

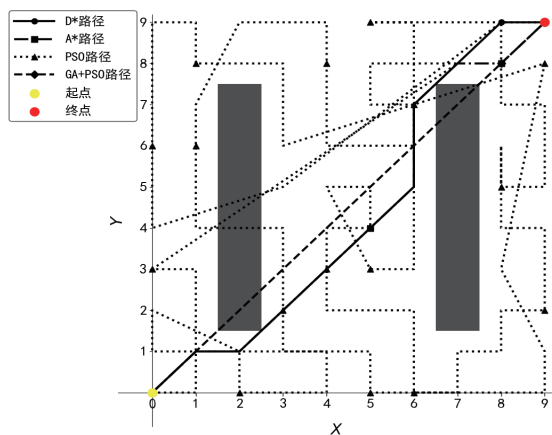


图5 算法路径规划对比图

根据表1和图5的数据可知，在静态环境中，D*算法和A*算法需要经过11步的时间就可以准确地找到最短路径（ $13.9\times 50\text{ cm}$ ）。而粒子群优化（PSO）算法及其与遗传算法的结合（GA+PSO）用时分别为87步和6步，规划的路径分别达到了 $137.9\times 50\text{ cm}$ 和 $12.7\times 50\text{ cm}$ 。

实验表明：在静态环境中，可以优先使用D*与A*算法，它们都可以较快地规划出最短路径。而PSO算法未能快速完成，而经过改进的算法GA+PSO算法可以快速完成，并寻找出最短路径。实验过程中也进行了多次算法优化，但结果并非完美。由于仿真的路径具有不确定性，所以暂时无法用于真实的四旋翼飞行器中。

实验通过飞行记录2D激光雷达、2个单目摄像头和2D激光雷达数据对比。记录原点(0, 0, 150)时，激光打点距离下面正方形中心点；记录AC1(0, 35, 140)，BD2(30, 15, 100)，CG1(40, 15, 100)，DL1(70, 35, 140)，四点激光打点距离圆形二维码的中心点距离；记录终点(70, 50, 150)时，激光打点距离填充圆形的中心点距离。因为巡航点数量比较多，选取具有代表性的巡航点，为了测试过程中存在单次误差，这边每个巡航点测试6次，然后取平均值，单位为m，结果如表2所示。

表2 巡航点记录对比表

巡航点	单位: m	
	2D LiDAR	ours
原点 (0, 0, 150)	0.082	0.083
AC1(0, 35, 140)	0.072	0.071
BD2(30, 15, 100)	0.121	0.082
CG1(40, 15, 100)	1.250	0.081
DL1(70, 35, 140)	1.340	0.086
终点 (70, 50, 150)	2.130	0.082

实验证明，采用单目摄像头结合2D激光雷达，误差基本控制在0.1 m以内，符合题目要求的0.25 m以内。然而，

在测试A、B、C、D面及降落点时，仅使用2D激光雷达的误差较大，未能达标。原因是2D激光建图后，机身旋转会导致地图同步旋转，进而造成建图不准确。这一发现验证了2D激光雷达在特定应用场景下的局限性。

6 结语

对比四旋翼飞行器在4算法下的自动规划路径，实验表明在静态场景下，D*与A*算法能快速锁定最短路径。然而，PSO及其与GA的结合算法，由于算法特性和大规模地图建模的复杂性，寻优效果不佳，难以找到最短路径，且容易陷入局部最优。

实验中解决在无3D激光雷达条件下利用2个单目摄像头与2D激光雷达下，SLAM建图在立体建图时飞机旋转导致的地图转变与精度定位问题。系统配备了两个单目摄像头（前后各一）与2D激光雷达，确保飞行器在飞行过程中无需旋转。实验验证显示，该设计使飞行器能够精确遍历各个巡航点，显著提升飞行准确性与稳定性。

参考文献：

[1] 乔道迹, 张艳兵. 多障碍环境下巡检机器人路径规划优化研究[J]. 现代电子技术, 2025,48(1):130-134.

[2] 曾宪阳, 张加旺. 改进A*算法融合DWA机器人路径规划研究[J]. 电子测量技术, 2025,48(6):20-27.

