

基于改进朴素贝叶斯的光电传感器故障检测方法

鲁雅聪¹ 赵文涵¹

LU Yacong ZHAO Wenhao

摘要

光电传感器中的故障信号存在复杂的关联性和非线性关系,在对其进行处理时受到其特性影响,计算复杂度较高,容易形成较大误差,导致获取的故障检测结果不准确。为此,文章提出一种基于改进朴素贝叶斯的光电传感器故障检测方法。首先提取光电传感器故障信号特征,构建一个朴素贝叶斯分类模型,然后采用多元线性回归模型改进朴素贝叶斯分类模型,得到加权朴素贝叶斯模型,最后以此为基础,输入提取特征,输出光电传感器故障类型分类检测结果。实验结果表明,设计方法在光电传感器故障检测准确率与效率上均表现良好,可为光电传感器故障检测提供有力支持。

关键词

改进朴素贝叶斯; 光电传感器; 故障检测; 检测方法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.035

0 引言

光电传感器的工作环境复杂多变,易受温度、湿度、尘埃等因素影响,导致故障频发。一旦光电传感器出现故障,可能导致生产中断、产品质量下降甚至安全事故,致使企业造成亏损。因此,迫切需要高精度、高平稳和高可信度的光电传感器^[1]。近年来,众多学者开展了相关研究,如文献[2]中针对传感器故障检测问题,设计了一种基于向量自回归模型和小波分析法的检测方法,可以准确判别传感器故障类型,但该方法对故障信号特征处理时的计算复杂度较高,限制了其在实际应用中的检测效率;文献[3]中将长短记忆网络、贝叶斯算法结合在一起,构建一个混合检测模型,能够实现传感器故障的高精度识别,但混合检测模型的训练过程需要大量的计算资源和存储空间,故障信号特征处理困难,在实际应用中如果计算资源不足,还会造成模型训练不充分,影响检测结果的准确性;文献[4]中基于卷积神经网络和门控递归单元,设计融合网络模型,在传感器故障检测中取得良好的检测效果,但该模型面对未知的传感器故障类型时,其泛化能力受到限制,故障信号处理不佳,无法解析其之间的复杂关系,导致其应用效果不佳。光电传感器故障检测的研究也是提高设备维护管理水平、降低维护成本的重要途径。因此,本文提出基于改进朴素贝叶斯的光电传感器故障检测方法。

1 提取光电传感器故障信号特征

一般来说,光电传感器在使用过程中可能会遭遇各种故障,其中,“硬”故障一般由结构损伤引起,具有幅度大、

突变快、易被发现的特点。而软故障则是一种幅度很小、变化很慢的传感器特征,难以被检测出来。因此,本文针对光电传感器的软故障检测方法展开深入研究,为实现特征变化较小的软故障准确检测,通过引入梅尔频率倒谱系数(MFCC)进行故障特征提取^[5]。假设原始光电传感器时域故障信号为 $S(t)$,为便于后续特征提取,引入汉明窗函数进行时域信号的分帧处理公式为:

$$f(n) = (1 - \eta) - \eta \cos\left(\frac{2\pi n}{L}\right), 0 \leq n \leq L-1 \quad (1)$$

式中: $f(n)$ 表示汉明窗函数,其中 n 为采样点序号; η 表示常数,根据经验设定为0.46; L 表示汉明窗的窗口长度,也就是窗口内包含采样点总数。根据函数对原始光电传感器时域故障信号 $S(t)$ 进行加窗处理,即可实现信号分帧,具体表示为:

$$S(n) = S(t) \cdot f(n) \quad (2)$$

式中: $S(n)$ 表示原始光电传感器时域故障信号的第 n 个采样点数值。接着,利用傅里叶变换对分帧加窗后的每一帧图像开展FFT(傅里叶变换)处理,获得各帧的频谱 $R(m)$:

