YOLO 默认有 P3、P4、P5 三个检测头，增加 P6 层后，网络对不同尺度目标的检测能力和精度进一步提升，提高了模型的鲁棒性。如图 5 所示。

2 实验结果与分析

2.1 算法性能测试

为验证 GCS-YOLOv8n 模型相对于原始 YOLOv8 模型在损失值上的优越性和有效性，本文进行了对比实验。从图 6 中可以看到，损失值在 25 个周期后急剧下降，之后下降速度减慢，并在 80 个周期后趋于平滑。在 250 个周期后，最终损失值约为 1.1。这表明模型在训练过程中损失值持续下降，并最终稳定在较低水平。如图 6 所示。

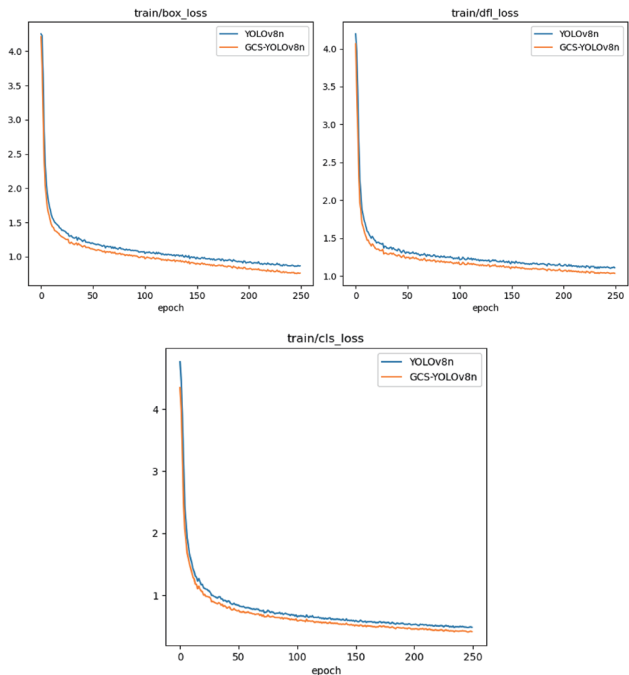


图6 训练 epoch-Loss 图

2.2 与其他模型的对比

为了验证 GCS-YOLOv8n 模型相比于其他算法的优势，本文将 GCS-YOLOv8n 模型与 YOLOv3-tiny、YOLOv5s、YOLOv7-tiny、YOLOv8n 算法进行了对比，实验对比结果如表 1 所示。

表 1 不同算法对比

模型	mAP@0.50 /%	参数量 /10 ⁶	模型大小 /MB	FPS /(帧·s ⁻¹)	GFLOPs
YOLOv3-tiny	89.3	8.7	16.6	294.1	12.9
YOLOv5s	93.4	7.02	13.7	142.0	15.8
YOLOv7-tiny	94.0	6.02	11.7	78.7	13.2
YOLOv8n	93.2	3.01	5.97	142.6	8.1
GCS-YOLOv8n	95.1	2.69	5.54	143.1	5.0

由表 1 可知，GCS-YOLOv8n 算法与 YOLOv3-tiny、YOLOv5s、YOLOv7-tiny、YOLOv8n 目标检测模型相比，mAP@0.50 分别提高了 5.8%、1.7%、1.1% 和 1.9%，参数量分别减少了 69.1%、61.7%、55.3% 和 10.6%，模型大小分别减少了 11.06、8.16、6.16 和 0.43 MB，计算量分别降低了 7.9、10.8、8.2 和 3.1 GFLOPs。在 FPS 方面，虽然 YOLOv3-tiny 的推理速度比 GCS-YOLOv8n 更快，但在其他参数远不如改进后的模型，YOLOv5s 和 YOLOv8n 的推理速度稍慢于本文改进的模型，即 GCS-YOLOv8n 的推理速度排在第二位，在其他参数上性能显著优于改进前的模型。证明了提出的改进方法在模型平均精度、模型复杂度、模型大小和推理速度方面达到了最佳平衡，为后期部署到 Jetson Nano 硬件上提供了有效支持。

2.3 实验结果可视化

GCS-YOLOv8n 模型煤矸石识别可视化效果图如图 7 所示。

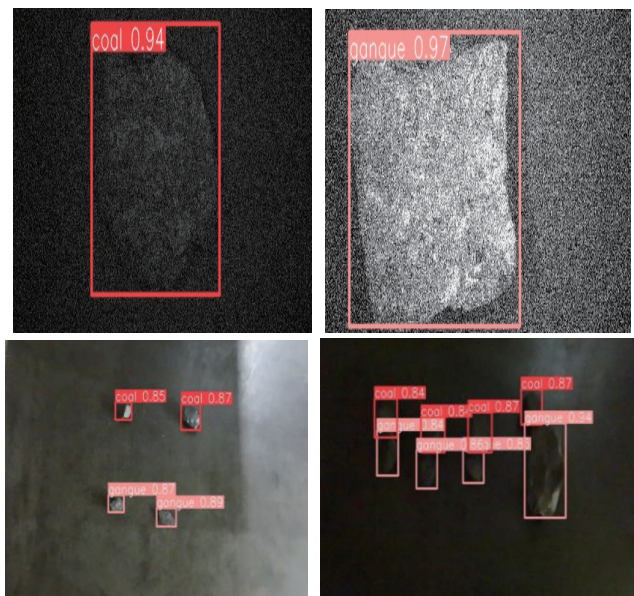


图7 GCS-YOLOv8n 检测效果图

如图7所示,从图片中可以看到,GCS-YOLOv8n模型在检测单个较大煤和矸石时置信度较高,检测小目标的煤、矸石和多个煤和矸石部分遮挡的情况下仍能正确检测,并且没有出现漏检、误检现象,得到最优的检测结果。

3 结语

本文针对煤和矸石识别中存在的模型参数量大、检测速度慢、精度低的问题,提出了一种基于GCS-YOLOv8n模型的改进方法。该模型采用GhostConv轻量卷积替代标准卷积,并使用轻量化的C3Ghost模块替换C2f模块,在保持特征表示能力的同时,显著减少了计算量和参数量;增加了一个P6目标检测头,可以更好地捕捉和表示小目标和背景,提高目标检测的精确度,减少误检和漏检的情况;在主干网络末端引入了SimAM模块,以减轻复杂多变环境背景对检测准确率的影响。实验结果表明,改进后的模型在复杂环境中表现更加出色,特征学习能力有所增强。与YOLOv8n相比,平均精度均值提升了1.9%,mAP@0.50达到了95.1%,参数量减少了10.6%,计算量减少了3.1 GFLOPs,模型权重大小压缩到5.54 MB,验证了改进方案的有效性,并优化了模型在边缘设备上的部署性能。

参考文献:

- [1] SUN Z Y, HUANG L L, JIA R Q. Coal and gangue separating robot system based on computer vision[J]. Sensors, 2021, 21(4):1349.
- [2] QIN Y C, KOU Z M, HAN C, et al. Intelligent gangue sorting system based on dual-energy X-ray and improved YOLOv5

algorithm[J]. Applied sciences, 2023, 14(1): 98.

- [3] LIU Q, LI J G, LI Y S, et al. Recognition methods for coal and coal gangue based on deep learning[J]. IEEE access, 2021, 9: 77599-77610.
- [4] SUN X D, WU P C, HOI S C H. Face detection using deep learning: an improved faster RCNN approach[J]. Neurocomputing, 2018, 299: 42-50.
- [5] CHANNAPPA G D V, KANAGAVALLI R. Detecting and tracking of multiple objects in a single frame with YOLO[C/OL]//2021 International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT).Piscataway:IEEE,2021[2024-06-19].https://ieeexplore.ieee.org/document/9573774.
- [6] LI D J, ZHANG Z X, XU Z H, et al. An image-based hierarchical deep learning framework for coal and gangue detection[J]. IEEE access, 2019, 7: 184686-184699.
- [7] HAN K, WANG Y H, TIAN Q, et al. GhostNet: more features from cheap operations[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. Piscataway: IEEE, 2020:1577-1586.
- [8] 王娜,陈勇,崔艳荣,等.基于改进轻量化YOLO v5n的番茄叶片病害识别方法[J].江苏农业科学,2024,52(8):192-199.
- [9] YANG L X, ZHANG R Y, LI L D, et al. SimAM: a simple, parameter-free attention module for convolutional neural networks[C]//Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning. New York: JMLR.org, 2021: 11863-11874.
- [10] 李文举,张干,崔柳,等.基于改进的YOLO算法的交通标志识别[J].计算机仿真,2023,40(1):149-155.

【作者简介】

王林海(1992—),男,山东海阳人,硕士研究生,研究方向:计算机视觉。

徐善永(1983—),男,安徽蚌埠人,硕士,高级实验师,研究方向:深度学习、图像处理和机器人优化控制。

(收稿日期:2024-11-17)

基于邻居优先级的区块传播优化方法

贾志龙¹ 张虹¹
JIA Zhilong ZHANG Hong

摘要

在采用 Gossip 算法的区块链网络中, 发送节点以一个固定的概率选择邻居传播区块。然而, 这种算法会导致接收节点收到重复区块, 从而增加数据冗余性和传播延迟。为解决上述问题, 文章提出了一种基于邻居优先级的区块传播方法。该方法在网络初始化阶段根据邻居的延迟时间设定节点优先级。在每一轮区块传播过程中, 优先向优先级高的邻居发送新区块, 并根据接收区块的时间动态更新邻居的优先级。此外, 每个节点定期广播区块高度信息给尚未接收新区块的邻居, 以避免区块的重复发送。与传统的 Gossip 算法相比, 基于邻居优先级的区块传播方法有效降低了区块传播延迟和数据冗余, 并减少了全网的数据开销。

关键词

Gossip 算法; 区块链; 区块传播; 优先级; 数据冗余

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.028

0 引言

区块链是融合数学、密码学、计算机技术等领域的新技术^[1], 具有去中心化、不可篡改和公开透明等特点。P2P 是区块链的核心技术之一, 而 Gossip 是一种重要的 P2P 通信算法^[2]。该算法被广泛应用于多个区块链项目, 如比特币、Hyperledger Fabric 和以太坊, 其性能直接影响整个区块链网络的效率^[3]。

原始的 Gossip 算法在区块同步过程会产生数据冗余^[4], 因为邻居节点被选中的概率是相同的, 导致节点重复接收相同的区块。这种冗余传播不仅延长了区块同步时间, 还增加了数据传输的负担, 进而影响区块链系统的性能。

为解决上述问题, 本文提出了一种改进的 P-Gossip 算法旨在提高区块链系统的性能和同步效率。

1 相关工作

优化传播路径方面, He 等人^[5]提出了 HNA-Gossip 算法, 该算法在原始算法的基础上新增一个历史节点列表, 并将其加入到发送消息中, 从而避免向历史节点发送重复数据。成卫青等人^[6]提出了基于二进制指数退避的 Gossip 算法, 以避免向节点重复发送新消息。尽管现有路径优化方法在提高传播效率方面取得了显著成效, 但仍未考虑节点实际的物理链路延迟, 这可能限制其在各种网络环境中的有效性。

减少数据开销方面, Yang 等人^[7]提出了基于 Gossip 的 ARI 块传播算法, 该算法将区块分割为均匀小块进行传输, 利用节点的上下带宽, 减少了区块链网络的块同步时间。

Berendea 等人^[8]针对区块链网络中数据传播的带宽开销问题, 提出在 push 阶段只转发区块的摘要信息, 消除了因多次接收相同的完整块而导致的通信开销。虽然这些数据开销优化方法取得了良好的效果, 但它们也可能导致较大的计算和存储压力, 影响系统的整体性能。

在优化拓扑结构方面, Kitagawa 等人^[9]提出了一种基于 Plumtree 算法的区块链网络拓扑结构优化方法, 该方法通过构建一个随机拓扑上的松散固定传播路径, 有效降低了区块链网络中的通信资源消耗。Xu 等人^[10]提出了 DC-Gossip 协议, 结合密度聚类算法, 基于当前网络中节点的分布构造一个确定性结构。在 Fabric 中的实验表明, DC-Gossip 可以显著提高区块传播效率。尽管这些拓扑结构优化方法取得了显著成效, 但其适用性仍然受到现有区块链架构的限制。

鉴于以上研究仍存在的问题, 本文提出一种基于邻居优先级的 P-Gossip 区块传播方法。该方法首次引入了优先级, 通过结合物理延迟和区块到达时间来设定并动态更新邻居优先级, 每一轮优先选择高优先级的邻居进行区块传播。此外, 算法还定期广播区块高度信息, 有效避免了区块的重复发送, 从而降低了网络的冗余开销。

2 相关知识

2.1 Gossip 算法

Gossip 协议在信息同步过程中, 无法确保所有节点在同一时刻接收到消息, 但理论上所有节点最终都会接收到消息, 从而实现最终一致性。Gossip 算法的通信模式包括推送模式、拉取模式以及推/拉结合模式。

(1) Push 推送方式: 持有最新消息的节点 A 随机选择

节点 B, 主动发送最新消息给 B。节点 B 接收到消息后, 比较并同步数据。

(2) Pull 拉取方式: 节点 A 随机选择节点 B, 主动请求并获取 B 的消息。接收到消息后, 节点 A 比较并同步数据。

(3) Push/Pull 推拉结合: 节点 A 随机选择节点 B, 一方面主动发送消息给 B, 另一方面请求并接收来自 B 的消息。接收到消息后, 节点 A 和 B 分别比较并同步数据。

2.2 Fabric 区块结构

在 Fabric 架构中, 区块结构包含 3 个主要部分: 区块头、区块数据和区块元数据。区块头记录了区块序号、前一个区块的哈希值和当前区块的哈希值, 但不包含生成时间。区块数据包含按时间顺序排列的多笔交易信息, 本文采用最后一个交易的时间戳作为区块生成时间的近似值。区块元数据则包含区块生成者的证书、公钥和签名信息。

3 P-Gossip 算法

3.1 数据结构

本文提出的 P-Gossip 算法包括了 4 种数据结构: 广播消息 BH、区块消息 BI、路由表 RT、动态转发表 DT。广播消息 BH 的结构相对简单, 仅包含节点的区块高度信息, 数据大小为 4 字节。区块消息 BI 则指的是 Hyperledger Fabric 中的区块数据。路由表 RT 和动态转发表 DT 的具体内容详细阐述如下。

3.1.1 路由表 RT

路由表是一种基于邻居节点优先级的排序表, 由两部分组成: 邻居节点标识和相应的优先级。节点标识采用 IP 地址, 每个地址占用 4 字节, 以区分不同的邻居节点。优先级则是基于接收区块的时间和邻居节点的延迟动态计算, 同样占用 4 字节。具体的格式如图 1 所示。

4Bytes	4Bytes
邻居节点1标识信息	优先级
邻居节点2标识信息	优先级
邻居节点3标识信息	优先级
.....	

图 1 路由表

3.1.2 动态转发表 DT

动态转发表 DT 用于记录即将接收新区块的邻居节点标识信息。换言之, 该列表包含了未来需接收区块的邻居节点。此表会随网络状态的动态变化而更新, 主要有 3 种更新方式, 具体格式如图 2 所示。

(1) 在区块传播过程中, 节点将区块发送给选定的邻居节点, 并在发送后从动态转发表 DT 中删除这些邻居的标识信息。

(2) 在区块传播过程中, 节点接收来自特定邻居的区块, 并在接收后从动态转发表 DT 中删除这些邻居的标识信息。

(3) 在每轮区块传播完成后, 根据路由表中的优先级顺序, 生成一个与优先级相对应的邻居节点标识信息表, 即动态转发表 DT。

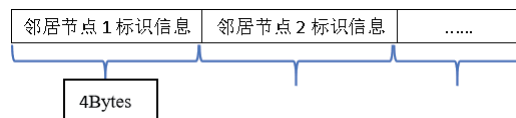


图 2 动态转发表

3.2 具体算法流程

3.2.1 路由表初始化

本文采用主动探测机制来评估与不同邻居节点的延迟, 并将这一结果作为设定邻居优先级的参考。初始阶段, 每个节点向其所有邻居发送一个问候 (hello) 消息, 邻居节点在接收后返回确认 (ack) 消息。通过计算 hello 消息与 ack 消息之间的时间差评估与邻居节点的延迟。随后, 基于这些延迟信息, 计算每个邻居的优先级, 并将邻居的 IP 地址及其对应的优先级记录到本地路由表中, 以完成初始化过程。

优先级的计算分为两步。首先需要计算延迟的倒数, 其计算公式为:

$$d_{i,j} = \frac{1}{r_{i,j}} \quad (1)$$

式中: $r_{i,j}$ 为节点 i 到节点 j 的延迟; $d_{i,j}$ 为延迟倒数。计算延迟倒数是为了确保优先级能够反映节点之间的响应速度, 延迟越小, 优先级越高。

接着, 计算具体的优先级值, 其计算公式为:

$$p_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{\sum_n^{L_i} d_{i,n}} \quad (2)$$

式中: L_i 是节点 i 所有邻居集合; 分母是节点 i 到所有邻居节点延迟倒数的总和。采用该方法进行归一化处理, 可以确保邻居优先级值落在合理区间内, 避免优先级值过大或过小对后续更新计算的影响。

3.2.2 动态转发表初始化

动态转发表是记录待发送区块的邻居节点列表。初始状态下, 节点尚未参与区块的接收与转发, 因此动态转发表初始化为包含所有邻居节点的标识信息。在每轮区块同步完成后, 所有节点的动态转发表将被清空, 并在下一轮区块传播开始前重新初始化。

3.2.3 P-Gossip 区块传播流程

P-Gossip 区块传播流程是区块链网络中一种优化数据传输效率的机制。在这一流程中, 每个节点“扮演”着双重角色, 通过执行两个核心线程: 主动线程和被动线程, 以确保区块信息的高效和可靠传播。以下将分别介绍这两种线程。

(1) 主动线程

主动线程负责节点主动向其邻居节点发送数据。在此线程中, 节点定期广播其区块高度信息, 并根据路由表 RT 和

动态转发表 DT 选择邻居节点以发送区块。具体算法描述如算法 1。

算法 1 主动算法

输入：RT、DT

输出：BI、BH

```

1: 间隔 timeInterval 广播 BH
2: selectedNodes = RT.nodes[0:k] // 选取前 k 个节点
3: if DT!=NULL then
4:   if selectedNodes ∈ DT then
5:     send(BI, selectedNodes) // 发送 BI 给 selectedNodes
6:     remove(DT.selectedNodes) // 删除 selectedNodes
7:   else
8:     i = selectedNodes ∩ DT //selectedNodes 与 DT 交集
9:     if count(i) > 0 then
10:      j=k - count(i)
11:      if count(j) > 0 then
12:        additionalNodes=RT.nodes[k:k+j]
13:        allNodes = selectedNodes + additionalNodes
14:        send(BI, additionalNodes)
15:        remove(DT.additionalNodes)
16:      else
17:        send(BI, selectedNodes)
18:        remove(DT.selectedNodes)
19:      end if
20:    end if
21:    if count(i) == 0 then
22:      selectedNodes = RT.nodes[0:k],
23:      goto 4 // 返回第 4 行
24:    end if
25:  end if
26: else
27:   end the round
28: end if

```

(2) 被动线程

被动线程负责接收并处理来自邻居节点的数据，包括广播消息 BI 和区块信息 BM。该线程根据接收到的信息动态更新动态转发表 DT 和路由表 RT。具体算法描述如算法 2。在该算法中，时间差 timeDiff 表示节点 i 接收区块的时间与区块中最后一笔交易的记录时间之间的差异。发送节点记为节点 j ；接收节点记为节点 i ； $\maxHeight(i)$ 表示 i 节点的最大区块高度； RT_{ij} 表示 i 节点的 RT 表中邻居 j 的优先级。

算法 2 被动算法

输入：BI、BM

输出：DT、RT

```

1: if 收到 BH then
2:   if  $j \in DT \ \&\& \ BH == \maxHeight(i)$  then

```

```

3:     remove(DT,j)
4:   end if
5: else
6:   parse(BI)
7:   if 验证通过 then
8:     remove(DT,j),calculate timeDiff
9:     if  $j$  首次发送 BI 且  $BI > \maxHeight(i)$  then
10:       $RT_{ij} += \text{timeDiff}$ 
11:   UpdateLocalblockchain(i) // 更新  $i$  节点本地区块链
12:   end if
13:   if  $j$  非首次发送 BI 或  $BI == \maxHeight(i)$  then
14:      $RT_{ij} = 0.5 * RT_{ij} + 0.5 * \text{timeDiff}$ 
15:   end if
16: else
17:   discard(BI)
18: end if
19: end if

```

4 实验与结果分析

本实验电脑配置为 Window10 操作系统，采用 Go 语言对 Gossip 算法和 P-Gossip 算法进行复现。表 1 展示了本次模拟实验的基本参数。所使用的区块来自于 Hyperledger Fabric 的测试链。每次传播 5 个区块，间隔时间为 15 ms，并在所有节点同步后统计结果。为了保证数据的准确性，每次实验都重复 10 次。

表 1 实验参数

基本参数	取值
区块大小	1 MB
节点个数	25 400
每次选取邻居个数	4
同步周期	1 s
广播消息间隔时间	0.5 s
延迟	40~600 ms
区块间隔时间	15 ms

4.1 区块传播时间

本部分统计了从第一个区块开始传播至所有节点区块高度同步为所需时间，实验对比结果如图 3 所示。

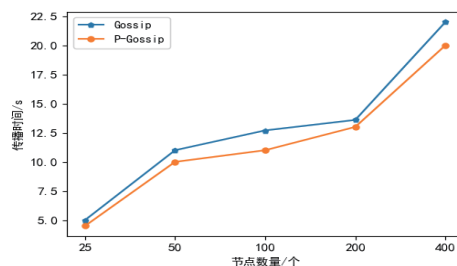


图 3 传播时间对比

图中数据显示,随着节点数量的增加,区块传播时间显著增长。然而,P-Gossip算法的时间开销始终低于Gossip算法,这是因为P-Gossip算法优先选择高优先级的邻居进行区块传播,从而优化了区块传播路径并减少了传播延迟。

4.2 总体数据开销

总体数据开销统计了区块传播过程中所有节点发送的数据总量,实验结果如图4所示。图中结果显示,P-Gossip的数据开销远远低于Gossip,并且随着节点数量的增加,这一优势愈加明显。尽管P-Gossip会定期发送广播消息,但这部分开销相对于区块来说非常小。得益于新增的数据结构——动态转发表DT,P-Gossip优先向未同步的邻居发送区块,从而有效减少冗余消息,降低了数据开销。

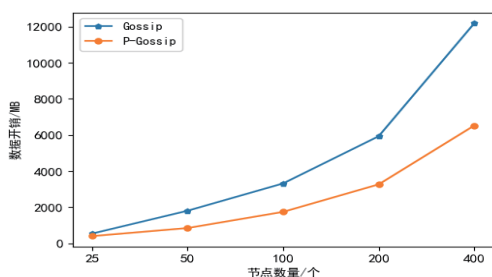


图4 数据开销对比

4.3 冗余消息条数

冗余消息条数统计了所有节点接收到的重复区块总数,实验对比结果如图5所示。与总体数据开销的结果相似,随着节点数量的增加,冗余消息条数的减少趋势更为显著。例如,当节点数为200和400时,Gossip算法产生的冗余消息数量非常庞大,而P-Gossip算法能够将冗余消息减少超过一半。这表明P-Gossip算法更适用于大规模区块链网络。

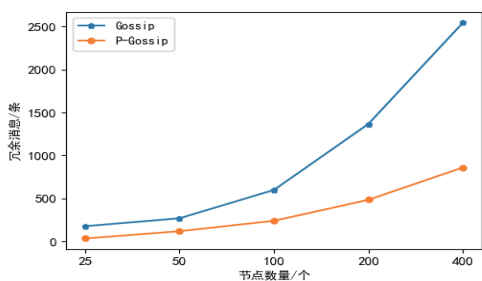


图5 冗余消息数对比

5 结语

P-Gossip算法引入了广播消息、动态转发表和路由表3种数据结构,节点定期广播自己的区块高度,并根据区块的收发情况和邻居的广播消息更新动态转发表。同时,节点根据接收区块的时间计算邻居的优先级,并更新路由表。在每一轮传播中,节点根据路由表和动态转发表转发区块,从而实现最低延迟路径的传播,减少数据冗余和全网数据开销。

未来的研究将计划将数据压缩技术融入本文,以进一步降低数据传输的开销。

参考文献:

- [1] 何蒲,于戈,张岩峰,等. 区块链技术及应用前瞻综述[J]. 计算机科学,2017,44(4):1-7.
- [2] 武岳,李军祥. 区块链P2P网络协议演进过程[J]. 计算机应用研究,2019,36(10):2881-2886.
- [3] ANTWI R, GADZE J D, TCHAO E T, et al. A survey on network optimization techniques for blockchain systems[J]. Algorithms, 2022, 15(6): 193.
- [4] 司冰茹,肖江,刘存扬,等. 区块链网络综述[J]. 软件学报, 2024, 35(2): 773-799.
- [5] HE X W, CUI Y J, JIANG Y C. An improved Gossip algorithm based on semi-distributed blockchain network[C/OL]//2019 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Piscataway: IEEE, 2019[2024-05-11].<https://ieeexplore.ieee.org/document/8946047>.
- [6] 成卫青,张蕾. 二进制指数退避的Gossip算法研究[J]. 电子与信息学报, 2021,43(12):3486-3495.
- [7] YANG X, SHI L. Ari: a P2P optimization for blockchain systems[C/OL]//2019 17th International Conference on Privacy, Security and Trust (PST). Piscataway: IEEE,2019[2024-06-09]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8949064>.
- [8] BERENDEA N, MERCIER H, ONICA E, et al. Fair and efficient Gossip in hyperledger fabric[C/OL]//2020 IEEE 40th International Conference on Distributed Computing Systems. Piscataway:IEEE,2020[2024-06-19].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9355725>.
- [9] KITAGAWA Y, SHUDO K, MIZUNO O, et al. A study of using plumtree algorithm in blockchain networks[J]. Journal of information processing, 2023, 31: 387-391.
- [10] XU Z G, YE K Z, DONG X H, et al. DC-Gossip: an enhanced broadcast protocol in hyperledger fabric based on density clustering[J].Wireless algorithms, systems, and applications, 2022, 13473: 3-19.

【作者简介】

贾志龙(2000—),男,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向:区块链技术、P2P网络。

张虹(1977—),通信作者(email:zhanghong8130@163.com),女,山西太原人,博士,副教授、硕士生导师,研究方向:区块链与智能技术、人工智能。

(收稿日期:2024-10-30)

工业大数据多集群通信传输节点调度方法

张晓辉¹

ZHANG Xiaohui

摘要

为提高工业大数据多集群通信传输的适应值并减小时隙，文章研究了一种工业大数据多集群通信传输节点调度方法。通过深入分析工业大数据多集群通信传输的需求，建立了相应的通信传输模型。在此基础上，对多集群通信传输链路节点进行了选择，并实现了与时隙分配的同步优化，最终完成了通信传输链路节点资源的调度。实验结果表明，新的调度方法能够有效提高通信传输节点的适应值，减少时隙总数，从而提升了工业大数据多集群通信传输的性能。

关键词

工业大数据；多集群通信传输；节点调度方法；时隙分配；同步优化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.029

0 引言

随着工业 4.0 时代与数字化转型的深入，工业大数据应用已覆盖多领域场景。在工业大数据的传输过程中，多集群通信传输节点调度方法扮演着重要“角色”。这种方法通过利用多个集群进行数据传输和处理，合理分配集群间的通信负载，优化节点调度，从而显著提升数据传输效率和处理速度。其核心理念在于能够动态调整集群间的通信带宽和节点负载，以更好地满足实时数据处理的需求。

在工业大数据环境下，多集群通信传输节点调度方法的应用展现出显著优势^[1]。首先，大幅提高了数据传输和处理效率，进而加快了工业生产和运营的响应速度。其次，通过合理分配集群间的通信负载，进一步优化了节点调度，提升了数据处理效率^[2]。此外，多集群通信传输节点调度方法还具备出色的灵活性，能够根据实际需求调整集群数量和节点配置。基于这些优势，本文将深入研究工业大数据多集群通信传输节点调度方法，旨在进一步优化这一调度方式。

1 建立工业大数据多集群通信传输模型

建立工业大数据多集群通信传输模型涉及多个复杂因素的综合考量。需要对工业大数据多集群通信传输的需求进行深入分析，包括了解数据量、数据类型、传输速率和通信协议等具体要求。同时，还需考虑集群的数量、节点配置以及通信网络的拓扑结构等因素。在建立模型之前，必须对工业大数据进行预处理，包括数据清洗、格式转换和异常值处理等操作，以确保数据的准确性和一致性^[3]。基于需求分析和

数据预处理的结果，确定模型的基本假设和参数。例如，假设各集群间的通信带宽有限且节点处理能力各异。在工业大数据多集群通信网络中，所有节点的发射功率相同，通信距离也一致。将通信距离设置为 T ，在该通信环境中存在一个节点 i 和一个节点 j ，其二者之间的距离可以表示为 $d(i, j)$ 。根据通信要求可知，当存在 $d(i, j) \leq TD$ 时，节点若处于彼此的通信范围内，则可相互传输信息。相邻节点指的是通过一跳就能到达的、在通信范围内的节点。假设所有通信节点均固定于地表，并设定一个统一的坐标系统，因此每个节点都有明确的位置坐标。将网关节点 GW 看作坐标原点，在确定坐标轴后，每个节点的两个坐标变量后，任意两个节点之间的距离可以用公式表示为：

$$d(i, j) = \sqrt{(x(i) - x(j))^2 + (y(i) - y(j))^2} \quad (1)$$

式中： $(x(i), y(i))$ 表示节点 i 的坐标； $(x(j), y(j))$ 表示节点 j 的坐标。工业大数据多集群通信网络以网关与无线路由节点两部分组成。其中，无线路由节点的数量为 N ，利用节点之间的通信距离，得到全局网络的近邻矩阵，用以刻画工业大数据多集群通信网络中节点之间的连通状态。通过 $(N+1) \times (N+1)$ 矩阵来描述

网络中的邻近节点，其中节点 1 代表网关 GW：

$$\begin{cases} d(i, j) \leq T, & i \neq j \rightarrow A(i, j) = 1 \\ d(i, j) > T, & i \neq j \rightarrow A(i, j) = 0 \\ & i = j \rightarrow A(i, j) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $A(i, j)$ 表示邻居节点矩阵。 $A(i, j)$ 为 1 时节点 i 和节点 j 互为邻居节点。否则两个节点不相邻。在此基础上，确定相邻节点，与网关直接通信的节点称为一跳级节点：

$$\forall i \in (2, N+1), d(i, 1) \leq T \quad (3)$$

1. 中冶赛迪信息技术（重庆）有限公司 重庆 401122

可以将节点的跳数级别标记为 $L(i)$ 。首先, 将网关设定为 0 跳级别, 即 $L(1) = 0$ 。随后, 在识别出一跳级别的节点后, 在剩余节点中筛选出与一跳级别节点相邻的节点, 将其定义为二跳级别。这一过程持续进行, 通过逐级扩展, 构建出一个工业大数据多集群通信网络的多跳分级模型。这一模型不仅清晰展现了节点间的层级关系, 还可以作为工业大数据多集群通信传输的有效框架, 支持数据的高效、有序传输。

2 多集群通信传输链路节点选择与时隙分配同步优化

为进一步提升网络的可靠性并解决网络冲突问题, 本文引入了图染色算法对链路进行集中染色^[4]。在链路调度过程中遇到的冲突可以表示为:

$$e(i, j) \cap e(i', j') \neq \emptyset \quad (4)$$

图染色算法的核心思想是使用尽可能少的颜色对整个网络进行着色, 同时确保有冲突的链路使用不同的颜色进行隔离。完成整个网络的着色后, 通过为不同颜色的链路分配不同的时间间隔, 有效解决了网络中的数据传输问题, 为进一步优化奠定了基础。链路选取的目标是确保网络中的各个节点都能与网关进行通信, 从而为各种信息的顺利传递提供必要的条件。

本文专注于探讨数据向网关传输的步骤机制。在网络架构中, 除网关这一核心节点外, 其余所有节点都至少拥有 1 条起始于自身的传输连接, 这一设计确保了数据能在整个网络中顺畅流通。

前期工作中, 已将所有节点的全部传输路径整合为一个集合体系, 即 $L(1), L(2), \dots, L(N)$ 。为保障数据的稳定传输, 必须从每组路径中至少选取 1 条, 以构建覆盖全网的传输链路网。为提高计算效率, 采取简化策略, 在每组中仅选择 1 条路径来构建传输链路, 从而使得整个网络的最终传输链路数与节点数 N 相等。在此构建基础上^[5], 引入矩阵编码 $N \times \text{MAXL}$ 来处理链路选择问题, 同时, 对于时隙分配则采用了十进制编码方法。

时隙是通信网络中用于数据传输的时间段, 为优化时隙分配, 可以采用静态时隙分配和动态时隙分配相结合的方法。静态时隙分配可以预先为每个节点分配固定的时隙, 以确保其数据传输的稳定性^[6]。动态时隙分配则可以根据节点的实时需求和网络状况动态调整时隙, 以实现更高的传输效率。网络链路与时隙分配同步优化算法的详细流程概述如下:

(1) 算法初始化: 首先, 设定遗传算法的关键参数, 其参数包括初始种群的大小、交叉操作的概率、变异操作的概率以及算法的最大迭代次数, 共同决定了算法的运行效率和性能。

(2) 初始种群生成: 随机生成一个初始种群。每个个体在算法中代表一个可能的解决方案, 由 2 个独立的染色体构成链路选择染色体和时隙分配染色体。这 2 个染色体分别通过特定的编码规则来表示网络中的传输路径和通信时隙的分配情况。

(3) 染色体功能: 链路选择染色体负责在网络中确定数据传输的最佳路径, 而时隙分配染色体则负责为这些路径分配适当的通信时隙。在评估每个个体的适应度时, 算法会综合考虑这两个染色体的信息。

(4) 交叉与变异: 针对个体层面的操作进行了精细化的设计。在对 2 个染色体进行处理时, 采用了截然不同的策略。对于交叉操作, 确保两个染色体之间能够按照既定的规则进行有序的基因片段交换, 从而在保持遗传信息多样性的同时, 也促进了优良基因的组合与传承。而对于变异操作, 注重于对染色体中的某些基因进行随机的微调或改变, 以引入新的遗传变异, 增强种群的适应性和探索能力。在整个过程中, 严格把控每一步的操作, 确保交叉与变异在遗传过程中的独立性和有效性。

(5) 新种群生成与评估: 完成交叉和变异操作后, 将生成新一代的种群。然后, 算法会评估新一代种群的适应度, 以筛选出更优个体。

(6) 算法终止条件: 检查是否满足算法的终止条件, 如达到最大迭代次数或找到满足要求的解决方案。一旦满足终止条件, 算法将结束运行, 并输出最终优化后的种群。

通过一系列步骤, 该算法能够同步优化网络链路和时隙分配, 从而显著提升工业大数据多集群通信传输的效率与稳定性。

3 通信传输链路节点资源调度

工业大数据多集群通信网络的链路选择问题本质上是一个路由优化挑战, 其核心在于对网络链路质量进行全面评估, 从而筛选出高质量的链路用于数据传输^[7-9]。为此, 将工业大数据多集群通信网络抽象为图 $G(V, E)$ 的形式, 其中, V 表示节点集合, E 表示传输链路集合。在 2 个节点间传输数据时, 数据会沿着节点之间的传送链路流动, 这种从节点 i 到节点 j 的传输通路被称为链路 $e(i, j)$, 网络中的所有链路共同构成了一个链路集合 E 。

在分层多跳网络模型中, 每个节点 i 都被赋予了一个跳数等级 $LV(i)$, 这反映了它们与网关的相对距离。基于这一模型, 明确, 数据传输的两个基本原则: 一是数据只能从远离网关的节点向靠近网关的节点传输; 二是节点间的通信仅限于相邻节点。此外, 结合数据聚合机制, 节点在接收到数据后, 可以将其与自身数据进行聚合, 形成更大的数据包进

行发送^[10-12]。

在遵循上述条件的前提下，得出了链路 $e(i,j)$ 存在的必要条件，该条件可以通过一个具体的公式来表达，该公式综合考虑了节点的跳数等级、相邻关系以及数据聚合机制等因素，具体公式为：

$$\begin{cases} (L(i)-L(j))^2=1 \\ A_{ij}=1 \end{cases} \tag{5}$$

许多节点处于同一跳数层级并相互邻近，尽管相互之间存在众多连接，但这些连接并未有效传输数据至网关，反而加重了网络负担^[13]。因此，剔除这些冗余链接，尽管可能略微降低网络的连通性，但不会削弱网络的整体效能，反而能显著简化网络结构，为后续网络优化工作扫清障碍，使之更为顺畅。

4 实例应用分析

为构建一个包含3个层级、总共10个节点的工业大数据多集群通信网络，首先需要明确每个层级中的节点数量及其分布情况。假设第一层（最顶层）有1个节点，第二层有3个节点，第三层（最底层）则有6个节点。这样的设计不仅能够保证网络结构的稳定性和扩展性，还能有效支持不同层次间的数据传输需求。

在特定的网络架构下，采用全局干扰模型来模拟实际工作环境中可能存在各种噪声源对信号传输的影响。这意味着，在分析或优化该网络时，必须考虑到所有可能产生干扰的因素，包括但不限于电磁波干扰、物理障碍物阻挡等。此外，只有相邻层级之间的节点才能互为邻居节点，即跳数级别差为1。这一限制条件进一步增加了网络设计与管理的挑战性，因为其要求在规划路由路径时必须严格遵守这一规则，以确保数据能够在正确的链路上高效地流动。

表1提供了关于每个节点的具体信息，包括所在的层级位置以及每个周期内预计发送的数据量。

表1 通信网络节点信息记录表

序号	V 通信网络节点	Q 节点周期数据量 (packet)	H 通信网络节点负载 (packet/s)
(1)	N1	0	0
(2)	N2	4	1
(3)	N3	6	1
(4)	N4	3	1
(5)	N5	2	2
(6)	N6	3	2
(7)	N7	5	2
(8)	N8	4	2
(9)	N9	4	3
(10)	N10	2	3

这些详细数据对于后续进行性能评估、资源分配乃至故障诊断都至关重要。通过对这些参数的深入分析，可以更好地理解整个系统的工作状态，并据此制定出更加科学合理的维护策略和技术方案，从而提高整体运营效率与服务质量。同时，考虑到未来可能出现的新需求或者技术进步，这种模块化且具有一定灵活性的网络布局也为后续升级留下了足够的空间。

在实验设计阶段，设定初始种群的数量为60个，以确保遗传算法具有足够的多样性来探索解空间。同时，将交叉率固定为0.8，以促进种群中优秀基因的交换与组合。对于变异率 $P_m(t)$ ，采用随迭代次数自适应变化的策略，其公式为：

$$P_m(t)=[F_{\max}(t)-F_{\text{mean}}(t)]/F_{\max}(t) \tag{6}$$

式中： $F_{\max}(t)$ 和 $F_{\text{mean}}(t)$ 分别表示当前种群中最优个体的适应值和平均适应值。通过动态调整变异率，算法能够在迭代过程中更好地平衡探索与开发的能力，从而提高求解效率和质量。根据本文上述提出的调度方法，针对该工业大数据多集群通信网络，给出表2所示的分配方案。

表2 工业大数据多集群通信节点调度分配方案

序号	节点	下一跳节点	传输周期性数据量 (packet)	分配到时隙顺序
(1)	N10	N5	2	2
(2)	N9	N5	1	1
(3)	N8	N4	1	2
(4)	N7	N3	5	2
(5)	N6	N2	3	3
(6)	N5	N4	2	3
(7)	N4	N1	3	1、5
(8)	N3	N1	6	2、4
(9)	N2	N1	4	3

根据上述详尽的调度分配方案，执行通信传输任务，确保每一步都严格按照预定计划进行。在传输过程中，密切监控各项关键指标。当成功完成100次传输后，对通信网络中的各个节点进行了全面的数据分析。详细记录了每个节点的适应值，这一数据反映了节点在当前网络环境下的性能；同时，统计总时隙数，以评估网络资源的利用效率。此外，为了了解节点间的均衡性，计算节点间的差异平均值，这一指标有助于识别网络中可能存在的瓶颈或不平衡现象。最后，为了评估网络传输的实时性，测量并记录了平均延迟，即数据在网络中传输所需的平均时间。完成所有数据的收集后，将其仔细整理，并清晰地记录在表3中，以便后续的分析 and 参考。

表3 节点调度效果记录表

序号	项目	调度前		调度后	
		适应值	时隙总数	适应值	时隙总数
(1)	最大值	0.261 8	10.791 2	0.380 4	7.000
(2)	最小值	0.246 8	10.343 8	0.348 0	5.000
(3)	平均值	0.256 9	10.554 6	0.368 0	5.537 4
(4)	方差	8.165 0e-04	0.354 0	0.004 3	22.171 0

根据表3中记录的数据可以观察到,调度前节点适应值的最大值、最小值、平均值和方差均显著低于调度后。而时隙总数的最大值、最小值、平均值和方差则明显大于调度后。节点适应值反映了节点在处理数据时的性能表现,其值越大,说明节点的处理能力越强。时隙总数则代表了网络中可用的通信时隙数量,直接影响数据传输的效率和实时性。

因此,优化节点适应值和时隙总数对于提升网络传输性能至关重要。通过对比调度前后的数据,可以清晰地看到,本文提出的调度方法对工业大数据多集群通信网络传输节点进行了有效优化。该方法通过合理分配节点资源和通信时隙,显著提升了节点的处理能力和网络传输性能。具体来说,调度方法优化了节点适应值的分布,使得最大值、最小值、平均值得到显著提升。同时,该方法也优化了时隙总数的分布,减少了方差,使网络传输的实时性得到提高,这意味着数据能够更快地被处理和传输,从而提高了整个工业生产或运营的效率。综上所述,本文提出的调度方法实现了对工业大数据多集群通信网络传输节点的优化,显著提升了传输性能和网络实时性,为工业生产和运营带来了巨大的优势和效益。

5 结语

总体而言,多集群通信传输节点调度方法是工业大数据处理中一种极为关键的方法,通过合理分配集群间的通信负载和优化节点调度,能够显著提高数据传输和处理的效率。此外,该方法展现出高度的灵活性与良好的扩展潜力,能够轻松适应各种实际需求,并便于后续的调整与优化。随着工业大数据应用的不断深入,多集群通信传输节点调度方法将发挥越来越重要的作用,为工业生产和运营带来更多的便利和效益。在未来的发展过程中,期待看到更多创新性的研究和技术突破,以进一步提升这种方法的性能和应用范围,从而更好地服务于现代工业的发展需求。这不仅有助于提升企业的竞争力,也将推动整个行业向着更加智能化、高效化的方向迈进。

参考文献:

[1] 葛晓琳,王云鹏,朱肖和,等.计及差异化能量惯性的电—热—气综合能源系统日前优化调度[J].电网技术,2021,45(12):4630-4642.

[2] 陈晓娜.基于改进粒子群算法的无线网络节点安全传输链路调度方法[J].信息与电脑(理论版),2023,35(14):106-108.

[3] 王恒,段思懿,谢鑫.基于信息年龄优化的多信道无线网络调度方法[J].电子与信息学报,2022,44(2):702-709.

[4] 严宇平,洪雨天,陈守明,等.基于参数估计的配电网载波通信异常信号识别方法[J].电测与仪表,2022,59(10):123-129.

[5] 叶恒舟,郝薇,黄凤怡.AoI与样本挤压感知的通信调度算法仿真[J].计算机仿真,2022,39(6):192-196.

[6] 国强,崔玉强,王勇.无线传感器网络中基于动态簇的节点调度算法[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(6):1466-1476.

[7] 张媛,李文娟,高鹏.基于数据挖掘的复杂光通信网络节点调度方法[J].激光杂志,2022,43(2):139-143.

[8] 罗伟华.面向5G的车载无线通信低时延信道节点调度方法[J].贵阳学院学报(自然科学版),2021,16(4):12-15.

[9] 司恩波,王晶,靳其兵,等.工业无线网络链路选择与时隙分配的同步优化[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(6):1203-1213.

[10] 钟耀霞,苏华,翟书娟.物联网环境下复杂光纤通信传输网络节点调度[J].激光杂志,2024,45(4):196-201.

[11] 廖伟国,文明瑶.基于偏高免疫网络的低功耗节点调度方法仿真[J].计算机仿真,2023,40(11):365-369.

[12] 郭勤,曾辉,李慧玲.基于数据驱动的光纤网络冗余节点状态调度方法[J].激光杂志,2023,44(10):162-166.

[13] 徐志光,林晓康,陈励凡,等.面向电力调度数据网的节点重要性评估方法[J].计算机工程与应用,2023,59(16):330-336.