[3] 吴鹏, 叶宝林, 吴维敏, 等. 基于改进混沌粒子群算法的交通信号控制[J]. 计量学报, 2024,45(12):1876-1884.

[4] 王慧. 结合遗传算法的粒子群优化模型及其应用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2008.

[5] 任泉, 王思宇, 张慧, 等. 基于2D激光SLAM的室内移动机器人定位与建图的设计及实现[J]. 信息技术与信息化, 2024(11): 182-185.

[6] 王芷馨. 基于改进粒子群算法的模块化系统辨识[D]. 青岛: 青岛大学, 2021.

[7] 刘能现, 俞建家. 基于GA与PSO并行的模糊聚类算法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009,37(3):336-339.

[8] 蒋睿. 基于改进混合粒子群算法无人机室内路径规划研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.

[9] 胥鑫磊, 李世豪, 董丁铭, 等. 基于STM32F407的植保飞行器设计研究[J]. 科技资讯, 2024,22(11):134-137.

[10] 武冬雨. 基于多传感器融合的四旋翼无人机室内自主飞行技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.

【作者简介】

刘顺财(1986—), 男, 福建漳州人, 硕士, 副教授, 研究方向: 嵌入式AI。

(收稿日期: 2025-02-23 修回日期: 2025-07-01)

基于自适应 CNN 算法的配电通信网节点优化部署方法

袁平亮¹ 包正睿¹ 王海¹
YUAN Pingliang BAO Zhengrui WANG Hai

摘要

鉴于现行配电通信网节点优化部署方法在实际应用中存在诸多不足,如中继节点与汇聚节点间距离过长,影响配电通信的时效性,以及通信能耗较高,增加配电通信网的运行成本,未能达到预期的部署效果。文章提出了一种基于自适应卷积神经网络(CNN)算法的配电通信网节点优化部署方法。首先,根据配电通信网的结构特性,构建了配电通信网的全联通模型,以描述其联通性能;其次,结合通信网全联通模型,构建了通信网节点部署的目标函数,并利用自适应 CNN 算法对目标函数进行自适应求解,筛选出符合目标的部署方案,从而实现基于自适应 CNN 算法的配电通信网节点优化部署。实验结果表明,所提方法能够有效缩短配电通信网中继节点与汇聚节点之间的距离,降低通信能耗,实现配电通信网的快速、节能通信。与传统方法相比,该方法具有更高的自动化程度和精确度,减少了人工干预,提升了配电通信网的稳定性和可靠性。通过自适应 CNN 算法的应用,该方法能够灵活适应不同规模的配电通信网,具有较强的适应性和广泛的应用范围。此外,该方法还兼顾了配电通信网的实时性和节能性,为配电通信网的优化运行提供了新的思路和技术支持。

关键词

自适应 CNN 算法; 通信网络; 部署; 全联通模型; 目标函数

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.07.015

0 引言

配电通信网在现代电力系统中扮演着至关重要的角色,它被形象地比喻为整个电力系统的“神经网络”。主要职责包括信息的传递、监控控制以及故障报警等,对于智能电网的构建和运行管理来说,是不可或缺的关键基础设施^[1]。在配电通信网中,节点是网络的重要组成部分,不仅负责数据的转发和处理,而且还是连接不同区域、不同层级电力设备的桥梁。节点的优化部署对于提升网络的通信效率、降低传输延迟具有显著作用,同时也能增强网络的稳定性和可靠性,为整个系统的可靠运行提供坚实的基础保障。

近年来,随着新兴技术的快速发展,配电通信网正逐步向智能化、自动化方向转型。这一转型对配电通信网的节点部署提出了更高的要求。如何在复杂的网络环境中,合理规划和优化节点的位置、数量、功能,以最大化网络的整体性能,成为当前研究的热点和难点问题。研究者们正在探索多种策略和方法,以期找到最佳的节点部署方案,从而确保配电通信网能够高效、稳定地运行,满足未来电