$$R(m) = \sum_{n=0}^{L-1} S(n) e^{-j2\pi nm/L}, 0 \leq n, m \leq L-1 \quad (3)$$

式中: j 表示虚部。基于所求光电传感器频域故障信号,可以进一步计算出功率谱 $G(m)$:

$$G(m) = \frac{1}{L} |R(m)|^2 \quad (4)$$

根据式(4)所求功率谱,利用马尔标度三角滤波器组,获得光电传感器各帧频域故障信号的乘方能谱 $N(i)$:

$$N(i) = \ln \left[\sum_{m=0}^{L-1} G(m) \cdot \delta_i(m) \right], 0 \leq i \leq I \quad (5)$$

式中: $\delta_i(m)$ 表示第 i 个 Mel 三角形滤波器的频率响应; I 表示滤波器数量。此时, 本文引入离散余弦变换对上式所求对数能谱进行处理, 可进一步获得光电传感器故障信号的 MFCC 系数 $C(n)$:

$$C(n) = \sum_{i=0}^{L-1} N(i) \cdot \cos(\pi n(i-0.5)/I), L=1, 2, \dots, J \quad (6)$$

式中: J 表示 MFCC 系数的阶数。最后, 根据所求 MFCC 系数进行光电传感器故障信号特征提取^[6]:

$$X(n) = \sum_{k=-m}^{k=m} k \cdot C(n+k) / \sqrt{\sum_{k=-m}^{k=m} k^2} \quad (7)$$

式中: $X(n)$ 表示 Mel 特征系数; k 表示索引。因此, 本文将 MFCC 提取出的 Mel 特征系数作为光电传感器故障信号特征, 以此为基础, 开展故障的分类检测。

2 基于改进朴素贝叶斯的光电传感器故障检测

光电传感器故障信号特征通常表现为输出信号的异常变化, 这些变化可能涉及信号的强度、频率、相位、波形等方面。故障信号特征的提取有助于识别传感器故障的类型和位置, 为后续的故障检测和诊断提供重要依据。接下来, 以此为基础, 开展光电传感器故障检测设计, 具体如下:

2.1 构建朴素贝叶斯分类模型

将上文提取的特征引入朴素贝叶斯算法中, 从而建立识别的故障诊断分类模型^[7]。已知给定的光电传感器故障信号特征样本集为 $X = \{X(1), X(2), \dots, X(n)\}$, 该样本集相对于故障类型 Z_i 的先验概率为 $P(X|Z_i)$ 。由于在朴素贝叶斯分类模型中, 光电传感器故障信号特征样本相互独立, 所以先验概率 $P(X|Z_i)$ 可分解为:

$$P(X|Z_i) = P(X(1)|Z_i)P(X(2)|Z_i) \cdots P(X(n)|Z_i) \quad (8)$$

确定先验概率后, 根据贝叶斯定理, 本文构建朴素贝叶斯分类检测模型^[8]用公式表示为:

$$P(Z_i|X) = \frac{P(X|Z_i)P(Z_i)}{P(X)} \quad (9)$$

式中: $P(Z_i|X)$ 表示光电传感器故障信号特征样本集 X 属于故障类型 Z_i 的后验概率; $P(Z_i)$ 表示光电传感器故障类型 Z_i 的先验概率; $P(X)$ 表示故障信号样本 X 的边缘概率。由于 $P(X)$ 对于光电传感器所有故障类型均相同, 所以在本文构建的朴素贝叶斯分类检测模型中, 只需比较 $P(X|Z_i)$ 和 $P(Z_i)$ 的大小, 即可确定光电传感器故障信号特征样本所属的故障类型。对于所有可能的故障类型 Z_i , 比较其乘积 $P(X|Z_i)P(Z_i)$ 的大小, 根据比较结果, 选择乘积最大的类别作为光电传感器故障信号特征样本 X 的最终所属故障类型。

2.2 改进朴素贝叶斯模型检测故障类型^[9]