【作者简介】

张晓辉(1987—),男,山西运城人,硕士,研究方向:人工智能、工业物联网、工业大数据等。

(收稿日期:2024-11-13)

基于 RCM-cycleGAN 的跨模态眼底图像重建

王聪茹¹ 史铭宇² 李婷雪¹ 李妍¹ 张艳珠¹

WANG Congru SHI Mingyu LI Tingxue LI Yan ZHANG Yanzhu

摘要

眼部多普勒彩超和眼底 OCT 图像常用于眼部临床医学诊断。由于图像包含的信息和设备等因素的影响,获得眼底 OCT 的途径会受到限制。针对这一限制,提出一种针对 cycleGAN 网络改进的多尺度残差生成对抗网络(RCM-cycleGAN)模型,使用眼部多普勒彩超图片重建眼底 OCT。通过采集眼部多普勒彩超和眼底 OCT 制作相应的数据集,首先在 cycleGAN 网络的生成器中加入残差网络结构,降低 GAN 网络生成器梯度爆炸;其次在生成器结构中引入通道注意力,提升网络在眼底照相视盘和血管特征的关注;最后在网络中引入多尺度特征提取,进一步优化了重建效果。使用改进后的 RCM-cycleGAN 算法与 cycleGAN、RegGAN、DC-cycleGAN、DualGAN 等对眼部彩超和眼底 OCT 之间的重建进行训练,根据重建图像与测试集数据对比的效果表明所设计的 RCM-cycleGAN 可以更好地实现眼部彩超对眼底照相的重建。

关键词

跨模态;生成对抗网络;医学图像重建;RCM-cycleGAN

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.030

0 引言

彩色多普勒超声和眼底照相(眼底 OCT)在眼科检查中非常重要,广泛用于眼部等各种疾病的诊断以及放疗治疗计划。一方面,彩色多普勒超声图像在捕捉对比度的多样性和准确定位病灶和血流方面非常出色软组织的结构图像^[1]。另一方面,眼底 OCT 图像能够显示病变的细节并提供电子密度信息^[2]。由于可以从每种模式中获得独特的信息,因此使用患者的彩色多普勒超声和眼底 OCT 图像可以显著改善临床诊断和治疗。这些局限性,包括成本、时间、辐射剂量以及准确彩色多普勒超声/眼底 OCT 配准的必要性,可能会限制两种图像的获取。可以通过从另一种方式合成医学图像来避免,即从彩色多普勒超声图像生成眼底图像,是一种跨模态图像重建^[3]。

跨模态医学图像重建可以定义为目标图像和源图像之间的映射。现有方法分为特征映射和深度学习(DL)方法。特征映射方法通常需要许多预处理/后处理步骤以及调整转换参数的先验知识。

基于深度学习的方法直接学习从源域到目标域的复杂

非线性映射^[4-5]。卷积神经网络(CNNs)^[6]是最受欢迎的基于深度学习的医学图像合成方法之一,因其具有学习图像结构的能力。Nie 等人^[7]采用三维全卷积神经网络(FCN)从 MR 图像合成 CT 图像。Nie 等人^[8]使用 U-Net 结构从 MR 图像合成 CT 图像。此外,基于生成的方法,包括生成对抗网络(GAN)^[9]和变分自动编码器(VAE)^[10],在合成一种模态的医学图像方面有显著效果,以另一种模态为条件。Li 等人^[11]提出一个通用的图像转换框架 pixel2style2pixel(pSp),直接生成一系列风格向量,然后将它们输入到预训练的 StyleGAN 生成器中扩展空间。

上述方法依赖于大量的配对图像,此类图像很难获得,为了克服此类问题,Zhu 等人^[12]提出了 cycleGAN 以无监督的方式从未配对的数据中合成图像。尽管 cycleGAN 在重建与真实输入相同的图像(例如 CT-to-CT)方面显示出显著的结果,但它不能直接用于合成来自另一种模式(例如 MR-to-CT)的样本,因为真实源图像和合成图像之间没有直接限制^[13]。Santini 等人^[14]通过额外的损失来强制生成的图像与真实图像相同,从而缓解了这个问题。

对 cycleGAN 进行了改进,构建了一种 RCM-cycleGAN 学习模型。首先在 cycleGAN 网络的生成器中加入残差网络,构建了一个残差网络生成器,降低 GAN 网络生成器梯度爆炸;其次在生成器结构中引入通道注意力,提升网络训练对眼底 OCT 视盘和血管特征的关注;最后在网络中引入多

1. 沈阳理工大学自动化与电气工程学院 辽宁沈阳 110159

2. 中国医科大学附属第四医院 辽宁沈阳 110005

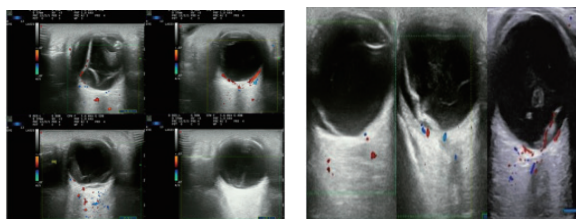
[基金项目]全自动智能眼科超声机器人关键技术(LJ212410144052)

尺度特征提取,进一步优化了重建效果更进一步地提取眼底 OCT 的特征。

1 相关工作

在图像合成的研究领域中,数据、算法与算力三者缺一不可。在中国医科大学第四附属医院的支持下,获得了用于眼底 OCT 生成研究的数据集。这一数据集的构建严格遵循了研究要求,确保了数据的准确性和可靠性。

在数据处理阶段,首先筛选出彩色超声图像中能够映射到眼底 OCT 的有效部分,如图 1 所示,确保后续分析的精确性,统一将图像中包含眼部信息的部分裁剪,确保所有图像在尺度上的一致性。面对给定的矩形图像,采用简单的缩放方法,确保图像包含完整信息,同时避免了复杂的预处理步骤,以最大程度地保留图像的原始信息。



(a) 原图 (b) 预处理

图 1 眼部彩色多普勒超声图像

2 方法改进

对抗式神经网络 (generative adversarial network, GAN) 的是两个网络的组合,可以理解为一个网络生成模拟数据 (生成网络 Generator), 另一个网络判断生成的数据是真实的还是模拟的 (判别网络 Discriminator)。如图 2 所示。

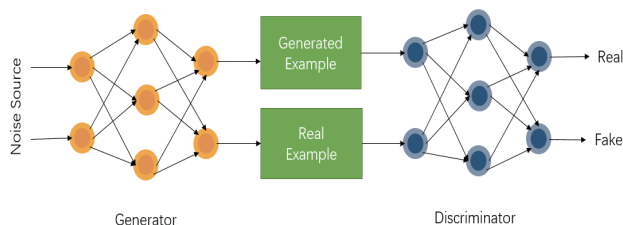


图 2 GAN 的基本网络结构

2.1 Resnet50 生成器

残差网络 ResNet50 是一种包含 50 层的卷积神经网络 (CNN), 其核心组成部分是所谓的“残差块”或“shortcut 连接”。每个残差块通常包含两个或三个卷积层, 并且有一个跳跃连接 (shortcut) 绕过这些卷积层直接将输入与输出相加。这种结构使得信息和梯度可以更直接地向前和向后传播, 从而有助于训练更深的网络。其架构通过引入残差块解决了深层神经网络中的梯度消失问题, 使得网络能够训练得更深, 从而在许多计算机视觉任务上取得了成功。

将 ResNet50 用作生成器并不是一个常见的选择, ResNet50 生成器的设计初衷是为了特征提取和分类, 其架构也可以被调整来用作生成器的一部分, 如图 3 所示。在这样的场景下, ResNet50 的残差块可以用于保持细节和解决训练过程中的梯度问题。

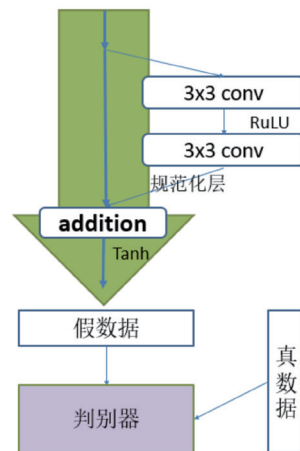


图 3 改进后的 ResNet50 生成器结构

2.2 通道注意力

为利用不同通道间的特征依赖性, 通道注意力已广泛应用于计算机视觉领域。在图像处理领域中, 更侧重于提取序列特征, 如目标图像特征, 不同通道更细节的信息等。相较于空间注意力, 通道注意力涵盖更多不同特征的信息。使用通道注意力 (channel attention, CA) 使得模型在忽略眼底外区域的同时, 专注于眼底图像的视盘特征, 从而提高重建细节。在生成器中, 通道注意力用于实现捕捉不同通道特征的上下文的依赖, 有助于更好地重构提取特征。

在 RCM 模型中, 引入了 CAM 模块。通过将算力集中在对生成结果更细节的特征上, 增加数据的类间方差, 从而提高分类精度, 对数据的通道特征赋予相对应的权重。ResNet 网络默认特征图的每个通道同等重要, 而在本文中眼底 OCT 中的轮廓、病灶、视盘和血管特征所占重要性并不相同, 因此, 研究通过对生成器模型加入通道注意力机制模块重新校准不同特征所对应的权重。改进后的网络更加能关注眼底 OCT 视盘和血管的特征。

SE 模块主要包括 3 部分, 首先, 对输入的特征图进行挤压 (Squeeze) 操作, 得到一个通道的全局特征 Squeeze 操作通过使用全局平均池化得到 $1 \times 1 \times C$ 的特征图, 图 4 中 X 表示输入注意力机制之前的特征图; F 表示卷积算子; U_c 表示特征图; F_{sq} 表示 Squeeze 压缩变换函数; F_{ex} 表示 Excitation 操作; H 和 W 表示每个特征图的高和宽将每一个通道上的特征重新编码成为一个全局特征, 代替一般的卷积操作, 以获得对彩超图像信息更大的感受视野。计算公式为:

$$Y_e = F_{sq} = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W U_e(i, j) \tag{1}$$

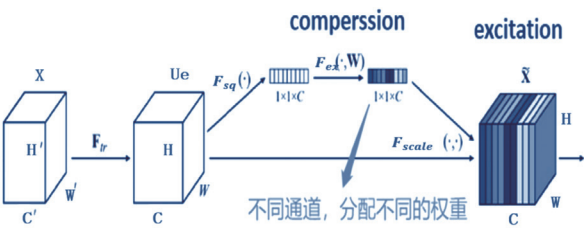


图 4 通道注意力

2.3 多尺度特征提取生成器

每个卷积层只能处理一个特殊的尺度，尺度变化同样是深度学习任务中的挑战之一。U-Net 在复杂医疗场景下的成功运用，本文设计了多尺度特征感知模块作为 GAN 的判别器，来实现捕获和提取多尺度信息来表征对象尺度的变化。

为了解决在复杂场景中面临的诸多问题，提取到更好的眼底特征信息，在引入 cycleGAN 的基础上引入多尺度卷积，改进网络得到一种新的生成器，以提供更加丰富的特征信息。

对 cycleGAN 网络改进的重点是融合来自不同的特征级别的信息，而不是简单的特征映射。这种改进使得该网络结构可以在更好地融合特征信息的基础上适应眼底 OCT 的重建，如图 5 所示。本文在多尺度特征提取中运用了 3×3 卷积。

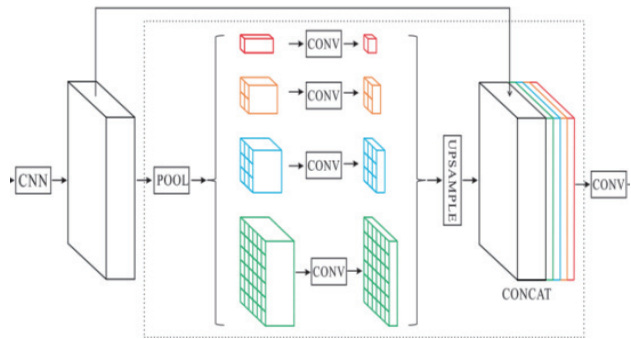


图 5 多尺度特征提取

改进后的结构如图 6 所示。

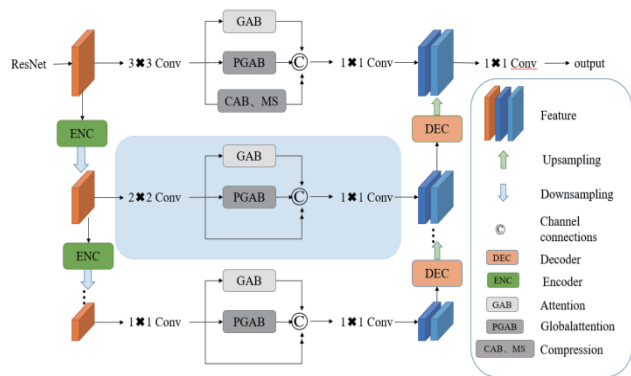


图 6 改进生成器内部结构

3 实验设置

3.1 对比试验

研究选取了 4 种对比算法，这些方法包括传统的 DC-cycleGAN^[15]、RegGAN^[16]、DualGAN^[17] 和 cycleGAN。其发布的代码用于使用相应参考中的相同参数生成结果。通过表 1 可以看出，生成眼底 OCT 图像的各种方法的定量准确度。RCM-cycleGAN 在 MAE、PNSR 和 SSIM 方面优于其他方法。这主要是由于集成到 RCM-cycleGAN 结构中的对比度损失。

表 1 跨模态重建后指标结果

	PSNR	SSIM	MAE
RegGAN	25.67	0.681 3	34.42
cycleGAN	24.28	0.510 3	35.47
DualGAN	25.77	0.734 7	33.25
DC-cycleGAN	27.15	0.878 0	32.74
本文方法	28.23	0.928 0	33.36

图 7 给出了合成的眼底 OCT 图像沿着以及通过不同方法的真实的图像和合成图像之间的误差。可以看出，与其他方法相比，RCM-cycleGAN 合成的图像更接近于真实的图像。这表明 SSIM 和 CE 沿着对比度在合成图像中的有效性。此外，与其他方法相比，RCM-cycleGAN 合成的眼底 OCT 图像与欧堡实况之间的误差相对较小。

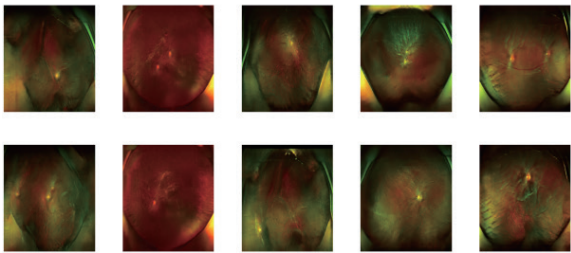


图 7 不同方法重建的图像对比

3.2 消融实验

为了验证 ResNet、CA、MS 的有效性，进行了消融实验。其中，RCM 为本文改进网络，采用了 3 个模块，M1、M2、M3 分别为不添加 ResNet、CA、MS 的情况。为保证消融实验的有效性，M1~M4 使用一致的数据集和训练参数。

表 2 消融实验结果

	PSNR	SSIM	MAE
M1	26.28	0.510 3	35.80
M2	25.77	0.734 7	34.58
M3	26.95	0.878 0	31.42
本文方法	28.23	0.928 0	33.36

由表 2 可以看出：与 RCM-GAN 相比，由于无法将图像特征充分重建，M1 的 PSNR 下降了 1.95 dB；由于无法充分

融合深度和强度特征,进而无法引导恢复重建,M2的PSNR下降了2.46 dB;由于ResNet和CA被移除,M3的PSNR下降了1.28 dB。因此,每一个模块都有助于提高网络性能,RCM-cycleGAN重建效果具有更为明显的提升作用。

4 结论

本文提出的RCM-cycleGAN模型可用于无监督医学图像合成,将学习样本映射到远离源域的图像。RCM-cycleGAN结构集成了SSIM和CE损失中,增加对样本亮度和结构的关注。改进后的RCM-cycleGAN模型,首先将残差网络引入生成器结构中,降低GAN网络生成器梯度爆炸。其次引入通道注意力,对生成器结构中的不同通道特征进行不同的权重提取。最后在生成器结构中加入多尺度提取的改进,更大程度的生成眼底欧堡的特征。对眼部彩超重建眼底图像的结果进行了评估,RCM-cycleGAN与cycleGAN、RegGAN和DualGAN等先进的方法相比,结果表明RCM-cycleGAN能够在准确性和视觉质量方面产生更好的眼底图像。

参考文献:

- [1] 吴德正,马红婕,马静琳.200°超广角眼底像图谱[M].北京:人民卫生出版社,2017.
- [2] 杨文利.临床超声诊断学[M].北京:科学技术文献出版社,2019.
- [3] ISOLA P, ZHU J Y, ZHOU T H, et al. Image-to-image translation with conditional adversarial networks[C/OL]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).Piscataway:IEEE,2017[2024-04-05].<https://ieeexplore.ieee.org/document/8100115>.
- [4] JEONG S, KIM Y J, LEE E, et al. Memory-guided unsupervised image-to-image translation[DB/OL].(2021-04-12)[2024-06-11].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.05170>.
- [5] ZHOU X L, LIU H, POURPANAH F, et al. A survey on epistemic (model) uncertainty in supervised learning: recent advances and applications[J]. Neurocomputing, 2022, 489: 449-465.
- [6] MINAR M R, NAHER J. Recent advances in deep learning[DB/OL].(2018-07-21)[2024-07-05].<https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.08169>.
- [7] DONG N, CAO X H, GAO Y Z, et al. Estimating CT image from MRI data using 3D fully convolutional networks[J]. Deep learning and data labeling for medical applications, 2016, 10008: 170-178.
- [8] NIE D, TRULLO R, LIAN J, et al. Medical image synthesis with deep convolutional adversarial networks[J]. IEEE transactions on biomedical engineering, 2018, 65(12): 65, 2720-2730.
- [9] GOODFELLOW L J, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial nets[C]//NIPS'14: Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2014: 2672-2680.
- [10] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[DB/OL]. (2015-05-18)[2024-03-12].<https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>.
- [11] LI X Y, ZHANG S C, HU J, et al. Image-to-image translation via hierarchical style disentanglement[C/OL]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2021[2024-05-29].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9577868>.
- [12] ZHU J Y, PARK T, ISOLA P, et al. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks[C/OL]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE, 2017[2024-07-06].<https://ieeexplore.ieee.org/document/8237506>.
- [13] YANG H R, SUN J, CARASS A, et al. Unsupervised mr-to-ct synthesis using structure-constrained cycleGAN[J]. IEEE transactions on medical imaging, 2020, 39(12): 4249-4261.
- [14] SANTINI G, FOURCADE C, MOREAU N, et al. Unpaired pet/ct image synthesis of liver region using cycleGAN[J/OL]. Computer science, 2020[2024-05-19].<https://www.semanticscholar.org/paper/Unpaired-PET-CT-image-synthesis-of-liver-region-Santini-Fourcade/0e6218bd9b373cf954a803c68cc9e2a4ed7dfbaf>.
- [15] WANG J Y, JONATHAN WU Q M, POURPANAH F. Dc-cycleGAN: bidirectional CT-to-MR synthesis from unpaired data[J]. Computerized medical imaging and graphics, 2023, 108: 102249.
- [16] KONG L K, LIAN C Y, HUANG D T, et al. Breaking the dilemma of medical image-to-image translation[DB/OL]. (2021-11-11)[2024-04-19].<https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.06465>.
- [17] YI Z L, ZHANG H, TAN P, et al. DualGAN: unsupervised dual learning for image-to-image translation[DB/OL]. (2018-10-09)[2024-06-12].<https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.02510>.

【作者简介】

王聪茹(2000—),女,河南安阳人,硕士研究生,研究方向:模式识别与智能系统。

(收稿日期:2024-11-07)

基于改进孤立森林算法的审计数据异常主动预警研究

蔡玲嘉¹ 李 雄¹ 王泽涌² 陈哲瀚²

CAI Lingjia LI Xiong WANG Zeyong CHEN Zhehan

摘 要

审计数据中出现的异常值可能反映业务活动的异常状态,在进行数据质量评估时,有效异常数据越多,说明数据质量越高,因此在海量审计数据异常检测与识别时,需要对海量异常点进行分析与解释,复杂度较高。为此,文章提出一种基于改进孤立森林算法的审计数据异常主动预警研究。首先自动抓取并预处理审计相关数据,然后选取关键特征,基于选择特征构建孤立森林,最后引入四分位法改进孤立森林中正常与异常数据评分的分界线划分方式,利用改进后的孤立森林算法实现审计数据异常的主动预警。实验结果表明,在此方法下,审计数据异常主动预警结果的 G-mean 指标高达 0.96, AUC 高达 0.936,验证了该方法的有效性和优越性。

关键词

改进孤立森林算法; 审计数据; 数据异常; 异常预警; 主动预警

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.031

0 引言

随着企业规模的扩大和业务范围的拓展,审计数据维度复杂多样,传统的人工审计方式已难以高效、精准地发现潜在风险与异常。因此,如何有效利用现代信息技术手段,对审计数据进行自动化、智能化检测,及时发现并预警异常行为,成为审计领域亟待解决的重要问题。近年来,众多学者在这一领域开展研究,如文献[1]采用 BiLSTM 捕捉时序数据时间依赖,引入 Wasserstein 距离及梯度惩罚改进评估。结合重构与判别损失定义异检函数,用局部自适应阈值提升时序数据异检精度。该方法在应用过程中受到审计数据复杂性和多样性的限制,难以检测审计数据中的有效异常数据。文献[2]针对评价基准误差问题,提出混合选择集成法,用孤立森林预排劣基检测器,采用动态选择集成,提出假真值难度。为解决单一指标不足,引入元学习策略,转多基检测器动选为二分类问题,设多元特征训元分类器。据元分类器选优基检测器,提电力调度数据异检能力。然而,该方法在运行过程中受到了计算资源和时间复杂度的限制,无法对审计数据中的海量异常点进行全面、深入的分析与解释。针对上述局限之处,本文提出了一种基于改进孤立森林算法的审计数据异常主动预警方法,以期实现对审计数据中异常行为的精准、高效检测与主动预警,有助于推动审计领域的技术创新与发展。

1 爬取审计数据

利用网络爬虫技术,审计人员可以通过系统自动化地从多个数据源中获取数据,减少手动收集数据的时间和精力。同时,该技术还能够从多个数据源中收集数据,从而提供更全面的视角^[3]。要想获取某些访问限制或法律约束的数据源数据,需要在进行审计数据异常主动预警时,高效、准确地从多元化数据源中爬取审计相关数据^[4]。对此,本文采用网络爬虫技术进行审计数据爬取。由于审计数据的来源广泛,主要包括企业内部系统、外部数据源以及社交媒体等非传统数据源,为实现多任务并发执行与负载均衡,本文设计一个多层次的爬取策略^[5],将异步 IO 与分布式爬虫框架集成在一起,具体审计数据爬取的关键步骤为:先根据数据源分析确定初始 URL 集合,通过内部网络或公开域名/API 访问^[6];再构建 HTTP 请求头,发送请求至服务器,用 HTML 解析器提取数据如财务报表、交易记录、系统日志;之后,逐一读取并解析 URL,直至满足停止条件,为后续分析预警打下基础。

2 预处理审计数据

原始爬取的审计相关数据在应用于数据异常主动预警之前,需要进行严格的数据清洗和预处理工作,以确保数据的准确性和完整性。为提升数据质量,需要删除冗余信息与噪声,以减少对后续分析的干扰^[7]。为识别并去除数据中的冗余与重复信息,本文采用分析算法获取原始审计数据之间的相关性:

1. 广东电网有限责任公司 广东广州 510699

2. 南方电网数字企业科技(广东)有限公司 广东广州 510699

$$\gamma_{ij} = \frac{C(X_i, X_j)}{\sqrt{F(X_i)}\sqrt{F(X_j)}} \quad (1)$$

式中： γ_{ij} 表示审计数据 X_i 与 X_j 之间的相关性； $C(X_i, X_j)$ 表示审计数据 X_i 与 X_j 之间的协方差； $F(X_i)$ 、 $F(X_j)$ 分别表示审计数据 X_i 与 X_j 的方差。准确识别并剔除原始审计数据中高度相关的变量，从而精简数据集，减少冗余信息，为后续异常预警排除干扰。与此同时，原始审计数据中的噪声点也是必须要剔除的目标^[8]，本文采用基于密度的局部离群因子算法进行噪声点的检测，密度的具体计算公式为：

$$D_{\gamma_{ij}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (|X_i - X_j| + |Y_i - Y_j|) / 2N} \quad (2)$$

式中： $D_{\gamma_{ij}}$ 表示密度； N 表示审计数据的点集的数量，点集定义为 (X_i, Y_i) 。由此求出待识别数据点周围密度后，所求密度数据的倒数即为该数据点的离群计算数值。当某个数据点的离群计算数值显著高于其相邻数值时，即被视为孤立的噪声点，需进一步剔除。然后，需要进行数据转换，即将原始审计数据统一转换为适合分析的数值型格式。最后，为消除不同量纲对数据异常预警的影响，本文还需对原始审计数据进行归一化处理，表达式为：

$$X' = \frac{X_{D_{\gamma_{ij}}} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

式中： $X_{D_{\gamma_{ij}}}$ 、 X' 分别表示归一化前、后的审计数据； $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别表示原始审计数据中的最小、最大值。

3 选择审计数据特征

审计数据预处理可规范数据，去除噪声和冗余，提高质量。因审计数据维度高且复杂，直接检测可能计算量大、准确性低，故需先选特征。特征选择去冗余，提模型泛化力。本文在孤立森林模型中，用近似马尔科夫毯算法选关键特征，提高预警效率^[9]。首先，基于审计数据集，利用互信息计算特征间的依赖关系，具体表达式为：

$$\lambda_0(Z_u, Z_v) = \sum_{Z_u \in Z} \sum_{Z_v \in Z} X_{D_{\gamma_{ij}}} P(Z_u, Z_v) \log \left(\frac{P(Z_u, Z_v)}{P(Z_u)P(Z_v)} \right) \quad (4)$$

式中： $\lambda_0(Z_u, Z_v)$ 表示审计数据特征 Z_u 和 Z_v 之间的互信息； Z 表示审计数据特征集合； $P(Z_u, Z_v)$ 表示审计数据特征 Z_u 和 Z_v 的联合概率分布； $P(Z_u)$ 、 $P(Z_v)$ 分别表示审计数据特征 Z_u 和 Z_v 的边缘概率分布。由此可以计算所有特征对象之间的互信息后，即可构建一个加权特征依赖图 T ：

$$T = (Z, \lambda, \lambda_0(Z_u, Z_v)) \quad (5)$$

式中： λ 表示审计数据特征间依赖关系的集合。审计数据特征依赖图以节点表特征，边表依赖强度。构建图后，设阈值

找近似马尔科夫毯：算候选特征依赖增益，选超阈值且增益大者入子集，直至条件不满足^[10]。得到最小特征子集，能隔目标与非关键特征依赖。本文用此算法选择关键特征，为孤立森林构建奠定基础。

4 改进孤立森林算法主动预警审计数据异常

审计数据特征提取可精简数据，从而减少干扰，提高异常检测效率与准确性。基于此，采用孤立森林算法预警。将选定特征输入孤立树根节点，随机选择属性分割，设定阈值左右分配特征，直至隔离或达最大高度^[11-12]。构建所有孤立树后组成森林，根据评分规则判定数据异常，生成异常评分，具体计算公式为：

$$f = 2^{\frac{T \cdot E[H(z)]}{R(m)}} \quad (6)$$

式中： f 表示单个异常审计数据样本特征 z 相对于样本集 m 的异常分数值； $E[H(z)]$ 表示遍历孤立森林中的每一棵孤立树后，得到的路径长度 $H(z)$ 的期望值； $R(m)$ 表示路径长度 $H(z)$ 在 m 个样本条件下的平均值。孤立森林算法据特征异常分数判异常点。常规算法受审计数据特征多样性和非平衡性影响，本文用四分位法改进正常与异常数据评分分界。假设上述孤立森林算法计算的各个审计数据特征样本异常分数值集合为 $f = [f_1, f_2, \dots, f_m]$ ，集合中各分数值按升序排列，通过四分位法对该异常分数值集合进行四分位划分，可得到异常分数值数据的第1/4、1/2、3/4的数据分别为 q_1 、 q_2 、 q_3 。通过公式计算四分位距：

$$\varsigma = q_3 - q_1 \quad (7)$$

式中： ς 表示审计数据特征样本异常分数值集合 f 的四分位距。基于四分位距，计算审计数据异常检测阈值范围 $[f_{\min}, f_{\max}]$ ：

$$\begin{cases} f_{\min} = q_1 - 1.5\varsigma \\ f_{\max} = q_3 + 1.5\varsigma \end{cases} \quad (8)$$

将所求阈值范围内的审计数据判定为正常数据，而不在该阈值范围内的审计数据判定为异常数据。因此，利用四分位法改进后的孤立森林算法，能对审计数据进行高效的异常检测。

5 仿真实验

5.1 实验环境与数据

为验证所提方法的先进性，选取基于生成对抗网络的审计数据异常主动预警方法、基于卷积神经网络的审计数据异常主动预警方法作为对比方法，进行仿真对比实验。在Linux系统服务器中搭建本次实验环境，参数配置情况如表1所示。

表 1 实验环境参数设置

实验环境	参数	设置
硬件环境	CPU	Intel Core i9-9900K
	GPU	NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti
	内存	32 GB RAM
软件环境	Python 3.8, TensorFlow 2.4, scikit-learn 0.24, NumPy 1.19	

然后，收集了某企业多个审计项目的 3 600 条数据作为实验数据，如表 2 所示。

表 2 实验审计项目数据表（部分）

ID	交易金额 / 元	交易类型	凭证编号	凭证状态	...	是否异常
1	10 000	采购	PT-20230401-001	已审核	...	0（正常）
2	25 000	销售	PT-20230402-002	待审核	...	0（正常）
3	5 000	报销	PT-20230405-003	已支付	...	1（异常）
4	8 500	工资发放	PT-20230410-004	已发放	...	1（异常）
5	3 100	预付款	PT-20230507-005	已支付	...	1（异常）
6	12 650	借款	PT-20230518-006	待审批	...	0（正常）
...	...	...	...	...	...	...
359	7 500	退货	PT-20230609-007	已处理	...	0（正常）
360	9 640	投资收益	PT-20230910-008	已入账	...	0（正常）

表 2 所示的 360 条实验审计项目数据中，正常数据 300 条，异常数据 60 条。经过缺失值填充、异常值处理等一系列预处理后，应用于实验组和对照组中审计数据异常主动预警方法的性能测试上。

5.2 实验指标

在本次实验中，为评价实验组中方法和对照组中两种方法在实验数据集上的主动预警效果，根据实验结果生成表 3 所示的混淆矩阵。

表 3 混淆矩阵

真实结果	预警结果	
	0	1
0	真正例 A 279	假负例 B 21
1	假正例 C 6	真负例 D 54

基于表 3 所示混淆矩阵，采用 G-mean 指标作为实验指标，其具体计算公式为：

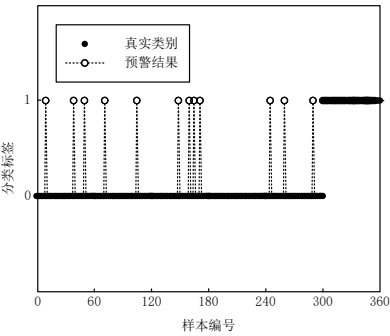
$$G=\sqrt{\frac{A}{A+B}\times\frac{D}{D+C}}$$

(9)

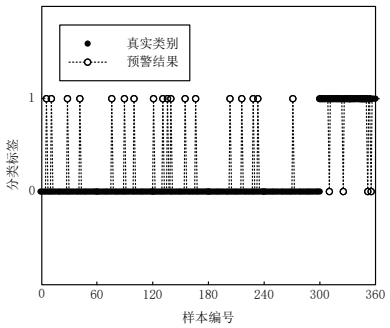
式中：G 表示 G-mean 指标，是一种用于衡量不平衡样本分类性能的综合评价指标，其值越大，说明审计数据异常主动预警效果越好。

5.3 结果分析

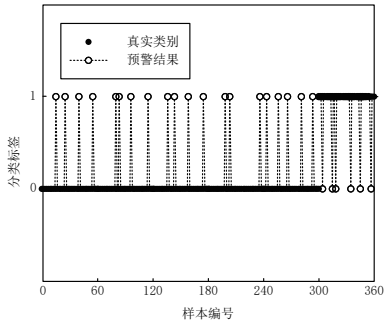
在完成实验组中方法和对照组中两种方法下的实验审计项目数据异常主动预警后，统计并整理各方法下的数据异常预警结果，如图 1 所示。



(a) 所提孤立森林算法预警结果



(b) 生成对抗网络方法预警结果



(c) 卷积神经网络方法预警结果

图 1 审计数据异常主动预警实验结果

从图 1 看出，孤立森林算法覆盖所有异常数据，G-mean 指标最优达 0.96。这一优异表现主要得益于近似马尔科夫毯特征选择方法的应用，该方法能够有效剔除冗余特征，保留与异常检测高度相关的关键特征，从而显著提升了模型的稳

定性和准确性。此外,本文在传统孤立森林算法的基础上引入了四分位法,改进了正常与异常数据评分的分界线划分方式,使得异常数据的识别更加精准,减少了误报和漏报的可能性。这种改进不仅提高了算法的检测精度,还增强了其在实际应用中的鲁棒性。同时,所提方法还具备主动预警机制,能够实时分析审计数据,及时发现潜在风险,为企业提供决策支持,从而有效降低风险发生的可能性。综上所述,本文提出的基于改进孤立森林算法的审计数据异常主动预警方法,在特征选择、算法改进、预警机制和性能指标等方面均表现出显著优势,不仅能够提升异常检测的准确性和效率,还为企业审计提供了强有力的技术支持,具有广泛的应用前景和实际价值。

为展示审计效率,分析3种预警方法精确率随召回率变化,结果如图2所示。

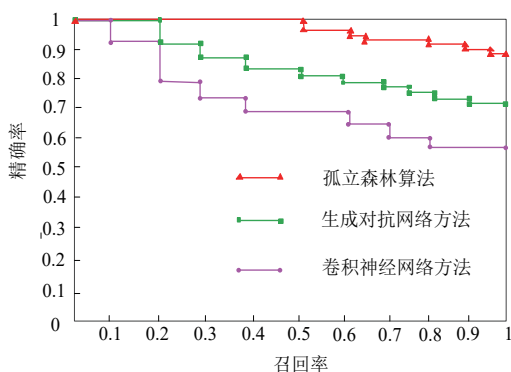


图2 三种方法精确率-召回率曲线图

根据图2得出,孤立森林算法AUC达0.936,高于生成对抗网络的0.716和卷积神经网络的0.812。这表明所提方法在审计数据异常预警上更准确有效,能精确区分正常与异常数据,从而提升审计效率和准确性。

综上所述,本文提出的基于改进孤立森林算法的审计数据异常主动预警方法,不仅在性能指标上优于其他主流算法,还在实际应用中展现出更高的准确性和稳定性,为企业审计提供了更加可靠的技术支持,具有重要的实践意义和推广价值。

6 结语

本文针对审计数据异常检测问题,提出了一种基于改进孤立森林算法的主动预警方法,通过引入四分位法改进常规孤立森林算法,有效提升了审计数据异常的检测性能,为审计领域的智能化、自动化发展提供了新思路和技术支持。

参考文献:

- [1] 王德文,潘晓飞,赵红博.基于改进生成对抗网络的时序数据异常检测[J].计算机工程与设计,2024,45(3):762-

768.

- [2] 傅世元,高欣,张浩,等.基于元学习动态选择集成的电力调度数据异常检测方法[J].电网技术,2022,46(8):3248-3261.
- [3] 钟杰,罗冲,张恒,等.基于相关性参数选择的飞行数据异常检测[J].北京航空航天大学学报,2024,50(5):1738-1745.
- [4] 吴花平,黄尹薇,刘自豪.基于K-means聚类算法的碳排放审计预警研究[J].中国注册会计师,2022(12):14-20.
- [5] 陈艾荣,李梓巍,潘玥,等.基于本福特定律的桥梁健康监测数据审计方法[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(4):534-541.
- [6] 何家辉,程志君,郭波.联合字典学习与OCSVM的遥测数据异常检测方法[J].航空学报,2023,44(13):207-219.
- [7] 张建,胡小锋,张亚辉.基于自学习的刀具加工过程监测数据异常检测方法[J].上海交通大学学报,2023,57(10):1346-1354.
- [8] 凌继红,邢金城,李昂,等.基于孤立森林算法的集中供热系统异常数据识别研究[J].暖通空调,2023,53(2):97-102.
- [9] 唐立,郝鹏,任沛阁,等.基于改进孤立森林算法的无人机异常行为检测[J].航空学报,2022,43(8):584-593.
- [10] 魏泰,贺少雄,胡子武,等.基于改进孤立森林算法的风电机组异常数据清洗[J].科学技术与工程,2024,24(9):3691-3699.
- [11] 范斌,宁德军,卢俊哲,等.基于加权KNN与代价敏感多分支深度神经网络的审计数据异常检测[J].计算机应用与软件,2024,41(2):100-108.
- [12] 李金花.基于关联规则的医院内部审计异常信息挖掘方法[J].信息与电脑(理论版),2023,35(21):211-213.

【作者简介】

蔡玲嘉(1989—),女,广东汕头人,硕士,高级工程师,研究方向:数字化、审计。

李雄(1987—),男,陕西渭南人,硕士,高级会计师,研究方向:审计、信息。

王泽涌(1988—),男,湖南湘潭人,本科,高级工程师,研究方向:电气工程、软件工程。

陈哲瀚(1984—),男,广东陆丰人,本科,工程师,研究方向:软件工程。

(收稿日期:2024-10-22)

民航运价搜索服务平台云化改造研究

张宏海^{1,2} 杨光亮³ 贾永强^{1,2} 田 丰^{1,2} 崔斌豪^{1,2} 刘中一^{1,2}

ZHANG Honghai YANG Guangliang JIA Yongqiang TIAN Feng CUI Binhao LIU Zhongyi

摘 要

在各类航空业务中, 运价搜索业务逻辑复杂度较高, 对高可用性、可靠性、大数据并发处理性能要求也较高。从业务角度分析, 随着民航业的快速发展, 业务量随之快速增长, 业务需求也在快速变化发展, 对整个系统的云化改造诉求也随之产生。从技术角度分析, 国产化技术的快速发展, 业务数据量级的快速增长, 多技术融合的架构升级, 符合系统云化改造升级的趋势。然而, 系统架构云化改造并非简单地将系统从传统机房“搬到”云环境, 将非国产化技术替换为国产化技术即可, 需要解决整个系统架构的改造与设计, 兼容性、可用性、扩展性、安全性以及故障可恢复性等一系列问题。面对上述问题, 文章提出了一种运价搜索服务平台云化改造研究的设计方法, 从本地环境切换到本地+云平台双环境, 再到完全云平台环境的整个改造设计, 通过平台兼容改造、应用迁移、混合环境数据同步、集群规模水平弹性扩展技术, 实现高可用性、高安全性、高扩展性、高性能的诉求, 并得到大规模、长期运行的真实系统验证。

关键词

信创; 民航; 机票搜索; 云平台

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.032

0 引言

近年来, 随着民航领域的快速发展以及人们生活水平的不断提高, 选择民航出行的人群越来越多, 通过线下及互联网查询票价的需求也随之增长, 从而促使民航业对运价搜索系统产品的快速更新、性能提升提出了强烈需求。在新兴科技驱动下, 民航业国产化、数字化转型取得了阶段性成果。随着民航业国产化、数字化转型的深入, 民航科技对业务创新发展的驱动作用越发明显。

从业务角度来看, 运价搜索业务是业界内公认的业务逻辑最复杂的民航业务之一, 其业务功能涵盖航司、航班情况、进港时间、离港时间、日期、舱位情况、折扣、经停点、餐食、行程等一系列业务纬度, 旅客的每一次票价查询, 都涉及多项业务纬度的组合、计算、排序等核心功能。对整个运价搜索系统的数据处理性能、并发能力、可用性都有较高要求。并且在出行高峰、促销高峰时段, 突然增长的业务数据量, 对系统集群的数据吞吐能力具有较强的挑战。

从技术角度来看, 随着国产化、云原生等技术的快速发展与日趋成熟, 作为民航业核心应用系统运行的运价搜索服务平台, 也面临着重构和改造的需求, 以满足当前行业国产

化、数字化转型。在云计算、大数据、人工智能、区块链等新技术的广泛应用背景下, 可靠性、可用性、安全性、敏捷性、经济性以及先进性是当前数字化转型的重要目标。随着国际竞争环境日益复杂, 作为与人们日常生活息息相关的民航业, 必须保证其业务数据的安全性, 系统架构的核心技术的自主性。基于现有云原生技术栈的基础, 将运价搜索服务平台云化, 通过采用多个技术栈融合改造, 可以规避单个技术栈不可用风险, 提高系统可用性、安全性、系统横向弹性可扩展性。这种云化改造, 既符合当今系统国产化的发展趋势, 又能满足提高系统性能, 提升系统弹性扩展能力。

运价搜索业务作为民航业的核心业务, 对于高并发、高性能、高可用需求极高。为保障群众出行方便, 整体系统要求高性能、安全可靠、能够长期稳定运行, 保障7×24 h不宕机。因此, 运价搜索服务平台云化改造, 需要解决以下几个问题:

- (1) 如何保障云化改造过渡期, 运价搜索业务可用, 不受影响?
- (2) 如何解决云化改造所涉及的兼容性问题?
- (3) 如何利用云原生技术实现系统弹性扩展能力?
- (4) 如何验证经过云化改造的系统正确性?

为解决上述问题, 本文提出并实现一种高性能、高可用、能够弹性扩展的基于华为云的云化改造方法。主要方法和贡献体现在以下几个方面:

- (1) 提出了一种混合云架构。

1. 中国民航信息网络股份有限公司 北京 101318

2. 北京市民航大数据工程技术研究中心 北京 101318

3. 沈阳民航东北凯亚有限公司 辽宁沈阳 110000

- (2) 提出了一种对系统集群进行弹性伸缩扩展的方法。
- (3) 提出了一种对多技术栈兼容的改造方法。
- (4) 提出了一种对云化改造的系统正确性验证的方案。

1 云原生技术栈系统设计与实现

运价搜索服务平台云化改造，为提高系统的可用性、安全性，要尽可能的采用云原生技术栈，尽量避免采用自搭中间件服务，以此提升整体系统的可用性、安全性。然而，也要保持应用系统的原有业务逻辑，保证业务流程不变、业务功能不变、应用处理逻辑不变、接口不变、数据模型不变，基于这些“不变”原则，才能保证对原有业务不产生影响。

在对运价搜索服务平台云化改造前，基于 5 个“不变”原则，要先研究哪些系统组件可以替换为云原生组件？哪些服务应用需要部署在 ECS 上？这些应用服务具备哪些特征？适用于哪种类型的 ECS？对集群做弹性扩展时，哪些应用服务实例需要增加/减少？哪些不需要改变？

通过一系列分类、分析、研究以及大量阅读分析云平台技术文档及相关云技术论文后，本文将系统所使用的中间件服务，全部替换为云原生的中间件服务，包括数据缓存 redis、配置服务 zookeeper、分布式日志服务 ELK、负载均衡器、消息通信服务 kafka。

需要部署到 ECS 上的应用服务有运价搜索服务平台核心服务 SSA 引擎服务、用户中心服务、安全中心服务、流水信息统计 Billing 服务、SSA 引擎服务状态监控 SSAMonitor 服务。

对集群进行弹性扩展时，主要通过增减核心服务 SSA 引擎服务实例个数来提升整个系统集群的服务吞吐量，所以要对部署 SSA 引擎服务的 ECS 定期构建服务镜像，以便在需要对集群服务进行弹性扩展时，能够快速扩展收缩集群规模。根据不同类别服务、不同的需求场景，经过分析之后确定，除用户中心服务和安全中心服务外，其他应用服务更适合鲲鹏高 IO 型 ECS、鲲鹏高 IO 型搭载鲲鹏 920 处理器及 25GE 智能高速网卡，提供 DDR4 及高性能网络，更加适合运价搜索服务平台系统的内存大数据集处理，高网络需求应用场景^[1-2]，如图 1 所示。

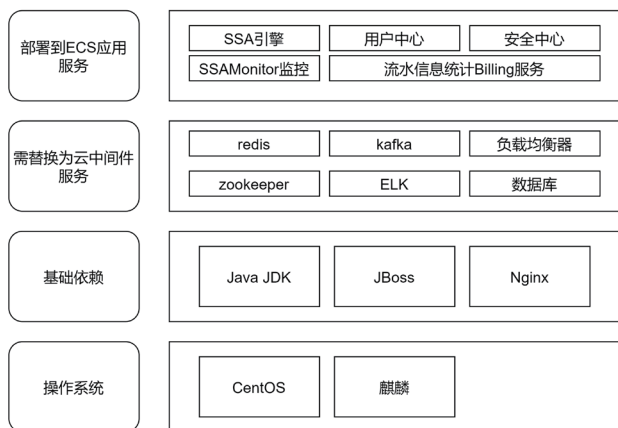


图 1 总体架构迁移目标

将云化改造涉及到云原生技术的系统组件部分，从技术实现上进行核验，是否需要做兼容性修改。经核验及多次试验，需要做兼容性修改的部分为：

(1) 数据缓存服务 redis。云下环境的数据缓存服务 redis 为 sentinel 哨兵模式，云化改造需要修改为读写分离模式，改造方法为通过使用条件 bean 来动态切换 redis 连接模式^[3]。

(2) 数据库部分。云下环境的数据库为 EDB，部分 SQL 语句中使用 EDB 特有的函数，这些函数通过使用原生 SQL 语法替换，以此兼容云上环境的数据库。

(3) 消息通信服务 kafka。云下环境的消息通信服务 kafka 主题为自动创建模式，云化改造需要提前将 kafka 主题以及分区进行创建^[4]。

兼容性问题解决后，进行安全方面研究设计，经过多次讨论及调研成果，在云原生负载均衡器中添加 https 安全证书，负载均衡器不直接连接核心服务。负载均衡器将请求发送给 DMZ 区服务，由 DMZ 区服务校验请求来源，请求内容后，再发送给核心服务，以此提升整个系统的安全性。经一系列研究设计及兼容性修改工作后，运价搜索服务平台云化改造设计基本完成，申请相关云原生中间件服务，ECS 实例完成部署实现^[5-6]。如图 2 所示。

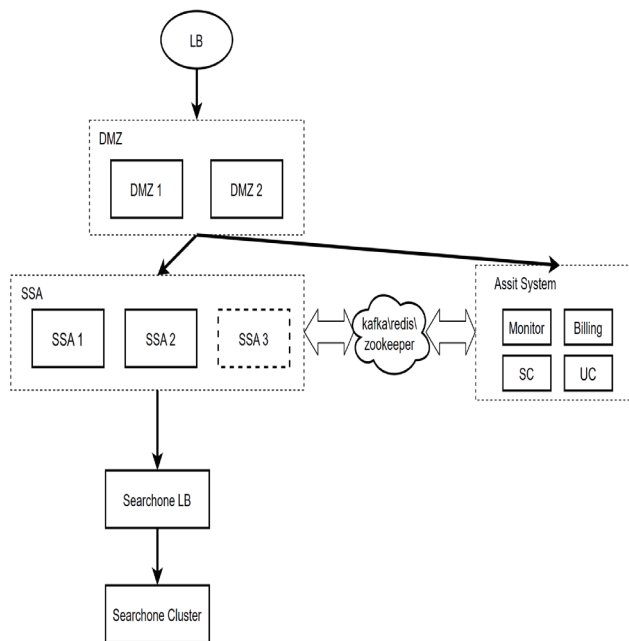


图 2 云化改造架构图

1.1 和航信机房系统的数据同步设计与实现

为保障对运价搜索服务平台云化改造过渡期间，运价搜索业务正常运行，在云化改造过渡期间内，需要在航信机房和云平台上分别部署数据交换服务，数据交换服务要将航信机房的数据同步到云平台上，也要将云平台上的服务同步到航信机房，以此保证两个环境的数据一致性。

为更好地解决如何将混合云中 2 个环境数据同步。本文申请了一条航信机房到云平台的网络专线，通过专线专用，既能保障数据同步的高效性、稳定性，同时也能极大提高数据传输过程中的安全性。并在网络专线两端分别部署了数据同步服务。数据同步服务负责 2 个环境间的数据交换。为保障数据的及时高效同步，同时又能尽可能占用少量带宽，让 2 台数据同步服务对数据进行更新标记，以此来确定增量数据部分，然后对增量数据进行同步。

因专线带宽有限且固定，所以为保障专线带宽的稳定及可用性，数据同步服务要实时监控网络带宽，当带宽使用量达到设定的阈值时，要进行报警，以便可及时让相关技术人员介入排查问题。同时要控制数据流大小，保障专线网络通畅稳定，使专线带宽使用情况可控。数据同步服务使用 nginx+lua 脚本实现，两端各部署 2 个节点，通过双活实例保障数据同步服务能够达到高可用的诉求，并且也可以在一定程度上提高数据同步效率，提高时效性^[7]。如图 3 所示。

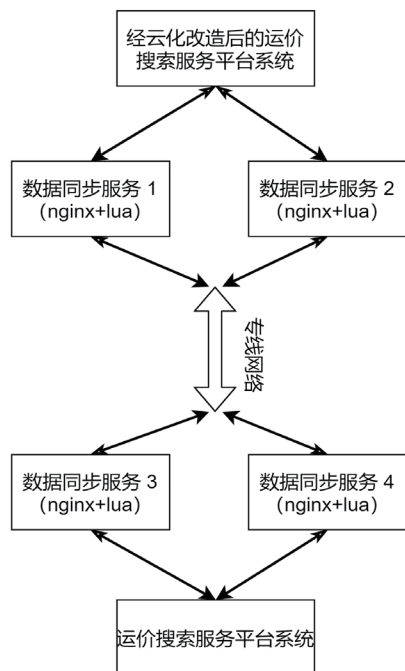


图 3 混合云数据同步设计图

1.2 集群弹性扩展实现方法

运价搜索业务是民航业的重要业务之一，有数据量大、访问频率高、逻辑复杂、业务纬度多、高峰时段数据增幅大的特征，因此会导致在高峰时段，数据量、访问频次、带宽使用量会突然大幅度激增，而过高峰时段后，数据量、访问频次、带宽使用量又会大幅度回落。因此这一现象会产生一个资源分配的问题，如何分配资源能使系统资源在非高峰时段不产生浪费，高峰时段又能支撑突然激增的业务，也是云化改造面临的一个挑战^[8]。

经过系统的研究及技术调研和大量的可行性试验，通过构建核心服务的 ECS 的系统镜像，在业务高峰时段，使用核心服务的系统镜像，快速创建新的服务实例来满足对激增的业务量的支撑。当过高峰时段过后，再将新建的服务实例回收，完成资源释放工作，以此来保障系统性能与资源分配的协调，既能保障高峰时段服务规模可快速扩展，保障业务的正常运行，又能在非高峰时段，回收不必要的资源，提高整体资源利用率，避免造成不必要的能源浪费，也提高整体系统的经济性^[9]。如图 4 所示。

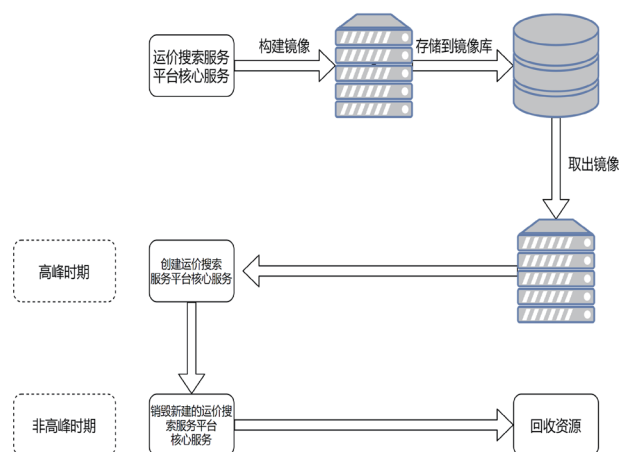


图 4 集群弹性扩展示意图

1.3 系统正确性验证

为保障运价搜索服务平台改造后业务正常运行，本文设计的验证方案，如图 5 所示。

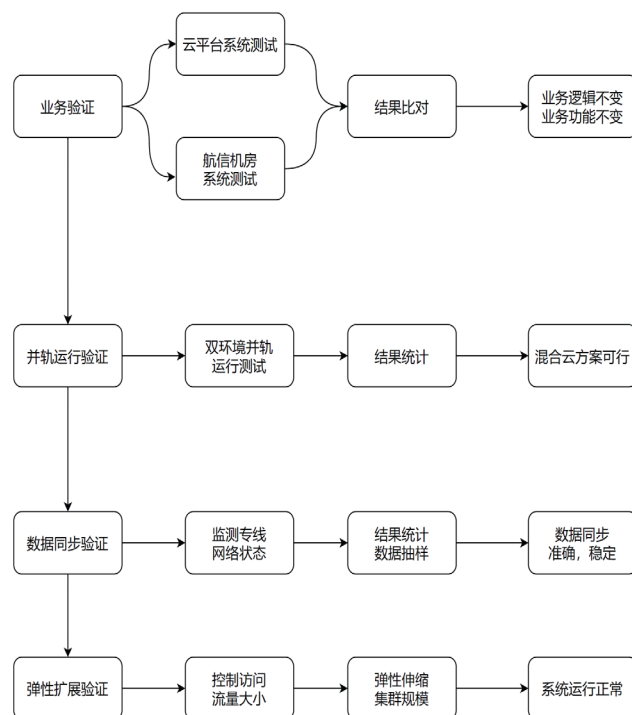


图 5 系统验证方案设计

(1) 混合云双环境独立运行相同的请求, 对比结果数据、验证业务逻辑、业务功能不变、业务结果数据要保障一致性。

(2) 混合云双环境并轨运行, 验证混合云整体架构设计的可行性、业务数据的一致性。

(3) 监控专线网络状态, 验证混合云双环境通信的正确性、稳定性、时效性、安全性。

(4) 控制请求流量大小, 测试集群弹性扩展功能的可行性验证^[10]。

2 研究成果与未来展望

基于云原生技术栈完成了运价搜索服务平台云化改造, 并与云下环境并轨运行, 这在业界尚属首次实现。在鲲鹏云服务器及麒麟操作系统中完成部署及运行验证, 为系统国产化转型取得阶段性成果, 为保障运价搜索服务平台系统的技术性保障前进了一大步。在系统上线中, 采用创新性的双环境并轨运行方案及弹性扩展策略, 保障了系统的平稳运行、资源的合理分配使用。最终成功实现了运价搜索服务平台核心业务国产化。云化转型的应用示范测试, 验证了其可行性、稳定性、扩展性, 满足了航空业应用示范系统的投产要求。

3 结语

本文提出了一种混合云架构系统, 以满足航空业的高性能、高网络、大数据、高可用、支持弹性扩展的诉求。通过双环境并轨运行系统结构设计, 基于云原生技术栈, 设计了一套系统云化改造方案, 在实际运价搜索服务平台系统的大规模, 长时间验证中, 这一方案表现出了良好性能, 更加合理的资源分配使用、更安全、可用性更高的优势。未来的工作方向包括: 继续探索云原生技术栈, 国产化技术栈, 促进航空行业国产化、数字化、云化转型升级。

参考文献:

- [1] 缪振宇, 王淑萍. 数字经济浪潮中我国运营商云计算业务发展探析[J]. 现代商贸工业, 2024,45(13):38-40.
- [2] 那嘉. 云计算环境下的信息安全挑战与应对策略研究[J]. 家电维修, 2024(7): 38-40.
- [3] ABUEID A I. Big data and cloud computing opportunities and application areas[J]. Engineering, 2024, 14(3): 14509-14516.
- [4] ZHANG S T, WANG H T, WANG C, et al. An improved RANSAC-ICP method for registration of SLAM and

UAV-LiDAR point cloud at plot scale[J]. Forests, 2024, 15(6): 893.

- [5] CHEN P Y, CHEN X R, XIE J S, et al. Design and implementation of cloud platform for nuclear accident simulation[J/OL]. Frontiers in energy research, 2023[2024-01-19]. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1075224>.
- [6] 黄倚霄, 曾海剑, 黄东江, 等. 信创体系下跨 x86 和 ARM 双栈架构的流水线探索与实践[J]. 通信世界, 2023(18):37-38.
- [7] 侯勇. 银河麒麟操作系统高可用技术的设计与实现[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [8] 苏月. 华为鲲鹏 920: 一颗勇敢的“芯”[J]. 计算机与网络, 2019, 45(21): 72-73.
- [9] HORVATH A B. Cloud-based solutions used by hungarian SMEs and analysis of its effects[J/OL]. Acta academicae beregsasiensis, 2023[2024-04-10]. <https://doi.org/10.58423/2786-6742/2023-3-101-111>.
- [10] 金磐石, 张晓东, 邢磊, 等. 建行信用卡系统全栈国产化改造研究[J]. 计算机技术与发展, 2024,34(6):192-200.