为克服朴素贝叶斯分类模型的局限性, 本文引入多元线性回归模型来对朴素贝叶斯分类模型进行改进^[10]。本次将朴素贝叶斯分类模型输入样本的每个属性视为自变量, 将目标故障类型视为因变量, 利用多元线性回归模型来分析每个属性之间的相关性, 具体表示为:

$$Z = \lambda_0 + \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \cdots + \lambda_n x_n + \varepsilon \quad (10)$$

式中: $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 表示回归系数; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示光电传感器故障信号特征样本的属性向量; ε 表示随机误差项。如式(10)所示, 通过对每个光电传感器故障信号特征样本的属性向量进行回归分析, 即可量化属性间的相关性, 进而为各个故障特征样本分配一个权值系数。在该多元线性回归模型中, 每个自变量的回归系数即为故障信号特征样本的权值系数。得到权值系数后, 本文构建的加权朴素贝叶斯分类检测模型表达式为:

$$P'(Z_i|X) = \frac{P(Z_i) \prod_{i=1}^n P(X(i)|Z_i)^{\lambda_i}}{P(X)} \quad (11)$$

式中: $P'(Z_i|X)$ 表示在改进朴素贝叶斯模型中, 光电传感器故障信号特征样本集 X 属于故障类型 Z_i 的后验概率; λ_i 表示第 i 个光电传感器故障信号特征样本 $X(i)$ 的权值。在实际检测中, 将提取的光电传感器故障信号特征样本输入到上式所示的加权朴素贝叶斯模型中, 运行模型即可得到并输出光电传感器故障类型的分类检测结果。

3 实验分析

3.1 实验设置

完成基于改进朴素贝叶斯的光电传感器故障检测方法的理论设计后, 进行设计方法的实验验证。首先, 搭建光电传感器故障检测的数字与半物理仿真实验平台。通过仿真系统对实物光电传感器进行常见故障的一一注入, 模拟 4 种不同类型的光电传感器故障, 并在传感器故障运行过程中, 收集故障信号作为实验数据。图 1 为监控系统显示器上显示的各类光电传感器故障信号图。

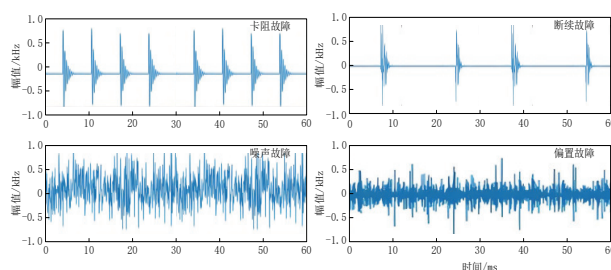


图 1 光电传感器模拟故障信号

基于图 1 所示的偏置故障、噪声故障、断续故障、卡阻故障下的实验信号数据, 展开本次光电传感器故障检测实验。

3.2 特征提取结果分析

在本次光电传感器故障检测实验过程中,首先,采用设计方法进行图1中4种类型下传感器故障信号的特征提取,所得Mel特征系数图如图2所示。

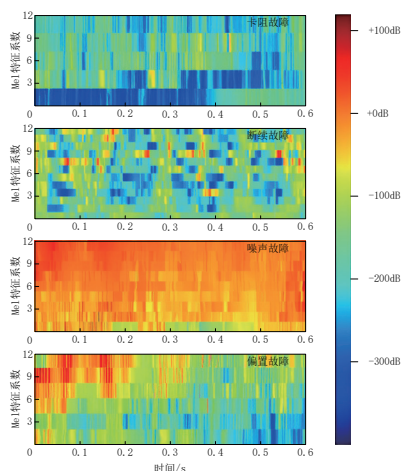


图2 光电传感器故障特征提取结果

从图2中可以看出,本文设计方法能够有效提取出不同类型的光电传感器故障信号特征。具体而言,由于偏置故障会导致光电传感器输出信号出现偏移,在Mel特征系数上,表现出各频次成分存在明显差异;由于噪声故障会导致传感器输出信号中包含大量的高频噪声成分,在Mel特征系数上表现出高频成分显著增加;由于断续故障导致传感器输出信号出现间断或不稳定的现象,在Mel特征系数上表现出时域上的不稳定性;由于卡阻故障导致传感器输出信号受到阻碍或延迟,在Mel特征系数上,表现出时域上的延迟特性。