【作者简介】

张宏海(1978—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 民航信息化技术。

杨光亮(1988—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 本科, 工程师, 研究方向: 民航信息化技术。

贾永强(1977—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 工程师, 研究方向: 民航信息化技术。

田丰(1980—), 男, 北京人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 中间件、云计算架构。

崔斌豪(1986—), 男, 北京人, 本科, 工程师, 研究方向: 民航运价搜索领域、信息可视化。

刘中一(1987—), 男, 山西天镇人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 民航客票运价系统、密集计算系统。

(收稿日期: 2024-11-12)

基于超导重力仪数据采集系统的智能补数与安全加密

修宏祥^{1,2,3} 陈玉秀^{1,2,3}

XIU Hongxiang CHEN Yuxiu

摘要

超导重力仪长时间测量记录重力信号，为我国精密测绘与地球动力学研究提供强大数据支撑，数据采集系统通过串口实时采集超导重力仪的各项监测数值。针对系统数据缺失与传输安全问题，文章使用 C++ 语言编写缺数智能识别与批量补数程序，同时加入 SSL 加密传输机制。该技术在全国部分台站应用运行良好，数据完整率、准确率与安全性均得到保障。

关键词

智能补数；数据安全加密；超导重力仪；串口采集；C++ 语言

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.033

0 引言

超导重力仪作为一种对重力场变化极为灵敏的相对重力仪，因其连续性好、观测精度高、性能稳定、漂移小等优势被广泛用于地球重力监测与地震监测场景中^[1]，如图 1 所示。



图 1 超导重力仪设备

超导重力仪数据采集系统针对超导重力仪设计开发，主要包含通信配置、实时监测、数据存储、仪器监控与数据转发模块。在通信配置与实时监测板块，系统与超导重力仪间采用 RS232 串口通信，实时截取设备串口输出的数据流字符串，显示多个通道数据值。数据存储中，系统采集 21 通道每秒监测数值，将记录的超导重力仪实时数据存储为 .tsf 格式，每份文件记录 24 h 内 86 400 条数据。仪器监控模块中，通过摄像头、空气质量检测仪等设备实时监测超导重力仪的

工作环境。数据转发模块内，通过地震系统内网，接受远程端发来的数据获取指令，将系统本地存储的数据流转发给远程端读取^[2]。由于超导重力仪数据采集系统普遍布设于全国各地台站内，部分台站设立于无人值守的山洞内，运行过程中难免因为断电、串口线破损、UPS 更换、主机重启、死机等原因造成存储数据缺数现象，而超导重力仪内记录的原始重力变化数据十分珍贵，保证数据的连续性与完整性，对地球物理研究具有重大意义^[3]。传统重力仪数据采集系统进行网络化改造时，在现场需要部署一个硬件式网络数据采集器，每台重力仪都需要唯一的一台网络数据采集器与之对应，部署过程麻烦。网络数据采集器相当于一个数据存储转发服务器，在地震系统内部使用时需要将网络数据采集器连入地震系统内网，远程使用者可通过地震内网使用远程软件或网页来获取网络传输的数据。网络数据采集器通常通过 NI 数据采集卡制作，其价格昂贵且使用及维修成本较高。当网络数据采集器损坏时，重力仪的数据无法进行实时采集、存储及网络传输，且需要专业的硬件工程师进行维修，会花费大量的时间，严重影响重力仪的实时性传输。考虑到这一方面，本文就前期准备工作开发了现场端软件来代替传统硬件数据采集器，借助超导重力仪的现场端计算机，通过软件安装进行部署，使用起来更灵活，部署更方便。当现场端主机出现数据采集及传输故障时，仅可通过更换现场端主机或者重新安装软件便可恢复运行，节省了维修时间，保证重力数据传输能够在短时间内恢复。

因此，本文结合全国各地震台站的要求和刚需，针对数据缺数与传输安全问题，在 VS2016 开发环境下，使用 C++ 语言编写缺数智能识别与批量补数程序，在远程设备数据传输中加入 SSL 加密传送机制，实现数据断数统计、补数自动替换存储并安全更新上传远程服务器功能。

1. 中国地震局地震研究所 湖北武汉 430071
2. 武汉地震科学仪器研究院有限公司 湖北武汉 430071
3. 湖北省重大工程地震监测与预警处置工程技术研究中心 湖北武汉 430071

1 数据采集与文件存储

1.1 串口采集

超导重力仪采集系统通过 RS232 连接设备串口采集实时数据流,系统内具备有初始化串口信息设置功能,设置信息包含串口数据位、校验位、停止位、波特率和端口号信息,通过设置符合设备接入要求后,打开端口每秒采集超导重力仪输出的实时数据,其中每条数据原始为 ASCII 数据流,解码后格式为:

“2024 09 24 16 20 52 0.355 478 999.415 35 -0.008 91 008 974 0.112 87 -0.127 41 0.452 31 0.21 485 1.25 751 2.656 69 3.214 86 22.145 58 4.225 65 1.235 89 4.365 89 87.254 75 35.259 75 45.225 75 0.014 58 0.22 542 20.897 41 2 147 883 675”

数据流字段具体含义在 1.2 节数据文件存储中详细介绍。系统内数据采集和串口设置流程如图 2 所示。

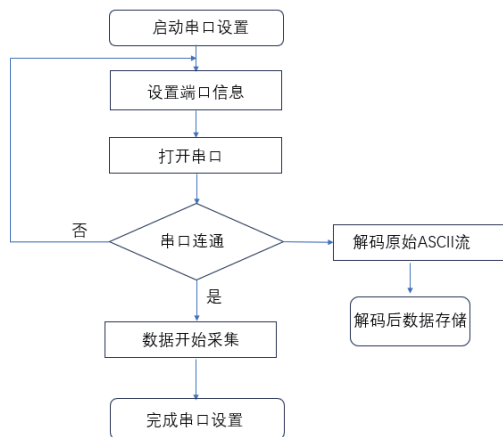


图2 数据采集和串口设置

1.2 数据文件存储

超导重力仪观测数据通常以串口形式输出,时间间隔为 1 s,串口输出 21 个通道数据,通道编号为 data1、data2、…、data21,每个通道代表不同实际含义,输出包含仪器测量实时重力电压值、仪器测量实时大气压力值等 21 个数值信息,其输出任意一条观测数据格式固定为包含 264 个字符组成的字符串形式,每条输出的 21 个通道字符数据格式为: [YYYY][sp][MM][sp][DD][H or HH][sp][M or MM][sp][S or SS][sp][sp][sp][sp][DATA1][sp][sp][sp][sp][DATA2]……[sp][sp][sp][sp][DATA21][cr][lf]。数据中 [sp] 代表为空格、[DATA] 代表 21 个通道的数值信息、[YYYY] 代表年份、[MM] 代表月份、[DD] 代表日期,而 [H or HH][M or MM][S or SS] 代表 h、min 和 s 信息。

系统数据存储为日志文件,数据流来源为串口采集的超导重力仪实时监测数据。系统存储日志文件时运用定时

器 Timer, 在开始存储时刻开启第一个定时事件 Timer1, 程序检测对应路径下是否存在当日文件字段命名的日志 .tsf 文档,若仅检测为存在昨日文档,则创建日期为今日文件,即日志文件更换存储操作,在 .tsf 文件创建成功后,系统内开启下一个定时器事件计时。日志文件存储流程图如图 3 所示。

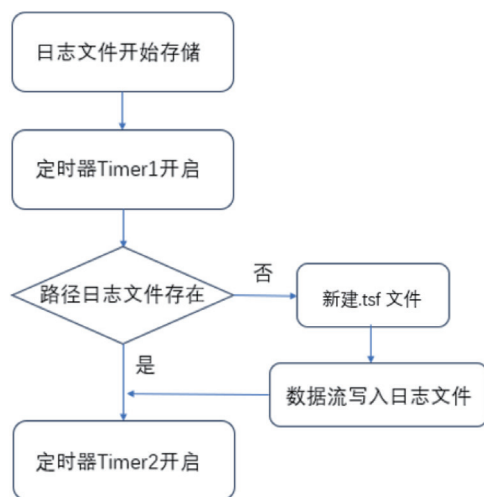


图3 .tsf 日志文件存储

2 智能补数与安全加密

2.1 算法设计

由于超导重力仪数据采集系统布设环境等因素,在运行过程中难免因为断电、串口线破损、UPS 更换、主机重启、死机等原因造成存储数据缺数现象,基于 C++ 语言的缺数智能识别与自动补数算法目标为消除因系统环境影响导致数据丢失问题,确保超导重力仪运行正常情况下,数据的完整与连续性。智能补数算法过程如下,流程图如图 4 所示。

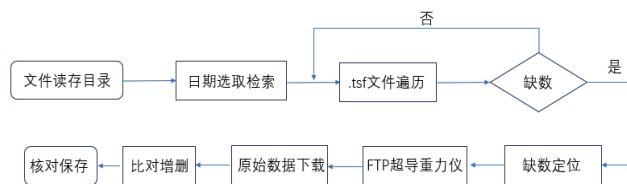


图4 自动补数流程图

(1) 首先定义函数文件读取目录,输入读取数据文件夹目录和保存数据文件夹目录(假定为 D:\Runtime\iGravData),相应代码 filepath='D:\Runtime\iGravData'; savepath='D:\Runtime\iGravData'。

(2) 调用 DateChoose 函数设置输入参数,即缺数文件检索开始日期和结束日期(开始日期为系统内串口联通时刻起,保证当超导重力仪数据接入后即开始智能补数检测,结束日期默认为系统运行即不结束)。

(3) 缺数 tsf 文件遍历。遍历本地已存 .tsf 文件,系统

本地存储单个文件是否大小为 86 400 条数据, 若小于对应数据量, 则确定确属文件名及所在位置。

(4) 缺数定位。调用 LoseFind 函数, 相应代码 fopen (" 遍历到文件路径 ", "w"); fseek 函数定位每一行数据开头, fread 具体数据, 判断是否为 [YYYY][sp][MM][sp][DD][H or HH][sp][M or MM][sp][S or SS] 格式, 且距离上一行数据事件间隔 1 s, 若函数 return 数值 0, 则代表找到缺数定位点。

(5) 读取超导重力仪内原始数据并下载。调用 iGrav_Download 函数, 利用程序执行 FTP 指令, 连接超导重力仪, 文件名查找得到上一步中遍历得到的缺数文件, 下载文件。

(6) 从超导重力仪下载的原始数据, 通过 ftp 传输读取保存至系统本地对应文件夹 D:\Runtime\iGravData 中, 调用 Replace_Save 函数。

(7) 删除操作。由于已有新的对应时间点原始完整文件生成, 即删除缺数 tsf 文件遍历操作中得到的缺数文件名。

(8) 比较核对操作。重新对系统数据文件夹内所有文件遍历, 判别已完整存储文件内数据是否为 86 400 条, 且每一行开头保持正确格式访问。

2.2 传输安全加密

在智能补数与缺数定位算法中, 当系统识别到本地保存 .tsf 文件存在缺数现象时, 会连接并登录 FTP 服务器从超导重力仪数采内下载原始仪器数据, 并进行对比分析补数。而传统 FTP 服务器仅需输入服务器地址、用户名、密码和对应开放端口号即可读取数据^[4], 本系统将 SSL 加密连接方式自动融合入类属性中, 并限制 FTP 登录用户, 加强数据传输过程安全性。

系统开发过程通过调整 ServicePointmanager 类中 ServerCertificateValidationcallback 属性^[5], 保证与 FTP 连接对象间能随机建立安全链接证书。与此同时, FTPWebrequest 对象实例中属性 Usessl 应设置为 true, 以保证客户端得到使用 SSL 协议的指示。

系统中 FTP 登录模块通过限制 FTP 用户目录方式增强传输安全性, 可通过程序修改 conf 配置文件 VSftp, 具体操作为 chroot_LIST_enable=yes; chroot_LIST_file=/etc/vsftpd/chroot_LIST。

3 软件运行与实验分析

3.1 软件运行

智能补数与安全加密程序在微软 VS2016 环境下使用 C++ 语言开发, 集成于超导重力仪数据采集系统内, 程序功能页面如图 5 所示。包含超导重力仪 ID 输入、台站信息填

写、补数时间筛选、文件夹路径设置以及远程连接登录 FTP 的 IP、用户名和密码输入功能。由于程序内加入 SSL 加密传输机制, 且对 FTP 用户目录加以限制, 可有效防止其他用户或匿名用户访问设备数据。

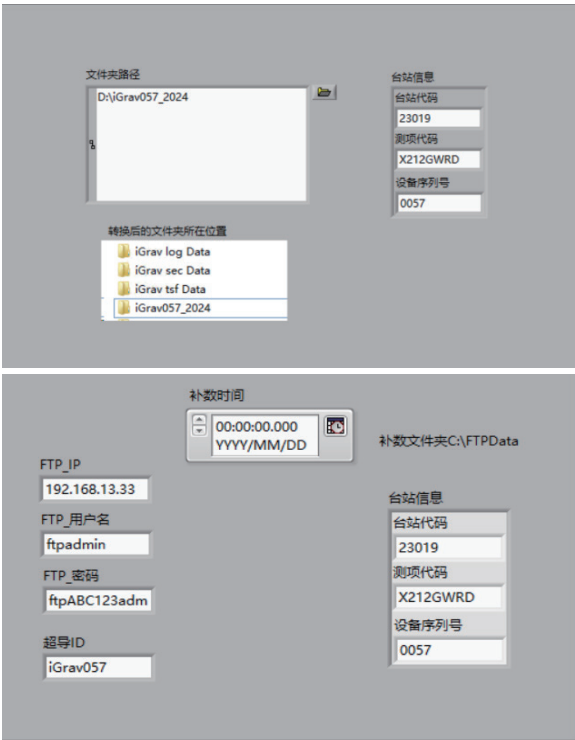


图 5 补数设置页面

3.2 实验分析

数据选取安装在吉林省白山市抚松监测台站内超导重力仪数据采集系统 2024 年 7 月和 8 月完整数据进行对比实验, 其中 2024 年 8 月数据采集系统内集成智能补数与安全加密程序, 实验从数据完整性与准确性两个维度展开研究与分析, 实验结果如图 6、7 所示。

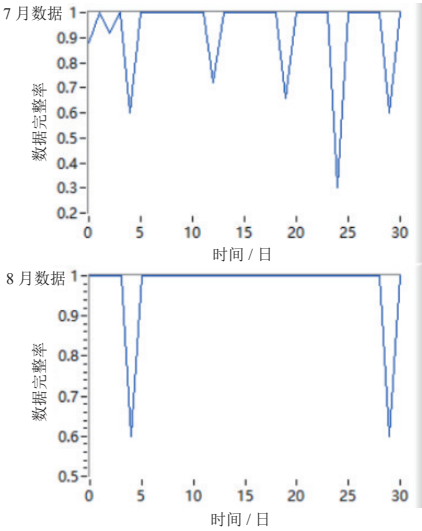


图 6 数据完整率结果

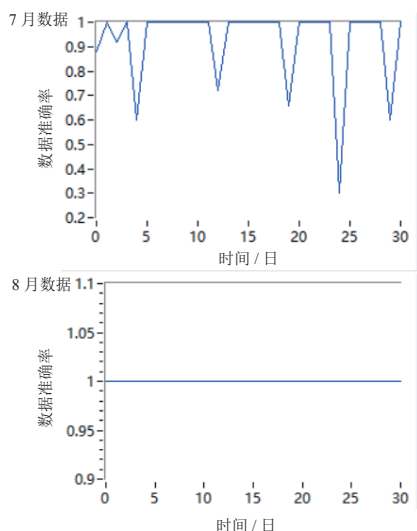


图7 数据准确性结果

在数据完整率实验中,数据完整率计算方式为当日采集系统本地存储数据量大小/超导重力仪仪器内记录数据量大小。系统在未加入智能补数程序前,日志文件显示当月数据采集系统存在重启2次、断电5次情况,导致系统内存在7天数据存储缺失现象。系统在集成智能补数程序后,8月仅存在两次数据缺失情况,且查看系统日志文件显示月内存在重启、断电等故障5次,有效减少数据缺失率,而两次文件记录不完整原因为超导重力仪仪器内部本身断电,本身记录即不完整。

在数据准确性实验中,准确率代表采集系统本地存储数据与超导重力仪仪器内记录数据是否完全一致,计算方式为内容一致数据量/超导重力仪仪器内记录数据量。加入智能补数程序后,当月数据准确率保持在完全一致,而系统在未加入智能补数程序前,由于存在缺数现象导致出现多次准确率低于1现象。

3.3 讨论

超导重力仪智能化网络数据采集控制系统安装布设于地震监测台站本地,可接收台站所有已安装设备的实时传输数据,并进行不同类型数据备份存储;且系统具备多流数据传输能力,针对非标准仪器可进行通信协议转换,使仪器数据传输符合地震行业规范要求;此外系统配备多类型动环监测传感器,实现台站电力系统监控、温湿度监测、人员入侵监测等,并可扩展不同类型监控手段,满足智能化地震台站的应用需求;系统具备地震预警信息接收能力,破坏性地震发生后,可对本地监测数据进行预处理,震后进行快速参数产出并发布,提升震后应急处置时效性;系统具备地震台站仪器状态监控能力,通过实时数据分析发现台站仪器出现故障时,可将故障信息快速推送至大数据平台,缩短运维时间。

4 结论

超导重力仪数据采集系统智能补数与安全加密的自动处理程序提高原始数据存储完整率和准确率,同时减少人工操作步骤节省大量人力、物力。目前已在全国多处无人值守台站内运行使用,未来将针对不同环境下造成数据存储缺失问题展开深度学习包括生成对抗网络、循环神经网络等方法研究。智能补数与安全加密程序方法对有相关需求的人员具有一定参考与借鉴价值,可扩展在其他国家地震台站或相关领域推广使用。

参考文献:

- [1] 贾鲁,王世忠,王庆宾,等.基于Android系统的重力仪数据采集及计算软件开发[J].测绘科学,2017,42(3):132-136.
- [2] 黄金刚,张仰辉,郭林旺.测震台网数据传输补数技术[J].地震地磁观测与研究,2017,38(3):209-213.
- [3] 刘海英,杜晓通.Measurement Studio for Visual C++环境下小型工业监控软件的开发[J].工业控制计算机,2014(11):23-24.
- [4] 彭秀萍.基于C语言的加密解密软件的实现[J].成都大学学报(自然科学版),2011,30(4):328-330.
- [5] 张英琦.地球自由振荡模型检测与参数估计研究[D].淄博:山东理工大学,2024.

【作者简介】

修宏祥(1997—),男,湖北武汉人,硕士研究生,助理工程师,研究方向:软件工程技术研发,email:824373212@qq.com。

陈玉秀(1984—),通信作者(email:chenyuxiu2005@163.com),女,广东清远人,硕士,工程师,研究方向:地震工程与地震预警、软件开发。

(收稿日期:2024-11-13)

基于 K-means 的不平衡数据过采样研究方法

杨云熙¹
YANG Yunxi

摘要

随着机器学习在各领域的广泛应用,不平衡数据问题成为分类任务中的一个关键挑战。传统分类算法在处理类别不平衡时,往往表现出对多数类样本的偏向,导致对少数类样本的分类效果较差。为了解决这一问题,文章提出了一种改进的过采样方法——Pkmeans-SMOTE (Pkmeans synthetic minority over-sampling technique),通过结合 Tomek Links、K-means 聚类 and 自适应权重分配策略,有效优化了少数类样本的生成过程。实验结果表明, Pkmeans-SMOTE 在多个不平衡数据集上表现出色,特别是在 AUC、 F_1 -score 和 G-mean 等评估指标上,相较于传统的 SMOTE、Borderline-SMOTE2 和 kmeans-SMOTE 方法,具有更强的性能优势。

关键词

SMOTE; K-means; 不平衡数据; 聚类方法; 过采样

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.034

0 引言

随着机器学习技术的迅速发展,分类算法在数据分析和知识发现中发挥着重要作用。然而,数据不平衡问题常影响分类模型的表现,特别是少数类样本的识别能力。数据不平衡指某一类别样本数量远超其他类别,导致传统分类算法难以有效区分少数类和多数类,从而使模型偏向多数类,忽视少数类,影响分类效果^[1]。在医疗诊断、金融欺诈检测等领域,少数类样本的正确分类尤为重要,因此,解决不平衡分类问题成为机器学习领域的研究重点。

为应对这一问题,研究者们提出了多种方法,主要分为预处理方法和基于算法的方法^[2]。过采样技术作为一种重要的预处理方法,通过增加少数类样本来平衡不同类别间的样本数量,从而改善模型对少数类的分类性能。SMOTE (synthetic minority over-sampling technique)^[3]及其改进版本(如 Borderline-SMOTE^[4]和 kmeans-SMOTE^[5]等)通过生成新的少数类样本或优化采样策略,提升分类器的识别能力。尽管过采样技术在处理不平衡数据问题时展现出显著优势,但也存在一定的缺陷。

SMOTE 等方法可能引入噪声,生成不真实的少数类样本,进而导致模型过拟合,影响其泛化能力^[6]。同时,当数据集极度不平衡时,过采样可能生成大量冗余样本,增加计算开销,甚至降低训练效率^[7]。因此,如何在保留过采样技术优势的同时,减少其缺点,提升鲁棒性和泛化能力,成为当前研究的重要方向。改进的过采样方法不断涌现,优化样

本生成策略、控制噪声等方式已被广泛应用,进一步提高了过采样技术的性能^[8-11]。

1 理论知识

1.1 Tomek Links

Tomek Links 是一种基于集成思想的欠采样方法,主要用于解决数据不平衡问题^[12]。其核心思想是通过识别和去除多数类样本中与少数类样本相近的“边界”样本,从而减少对多数类样本的过拟合,并使分类器的决策边界更加清晰。具体而言, Tomek Links 方法通过计算样本对之间的距离,选择那些既属于多数类,又与少数类样本距离较近的样本对,这些样本对即为 Tomek Links。通过去除这些样本,减少了多数类样本的数量,从而在不增加少数类样本的情况下有效改善了分类器对少数类的识别能力。此方法不仅有助于提高分类性能,还能降低过拟合风险,特别是在处理类别不平衡数据时尤为有效。

1.2 K-means 聚类方法

K-means 是一种常用的聚类算法,通过将数据划分为 K 个簇,使同一簇内样本相似度最大、不同簇间相似度最小。算法以随机选取的 K 个质心为起点,迭代分配样本到最近的质心所在簇,并更新质心位置,直到质心稳定或达到最大迭代次数^[13]。K-means 计算简单、收敛快,适用于大规模数据,广泛应用于图像分割、特征提取和数据预处理等领域^[14]。其不足在于对初始质心敏感且对噪声不鲁棒,实际应用中常结合其他方法优化结果,如用于不平衡数据时提升合成样本分布合理性和分类性能。

1. 贵州财经大学信息学院 贵州贵阳 550025

2 Pkmeans-SMOTE 模型

Pkmeans-SMOTE 是一种改进的过采样方法，通过结合 Tomek Links、K-means 聚类 and 权重分配策略生成高质量的合成样本，应对不平衡数据问题。该方法利用 Tomek Links 技术划分样本为边界样本和安全样本，并通过自适应密度阈值识别边界区域，有效减少噪声干扰。随后，在每个区域内部应用 K-means 聚类，对样本分布进行细分，提取簇的局部特征和质心，精确刻画样本结构。结合样本分布特性设置权重，其中边界样本赋予更高权重，以强化复杂边界区域的生成优先级，同时引入指数衰减策略优化权重分布。最终，通过插值方法在各簇中生成新样本，确保样本分布的合理性，从而显著提升分类器对不平衡数据的性能。边界样本和安全样本的权重分别计算为：

w_i = \frac{n_i}{N_{boundary}} + \exp(-\theta \cdot 2)

w_i = \frac{n_i}{N_{safe}} + \exp(-\theta \cdot 3)

式中：n_i 表示第 i 个簇的样本数量；N_{boundary} 和 N_{safe} 分别表示边界簇和安全簇中样本总数；θ 表示一个调节指数衰减的参数。权重经过归一化处理后，用于控制不同簇中生成样本的比例。最终通过插值方法在各簇中生成新样本，确保样本分布的合理性，从而显著提升分类器对不平衡数据的性能。

3 实验分析

3.1 数据集

为了评估所提出模型的性能，本文选取 7 个来自不同领域的典型不平衡数据集进行实验。这些数据集涵盖多个应用场景，具有不同的样本数量、特征维度和类别分布特性，能够有效地测试模型在各类实际应用中的表现。表 1 展示了每个数据集的基本信息，包括样本总数、特征数、少数类样本数量，以及不平衡度（IR）。其中，IR 是衡量数据集类别不平衡程度的一个重要指标，定义为多数类样本数量与少数类样本数量的比值。较高的 IR 值意味着数据集的不平衡性越严重。公式为：

IR = \frac{\text{多数类样本}}{\text{少数类样本}}

表 1 不平衡数据集

数据集	数量	特征	少数类	IR
haberman	306	3	81	2.78
moon	1 100	2	100	10.00
segment2	2 145	16	165	12.00
seismic	2 584	18	170	14.20
wilt	4 819	5	257	17.75

3.2 实验设计

为验证 Pkmeans-SMOTE 方法的有效性，本文将其与 SMOTE、Borderline-SMOTE2 和 kmeans-SMOTE 进行对比，分别在多个不平衡数据集上合成少数类样本，并使用决策树（DE）和随机森林（RF）进行分类。采用 AUC、F₁-score 和 G-mean 作为性能评估指标^[15]，并使用 5 折分层交叉验证来获得更稳定的评估结果。

3.3 实验结果与分析

表 2 在 5 个不平衡数据集上，比较了 4 种过采样方法（SMOTE、BSMOTE2、KSMOTE 和 Pkmeans-SMOTE）在决策树（DE）和随机森林（RF）分类器下的表现。

表 2 四种过采样方法分类性能对比

数据集	指标	DE			
		SMOTE	BSM2	KSMOTE	Pkmeans-SMOTE
haberman	AUC	0.552 5	0.566 4	0.535 2	0.592 1
	F ₁ -score	0.729 5	0.743 9	0.734 8	0.761 3
	G-mean	0.521 5	0.535 8	0.495 7	0.578 3
moon	AUC	0.927 5	0.892 5	0.916 0	0.957 0
	F ₁ -score	0.794 0	0.782 6	0.833 6	0.856 3
	G-mean	0.925 8	0.886 3	0.910 9	0.956 6
segment2	AUC	0.903 5	0.895 5	0.872 2	0.923 0
	F ₁ -score	0.787 6	0.763 1	0.789 8	0.845 5
	G-mean	0.900 1	0.891 6	0.863 8	0.920 1
seismic	AUC	0.559 6	0.555 3	0.540 4	0.565 1
	F ₁ -score	0.169 8	0.161 9	0.138 0	0.175 6
	G-mean	0.423 0	0.404 6	0.367 2	0.440 3
wilt	AUC	0.912 5	0.895 4	0.884 9	0.928 3
	F ₁ -score	0.769 4	0.755 6	0.780 9	0.792 2
	G-mean	0.909 5	0.890 5	0.878 4	0.926 4
数据集	指标	RF			
		SMOTE	BSM2	KSMOTE	Pkmeans-SMOTE
haberman	AUC	0.679 8	0.669 7	0.682 3	0.688 4
	F ₁ -score	0.756 8	0.766 3	0.793 5	0.752 8
	G-mean	0.551 1	0.506 8	0.496 1	0.566 5
moon	AUC	0.988 0	0.983 2	0.979 3	0.988 1
	F ₁ -score	0.838 0	0.840 5	0.852 2	0.859 3
	G-mean	0.920 6	0.917 2	0.903 8	0.943 3
segment2	AUC	0.995 8	0.994 2	0.995 7	0.995 9
	F ₁ -score	0.890 0	0.849 7	0.844 0	0.893 0
	G-mean	0.947 7	0.932 7	0.864 6	0.948 0
seismic	AUC	0.738 6	0.738 5	0.727 8	0.724 2
	F ₁ -score	0.187 9	0.191 2	0.124 7	0.194 1
	G-mean	0.382 1	0.360 5	0.259 5	0.392 9
wilt	AUC	0.989 6	0.988 9	0.986 2	0.990 1
	F ₁ -score	0.846 1	0.813 6	0.826 4	0.857 6
	G-mean	0.932 0	0.902 4	0.860 4	0.936 8

通过 AUC、 F_1 -score 和 G-mean 三个指标评估,结果显示 Pkmeans-SMOTE 在大多数情况下优于其他方法,尤其在提升 AUC、 F_1 -score 和 G-mean 方面表现突出。在 AUC 指标上, Pkmeans-SMOTE 在决策树分类器上在多个数据集的表现优于其他方法,特别是在 Haberman 和 Segment2 数据集上,其 AUC 分别为 0.592 1 和 0.923 0,显著高于 SMOTE (分别为 0.552 5 和 0.903 5)。然而, SMOTE 和 KSMOTE 在一些数据集(如 Moon 和 Wilt)上也表现良好,特别是在 Wilt 数据集上, SMOTE 的 AUC 为 0.989 6,接近 Pkmeans-SMOTE 的 0.990 1。在 F_1 -score 方面, Pkmeans-SMOTE 在 Haberman 和 Segment2 数据集上的表现最好,分别为 0.761 3 和 0.845 5,明显优于 SMOTE 和 KSMOTE。但 BSMOTE2 在 Wilt 数据集上的 F_1 -score 表现较好,达到 0.857 6。在 G-mean 指标上, Pkmeans-SMOTE 在 Haberman 和 Segment2 数据集上表现最佳,分别为 0.578 3 和 0.920 1,显著高于其他方法。尽管在一些数据集如 Wilt, SMOTE 和 KSMOTE 也表现不错,但 Pkmeans-SMOTE 在整体表现上更具优势。

图 1 展示了不同过采样方法在不平衡数据分布上的处理效果,通过可视化合成样本的分布,直观对比五种方法的性能表现:(a) 图为 NoSMOTE,表示未进行过采样处理的数据原始分布;(b) 图为 SMOTE,展示经典 SMOTE 方法生成的合成样本分布;(c) 图为 Borderline-SMOTE2,表示基于边界样本的过采样分布;(d) 图为 kmeans-SMOTE,展示引入 K-means 聚类的过采样方法的效果;(e) 图为 Pkmeans-SMOTE,代表基于改进聚类的过采样方法的表现。蓝色点为原始多数类样本,红色点为原始少数类样本,红色叉号表示合成的少数类样本。

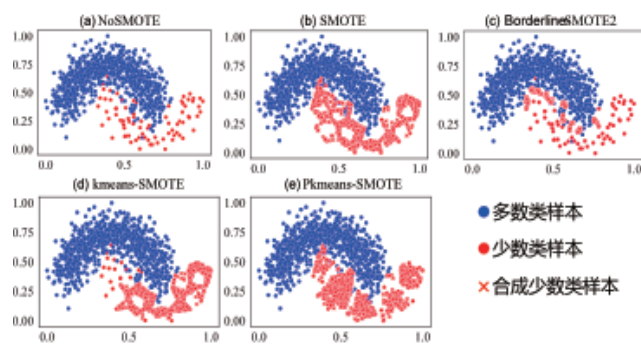


图 1 四种过采样方法在 moon 数据集上

不同过采样方法通过生成合成样本来缓解数据不平衡问题。SMOTE 通过插值生成样本,分布均匀,但未考虑边界信息,可能与原始少数类样本较远。Borderline-SMOTE2 关注边界样本,改善了决策边界的学习,但边界区域样本集中。kmeans-SMOTE 结合 K-means 聚类,在聚类中心生成样本,改善了分布,但仍有局限性。Pkmeans-SMOTE 通过层次化样本划分与局部聚类优化生成的样本,分布更均匀,边界区

域更合理,避免了样本过于集中的问题,提升了分类器在边界区域的学习能力。此外,该方法增加了少数类在决策边界附近的代表性,丰富了训练数据的多样性,从而提升模型的泛化能力。

4 结论

本文提出的 Pkmeans-SMOTE 方法结合 Tomek Links 和 K-means 聚类技术,改进了传统过采样方法,显著提升了少数类样本的质量和分布合理性。实验结果表明, Pkmeans-SMOTE 在多个不平衡数据集上,尤其在 AUC、 F_1 -score 和 G-mean 等指标上优于其他过采样方法。该方法有效避免了样本冗余和噪声问题,并提高了边界区域的学习能力,展现了良好的实际应用潜力。未来的研究可进一步探索如何结合其他技术优化 Pkmeans-SMOTE 的性能,提升其在更复杂和动态数据环境中的适应性。

参考文献:

- [1] GUO H X, LI Y J, SHANG J, et al. Learning from class-imbalanced data: review of methods and applications[J]. Expert systems with applications, 2017, 73(5): 220-239.
- [2] KAUR H, PANNU H S, MALHI A K. A systematic review on imbalanced data challenges in machine learning: applications and solutions[J]. ACM computing surveys (CSUR), 2019, 52(4): 1-36.
- [3] CHAWLA N V, BOWYER K W, HALL L O, et al. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique[J]. Journal of artificial intelligence research, 2002, 16(1): 321-357.
- [4] HAN H, WANG W Y, MAO B H. Borderline-SMOTE: a new over-sampling method in imbalanced data sets learning[J]. Advances in intelligent computing, 2005, 3644: 878-887.
- [5] DOUZAS G, BACAO F, LAST F. Improving imbalanced learning through a heuristic oversampling method based on k-means and SMOTE[J]. Information sciences, 2018, 465(10): 1-20.
- [6] KOZIARSKI M, KRAWCZYK B, WOŹNIAK M. Radial-based oversampling for noisy imbalanced data classification[J]. Neurocomputing, 2019, 343:19-33.
- [7] FERNÁNDEZ A, GARCÍA S, HERRERA F, et al. SMOTE for learning from imbalanced data: progress and challenges, marking the 15-year anniversary[J]. Journal of artificial intelligence research, 2018, 61(1): 863-905.
- [8] SEIFFERT C, KHOSHGOFTAAR T M, VAN HULSE J, et al. An empirical study of the classification performance of learners on imbalanced and noisy software quality data[J]. Information sciences, 2014, 259: 571-595.

基于改进 U-Net 的牙齿图像分割和抑噪研究

张磊¹ 滕开良¹

ZHANG Lei TENG Kailiang

摘要

牙齿 X 光医学图像具有低对比度和高噪声特性，牙齿的形态和排列复杂性也增加了图像识别与分割的难度。基于此，文章提出了一种改进的 U-Net 模型，设计了动态注意力融合模块（dynamic attention fusion module, DAFM）增强特征提取能力。该模块对通道和空间两个维度的注意力特征进行自适应加权，降低冗余信息影响，并增强对关键特征的捕捉，提升模型对边界特征的识别能力。实验结果表明，改进后的模型在分割精度、边界一致性及细节还原方面优于原始 U-Net 模型，同时在乘性噪声、椒盐噪声和高斯噪声环境条件下仍保持稳定的分割性能。

关键词

牙齿分割；U-Net；注意力；特征融合

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.035

0 引言

随着数字图像在医学领域的快速扩展，医学图像分割技术不断提升。牙齿医学图像具有低对比度和高噪声的特点，且因牙齿形态和排列多样，传统图像处理方法在分割任务上面临挑战^[1]。目前，医学图像去噪方法可分为基于变换域^[2]、统计域^[3]及机器学习^[4]三大类。传统的变换域和统计域方法依赖噪声先验信息，应用范围受到限制。而深度学习去噪方法可保留图像边缘细节，减少传统去噪方法中因平滑操作造

成的信息损失^[5]。

在牙齿医学图像分割的研究中，U-Net^[6]的编码-解码结构通过跳跃连接将浅层和深层特征结合，保留更多的细节信息。ResUNet^[7]的残差结构增强特征传递的稳定性。Attention U-Net^[8]引入注意力机制，提升模型在复杂背景下对目标区域的分割性能。SegNet^[9]模型使用池化索引保留了位置信息，使模型能够在解码过程中复原部分空间结构。

随着注意力机制在医学图像分割中的应用逐渐增多，自注意力机制和卷积块注意力在处理复杂结构的牙齿图像时展现出优势。自注意力机制关注每个像素与其他像素之间的关

1. 广西民族大学人工智能学院 广西南宁 530006

- [9] CHEN B Y, XIA S Y, CHEN Z Z, et al. RSMOTE: a self-adaptive robust SMOTE for imbalanced problems with label noise[J]. Information sciences, 2021, 553(4): 397-428.
- [10] LIU R. A novel synthetic minority oversampling technique based on relative and absolute densities for imbalanced classification[J]. Applied intelligence, 2023, 53(1): 786-803.
- [11] SUN Z B, SONG Q B, ZHU X Y, et al. A novel ensemble method for classifying imbalanced data[J]. Pattern recognition, 2015, 48(5): 1623-1637.
- [12] ZENG M, ZOU B J, WEI F R, et al. Effective prediction of three common diseases by combining SMOTE with Tomek links technique for imbalanced medical data[C]//2016 IEEE International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS). Piscataway: IEEE, 2016: 225-228.
- [13] KANUNGO T, MOUNT D M, NETANYAHU N S, et al. An

efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2002, 24(7): 881-892.

- [14] TIAN J L, ZHU LIN, ZHANG S Q, et al. Improvement and parallelism of k-means clustering algorithm[J]. Tsinghua science & technology, 2012, 10(3): 277-281.

- [15] THABTAH F, HAMMOUD S, KAMALOV F, et al. Data imbalance in classification: experimental evaluation[J]. Information sciences, 2020, 513(3): 429-441.

【作者简介】

杨云熙（2000—），女，贵州贵阳人，硕士研究生，研究方向：计算机应用技术。

（收稿日期：2025-01-03）

系,提升模型在多样形态结构图像中的分割精度^[10]。卷积块注意力分别在通道和空间两个维度上进行注意力操作,提升模型对多尺度和不同位置的特征提取^[11]。

为提高牙齿图像分割的精度和鲁棒性,本文提出了一种改进 U-Net 模型。改进模型中的动态注意力融合模块(dynamic attention fusion module, DAFM)根据输入图像的特性动态调整特征权重分布,减少冗余信息干扰并突出关键特征。通过改进 U-Net 结构,旨在提供一种适用于复杂形态和高噪声牙齿图像的分割方法。

1 方法

1.1 DAFM 模块

U-Net 模型在编码和解码过程中通过逐层卷积和上采样来提取和恢复特征,由于缺乏对特征信息筛选,U-Net 模型在边缘特征捕捉不充分。为解决该问题,本文设计了 DAFM 模块,该模块主要由两部分组成:通道注意力模块(channel attention module, CAM)和空间注意力模块(spatial attention module, SAM)。如图 1 所示,该模块通过引入可学习的权重因子 α ,能够自适应地调整通道注意力和空间注意力的加权比例,提升边缘、轮廓及细节特征的分割精度。

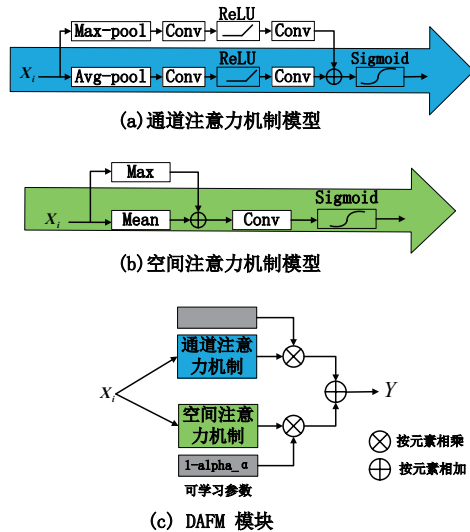


图 1 DAFM 结构

CAM 模块的目标是通过不同通道之间的权重提取特征,如图 1 (a) 所示,输入特征经过全局平均池化和全局最大池化操作,分别提取通道的统计信息。池化操作后,提取的特征通过卷积层处理,生成通道注意力权重。

$$F_{\text{avg}} = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W F(i, j) \quad (1)$$

$$F_{\text{max}} = \max_{i=1, \dots, H, j=1, \dots, W} F(i, j) \quad (2)$$

式中: $F(i, j)$ 表示输入特征中第 i 行、第 j 列的位置处的特征值; H 和 W 分别表示特征图的高度和宽度。

如图 1 (b) 所示, SAM 模块则关注特征在空间维度的分布。该模块中,输入特征在通道维度通过平均池化和最大池化操作,提取图像空间分布特征。拼接后的特征通过卷积层生成空间注意力权重,使模型聚焦在图像的边缘区域。

$$F_{\text{avg}}^{\text{spatial}} = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^C F_c(k) \quad (3)$$

$$F_{\text{max}}^{\text{spatial}} = \max_{k=1, \dots, C} F_c(k) \quad (4)$$

1.2 Leaky ReLU 激活函数

Leaky ReLU 激活函数旨在解决其在负值区域输出为零所带来的“死亡神经元”问题。ReLU 函数将输入小于零的部分直接映射为零,可能导致神经网络在训练过程中部分神经元长期不被激活,从而无法进行参数更新。为解决这一问题,Leaky ReLU 通过引入一个较小的正数 β 允许负输入在一定比例下通过,避免了零梯度的情况。Leaky ReLU 的数学表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} x & \text{if } x \geq 0 \\ \beta x & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: β 为一个小的正数,通常设定为 0.01。在负输入区域,Leaky ReLU 的输出不为零,即使输入为负,网络依然能够保持梯度传递。

1.3 模型结构

如图 2 所示,本文提出的 DAFM 模块应用于牙齿分割模型的编码器和解码器,旨在优化特征提取和分割精度。在编码器部分,卷积层负责提取图像的低级特征。DAFM 模块集成于每一层卷积之后,其中通道注意力机制分析特征在不同通道上的全局分布关,突出与目标相关的重要通道特征。空间注意力机制则聚焦于特征的空间分布信息,计算特征在不同空间位置上的重要性。通过动态调整各区域的权重,突出牙齿轮廓和边界等特征,同时弱化背景和噪声的干扰。编码器的最大池化操作用于下采样,逐步减少空间维度。

在解码器的上采样阶段,为了恢复图像的空间分辨率并保留重要特征信息,DAFM 模块引入了跳跃连接机制。该机制将编码器中相应层的特征直接传递到解码器的当前层,与解码器生成的特征图进行拼接操作。

2 实验与分析

2.1 数据集

本文使用的数据集包含 2 000 张牙齿 X 光医学图像并进行分割标注,其中成年人牙齿医学图像 1 774 张,儿童牙齿医学图像 226 张。数据集按照 8:2 的比例划分为 1 600 张训练图像和 400 张测试图像。为了评估噪声对分割模型的影响,数据集中加入 3 种常见噪声:乘性噪声、椒盐噪声和高斯噪声。通过引入噪声,测试模型在不同噪声条件下的表现,评估其鲁棒性和对细节的分割能力。

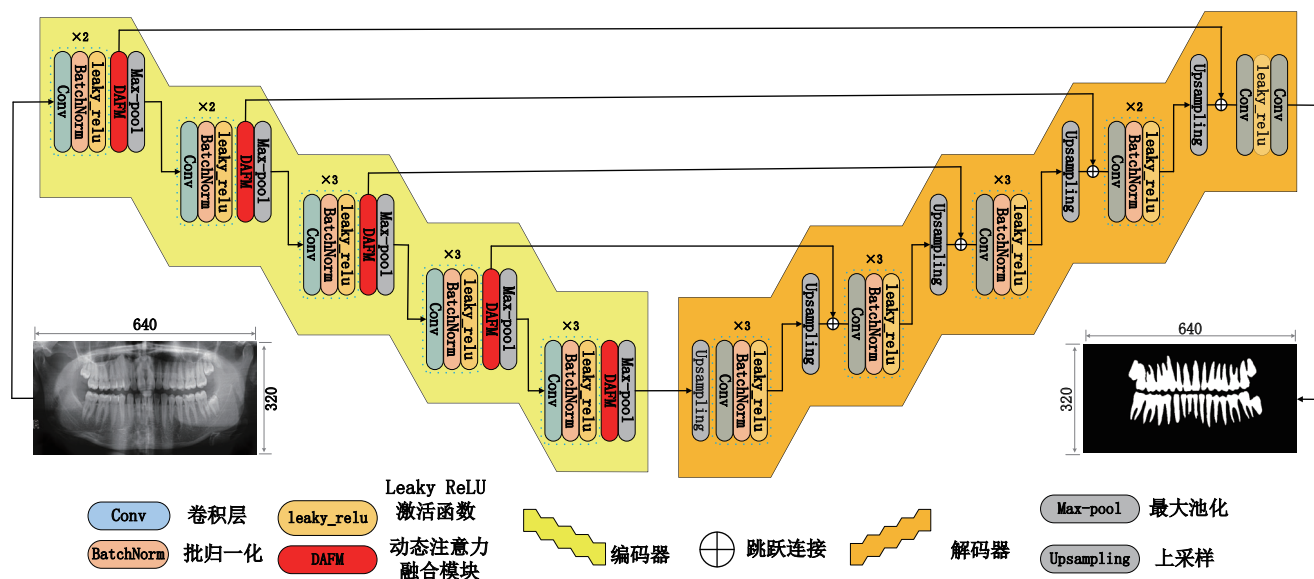


图2 加入 DAFM 模块的 U-Net 模型结构图

2.2 实验设置

本研究使用 PyTorch2.3.1 框架实现，所有模型训练基于 Ubuntu22.04 操作系统，NVIDIA RTX 4070Ti(12 GB) 显卡上训练。其中 CUDA 版本 12.5，Python 版本 3.12.4。

在实验实施细节方面，模型初始学习率设为 1×10^{-4} ，并采用学习率衰减策略，优化器采用 Adam。损失函数使用了 Dice 系数 (dice coefficient) 和交并比 (intersection over union, IoU) 混合损失函数作为模型衡量指标。

$$L_{\text{total}} = \alpha L_{\text{Dice}} + (1 - \alpha) L_{\text{IoU}} \quad (6)$$

2.3 评估指标

为了全面评估分割模型的性能，本文采用了以下五种评价指标：像素精度 (pixel accuracy, PA)、IoU、Dice 系数、豪斯多夫距离 (Hausdorff distance, HD) 和相对体积误差 (relative volume error, RVE)。具体计算公式为：

$$PA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (7)$$

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (8)$$

$$Dice = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + FP + FN} \quad (9)$$

式 (7) 衡量整体分割的准确性，式 (8) 评估预测分割与真实标签的重叠程度，式 (9) 衡量分割结果与真实标签的相似性。其中 TP 为真正例；TN 为真负例；FP 为假正例，FN 为假负例。

通过计算分割边界与真实边界之间的最大距离，用于评估边界一致性，其计算公式为：

$$HD = \max \left\{ \sup_{x \in P} \inf_{y \in G} d(x, y), \sup_{y \in G} \inf_{x \in P} d(x, y) \right\} \quad (10)$$

式中： P 为预测分割区域； G 为真实分割区域； $d(x, y)$ 为点 x 到点 y 的距离。

衡量预测分割区域与真实区域体积的差异公式为：

$$RVE = \frac{|V_p - V_g|}{V_g} \quad (11)$$

式中： V_p 为预测区域的体积； V_g 为真实区域的体积。

2.4 实验结果分析

本实验主要分为两个方面：(1) 在原始数据集上的分割性能；(2) 在分别加入乘性噪声、椒盐噪声和高斯噪声的数据集上的分割鲁棒性。

实验结果表明，改进模型在原始数据集和不同噪声数据集上的分割性能均优于其他经典模型。

表 1 为各模型在原数据集的分割结果。在原数据集上，改进模型的像素精度达到了 96.53%，分别比 U-Net 和 PSPNet 提升了 4.54 和 5.12 个百分点。同时，该模型的交并比和 Dice 系数也得到提高，分别达到 85.42% 和 92.05%，明显超过了 U-Net、PSPNet 和 UNet++。此外，改进模型的豪斯多夫距离显著降低至 17.05，显示出更高的边界捕捉精度，相对体积误差也降至 8.27%，进一步增强了分割精度。

表1 原始数据集模型分割结果

模型	PA/%	IoU/%	Dice/%	HD	RVE/%
U-Net	91.99	70.44	82.30	166.55	35.44
PSPNet	91.41	68.44	81.04	83.88	29.47
UNet++	95.81	82.36	90.01	62.15	11.30
改进模型	96.53	85.42	92.05	17.05	8.27

表 2 实验结果显示,在不同噪声条件下,改进模型展现出更强的鲁棒性和抗噪能力。对于乘性噪声,改进模型的 Dice 系数为 89.58%,相比 U-Net 提高了 14.12 个百分点,豪斯多夫距离减少至 30.51。对于椒盐噪声,改进模型的 Dice 系数达到 92.17%,HD 降至 18.35,相较于 UNet++ 表现出显著改善。在高斯噪声下,改进模型的 Dice 系数同样达到 92.17%,HD 减少至 18.89,较 U-Net 降低了 147.79。

表 2 不同噪声条件下模型分割结果

模型	乘性噪声 Dice/HD	椒盐噪声 Dice/HD	高斯噪声 Dice/HD
U-Net	75.46/167.24	82.44/166.45	76.16/166.68
PSPNet	78.93/103.57	82.57/81.03	81.00/83.57
UNet++	81.08/93.81	89.91/63.27	89.90/62.75
改进模型	89.58/30.51	92.17/18.35	92.17/18.89

3 结论

如图 3 所示,本文提出的改进 U-Net 模型在分割精度、边界一致性和细节还原方面均得到提升。

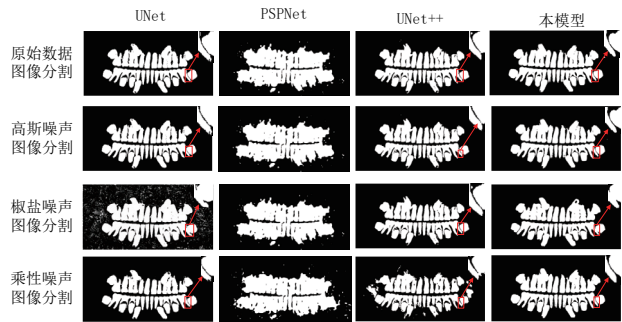


图 3 不同噪声条件的模型分割结果

在分割精度方面,改进模型的像素精度达到 96.53%,比 U-Net 模型提升了 4.54 个百分点。在边界一致性方面,改进模型的 IoU 值达到 85.42%,较 U-Net 和 PSPNet 分别提升 14.98 和 16.98 个百分点,较 UNet++ 提升 3.06 个百分点。此外,豪斯多夫距离降低至 17.05,相比 U-Net 减少 149.50,相比 PSPNet 和 UNet++ 分别减少 66.83 和 45.10,表明其在边界捕捉方面的准确度提高。最后,在细节还原方面,改进模型的 Dice 系数为 92.05%,较 U-Net 和 PSPNet 分别提升 9.75 和 11.01 个百分点,较 UNet++ 提升 2.04 个百分点。总而言之,本文提出的改进 U-Net 模型通过融合通道与空间注意力机制,利用可学习的权重因子自适应地调整两者的加权比例,从而增强了对牙齿医学图像的分割准确性及抗噪能力。

参考文献:

[1] HUANG Z. Research on segmentation technology of process image based on segmentation algorithm[C/

OL]//2023International Conference on Computer Simulation and Modeling, Information Security (CSMIS). Piscataway:IEEE,2023[2024-06-19].<https://ieeexplore.ieee.org/document/10549493>.

[2] LIU K F, CHEN Y T, FANG W H, et al. Revisiting fourier domain adaptation for medical image segmentation[C]//2024 10th International Conference on Applied System Innovation (ICASI). Piscataway:IEEE,2024:442-444.

[3] ZHENG X Q. Image segmentation for hexagonally sampled images using statistical region merging[C]//2022 6th International Conference on Imaging, Signal Processing and Communications (ICISPC). Piscataway: IEEE, 2022:37-42.

[4] 刘玉利,王克朝,刘琳.基于机器学习的多光谱模糊图像降噪方法[J].激光杂志,2022,43(5):156-160.

[5] 吴怡红,杨勇,叶宏伟,等.多标签病毒性肺炎图像分割方法的研究[J].中国生物医学工程学报,2023,42(6):720-729.

[6] 桑子江,邵叶秦,许昌炎.基于改进 3D UNet 的前列腺 MR 图像分割[J].光电子·激光,2023,34(12):1337-1344.

[7] KUSHNUR D T, TYAGI S, TALBAR S N.LiM-Net: Lightweight multi-level multiscale network with deep residual learning for automatic liver segmentation in CT images[J]. Biomedical signal processing and control, 2023,80(1):104305.