3.3 故障检测结果对比

为验证基于改进朴素贝叶斯的光电传感器故障检测方法的检测精度,将该方法设置为实验组,将基于多模型的光电传感器故障检测方法和基于CNN-GRU的光电传感器故障检测方法设置为对照组,应用3种方法进行光电传感器各类型故障信号样本的分类检测,统计并整理检测结果如图3所示。

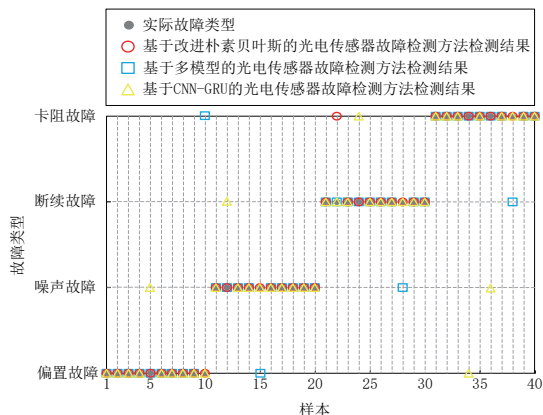


图3 光电传感器故障检测结果

从图3中可以看出,在4种不同类型的光电传感器故障检测中,实验组方法表现出最佳的检测精度。具体来说,实验组方法下光电传感器故障检测的平均准确率达97.5%,较对照组中两种方法分别提升了10%、7.5%。这主要因为本文应用多元线性回归模型对朴素贝叶斯进行了改进,从而提高其对不同故障特征的识别能力。因此,本文设计的基于改进朴素贝叶斯的光电传感器故障检测方法是有效且正确的,实际应用中能够取得良好的检测效果。

3.4 故障检测效率对比

为进一步验证基于改进朴素贝叶斯的光电传感器故障检测方法的检测效率,分别统计3种方法在迭代过程中的适应度变化值,绘制出如图4所示的适应度曲线。

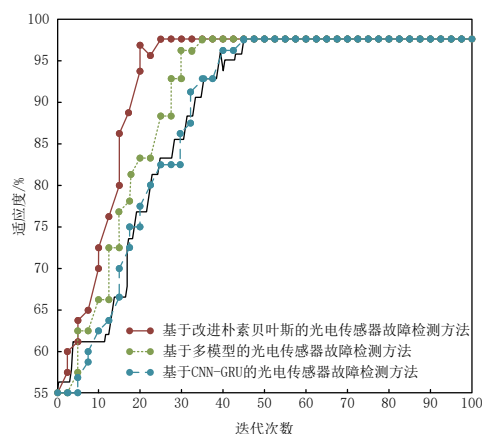


图4 故障检测方法的适应度曲线

从图4中可以看出,实验组方法在光电传感器故障检测过程中,经过大约25次迭代后达到了最佳适应度98.1%,较对照组中两种方法分别缩短了10次、15次,说明经过多元线性回归模型改进后的朴素贝叶斯分类模型具有较高的收敛速度,实际应用中可以显著提升光电传感器故障检测效率。总之,本次实验从故障检测精度与效率两方面验证了本文设计的基于改进朴素贝叶斯的光电传感器故障检测方法的可行性和优异性。

4 结语

本文针对光电传感器故障检测问题,提出了一种基于改进朴素贝叶斯算法的检测方法。文中通过多元线性回归模型对朴素贝叶斯分类模型进行改进,有效提升了模型在处理高维、非线性光电传感器数据时的准确性和鲁棒性。最后实验结果证明,应用所提方法可提升光电传感器故障检测精度,且其适应度较好,在大约25次迭代后达到了最佳适应度,为98.1%。展望未来,本研究将继续深化对朴素贝叶斯算法及其改进方法的研究,探索与其他机器学习算法的融合策略,以进一步提高故障检测的准确性和效率。

基于低频近似的光滑相位恢复算法研究

刘小雅¹

LIU Xiaoya

摘要

由于自然图像的大部分信息集中在低空间频段，而相位恢复算法中的损失函数通常为非凸且不光滑，尤其是绝对值项的不光滑特性会恶化 AF 算法的性能。为此，文章提出了一种基于低频系数近似的光滑共轭振幅流（FSCG）算法。该算法通过设计光滑的损失函数，避免了当 $a_i^H z$ 接近零时梯度突变的负面影响，并且不依赖于传统的截断和重加权过程，从而简化了实现过程并提高了性能。大量数值试验证明，FSCG 算法在一维情况下的收敛速度优于现有方法，并且在二维图像的振幅与相位重构中也表现出良好的效果。

关键词

信号恢复；相位恢复；光滑梯度；低频近似

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.036

0 引言

在信息技术的发展过程中，相位恢复（phase retrieval, PR）是信号处理中的一种重要技术，其本质是解决逆问题，通过从部分缺失、模糊或无法直接测量的数据中恢复完整的信号信息。在实际应用中，信号往往在采集、传输或存

储过程中受到噪声干扰、数据丢失或测量限制，这些问题使部分关键信息（尤其是相位信息）无法直接获取或测量。相位恢复技术通过一系列优化算法和数学建模，从可获得的强度或振幅数据中推断出丢失的相位信息，从而重建信号的完整形式。

PR 也广泛应用于压缩感知、信号去噪、数据插值等技术密切相关，为从不完整的数据中恢复出精确的信号信息提

1. 西安石油大学理学院 陕西西安 710065

参考文献：

- [1] 许水清, 陶松兵, 柴毅, 等. 基于瞬时幅值的光伏系统电流传感器微小故障检测及估计 [J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 583-592.
- [2] 陈美霞, 梁师嵩, 胡佳乔. 基于向量自回归模型和小波分析法的列车充电机电流传感器故障检测方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 152-155.
- [3] 赵万里, 郭迎清, 徐柯杰, 等. 基于多模型的航空发动机传感器混合故障诊断方法 [J]. 推进技术, 2023, 44(3): 229-237.
- [4] 李冬辉, 赵墨刊, 高龙. 基于 CNN-GRU 的冷水机组传感器偏差故障诊断方法 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49(2): 74-82.
- [5] 熊伟, 苟斌, 张坤, 等. 基于数据驱动的牵引逆变器电压传感器间歇性故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4446-4459.
- [6] 王凌燕, 焦冬秀. 基于椭圆计算的集员滤波传感器故障检测方法 [J]. 机械设计与制造, 2024(10): 12-19.

- [7] 郁明, 李旺林, 蓝盾. 基于优化自适应阈值的非线性机电系统传感器故障检测和主动容错控制 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 26-37.
- [8] 杨贺雅, 邢纹硕, 陈聪, 等. 基于随机森林二分类器的模块化多电平换流器子模块开路故障检测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3916-3928.
- [9] 辛梓铭, 王芳. 基于改进朴素贝叶斯算法的文本分类研究 [J]. 燕山大学学报, 2023, 47(1): 82-88.
- [10] 庄小亮, 李乾坤, 刘紫罡, 等. 基于改进 MFCC-OCSVM 和贝叶斯优化 BiGRU 的 GIS 异常工况声纹识别算法 [J]. 南方电网技术, 2025, 19(1): 30-40.

【作者简介】

鲁雅聪（1997—），女，河南郑州人，硕士，助教，研究方向：光电器件。

赵文涵（1997—），女，河南郑州人，硕士，助教，研究方向：光子学与光电子技术。

(收稿日期：2025-02-11)