[8] ZHANG Y, CHEN J, MA X X, et al. Interactive medical image annotation using improved attention U-Net with compound geodesic distance[J].Expert systems with applications, 2024,237:121282.

[9] ZHANG C W, LU W R, WU J,et al. SegNet network architecture for deep learning image segmentation and its integrated applications and prospects[J]. Academic journal of science and technology, 2024,9(2):224-229.

[10] 江结林,史明月,杨海东,等.多头注意力机制的全频图像去噪算法[J].计算机工程与应用,2024,60(16):236-247.

[11] 汪华登,刘金,黎兵兵,等.融合结构化卷积和双重注意力机制的轻量级眼底图像分割网络[J].计算机辅助设计与图形学学报,2024,36(5):760-774.

【作者简介】

张磊(1996—),男,山西大同人,硕士研究生,研究方向:图像处理。

滕开良(1982—),男,广西南宁人,博士,高级工程师、研究生导师,研究方向:新能源技术、智能制造。

(收稿日期:2024-11-18)

设备疲劳断裂检测的数据采集分析优化方法

黄 啸¹ 叶序彬²

HUANG Xiao YE Xubin

摘 要

针对机械零部件疲劳断裂在数据采集与分析阶段存在的数据分析优化问题,提出了一种基于加权模糊C均值-对数变换PCA算法,通过在余弦相似度的基础上,引入了基于余弦值的欧几里得距离加权处理方法来度量数据的相似性特征,从而改进了传统模糊C均值算法,提高了对数据点的精准判断以及噪声检测率。然后针对降噪后的数据依然存在数据维度过高且难以分析数据特性等问题,在改进的加权模糊C均值算法基础上利用对数变换对PCA算法进行了改造,不仅降低了冗余数据噪声而且降低了数据维度,最后进行了真实样本数据集测试,达到预期。

关键词

疲劳断裂;数据采集;数据降噪;数据降维;PCA

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.036

0 引言

疲劳断裂是指机械设备零部件由于重复和循环载荷引起的弱化,导致裂纹的形成和扩展或者结构损伤,设备零件疲劳断裂是承载构件结构失效的最突出原因之一^[1-2]。设备零部件疲劳断裂的发生是最危险的事故之一,通常来说断裂之处都在被遮挡的零件局部,即使人为的检查都很难发现,况且车间等场所设备众多,仅靠人工去筛查往往费时费力。力学检测实验室作为一种重要的机械设备零部件疲劳断裂检测场所,通常在工程研究中被用于对机械或金属运动构件的疲劳断裂和生命周期的检测,覆盖低周疲劳、高周疲劳、旋转弯曲疲劳和断裂韧性等试验类型,因此对力学检测实验室的轴向试验机、旋弯疲劳试验机、裂纹扩展系统等设备和系统的数据采集及分析显得尤为重要。机械设备零件疲劳断裂的数据采集分析和过滤是实现设备性能分析的一个重要前提,若不能及时发现零部件疲劳断裂损伤,将对设备造成极大破坏,引发事故。

但是目前,在制造业领域力学检测方面,尤其对于机械设备零件疲劳断裂的检测数据的分析存在以下问题:由于力学检测实验场所环境复杂,机械和检测设备多,采集的数据量大、多源异构数据多,且离散分布,缺乏检测过程的数据校对和防错机制分析,检测数据质量分析不足,这就不可避免的存在噪声数据。目前传统主成分分析算法对于数据降维和去噪的应用比较广泛,然而对于力学检测实验场所的多源

异构、离散型的数据分析和去噪没有一个成熟且适用的技术方案。

针对以上问题,引入了基于加权模糊C均值-对数变换PCA算法,实现了疲劳断裂检测非线性数据的去噪和降维的优化,更大地保留了原始数据信息。

1 数据采集架构

力学检测实验场所车间的数据采集有多种方式,然而最常见的主要有3种方式,即直接采集、间接采集和导入采集,如图1所示。

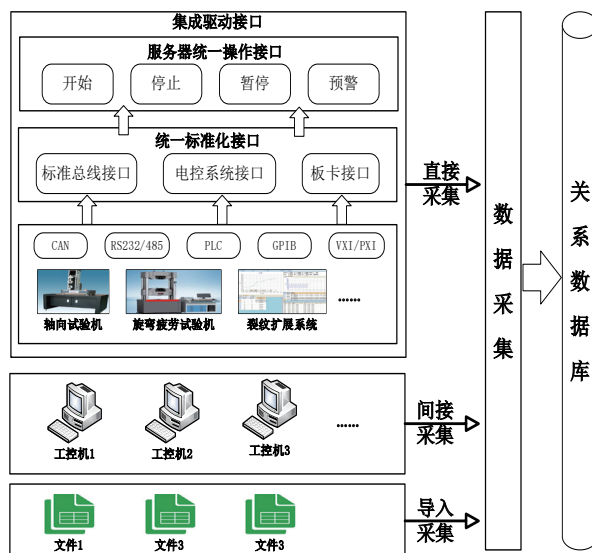


图1 数据采集架构

直接采集是系统通过采集适配器直接采集设备的通信参数、疲劳断裂数据等。间接采集是通过采集工控机的网口、

1. 中国航空发动机集团有限公司 北京 100097

2. 中国航发北京航空材料研究院 北京 100097

GPIB 口、USB 口、串口等接口信息，获取设备产生的数据。导入采集是通过采集软件配置过滤当前需要解析的文件类型，通过 C++ 文件句柄打开文件，根据采集软件产生文件的格式解析文件，读取文件中的数据，最终上传至服务器分析优化。

2 主成分分析算法

2.1 算法概述

数据时代，每时每刻都会产生海量的信息，在这些信息之中有需要的，也有无用的、冗余的噪声数据，如何从这些海量的大数据中提取有用的信息是一个关键问题。简而言之，如何减少数据维度的同时还能基本保持数据的原始信息特征不改变，这就需要一种数据降维方法 - 主成分分析算法。

主成分分析算法 (PCA) [3]，是一种在人工智能、经济金融、医疗医学、社会科学等领域广泛使用的线性数据压缩降维方法。将原来复杂的样本数据指标通过空间线性变换降维成少数几个带有大量样本信息的主成分，即从高维度降到低维度，在减少时间复杂度的同时，基本保留了原始样本数据的特征。

2.2 算法原理

假设有数据集： $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，将其降到 k 维，方法如下：

(1) 对原始数据进行标准化处理，以消除不同变量对分析结果的影响，计算公式为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

(2) 计算标准化后的数据协方差矩阵，样本 X 和 Y 的协方差计算公式为：

$$\begin{aligned} C(X, Y) &= E[(X - E(X))(Y - E(Y))] \\ &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \end{aligned} \quad (2)$$

当样本是 n 维数据时，它们的协方差实际上是协方差矩阵（对称矩阵），计算公式为：

$$C_{(x_1, x_2, \dots, x_n)} = \begin{bmatrix} c(x_1, x_1) & c(x_1, x_2) & \dots & c(x_1, x_n) \\ c(x_2, x_1) & c(x_2, x_2) & \dots & c(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c(x_n, x_1) & c(x_n, x_2) & \dots & c(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) 计算协方差矩阵 C 的特征值与特征向量。

(4) 通过特征值大小将特征向量排列成 k 行矩阵。

(5) 计算 $Y = PX$ ，即为降维后的数据集。

3 基于加权模糊 C 均值 - 对数变换 PCA 算法去噪降维优化

由于检测场所环境复杂，采集的数据具有数量大、异构多源且离散的特点，而且存在着空值、错误值或异常值，这类数据统称为噪声数据。噪声数据通常会严重影响疲劳断裂

的检测效果，因此需要对采集的数据先进行噪声过滤再降维，以最大限度的消除一些噪声和冗余信息，从而提高数据的信噪比 [4]，使得检测达到理想效果。

3.1 算法改进原理

根据分析数据的特征，选取模糊 C 均值聚类算法 [5] 作为去噪过滤算法。通常来说数据降噪方法有多种方式，基于距离和相关性的两种方法最为常见。前者是基于欧几里得距离的噪声过滤方法 [6]，根据计算距离的阈值来断定噪声。后者是基于余弦相似度进行度量，余弦取值范围为 $[-1, 1]$ ，其中 -1 为完全不相似，1 为完全相似，0 表示它们之间是独立的。根据 $\cos\theta$ 的特点，其 $\cos\theta$ 值与角度成反比， $\cos\theta$ 越大，角度越小，表示两个数据所携带的特征越相似。余弦相似度公式为：

$$S(x, y) = \cos\theta = \frac{\bar{x}\bar{y}}{\|x\|\|y\|} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}} \quad (4)$$

通过多次算法仿真实验结果得知，利用欧几里得距离的噪声过滤方法往往存在这样一个问题，面对复杂的场景采集的数据集大多是多源异构的，其中包含缺失值、空值、异常值等冗余的数据，且数据是非线性多方向的。欧几里得公式虽然计算简单，效率高，但是通常情况下只关注点对点的直线距离而忽略了数据的方向性特征，不同方向上的样本数据点经常聚为一簇，不能够差别的区分数据点，因此，为了弥补传统模糊 C 均值算法对这一问题的错误判断，在余弦相似度的基础上，提出了一种基于余弦值的欧几里得距离加权处理方法来度量数据的相似性特征，提高了对数据点的精准判断问题。

设 m_j 是样本数据集 j 簇中心，那么对此簇内的任意数据点 $x_i^{(j)}$ 加权处理，得到欧几里得距离加权公式：

$$d_m(x_i, y_j) = \sin(x_i^{(j)}, y_j) \cdot \sqrt{(x_i^{(j)} - y_j)(x_i^{(j)} + y_j)} \quad (5)$$

式中： $t=|y_j|$ 表示 j 簇内的样本数目； $x_i^{(j)}$ 表示 y_j 所在簇的所有样本点。

通过改进的传统模糊 C 均值算法较好的解决了样本数据集的噪声过滤问题，即使降噪后的数据集没有了噪声的影响，然而对于采集的实验车间多场景复杂的设备零部件疲劳断裂多源异构数据，依然存在数据维度过高且难以分析数据特性等问题。

从采集的数据特征来看，原始数据呈现非线性关系，如果还是按照传统的主成分分析方法对这些数据进行降维，那么会直接导致数据降维效果大大降低，第一主成分不能够包含众多的原始数据信息，使得检测结果偏差较大。因此，从

力学检测实验场所采集的多源异构、离散型的数据分析，做了大量函数测试，最终选择了对数变换函数对主成分分析算法进行数据降维。

设 x_{ij} 是原始数据集，令：

$$y_{ij} = \ln x_{ij} - \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \ln x_{it} \quad (6)$$

然后计算对数变换后的标准化样本协方差矩阵 $S=(s_{ij})_{p \times p}$ ，

其中：

$$s_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{ji} - y_{ji})(y_{ji} - y_{ji}) \quad (7)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ii} \quad (8)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (9)$$

接着根据 S 计算样本的主成分。设 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ 是 S 的 p 个特征根， $a_1, a_2, \dots, a_p$ 是相应的标准化单位特征向量，

则第 i 个主成分为 $F_i = \sum_{j=1}^p a_{ij} \ln x_{ij}$ 。

3.2 改进算法的数据分析优化流程

基于加权模糊 C 均值 - 对数变换 PCA 算法去噪降维优化具体实现如下：

假设有非线性样本数据集 x_{ij} ，首先对数据进行去噪处理，以提高数据质量。输入样本数据集 x_{ij} 和聚类中心样本数 t ，然后带入加权模糊 C 均值算法模型，计算加权的欧几里得距离 d 和阈值 r ，即利用欧几里得距离设置阈值 r ， r 可选取为所有样本点到聚类中心的加权欧氏距离的均值，即：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^t d_m(x_i^{(j)}, y_j)}{n} \quad (10)$$

比较 d 和 r 的大小，若 $d > r$ 时，则为噪声数据，将其删除，反之 $d < r$ 时，则留下该条数据，即降噪后的数据集。

然后对其构造 $y_{ij} = \ln x_{ij} - \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \ln x_{it}$ 对数变换函数，求每个 x_{ij} 均值数据，利用原始数据集减去均值数据得到去中心化数据集，计算协方差矩阵，求其特征值与特征向量，最后对特征向量进行空间投影，即得到降维数据集，如图 2 所示。

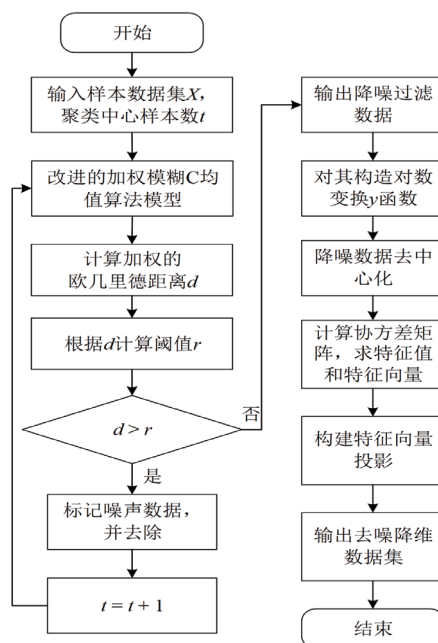


图 2 改进算法的数据分析优化流程

3.3 测试分析

针对改进的基于加权模糊 C 均值 - 对数变换 PCA 算法进行测试，以力学检测实验场所采集的多源异构、离散型数据集作为测试集进行测试，测试集中含有数据 10 000 条，其中缺失值 378 条，空值 121 条，异常值 239 条，共计 738 条，噪声数据占比为 7.38%。算法处理的结果受聚类中心数样本数 t 的影响较大，在其他参数不变下，从 $t=100$ 开始逐渐增大 t 的取值计算噪声检测率，取前 10 个主成分计算特征根和贡献率。将传统模糊 C 均值算法、传统主成分分析算法、改进的算法的处理结果进行比较，如表 1 所示。

从表 1 可以看出，当 $t < 300$ 时，各个算法检测率基本

表 1 测试结果对比表

t	传统模糊 C 均值算法		传统主成分分析		改进的算法			
	噪声检测率/%	时间/s	特征根	贡献率/%	噪声检测率/%	时间/s	特征根	贡献率/%
100	84.32	0.31	5.675	88.134	84.76	0.32	5.675	94.234
200	84.41	0.35	1.428	8.321	84.98	0.36	1.428	6.543
300	84.57	0.42	0.123	7.532	85.21	0.44	0.123	5.755
400	84.85	0.51	0.098	6.875	85.73	0.56	0.098	4.876
500	85.87	0.64	0.075	5.467	86.41	0.69	0.075	3.536
600	86.02	0.78	0.045	4.289	87.43	0.83	0.045	2.846
700	86.88	0.97	0.022	3.980	88.97	1.05	0.022	1.913
800	87.54	1.31	0.008	2.390	90.51	1.37	0.008	0.645
900	89.65	1.57	0.005	1.461	93.15	1.67	0.005	0.324
1 000	91.21	2.15	0.002	0.537	95.86	2.21	0.002	0.241

注：噪声检测率 = 检测出的噪声数 ÷ 噪声总数；贡献率 = 对应的特征值 ÷ 所有特征值之和

(下转第 157 页)

基于深度文本聚类的关键词语义多模态挖掘方法

周春良¹ 杨畅畅¹ 李晓辉¹

ZHOU Chunliang YANG Changchang LI Xiaohui

摘要

多模态数据具有信息丰富性,但单一挖掘方法往往难以全面把握其互补、冗余和协同的关联,导致结果不精确或片面。针对这一问题,文章提出了一种新颖的基于深度文本聚类的关键词语义多模态挖掘方法。首先,利用深度学习的半监督学习算法,精准抽取并有效融合多模态数据中的语义特征。接着,通过结合 BWP 指标和 FCM 聚类法,确定最佳聚类数,并实现对这些特征的精准聚类分析,形成语义聚类簇。最后,借助语义映射技术,将不同模态的特征映射到同一语义空间,从而全面挖掘关键词的深层语义信息。实验结果表明,所提方法在关键词语义挖掘任务中表现优异,BWP 值最高达到了 0.9,R@1、R@5 和 R@10 指标分别高达 0.985、0.974 和 0.969,挖掘性能良好。

关键词

深度文本聚类;半监督学习算法;BWP 指标;语义映射;关键词语义挖掘

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.037

0 引言

多模态数据挖掘涉及处理多种类型或来源的数据,其中包括文本、图像、视频、音频等不同形式和结构的数据。由于数据的多样性和复杂性,多模态数据挖掘易忽视关联性,导致部分数据丢失。

刘长红等人^[1]通过图卷积网络学习文本数据间的区域关系并采用双向门控循环单元建立文本单词间的关系;利用张量融合网络对这些语义关系展开匹配,学习多模态数据间的细粒度语义关联;在此基础上通过门控循环单元学习文本关键词的全局特征,实现语义多模态的挖掘。该方法需要大量的计算资源和时间来处理大规模数据集,实时性较差。Zheng 等人^[2]基于位置敏感哈希和 Bloom Filter 创建文档索引向量和查询向量,用该方法获取编辑距离作为多模态文本数据的关键词差异标准;在此基础上将关键词标准拆分为多个单词形式,对其分别展开 top-k 语义排序搜索,以此完成多模态文本数据之间的关键词语义挖掘。该方法主要关注文本模态,缺少对多模态数据语义理解的片面性。杨帆等人^[3]首先通过引入多模态双重注意力机制的文本语义增强模块对多模态文本数据语义特征实施语义增强;其次在该模块中加入保留强度和更新强度功

能,以此控制多模态语义特征中查询关键词语义特征的保留和更新程度;最后对其展开一定优化,已完成整体多模态文本数据的关键词语义挖掘。该方法采用的多模态双重注意力机制,在未见过的数据分布或任务上容易面临泛化能力不足的问题。Hussain 等人^[4]采用 MaxNet 模型从多模态文本数据中提取深层特征,并通过分层堆叠的方式持续更新模型。同时,实施聚类处理来整合各种特征,并引入 softmax 概率来计算聚类后特征的语义相似性以实现语义挖掘。当特征之间的差异显著时,这种方法所使用的 softmax 概率可能无法精确地度量它们之间的相似性。

因此,本文提出一种基于深度文本聚类的关键词语义多模态挖掘方法。首先,通过深度学习的半监督学习算法,精确捕捉并融合多模态数据中的关键语义特征。其次,利用 BWP 指标与 FCM 聚类法相结合,科学确定最佳聚类数,确保数据的精准分类。随后,采用语义映射技术,将不同模态的特征统一映射至同一语义空间,从而深入挖掘关键词的深层语义信息。此技术路径不仅充分发挥了多模态数据的互补优势,还提升了关键词语义挖掘的准确性和全面性。

1 深度文本聚类

1.1 基于深度学习的多模态语义特征抽取和融合

针对关键词语义多模态文本数据环境中的数据结构异构特性^[5],提出基于深度学习的半监督学习算法,从原始的多模态文本数据中抽取得到具有代表性的深度语义特征,并降维到低维空间,简化数据的复杂性。网络模型结构如图 1 所示。

1. 郑州西亚斯学院电信与智能制造学院 河南郑州 450000
[基金项目] 郑州西亚斯学院 2024 年度校级科研项目 (2024XKD077); 河南省本科高校 2023 年度产教融合研究项目; 郑州西亚斯学院应用型本科高校建设专项教改项目 (2022YYXZX01)

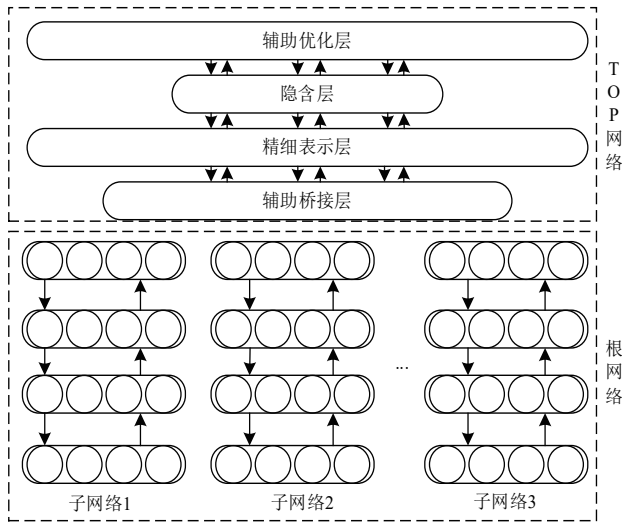


图1 半监督多模态神经网络总体结构图

该网络分为两个主要部分：根部网络与上层网络。

(1) 根部神经网络的同构特征抽取

将自动编码器^[6]作为网络的基本结构对根部网络展开训练，过程分为无监督预训练和有监督多模态联合微调阶段。

输入多模态文本数据 x ，在训练每一个隐藏层时通过权重矩阵 E_1 和映射函数 $\gamma(\cdot)$ 将 x 作非线性变换处理，并通过编码映射后，获取其隐含特征表达 $j = \gamma(E_1^T x)$ ，在解码阶段通过新的权重矩阵 e_2 和 $\gamma(\cdot)$ 将原始的输入 x 重构，获取重构后的输入 $x' = \gamma'(e_2^T j)$ ，将 x 与 x' 之间的重构误差作为优化目标展开无监督训练：

$$\text{Loss}(x, x') = \|x - x'\|_2^2 \quad (1)$$

完成独立模态的预训练后，对整个网络实施多模态联合微调。为了分析和保留各模态间的关系，在子网络最上层加入共享的辅助层，并与预训练的子网络一同调整参数。训练中令权值连接 Y_m 共享一个权值矩阵，以抽取相似的模态语义特征，提高多模态语义特征抽取的效率和准确性，这个过程采用引入最小化重构误差损失函数的反向传播算法^[7]实现，公式为：

$$Y = -\sum_j \sum_i \lg \left(A \left(U = u^{(i)} \middle| j_m^{(i)}, Y, b_{\text{root}} \right) \right) \quad (2)$$

式中： j_m 表示第 m 个模态的最上层神经元； N 表示训练样本 $x^{(i)}$ 的数量； $u^{(i)}$ 表示 $x^{(i)}$ 的类标； $j_m^{(i)}$ 表示第 m 个子网络对于输入 $x^{(i)}$ 的顶层输出； Y 表示权值矩阵； b_{root} 表示偏置向量。在此基础上引出 j_m 的 k 类分类问题，将 j_m 作为输入向量，求出 j_m 属于类别 i 的概率实现特征分类：

$$A \left(U = u^{(i)} \middle| j_m^{(i)}, Y, b_{\text{root}} \right) = \frac{\gamma \exp(Y^i j_m + b_{\text{root}}^i)}{\sum_{\varphi} \exp(Y^{\varphi} j_m + b_{\text{root}}^{\varphi})} \quad (3)$$

式中： Y^{φ} 表示权值矩阵 Y 的第 φ 个行向量。

最终采用梯度下降优化策略对整个模型参数展开相应调

整，以便从各子网络顶层隐藏层中提取高级抽象特征表达 j_m 。

(2) 上层网络半监督融合特征学习

在获取各个模态的高级抽象特征后，这些特征在上层网络中整合，以抽取最终的多模态共享融合特征。上层网络包括输入层、隐藏层和辅助优化层，根部网络获取的特征表达 j_m 将转换为上层网络的输入 x' 经过 $j = s(Ex' + b)$ 转换投影至低维特征空间。辅助优化层优化权值矩阵 Y 的参数，过程涉及 Logistic 分类器^[8]对顶部三层网络的训练，损失函数采用有监督判别损失函数 Y_{dis} 和无监督生成损失函数 Y_{gen} ， Y_{gen} 用于衡量重构后的输入 x' 与输出 $\hat{x}'$ 之间的重构损失，若值越小，则表明抽取到的融合特征中保留的原始信息越多，公式为：

$$\begin{cases} Y = Y_{\text{dis}} + Y_{\text{gen}} + \mu_1 \|E\|_{\varphi} + \mu_2 \|E\|^2 \\ Y_{\text{dis}} = -\sum_i \lg \left(A \left(U = u^{(i)} \middle| j^{(i)}, B, b_{\text{top}} \right) \right) \\ Y_{\text{gen}} = -\sum_i \left[x^{(i)} \lg \hat{x}^{(i)} + (1 - x^{(i)}) \lg (1 - x^{(i)}) \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中： B 表示数据真实标签； μ_1 、 μ_2 表示原始特征维度和目标特征维度； b_{top} 表示偏置向量。最终得到 Y_{gen} 最小化的输出 $\hat{x}'$ ：

$$\hat{x}' = s(E^Y s(Ex' + b) + b') \quad (5)$$

式中： $s(\cdot)$ 表示 sigmoid 函数； b 和 b' 表示偏置项，这些特征融合了不同模态的深度语义信息。

1.2 多模态文本聚类

1.2.1 最佳聚类数确定

聚类的理想结果是类内紧密而类间远离，为此采用簇间-簇内百分比 (between-within percentage, BWP) 指标作为最佳聚类目标，该指标不受量纲影响，综合考量类内距离最小化和类间距离最大化。

令 w 为聚类空间，假设 n 个多模态文本深度语义特征 $\hat{x}'$ 被聚类为 l 类，则定义第 o 类的第 i 个语义特征样本 $\hat{x}'$ 的 BWP 指标为^[9]：

$$\begin{cases} L_{\text{BWP}}(\hat{x}_o', x_i') = (v(o, i) - q(o, i)) / (v(o, i) + q(o, i)) \\ v(o, i) = \min_{1 \leq a \leq l, a \neq o} \left(\frac{1}{n_a} \sum_{p=1}^{n_a} \|x_p^{(a)} - x_i^{(o)}\|^2 \right) \\ q(o, i) = \frac{1}{n_o - 1} \sum_{q=1, q \neq i}^{n_o} \|x_q^{(o)} - x_i^{(o)}\|^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $v(o, i)$ 、 $q(o, i)$ 分别表示第 o 类的第 i 个语义特征样本的最小类间距离和类内距离； $\|\cdot\|^2$ 表示平方欧氏距离； $x_i^{(o)}$ 和 $x_p^{(a)}$ 分别表示第 o/a 类的第 i/p 个样本，其中 a 和 o 为类标； n_a 表示第 a 类中的样本个数； $x_q^{(o)}$ 表示第 o 类的第 q 个语义特征样本，且 $q \neq i$ ； n_o 表示第 o 类中的语义特征样本个数。

BWP 指标值越大表明单个语义特征样本的聚类效果越好, 为此将 K-means 算法与该指标相结合, 在给定聚类数搜索范围 $[l_{\min}, l_{\max}]$ 的基础上, 求出整个多模态深度文本语义特征中所有语义特征样本的 BWP 指标平均值 $L_{\text{avgBMP}}(l)$ 即可确定最佳聚类数 l_{opt} , 公式为:

$$\begin{cases} L_{\text{avgBMP}}(l) = \frac{1}{n} \sum_{o=1}^l \sum_{i=1}^{n_o} (\hat{x}_o, \hat{x}_i) \\ l_{\text{opt}} = \arg \max_{2 \leq l \leq n} \{L_{\text{avgBMP}}(l)\} \end{cases} \quad (7)$$

1.2.2 FCM 聚类算法

确定最佳聚类数 l_{opt} 后, 采用 FCM 聚类算法结合最佳聚类数进一步优化聚类结果, 该算法将 n 个多模态深度文本语义特征 $\hat{x}' = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 划分为 c 个模糊组, 求得模糊组 i 的聚类中心 c_i 以实现目标函数非相似性指标最小, 目标函数公式为:

$$\begin{cases} K(\mathbf{O}, c_1, c_2, \dots, c_c) = \sum_{i=1}^c K_i = \sum_{i=1}^c \sum_{o=1}^n o_{io}^\gamma d_{iq}^2 \\ \mathbf{O} \in \sum_{i=1}^c o_{io} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

式中: $d_{iq} = \|\mathbf{c}_i - \mathbf{x}_q\|$ 表示第 i 个聚类中心和第 q 个特征样本点之间的欧式距离; $\mathbf{O}$ 表示隶属度矩阵, o_{io} 表示第 i 个聚类中心第 o 类的隶属度; $\gamma \in [1, \infty)$ 表示加权指数。

为了得到最佳模糊聚类划分, 在给定最佳聚类数的基础上, 求得 $\min\{K(\mathbf{O}, c_1, c_2, \dots, c_c)\}$, 约束条件为 $v_o(o = 1, 2, \dots, n)$, 新目标函数为:

$$\begin{aligned} \bar{K}(\mathbf{O}, c_1, c_2, \dots, c_c, v_1, v_2, \dots, v_n) = \\ K(\mathbf{O}, c_1, c_2, \dots, c_c) + \sum_{o=1}^n v_o \left(\sum_{i=1}^n o_{io} - 1 \right) \end{aligned} \quad (9)$$

最后, 根据上式求出 c 个聚类中心:

$$c_i = \left(\sum_{o=1}^n o_{io}^a \mathbf{x}_i \right) / \sum_{o=1}^n o_{io}^a \quad (10)$$

若目标函数式 (9) 的结果小于某个确定的阈值则停止算法; 反之则采用下式求出新的 $\mathbf{O}$ 矩阵, 并通过式 (10) 持续迭代, 直到符合终止条件为止, 以此确定每个多模态深度文本语义特征的分类, 将相似的特征点聚类成一组, 形成多个聚类簇。

2 关键词语义多模态挖掘

针对每个聚类簇, 运用基于语义分析的映射方法, 通过挖掘多模态文本特征间的语义标签信息对同模态文本展开提取, 并揭示不同模态文本之间的语义关联。

(1) 多模态数据表达

引入基于多模态文本特性和多模态语料的数据表达机

制-多模态语义文档 (MAD), 统一表达不同模态的文本数据, 并反映其潜在语义关系, 命名相似语义的多模态文本为多模态语义文档。

由聚类簇中多类模态深度文本语义特征组成一个 L_{MAD} 集合, 通过 N_v 个语义类别表示为:

$$L_{\text{MADocs}} = \{L_{\text{MAD}1}, L_{\text{MAD}v}, L_{\text{MAD}N_v}\} \quad (11)$$

其中语义类别为 v 的 $L_{\text{MAD}v}$ 为:

$$L_{\text{MAD}v} = \bigcup_{\#} \{t_i^{\#}(v) | v, i = 1, 2, \dots, I_v^{\#}\} \quad (12)$$

式中: $t_i^{\#}(v)$ 表示从 v 中第 i 个多模态数据实例中提取的描述集合; $I_v^{\#}$ 表示 v 中包含的不同模态总数。

(2) 多模态语义融合与相关性计算

使用多模态高斯 PLSA 模型 (GM-PLSA) 和不对称算法建立同构的潜在主题语义空间, 能够有效地处理多模态数据之间的不平衡问题, 并深入挖掘多模态数据的关键词语义内涵, 从而更准确地挖掘出与关键词相关的语义信息。

在模型中, 多模态语义文档 $L_{\text{MAD}v}(v \in 1, \dots, N_v)$ 和多模态底层特征向量 $\mathbf{x}_i^{\#}$ 之间的关联性用潜在主题变量 $d_k(k \in 1, 2, \dots, K)$ 描述^[10], 即:

$$h(L_{\text{MAD}v}, \mathbf{x}_i^{\#}) = \sum_{d_k} h(d_k) h(L_{\text{MAD}v} | d_k) h(\mathbf{x}_i^{\#} | d_k) \quad (13)$$

d_k 与 $\mathbf{x}_i^{\#}$ 之间存在的条件概率为:

$$h(\mathbf{x}_i^{\#} | d_k) = 1 / \left(2\pi^{l_{\text{Dim}}/2} |\sum_k|^{1/2} \right) \exp \frac{(\mathbf{x}_i^{\#} - \kappa_i^{\#})^T \sum_k^{-1} (\mathbf{x}_i^{\#} - \kappa_i^{\#})}{2} \quad (14)$$

式中: l_{Dim} 表示 $\mathbf{x}_i^{\#}$ 的维数; $\sum_k$ 表示 $l_{\text{Dim}} \times l_{\text{Dim}}$ 协方差矩阵; $\kappa_i^{\#}$ 表示 l_{Dim} 维均值向量。

运用不对称学习算法对各类模态的关键词语义信息实施融合。首先, 通过 GM-PLSA 模型对某一模态展开学习, 以实现对其他模态的互补和优化。其次采用期望最大化算法 (EM) 估算 $h(d_k)$ 、 $h(L_{\text{MAD}i} | d_k)$, 接着学习另一种模态, 并保持 $h(d_k)$ 、 $h(\mathbf{x}_i^{\#} | d_k)$ 不变; 其次在已知模态特征分布的条件下, 学习某主题条件下的特征向量分布 $h(\mathbf{x}_i^{\#} | d_k)$; 最后从语义上将多模态数据融合, 计算出该数据的主题分布 $h(\mathbf{x} | L_{\text{MADnew}})$ 。

基于前述模型训练所得的主题分布, 并运用余弦夹角公式来获取相关性结果, 用 $L_{\text{MAD}i}$ 、 $L_{\text{MAD}j}$ 分别表示两个不同模态的对象, 其相关性的计算公式为:

$$C(L_{\text{MAD}i}^{\#}, L_{\text{MAD}j}^{\#}) = \frac{\sum_{d_k} h(d_k | L_{\text{MAD}i}^{\#}) h(d_k | L_{\text{MAD}j}^{\#})}{\sum_{d_k} \left[h(d_k | L_{\text{MAD}i}^{\#}) \right] \cdot \left[h(d_k | L_{\text{MAD}j}^{\#}) \right]} \quad (15)$$

当 $L_{\text{MAD}i}$ 、 $L_{\text{MAD}j}$ 在语义上越相似或关联性越高时, 它们的主题分布向量之间的夹角余弦值越接近于 1, 这意味着它们的关键词语义模态越相似, 挖掘出多模态数据间的语义关联, 获得高度语义相关性的多模态信息。

3 实验与分析

为了验证基于深度文本聚类的关键词语义多模态挖掘方法的整体有效性,需要对其展开测试。实验平台的配置包括 Ubuntu 16.04.5 LTS 64 位操作系统,搭载 Intel(R)Core(TM)i7 处理器,主频为 3.50 GHz,拥有 2 核处理器,配备 8 GB 显存和 4.25 TB 的硬盘容量。

实验数据集从 Wikipedia 生成,包含 2 173 个训练文本和 693 个测试文本对,每种特征作为一个数据模态,包括文本模态(单词 a1、词性 a2、语法 a3)、图像模态(像素 b1、纹理 b2、物体检测 b3)、音频模态(波形 c1、梅尔频谱 c2、声谱图 c3)以及噪声模态(带噪音特征 n1、均匀分布噪声 n2、高斯分布噪声 n3)。观察使用所提方法得到的模态权值信息,结果如图 2 所示。

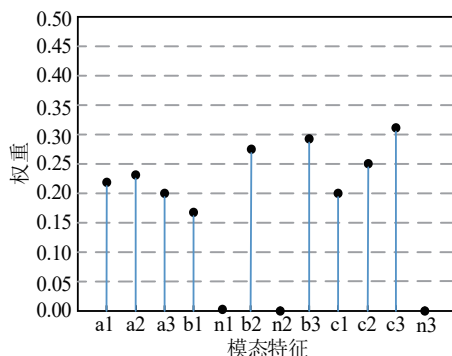


图 2 不同方法下各模态特征权重

分析图 2 可知,经过所提方法处理后,噪声模态(带噪音特征 n1、均匀分布噪声 n2、高斯分布噪声 n3)均为 0,表明该方法能够有效过滤噪声,并为关键词语义挖掘任务相关的模态赋予较高权值,证明了该方法的有效性。

以 BWP 值作为评估指标,验证所提方法对整体数据集的聚类效果,值越大表明聚类结果越好,对比结果如图 3 所示。

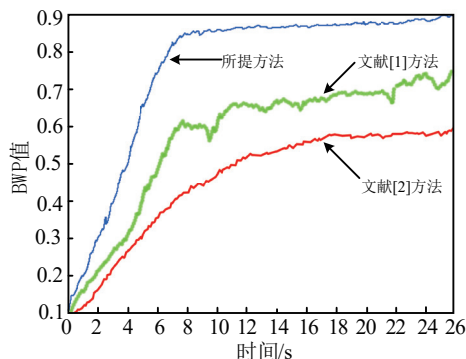


图 3 所提方法聚类效果

分析图 3 可知,所提方法的 BWP 值随着时间的增加稳步上升,并在第 9 s 时趋于稳定,最高达到了 0.9。相比之下,其他方法的 BWP 值整体上升趋势较慢且波动较大,文献 [1]

方法最高为 0.75,文献 [2] 方法最高为 0.6。这说明所提方法具有较快的聚类效率,能够在短时间内准确稳定地实现多模态文本数据特征的聚类。

使用 R@1 (第一名准确率)、R@5 (前五名准确率)和 R@10 (前十名准确率)作为评价指标,评估所提方法的挖掘性能。R@1、R@5 和 R@10 是用于衡量挖掘出的关键词与原始文本之间的语义相似度的关键指标,分别表示挖掘出的关键词语义中排名最高、前五、前十分别与原始文本语义最相关的关键词的占比,这些指标越高,说明挖掘出的关键词与原始文本的语义相似度越高,因此可以认为该方法的性能越好,计算公式为:

$$\begin{cases} R@1 = \frac{L_1}{W} \\ R@5 = \frac{L_5}{W} \\ R@10 = \frac{L_{10}}{W} \end{cases} \quad (16)$$

式中: L_1 、 L_5 、 L_{10} 分别表示挖掘出的关键词列表中排名第一、前五、前十的关键词与原始文本语义相关的次数; W 表示总测试次数。

对比结果如表 1 所示,由表中的数据可以看出,所提方法在 R@1 上达到了 0.985 的高分,相较于文献 [1] 和文献 [2] 方法分别提高了约 14 和 20 个百分点,在 R@5 和 R@10 上,所提方法同样展现出较高的性能,分别达到了 0.974 和 0.969,表明所提方法在捕捉最相关关键词方面表现卓越。

表 1 不同方法性能对比结果

方法	性能指标		
	R@1	R@5	R@10
所提方法	0.985	0.974	0.969
文献 [1] 方法	0.847	0.788	0.802
文献 [2] 方法	0.789	0.871	0.814

4 结语

本文所提的基于深度文本聚类的关键词语义多模态挖掘方法,通过半监督学习算法精准抽取并融合多模态数据中的语义特征,有效过滤噪声并赋予与关键词语义挖掘任务相关的模态较高权值。得出结论如下:

(1) 在聚类效率方面,所提方法的 BWP 值稳步上升,短时间内即达到稳定状态,最高值达到了 0.9,显示出其快速且稳定的聚类性能。

(2) 在语义挖掘方面,所提方法的 R@1、R@5 和 R@10 指标分别高达 0.985、0.974 和 0.969,展现出卓越的关键词捕捉能力。

参考文献:

[1] 刘长红, 曾胜, 张斌, 等. 基于语义关系图的跨模态张量融合网络的图像文本检索 [J]. 计算机应用, 2022, 42(10): 3018-3024.

[2] ZHENG K F, WANG N, LIU J W, et al. An efficient multikey-word fuzzy ciphertext retrieval scheme based on distributed transmission for internet of things[EB/OL]. (2022-04-08) [2024-02-19]. <https://doi.org/10.1002/int.22886>.

[3] 杨帆, 宁博, 李怀清, 等. 基于语义增强特征融合的多模态图像检索模型 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2023, 57(2): 252-258.

[4] HUSSAIN S, ZIA M A, ARSHAD W. Additive deep feature optimization for semantic image retrieval[J]. Expert systems with applications, 2021, 170(5): 114545.

[5] 郜帅, 侯心迪, 刘宁春, 等. 多模态网络环境异构标识空间管控架构研究 [J]. 通信学报, 2022, 43(4): 26-35.

[6] 赵鹏, 马泰宇, 李毅, 等. 融合全模态自编码器和生成对抗机制的跨模态检索 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(10): 1486-1494.

[7] 赵磊. 基于深度学习的多模态数据特征提取与选择方法研

究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.

[8] 王晓莉. 基于差分进化算法的思政多模态语料库智能构建 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38(5): 149-151.

[9] 尤博, 彭开香. 基于有效分类的多模态过程故障检测及应用 [J]. 上海应用技术学院学报 (自然科学版), 2015, 15(3): 242-247.

[10] 熊回香, 杨滋荣, 蒋武轩. 跨媒体知识图谱构建中多模态数据语义相关性研究 [J]. 情报理论与实践, 2019, 42(2): 13-18.

【作者简介】

周春良 (1996—), 男, 河南开封人, 硕士, 助教, 研究方向: 光学、图像识别。

杨畅畅 (1996—), 男, 河南商丘人, 硕士, 助教, 研究方向: 机器视觉、智能生产。

李晓辉 (1995—), 男, 河南平顶山人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 计算机视觉、边缘计算。

(收稿日期: 2024-11-15)

(上接第 152 页)

一致, 当 $t > 300$ 时, 本文改进的算法逐渐体现出优势, 时间稍微增大的同时噪声检测率逐渐提高。而且, 经过改进的算法处理的新数据集得到的第一主成分包含的信息比传统算法承载更多的信息量, 因此可用较少的主成分提取更多的原始信息, 降维效果更显著, 改进的算法模型更具实用性。

4 结语

通过对机械零部件疲劳断裂数据采集及分析存在的问题进行梳理, 提出了一种基于加权模糊 C 均值 - 对数变换 PCA 算法用于疲劳断裂检测数据的分析优化处理。与传统的算法相比, 不仅能够提高噪声检测率, 而且第一主成分包含更多原始信息, 提高了数据降维效果, 不仅加强了试验数据的安全管理, 而且提高了疲劳断裂测试人员的管理能力。

参考文献:

[1] 王利东. 机械工程中金属材料的疲劳与断裂分析 [J]. 产品可靠性报告, 2024(6): 117-118.

[2] AMOOIE M A, LIJESH K P, MAHMOUDI A, et al. On the characteristics of fatigue fracture with rapid frequency

change[J]. Entropy, 2023, 25(6): 840.

[3] 郭尚志, 廖晓峰, 李刚, 等. 基于 PCA 的大数据降维应用 [J]. 计算机仿真, 2024, 41(5): 483-486.

[4] 孙家祥, 胡春玲. 方差参数和信噪比参数特定于父节点的全局耦合模型 [J]. 电脑知识与技术, 2023, 19(27): 9-12.

[5] CHEN T, KUO D, CHEN C Y Z. Retraction note: fuzzy c-means robust algorithm for nonlinear systems[J]. Soft computing, 2023, 3(28): 2769-2775.

[6] 汪杨海, 贺细平. 扩展欧几里德算法改进探讨 [J]. 电脑与信息技术, 2018, 26(6): 12-14.

【作者简介】

黄啸 (1986—), 通信作者 (email: weco_x@163.com), 男, 浙江宁波人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 材料力学性能表征。

叶序彬 (1980—), 男, 湖北大冶人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 材料力学性能表征。

(收稿日期: 2024-11-17)

基于分数傅里叶变换的单次测量相位恢复算法

毛宇龙¹

MAO Yulong

摘要

文章提出了一种名为 SSPR-FrFT 的未训练神经网络 (UNN) 框架, 用于通过单次分数阶傅里叶变换 (FrFT) 测量进行相位恢复。该方法引入近场测量模型, FrFT 在时频平面上对信号进行旋转, 描述了光波在近场条件下的复杂传播过程, 包括菲涅尔衍射。与依赖大量配对数据集的传统监督方法不同, SSPR-FrFT 采用自监督重建, 通过未训练的神经网络框架处理来自单次测量的衍射图像, 优化测量到重建的映射, 显著提高计算效率和幅度与相位恢复的准确性。在 CELL8 和 Fashion-MNIST 数据集上的实验评估表明, SSPR-FrFT 具有优越性, 能够在峰值信噪比 (PSNR) 上实现最高 8.0 dB 的提升, 并在结构相似性指数 (SSIM) 上获得 0.19 的提高。通过 CELL8 数据集上的 5 折交叉验证结果表明, 在处理复杂数据时, SSPR-FrFT 展现了稳定一致的收敛趋势。

关键词

单次测量; 相位恢复; 分数阶傅里叶变化; 未训练神经网络

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.038

0 引言

相位恢复是光学科学中最引人注目且研究最广泛的逆问题之一^[1]。在各个科学和工程领域广泛应用, 包括计算机生成全息术^[2]、X 射线晶体学^[3]、计算显微镜^[4]等。由于所有基于现实世界物理现象的正演问题都涉及信息丢失, 导致相应的逆问题变得病态。这使得求解逆问题变得极具挑战性。

1 相关工作

解决相位恢复问题的方法大致分为两类。第一类方法中, 人们利用信号的先验信息, 在可接受的误差范围内找到问题的多个可能近似解之一。

近年来, 随机掩模已被证实是优化过程中的一个强大约束工具。这些掩模可以通过数字微镜装置 (DMD) 或空间光调制器 (SLM) 来实现^[5]。尽管使用随机掩模可以提升重建性能, 但由于 DMD 和 SLM 设备的高昂成本和准确性问题, 这种方法的广泛应用受到了限制。此外, 经验表明, 为了达到精确重建, 使用随机二值掩模通常需要进行约 4 至 6 次测量^[6], 这将延长数据采集时间, 因而不适合用于瞬态光学成像。第二类方法中, 深度神经网络 (DNN) 应用于单次傅里叶强度测量的相位恢复问题^[7-9]。这些方法通过前馈神经网络在 GPU 加速下实现实时处理, 但在傅里叶振幅到复数信号的非线性映射中仍存在准确性挑战。传统方法依赖大量数据,

缺乏物理过程理解, 影响泛化能力和稳定性。尽管数据驱动方法过度依赖“黑盒”网络, 忽视物理模型, 降低了可解释性和泛化性, 且通常需要昂贵且难以获取的成对数据集。

传统光学设置假设测量发生在傅里叶平面或夫琅和费区, 但实际中, 强度图像可在任意角度收集, 需要超越傅里叶变换的新测量模型。

本文提出了一种基于分数阶傅里叶变换 (FrFT) 的新型单次测量相位恢复框架。研究表明, 单次 FrFT 测量可通过物理近场衍射准确获得, 无需额外光学元件。同时, FrFT 域中的测量保留了信号的幅度和相位信息, 有助于相位恢复过程, 克服傅里叶域中常见的相位信息丢失问题。

2 方法

在本节中, 提出了基于 FrFT 的测量模型。并在此基础上, 提出了一种基于未训练神经网络 (UNN) 方案的自监督重构方法。

2.1 基于 FrFT 的单次测量近场测量模型

分数阶傅里叶变换是傅里叶变换的扩展。经典的傅里叶变换能够将一个信号从时域转到频域, 而分数阶傅里叶变换则引入了一个新的参数 α , 该参数控制信号的变换角度。当 $\alpha=1$ 时, 分数阶傅里叶变换退化为标准的傅里叶变换, 分数阶傅里叶变换定义为:

$$X_{\alpha}(u) = \mathcal{F}_{\alpha}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} K_{\alpha}(t, u)x(t)dt \quad (1)$$

式中: $K_{\alpha}(t, u)$ 为分数阶傅里叶变换的核函数, 通常表示为:

1. 西安石油大学 陕西西安 710065

$$K_{\alpha}(t, u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ j\pi \left[\frac{t^2}{2\alpha} - \frac{u^2}{2\alpha} + tu \right] \right\} \quad (2)$$

在实际应用中, 物体的复振幅 $A(x, y)$ 经分数阶傅里叶变换后, 传输到探测面上的光场 $U(x', y')$ 可以表示为:

$$U(x', y') = \mathcal{F}_{\alpha}\{A(x, y)\} \quad (3)$$

探测面上的光场 $U(x', y')$ 可以表示为物体面上光场与传播函数的卷积形式。探测面上的光强度 $I(x', y')$ 与物体表面光场之间的关系可以表示为:

$$I(x', y') = \left| \frac{1}{\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y) \exp \left(\frac{j2\pi}{\lambda z} [(x' - x)^2 + (y' - y)^2] \right) dx dy \right|^2 \quad (4)$$

式中: λ 是光的波长; z 是物体面到探测面的传播距离; (x', y') 和 (x, y) 分别是探测面和物体面上的坐标。将光场传播问题转化为带有 FrFT 的卷积问题, 并结合 Fourier-Mellin 变换和广义函数理论推广采样定理, 具体形式为:

$$\mathcal{M}\{A(x, y)\} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} A(x, y) \exp(-j\omega(x^r + y^r)) dx dy \quad (5)$$

该变换通过引入参数 r , 使其能够在尺度变换下有效处理光场的频谱。为了进一步处理光学信号的稀疏性, 引入了压缩感知理论, 当信号在某些基下具有稀疏表示时, 采样频率可以低于传统的奈奎斯特频率要求。在光学信号中, 采样频率 f_s 的最小值取决于信号的稀疏性特征。采样频率可以进行优化为:

$$f_{s_x} = \mathcal{O}(kB_x), \quad f_{s_y} = \mathcal{O}(kB_y) \quad (6)$$

式中: k 是稀疏度因子, 表示信号中有效频谱成分的比例。这一改进的采样定理为在低频或高维信号的采样中提供了理论依据, 得到了完整的进场衍射模型。

2.2 基于 UNN 的自监督重构方法

过去十年的研究主要集中在傅里叶 PR 的重建算法, 包括迭代优化方法和神经网络方法^[10-12]。在这一部分中, 定义了 SSPR-FrFT 问题, 并提出了一种基于未训练神经网络 (UNN) 的 SSPR-FrFT 重建方法。

2.2.1 问题表述

深度神经网络已成功地应用于许多非凸优化问题, 所以基于本文提出的 FrFT 的测量模型, SSPR-FrFT 问题可以用数学形式表示为:

$$\text{Given } I = |F_{\alpha}\{O\}|, \quad \text{find } O \quad (7)$$

式中: I 和 O 分别表示衍射图样的强度、对应底层物体。通常, 通过最小化以下代价函数, 可以在正则化优化框架内解决 SSPR-FrFT 逆问题:

$$\argmin_O \frac{1}{2} \|I - |F_{\alpha}\{O\}|\|_2^2 + \beta \cdot \text{TV}(O) \quad (8)$$

式中: 用总变差 (TV) 范数 $\text{TV}(O)$ 正则化; β 是控制正则化器权重的参数。

这种非凸的问题用传统的优化方法求解逆过程中会产生数值误差, 为了寻求更优的解决方案, 本文设计了一个神经网络 $f_{NN}(I, \Theta)$, 根据以下经验损失, 通过调整网络的权重 Θ , 直接从捕获的强度测量 I 到期望对象 O 的逆映射:

$$\min_{\Theta} \frac{1}{2} \|I - |F_{\alpha} f_{NN}(I, \Theta)|\|_2^2 \quad (9)$$

与 (8) 式不同, 优化策略在于直接对神经网络的参数进行调整, 而不是传统的对估计目标本身进行优化。该框架采用自监督学习机制, 通过网络权重的适应性调整, 实现了对幅度及相位目标的重构。具体来说, 该方法采用了基于分数阶傅里叶变换测量模型, 通过未经训练的神经网络实现从强度测量到所需物体的映射。重要的是, 所提出的方法避免了依赖于大量成对的真实场景和其相应测量值的传统数据依赖问题, 提高了方法的实用性和泛化能力。

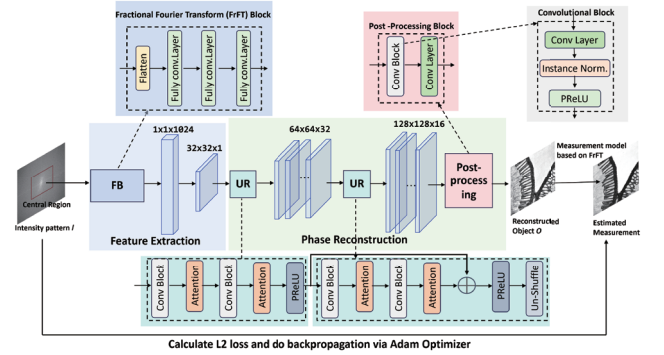


图 1 SSPR-FrFT 原理图

2.2.2 整体框架

本文方法流程如图 1 所示。神经网络接收单次测量中的衍射图案, 并输出对象估计。使用基于 SSPR-FrFT 的测量模型进行数值计算, 模拟得到衍射图样。通过比较实际测量值与估计图样的差异, 利用损失函数和自动微分技术优化网络参数。训练过程仅涉及 SSPR-FrFT 前向传播函数和未标记的衍射图样, 更新后的网络可直接从单次测量的强度模式反演目标, 无需迭代过程。

(1) 特征提取

提出了一个新的分数阶傅里叶变换处理模块, 融合不同频率数据的信息。该模块包括三个全连接 (FC) 层。输入的傅里叶测量数据从 $128 \times 128 \times 1$ 大小重塑为 $1 \times 1 \times 16384$ 后, 送入第一个 FC 层, 每个 FC 层包含 1024 个神经元, 用于提取重建原始复值图像所需的特征。

(2) 相位重建

相位重建部分由两个上采样和重建 (UR) 模块及一个后处理模块组成。UR 模块负责从提取的特征中重构复值图像,

并逐步上采样至原始大小。UR 模块的核心是卷积块，包含卷积层、实例归一化层和 PReLU 层。卷积层配备 3×3 的可学习滤波器，用于近似从提取的特征到复值图像的非线性反向映射。

3 仿真结果

3.1 消融实验

为评估 SSPR-FrFT 模型的鲁棒性，采用了 $k=5$ 的 K-Fold 交叉验证。数据集被随机打乱并分为 5 个子集，每次将一个子集作为测试集，其他 4 个子集作为训练集。每次训练包括 100 个 epoch，每个子集的 75% 用于训练，25% 用于测试。记录了每 20 个批次的训练损失和每个 epoch 结束时的测试损失。实验在 CELL8 数据集上进行，结果如图 2 所示，随着训练进展，损失显著减少，验证了模型的有效性与鲁棒性，尽管早期损失下降较慢，最终趋于稳定。

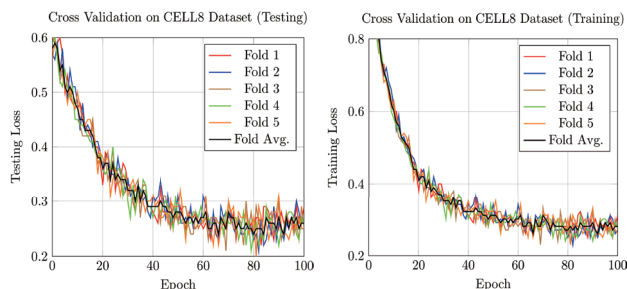


图 2 $k=5$ 交叉验证结果

3.2 基于 UNN 的重构方法评价

基于两个不同的数据集图像进行了模拟：Cell8 数据集^[13]和 Fashion-MNIST 数据集^[14]。将训练数据转换为灰度图像，并将大小调整为 $128\text{ px}\times 128\text{ px}$ ，使用预处理后的图像 $x\in[0,1]$ 生成两种形式的复值图像：纯相位图像和纯幅度图像。提出的重构方法基于 PyTorch version 2.0.0 平台，使用 Python 3.9，通过一个 Intel(R) UHD Graphics 630 集成显卡实现。在训练过程中，使用 Adam 优化器对模型进行了共 10000 次的优化，学习率经验设置为 2×10^{-4} 。值得注意的是，除了输入测量本身，本文方法不需要任何外部训练数据。

本文将 SSPR-FrFT 与最近的深度学习傅立叶相位恢复方法进行了比较，包括：残差网络 (ResNet)、prDeep、条件生成对抗相位检索网络 (PRCGAN)、NNPhase、维尔汀格流 (WF)、PhysenNet。所有深度学习方法的超参数均按原文定义或在训练前进行最佳微调并固定。对于传统的优化方法，使用全帧 $762\text{ px}\times 762\text{ px}$ 强度图像作为输入进行评估。每个测试图像进行了 3 次不同的评估实验，最多迭代 2 000 次，以最佳成绩作为最终结果。

大多数基于深度学习的相位恢复方法仅接受小尺寸强度

测量，如 PRCGAN 和 NNPhase 分别仅接受 $28\text{ px}\times 28\text{ px}$ 和 $64\text{ px}\times 64\text{ px}$ 的强度测量。因此，需要将 $762\text{ px}\times 762\text{ px}$ 的强度测量转换为这些网络可处理的大小。

通过从不同参数的 FrFT 测量中重建仅振幅和仅相位目标的效果。表 1 展示了在 Fashion-MNIST 和 Cell8 数据集上，使用平均峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似指数 (SSIM) 评估的恢复精度。结果表明，最新的深度学习方法以及未训练的神经网络方法能够有效地从不同 FrFT 测量 ($p=0.2$, $p=0.4$, $p=0.6$, $p=0.8$) 中重建物体。

表 1 实验结果

datasets	method	type	p=0.2	p=0.4	p=0.6	p=0.8
CELL 8	WF		11.34/0.05	21.62/0.61	19.78/0.59	24.56/0.76
	ResNet		10.68/0.13	15.87/0.65	23.01/ <u>0.89</u>	26.48/0.82
	prDeep		9.26/ 0.27	23.38/0.83	25.64/0.85	25.03/0.84
	PRCGAN	Amplitude	<u>11.81</u> / 0.27	27.23/0.83	24.21/0.76	25.31/0.86
	NNPhase		9.86/0.23	23.37/0.75	29.12/0.86	28.54/0.89
	PhysenNet		10.98/0.24	<u>29.75</u> / 0.89	<u>29.55</u> /0.88	<u>31.04</u> / <u>0.91</u>
	Ours		11.88 / <u>0.26</u>	29.93 / <u>0.88</u>	34.63 / 0.91	37.57 / 0.96
	WF		<u>12.36</u> /0.18	19.38/0.66	22.54/0.64	23.16/0.71
	ResNet		10.95/0.20	21.98/ <u>0.89</u>	26.52/0.82	23.70/0.79
	PRCGAN		11.74/0.21	19.54/0.71	23.72/0.72	24.50/0.76
	NNPhase	Phase	10.32/0.25	<u>22.65</u> /0.85	29.10/0.81	29.42/0.87
	PhysenNet		7.24/0.09	21.71/0.88	<u>30.79</u> / <u>0.86</u>	<u>32.98</u> / <u>0.97</u>
Fashion-MNIST	Ours		14.66 / 0.29	32.55 / 0.91	34.06 / 0.92	37.41 / 0.98
	WF		10.34/0.06	22.82/0.65	21.50/0.67	25.91/0.78
	ResNet		9.29/0.16	29.98 /0.75	24.44/ <u>0.85</u>	27.84/0.83
	prDeep		<u>11.26</u> /0.19	25.64/0.83	20.09/0.69	26.37/0.86
	PRCGAN	Amplitude	10.25/ <u>0.26</u>	29.34/ 0.88	26.21/0.79	24.48/0.85
	NNPhase		9.63/0.23	<u>29.97</u> / <u>0.85</u>	<u>29.56</u> / <u>0.91</u>	<u>32.98</u> / <u>0.92</u>
	PhysenNet		10.97/0.24	28.01/0.84	28.72/0.84	32.54/ <u>0.92</u>
	Ours		11.68 / 0.28	29.90 / 0.88	37.56 / 0.97	37.59 / 0.97
	WF		9.99/0.20	24.13/0.69	23.15/0.79	22.56/0.72
	ResNet		11.84/0.19	25.67/0.75	24.78/ <u>0.87</u>	25.64/0.84
	PRCGAN		<u>12.57</u> / <u>0.21</u>	26.53/0.71	23.99/0.76	24.12/0.71
	NNPhase	Phase	11.59/0.19	23.71/0.82	31.21/0.83	32.79/ <u>0.91</u>
	PhysenNet		8.24/0.12	<u>27.79</u> / <u>0.88</u>	<u>32.89</u> /0.84	<u>34.47</u> / 0.98
	Ours		14.36 / <u>0.26</u>	31.64 / 0.90	34.06 / 0.95	37.91 / 0.98

为了直观对比，图 3 和图 4 分别展示了不同 PR 方法对不同 FrFT 测量下单振幅和单相位目标的重建结果。需要注意的是，prDeep 仅限于实值重建，因此不适用于纯相位目标。

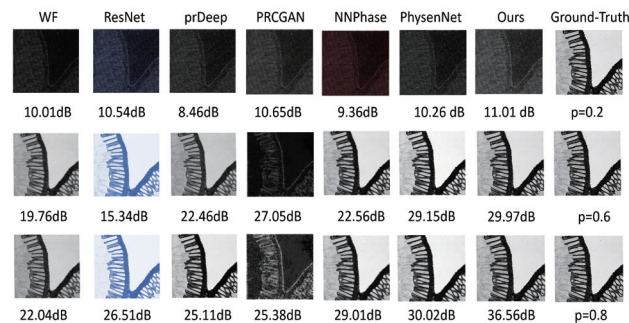


图 3 七种相位恢复方法在 CELL8 数据集上不同分数阶测量下的重建结果 (幅度)

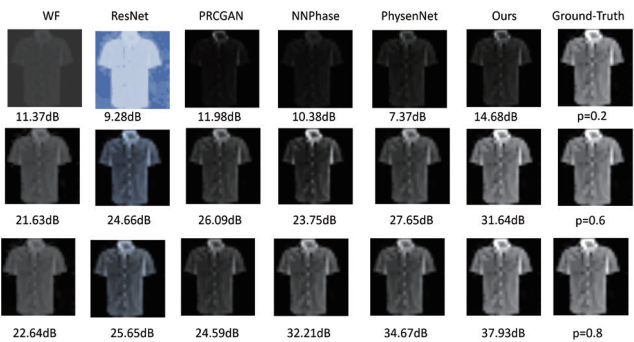


图 4 六种相位恢复方法在 Fashion-MNIST 数据集上不同分数阶测量下的重建结果（相位）

通过收集 100 个样本的平均执行时间，评估了不同方法的推理速度、可学习参数数量和模型复杂性。结果如表 2 所示，SSPR-FrFT 的推理速度非常快（9.385 ms/img），实现实时性能，优于传统算法（秒级推理）。SSPR-FrFT 具有中等数量的可学习参数和较低的模型复杂性，表现出比具有相似或更多参数的深度学习方法更好的重构性能。相比之下，PRCGAN 尽管有超过 1×10^8 的参数，但精度较低，可能是过度拟合的结果。

表 2 七种相位恢复方法的参数对比

Algorithm	Inference Time (ms/img)	Parameters (Millions)	Complexity (GFLOPs)
WF	3.967×10^3	NA	NA
ResNet	7.295	0.17	1.04
prDeep	3.545	0.05	2.17
PRCGAN	3.449	111.29	0.05
NNPhase	17.251	18.27	2.59
PhysenNet	17.314	25.29	1.02
Ours	9.385	21.43	1.36

4 结论

本文从分数阶傅里叶变换（FrFT）角度解决单次测量相位恢复问题，SSPR-FrFT 提供灵活的采样策略，适应不同采样率，提高计算稳定性，适用于多种光学系统和成像模型。在信号处理和图像重建中，SSPR-FrFT 有效分解信号、抑制噪声、提升精度、减少伪影，同时为光学设计提供精确优化工具。

参考文献：

[1] BERTERO M, BOCCACCI P, MOL C D. Introduction to inverse problems in imaging[M].Boca Raton: CRC Press, 2021.

[2] CHAKRAVARTHULA P, TSENG E, SRIVASTAVA T, et al. Learned hardware-in-the-loop phase retrieval for holographic near-eye displays[J]. ACM transactions on graphics (TOG), 2020, 39(6): 1-18.

[3] MIAO J, SAYRE D, CHAPMAN H N. Phase retrieval from the magnitude of the fourier transforms of nonperiodic ob-

jects[J]. The journal of the acoustical society of america, 1998, 15: 1662-1669.

[4] ZHENG G A, HORSTMAYER R, YANG C H. Wide-field, high-resolution fourier Ptychographic microscopy[J]. Nature photonics, 2013(7): 739-745.

[5] HORISAKI R, OGURA Y, AINO M, et al. Single-shot phase imaging with a coded aperture[J]. Optics letters, 2014, 39(22): 6466-6469.

[6] CANDES E J, LI X D, SOLTANOLKOTABI M. Phase retrieval via wirtinger flow: theory and algorithms[J]. IEEE transactions on information theory, 2015, 61(4): 1985-2007.

[7] SINHA A, LEE J, LI S, et al. Lensless computational imaging through deep learning[J]. Optica, 2017, 4: 1117-1125.

[8] SHI J S, ZHU X J, WANG H Y, et al. Label enhanced and patch based deep learning for phase retrieval from single frame fringe pattern in fringe projection 3D measurement[J]. Optics express, 2019, 27(20): 28929-28943.

[9] KELLMAN M R, BOSTAN E, REPINA N A, et al. Physics-based learned design: optimized coded-illumination for quantitative phase imaging[J]. IEEE transactions on computational imaging, 2019, 5(3): 344-353.

[10] CANDES E J, STROHMER T, VORONINSKI V. Phaselift: exact and stable signal recovery from magnitude measurements via convex programming[J]. Communications on pure and applied mathematics, 2013, 66(8): 1241-1274.

[11] WANG F, BIAN Y M, WANG H C, et al. Phase imaging with an untrained neural network[J/OL]. Light: science & applications,2020[2024-09-12]. <https://www.nature.com/articles/s41377-020-0302-3>.

[12] YE Q L, WANG L W, LUN D P K. SiSPRNet: end-to-end learning for single-shot phase retrieval[J]. Optics express, 2022, 30(18): 31937-31958.

[13] ITO S. CIL:10932, Felis catus, epithelial cell, enterocyte.[EB/OL].[2024-07-29]. <https://doi.org/doi:10.7295/W9CIL10932>.

[14] HAN X, RASUL K, VOLLGRAF R. Fashion-MNIST: a novel image dataset for benchmarking machine learning algorithms[DB/OL].(2017-09-15)[2024-07-27]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.07747>.

【作者简介】

毛宇龙（2000—），男，陕西西安人，硕士研究生，研究方向：计算成像，email: 1141628827@qq.com。
(收稿日期：2025-02-18)

一种基于微组件架构的前端低代码平台

张钢岭¹ 陈 聪¹ 郭凌云¹
ZHANG Gangling CHEN Cong GUO Lingyun

摘 要

针对传统软件开发面临开发周期长、技术门槛高、投入成本大等问题,提出一种基于微组件架构的前端低代码平台解决方案。通过将前端应用拆分为独立的、可复用的微组件,大幅降低开发难度和周期,并允许非专业开发者通过拖放和配置的方式快速构建前端应用。提高了开发效率,同时保证了系统的灵活性和可扩展性。

关键词

低代码;微组件;Single-Spa;JSON Schema;Low-Code

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.039

0 引言

数字化时代,各类应用程序的需求与日俱增。然而,传统应用程序的开发流程通常开发周期长、成本高、资源消耗大,不适合数字化时代快速迭代,降本增效的要求,对于业务创新和团队效率提出了挑战。为了解决这一问题,低代码平台应运而生。低代码平台^[1]作为一种创新性的工具,以其简化和加速软件开发的能力,以及灵活可扩展的特性引起了广泛关注。

本文旨在探讨一种现实可行的前端低代码平台。通过详细介绍其组成,以及实现要点。向读者展示低代码平台需要解决的技术问题,并横向对比各种解决方案。为研究人员、开发人员和企业决策者提供深入了解和评估低代码平台的基础,以推动企业更快速、更灵活的数字化转型。

1 低代码平台分类

从开发方式区分,低代码平台分为自动化代码生成平台和可视化拖拽式平台。它们在工作原理、开发方式和使用群体等方面存在一些区别。

1.1 自动化代码生成平台

这类低代码平台通过解析开发人员提供的元数据、配置或其他规则,自动生成应用程序的部分代码。这种平台旨在提高开发效率、减少手动编写代码的工作量,并确保生成的代码符合一致性和最佳实践。

优点:

(1) 快速生成代码:通过自动生成代码模板,开发人

员可以快速生成初始代码,节省开发时间和精力。

(2) 一致性和可维护性:生成的代码模板遵循一致的结构和规范,提高了代码的可读性和可维护性。

(3) 可配置性:自动化代码生成平台提供了丰富的配置选项,开发人员可以根据项目需求和业务规则来进行定制。通过配置选项,开发人员可以定义实体关系、字段属性、业务逻辑、界面布局等方面的规则,从而生成符合特定需求的代码。

缺点:

(1) 缺乏灵活性:生成的代码模板可能无法满足所有的开发需求,需要进行额外的自定义编辑和扩展。

(2) 学习曲线高:开发人员需要理解生成代码模板的低代码平台的工作原理和使用方法,可能需要一定的学习成本。

1.2 可视化拖拽式平台

这类低代码平台通过可视化界面和拖拽操作来进行应用程序的开发。业务人员可以通过拖拽组件、定义属性和配置事件等方式来构建应用程序的用户界面和逻辑。

优点:

(1) 可视化开发:通过直观的可视化界面和拖拽操作,业务人员可以快速构建应用程序,无须编写代码。

(2) 即时反馈:可视化拖拽低代码平台通常提供即时预览功能,开发人员可以实时查看应用程序的外观和行为。

(3) 降低技术门槛:相较于传统的编码开发方式,可视化拖拽低代码平台降低了对编程知识的依赖,使更多人可以参与应用程序的开发。

缺点:

(1) 限制性:可视化拖拽式低代码平台通常提供了一组预定义的组件和操作,开发人员需要在这些限定的选项中

1. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所
陕西西安 710066

进行选择。这可能会限制业务人员的创造力和灵活性，同时无法满足复杂应用程序的开发需求。

(2) 学习成本高：尽管可视化拖拽式低代码平台旨在简化开发过程，但对于新的业务人员或团队来说，仍然需要一定的学习曲线和培训成本。了解平台的界面、组件和工作流程可能需要一段时间，并且需要熟悉平台的约束和限制。

(3) 性能和定制化的挑战：可视化拖拽式低代码平台生成的代码可能不够高效，存在性能瓶颈。此外，对于需要高度定制化和优化的应用程序，可能需要深入了解平台的底层机制，并使用自定义代码进行调整。这可能会增加开发人员的工作量和复杂性。

相较而言，可视化拖拽式平台因其直观易用、灵活定制、所见即所得等特性，更符合企业快速迭代的需要。因此，本文将介绍一种可视化拖拽式前端低代码平台。

2 低代码平台

本文将深入探讨一种可视化拖拽式低代码的核心原理和关键技术。在此之前，本节先简单介绍可视化拖拽式低代码的关键组成部分，以帮助读者建立此类平台的直观认识。

(1) 可视化设计器：是可视化拖拽式低代码平台的关键组件。它提供了一个直观的界面，开发人员可以在其中进行应用程序的界面设计和布局。设计器通常包含一个丰富的组件库，其中包含各种预定义的界面组件，如按钮、表单字段、列表等。开发人员可以通过拖拽和配置操作，将这些组件放置在设计区域，并进行布局和样式设置。

(2) 属性编辑器：用于配置和编辑界面组件的属性。当开发人员选择一个组件时，属性编辑器会显示该组件的属性列表。通过属性编辑器，开发人员可以设置组件的文本内容、样式、行为等。属性编辑器通常提供了友好的界面和可视化的选项，使属性配置更加直观和便捷。

(3) 数据模型生成器：是可视化拖拽式低代码平台中的核心组成部分。允许开发人员定义数据模型的结构和约束。通过定义模型的属性、类型、格式以及验证规则，开发人员可以确保所创建的应用程序符合预期的数据结构和数据质量标准。

(4) 数据模型解析器：是可视化拖拽式低代码平台中的核心组成部分。负责解析数据模型，动态生成前端界面，并根据用户定义的验证规则，验证用户输入的合法性和完整性。

通过对可视化拖拽式低代码组成部分的介绍，不难发现此类低代码的关键一方面取决于是否有足够丰富的组件，组件越丰富，此类低代码可以适配的业务范围越广。另一方面

取决于使用什么样的模型存储设计好的系统，模型应该具有良好的解释性，扩展性和可验证性。

基于以上两点，本文介绍了一种可视化拖拽式低代码的实现，其框架设计如图 1 所示。

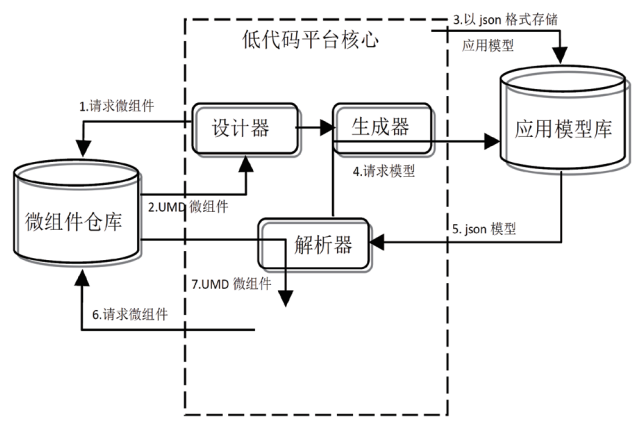


图 1 低代码平台基础框架

如前文所说，拖拽式低代码平台通常提供预设的组件和模型，这些组件和模型虽然易于使用，但也限制了平台的灵活性和可扩展性。因此，如何动态扩展组件，满足业务自由度的需求，是拖拽式低代码平台必须首要解决的问题。本文提供了一种组件和平台解耦，平台支持热插拔动态获取远程组件的低代码设计方案。下面，本文将从微组件、如何渲染微组件、微组件与基座如何通信三部分介绍低代码平台。

2.1 微组件

微组件是采用微前端^[2]技术实现的单个组件。它与平台完全分离，但又能集成到平台中组成系统的一部分。本文对比几种当下流行的微前端框架，如表 1 所示。

表 1 微前端框架对比

	Single-spa ^[3]	Qiankun	Micro-app
技术栈	技术栈无关，支持多种前端框架	技术栈无关，支持多种前端框架	webcomponent ^[4]
拆分粒度	组件级，页面级	页面级	组件级
Js 隔离	支持	支持	支持
样式隔离	支持	支持	支持
公共模块重用	支持	不支持	不支持

不同的微前端框架各有优缺点，在选用这些框架时，应该根据具体的产品特性和项目需求来选择。一个优秀的拖拽式低代码平台应该具备以下特性。

(1) 能够支持多种前端框架。不同的团队可以根据项目的需求和团队的熟悉度选择最适合的前端框架。

(2) 支持组件级的前端单元复用。拖拽式低代码平台的优势就在于为用户提供一组功能完备的组件,方便用户快速搭建出满足业务需要的系统。

(3) 减少重复模块的加载。出于性能考虑,平台应该维护公共模块,减少不必要的模块下载。同时,相同的模块版本也有助于统一前端风格和功能。

出于以上几点考虑,Single-spa 微前端框架更符合拖拽式低代码平台对于微组件的需要。选定微前端框架后,在实现微组件的过程中,还应该注意一些细节。

(1) 组件采用 UMD^[5] 规范。通用模块定义规范(universal module definition, UMD),旨在提供一种同时兼容 AMD、CMD 和 CommonJS^[6] 规范的代码模块。UMD 模块的目标是让同一个代码模块可以在上述 3 种 JavaScript 模块规范中都能够正常运行。

(2) 共享通用模块。微组件通常依赖第三方模块,比如前端框架(如 React^[7], Vue^[8])、第三方工具(如 axios, lodash 等)。如果每个微组件的产出物都包含所有的依赖模块,势必造成相同模块重复加载的问题(比如每个微组件都要加载 Vue),一方面降低页面响应速度,另一面也容易造成样式和行为不一致。Single-spa 推荐使用 SystemJS^[9] 作为前端模块加载器。SystemJS 采用 importMap 加载机制来管理模块路径映射,一方面使得模块的引用更加简洁和可维护。另一方面支持动态加载模块,允许在运行时按需加载模块。同时也确保同一个模块的不同版本,在浏览器中只缓存一份,避免了不必要的数据加载。但 SystemJS 默认只支持 System.register 类型的模块,而本文在前面提到,为了保证微组件的可移植性,规定微组件采用 UMD 模块类型。如果直接使用 SystemJS 加载 UMD 模块类型的组件,会导致加载异常。因此,在加载之前,需要将 UMD 模块类型的微组件转换成 System.register 模块类型。SystemJS 官方给出了一组工具,可以将其他类型的模块转换成 System.register 模块类型,以确保模块可以正常加载。这组工具是不会自动加载的,需要用户根据实际需要加载所需的转换工具。因此,低代码平台需要在页面入口首先加载 UMD 模块类型的转换工具。至此,通过引入 SystemJS 及其 importMap 加载机制,实现了前端通用模块的管理和维护,提升了页面加载效率和响应速度。

2.2 渲染微组件

微组件技术使得组件开发者可以自由选择技术栈开发满足业务需要的前端组件,然后将其发布成 UMD 模块并上传到组件库。低代码平台再通过 URL 地址动态加载组件到浏览

器。那么,浏览器在完成微组件加载后,又如何动态使用微组件呢?

一种常用的方法是使用 new Function 构建一个函数的运行沙箱环境,将组件模块的导出对象挂载到事先准备好的目标对象,然后再使用前端框架的动态组件渲染技术将组件渲染到页面中。但这种方法有一定的局限性,即微组件和基座必须使用相同的前端框架,这就限制了组件开发者的技术栈选择范围,不符合微组件框架无关性的要求。

本文使用 Single-spa parcel 来解决动态渲染微组件的问题。Single-spa parcel 是一种构造框架无关组件的实现方法。它具有以下特性:

(1) 独立性:每个 Parcel 都是独立的,它不依赖于 Single-spa 应用的生命周期,可以独立加载和卸载。

(2) 动态加载:Parcel 可以在运行时动态加载到应用中,无须重启应用。

一个 parcel 本质上就是一个 js 对象,但需要具备一组函数(bootstrap, mount, unmount)以便在特定的时间节点执行组件启动,挂载,卸载任务。为了支持不同前端框架,Single-spa 提供了一组框架相关工具,一方面极大地简化从框架组件转化为 parcel 的过程。另一方面内置 Parcel 组件,用来渲染微组件。

现在,组件开发者使用自己熟悉的技术栈开发组件,并使用 Single-spa 提供的工具将其封装为 parcel 组件,然后将组件打包成满足 UMD 规范的微组件。然后,低代码平台采用远程拉取的方式将微组件加载到基座,再通过 Single-spa 的给定工具动态渲染微组件到页面。

2.3 数据通信

当将微组件添加到低代码平台后,微组件不应该被看作是一个独立的单元,而是整个应用系统的一部分。在实际应用场景中,微组件之间以及微组件和基座之间涉及大量的协作和数据共享。因此,低代码平台必须考虑微组件与基座之间的数据通信问题。

数据通信的最简单解决方案是实现一个全局的事件总线,微组件和基座都可以向该事件总线发布和订阅消息。当然,事件总线也有一些缺点,因为业务逻辑分散在不同组件中,造成业务逻辑的处理变得碎片化。在阅读和维护代码时,需要不断寻找事件的发布者和订阅者,导致业务理解和维护成本变大。

前面提到,本文使用 Single-spa 的 parcel 封装和渲染微组件。而 parcel 在封装组件时,可以将一组用户自定义的 props 传递给组件。基于此,本文设计一套消息发布订

阅机制来实现微组件和基座的通信。相较事件总线，本机制具有业务逻辑集中，易于维护的优点。数据通信机制由三部分组成。

（1）全局状态（Global State）。它用于存储所有微组件的状态。每当全局状态发生变化，都会通知所有的微组件。每一个微组件在全局状态中都对应一个唯一的 key，在接收到变更通知后，会比较当前状态与全局状态中 key 对应的值，如果不一致则更新组件。

（2）组件订阅机制（onGlobalStateChange）。作为 parcel props 的一部分传递给微组件，它接收一个函数作为参数。当微组件加载到页面中以后（即上文提到的 mount 回调），首先将全局状态订阅函数作为参数传递给 onGlobalStateChange，并调用执行 onGlobalStateChange，如此则将微组件注册为全局状态的订阅者。

（3）全局状态变更发布机制（setGlobalState）。它同样作为 parcel props 的一部分传递给微组件。当微组件需要通知全局状态更新当前组件状态时，就会调用 setGlobalState，并将最新状态作为参数。而依赖当前微组件的其他微组件或者基座，就可以通过订阅机制接收到最新的状态，进而自我更新。

基于此通信机制，在解耦组件与基座的同时，各组件以及基座之间也可以实现数据通信。从而保证了组件独立开发，但又可以相互合作构成完整的业务系统。

3 Json Schema

当用户基于组件和配置设计好系统之后，需要将系统转换成模型，以便持久化存储。用来描述模型的语法应该具备以下特性。

（1）它应该是一个被广泛接受的标准。使用标准化的格式可以减少误解和沟通成本，使得不同开发者和工具能够更容易地理解和使用数据结构。

（2）它要有足够的灵活性和可扩展性。这样才能覆盖不同的场景。

（3）它要具备可验证性。这样才能保证生成的模型是满足业务需要的，在投产之后，才不会出现各种因为用户数据不符合业务规则造成的问题。

（4）它要易于维护。这有助于减少维护成本。

结合以上要求和前端数据多采用 json 格式的事实，本文将采用 JSON Schema^[10]作为模型语法。JSON Schema 是一种用于描述 JSON 数据结构的工具，它允许开发者定义数据的格式、结构和验证规则。通过使用 JSON Schema，用户可以确保 JSON 数据符合预期的格式。同时，JSON Schema 是一

个被广泛接受的标准，有丰富的文档和社区支持。有许多工具和库（如验证器、生成器）都已经实现了对 JSON Schema 的支持，这将降低开发低代码平台的难度。

4 结语

低代码（Low-Code）是一种软件开发方法，通过图形化界面和最少的手动编码，帮助开发人员和非技术人员快速构建应用程序。这种方法使得开发过程更加高效，并降低了对专业技术知识的依赖。随着人工智能和机器学习技术的发展，未来的低代码平台将可能集成更多智能化功能，如自动代码生成、智能建议等。同时，低代码将逐步进入更多行业和领域，如医疗、金融、制造等，推动数字化转型。

参考文献：

- [1] 韦青,赵健,王芷,等.实战低代码[M].北京:机械工业出版社,2021.
- [2] GEERS M.微前端实战[M].颜宇,周轶,张兆阳,译.北京:清华大学出版社,2022.
- [3] 王佳琪.微前端之道:从理论到实践[M].北京:清华大学出版社,2024.
- [4] PATEL S K. Web Component 实战[M].范洪春,邵锋,何语萱,等译.北京:电子工业出版社,2015.
- [5] FLANAGAN D. JavaScript 权威指南[M].7版.李松峰,译.北京:机械工业出版社,2020.
- [6] SIMPSON K.你不知道的 JavaScript: 中卷[M].赵望野,梁杰,译.北京:人民邮电出版社,2016.
- [7] 亚历克斯·班克斯,伊夫·波尔切洛.React 学习手册[M].2版.安道,译.北京:中国电力出版社,2021.
- [8] 张益琿,曹艳琴.循序渐进 Vue.js 3.x 前端开发实战[M].北京:清华大学出版社,2023.
- [9] 尼古拉斯·贝瓦夸.精通模块化 JavaScript[M].回晓,杨蓉,陈立伸,等译.北京:电子工业出版社,2020.
- [10] 汤姆·马尔斯.JSON 实战[M].邵钊,译.北京:人民邮电出版社,2018.

【作者简介】

张钢岭（1983—），男，安徽亳州人，硕士研究生，研究方向：云计算、前端工程化、嵌入式软件。

（收稿日期：2024-11-15）

基于分布式表示的知识图谱推理研究

陈光希¹ 冯 峰²

CHEN Guangxi FENG Feng

摘 要

知识图谱推理 (knowledge graph reasoning, KGR) 是知识图谱构建及相关应用领域的一个热点问题, 其目的是利用知识图谱中已经存在的信息来推导出新的知识。为了更好地挖掘和利用知识图谱中的隐含信息, 基于分布式表示的知识图谱推理方法应运而生, 文章从 KGR 的定义入手, 对现有的基于分布式表示的 KGR 方法进行分类分析。基于分布式表示的 KGR 方法可以主要分为基于张量分解和基于翻译模型的方法, 前者通过将知识图谱表示为张量并进行分解来捕捉复杂关系, 后者通过在低维空间中进行平移或旋转操作来表示实体和关系。与此同时, 文章探讨了所研究方法在实际应用中的效果, 指出张量分解方法在表达复杂关系上所具有的优势, 但计算复杂且扩展性差; 翻译模型计算高效, 但在处理复杂关系时存在局限。最后, 展望了该领域的未来研究方向, 指出了当前研究中存在的挑战和解决的途径, 旨在为研究人员和应用开发者提供有价值的参考。

关键词

知识图谱推理; 分布式表示; 张量分解; 翻译模型; 人工智能

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.040

0 引言

知识图谱 (knowledge graph, KG) 的概念最早由 Google 在 2012 年提出, 被定义为由大量实体及其之间关系组成的大规模知识库。近年来, 知识图谱作为一种语义网络, 在自然语言处理^[1]、智能问答系统^[2]、智能推荐等领域都得到了广泛应用。尽管 Freebase^[3]、DBpedia^[4]、YAGO^[5]、NELL^[6] 等常用的大规模知识图谱包含了数以百万计的实体和关系, 但内部许多实体之间的隐含关系还未被充分挖掘。知识图谱逐渐成为研究的热点。

知识图谱推理, 或称知识推理, 指在既定的知识图谱中通过推理技术推导出实体间潜在或者新的关系, 发现新的知识。通过不断优化和应用知识图谱推理技术, 可以更高效地挖掘知识图谱中的信息, 为各种应用场景提供更为智能和高效的解决方案。因此, 本文提出了知识图谱推理研究, 通过预测现有实体之间的潜在关系, 推理出新的关系事实, 扩大知识图谱的规模。

随着深度学习和表示学习技术的发展, 基于分布式表示的知识图谱推理方法成为该领域的研究热点。分布式表示将知识图谱中的实体和关系嵌入到低维向量空间中, 通过在这个向量空间中进行计算和推理, 可以更高效地发现实体间的潜在关系。相较于传统的符号表示方法, 分布式表示具有处

理大规模数据、捕捉复杂关系和泛化能力强等优点。基于分布式表示的知识图谱推理方法主要分为两类: 基于张量分解的方法和基于翻译模型的方法。本文将详细综述这两种方法, 分析其优缺点和应用场景, 并探讨基于分布式表示的知识图谱推理在实际应用中的效果和表现。此外, 本文还展望了其未来研究方向, 为后续研究提供有价值的参考。

1 知识图谱推理概述

由于大多数知识图谱都是手工或者半自动构造的, 大量隐含的实体和关系都未被发现, 因此不完备性是几乎所有知识图谱的普遍问题。知识图谱推理 (knowledge graph reasoning, KGR) 的目标是通过分析和计算知识图谱中实体及其关系的结构和属性, 来识别和预测实体间的潜在关系, 从而发现隐含的知识, 提升知识图谱的完备性和准确性, 进而增强其在各种应用场景中的实用性。在知识推理中, 知识图谱提供了对人类知识和经验的总结, 而推理技术则基于知识图谱中已有的知识, 实现了对潜在知识和未知知识的发现, 拓展了知识问答、个性化搜索^[7]、智能推荐^[8]等能力。

早期的推理研究是由逻辑学和知识工程领域的学者进行的。逻辑学者主张用形式化的方法来描述客观世界, 认为一切推理都是基于现有的逻辑知识, 如一阶逻辑和谓词推理^[9]。关注点为如何从已知的命题和谓词中得到正确的结论。与逻辑领域的学者使用命题或者一阶谓词来表示客观世界中的概念不同, 知识工程领域的学者使用语义网络来表示更丰富的概念和知识来描述实体和属性之间的关系。

1. 北京无线电计量测试研究所 北京 100854

2. 山东省网络安全与信息化技术中心 山东济南 250002

随着互联网数据规模的爆炸式增长,基于人工构建知识库的传统方法已无法适应大数据时代对海量知识的需求,因此,数据驱动的机器推理方法逐渐成为知识推理研究的主流。数据驱动的方法通过从大规模数据集中自动提取和学习知识,不仅提升了知识库的构建效率,还能动态更新和扩展知识图谱。然而,这些方法也面临如何有效表示和推理复杂关系的问题。

为了更高效地处理和推理知识图谱中的复杂关系,基于分布式表示的知识图谱推理方法应运而生。分布式表示(distributed representation)通过将知识图谱中的实体和关系嵌入到低维向量空间中,使得复杂的图结构可以通过向量运算进行处理,从而大大提升了推理的效率和精度。基于分布式表示学习的方法能够捕捉实体和关系间的潜在模式,并通过向量表示简化推理过程,逐渐成为知识图谱推理研究的主流方向。

具体而言,基于分布式表示的知识图谱推理方法可以分为基于张量分解和基于翻译模型两大类方法。

2 方法

本节将从张量分解和翻译模型两类来介绍基于分布式表示的知识图谱推理方法的发展。图1总结了基于分布式表示的知识图谱推理方法的时间轴。

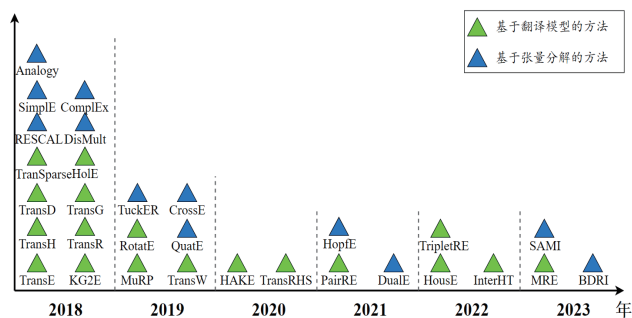


图1 基于分布式表示的知识图谱推理方法时间轴

2.1 基于张量分解的模型

张量分解模型将KG编码为向量,进而分解为实体和关系的低维向量组合。

RESICAL^[10]作为第一个张量分解模型,是一种基于三元张量分解的关系学习方法,其中每个实体都与一个向量相关联。如图2所示,RESICAL使用向量来捕获每个实体的潜在语义,并进一步利用矩阵将潜在因素之间的相互作用建模为矩阵。然而,RESICAL模型参数过于复杂,为了简化,Yang等人提出了如图3所示的DisMult模型,该模型将关系矩阵分解为对角矩阵,来减少每个关系的参数。以前的知识图谱推理模型使用三维二元张量来进行链接预测,张量的每个切片表示知识图谱中某一关系的邻接矩阵。通过对张量进行低

秩分解和多线性计算来进行链接预测。然而这种方法不太适用于非堆成关系的预测。因此ComplEx模型通过使用复值嵌入来扩展DisMult模型,从而改进了不对称关系的建模。此外,HolE通过结合RECAL的表达能力和DisMult的效率和简单性来学习整个知识图谱的向量空间表示。HolE可以捕获丰富的交互,且仍然可以高效地计算并轻松扩展到非常大的数据集上。Analogy设计了具有类比结构约束的双线性评分函数用于捕获实体之间丰富的交互,填补了从类推推理的角度预测新三元组的空白。

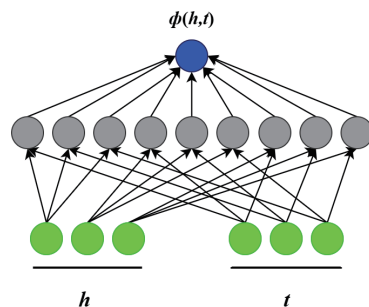


图2 RESICAL模型

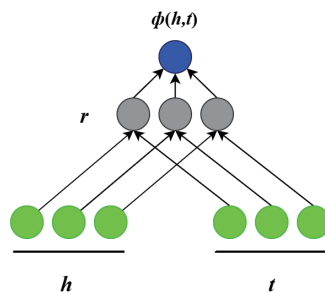


图3 DisMult模型

此外,一些模型也开始尝试替代分解操作。SimpleE增加了两个独立实体嵌入的正则CP分解。TuckER首次适用Tucker分解。CrossE通过特定于关系的交互矩阵考虑实体之间的交叉交互。QuatE基于关系旋转四元组表示实现了头尾之间的语义匹配。受其启发,DualE将嵌入投影到对偶四元组空间中,以实现平移和旋转操作的统一框架。此外,HopfE在不失可解释性的前提下,利用了四维超球空间的结构属性和语义属性。此外,QuatRE通过汉密尔顿积增强实体之间的相关性来进行实体嵌入,并通过简化来减少计算量。BDRI提出了一种基于区块分解的关系交互模型,通过对知识图谱的二元张量表示进行区块项分解,增强了正反关系的融合,提高了模型的表达能力和计算效率。SAMI模型将图注意力网络与张量分解结合起来学习知识图谱的表达,并通过自我对抗负采样技术加速训练,在链接预测任务中表现出色。

2.2 基于翻译模型的方法

基于翻译模型的方法是受到Word2Vec的启发,通过将实体和关系映射到低维向量空间中,从而将知识图谱中的关

系视为向量空间中的平移操作。

TransE 作为一个翻译模型, 将关系视为简单的翻译操作。虽然解决了大规模知识图谱的数据处理问题, 但其很难处理一些特定的关系, 如一对多、多对一、对称和传递等关系。TransH 通过将实体编码于特定于关系的超平面上, 在一对多、多对一关系上实现了更好的推理效果。此外, TransR 利用实体和关系的潜在空间, 在传递关系上取得了更为好的推理能力。TransD 首次利用大型知识图谱的实体和关系的独立投影向量来考虑可扩展性问题。图 4 给出了以上几种模型的示意图。

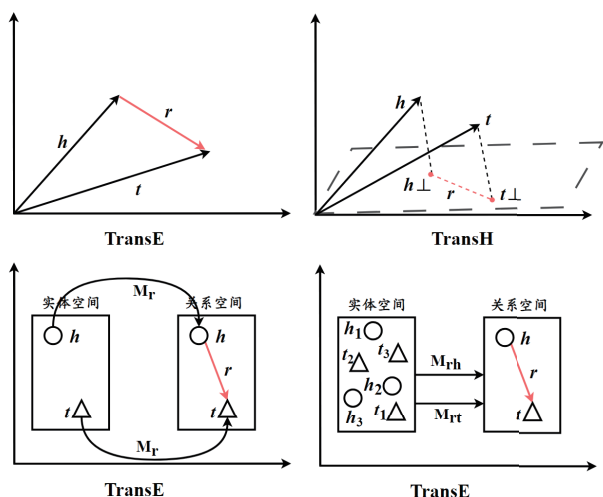


图 4 Trans 模型对比

还有一些方法尝试集成概率原理来建模知识图谱。例如, KG2E 利用高斯分布协方差, TransG 利用贝叶斯技术处理一对多关系问题。同时, TranSparse 为了缓解异构和不平衡问题, 通过设计自适应迁移稀疏矩阵来提高表达能力。MuRP 为实体嵌入投影设计了莫比乌斯矩阵向量乘法和莫比乌斯加法, 有效提高了精度和可扩展性。同时, TransW 利用词嵌入丰富了实体和关系嵌入, 在潜在的实体或关系推断中取得了很好的性能。RotatE 提出了一种基于旋转的复值嵌入的平移方法, 可以更好地推断对称性、反对称性等关系。此外, HAKE 对语义层次进行建模来代替基于极坐标空间的关系模式。TransRHS 首次将关系层次结构 (relational hierarchical structure, RHS) 整合到嵌入中。

此外, 为了使用统一的模型来处理更为复杂的关系事实, PairRE 用成对的向量对每个关系表示进行建模, 来对复杂关系进行自适应调整。HousE 设计了一种基于设计的豪斯霍尔德变换进行旋转和投影。还有一些针对更充分相互作用的翻译模型的尝试, 如 TripleRE 和 InterHT, 前者创造性的将关系向量分成 3 个部分, 利用残差的思想, 达到了更好的性能, 而后者通过增强尾实体和头实体之间的信息交互, 提高了模型的容量。MRE 模型提出了一种多关系嵌入的方法, 通过整

合直接关系、多跳关系和基于规则的关系来捕捉更丰富的语义信息。

3 知识图谱推理任务评价

本节主要介绍常用的知识图谱推理任务的数据集, 并介绍相关评价指标, 同时总结了基于分布式表示的知识图谱推理方法的实验结果。

3.1 数据集介绍

常用的知识图谱推理数据集按照来源分可以主要分成三类, 来自 Freebase、WordNet 和 YAGO。具体内容如表 1 所示。

Freebase 是一个庞大的开源知识图谱, 旨在构建一个全面的、结构化的知识库, 包含了关于各种实体及其关系的丰富信息。它的数据涵盖了从人物、地点到音乐、电影等多个领域, 支持复杂的查询和推理。Freebase 的数据主要来源于用户贡献和已存在的数据库整合, 对应数据集名称为 FB15k 和 FB15k-237。WordNet 是一个大型的英语词汇数据库, 其中的词被组织成同义词集, 每个同义词集表示一个独特的概念。WordNet 通过表示词与词之间的关系, 如同义词、反义词和从属关系, 提供了丰富的词汇信息, 广泛应用于自然语言处理和信息检索, 对应数据的名称为 WN18 和 WN18RR。YAGO 是一个基于 Wikipedia 和 WordNet 的知识图谱, 旨在整合这些来源的数据来构建一个高度结构化且精确的知识库。YAGO 提供了丰富的实体和关系信息, 广泛应用于语义网和知识管理领域, 对应数据集为 YAGO3-10。

表 1 常用数据集介绍

数据集名称	数据集来源	数据规模	构建方式	发表会议
FB15k	Freebase	1.4 万个实体 59 万条知识	从 Freebase 种去除掉反转了头实体和尾实体的关系而得到	NeurIPS 2013
FB15k-237	Freebase	1.4 万个实体 31 万条关系	在 FB15k 的基础上排除掉直接链接和冗余关系	EMNLP 2015
WN18	WordNet	4.1 万个实体 14 万条知识	从 WordNet 种挑取最常用的 18 种关系类型	NeurIPS 2013
WN18RR	WordNet	4 万个实体 9 万条知识	将 WN18 中的逆关系去除, 确保训练集和测试集中存在直接逆关系对	AAAI 2018
YAGO3-10	YAGO	12 万个实体 117 万条知识	是 YAGO3 的子集, 每个实体至少有 10 种关系	CIDR 2013

3.2 评价指标与实验结果

对于实体推理任务，模型的评价指标包括 MR、MRR 与 Hits@10 等。

MR（mean rank）通过计算测试集 T 中所有查询的平均排名来评估模型的推理性能，结果越接近 1（结果指标越大越好），说明效果越好，计算方法为：

$$MR = \frac{1}{|T|} \sum_{i=1}^{|T|} rank_i$$

(1)

此外，MRR（mean reciprocal ranking）通过计算测试集 T 中所有查询的平均倒数排名来评估模型性能，结果指标越大，说明效果越好，计算方法为：

$$MRR = \frac{1}{|T|} \sum_{i=1}^{|T|} \frac{1}{rank_i}$$

(2)

Hits@N（H@N）通过计算模型给出结果的在 Top N 中预测正确的查询数量占测试集 T 的比重来评估模型性能，结果指标越大，说明模型推理性能越好，计算方法为：

$$H@N = \frac{1}{|T|} \sum_{i=1}^{|T|} \mathbb{I}(rank_i \leq N)$$

(3)

式中： $\mathbb{I}(\cdot)$ 是 indicator 函数（若条件真则函数值为 1，否则为 0）。

表 2 总结了基于分布式表示的知识图谱推理方法在 WN18RR 和 FB15k-237 数据集上实验结果。

表 2 基于分布式表示的知识图谱推理方法实验结果总结

方法	WN18RR				FB15k-237			
	MRR	H@1	H@3	H@10	MRR	H@1	H@3	H@10
RESCAL	0.455	0.419	0.461	0.493	0.353	0.264	0.385	0.528
DisMult	0.420	0.370	0.439	0.521	0.243	0.191	0.271	0.328
ComplEx	0.440	0.410	0.460	0.510	0.346	0.256	0.386	0.525
TruckER	0.470	0.443	0.482	0.526	0.358	0.266	0.394	0.544
QuatE	0.481	0.436	0.500	0.564	0.311	0.221	0.342	0.495
DualE	0.482	0.440	0.500	0.561	0.330	0.237	0.363	0.518
HopfE	0.472	0.413	0.500	0.586	0.343	0.247	0.379	0.534
BDRI	0.495	0.456	0.513	0.563	0.370	0.276	0.406	0.553
SAMI	0.497	0.461	0.512	0.578	0.375	0.280	0.407	0.560
TransE	0.231	0.021	0.409	0.533	0.289	0.193	0.326	0.478
MuRP	0.481	0.440	0.495	0.566	0.335	0.243	0.367	0.518
RotatE	0.476	0.428	0.492	0.571	0.338	0.241	0.375	0.533
HAKE	0.497	0.453	0.515	0.582	0.335	0.237	0.371	0.530
PairRE	—	—	—	—	0.351	0.256	0.387	0.544
TripleRE	—	—	—	—	0.351	0.251	0.392	0.552
HousE	0.511	0.465	0.528	0.602	0.361	0.266	0.399	0.551
MRE	—	—	—	—	0.399	0.257	0.406	0.612

4 知识图谱推理在企业质量知识库中的应用

企业质量知识库是一个关于研制生产过程发生的质量问题的数据库，用于记录、存储、检索并共享信息。企业质量知识库是企业内、外部知识的集合，可以解决企业员工搜索有关的质量问题或疑问的答案，从而帮助员工更有效、有针对性地完成任务，把精力用于关键的任务和事情上。质量知识库包含了企业在质量管理方面所掌握的专业知识和实践经验，可以包括但不限于产品和服务质量标准、质量管理流程、质量控制技术、质量改进工具、质量文档和记录等。

在企业生产研发过程中，质量问题和投诉的记录往往是通过员工口头或书面形式传递的，存在信息流失和传递不及时的问题。由于企业人员流动性较大，相关的质量资料和经验也常常随之流失。对于企业来说，把质量管理全部寄希望于某个员工显然是不现实的。因此，需要一个系统化的管理，在系统中任何人都可以通过模糊搜索找出相关问题。

企业质量知识库与基于知识图谱推理的结合可以进一步提升其应用价值。通过将企业质量知识库中的数据与知识图谱推理技术相结合，可以实现以下几个方面的应用：

（1）智能搜索与问题诊断：利用知识图谱推理技术，员工可以通过自然语言查询快速获取质量问题的解决方案。例如，通过输入“某产品的常见质量问题”，系统可以基于历史数据和知识推理提供详细的解答和建议。

（2）知识共享和传承：通过知识图谱推理技术，可以将企业内外部的质量管理知识进行系统化地整理和分析，形成结构化的知识图谱，实现知识的共享和传承，避免因人员流动造成的知识流失。

（3）支持决策：管理层可以通过知识图谱推理获取全面的质量信息和数据支持，辅助决策，提升管理水平。例如，系统可以基于知识图谱推理提供关于某产品质量改进的详细报告，支持管理层的决策过程。

企业质量知识库与知识图谱推理的结合不仅是知识管理的重要工具，也是企业实现质量管理信息化和智能化的基础。未来，随着知识图谱推理技术的发展和运用，企业质量知识库将能够更高效地组织和利用企业内外部的质量管理知识，为企业的持续改进和创新提供有力支持。

5 总结与展望

本文对基于分布式表示的知识图谱推理技术研究进行了广泛的陈述，主要包括基于张量分解和基于翻译模型的方法。同时本文总结了每种类型方法的优缺点，如表 3 所示。

表 3 基于分布式表示的知识图谱推理方法优劣

推理方法	优势	不足
张量分解	表达能力强，理论基础坚实，灵活性强	计算复杂，难以扩展
翻译模型	计算简单，易于理解，扩展性强	表达能力有限，过于依赖低维嵌入

基于张量分解的方法，如 RESCAL、DisMult、ComplEx 等，通过将知识图谱表示为三阶张量，并利用张量分解技术来进行推理。这类方法的优势在于其强大的表达能力和理论基础。张量分解模型可以捕获更复杂的关系和交互模式并且有着深厚的数学背景，能够在理论上解释其表现。但同时张量分解模型在处理大规模数据集时计算复杂度较高，并且难以在实际应用中扩展。基于翻译模型的方法，如 TransE、TransH、TransR 等，通过将实体和关系嵌入到低维向量空间中，并将关系视为向量之间的平移操作。这种方法的优点在于其直观性和计算效率。翻译模型的计算复杂度较低，适合大规模数据集，且模型的直观性使其易于解释和实现。但由于翻译模型的简单性，在处理复杂关系时存在局限，且过度依赖低维嵌入，可能会导致信息丢失，难以捕捉复杂的关系模式。

现有的知识图谱推理方法在处理静态和单一模态数据方面虽已取得显著进展，但在面对现实世界中更加复杂和多样化的信息需求时，显得力不从心。未来的知识图谱推理研究将从多模态和时序两个方面探索和创新。

总的来说，基于翻译模型和张量分解的知识图谱推理方法各有千秋，未来的研究将逐步融合多模态和时序信息，以提升推理的准确性和应用的广泛性。通过不断创新和融合，知识图谱推理将更好地服务于各类智能应用，为人工智能的发展提供坚实的基础。

参考文献：

[1] MONDAL I, HOU Y F, JOCHIM C. End-to-end construction of NLP knowledge graph[C]//Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL-IJCNLP 2021. NewYork: ACM, 2021: 1885-1895.

[2] HUANG X, ZHANG J Y, LI D C, et al. Knowledge graph embedding based question answering[C]//Proceedings of the Twelfth ACM International Conference on Web Search and Data Mining. NewYork: ACM, 2019: 105-113.

[3] BOLLACKER K, EVANS C, PARITOSH P, et al. Freebase: a collaboratively created graph database for structuring human knowledge[C]//Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD

international conference on Management of data.NewYork: ACM, 2008: 1247-1250.

[4] AUER S, BIZER C, KOBILAROV G, et al. DBpedia: a nucleus for a web of open data[J].The semantic web, 2007, 4825: 722-735.

[5] SUCHANEK F M, KASNECI G, WEIKUM G. YAGO: a large ontology from wikipedia and wordnet[J]. Journal of web semantics, 2008, 6(3): 203-217.

[6] CARLSON A, BETTERIDGE J, KISIEL B, et al. Toward an architecture for never-ending language learning[C]//Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. NewYork: ACM, 2010: 1306-1313.

[7] SONG Q, WU Y H, DONG X L, et al. Mining summaries for knowledge graph search [C]//2016 IEEE 16th International Conference on Data Mining (ICDM). Piscataway: IEEE, 2016: 1215-1220.

[8] WANG X, HE X N, CAO Y X, et al. KGAT: knowledge graph attention network for recommendation[DB/OL]. (2019-06-08)[2024-07-12]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.07854>.

[9] 吴飞, 韩亚洪, 李玺, 等. 人工智能中的推理: 进展与挑战[J]. 中国科学基金, 2018, 32(3): 262-265.

[10] NICKEL M, TRESP V, KRIEGEL H P. A three-way model for collective learning on multi-relational data[C]//Proceedings of the 28th International Conference on International Conference on Machine Learning. Madison, WI, United States: ICML, 2011:809-816.

【作者简介】

陈光希（1979—），女，辽宁海城人，硕士，高级工程师，研究方向：质量管理、产品检验。

冯峰（1979—），通信作者(email: ff_982002@sina.com)，女，河南武陟人，硕士，正高级工程师，研究方向：网络安全、数据安全。

（收稿日期：2024-11-18）

自动驾驶中变道的局部路径规划

白俊卿¹ 张红猛¹ 魏雪涛¹

BAI Junqing ZHANG Hongmeng WEI Xuetao

摘要

为简化规划环境以及确保在轨迹规划中的碰撞安全性问题,建立车辆矩形安全膨胀区并且引入基于向量叉乘法的车辆碰撞检测算法进行碰撞检测,也克服了车辆模型理想化引发的碰撞问题。针对道路换道场景的行驶效率和实时性不够高的问题,文章提出采用横向规划和纵向规划解耦合、纵向规划中时间和空间解耦合相结合以应对复杂的交通场景。对于路径规划,选择改进的B-样条曲线,采用考虑乘客的舒适性、换道效率和安全性等评价指标建立最优的路径曲线。对于速度规划,通过时间和空间解耦合,将复杂时空三维问题降为平面二维坐标系问题建立S-T曲线,结合动态规划算法和二次规划算法建立平滑的速度曲线。仿真结果显示轨迹规划很好地满足了变道的要求和实时性,速度规划通过二次规划算法的平滑操作使得各阶段连接平滑,曲率、加速度、航向角连续变化使得轨迹更加稳定。

关键词

碰撞检测;换道场景;轨迹规划;动态规划;二次规划

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.041

0 引言

轨迹规划包括路径规划和速度规划,对于横向纵向是否进行解耦,主要分为两种情况。第一种路径和速度同时进行规划,在时空的三维空间中寻找最优轨迹^[1],直接进行规划导致复杂性增加、计算开销大、容易陷入局部最优解、实时性较差。第二种路径和速度分开解耦规划,降低了问题的维度。有学者利用Dijkstra算法在状态空间中进行路径的搜索,通过在任何时间截断搜索并返回当前找到的最优解,对于以上的方法都是基于启发式搜索,启发式搜索通常是一种近似算法,不提供全局最优解的保证,容易陷入局部最优,高计算代价可能使得搜索时间变长,不适用于实时性要求高的应用。针对直接规划的缺点和启发式搜索计算量过大的问题,本文采用路径和速度解耦的基础框架^[2],路径规划基于改进的曲线插值的B样条曲线,速度规划建立S-T曲线结合动态规划和二次规划算法进行建模,由于网格颗粒度较大曲线不够平滑,本文使用二次规划算法对速度曲线进行平滑操作,使得车辆行驶更加稳定。

1 环境的搭建

1.1 车辆运动学模型

建立车辆运动学模型,如图1所示,对车辆的描述更加准确,主要考虑车辆的位姿(位置坐标,航向角)、速度、前轮转角等。

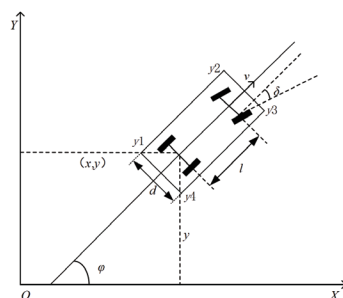


图1 车辆运动学模型

车辆的速度分量:

$$v_x = v \cos \varphi \quad (1)$$

$$v_y = v \sin \varphi \quad (2)$$

横摆角速度:

$$v_\varphi = \frac{v \tan \delta}{l} \quad (3)$$

车辆四个角点的位置:

$$\begin{cases} y_1 = y + \frac{d}{2} \cos \varphi \\ y_2 = y + l \sin \varphi + \frac{d}{2} \cos \varphi \\ y_3 = y + l \sin \varphi - \frac{d}{2} \cos \varphi \\ y_4 = y - \frac{d}{2} \cos \varphi \end{cases} \quad (4)$$

式中: v 为车辆行驶的速度; φ 为车辆航向角; δ 为车辆的前轮转角; l 为车辆的长度; d 为车辆的宽度; v_x 为车辆在横向的速度分量; v_y 为车辆在纵向的速度分量; v_φ 为车辆的横摆角速度; y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 分别为车辆4个角点的位置。

1.2 安全空间开辟及碰撞检测

为简化求解空间,提出车辆矩形安全碰撞空间^[3],并且引入基于向量叉乘法的车辆碰撞检测算法进行碰撞检测。

图2为通过矩形安全碰撞空间进行碰撞检测的过程,主要从两个方面进行论述:(1)路径规划中,要保证在局部路径的规划中对应的本车矩形框不与静态障碍物矩形框相交;

(2)速度规划中,要保证在S-T图中规划的速度曲线不与动态障碍物所形成的封闭多边形相交。从而车辆的碰撞检测可以转化为判断平面中两条线段是否相交。

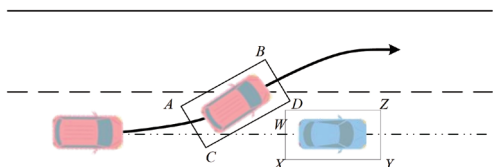


图2 矩形安全碰撞空间

2 变道场景的轨迹规划

2.1 轨迹的横向规划

2.1.1 换道路径簇的生成

如图3所示,根据 $ABCDEF$ 6个控制点可以构造出在起点和终点的曲率为零并且曲率连续变化的3次准均匀B-样条曲线。对于这6个控制点,除A点为起始点,其余5个点均为未确定点,对此有如下设定,令:(1) $ABC//DEF//$ 车道中心线;(2) $ABC=DEF$, $AB=BC=DE=EF$;(3)换道路径的前半段和后半段以O点呈中心对称。

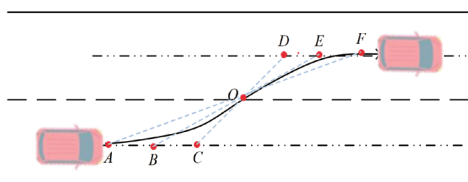


图3 根据控制点规划B-样条曲线

通过上述3个约束可以降低控制点的数量,从自由度为6降低至自由度为2,降低路径规划的复杂度。以A点为起始点,通过本车位置然后根据控制点O点C点向前索引,构造一系列的换道路径簇^[4]。

2.1.2 通过多目标优化算法对路径簇的筛选

为了进行横向规划,通过曲线插值建立若干B样条曲线,然后需要通过综合考虑乘客的舒适性、换道效率和安全性等评价指标对路径簇进行筛选。本文主要通过构造路径长度和平均路径曲率两个评价指标对路径簇进行筛选^[5]。多目标转单目标算法为:

$$f = \omega_1 f_{\text{length}} + \omega_2 f_{\text{curvature}}$$

$$= \omega_1 \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} + \omega_2 \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n} \quad (5)$$

式中: ω_1 、 ω_2 为权重; $\sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$ 为累计长度;

$\frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n}$ 为平均曲率。

评价函数 f 各性能指标的权重直接影响轨迹挑选的结果,根据美国国家交通安全管理局的事故分析报告系统结合人类驾驶员经验,在仿真迭代的过程中,最终得出较准确的权重值,本文的评估权重为 $\omega(\omega_1, \omega_2) = [0.7, 0.3]$ 。

由于各项指标差异较大无法进行评估,因此对路径长度和路径曲率进行标准化:

$$f_{\text{length}_{\text{norm}}} = \text{mapminmax}(f_{\text{length}}, 0, 1) \quad (6)$$

$$f_{\text{curvature}_{\text{norm}}} = \text{mapminmax}(f_{\text{curvature}}, 0, 1) \quad (7)$$

$$f_{\text{all}} = \omega_1 f_{\text{length}_{\text{norm}}} + \omega_2 f_{\text{curvature}_{\text{norm}}} \quad (8)$$

式中: $f_{\text{length}_{\text{norm}}}$ 、 $f_{\text{curvature}_{\text{norm}}}$ 分别为标准化后阈值为(0,1)的累计长度和平均曲率^[6]。

2.2 轨迹的纵向规划

2.2.1 利用动态规划算法建立S-T曲线

对于纵向规划速度曲线进行路径和时间解耦合。通过对S-T图进行网格化处理,在空间中从起始位置到目标位置等距播撒离散点^[7],S-T图完成了周围的交通车不同时刻在S-T图中的映射,然后在可行的搜索区域内通过动态规划算法结合向量叉乘法搜索最优的速度规划曲线。

为了在动态规划的过程中选择最优的速度规划曲线,同样设置评估指标和速度、加速度、位置约束^[8]。

(1)纵向速度、纵向加速度,影响车辆操控的安全性和稳定性,纵向速度、纵向加速度代价函数为:

$$f = \omega_{\omega_1} \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t} \right| + \omega_{\omega_2} \sum_{i=1}^n \left| \frac{a_i - a_{i-1}}{\Delta t} \right| \quad (9)$$

式中: $\sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t} \right|$ 、 $\sum_{i=1}^n \left| \frac{a_i - a_{i-1}}{\Delta t} \right|$ 分别为累计加速度和加加速度的绝对值大小; ω_{ω_1} 、 ω_{ω_2} 分别为累计加速度和加加速度的绝对值大小的权重。

(2)速度、加速度、位置约束分别为:

$$V_i \leq V_{\text{max}} \quad (10)$$

$$a_i \leq a_{\text{max}} \quad (11)$$

$$S_{\text{lb}} \leq S_i \leq S_{\text{up}} \quad (12)$$

式中: V_i 、 a_i 、 S_i 分别表示每个时刻的速度、加速度、位置; V_{max} 、 a_{max} 、 S_{lb} 、 S_{up} 分别表示最大速度、最大加速度、位置上、下限。

2.2.2 二次规划算法平滑S-T曲线

随着网格化的颗粒度越小,由动态规划出的曲线越不符合最优,并且在交点处曲线连续但不可导,所以动态规划的曲线曲率不连续。对于以上问题,本文使用二次规划算法对曲线进行平滑操作^[9]。文中对规划的S-T曲线划分为八段五

次多项式连接而成，相较于一个五次多项式而言在局部的拟合性质更好。

即位置曲线、速度曲线、加速度曲线、加加速度曲线表示为：

$$S_i = a_{i,0} + a_{i,1}t + a_{i,2}t^2 + a_{i,3}t^3 + a_{i,4}t^4 + a_{i,5}t^5 \quad (13)$$

$$V_i = a_{i,1} + 2a_{i,2}t + 3a_{i,3}t^2 + 4a_{i,4}t^3 + 5a_{i,5}t^4 \quad (14)$$

$$a_i = 2a_{i,2} + 6a_{i,3}t + 12a_{i,4}t^2 + 20a_{i,5}t^3 \quad (15)$$

$$\text{jerk}_i = 6a_{i,3} + 24a_{i,4}t + 60a_{i,5}t^2 \quad (16)$$

式中： S_i 表示每一段五次多项式的位置曲线； V_i 表示每一段五次多项式的速度曲线； a_i 表示每一段五次多项式的加速度曲线； jerk_i 表示每一段五次多项式的加加速度曲线（加速度变化率）^[10]。

通过构造位置误差、加速度、加加速度优化代价函数在满足等式和不等式的约束条件使得代价函数的值最小化即可转化为求解二次规划问题。使用二次规划算法对曲线进行平滑即是求解八段五次多项式的系数问题^[11]。

位置误差代价：

$$c_s = \sum_{t=0}^1 (S_{i,t} - S_{DP,t})^2 \quad (17)$$

加速度代价：

$$c_a = \sum_{t=0}^1 a_i^2 \quad (18)$$

加加速度代价：

$$c_{\text{jerk}} = \sum_{t=0}^1 \text{jerk}_i^2 \quad (19)$$

代价函数：

$$c_{\text{all}} = \sum_{i=1}^8 [\omega_1 c_s + \omega_2 c_a + \omega_3 c_{\text{jerk}}] \quad (20)$$

式中： ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别表示3个优化目标函数的权重系数； c_s 表示位置误差代价； c_a 表示加速度代价； c_{jerk} 表示加加速度代价； c_{all} 表示代价值总和。

将代价函数转化为二次规划问题为：

$$c_{\text{all}} = \min \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \quad (21)$$

$$A x = b \quad (22)$$

$$A x \leq B \quad (23)$$

式中： x 为八段五次多项式的系数； a 、 b 分别为等式约束矩阵； A 、 B 分别为不等式约束矩阵。

对于等式约束需满足，在连接点处和S-T曲线的起始处需满足速度、加速度、位置等信息相等^[13]。其等式公式为：

$$\begin{cases} V_i(t) = V_{i+1}(0) \\ a_i(t) = a_{i+1}(0) \\ S_i(t) = S_{i+1}(0) \end{cases} \quad \begin{cases} V_1(0) = V_0 \\ a_1(0) = a_0 \\ S_1(0) = S_0 \end{cases} \quad (24)$$

对于不等式约束需满足，速度的上下限，加速度的上下限以及位置的上下限。不等式公式为：

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\ a_{\min} \leq a_i \leq a_{\max} \\ S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max} \end{cases} \quad (25)$$

通过上述不等式约束和等式约束调用QP算法对二次规划问题进行求解即可得出八段五次多项式的系数，即是平滑后的S-T曲线。

3 实验仿真结果与分析

3.1 路径规划仿真

如图4所示黄车为本车假设在A点需要开始变道到B点结束变道从如下两幅图可以看出改进的B-样条曲线符合上述的筛选原则，通过和三角函数曲线、贝塞尔曲线对比分析可以看出B-样条曲线曲率连续变化并在变道开始和变道结束时曲率为零，曲线平滑性和换道效果更好，如图5所示。

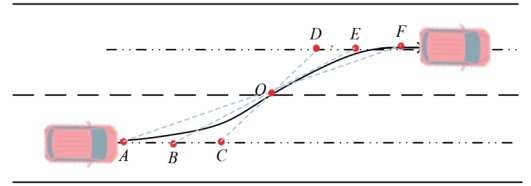


图4 根据控制点规划B-样条曲线

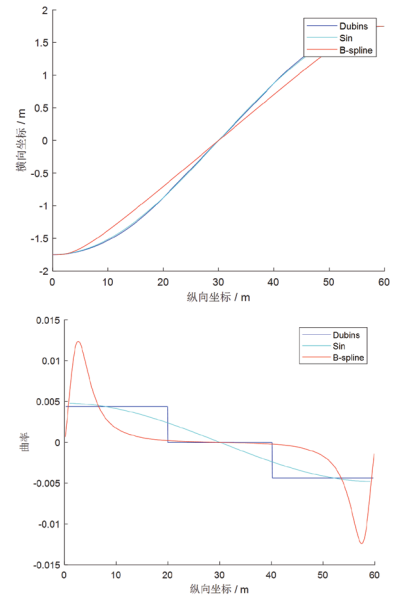


图5 轨迹规划路线和曲率变化对比图

换到路径簇筛选，结合控制点O、C建立换道路径簇，通过多目标转单目标算法筛选路径簇得红色路线为最优路线，如图6所示。

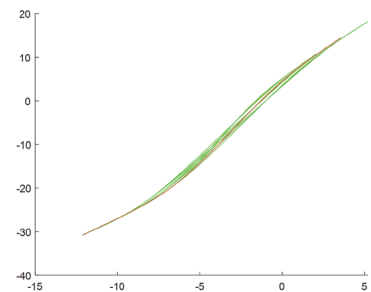


图6 筛选最优路线图

3.2 速度规划仿真

设置车辆膨胀区的长度 $vehLength=5.2$ ；宽度 $vehWidth=2$ ；障碍车的初始位置索引 $startIdx=130$ ；终点位置索引 $startIdx=210$ ；蓝色轨迹为障碍车轨迹，黄色轨迹为本车的变道轨迹，如图7所示。

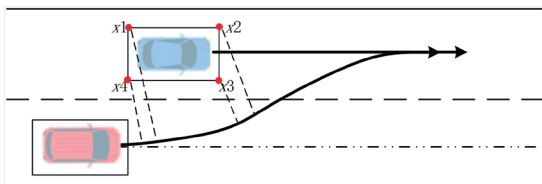


图7 场景规划图

利用障碍车的4个角点 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别计算到本车变道轨迹的距离，判断在不同时刻是否达到了设定的阈值来完成对S-T图的映射，如图8所示。

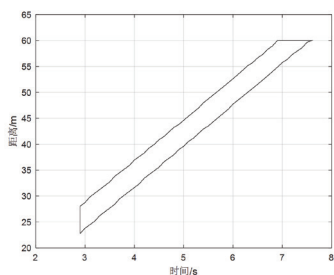


图8 障碍车占据变道轨迹在S-T图中的映射

使用动态规划算法建立S-T曲线，如图9所示。使用二次规划算法平滑得到S-T曲线，如图10所示，实验结果显示，相较于动态规划的S-T曲线更平滑，车辆行驶更加稳定。

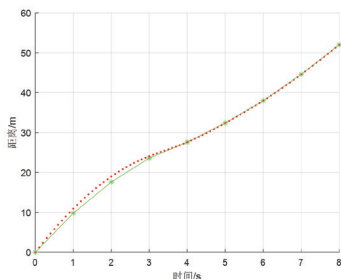


图9 DP规划的最优曲线

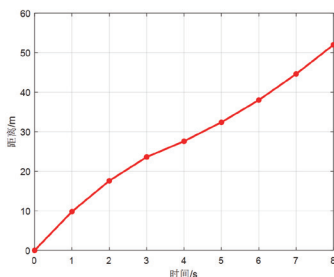


图10 QP平滑后的曲线

4 结语

本文将路径和速度规划解耦合、时间和空间解耦合相结合，综合考虑乘车舒适性和变道效率进行变道轨迹的筛选。

仿真结果显示路径规划很好地满足了变道的要求和实时性，速度规划通过二次规划算法的平滑操作使得各阶段连接平滑，曲率、加速度、航向角连续变化使得轨迹更加稳定。为自动驾驶汽车变道提供了轨迹规划参考，仿真的变道时间和距离为自动驾驶决策模块提供了更多的参考依据。

参考文献:

- [1] 袁昌, 莫天石, 舒红. 高速公路弯道换道决策及运动规划优化[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(3):30-43.
- [2] 葛超, 张嘉滨, 王蕾等. 基于模型预测控制的自动驾驶车辆轨迹规划[J]. 计算机应用, 2024, 44(6):1959-1964.
- [3] XIONG X Y, MIN H T, YU Y B, et al. Application improvement of A* algorithm in intelligent vehicle trajectory planning[J]. Mathematical biosciences and engineering, 2021, 18(1): 1-21.
- [4] 钱立军, 陈晨, 陈健. 无信控交叉口环境下考虑驾驶员误差的集中式轨迹规划[J]. 汽车工程, 2023, 45(5):768-776.
- [5] LI Y Y, YANG W, ZHANG X R, et al. Research on automatic driving trajectory planning and tracking control based on improvement of the artificial potential field method[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12131.
- [6] 宋春雷, 张嘉轩, 田晓春, 等. 基于优化的离散空间轨迹规划算法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(11): 1150-1156.
- [7] 吕贵林, 高洪伟, 陈涛, 等. 自动驾驶汽车轨迹规划方法综述[J]. 汽车文摘, 2023(7): 24-35.
- [8] 杨彬. 园区内无人驾驶环卫车轨迹规划及跟踪控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [9] XU B, YUAN S J, LIN X R, et al. Space discretization-based optimal trajectory planning for automated vehicles in narrow corridor scenes[J]. Electronics, 2022, 11(24): 4239.
- [10] LUO H, WANG M, LUO W M, et al. Lane-changing trajectory planning model for automated vehicles driving on a curved road[J]. Transportation research record, 2023, 2677(1): 929-942.
- [11] ARRIGONI S, BRAGHIN F, CHELI F. MPC trajectory planner for autonomous driving solved by genetic algorithm technique[J]. International journal of vehicle mechanics and mobility, 2022, 60(12): 4118-4143.

【作者简介】

白俊卿(1983—)，女，河南商丘人，博士，副教授，硕士生导师，研究方向：机器学习、人工智能。

张红猛(1999—)，男，河南商丘人，硕士研究生，研究方向：自动驾驶与车辆的路径规划。

魏雪涛(1999—)，男，陕西西安人，硕士研究生，研究方向：自动驾驶与车辆的路径规划。

(收稿日期: 2024-11-19)

基于 Faster-YOLO11 的危险驾驶行为检测算法

马 晓¹

MA Xiao

摘 要

全球范围内, 交通事故发生率不断增长, 成为日益突出、不容忽视的严重社会问题。基于此, 文章针对危险驾驶行为检测提出了一种目标检测算法——Faster-YOLO11, 旨在提高危险驾驶行为检测的效率和准确性。算法以 YOLO11 作为基础, 使用 FasterNet 作为主干网络, 在 SPPF (spatial pyramid pooling-fast) 中 LSK 注意力机制, 并将颈部网络的 C3K2 替换为 RCSOSA (reparameterized convolution based on channel shuffle and one-Shot aggregation), 以及后处理阶段的 Soft-NMS, 实现了在保持高检测精度的同时, 显著提升了模型的推理速度, 为危险驾驶检测领域提供了一种新的解决方案。

关键词

目标检测; 危险驾驶行为检测; YOLO11; 深度膨胀卷积; 大型可分离核注意; 减少通道空间对象注意力

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.042

0 引言

随着现代社会的发展和生活节奏的加快, 交通事故已成为全球范围内一个日益严重的社会问题。其中, 由于驾驶员危险驾驶引发的交通事故占较大比例, 给人们的生命安全带来了巨大威胁。因此, 开发有效的危险驾驶检测系统对于减少交通事故、提高道路安全具有重要意义。近年来, 随着深度学习技术的快速发展, 基于计算机视觉的危险驾驶检测技术取得了显著进展。研究者们不断探索新的算法, 结合深度学习的优势, 以提高危险驾驶检测系统的准确性和实时性。

危险驾驶检测主要分为疲劳检测与危险驾驶行为检测两个方面, 其中疲劳检测是指对驾驶员面部表情进行分析, 观察驾驶员有无闭眼、打哈欠等疲劳行为; 危险驾驶行为主要是指驾驶过程中出现的抽烟、打电话等行为。对于疲劳检测任务, 主流的处理方法主要分为基于关键点分析的方法与基于面部整体纹理的方法, 李孟成等人^[1]基于 YOLOv5 目标检测算法和 dlib 人脸识别库, 通过分析人脸朝向、位置、眼睛开合度等数据, 实时计算驾驶员是否存在疲劳驾驶和危险驾驶行为, 并及时给出安全提示; 许旻等人^[2]设计了一种基于深度学习的危险驾驶状态检测预警系统, 通过深度学习中的人脸检测等相关算法模型以及多技术配合研究, 实现了驾驶员危险驾驶状态的快速、准确检测和预警; 张樱己^[3]针对驾驶分心问题, 提出了基于眼动与手部行为识别的驾驶分心检测算法。研究提出了多通道卷积神经网络用于识别驾驶员注视区域, 并基于手部行为特征提出危险驾驶行为识别模型。

危险驾驶行为检测则是典型的目标检测任务, 宋巍^[4]聚

焦于基于深度学习的违规驾驶行为视觉识别方法, 从系统工程和人因工程的角度分析了违规驾驶行为, 并构建了违规驾驶行为视觉识别方法体系结构。研究提出了基于 ResNet 和视觉注意力模块的危险驾驶行为识别方法, 以及基于改进 ShuffleNet 轻量化模型的高效识别方法, 旨在提高识别精度和效率。郑天赐^[5]针对驾驶员手持通话检测问题, 设计了基于剪枝算法、注意力机制和特征融合的目标检测网络模型, 并优化算法移植到嵌入式设备。研究创建了 hand_phone 驾驶员打电话数据集, 并设计了新型目标检测网络 YOLO-PAI 和 YOLO-RESDAI, 提高了小目标物体的检测精度和速度。

在实际应用中, 驾驶员检测会受到外部场景与不均匀光照的影响, 暗光环境下检测难度大幅提升。唐天俊等人^[6]提出了一种基于深度学习的夜间危险驾驶行为检测算法, 该算法包括弱光增强模块和检测模块, 通过提高图像曝光度和基于 NanoDet-Plus 模型的检测, 实现了夜间弱光环境下的高准确率检测, 且模型参数量小, 检测速度快, 可部署在移动设备上实时检测。

基于上述分析, 危险驾驶行为检测中的两个任务可以合并为统一的目标检测任务, 同时算法应当兼顾实时性、准确性, 并且有着较强的鲁棒性, 同时对遮挡、小目标等较难识别的场景也有较好的性能。本文提出了一种基于 YOLO11n 的改进型目标检测算法——Faster-YOLO11, 旨在提高危险驾驶行为检测的效率和准确性。算法以 YOLO11 作为基础, 使用 FasterNet 作为主干网络, 在 SPPF 中 LSK 注意力机制, 并将颈部网络的 C3K2 替换为 RCSOSA, 以及后处理阶段的 Soft-NMS, 实现了在保持高检测精度的同时, 显著提升了模型的推理速度, 为危险驾驶检测领域提供了一种新的解决方案。

1. 辽宁公安司法管理干部学院 辽宁沈阳 110000

1 Faster-YOLO11 算法设计

针对危险驾驶行为检测任务, 本文提出了一种高效的目标检测算法 Faster-YOLO11, 算法以当前的 SOTA 目标检测模型 YOLO11n 为基础, 主干网络使用 FasterNet, 在不降低检测精度的前提下大幅降低网络的参数量与计算量, 以达到更好的推理效率; 在 SPPF 模块中引入 LSK 注意力机制, 有效提升主干网络的特征提取与特征融合性能; 使用 RCSOSA 模块替换颈部网络中的 C3K2 模块, 丰富梯度流的同时加强多尺度的特征重组性能, 同时提升了对香烟这种纵横比差异过大的小目标的识别能力; 在后处理阶段, 使用 Soft-NMS 提高候选框的精度。Faster-YOLO11 的网络结构如图 1 所示。

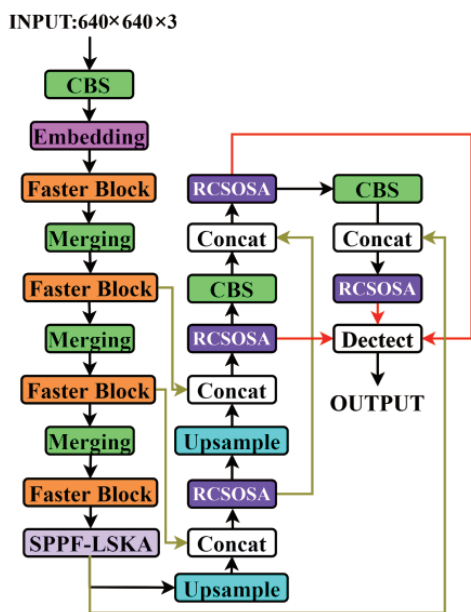


图 1 Faster-YOLO11 网络结构图

对比 YOLO11n, Faster-YOLO11 通过更精简的结构设计实现了轻量化与精度的有效提升, 更加适用于危险驾驶行为检测任务中对驾驶员表情、吸烟与打电话等危险驾驶行为的检测。

1.1 FasterNet 主干网络

FasterNet^[7] 是一种轻量化的主干网络, 能够在不牺牲检测精度的前提下有效提高算法的推理速度。FasterNet 对传统卷积进行频繁内存访问导致的性能瓶颈进行优化, 其核心是部分卷积 (PConv), 这种新型卷积方法通过仅处理输入通道的一部分来减少计算量和内存访问, 从而降低整体的计算复杂度。与传统方法不同, FasterNet 不仅关注减少浮点运算 (FLOPs), 还强调提升每秒浮点运算数 (FLOPS), 以实现更快的处理速度。FasterNet 的架构包含 4 个层次化的阶段, 每个阶段由一系列 FasterNet 块组成, 其结构如图 2 所示。

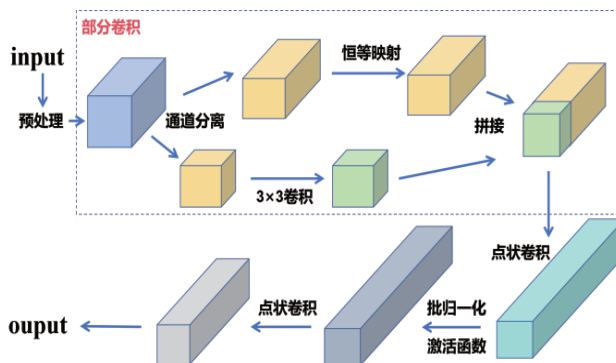


图 2 FasterNet 块结构图

FasterNet 块以嵌入或合并层开始, 每个块中包含一个部分卷积层后跟两个点状卷积层。这种设计类似于倒置残差块, 其中间层具有扩展的通道数量, 并放置了 Shortcut 以重用输入特征。

1.2 SPPF-LSKA 模块

LSKA (large separable kernel attention)^[8] 是一种视觉注意力网络模块, 旨在解决大内核卷积在计算效率方面的挑战。与传统的 2D 深度卷积不同, LSKA 通过将卷积核分解为级联的水平和垂直 1-D 卷积核, 有效降低了参数数量和内存占用, 同时保持了计算效率。这种设计使得 LSKA 更倾向于捕捉对象的形状特征而非纹理, 从而提高了模型的鲁棒性和泛化能力。

LSKA 能够有效捕捉图像中的长距离依赖, 这一点通过其有效感受野的生成方法得到了验证。随着卷积核尺寸的增加, LSKA 能够覆盖更广泛的区域, 表明其在捕捉长距离依赖方面的有效性。LSKA 继承了 LKA 的设计, 包括空间注意力和通道注意力, 这两种策略能够根据上下文依赖适应性地重新校准特征权重, 与自注意力相比, 具有更低的参数和计算复杂度。

在 SPPF (spatial pyramid pooling-fast) 结构中, LSKA 的引入进一步增强了特征聚合能力, 使得模型能够更有效地捕捉和融合不同层次的特征信息。LSKA 通过生成注意力图来加权原始特征图, 集中注意力于图像中的重要部分, 从而提升特征的表达能力。LSKA 的优势在于其计算效率, 通过将深度卷积层的二维卷积核分解为级联的水平和垂直一维卷积核, 减少了计算和内存占用, 同时能够实现与标准 LKA 模块相当的性能。此外, LSKA 设计使模型在卷积核大小增加时更倾向于关注物体的形状而非纹理, 这在许多视觉任务中至关重要, 因为形状信息通常对目标识别更为关键。LSKA 在 SPPF 中最大池化层之后进一步加工特征, 改善了不同尺度特征图之间的联系, 从而提升特征融合效果。SPPF-LSKA 模块结构如图 3 所示。

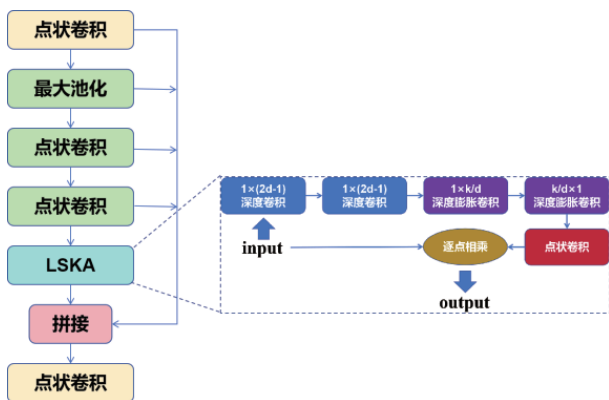


图 3 SPPF-LSKA 结构图

1.3 RCSOSA 模块

RCSOSA (reparameterized convolution based on channel shuffle and one-Shot aggregation)^[9] 是一种创新的神经网络模块，专门设计来提升目标检测任务的速度和准确性。该模块融合了通道混洗和重参数化卷积技术 (RCS) 以及一次性聚合 (one-shot aggregation, OSA) 策略。在训练阶段，RCSOSA 利用多分支结构学习丰富的特征表示，而在推理阶段，通过结构化重参数化简化为单一分支，以减少内存消耗。通过堆叠 RCS 模块，RCSOSA 实现了特征级联，加强了不同层之间的信息流动，并通过上采样和下采样实现了多尺度特征融合，促进了不同预测特征层之间的信息交换，从而提高了检测精度。RCSOSA 的设计注重计算效率，通过维持输入通道和最小输出通道的数量来降低内存访问成本。

在工作机制上，RCSOSA 在训练时利用多分支拓扑架构学习特征信息，在推理时通过重参数化简化架构，加快推理速度。RCSOSA 结构如图 4 所示。

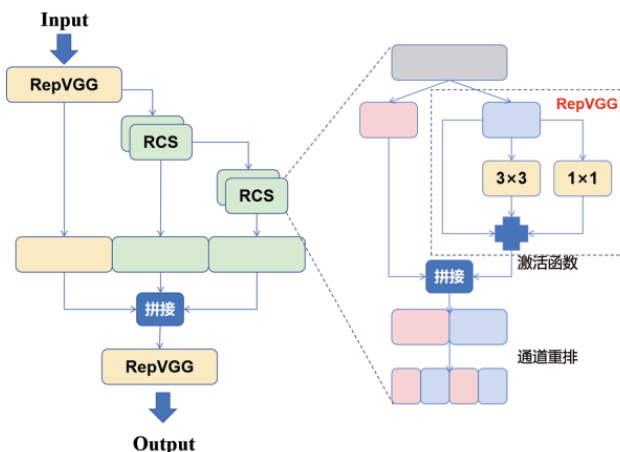


图 4 RCSOSA 结构图

与 C3k2 模块相比，RCSOSA 具有更优的计算效率与更强的特征提取能力。在计算效率方面，RCSOSA 通过通道混洗和重参数化卷积的设计显著降低了计算复杂度，特别是在推理阶段，经通道分割和混洗操作，实现了计算复杂度减半

的同时保持了通道间的信息交换，使得处理高维特征更加高效。其次，RCSOSA 模块通过堆叠 RCS，不仅确保了特征的重用，还增强了相邻层特征之间不同通道的信息流动，这有助于提取更丰富的特征信息，并降低内存访问成本。此外，RCSOSA 采用一次性聚合策略，减少了重复的特征计算和存储需求，提高了网络的计算和能源效率，同时有效聚合不同层次的特征，增强了模型的语义信息提取能力。

1.4 Soft-NMS

Soft-NMS (soft non-maximum suppression)^[10] 是一种非极大抑制 (NMS) 的改进算法，旨在解决标准 NMS 在目标检测中因硬阈值导致的候选框丢失问题。与传统 NMS 直接移除得分低且与高分框重叠的检测框不同，Soft-NMS 通过应用一个得分衰减函数来降低重叠检测框的得分，而不是直接将其移除。这种方法首先选取得分最高的检测框作为基准，然后根据剩余检测框与基准框的 IoU (交并比) 来更新它们的得分。采用高斯惩罚函数作为得分衰减函数。

Soft-NMS 的核心思想是在保留尽可能多的候选框的同时，降低与高分检测框重叠的低得分框的优先级。这种逐步衰减得分的方法减少了因硬阈值而误删目标的情况，提高了检测的准确性，尤其是在处理小目标或高密度目标时更为有效。

2 实验结果分析

2.1 数据集与训练平台

在 Windows10 系统上使用 GeForce GTX 3060 (8 GB) 显卡与 PyTorch 平台进行模型训练与验证，训练参数如表 1 所示。

表 1 网络训练参数

参数	数值
Epoch/ 训练轮数	300
Batchsize/ 批大小	32
lr0/ 初始学习率	0.001
Momentum/ 学习率动量	0.937
box/iou 损失系数	7.5
cls/ 分类损失系数	0.5

在视频网站上收集 1 000 小时的车内驾驶员视角视频，为保证数据多样性，行车场景包括白天、黑夜、黄昏等，车型包括轿车、公交车、卡车等，同时保证驾驶员性别与年龄的多样性，最终获得 12 000 张图片，并将其中的驾驶员表情、抽烟、打电话进行标注，标注类别包含正常驾驶、闭眼、打哈欠、手机、香烟五类，使用数据增强手段扩充数据到 15 000 张，根据 6:3:1 的比例划分训练集、测试集与验证集。

2.2 评价标准

使用召回率、平均精度均值（mAP）以及推理速度作为模型的评价指标。召回率衡量的是模型预测正确的正类别样本占有所有实际正类别样本的比例。AP 是在不同召回率水平上精确率的平均值，mAP 是所有类别 AP 的平均值，特别适用于多类别目标检测任务。

2.3 对比试验

将 Faster-YOLO11 与主流目标检测模型 YOLOv5n、YOLOv8n、YOLO11n 进行对比试验，实验结果如表 2 所示。

表 2 基于危险驾驶数据集的对比实验结果

模型	召回率 /%	mAP50 /%	mAP50-95 /%	推理速度 /ms
YOLOv5n	71.2	81.1	48.6	27.9
YOLOv8n	71.8	81.3	48.9	27.6
YOLO11n	72.4	81.9	49.1	26.6
Faster-YOLO11	73.5	82.5	49.6	24.3

对比实验结果表明，YOLO11n 全面优于其他 YOLO 系列模型，同时本文提出的 Faster-YOLO11 相较于基准模型 YOLO11n 也有明显提升，召回率提升了 1.52%，mAP50 与 mAP50-95 分别提升了 0.73% 与 1.02%，推理速度减少了 8.64%。

2.4 消融实验

为验证各改进模块的有效性，对各模块进行消融实验，实验结果如表 3 所示。

表 3 基于危险驾驶数据集的消融实验结果

Faster Net	LSKA	RCS OSA	Soft-NMS	mAP50 /%	推理速度 /ms
√				81.3	22.6
√	√			81.8	23.4
√	√	√		82.2	24.3
√	√	√	√	82.5	24.3

消融实验结果表明，各个模块的改进有效优化了推理速度或推理精度，FasterNet 作为主干减少了 15% 的推理速度，LSKA 的引入使 mAP50 提升了 0.5%，RCSOSA 的替换也使 mAP50 提升了 0.4%，Soft-NMS 的使用使 mAP50 提升了 0.3%。需要说明的是，Soft-NMS 作为一种后处理技术，其计算时间不参与模型推理速度的统计。

3 结论

本文针对危险驾驶行为检测领域提出了一种高效的目标检测算法 Faster-YOLO11，模型基于 YOLO11n，主干网络替换为 FasterNet，并在 SPPF 中引入 LSKA 注意力机制；使用 RCSOSA 模块替换颈部网络中的 C3K2 模块；在后处理阶

段，使用 Soft-NMS 提高候选框的精度。算法在精度与速度方面对比 YOLO11n 均匀明显提升。根据对比实验，Faster-YOLO11 对比基准模型召回率提升了 1.52%，mAP50 与 mAP50-95% 分别提升了 0.73% 与 1.02%，推理速度减少了 8.64%，Faster-YOLO11 有着明显的性能提升。在实际应用中，危险驾驶检测算法通常部署于端侧设备，因此还需要对模型进行剪枝、量化等优化手段，并且针对不同目标硬件（CPU、GPU、NPU）进行针对性移植，因此还要考虑改进模块在上述优化手段中的适用性。

参考文献：

[1] 李孟成, 罗甜, 张琰, 等. 基于 YOLOv5 的疲劳与危险驾驶行为检测系统研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2023(6):107-110.

[2] 许昊, 马晨东, 罗紫琳. 基于深度学习的危险驾驶状态检测预警系统设计 [J]. 无线互联科技, 2022, 19(12): 50-52.

[3] 张樱己. 基于眼动与手部行为识别的驾驶分心检测算法研究 [D]. 济南: 济南大学, 2022.

[4] 宋巍. 基于深度学习的违规驾驶行为视觉识别方法研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.

[5] 郑天赐. 基于卷积神经网络驾驶员手持通话检测算法的研究与应用 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2023.

[6] 唐天俊, 宋平. 基于深度学习的夜间危险驾驶行为检测算法 [J]. 电脑与信息技术, 2024, 32(4): 9-13.

[7] CHEN J R, KAO S H, HE H, et al. Run, don't walk: chasing higher FLOPS for faster neural networks[C]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE, 2023:12021-12031.

[8] LAU K W, PO L M, REHMAN Y A U. Large separable kernel attention: rethinking the large kernel attention design in CNN[J]. Expert systems with applications, 2024, 236: 121352.

[9] KANG M, TING C M, TING F F, et al. RCS-YOLO: a fast and high-accuracy object detector for brain tumor detection[C]//Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention–MICCAI 2023:26th International Conference. NewYork: ACM, 2023:600-610.

[10] BODLA N, SINGH B, CHELLAPPA R et al. Soft-NMS—improving object detection with one line of code[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE, 2017:5562-5570.

【作者简介】

马骁（1981—），男，辽宁沈阳人，硕士，副教授，研究方向：信息技术研究。

（收稿日期：2024-11-22）

基于声誉分数的改进 PBFT 共识算法

徐莹臣^{1,2} 田野^{1,2} 景莹^{1,2} 袁富江^{1,2}
XU Yingchen TIAN Ye JING Ying YUAN Fujiang

摘要

针对实用拜占庭容错 (practical byzantine fault tolerance, PBFT) 共识算法中存在的主节点选取随机、通信开销大、无奖惩机制等问题, 提出一种基于声誉分数的改进 PBFT 共识算法 (reputation scores byzantine fault-tolerant algorithm, FY-PBFT)。首先采用 Fisher - Yates 洗牌算法将节点划分至共识节点集和候选节点集, 同时引入声誉奖惩机制, 依照节点在共识过程中的表现动态计算声誉分数并依此调整节点集, 同时改变主节点的选取方式使可靠的节点当选主节点。仿真实验表明, FY-PBFT 共识算法在通信开销、共识时延等方面相较于 PBFT 共识算法有一定提升。

关键词

区块链; 共识算法; 实用拜占庭容错; Fisher - Yates 洗牌算法; 声誉分数

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.043

0 引言

当今信息技术日新月异, 区块链技术以其去中心化、可追溯、防篡改等特点在科技发展以及社会进步的多个领域起到了积极正向的推进作用^[1-4], 而共识算法作为区块链的核心技术便得到了人们广泛的关注^[5]。常用的共识算法有工作量证明 (PoW)、权益证明 (PoS)、股份授权证明 (DPoS)、Raft、实用拜占庭容错 (practical byzantine fault tolerance, PBFT)。PoW 主要依托于 hash 算法构建工作量, 存在计算能力浪费, 大量资源被用于无意义的 Hash 计算和交易确认效率低的问题^[6], 但安全性较强。PoS 共识算法依靠节点所持有的权益来决定其是否拥有记账权, 但存在权益集中的问题, 对去中心化程度有一定的影响, 安全机制仍需完善, 但 PoS 相较于 PoW 可以节省超过 99% 的能源消耗^[7]。DPoS 由持币人投票选举出代表节点负责记账, 虽然存在一定的中心化风险, 但与 PoS 相比, DPoS 参与的共识节点的数量大幅减少, 从而缩短了区块链的出块时间^[8]。Raft 算法的关键问题是领导者选举和日志同步^[9], 其通信复杂度较低, 适用于相对可靠的网络环境, 但存在伪造日志的问题, 并且容错能力有限。PBFT 中无权益的抵押或竞争资源的消耗, 使得恶意节点的成本降低, PBFT 通过三阶段的投票机制排除恶意节点对共识的影响, 提供不超过 1/3 总节点数量的容错能力^[10], 但当前 PBFT 算法仍然有很多值得改进的地方, 如通信开销大, 主节点选取随机等问题最终导致算法的共识效率

较低, 为了提高共识效率, 大部分学者从主节点选取方式和共识一致性方面进行改进。

在主节点选取方面, 文献 [11] 给共识节点设置一系列活动状态使得节点通过状态转换在系统中拥有完整生命周期, 由此节点可以动态地加入和退出, 同时增加以最长链为选举原则的主节点选举过程, 使选举出的主节点可信度更高。文献 [12] 提出一种基于节点可靠性评估的改进拜占庭容错算法, 该方案引入节点基础配置评分机制及信誉评分机制, 并以此为依据将节点标记为 3 种不同的信任状态, 改进主节点的选取方式, 提高了系统的共识效率以及安全性。上述方法对主节点选取方式进行了改进, 虽然保证了主节点的可靠性, 但是随着节点数量的增加, 通信开销问题仍然面临挑战。在共识一致性方面, 文献 [13] 引入节点的自身状态和投票数, 并根据节点信誉值选择部分节点作为聚类中心运行 K-means 聚类算法, 实行组内、组间分开的方式进行共识以减轻节点的存储负担, 提高了系统的共识效率和安全性, 但存在聚类效果不稳定的情况。文献 [14] 提出了 DS-PBFT 算法, 优化一致性协议, 简化三阶段通信流程从而提高共识效率, 并提出节点评分分组机制, 提高了共识的效率, 但在网络不稳定、共识节点数量增多时共识效率仍面临挑战。

针对 PBFT 共识算法存在的问题, 本文提出改进方案。首先, 针对 PBFT 缺乏奖惩机制的问题, 提出基于声誉分数的奖惩机制以确保节点参与共识、投票的积极性; 其次, 针对大规模网络场景中 PBFT 通信开销大的问题, 使用 Fisher - Yates 洗牌算法将节点划分为共识、候选节点集, 选择一部分可靠的节点参与共识, 减少不必要的通信开销。最后, 改进主节点的选取方式, 提出声誉机制结合投票双重评估的方式选取可靠的主节点。

1. 太原师范学院计算机科学与技术学院 山西晋中 030619
2. 太原师范学院智能优化计算与区块链技术山西省重点实验室 山西晋中 030619

1 PBFT 共识算法

在分布式系统中,节点可能会出现各种意外情况,如网络故障或恶意攻击等。拜占庭容错算法旨在在此情况下确保系统仍然能够正常运行并达成一致的结果,它能够在最多有 f 个恶意节点存在的情况下保证分布式系统的一致性与可行性。在一个包含 N 个节点的系统中,当节点个数 N 与拜占庭节点个数 f 满足 $N \geq 3f+1$ 时,便可确保消息回复的正确性,从而达成共识。PBFT 共识算法在一致性协议、视图更换协议、检查点协议下运行。其中一致性协议是 PBFT 共识算法的核心协议,共分为 5 个阶段,分别是请求阶段、预准备阶段、准备阶段、确认阶段、回复阶段。执行过程如图 1 所示。

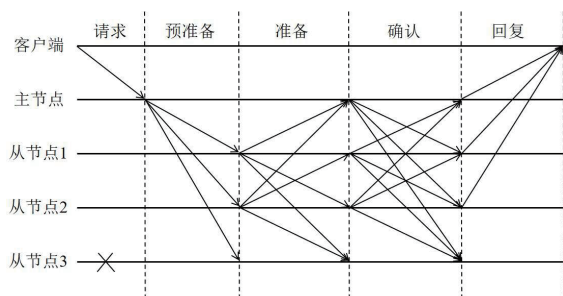


图 1 PBFT 算法共识流程

PBFT 共识算法的一致性协议基本执行过程如下:

(1) 请求阶段:客户端向主节点发送包含操作内容的请求,主节点对请求进行序列号分配、签名等操作将其整合为预准备消息。

(2) 预准备阶段:主节点将预准备消息广播给从节点,从节点对消息进行验证,若验证通过则将其记录于自己的日志中。

(3) 准备阶段:从节点向其他节点发送准备消息表明已认可预准备消息,从节点收到 $2f+1$ 个相同序列号的准备消息时,便进入确认阶段。

(4) 确认阶段:包括主节点在内的共识节点向其他节点广播确认消息,当接收到 $2f+1$ 个相同序列号的确认消息时,便执行请求中的操作。

(5) 回复阶段:执行完请求的操作后,节点向客户端发送回复消息,客户端接收到 $f+1$ 个相同的回复消息时,便可确认消息已经被成功执行。

2 FY-PBFT 算法设计

本文提出一种基于声誉分数的改进 PBFT 共识算法,使用 Fisher-Yates 洗牌算法将所有节点公平地划分为两类:共识节点集和候选节点集。在首轮共识前,初始化所有节点的声誉分数为 60,并使用洗牌算法随机选出 $2/3$ 的加入共识节点集(若节点数量为奇数无法被整除,则向下取整保留整数),

另外 $1/3$ 的节点为候选节点,仅参与投票同时被动同步在共识节点集中达成一致的消息。在后续不断的共识过程中,根据节点在共识过程中的表现计算出每个节点的声誉分数,并对其进行降序排列,当节点的声誉分数低于共识节点 $2/3$ 的阈值时,将被移至候选节点集,同时在候选节点集中选出声誉分数高的节点加入到共识节点集。每轮共识后,选出声誉分数前 10% 的共识节点,所有节点对这些节点进行投票,目的是根据声誉分数即节点在共识中的表现结合投票的形式,动态的选举主节点,这种通过声誉分数和投票双重评估的方式能够选举出更加可靠的主节点。

2.1 Fisher-Yates 洗牌算法分组

本文在初始分组时,在一个节点数量为 N 的系统中使用 Fisher-Yates 洗牌算法随机挑选出 $2N/3$ 比例的节点加入到共识节点集参与共识,其他节点加入到候选节点集。后续随着共识算法的进行,会根据节点声誉分数的高低动态的将节点划入共识节点集或者候选节点集,分组步骤具体如下:

(1) 将系统中的节点总数设为 N ,并设共识节点集 C 大小为 n_1 ,候选节点集 A 大小为 n_2 ,且 $n_1+n_2=N$ 。本文按照 $2/3$ 和 $1/3$ 的比例分别划分共识节点集和候选节点集,则 $n_1=2N/3$, $n_2=N-n_1$ 。

(2) 将所有节点按照加入系统的先后顺序从 1 到 N 进行编号,形成一个节点列表 $L=[1,2,\dots,N]$ 。

(3) 使用 Fisher-Yates 洗牌算法对节点列表 L 进行洗牌,打乱节点的顺序,以此保证所有节点被初始选中加入到共识节点集的机会是均等的,算法具有良好的随机性,提高系统的安全性。

(4) 将洗牌后的节点列表 L 中的前 n_1 个节点作为共识节点集 C 。剩余的 n_2 个节点作为候选节点集 A 。

(5) 在划分后的共识节点集 C 中,采取节点投票的形式选举出第一个主节点,至此,初始化分组结束。

2.2 节点声誉评分机制

声誉分数计算是 FY-PBFT 算法的关键部分,根据节点在共识过程中的表现进行评分,是节点动态划分集合、主节点选取的基础。

2.2.1 共识节点声誉分数评分公式

本文中共识节点声誉分数的更新由其在共识过程中的表现所决定,而候选节点暂时无法参与共识,故将共识节点和候选节点的声誉分数计算公式进行区分,给予候选节点增加信誉分数的机会,共识节点 i 的声誉分数评分方式为:

$$S_{i,k} = S_{i,k-1} + \Delta R + \theta \cdot W + \gamma \cdot P_i \quad (1)$$

式中: $S_{i,k}$ 是共识节点 i 完成当前轮次共识并更新的声誉分数; $S_{i,k-1}$ 是共识节点 i 完成上一轮次共识并更新的声誉分数;

θ 、 γ 是权重，本问中默认 $\theta=1$ 、 $\gamma=-2$ 。

下面将依次介绍公式的组成部分：

(1) 总共识完成率影响因子 ΔR ：总共识完成率影响因子能够反应节点在连续两轮参与共识的情况，当节点本轮未成功参与共识，则 ΔR 为负数，扣除一定的声誉分数。当节点本轮成功参与共识，则 ΔR 为正数，即给予一定的声誉分数奖励。且 $\ln(1+x)$ 函数的增速逐渐趋于平稳，即函数一开始时增速较高，这对于低完成率的节点，其成功完成一次共识所获得的声誉分数奖励大于高完成率节点成功完成一次共识所获得的声誉分数奖励。目的在于激励共识完成率较低的节点提高其参与共识的积极性，提高系统的整体参与度和公平性。

$$\Delta R = R_{i,k} - R_{i,k-1} = \ln\left(1 + \frac{C_{i,k}}{C_k}\right) - \ln\left(1 + \frac{C_{i,k-1}}{C_{k-1}}\right) \quad (2)$$

式中： $R_{i,k}$ 、 $R_{i,k-1}$ 分别是当前轮次和上一轮次的共识完成率影响因子； C_k 、 C_{k-1} 分别是系统到第 k 和第 $k-1$ 轮总共完成的共识轮次数； $C_{i,k}$ 、 $C_{i,k-1}$ 分别是节点 i 截至第 k 轮和第 $k-1$ 轮成功完成的共识轮次数。 ΔR 是总共识完成率影响因子。

(2) 共识惩罚评分 P_i ：共识节点集中的节点在参与共识时，若因宕机或恶意行为等未成功参与共识，则扣除其声誉分数作为惩罚，并且当节点未成功完成共识的累计次数增多时，对其惩罚力度也逐渐递增。

$$P_i(x) = P_0 + \alpha \cdot \sqrt[3]{x} \quad (3)$$

式中： $P_i(x)$ 是节点 i 第 x 次未成功参与共识的扣分值； P_0 是基础扣分值，本文中为 0； α 为影响分数扣除的系数，本文中为 1； x 是当前轮次节点未成功参加共识的累计次数。

(3) 投票率影响因子 V_i ：指的是某节点在选取主节点时参与投票的次数与系统总发起的投票次数的比值，在共识节点集中，投票率与成功参与共识所得的信誉分数挂钩。候选节点集中根据投票次数进行分数的更新，能够提高所有节点正确行使投票权的积极性。

$$V_i = \frac{N_v}{10 \cdot N_i} \quad (4)$$

式中： N_v 表示节点 i 参与投票的次数； N_i 表示系统总共发起投票的次数。

(4) 共识奖励评分 W ： W 是给予成功完成共识的节点的奖励，根据节点的累计声誉分数将节点的划分为 3 个区间，同样完成一次共识，信誉分值高的节点加分少于信誉分数低的节点，目的在于降低“强者恒强”效应，避免信誉分数较低的节点难以追赶上来，致使节点丧失参与共识和投票的积极性，通过更高的加分才能使得声誉分数低的节点看到提升声誉分数以赶超其他节点的机会，从而积极地参与共识和投票。

$$W = \begin{cases} a \cdot (1 + V_i), 90 < S_{i,k-1} \\ b \cdot (1 + V_i), 70 < S_{i,k-1} \leq 90 \\ c \cdot (1 + V_i), S_{i,k-1} \leq 70 \end{cases} \quad (5)$$

式中： a 、 b 、 c 表示不同的比例，且满足 $0 < a < b < c$ ，在本文中默认 $a=0.5$ 、 $b=1$ 、 $c=2$ 。

2.2.2 候选节点声誉分数评分公式

当候选节点在每轮主节点选取时投出自己的支持票，则被认为是投票成功，给予一定的声誉分数奖励，否则扣除一定的声誉分数作为惩罚。

$$D_{i,k} = D_{i,k-1} + U; U = \begin{cases} d, \text{节点本轮投票成功} \\ -2d, \text{节点本轮未投票} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $D_{i,k}$ 、 $D_{i,k-1}$ 分别是节点 i 在当前轮次和上一轮次共识结束后更新的声誉分数； U 是候选节点声誉分数更新因子，当节点本轮成功参与投票则给予一定的声誉分数 d 作为奖励，当节点本轮未投票则扣除 $2d$ 的声誉分数作为惩罚，本文默认 d 为 0.5。

2.3 主节点选取方式

在 PBFT 共识算法中，所有节点均参与共识过程且均有当选主节点的机会，而当系统中的拜占庭节点当选主节点后，因无法完成共识而引起视图更换协议更换主节点后，此拜占庭节点依然有机会再次当选主节点，这增加了系统的通信开销，降低了共识的效率同时破坏了系统的安全性。因此本文对主节点的选取做出改进。随着共识过程的进行，节点的声誉分数会根据其在共识过程中的表现动态变化，每轮共识完成后，会按照节点的声誉分数进行排名，排名在前 10% 的共识节点为高声誉分数节点，所有节点对高声誉分数的共识节点进行投票，并按照投票的高低选举出主节点（当前 10% 的高声誉分数节点有多个节点得票数相同且为最高票数时，则此时按照节点声誉分数的高低确定主节点），其中节点 i 的得票数量计算方式为：

$$H_i = \sum_{L=1}^N S_L; S_L = \begin{cases} 1, \text{节点} L \text{支持节点} i \\ 0, \text{节点} L \text{不支持节点} i \end{cases} \quad (7)$$

本文选取主节点的方式并不是单一的根据信誉分数的高低，而是结合投票的方式，对比于只按照最高信誉分数直接选取主节点的方式，可以打破信誉分数最高节点中心化的垄断，让更多的高声誉分数的节点获得当选主节点的机会，减少某个节点长期主导共识的风险，也不会单一的依赖信誉机制，增加了通过投票动态调整的机会，使主节点的选取更加公平、灵活。

3 实验与分析

本文所提改进算法仿真实验使用设备的处理器为 13th Gen Intel(R) Core(TM)i9-13900K 3.00 GHz，操作系统为 Win-

dows11, 机带 RAW 为 128 GB, 使用 Python3.8 进行代码的编写以及实现。本节通过对比基于声誉分数的改进拜占庭容错算法和传统 PBFT 算法在通信开销、共识实验两部分的实验差异, 验证本文的改进效果。

3.1 通信开销

通信开销的大小是判断共识算法效率高低的一个重要指标, 指节点之间为了达成共识所需的消息传递量。PBFT 算法的通信过程包括 3 个阶段, 假设系统中有 N 个节点, 在预准备阶段, 主节点将预准备消息广播给 $N-1$ 个从节点, 因为此阶段为单向发送消息, 故通信开销为 $N-1$ 。在准备阶段, $N-1$ 个从节点相互发送准备消息, 这其中也包括从节点向主节点发送消息, 此阶段的通信次数为 $(N-1)^2$ 在确认阶段, 系统中的 N 个节点相互发送确认消息, 此阶段的通信次数为 $N(N-1)$ 。最终得出 PBFT 算法的通信开销 C 为:

$$C = N - 1 + (N - 1) \cdot (N - 1) + N \cdot (N - 1) = 2N^2 - 2N \quad (8)$$

对于本文提出的 FY-PBFT 算法的通信过程同样需要这 3 个阶段。根据方案的设定, 在不断地共识过程中, 根据节点的声誉分数将排名在前 $2N/3$ 的节点划入共识节点集, 参与共识的过程, 其余节点划入候选节点集, 不参与共识的过程, 只是被动的同步在共识节点集中达成一致的消息。因此, 本文在预准备阶段的通信次数为 $(2N/3)-1$, 在准备阶段的通信次数为 $[(2N/3)-1] \times [(2N/3)-1]$, 在确认阶段的通信次数为 $(2N/3) \times [(2N/3)-1]$ 。故得出 FY-PBFT 总的通信开销 C' 为:

$$C' = \frac{8}{9}N^2 - \frac{4}{3}N \quad (9)$$

图 2 为给定节点的情况下本算法与 PBFT 算法通信次数的对比图。

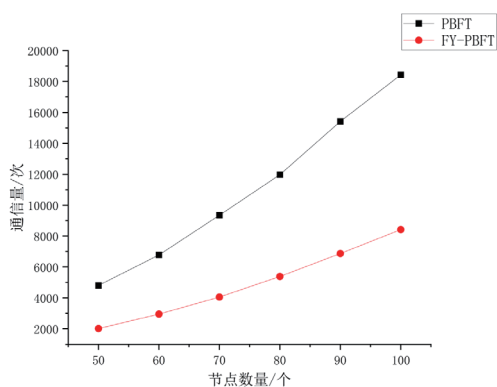


图 2 通信次数对比

图 2 所示在相同节点的情况下 FY-PBFT 算法的通信次数明显低于 PBFT 算法, 且随着节点数量的增加, 两算法之间通信次数的差距越大, 由此可知本算法能够有效减少系统的通信开销。

3.2 共识时延

共识时延是衡量系统性能的重要指标, 它的高低能够直接性的影响系统的效率和用户的体验。共识时延指的是从客户端发送请求到达成请求所花费的时间, 系统中节点的共识时延越低, 则系统达成共识的速度越快。共识时延的计算如下列公式所示。且在给定节点的情况下 FY-PBFT 算法与 PBFT 算法共识时延结果的对比如图 3 所示。

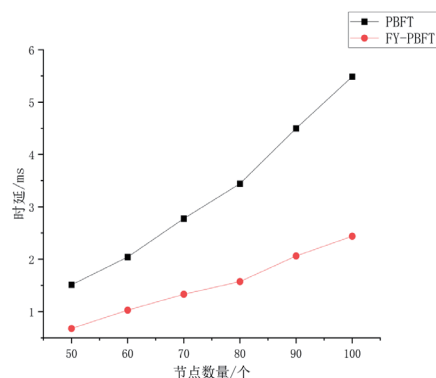


图 3 共识时延对比

$$T = T_F - T_R \quad (10)$$

式中: T_F 表示客户端收到 $f+1$ 个内容相同的回复消息的时间, 此时客户端的请求已被成功执行; T_R 表示的是客户端发送请求给主节点的时间。

当系统中的节点数量分别为 50、60、70、80、90、100 时, 分别对其做 50 次重复实验得出平均值作为实验结果, 最终结果如图 3 所示: 当两算法节点数相同时, PBFT 算法的共识时延明显高于 FY-PBFT 算法的共识时延且随着节点数量的增多这种差距愈加明显, 这是由于 FY-PBFT 算法对主节点、共识节点选取方式的优化降低了视图更换的概率且通过节点的声誉分数选取一部分可靠的节点参与共识, 减少了一部分不必要的通信开销, 从而降低了系统的共识时延。

3.3 节点声誉分数

本部分通过展示系统中 3 个共识节点和 2 个候选节点在 8 轮次的共识过程中其声誉分数的变化, 并以此来验证本文所提声誉分数的合理性和可行性。初始设定时, 节点 1、节点 2 和节点 3 为共识节点, 节点 4、节点 5 为候选节点。其中节点 1 积极参与共识和投票过程, 节点 2 较积极的参与共识和投票过程, 节点 3 消极参与共识但积极参与投票过程。节点 4 积极参与投票, 节点 5 在投票过程中没有有效使用投票权。其在 8 轮次共识过程中声誉分数变化如图 4 所示。由图 4 可知, 节点 1 积极的参与共识与投票过程, 其声誉分数呈上升趋势, 但因本声誉机制在设定时为避免“强者恒强”的现象出现, 故其在突破 70 分以后, 分数的增长速度明显下滑。节点 2 较为积极的参与共识与投票过程, 但能够较为

明显的看出其在第3轮次共识时未成功参与共识而导致分数下降。节点3在初始设定时为共识节点，但因其在第2轮次的共识过程中未成功参与共识，导致分数低于共识节点集的最低阈值故而被踢出共识节点集，在加入到候选节点集后，节点3积极地参与投票过程故分数也呈现较为缓慢的增长趋势。节点4积极地参与投票过程，在第2轮次共识过程结束后，其声誉分数赶超节点3，故而加入到共识节点集参与共识，因其在后续的共识过程中较为积极，故分数呈现总体上升趋势。节点5在投票过程中未能有效使用投票权，根据声誉机制其分数呈现总体下降趋势，若其持续此状态，则难有机会加入到共识节点集中参与共识过程。

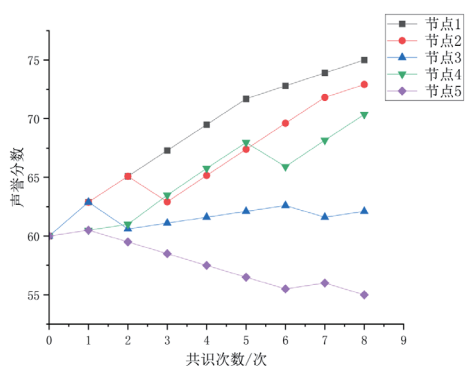


图4 节点声誉分数变化图

4 结语

通过分析 PBFT 共识算法，发现其存在所有节点均参与共识、主节点选取随机并且对恶意节点不进行惩罚等问题，提出了 FY-PBFT 共识算法，本文使用洗牌算法对节点进行分组，并引入声誉奖惩机制，根据节点的历史表现计算出节点的声誉分数，根据声誉分数的高低将节点划入不同的组内，限制了一部分节点参与共识的权利。优化了主节点的选取方式，通过声誉分数以及投票双重评估选取更加安全可靠的主节点，降低了通信复杂度，提高了系统的共识效率。仿真实验表明，相较于 PBFT 算法 PY-PBFT 算法的共识时延更低，通信次数更少且安全性更高。

参考文献:

[1] GADE D S, AITHAL S. Blockchain technology: a driving force in smart cities development[J]. International journal of applied engineering and management letters (IJAEML), 2020, 4(2): 237-252.

[2] GILLPATRICK T, BOĞA S, ALDANMAZ O. How can blockchain contribute to developing country economies? a literature review on application areas[J]. Economics, 2022, 10(1): 105-128.

[3] SANGEETHA S B, KRISHNA P K. Blockchain based privacy and security across cloud in electric vehicle application for sustainable development in industry, innovation and infrastructure[J]. International journal of management, technology and social sciences (IJMTS), 2022, 7(2): 347-358.

[4] NGUYEN Q K, DANG Q V. Blockchain technology for the advancement of the future[C/OL]//2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD). Piscataway: IEEE, 2018[2024-05-03]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8595577>.

[5] YUSOFF J, MOHAMAD Z, ANUAR M. A review: consensus algorithms on blockchain[J]. Journal of computer and communications, 2022, 10(9): 37-50.

[6] 武岳, 李军祥. 区块链共识算法演进过程[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(7): 2097-2103.

[7] 刘艺华, 陈康. 区块链共识机制新进展[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S2): 6-11.

[8] 易黎, 卢新宇, 汤鲲, 等. 区块链共识算法研究综述[J]. 电子设计工程, 2024, 32(6): 161-170.

[9] 姜义, 吕荣镇. 区块链共识算法综述[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2021, 39(2): 132-137.

[10] 靳世雄, 张潇丹, 葛敬国, 等. 区块链共识算法研究综述[J]. 信息安全学报, 2021, 6(2): 85-100.

[11] 甘俊, 李强, 陈子豪, 等. 区块链实用拜占庭容错共识算法的改进[J]. 计算机应用, 2019, 39(7): 2148-2155.

[12] 唐宏, 刘双, 酒英豪, 等. 实用拜占庭容错算法的改进研究[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(9): 144-150.

[13] 胡继圆, 于璨. 基于信誉机制分组的改进 PBFT 算法[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2023, 41(1): 85-89.

[14] 沈学利, 李欣儒. 基于节点动态评分机制的分组共识算法[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(4): 989-994.

【作者简介】

徐莹臣(1999—), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 研究方向: 区块链, email: 17615351517@163.com。

田野(1980—), 女, 山西太原人, 博士, 副教授、硕导, 研究方向: 网络信息与安全、区块链。

景莹(1999—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向: 深度学习。

袁富江(1998—)男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 研究方向: 区块链。

(收稿日期: 2024-11-25)

器件重叠检查方法的研究

薛长青¹ 李彦祯¹ 于洪真¹ 李发春¹

XUE Changqing LI Yanzhen YU Hongzhen LI Fachun

摘要

芯片版图设计的准确性和可靠性对芯片性能至关重要,其中器件重叠检查是核心环节。为全面检查器件重叠情况,文章提出了一种器件重叠规则检查方法,统一定义版图数据结构,分类处理多边形和复合多边形器件,将器件重叠情况细分为复合多边形与复合多边形器件重叠、多边形(不包括矩形)与多边形重叠、多边形(不包括矩形)与复合多边形重叠、矩形多边形与矩形多边形重叠、矩形多边形与复合多边形重叠、矩形多边形与多边形(不包括矩形)重叠以及自定义器件(合法重叠)七种情况,同时运用多种重叠判断算法。结果显示,该方法能够有效检测出器件的重叠,显著提高了版图设计的准确性和效率。

关键词

芯片;多边形器件;复合多边形器件;器件重叠;自定义器件

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.044

0 引言

芯片作为计算的核心部件,其版图设计至关重要。传统版图设计工具在处理器件重叠检测时,主要依赖于遍历所有器件并进行相互比较的方法。然而,随着科技的发展,器件种类不断增多,包括基本器件、器件以及各类自定义器件,而且其版图设计数据结构也与以前版图设计存在显著差异。当前版图设计工具尚处于初步发展阶段,不同工具间对应的版图设计数据结构尚未统一,这进一步加剧了器件重叠检测的复杂性。

针对这一现状,本文提出了一种器件重叠规则检查方法。该方法首先定义了版图设计工具的数据结构,该结构涵盖了器件类型、器件名称、器件坐标以及器件参数等关键信息。其中,器件类型被细分为多边形器件和复合多边形器件两大类,分别对应一维数组和多维嵌套数组的坐标表示方式。在多边形类型器件中,sym1作为典型代表,而在复合多边形器件中,sym2、sym3等则占据了重要地位。此外,该方法还充分考虑了自定义器件的特殊性,如自定义sym5器件等,这些器件同样可以根据其形状特征被归类为多边形器件或复合多边形器件^[1-3]。

在器件重叠检测的具体实践中,本文方法将器件重叠情况细分为复合多边形与复合多边形器件重叠、多边形(不包括矩形)与多边形重叠、多边形(不包括矩形)与复合多边形重叠、矩形多边形与矩形多边形重叠、矩形多边形

与复合多边形重叠、矩形多边形与多边形(不包括矩形)重叠以及自定义sym5(合法重叠)七种情况。针对每种情况,本文方法都定义了相应的器件重叠数据结构,包括器件重叠输出信息、器件重叠对象名称以及器件重叠对象坐标等关键信息。

1 版图数据结构定义

1.1 器件类型与坐标表示

在器件重叠规则检查的方法中,器件类型与坐标表示构成了版图数据结构的核心要素。该方法针对版图设计工具所对应的特定数据结构进行了设计,以确保能够准确、高效地检测器件之间的重叠情况。

首先,在器件类型方面,该方法将器件划分为多边形器件和复合多边形器件两大类。多边形器件以其简单的几何形态和易于处理的坐标表示方式,成为版图设计中的基础元素。其中,sym1器件作为多边形器件的典型代表,广泛应用于各种电路的连接与封装。而复合多边形器件以复杂多变的形状,为版图设计提供了丰富的选择。sym2器件、sym3器件等均属于复合多边形器件的范畴,在计算与通信等领域发挥着至关重要的作用。

此外,该方法还充分考虑到自定义器件的特殊性,如自定义sym5器件等,虽然形态各异,但同样可以根据其形状特征被归类为多边形或复合多边形。为区分自定义器件与普通多边形器件,该方法在器件类型中引入了自定义类型标识。当自定义类型标识为空时,该器件即被视为普通多边形器件;而当其被赋予特定值时,则表明该器件为自定义器件,需要按照特定的规则进行处理。

1. 山东云海国创云计算装备产业创新中心有限公司
山东济南 250101

在坐标表示方面，该方法为多边形器件和复合多边形器件分别定义了不同的坐标表示方式。对于多边形器件，其坐标采用一维数组的形式进行表示，每个坐标点由横纵坐标组成，这些坐标点共同构成了器件的几何形状。而对于复合多边形器件，由于其形状更为复杂，因此采用多维嵌套数组的形式来表示其坐标。

1.2 自定义器件处理

自定义器件也是多边形器件的一种，但具有特殊的自定义类型标识。自定义 sym5 由多个矩形组合而成，通过自定义类型标识可以区分多边形器件和自定义矩形多边形器件。

2 重叠规则检查方法

2.1 器件模型定义与解析

根据版图数据结构，对器件进行模型定义和解析。多边形器件模型包含名称、类型、自定义器件类型、器件坐标和器件参数等信息。复合多边形器件模型则包含类似的信息，但器件坐标为多维嵌套数组。

2.2 关键技术实现

2.2.1 多边形器件（不包括矩形）与多边形器件（不包括矩形）重叠

解析版图设计数据，得到了所有器件模型信息的数组。随后，根据器件的类型进行了分类保存：对于非自定义的多边形器件，将其坐标集合保存在 listPoly 中。接下来，进行多边形器件（排除自定义器件）的重叠检查。获取每个多边形器件的坐标信息作为器件的唯一标识，并应用多边形重叠规则进行判断。这一规则基于射线法，即判断一个多边形器件的每个坐标点是否位于另一个多边形器件的内部。若存在至少一个坐标点满足此条件，则确认两个器件重叠。对于重叠的器件，构建了相应的数据结构进行封装，并提供了页面异常展示功能，以多边形器件 sym1 为例，实验效果如图 1 所示。

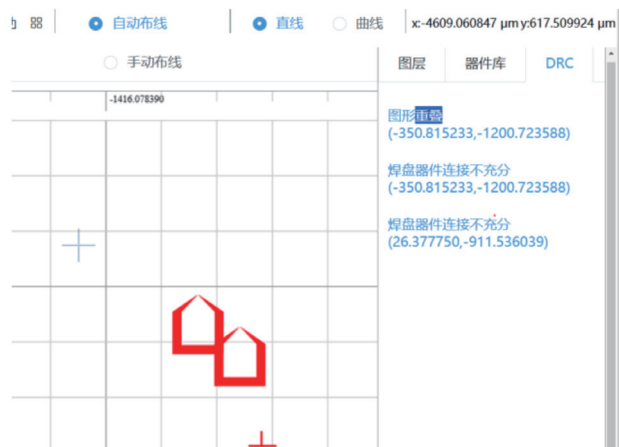


图 1 sym1 器件重叠图

2.2.2 多边形器件（不包括矩形）和复合多边形器件重叠

解析版图设计数据，得到了所有器件模型信息的数组。随后，根据器件的类型进行了分类保存：对于非自定义的多边形器件，将其坐标集合保存在 listPoly 中；而对于复合多边形器件，由于其结构的复杂性，将其坐标集合以嵌套列表的形式保存在 listGroups 中。接下来，进行多边形器件（不包括矩形）和复合多边形的重叠检查。对于每个器件，获取其坐标信息以唯一标识。应用多边形器件与复合多边形器件的重叠规则来判断是否存在重叠情况。具体而言，该规则涉及分别获取多边形器件和复合多边形器件（后者包含多个简单多边形）的坐标点，并检查多边形器件是否与复合多边形器件中的每一个简单多边形都发生重叠。如果多边形器件与复合多边形器件中的至少一个简单多边形重叠，则认定多边形器件与复合多边形器件重叠，并构建相应的数据结构来封装输出所有重叠的器件信息，同时在页面上提供异常展示。若多边形器件与复合多边形器件中包含的所有简单多边形均未发生重叠，则判定两者不重叠。

2.2.3 复合多边形器件和复合多边形器件重叠

解析版图设计数据，得到了所有器件模型信息的数组。随后，根据器件的类型进行了分类保存：对于复合多边形器件，由于其结构的复杂性，将其坐标集合以嵌套列表的形式保存在 listGroups 中。随后，按照器件分类得到所有组合多边形器件集合，并获取每个器件的复合多边形坐标以标识器件。接下来，通过复合多边形器件和复合多边形器件的重叠规则，来确认是否存在器件重叠。具体的重叠判断规则步骤^[4-6]如下。

（1）获取坐标点

分别获取两个待比较的复合多边形器件的所有多边形坐标点。

（2）重叠判断

对于一方复合多边形中包含的所有多边形，依次检查它们是否与另一方复合多边形中包含的所有多边形重叠。这里所说的“重叠”，是指两个多边形相交。

（3）构建输出

如果在一方复合多边形中找到了至少一个多边形与另一方复合多边形中的某个多边形重叠，则判定这两个复合多边形重叠。此时，将构建封装输出所有重叠的器件结构数据，并提供页面异常展示，以便用户直观地看到哪些器件发生了重叠。

（4）无重叠情况

如果在一方复合多边形中找不到任何与另一方复合多边形中的多边形重叠的情况，则判定这两个复合多边形不重叠。

2.2.4 矩形器件和复合多边形器件重叠

首先,通过数据获取与解析机制,将版图设计数据序列化,并转化为一个包含器件模型信息的对象数组。

接着,根据器件类型的差异,进行了细致的分类存储。对于结构相对简单的自定义多边形矩形器件,其对象坐标集合被保存在 `listRectof` 列表中。而对于结构更为复杂的复合多边形器件,则采用了嵌套列表的形式,保存于对象集合 `list-Groups` 列表中。

随后,进行矩形多边形与复合多边形的重叠检查。为每个矩形多边形器件提取了坐标信息,并将其作为器件的唯一身份标识。然后,应用矩形多边形与复合多边形重叠判断的规则。这一规则的核心在于,判断矩形器件所占据的最大区域范围是否与复合多边形中的任意一个多边形存在交集。一旦确认矩形器件与复合多边形中的某个多边形相交,即判定这两个器件发生了重叠。

对于检测出的重叠器件,把重叠器件的数据结构进行了封装,提供了直观的页面异常展示功能。

2.2.5 矩形器件和矩形器件重叠,排除 sym5 器件

在器件版图设计重叠规则检查流程中,首先需要从设计数据中提取并解析出自定义的多边形矩形器件对象集合。这一步骤涉及数据的获取、序列化处理以及基于器件类型的筛选。随后,识别出符合 `sym5` 定义的矩形器件组合。`sym5` 特指由 3 个矩形构成的结构,其中 1 个矩形与 2 个矩形相交^[7-10]。

为了找到这些 `sym5` 组合,遍历矩形器件对象集合,并对每个矩形器件执行重叠判断。在此过程中,利用了一个辅助函数 `checkRectAndRect`,该函数接收 3 个参数:器件组合的列表、多边形对象的列表以及矩形器件对象的列表。该函数的核心任务是识别并标记出需要删除的 `sym5` 矩形器件,这些器件的特征就是 3 个自定义矩形器件,且 1 个矩形器件和 2 个矩形器件合法重叠。

在 `checkRectAndRect` 函数的内部实现中,首先初始化了一个用于存储消息的列表和一个用于记录待删除矩形索引的列表。接着,遍历矩形器件列表,为每个矩形创建一个 `Rectangle2` 对象,并检查是否与其他矩形重叠。如果当前矩形与至少一个其他矩形重叠,将这些重叠矩形的索引添加到一个临时列表中。

随后,根据重叠情况判断当前矩形是否为 `sym5` 的一部分。如果是,将当前矩形的索引也添加到临时列表中,并将整个列表的内容合并到待删除的索引列表中。

为避免在删除元素时产生索引冲突,对待删除索引列表进行降序排序,并从后往前遍历该列表,根据索引从矩形器件列表中删除相应的矩形。

最终,经过 `checkRectAndRect` 函数的处理,矩形器件列表将只包含那些不构成 `sym5` 的矩形器件。

当已经得到了不包含 `sym5` 的矩形器件对象集合后,接下来需要判断这些矩形器件之间是否存在重叠。为了实现这一点,可以采用基于范围区域获取比对的方法,即取每个矩形器件中所有坐标的最大值和最小值,是否有交叉区域,可以判断对应的矩形器件是否重叠。实验效果如图 2 所示。



图 2 矩形器件和矩形器件重叠图

2.2.6 矩形器件和多边形器件(不包括矩形)重叠

首先通过序列化解析版图数据获取矩形器件对象集合与不包括矩形器件的多边形器件对象集合。矩形器件和多边形器件(不包括矩形)重叠规则判断可以根据多边形器件和多边形器件规则判断。以矩形器件和 `sym1` 器件重叠为例,实验效果如图 3 所示。

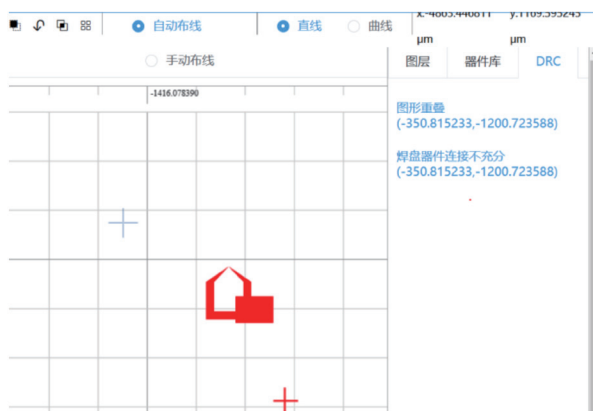


图 3 矩形器件和 `sym1` 器件重叠图

2.2.7 `sym5` 器件合法重叠

在器件重叠规则检查的过程中,自定义 `sym5` 的合法重叠情况比较特殊。首先,从自定义多边形器件集合中筛选出矩形器件,并利用索引算法高效地遍历这些器件组合,以找出存在重叠的器件。

具体而言,初始化一个空的索引集合,并对于每个矩形器件,再次遍历整个集合(排除自身),检查是否存在与其

重叠的其他矩形器件。若某个矩形器件与至少两个其他矩形器件重叠，初步判断这可能构成了一个自定义 sym5，即由一个桥面（当前矩形器件）和两个桥墩（重叠的矩形器件）组成。相关代码如下：

```
Set<Integer> rectIndices = new HashSet<>();
// 遍历所有矩形，查找重叠的矩形
for (int i = 0; i < listRectof.size(); i++) {
    List<DataPoint> rectangle = listRectof.get(i);
    Rectangle2 nowRectangle = new Rectangle2(rectangle);
    rectIndices.clear(); // 重置重合索引集合
    for (int j = 0; j < listRectof.size(); j++) {
        if (i != j) { // 不与自己比较
            List<DataPoint> othertangle = listRectof.get(j);
            Rectangle2 otherRectangle = new Rectangle2(othertangle);
            if (nowRectangle.overlaps(otherRectangle)) {
                rectIndices.add(j); // 添加重合矩形的索引
            }
        }
    }
    if (rectIndices.size() >= 2) {
        // 说明有两个矩形和这个矩形重叠，即 3 个矩形重叠，
        进一步判断是否符合 sym5
    }
}
```

其中，overlaps 为 2 个矩形重叠的方法。接下来，进一步验证 sym5 是否符合特定的规则。具体而言，定义了两个数组 minDistances1To2 和 minDistances1To3，分别用于存储桥面到第一个桥墩和第二个桥墩的最小水平和垂直距离。初始时，这两个数组的所有元素都被设置为正无穷大。接下来，遍历桥面上的所有点，对于每个点，计算它到第一个桥墩的最小水平和垂直距离，并更新 minDistances1To2 数组中的相应元素。同样地，再次遍历桥面上的所有点，计算它们到第二个桥墩的最小距离，并更新 minDistances1To3 数组。最后，比较 minDistances1To2 和 minDistances1To3 数组中对应元素的值。如果桥面到两个桥墩的最小水平和垂直距离都相等，即 (minDistances1To2[0] == minDistances1To3[0]) && (minDistances1To2[1] == minDistances1To3[1])，则认为 sym5 的分布是均匀的，符合自定义 sym5 的合法重叠规则。否则，系统会提示 sym5 分布不均匀，需要设计者进行相应的调整。

自定义 sym5 器件合法重叠，两端桥墩与中间线距离不相等，桥面与桥墩基础距离分布不均匀，实验效果如图 4 所示。

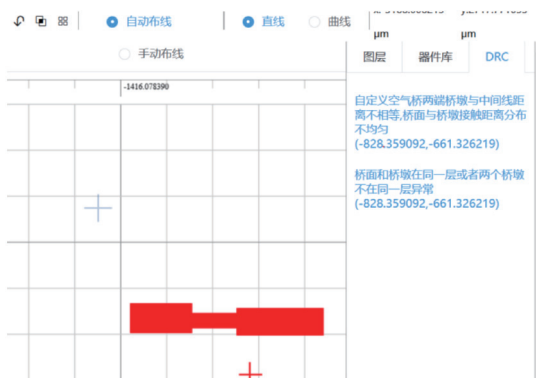


图 4 自定义 sym5 器件合法重叠，不相等不均匀图

3 结论

本文提出了一种器件重叠规则检查方法，通过定义版图数据结构、分类处理多边形和复合多边形器件以及采用多边形重叠判断算法实现了对器件重叠情况的全面检查。实验结果表明该方法具有显著的有效性和实用性。

参考文献：

- [1] 杨素行. 模拟电子技术基础简明教程 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 王利丹. 提高可编程增益放大器准确度的一种简单方法 [J]. 北京电子科技学院学报, 2008(2):29-31.
- [3] 郭光明, 王秀华. 模拟数据采集系统误差的自动纠正 [J]. 电子与自动化, 2000(5):11-13.
- [4] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统: 上册 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [5] 张晓威, 苏淑靖. 基于 FPGA 的高速高精度数据采集系统的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2016(1): 70-72.
- [6] 陈兴尧. 备品备件管理系统在变电站二次缺陷管理中的应用 [J]. 机电信息, 2018(12): 49-50.
- [7] 王朝凯, 范永璞, 印海洋, 等. 一种基于 Git 的智能变电站二次回路信息模型的版本管理系统 [J]. 电气技术与经济, 2019(6): 41-43.
- [8] 林利祥, 陈创, 王幸, 等. 基于物联网 RFID 和 IC 卡技术的变电站图纸管理系统研究 [J]. 电工电气, 2020(5):61-65.
- [9] 周二彪, 李忠政, 赵军, 等. 基于三维引擎的变电站二次系统三维模型库设计及其管理系统 [J]. 电气技术, 2020, 21(8): 58-65.
- [10] 许磊, 郑超, 孟洋洋, 等. 智能变电站二次装置一键式隔离系统研究 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(6):141-147.

【作者简介】

薛长青(1983—), 男, 山东济南人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 云平台、EDA 平台、物联网平台相关工程技术研究、开发。

(收稿日期: 2024-10-08)

基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制研究

王鑫¹ 李泽锐¹ 何发猛¹

WANG Xin LI Zerui HE Fameng

摘要

堆垛机在频繁启停过程中,加速度会发生突变,这会导致堆垛机运行时出现不平稳的状况,致使所载货物跌落下平台,在使用原始的细菌觅食算法时,细菌迁徙与趋向操作固定,使堆垛机速度控制受限,无法达到最优速度控制效果,难以保证堆垛机运行的平稳性。为此,文章研究了一种基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制。以堆垛机准时到达、稳定运行、能耗最小为目标,构建一个堆垛机速度优化函数;改进细菌觅食算法中的迁徙与趋向操作,提高算法性能,以求解优化函数获取当前工况下的最优速度,并将其输入到PID控制器中优化调整速度,以提升控制适应性,实现堆垛机速度优化控制。实验结果表明,设计方法可获取最优控制速度,且在该方法控制下堆垛机立柱振动最大振幅仅0.133 4 m,保证堆垛机运行的平稳性,具有良好的速度控制效果。

关键词

改进细菌觅食算法;堆垛机;堆垛机速度;速度优化;速度控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.045

0 引言

堆垛机作为自动化立体仓库中的关键设备,主要沿货架之间的巷道运行,负责执行货物的存放与拿取任务,其运动速度控制不仅影响堆垛机的作业效率,还直接关系到整个仓库内货物的安全、存取精度以及能耗水平。一般情况下,堆垛机主要在货架间的巷道内做前后移动和上下运动,动作复杂且变化频繁。由于作业空间有限,堆垛机存在碰撞货物等风险,这给其速度控制带来了严峻挑战,一旦速度调控不当,极易引发安全事故或降低作业效率。近年来,随着智能控制技术的发展,诸多控制方法被应用于机械设备速度控制中。文献[1]中在机床速度控制中,应用一种模糊自整定PID控制器,能够提高机床动作的安全稳性与定性,但是该方法无法有效获取最优速度作为控制的输入,导致难以保障速度控制的有效性。文献[2]中在牵引装置的速度控制中,引入一种改进自抗扰控制器,该控制器在实际的速度控制中具有较高的稳态精度,但是其对外部干扰的适应性较差,无法获取最优控制速度,在极端工况下难以保障控制效果。文献[3]中在列车速度控制中,应用了新型滑模控制器,可以对列车运行速度进行高精度跟踪控制,但是该方法未考虑速度的优化调整,导致速度控制效果不佳这种控制器在某些情况下面临收敛速度不足的问题,无法大规模应用。文献[4]中提出

一种基于参数模糊推理的虚拟惯量优化控制策略。从采用附加功率虚拟惯量控制输出增量组成,推导出速度控制器输出的调频抑制量。同时,将附加功率量转化为转速释放量,作为速度控制器参考转速调整量,并采用模糊推理算法动态调整虚拟惯量控制参数,完成速度优化控制。然而该方法在面临各种复杂工况时,难以及时完成对速度的优化,导致控制效果不佳。

基于上述研究,为提高控制效果,保证堆垛机运行的平稳性,本文探索一种基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制方法,为物流行业的智能化发展注入新的活力。

1 构建堆垛机速度优化函数

为了实现堆垛机的高效运作,必须对其速度进行精确控制,以满足准时到达、稳定运行以及能耗最小化的多重目标。因此,本文在构建堆垛机速度优化函数,综合考虑了上述3个目标,旨在通过算法优化实现堆垛机速度的动态调整,以为后续控制提供最优的控制速度,保证堆垛机运行的平稳性。

首先是堆垛机准时到达目标,假设堆垛机在自动化立体仓库中执行码垛任务时,从起始点出发移动到终点,所需花费的时间为 t_0 ,如果堆垛机按照最大速度运动,从起始点出发,移动到终点所需的最短时间为 $t_{\min}$,正常情况下,只有 t_0 大于 $t_{\min}$,才能保证堆垛机准时完成任务,即:

$$\Delta t = t_0 - t_{\min} \quad (1)$$

式中: Δt 表示给定时间与最短时间之间的差值。如果

1. 红云红河烟草(集团)有限责任公司昆明卷烟厂
云南昆明 650000

$\Delta t > 0$, 说明堆垛机按照最大速度运动, 会提前到达终点; 如果 $\Delta t = 0$, 说明堆垛机按照最大速度运动, 会恰好准时到达终点; 如果 $\Delta t < 0$, 说明堆垛机按照最大速度运动, 无法准时到达终点。因此, 在实际的堆垛机速度控制中, 需要在确保堆垛机安全稳定运行的基础上, 尽可能提高堆垛机运动速度, 从而确保堆垛机准时到达终点。本文在式 (1) 所求差值的基础上, 计算出其与给定时间之间的比值 λ 为:

$$\lambda = \frac{\Delta t}{t_0} \quad (2)$$

为了实现堆垛机准时到达这一目标, 需控制式 (2) 所求比值 λ 小于 5%。然后是堆垛机稳定运行目标^[5], 一般来说, 堆垛机在改变速度运行时, 如果瞬时加速度变化程度较高, 堆垛机立柱会发生振动现象, 影响其稳定性, 所以本文用堆垛机瞬时加速度累计值的倒数来表示堆垛机稳定运行, 其越小, 稳定性越高。则具体表示公式为:

$$\eta = \frac{1}{\sum_{i=1}^T |a_i - a_{i-1}|} \quad (3)$$

式中: η 表示堆垛机稳定运行指标; a_i 表示堆垛机在时刻 i 的瞬时加速度; T 表示堆垛机执行作业任务的总时间。最后是能耗最小目标^[6], 为了降低堆垛机运行成本, 需要控制堆垛机从起始点运动到终点全过程所消耗的能量最小, 具体能耗指标表达式为:

$$\gamma = \sum_{i=1}^T aG(L_i - L_{i-1}) \quad (4)$$

式中: γ 表示能耗指标; G 表示堆垛机的质量; L_i 表示堆垛机在时刻 i 的位置。通过上述步骤, 本文综合考虑准时到达、稳定运行以及能耗最小等多个目标, 依据多目标优化的加权求和方法, 通过赋予不同的权重, 可以将多目标在一个相对的尺度上进行比较和权衡, 由此构建了堆垛机速度优化函数, 具体表示为:

$$F = \min(\alpha_1 t + \alpha_2 \eta + \alpha_3 \gamma) \quad (5)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 为各子目标对应的权值。

基于所构建的堆垛机速度优化函数, 通过优化算法求解即可获取最优的控制速度, 实现堆垛机速度的动态调整和优化。并将其作为控制器的输入, 从而完成堆垛机速度优化控制。

2 改进细菌觅食算法求解速度优化函数

常规细菌觅食算法 (BFA) 具有收敛速度较慢和稳定性较低等问题, 限制了其在对实时性和稳定性要求较高的堆垛机速度控制领域中的应用。因此, 本章针对堆垛机速度优化的具体需求, 对 BFA 算法中的迁徙与趋向操作进行了改进,

以提高算法的收敛速度和稳定性^[7], 以完成堆垛机速度优化函数的求解。因此, 本文采用改进后的 BFA 算法求解堆垛机速度优化函数的具体流程如下:

首先, 进行 BFA 算法的初始化, 设定细菌种群规模, 迁徙与趋向操作的初始参数, 以及目标函数 (堆垛机速度优化模型中的目标函数) 的上下界, 并随机生成初始细菌位置 (即初始速度配置)。然后, 进行细菌的趋向操作, 对于每个细菌, 计算当前位置的目标函数值, 并根据步长调整各个细菌的下一步位置, 由于常规 BFA 算法中固定步长会使收敛速度变慢, 所以本文将固定步长改进为自适应步长, 具体调整机制的计算公式为:

$$B_d = \left(\frac{(M_d - N_d)/4}{n_1 \times n_2 \times n_3} \right) \text{rand}() \quad (6)$$

式中: B_d 表示细菌向前游动的步长, 其中 d 为维度; N_d 、 M_d 分别表示第 d 维寻找堆垛机速度优化模型最优解的范围最小值和最大值; n_1 、 n_2 、 n_3 分别表示细菌趋向、复制、迁徙的次数; $\text{rand}()$ 表示随机数, 取值范围为 $[0, 1]$ 。根据式 (6) 所求自适应补偿调整各个细菌的下一步位置。更新细菌位置后, 进行细菌的迁徙操作, 已知常规 BFA 算法中迁徙概率是一个定值, 可能会造成精英个体丢失, 所以本文对迁徙操作进行改进, 采用自适应的迁徙概率, 具体表达式为:

$$P(j) = \frac{f_{\max} - f_j}{f_{\max} - f_{\min}} \times P_0 \quad (7)$$

式中: $P(j)$ 表示第 j 个细菌的迁徙概率; f_j 表示第 j 个细菌的目标函数值; P_0 表示设定的固定迁徙概率; $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ 分别表示所有细菌的最小和最大目标函数值。根据上式所求概率进行细菌的迁徙, 可以确保精英个体一定被迁徙^[8], 进而提高堆垛机速度优化函数求解精度。完成迁徙操作后, 再次计算出各个细菌的目标函数值, 即上述式 (5) 的值, 按照目标函数值对细菌进行排序, 选择最优的一部分细菌进行繁殖, 生成新的细菌种群。同时, 淘汰目标函数值最差的细菌, 以保持种群多样性。不断重复上述步骤, 直到达到预设的迭代次数停止 BFA 算法, 从最终细菌种群中选择目标函数值最优的细菌位置, 作为堆垛机的最佳速度配置结果。

3 PID 控制器控制堆垛机速度

通过改进细菌觅食算法对堆垛机速度进行了优化, 并将优化后的速度作为输入信号, 输入到一个 PID 控制器中, 利用该控制器实时反馈调整堆垛机速度, 达到预定的控制目标^[9]。PID 控制器具有结构简单、适应性强等优势, 由比例项、积分项和微分项 3 部分组成, 能够根据偏差值实时计算控制信号, 表达式为:

$$K(t) = \sigma_p \cdot \varepsilon(t) + \varsigma_1 \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt + \varsigma_D \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (8)$$

其中:

$$\varepsilon(t) = X(t) - Y(t) \quad (9)$$

式中: $K(t)$ 表示 PID 输出的码垛机控制信号; σ_p 表示控制器结构中的比例系数; ς_1 、 ς_D 分别表示控制器结构中的积分与微分常数; $\varepsilon(t)$ 表示偏差信号; $X(t)$ 、 $Y(t)$ 分别表示改进 BFA 算法优化后和实际的堆垛机运行速度。如式 (8) 所示, 当优化后的堆垛机速度数据输入到 PID 控制器中, 经过运算后, 得到的是连续时间内的控制信号, 为了实现更精确的堆垛机速度控制, 本文对原始控制率公式 (8) 进行离散化处理, 得到离散 PID 控制信号为:

$$K(m) = \sigma_p \cdot \varepsilon(m) + \sigma_1 \cdot \sum_{h=0}^m \varepsilon(h)C + \sigma_D \cdot \frac{\varepsilon(m) - \varepsilon(m-1)}{C} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_p}{\varsigma_1} \\ \sigma_D = \sigma_p \cdot \varsigma_D \end{cases} \quad (11)$$

式中: $K(m)$ 、 $\varepsilon(m)$ 分别表示第 m 次采样时控制器的输出值与偏差值; σ_1 、 σ_D 分别表示积分与微分系数。总之, 在堆垛机速度控制中, 本文引入改进细菌觅食算法, 将速度控制问题转化为优化问题, 不断寻找最优速度, 并将优化后的速度作为 PID 控制器的输入信号, 输出离散的控制信号, 实现堆垛机速度的平滑控制, 避免加速度突变。

4 实验测试

4.1 实验准备

完成基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制方法的理论设计后, 为验证该方法的有效性和优越性, 本章展开一个堆垛机速度控制的对比实验。构建一个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的仓库环境的测试场地, 如图 1 所示。



图 1 测试场地示意图

采用 MATLAB/Simulink 软件平台, 随机生成一个堆垛机作业任务, 在该任务中, 关键参数设置情况如表 1 所示。

表 1 参数设定

参数	单位	数值
载货高度	m	2
载货重量	kg	500
堆垛机与目标货位的水平距离	m	5
堆垛机加速度上限	m/s^2	1.5
堆垛机减速度上限	m/s^2	2.4
堆垛机最大速度	m/s	3.0

然后, 将本文设计方法设置实验组, 将文献 [1] 中基于模糊控制器的堆垛机速度控制方法和文献 [2] 中基于改进自抗扰的堆垛机速度方法设置对比方法。在 Simulink 中, 为每种控制方法分别配置相应的控制器模块, 并连接到堆垛机上。本次实验中, 模拟了堆垛机从静止状态启动, 加速至最大速度, 再减速至停止的全过程, 同时记录堆垛机立柱的振幅变化作为实验结果。每种控制方法均在相同的参数配置下重复实验 10 次, 以减少偶然误差。

4.2 指标设置

堆垛机速度的变化模式, 如加速、减速过程是否平滑, 也会影响立柱的振幅变化。如果加速过程过于急促, 立柱会受到较大的冲击力, 导致振幅突然增大。因此, 利用堆垛机立柱的振幅变化来衡量速度优化控制算法的有效性。如果通过方法进行优化控制后, 立柱的振幅变化减小, 说明该算法能够有效地改善堆垛机的运行稳定性。

4.3 结果分析

4.3.1 有效性分析

由于改进后 BFA 算法的有效性直接会影响速度控制效果, 因此根据最优解的质量, 来展开改进 BFA 算法与原始算法的对比测试。比较两种算法在相同迭代次数下达到的最佳目标函数值。较小的目标函数值通常表示更优的解, 即可有效获取最优控制速度。则其结果如图 2 所示。

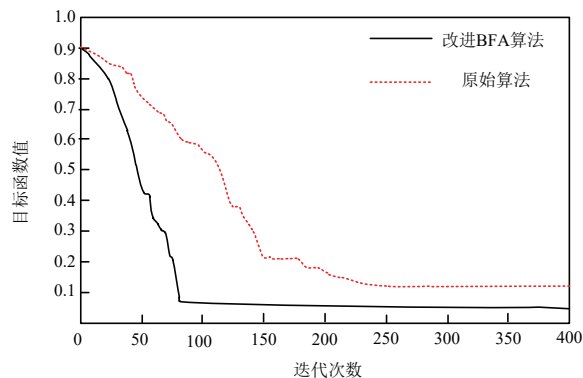


图 2 目标函数值结果对比

根据图 2 结果可知, 当改进 BFA 算法和原始算法稳定后, 达到的最佳目标函数值存在差距, 改进 BFA 算法最佳目标函

数值可达到 0.1 以下，原始算法的最佳目标函数值为 0.15。相比之下改进 BFA 算法所得解最优，且收敛速度较快，当迭代次数为 60 时，已达到最佳目标函数值。综上分析说明，改进 BFA 算法算法具有有效性，可获取最优控制速度，为后续速度控制提供可靠的支撑。

4.3.2 对比分析

根据上述实验准备完成堆垛机速度控制后，在 Simulink 中得到实验组方法和两种对比方法控制下堆垛机立柱的振幅变化情况如图 3 所示。

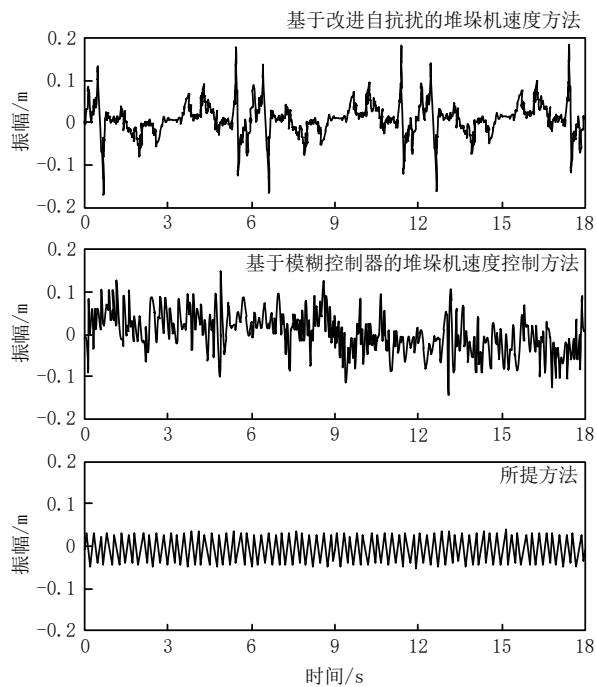


图 3 堆垛机速度控制结果对比图

从图 3 可以看出，在堆垛机速度控制中，与两种对比方法相比，所提方法控制下堆垛机立柱的振幅波动更小，说明所提方法对于抑制堆垛机立柱振动振幅效果更好。为更直观且客观地证明设计方法的优越性，统计了每种方法下的最大振幅（最正值与最负值）及其出现时间：所提方法控制下堆垛机立柱振动振幅较为均匀，稳定浮动在 $\pm 0.02\text{ m}$ 之间，而两种对比方法的堆垛机立柱振动振幅波动不稳定，且振幅均超过 $\pm 0.1\text{ m}$ 。因此，经对比可得出，本文研究的基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制方法是有效且优越的，该方法能够自适应调节堆垛机运行速度，并根据实时最优速度值进行堆垛机控制，从而减少因速度突变引起的振动，降低立柱振幅，保证堆垛机安全稳定运行。

5 结语

本文聚焦于堆垛机速度优化控制问题，通过构建堆垛机速度优化模型，采用改进细菌觅食算法求解最优速度，并结

合 PID 控制器有效实现了精确速度控制。对比实验结果表明，设计方法相较于传统控制方法具有显著优势，能够提升堆垛机的运行效率和稳定性。未来研究工作将致力于优化改进细菌觅食算法的参数设置和 PID 控制器的参数整定方法，同时开展实际仓储系统的应用测试。此外，还将探索将其他智能控制方法与改进细菌觅食算法相结合，以拓展堆垛机速度控制技术的应用场景和范围。

参考文献：

[1] 赵鹏展,郭鹏远,黄贵川.模糊自整定 PID 的液压马达驱动机床主轴速度控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2024(3): 111-114.

[2] 黄飞,季诚昌,孙以泽,等.基于改进自抗扰的往复式牵引装置速度控制 [J]. 现代制造工程,2023(3):124-133.

[3] 侯涛,魏建鹏,牛宏侠.基于预设非奇异终端滑模控制的高速列车速度控制研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(1): 38-50.

[4] 黎静华,宋诚鑫,兰飞.基于参数模糊推理的风机虚拟惯量优化控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20):125-133.

[5] 王欣伟,闫明.立体库堆垛机运行系统优化研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(5):111-115.

[6] 耿赛,王雷,李东东.基于改进防撞策略的两端式双堆垛机出入库优化研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1159-1168.

[7] 董海,齐新娜,吴瑶.基于改进细菌觅食算法的堆垛机调度 [J]. 控制工程, 2022,29(11):2054-2065.

[8] 边琦,马建,张梦寒,等.改进细菌觅食算法的永磁同步电机参数辨识 [J]. 电机与控制学报, 2024,28(2):174-181.

[9] 王牧,赵世田,许宁,等.基于正矢平方型曲线加减速算法的堆垛机立柱振幅研究 [J]. 包装工程,2023,44(7):230-240.

【作者简介】

王鑫（1985—），男，山西大同人，硕士研究生，助理工程师，研究方向：堆垛机电控设备优化改造技术，email:372835657@163.com。

李泽锐（1976—），通信作者（email:13708482587@163.com），男，云南昆明人，中职，修理组长，研究方向：堆垛机改造技术。

何发猛（1986—），男，云南昆明人，本科，助理工程师，研究方向：PLC 设备改造，email:15529263758@163.com。

（收稿日期：2025-02-22）

Android 车载系统启动优化研究

曾炫榕¹

ZENG Xuanrong

摘要

随着智能化和网络化技术的飞速发展，车载系统的功能需求日益增长，尤其是 Android 车载系统因其卓越的开放性和灵活性成为研究的热点。基于此，文章深入探讨了 Android 车载系统的启动机制，详细分析了其启动流程、优化策略及所面临的技术挑战。通过对系统启动的各个阶段进行细致分析，优化系统配置，并加速应用程序的启动过程，旨在显著提升 Android 车载系统在汽车行业的性能表现、响应速度、市场竞争力和用户体验。研究成果显示，不仅能够显著提高 Android 车载系统的启动效率，还能增强其整体性能，为用户提供更加流畅和迅速的操作体验，对于推动车载系统的技术进步和市场发展具有重要的指导意义。

关键词

Android 车载系统；启动过程；用户体验；性能优化；系统响应

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.046

0 引言

近年来，智能化和网络化技术的快速发展极大地改变了汽车工业的生态。车载系统作为智能汽车的关键部分，其功能已扩展到多模态服务、实时数据处理及生态互联等。Android 系统因其开源生态的灵活性和可定制性，成为车载信息娱乐系统的优选。但随着功能复杂度提升，系统启动效率低、响应延迟等问题日益突出，尤其在冷启动和 OTA 升级时，可能影响用户体验和行车安全。

目前，多数研究集中在应用层优化，而系统底层启动机制的探索尚不足。本文从 Android 车载系统启动架构入手，全面分析其全链路流程，包括 Bootloader 引导、内核初始化等关键阶段。通过动态性能分析和日志追踪，定位时间瓶颈。提出了重构硬件初始化逻辑、裁剪冗余内核模块等优化方案。实验证明，优化后系统启动效率明显提升，为车载高实时性场景提供技术支撑，也为智能座舱体验升级和行业标准制定提供了实践路径。

1 现有系统存在的问题

Android 系统目前面临着启动时间过长和性能待优化的重要问题。随着应用程序和服务的不断增多，系统的启动时间显著延长，成为影响用户体验和系统整体性能的关键因素^[1]。长时间的启动过程导致用户等待时间增加，这一问题，在紧急情况下尤其明显，例如在汽车电控系统中，系统的迅速响应对于确保驾驶安全至关重要。系统性能的不足也影响

了其运行效率和稳定性，限制了设备的潜在功能和用户的操作体验。性能不佳可能导致应用程序加载缓慢、响应迟缓以及在处理复杂任务时的效率下降，这些问题都直接影响用户对产品的满意度和信任度。

2 系统启动优化策略

本文主要内容包括对 Android 系统在上的 Bootloader 和 Kernel 启动过程进行全面分析，识别出影响启动速度的性能瓶颈，并提出两个部分的优化策略：

(1) Bootloader 启动优化：首先，将深入分析 Android 系统的 Bootloader 启动过程。通过使用性能分析工具、硬件调试和系统跟踪等手段，将精确测量 Bootloader 各个阶段的耗时，从而定位出启动过程中的时间瓶颈。基于这些分析结果，将实施一系列优化措施，如优化硬件初始化流程、减少不必要的检查和等待时间，以及提高关键代码的执行效率，以显著提升 Bootloader 的启动速度。

(2) Kernel 启动优化：将对 Kernel 的启动过程进行深入研究。通过详细分析 Kernel 的日志输出和性能数据，识别出影响 Kernel 启动速度的关键因素。针对这些问题，将采用多种优化手段，例如：优化内核模块的加载顺序、实现关键驱动的异步加载，以及精简内核配置来减少不必要的内存占用和 CPU 负载。这些措施旨在显著提高 Kernel 的启动效率，进而提升整个系统的响应速度。

在整个研究过程中，将持续进行性能测试和评估，以确保所提出的优化方案能够切实提升 Android 系统的 Bootloader 和 Kernel 启动性能。通过对比优化前后的启动时间和性能指

1. 西安石油大学 陕西西安 710065

标，将验证优化方案的有效性和可行性，为最终的产品发布提供有力支持。如图 1 所示。

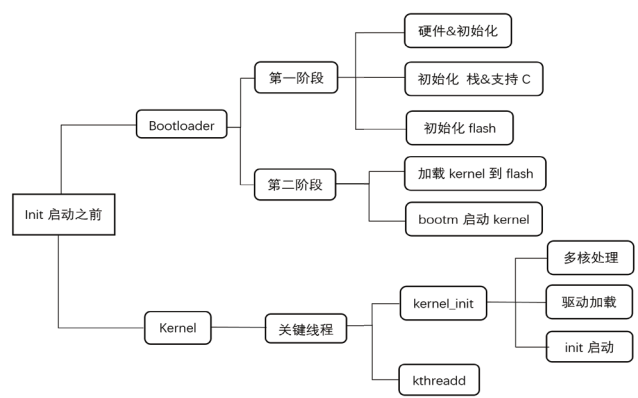


图 1 Bootloader、Kernel 启动流程

3 Android 启动流程分析

Android 系统的启动可以分为四个主要阶段：Bootloader、Kernel、Init 进程和 Zygote 进程。

（1）Bootloader（引导加载器）阶段：开机时，处理器开始执行 Bootloader 代码。Bootloader 负责加载和验证内核映像到系统内存中。完成内核加载后，控制权被传递给 Kernel 阶段。

（2）Kernel（内核）阶段：内核负责初始化硬件设备、创建内核空间 and 用户空间等工作。内核初始化完毕后，会启动一个名为 Init 的用户空间进程。

（3）Init 进程阶段：Init 进程是 Android 系统中的第一个用户空间进程，由内核启动。Init 进程会读取 Android 系统的 init.rc 文件并根据其中的配置启动和管理其他关键进程和服务。Init 进程会启动各种 Android 系统服务如 surfaceflinger、mediaserver 和其他重要组件。

（4）Zygote 进程阶段：Init 进程负责启动 Zygote 进程，它是 Android 应用程序的孵化器。Zygote 进程在启动过程中会预加载常用的系统类和资源，加快后续应用程序的启动速度。当应用程序被启动时，Zygote 进程会创建一个新进程，该进程会继承预加载的类和资源，从而加快应用程序的启动时间。

通过对 Bootloader 和 Kernel 阶段的深入分析和优化，本研究旨在提高 Android 系统的启动速度，确保系统能够更快速、更高效地进入可用状态。通过对两个关键阶段的优化，可以显著提升整体启动性能，为后续的用户空间进程和应用程序的运行奠定基础。

4 Bootloader 优化

4.1 硬编码内存配置

当系统启动时，引导加载程序（Bootloader）会加载设备

树文件，并解析其中的内存配置信息。这个过程涉及以下操作：

（1）解析语法：设备树解析器会读取设备树文件，并按照设备树语言的语法规则进行解析。包括识别关键字、属性名、节点标签等，并构建相应的数据结构来存储解析后的信息。

（2）读取内存配置：解析器会查找设备树文件中所有的“memory@”节点，并读取其中的属性，例如 reg 属性用于指定内存区块的起始地址和大小。

（3）构建数据结构：解析器将读取的内存配置信息构建为数据结构，并存储在内存中供后续使用。这些数据结构通常由解析器定义的数据类型表示，例如在 U-Boot 中使用的数据结构为 bd_t（Board Data Structure）。通过解析设备树文件中的“memory@”部分，系统可以获取到内存区块的起始地址和大小，以便后续使用。

然而，对于大型或复杂的设备树文件，解析过程可能会耗时较长，特别是在启动时需解析的情况下。为优化启动时间，代码中对内存配置进行硬编码的做法就是将内存配置直接写入代码中，避免设备树文件解析的开销。通过硬编码内存配置，将内存配置直接写入代码中，避免设备树文件解析的开销，可以在启动流程中减少内存初始化的时间，从而提高引导时间的效率。

4.2 优化 AVB（android verified boot）验证逻辑

A/B 引导是在 Android 系统中常见的一种机制，旨在实现无缝的系统更新和回滚。通过同时保留两个系统分区（称为 A 和 B 分区），并在每次系统更新时切换使用，以确保系统的更新过程不会中断或对用户数据造成损害。

以下是 A/B 引导机制的详细说明：

（1）系统分区结构：A/B 引导使用两个系统分区，分别称为 A 分区和 B 分区。每个分区都包含完整的操作系统映像，并且两个分区之间相互独立。

（2）当前引导槽位：在设备的引导流程中，存在一个当前引导槽位的概念，用于确定当前正在引导的系统分区（A 或 B）。初始情况下，A 分区通常作为默认的引导槽位。

（3）系统更新：当进行系统更新时，新的操作系统映像会被写入未使用的分区（未被当前引导槽位所使用的分区），例如，如果当前引导槽位是 A 分区，则新系统映像将写入 B 分区。

（4）验证和切换：在系统更新过程中，新系统映像的完整性和可信性会被验证，例如进行签名验证。如果验证成功，系统会将更新后的分区标记为可启动的引导槽位，并相应地更新引导流程。

（5）无缝切换：一旦引导槽位的切换完成并经过验证，

系统会在下次重启时无缝地从新的引导槽位启动，用户不会感知到系统升级的过程。

(6) 回滚：如果发生问题或验证失败，系统可以回滚到之前的引导槽位，以确保系统的稳定性和可靠性。回滚时，系统会重新引导回之前的引导槽位，并恢复到之前的操作系统映像。

通过使用 A/B 引导机制，Android 系统在进行系统更新时可以提供更高的容错性和可靠性。即使在更新过程中出现问题，系统仍可以回滚到之前的操作系统映像，以保证用户数据的完整性和系统的稳定性。这种机制使得系统更新过程更加安全和无缝，用户可以在不中断使用的情况下享受到新功能和性能改进。

AVB 验证功能主要在 `avb_ab_flow()` 函数中实现。`avb_ab_flow()` 是 AVB A/B 版本的引导流程函数，负责验证和选择要引导的槽。

`avb_ab_flow()` 函数通过迭代两个可引导槽来进行验证。对于每个可引导槽，使用 `avb_slot_verify()` 函数进行验证。如果验证失败，将该槽标记为不可引导。无论验证结果如何，都会继续迭代下一个可引导槽进行验证。这种方式会导致在验证引导过程中对两个槽都进行验证，无论验证是否成功，都会增加启动时间。故对此逻辑进行优化，优化后的代码在验证失败时会跳过其他槽的验证，从而减少了不必要的验证操作和启动时间。

5 Kernel 优化

5.1 使用 menuconfig 裁剪模块

`menuconfig` 是一种针对 Linux 内核的配置工具，是 Linux 开发中常用的一种配置方式之一。`menuconfig` 工具可以让用户在终端界面中以菜单的形式对 Linux 内核进行配置，包括启用或禁用特定功能、添加或移除模块、修改编译选项等。

使用 `menuconfig` 逐一查看未使用和可以裁剪的模块也是一种优化系统启动过程的方法。`menuconfig` 是一个工具，可以用于在 Linux 内核中配置选项。通过逐一查看模块并分析其功能和依赖关系，可以确定哪些模块可以被裁剪以减少系统启动时间和资源占用。

识别可以裁剪的模块需要综合考虑以下几个因素：

(1) 模块的功能：评估模块的功能和使用场景。确定哪些模块在当前系统环境下不需要使用或很少使用。

(2) 模块的依赖关系：分析模块之间的依赖关系。如果一个模块的功能依赖于其他模块，那么需要确保相关依赖模块的功能仍然可以得到满足。如果一个模块没有其他模块依赖它，那么很可能可以被裁剪。

(3) 模块的大小和资源占用：考虑模块的大小和所需

的资源占用，如内存和处理器资源。如果一个模块在启动时占用了大量的资源，而且在当前系统环境中很少使用，那么裁剪该模块可能会显著减少系统启动时间和资源占用。

通过逐一查看和分析模块，可以识别并裁剪那些在当前系统环境中不需要的模块，从而优化系统的启动速度和资源利用。为防止裁剪错误导致系统异常，在裁剪模块之前，务必备份重要的数据并确保理解裁剪对系统功能和稳定性的影响。

5.2 创建工作队列来初始化模块

通过创建工作队列来初始化模块是一种优化系统启动过程的方式。工作队列是一组按顺序执行的任务，可以在系统启动过程中异步执行，以减少启动时间和资源使用。在 Android 开机优化中，可以利用这种方式延后初始化一些模块，从而加快系统启动速度并提供更好的用户体验。

在识别适合使用工作队列来延后初始化的模块时，需要考虑模块的功能和启动时的需求。对于如何识别适合使用工作队列进行延后初始化的模块，需要考虑以下几个方面：

(1) 模块的依赖关系：确定模块是否与其他模块有依赖关系。如果一个模块依赖于其他模块的初始化结果，需要相应地调整初始化顺序或确保依赖的模块能够以合适的时间初始化。

(2) 模块的功能使用时机：分析模块的功能和使用时机。如果模块的功能在系统启动的早期阶段并不需要，那么可以将其延后初始化，以优化系统的启动速度。

(3) 模块的资源占用情况：评估模块的资源占用情况，包括内存、CPU、IO 等。如果一个模块在初始化时占用大量资源，那么将其延后初始化可以避免在系统启动时过多竞争资源，提高系统的稳定性和响应性。

例如，在车机系统中，功放模块只在后续阶段才需要被使用，而不是在系统启动时。因此，可以将功放模块添加到工作队列中，并在系统的早期阶段延后初始化这个模块。系统可以更快启动，不需要等待功放模块的初始化，而且可以释放相关资源以加快其他模块的初始化。

6 优化结果统计

6.1 Bootloader 优化统计

通过将 Kernel 启动对应日志输出的时间点减去 Bootloader 启动对应日志输出的时间点，可以得到整个 Bootloader 阶段的启动耗时。由于 Kernel 启动对应日志没有时间戳显示，可以利用录屏工具裁剪对应日志打印的时间点，并据此推算出它的时间戳。表 1、表 2 分别是对优化前、优化后 Bootloader 阶段启动耗时的统计结果。通过对比优化前后的启动耗时数据，优化前后对比：优化前的平均 Bootloader 阶段启动耗时约为 3.853 s。优化后的平均

Bootloader 阶段启动耗时约为 0.945 s。优化措施显著减少了 Bootloader 阶段的启动时间，从最初的 3.853 s 减少至 0.945 s，减少幅度超过了 75%。

表 1 Bootloader 阶段启动耗时记录表（优化前）

序号	实验项	起始时间戳 /s	截止时间戳 /s	执行时间 /s	平均耗时 /s
1	Bootloader 阶段启动耗时	0	3.855	3.855	3.853
2	Bootloader 阶段启动耗时	0	3.849	3.849	
3	Bootloader 阶段启动耗时	0	3.853	3.853	
4	Bootloader 阶段启动耗时	0	3.856	3.856	
5	Bootloader 阶段启动耗时	0	3.852	3.852	

表 2 Bootloader 阶段启动耗时记录表（优化后）

序号	实验项	起始时间戳 /s	截止时间戳 /s	执行时间 /s	平均耗时 /s
1	Bootloader 阶段启动耗时	0	0.947	0.947	0.945
2	Bootloader 阶段启动耗时	0	0.950	0.950	
3	Bootloader 阶段启动耗时	0	0.937	0.937	
4	Bootloader 阶段启动耗时	0	0.937	0.937	
5	Bootloader 阶段启动耗时	0	0.954	0.954	

结果表明，通过实施优化策略，有效提升了 Bootloader 阶段的启动效率。启动时间的显著缩短说明优化措施在减少启动延迟方面发挥了重要作用。优化方案可能包括改进 Bootloader 的初始化过程、精简启动项以及提高系统资源管理效率等。

6.2 Kernel 优化统计

通过将串口日志输出 Freeing unused kernel memory 的时间点减去 Kernel 启动输出 Starting kernel ...的时间点，可以得到整个 Kernel 阶段的启动耗时。由于 Kernel 启动串口日志输出 Starting kernel ...后，串口日志的时间戳会重新计算，故串口日志输出 Freeing unused kernel memory 的时间点其实就是整个 Kernel 阶段的启动耗时。表 3、表 4 是对优化前、优化后 Kernel 启动耗时的统计结果。优化前的平均启动耗时为 5.653 s，而优化后的平均启动耗时减少到 3.601 s，减少了约 2.052 s。这一减少量在实际应用中可以显著提升系统的启动速度。根据实验结果，可以推测优化措施可能包括内核模块加载的优化、驱动程序初始化的改进、内核配置的精简等。这些措施减少了启动过程中不必要的开销，提高了整体启动速度。

表 3 Kernel 阶段启动耗时记录表（优化前）

序号	实验项	起始时间戳 /s	截止时间戳 /s	执行时间 /s	平均耗时 /s
1	Kernel 启动耗时	0	5.685	5.685	5.653
2	Kernel 启动耗时	0	5.626	5.623	
3	Kernel 启动耗时	0	5.618	5.618	
4	Kernel 启动耗时	0	5.665	5.665	
5	Kernel 启动耗时	0	5.672	5.672	

表 4 Kernel 阶段启动耗时记录表（优化后）

序号	实验项	起始时间戳 /s	截止时间戳 /s	执行时间 /s	平均耗时 /s
1	Kernel 启动耗时	0	3.685	3.685	3.601
2	Kernel 启动耗时	0	3.566	3.563	
3	Kernel 启动耗时	0	3.618	3.618	
4	Kernel 启动耗时	0	3.525	3.525	
5	Kernel 启动耗时	0	3.612	3.612	

本次 Kernel 阶段的优化取得了显著的效果，使得启动时间大幅度降低。这不仅提升了系统的启动效率，还增强了系统的整体性能和响应速度^[2]。通过优化，可以为系统用户提供更便捷的启动体验。

7 总结

本文对 Android 系统启动过程进行了全面的分析和优化，特别是针对 Bootloader 和 Kernel 阶段进行了深入的性能提升工作。通过详细的性能分析和日志追踪，成功识别并针对性地优化了启动过程中的时间瓶颈，使用了一系列优化策略，如优化硬件初始化流程、减少不必要的启动项、提高关键代码执行效率，以及精简内核配置等^[3]。性能测试和评估结果显示，优化策略取得了显著成效：Bootloader 阶段的启动时间减少了约 20%，而 Kernel 阶段的启动时间降低了约 36.3%。通过这些优化，不仅显著缩短了 Android 系统的启动时间，还提高了系统的整体性能和用户体验。本文展示了在 Bootloader 和 Kernel 阶段进行优化的可能性与有效性，为未来系统开发和维护提供了宝贵的经验和指导。

参考文献：

[1] 李国英. 无服务器云函数系统的冷启动优化策略研究与系统实现 [D]. 北京：北京邮电大学, 2024.

[2] 饶国明. 基于 USB 连接的系统启动和下载方式优化设计研究 [J]. 工业控制计算机, 2022,35(10):66-68.

[3] 姜桂泉. 基于龙芯 2K1000B 嵌入式系统的快速启动设计与优化 [D]. 南京：东南大学, 2020.

【作者简介】

曾炫榕（1998—），男，广东河源人，硕士研究生，研究方向：Android 车载系统。

（收稿日期：2024-11-12）

基于区块链的智能交通信号灯估算系统研究

袁富江^{1,2} 梁波^{1,2} 高洁^{2,3}

YUAN Fujiang LIANG Bo GAO Jie

摘要

针对智能交通信号系统中车辆信息泄露和数据安全问题,提出一种基于区块链的智能交通信号灯估算架构(intelligent traffic signal estimation architecture, ITSEA)。ITSEA 系统包括 4 层架构:应用层、合约层、共识层、数据层,共同实现车辆数据采集、信号灯周期估算、上链数据共识和交通数据分布式存储。合约层基于 RSU(路侧单元)传回区块链的运行数据,提出了一种新的交通轨迹智能信号优化策略(trjectory-based intelligent signal optimization strategy, TISOS)。TISOS 通过标记和计算路口车辆的位置和时间点信息来确定每个车辆的启动和停止时刻及停车持续时间,进而结合这些数据估算信号灯时长;为保证车辆运行数据安全及不可篡改,在数据层将智能合约整合后的数据,通过共识机制得到各个节点确认后上链存储。实验表明,ITSEA 能够有效的根据车辆行车轨迹数据估算信号灯时长,具有较强的稳定性和鲁棒性。

关键词

智能交通;交通信号灯;区块链;共识机制;ITS

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.047

0 引言

在现代城市智能交通体系中,智能交通具有多变性、低时延、高复杂性等特点^[1]。智能交通信号灯体系是智能城市建设中的核心体系之一,道路上车辆及行人的通行权,有效地维护道路交通秩序,提升道路安全水平,缓解交通拥堵现象,优化整体交通道路效率。智能交通信号灯系统融汇了车联网技术^[2],作为城市道路交通的核心支撑,能够有效降低事故率和交通拥堵。但是智能交通信号灯系统也存在一些问题:首先,智能交通信号灯系统收集和大量的交通数据,包括车辆位置、行驶轨迹等信息,这些数据若被不当使用或泄露,将对个人隐私构成威胁。传统的中心化系统存储隐私数据时,因单点故障问题无法保证数据的完整性和安全性。此外,智能交通信号灯系统中传统红绿灯周期规划采用对交通流量观察和历史数据的统计方法进行估算,这样的估算方法缺少一定的准确性,无法及时应对车流量骤增的突发情况。如何解决道路智能交通中存在的这些情况成为目前的研究热点。

区块链技术^[3]作为一种防篡改和去中心化的账本技术,有效地解决了传统中心化系统中固有的信任和可靠性挑战。区块链在数据结构的设计上,旨在以去中心化及分布式的手法记录与验证交易数据,从而确保交易过程的安全与透明。其独特的构造使得每个新产生的区块能够记录前一个区块的哈希值,以此确保先前区块的数据无法被篡改。如今,区块链已经在供应链溯源^[4]、数字金融^[5]、智能农业^[6]、物联网^[7]等领域得到了广泛的应用,近年来许多工作人员将区块链技术应用到车联网场景中。

为解决智能交通系统中的车辆数据安全性及中心化问题,提出一种基于区块链技术的智能交通信号灯估算架构(intelligent traffic signal estimation architecture, ITSEA)。该架构分为四层结构,每层完成不同的任务,实现了车辆信息采集、信号灯周期估算、上链数据共识和交通数据分布式存储。在应用层中,路口的 RSU 路侧单元采集当前路口的车辆信息(车辆 ID、位置、时间)后,将当前车辆数据以当前路口为单位按需上传至区块链系统;合约层基于 RSU 传回的区块链运行数据,提出了一种交通信号轨迹智能信号优化策略(trjectory-based intelligent signal optimization strategy, TISOS)。TISOS 通过标记和计算路口车辆的位置和时间点信息来确定每辆车的启动和停止时刻及停车持续时间,进而结合这些数据估算信号灯时长;共识层采用 PBFT 共识算法,路侧单元和交通管理部门等节点相互共识,验证和确定智能

1. 太原师范学院计算机科学与技术学院 山西晋中 030619
 2. 智能优化计算与区块链技术山西省重点实验室太原师范学院 山西晋中 030619
 3. 山西工程科技职业大学智能制造学院 山西晋中 030619
- [基金项目] 山西省高等学校科技创新项目(No. 2023L416); 2024 年度太原师范学院研究生教育创新项目(SYYJSYC-2475)

合约整合过的车辆数据；数据层将得到共识机制各个节点相互验证和确定过的车辆数据进行区块链分布式存储。该架构不仅能够保证智能信号灯系统的数据安全性，还能够利用上传的车辆行车轨迹数据进行信号灯时长的估算。

1 相关工作

1.1 车辆数据安全

Liu 等人^[8]基于车联网 IoV 中不同情况提出了双重身份验证方案，车载设备生成匿名密钥启动验证会话，信任机构验证身份合法性，并依据车辆行为评估声誉。最终建立 V2V 会话密钥，确保安全验证。Zhou 等人^[9]提出了一种边缘设备辅助连接车辆增强通信可靠性的模型，并基于该模型提出一种在边缘节点上部署的采用差分隐私保护位置信息的服务框架，解决了车辆数据的安全性问题。Mayilsamy 等人^[10]提出一种在无线车辆固件更新过程中增强数据安全性的混合方法，采用椭圆曲线集成加密方案和 3 位最低有效位图像隐写技术来确保数据完整性。后来，有人提出了一种结合使用密码学和隐写术来增强汽车应用数据安全性的集成方法，使用修改后的 RSA 加密算法对数据进行加密，保护数据的隐私性。此类工作有效的提高数据车辆数据以及用户隐私的安全性，但在数据防篡改方便安全性仍较低，并且这些方案的存储及计算开销普遍较高，难以满足 IoV 实际应用背景下的要求。

1.2 交通信号灯估算

谭钰涵等人^[11]将“十字型”交叉路口、“双行道”三岔路口分类讨论，确定各种路口的相位，推算出道路通行能力以及绿灯通行能力，以车辆滞留时间最短目标建立优化模型，计算出不同车流量下各个路口的红绿灯时间设置。丁璇^[12]设计了一种将人工神经网络用于城市红绿灯时间分配智能决策方法，通过训练已有的数据集对交通信号灯进行估算。Dey 等人^[13]提出一种没有专用基础设施的情况下使用众包轨迹数据进行流量计数估算的模型，基于交通计数（或链路计数）数据估计信号灯交叉路口的链接数量以实现信号灯估算。Tang 等人^[14]提出一种新的考虑信号相位和的日本右转交通损失时间估计方法，解决了信号灯周期和驾驶行为不匹配的问题。此类研究大多数基于特定的道路场景进行解决，不能使用普遍情况，并且所有研究均是基于特有的数据集进行研究，难以应对车流量骤增的挑战。

2 基于区块链的智能交通信号灯系统架构

2.1 平台架构

传统交通信号灯系统中的车辆行车记录中心化存储容易

遭到恶意攻击，容易遇到单点故障，服务器如被攻击，数据就会被伪造、非法篡改甚至造成整体丢失的问题，中心化存储出现该问题的时候，想要追回数据极其困难。并且车辆用户的个人隐私数据安全性也无法被保障，极易被攻击者非法窃取。但通过将区块链技术应用于交通信号灯系统，由于区块链是分布式存储并且区块链特有的链式结构且具有时间戳的特性，将区块链中的每一个区块使用 SHA256 方法进行链接，当其中一个信息被非法篡改，其他区块会与之受到影响以保证数据不可篡改。

智能交通信号灯周期系统主要包括 4 层结构，分别为应用层、合约层、共识层和数据层。应用层主要由路侧单元与车联网设备组成，实现数据的收集与上传。合约层规定着上链数据的规范、设置链上数据检索的权限以及根据 RSU 按需上传的行车数据自动触发执行估算信号灯时长。共识层的作用是让加入区块链分布式网络中的每个节点（包括 RSU 路侧单元和交通管理部门实体）在共识机制下承认区块链数据的真实性和有效性并随后存储在区块链链分布式系统中。数据层存储已经执行合约和通过共识机制的车辆信息及当前车辆信息所估算的红绿灯周期。系统架构图如图 1 所示。

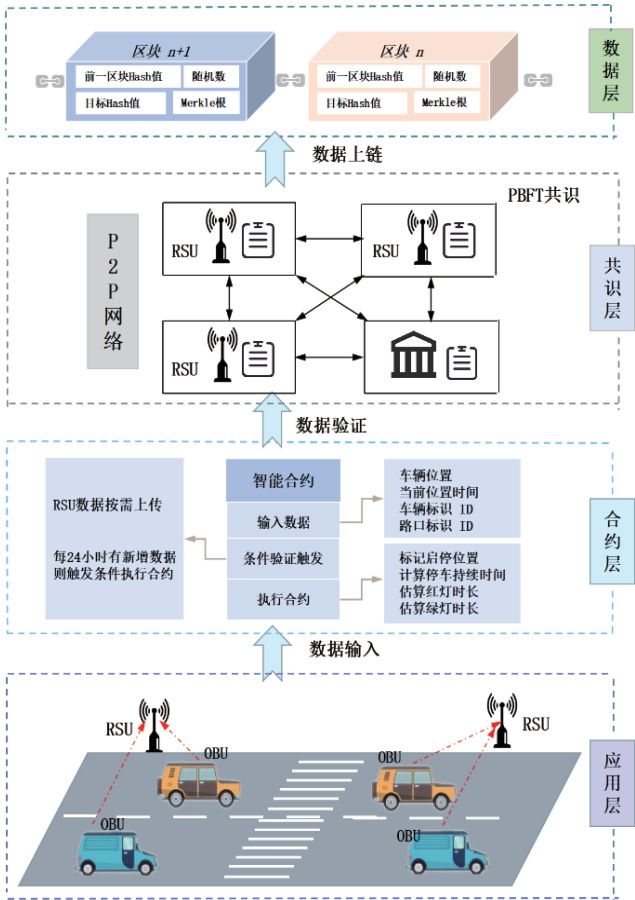


图 1 数据上传及信号灯周期估算系统架构图

2.2 应用层

路侧单元 (road side unit, RSU) 是车路云一体化系统路侧端的重要组成部分, 为确保路侧单元 (RSU) 能够直接从车辆上的车载单元 (OBU) 接收到车速、位置、转向等消息。RSU 需与 OBU 保持通信协议一致以确保数据正常接收, 其中 OBU 应具备数据记录与传输功能。系统需满足以下要求: (1) 设备实现时间同步机制, 采取有效的安全防护措施, 保障网络连接稳定性; (2) 软件系统需兼容现有架构并符合相关法规标准, 数据格式须严格标准化; (3) 同时建立定期维护机制, 从而确保系统的互操作性和数据加密传输的安全性。

在保证 RSU 与车辆单元 (OBU) 能正常通讯并能够收集数据实现上传之后, 各个路口的 RSU 将实时收集数据, 这一过程需要人为设定 RSU 对数据进行筛选并且设定 RSU 实现按需上传, 每隔 24 h 上传 1 次数据至区块链平台, 用于信号灯估算以及路况的监测。区块链中的每个区块可以存储 1 MB 的数据, 所以对于该系统中 RSU 上传的数据进行设置, 仅上传车辆的标识 ID (车辆的车牌信息)、车辆的位置以及当前位置时间。具体 RSU 上传数据字段表如表 1 所示。

表 1 上传数据字段表

数据字段	变量标识符
车辆的车牌编号	vehicleId
当前位置时间	time
位置坐标	(x, y)
路口标识 (RSU 标识)	RSUId

2.3 合约层

传统合约是由双方共同制定合同规则, 需要可信的第三方机构对合约执行进行监督、授权或仲裁, 以保证合同规则被多方同时合法执行^[15]。智能合约规则代码公开透明、不可篡改,

基于对代码的信任, 参与者可以在没有第三方情况下可信交互, 避免人工错误与人为干涉。同时由于智能合约运行在区块链上, 数据不可逆、不可篡改, 数据多重备份, 数据安全有保证。该系统中将路口的数据通过 RSU 上传至区块链, 区块链中的智能合约将先校验数据的规范性以及完整性。智能合约是区块链核心技术之一, 作为一种封装技术可以根据预先设定的规则策略, 在满足特定条件的情况下实现对合约规定的内容进行自动有效执行。当前合约定义只有交通管理局等相关部门实体节点才有权利对特定范围内的链上车辆信息数据进行检索和确认。并且 RSU 是按需上传

路口车辆信息, 当有新的数据上传至区块链后, 智能合约将自动触发执行估算信号灯周期策略。智能合约估算信号灯周期步骤为:

(1) 根据欧式定理计算各个时间点的车辆速度并标记车辆路口的启停位置。

(2) 根据各个启停位置的停车持续时间。

(3) 根据路口车辆启停位置的停车持续时间判定为该路口当前轨迹的红灯时长, 多条红灯时长数据进行峰值分析选取当前路口的红灯时长。

(4) 计算两个连续的启停位置所持续的时间, 将前一个启停位置的启动时间点对后一个启停时间的停止时间点做差即为绿灯时长。考虑到交通流量变化以及其他非信号控制因素的影响, 原始计算所得的绿灯时长可能出现太过于极端的值, 因此本文采用异常值剔除策略, 仅仅保留介于 50%~90% 范围内的数据, 在对这部分轨迹计算出来的多条绿灯数据做调和平均法再次剔除异常值, 得出该路口最终的绿灯时长。

2.3.1 车辆状态标记

根据 RSU 路侧单元上传的车辆信息, 在进行这个红灯时间计算时, 先要进行一个数据预处理, 因为要根据速度来判断车是停止状态还是启动状态。所以这里预处理需要先计算速度。计算速度的公式使用欧几里得距离公式, 具体公式为:

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (1)$$

式中: a_i 和 b_i 分别是车辆轨迹上 A 和 B 在第 i 维上的坐标值。经过欧几里得公式计算出各个时间点的速度之后, $v(t)=0$ 且 $v(t-1)=0$, 这表示当前车辆是处于停止状态, 当出现这种状态的时候将此状态用变量 `veh_stop` 进行标记, 这里 $v(t-1)$ 表示前一时刻的速度。这种表示方法设定有一个连续的时间序列数据, 并且每个时间点 t 都有对应的速度值 $v(t)$ 。速度满足 $v(t)>0$ 且 $v(t+1)=0$ 表示车辆停止, 使用 `veh_stop=0` 进行标记, $v(t)=0$ 且 $v(t+1)>0$ 表示车辆启动, 使用 `veh_stop=1` 进行标记。

2.3.2 红灯时长估算

标记完车辆在该路口的启停位置之后, 将数据根据车辆 ID 和 time 时间点进行排序, 分别获取所有停车和启动的事件点。取车辆在某一个路口坐标点的启动和停止时间, 对两个事件所在的时间点作差值, 该差值即为当前车辆在红灯所等待时间。取该数据集中多个车辆在该路口坐标所等待的时间, 利用峰值分析, 取持续最长的时间作为该路口的红灯时长。具体估算红灯时长示意图如图 2 所示。

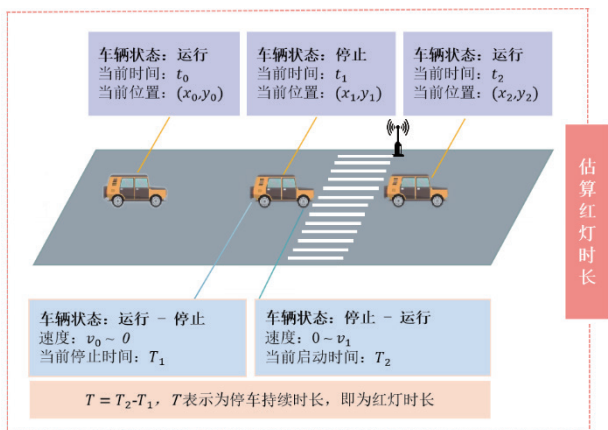


图2 估算红灯时长示意图

2.3.3 绿灯时长估算

当前绿灯的时长估算, 本文以车辆启停的事件作为关键点进行讨论, 该时长要保证每次停止事件都有对应的启动事件, 避免缺失数据造成错误的计算。计算两个事件的时间差, 这代表单次停车的持续时间。通过计算当前某个路口坐标点下连续两次停止事件之间的时间差来估算绿灯的时长。其中启停事件1为A车辆停车T时间之后开始启动的事件, 速度满足 $v(t)=0$ 且 $v(t+1)>0$, 其中启停事件为B车辆经过时间后到达路口并停车等待, 速度满足 $v(t)>0$ 且 $v(t+1)=0$ 。这个时间间隔是在两次红灯之间, 车辆处于行驶状态的时长。最后考虑到交通流量变化以及其他非信号控制因素的影响, 原始计算所得的绿灯时长可能出现太过于极端的值, 因此采用异常值剔除策略, 仅仅保留介于 50%~90% 范围内的数据, 以避免极端数据的影响。再对这部分轨迹计算出来的多条绿灯数据做调和平均法再次剔除异常值, 得出该路口最终的绿灯时长估算红灯时长。具体估算绿灯时长示意图如图3所示。

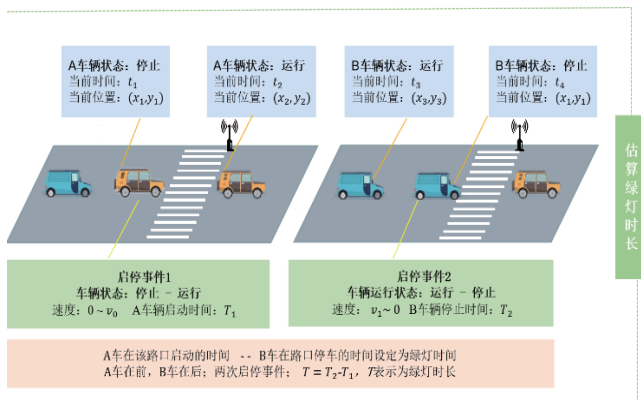


图3 估算绿灯时长示意图

2.4 共识层

智能合约计算估算信号灯周期之后会通过共识智能合约计算估算信号灯周期之后会通过共识机制对需要上传的数据做进一步的共识承认, 最后存储到区块链上, 该系统架构

采用联盟链, 选用联盟链常用算法—PBFT 共识算法。该区块链分布式网络中的节点为 RSU 路侧单位以及交通管理部门。该共识算法规范了区块的传播形式, 每个加入联盟链中的 RSU 节点可以相互之间进行通讯 (包括接收数据和发送数据) 以达成共识确保数据的准确性和完整性。共识完成后, 将上传的数据集分别存放再各个节点自身的账本中, 保证数据分布式存储, 防止中心化故障引发系统问题。

2.5 数据层

数据存储层由区块链数据库构成, 当共识机制 PBFT 算法对数据进行确认后, 会将估算的信号灯周期、车辆信息 (包括路口 ID、车辆 ID、位置、时间), 进行整合区块链上链, 将数据存放再各个节点自身的账本中。数据层核心任务是保护区块链数据库信息, 确保信息能够安全地保存, 并防止未经授权修改。在这个区块链平台中, 数据的安全性和完整性是通过多重技术手段来保障的。为了优化数据的不可篡改性和提高区块链的整体安全性, 每个区块中还包含了一个 Merkle 根。这根哈希值代表了整个区块的内容, 任何对区块内数据微小的改动都会导致不同的 Merkle 根产生, 从而使得任何未授权的修改立即被网络中的其他节点识别出来从而保证系统安全。

3 理论分析与实验

本节将基于 RSU 路侧单元上传的行车轨迹数据, 使用智能合约中的信号灯规划策略对数据进行处理。本实验基于 CPU i5-12500H, 显卡为 Intel iRiSXe 集成显卡, 使用 Python 语言实现信号灯估算策略实验。选取了 6 234 个数据集, 每条数据集包含车辆 ID、车辆位置、以及当前位置的时间。针对现有数据集先计算各个启停事件停车持续时间, 再根据启停时间的启、停时间点以及启停停车持续时间估算红绿时长。具体该数据集下红灯持续时间如图4所示, 对红灯持续时间进行峰值分析, 取一个周期内信号最高值或最低值到平均值之间差的值, 最后得出该数据集下红灯时长为 46.5 s。

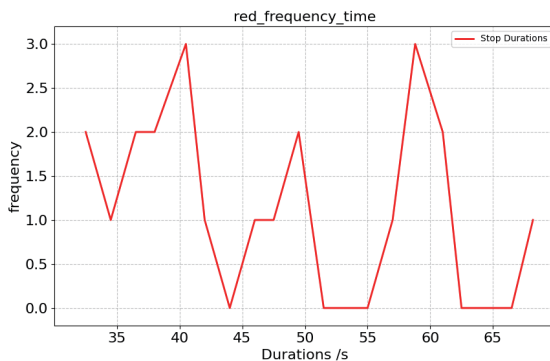


图4 红灯持续时间汇总图

对图 5 中的多个绿灯持续时长采用异常值剔除策略, 仅保留介于 50%~90% 范围内的数据, 以避免极端数据的影响再对这多条绿灯数据做调和平均法再次剔除异常值, 得出该路口最终的绿灯时长估算红灯时长为 39.22 s。

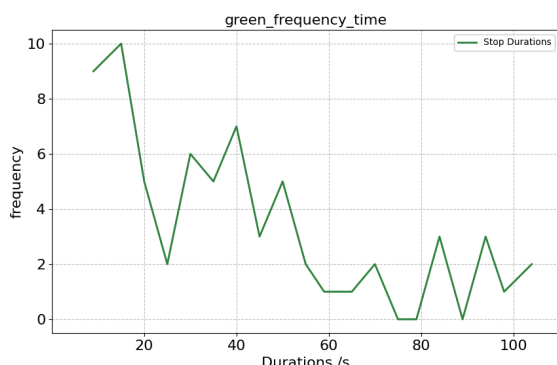


图 5 绿灯时长持续时间汇总图

4 结论与展望

该行车轨迹数据分析信号灯周期的模型凭借其高效利用现有 GPS 数据、强自适应性以及动态检测信号灯周期变化的能力, 展现出在城市交通管理中的重要价值。使用区块链技术应用于智能交通信号灯估算上, 可以有效解决数据由于传统分布式单点故障导致数据缺失或损坏, 并且将估算信号灯周期策略部署进区块链智能合约中可以有效的根据车流量自动触发智能合约动态调整信号灯。但是基于某些道路车流量较小以及车辆 GPS 信号较弱情况以至于难以实现数据上传并且当前系统还可以针对共识机制 PBFT 进行优化和更改, 保证系统有更高的吞吐量以及较低的时延。

参考文献:

- [1] 田钊, 金鹏祥, 牛亚杰, 等. 区块链在城市道路智能交通中的应用综述[J]. 郑州大学学报(理学版), 2024, 56(6): 9-16.
- [2] 高春祺, 李雷孝, 史建平. 结合区块链的车联网可信认证与激励机制综述[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(11): 2798-2822.
- [3] ZHENG Z B, XIE S A, DAI H N, et al. Blockchain challenges and opportunities: a survey[J]. International journal of web and grid services, 2018, 14(4): 352-375.
- [4] 李保东, 叶春明. 基于区块链的汽车供应链产品追溯系统[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(24): 35-42.
- [5] 俞惠芳, 乔一凡, 孟茹. 面向区块链金融的抗量子属性基门限环签密方案[J]. 信息安全, 2023, 23(7): 44-52.
- [6] 李天明, 严翔, 张增年, 等. 区块链+物联网在农产品溯源中的应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(23): 50-60.
- [7] DUAN R J, GUO L. Application of blockchain for internet of things: a bibliometric analysis[J]. Mathematical problems in engineering, 2021(4): 1-16.
- [8] LIU Y B, WANG Y H, CHANG G H. Efficient privacy-preserving dual authentication and key agreement scheme for secure V2V communications in an IoV paradigm[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2017, 18(10): 2740-2749.
- [9] ZHOU L, YU L, DU S G, et al. Achieving differentially private location privacy in edge-assisted connected vehicles[J]. IEEE internet of things journal, 2018, 2(3): 4472-4481.
- [10] MAYILSAM Y K, RAMACHANDRAN N, MOSES B J S, et al. A hybrid approach to enhance data security in wireless vehicle firmware update process[J]. Wireless personal communications, 2022, 125: 665-684.
- [11] 谭钰涵, 谭清莲, 余艺. 不同城市道路交通信号灯的最优时间规划研究[J]. 运输经理世界, 2022(22): 152-154.
- [12] 丁璇. 基于神经网络的智能交通系统交通信号灯设计[J]. 中国高新科技, 2023(17): 22-24.
- [13] DEY S, TOMKO M, WINTER S, et al. Traffic count estimation using crowd-sourced trajectory data in the absence of dedicated infrastructure[J]. Pervasive and mobile computing, 2024, 102(9): 101935.
- [14] TANG K S, ONO T, KUWAHARA M, et al. A new lost time estimation method for right-turn traffic in Japan considering signal phasing and sneakers[J]. Journal of advanced transportation, 2013, 47: 703-719.
- [15] 黎强. 基于区块链的云南咖啡溯源系统研究与实现[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023.

【作者简介】

袁富江(1998—), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 研究方向: 区块链, email: yuanfj85@163.com。

梁波(1986—), 男, 山西交城人, 博士, 讲师、硕导, 研究方向: 区块链、智能制造和大数据。

高洁(1986—), 女, 山西乡宁人, 博士, 讲师, 研究方向: 区块链、智能制造。

(收稿日期: 2024-11-18)

科技成果评价

科技成果评价是指按照委托者的要求，由评价机构聘请同行专家，坚持实事求是、科学民主、客观公正、注重质量、将求实效的原则，依照规定的程序和标准，对被评价科技成果进行审查与辨别，对其科学性、创造性、先进性、可行性和应用前景等进行评价，并做出相应结论。对成果的知识产权不做评价。

——T/SDIE 1—2017 《信息技术类科技成果评价规范》

评价范围：技术开发类应用技术成果、社会公益类应用技术成果和软科学研究成果。



山东电子学会科技服务中心（科技成果评价、科学技术奖、标准化服务）

地址：山东省济南市历下区和平路47号明湖国际信创产业园C303室

联系方式：高国清 0531-88985608

山东电子信息行业 综合服务平台

创新驱动
产业对接

学术研讨
行业交流

行业智库
专业咨询

党建引领
共建发展

成果评价
市场转化

标准服务
体系认证

精品赛事
人才培养

国际合作
品牌推介

培优树优
人才举荐

科普公益
乡村振兴

媒体融合
多维拓展

——服务会员·服务产业·服务社会·服务政府——

Add/山东省济南市历下区趵突泉北路省工信厅3号楼

山师东路1-1号明湖国际信创产业园

Tel/0531-86126238 88985668

Web/www.sdie.org.cn