力系统的需求。

文献[2]提出了在能量受限约束下的部署方法,深入分析了节点的动态特性,计算了网络节点网格密度,并利用 K-均值聚类及粒子群算法找出了最优节点位置,实现了在能量约束条件下的动态协同部署。文献[3]提出了基于复杂图论的部署方法,构建了网络节点部署模型,通过获取极大全连通子图来确定初始中心点,然后利用优化算法求解得到节点的最佳部署位置,以实现节点的高效部署。然而,尽管这些方法取得了一定的成果,但配电通信网节点部署仍面临许多挑战和不足。为此,本文提出了一种基于自适应卷积神经网络(CNN)算法的配电通信网节点优化部署方法,旨在进一步提升节点部署的智能化和自动化水平,以应对日益增长的网络性能需求。

1 建立配电通信网全联通模型

由于配电通信任务的特殊性质以及配电通信环境的复杂多变,为了确保数据传输的稳定性、可靠性和高效性,同时有效解决两个远程节点间高功率直接传输所带来的能量消耗问题,通讯节点之间采取了多跳通信模式。具体来说,通过构建一个由多个通讯终端组成的无线多跳自组网络,这些终端能够相互之间进行信息的交换和共享,从而实现了一个高

1. 国网甘肃省电力公司信息通信公司 甘肃兰州 730050

效、稳定的配电通信网络。配电通信网络的结构在图 1 中得到了详细地展示。

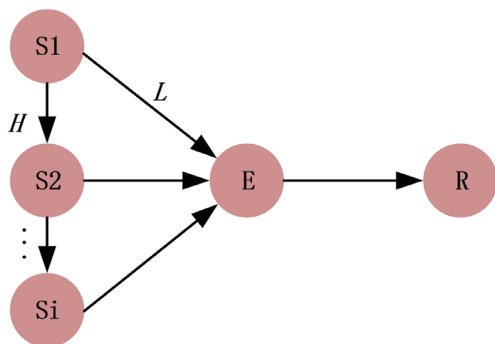


图 1 配电通信网络结构

如图 1 所示, S 表示配电通信设备, 各自作为通信网络的一个节点; E 表示信息中继节点, 负责在配电通信设备之间转发信息; R 表示信息汇聚节点, 也就是指挥中心, 负责接收和处理所有通信设备传输的数据; H 表示通信设备之间的通信距离; L 表示节点到信息中继节点的距离。在工作期间, 各通信装置对所分配的范围内的数据进行收集。将所收集到的资料传递至离其最近的、目前处于闲置状态的结点。这一过程不断重复, 直至到达最接近信息中继节点的位置, 并由它向中继节点发送消息^[4]。最后, 由中继节点将各节点收集到的数据实时反馈给信息中心。假设 i, j 为配电通信网中任意两台通信设备, 其之间的距离用公式表示为:

$$H_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

式中: x_i 、 x_j 分别表示两台配电通信设备在直角坐标系下的横坐标; y_i 、 y_j 分别表示两台配电通信设备在直角坐标系下的纵坐标。每个通信节点都有一个感知范围半径为 r , 则中继节点的感知范围半径为 $2r$, 如果两台配电通信设备在中继节点的感知范围之内, 那么它们之间就建立连接, 其用公式表示为:

$$H_{ij} \leq 2r \quad (2)$$

在通讯网络领域,如果每一个网络节点都能够与其他所有节点,以及信息中继节点和汇聚节点之间建立直接的连接,那么这样的网络结构被称为完全联通网络^[5]。在这样一个完全联通的网络环境中,所有的配电网通讯装置都能够不断地与网络中的各个节点进行信息的交换和数据的传输,以此来实现通讯的目标。关于全联通问题的探讨,可以这样来描述:在特定的感知范围半径 r 内,任意两台配电通信设备节点之间的距离都不超过 r ,且所有节点都与信息中继节点和汇聚节点相连通,因此建立配电通信网全联通模型可用

公式表示为：

$$B = \min_r |r| \text{ s.t. } \forall S, E \in R, H_{ij} \leq 2r \quad (3)$$

式中： B 表示配电通信网全联通模型。

2 设定通信网节点优化部署目标函数

针对配电通信设备在广阔作业时面临的远距离信息传输挑战,提出采用中继节点与汇聚节点的多级、分层式节点部署策略,联合上文建立的配电通信网全联通模型,构建通信网节点部署目标函数,首先设定以下基本假设:

假设 1: 信息中继节点的最大信息转发能力始终能够满足其覆盖区域内所有配电通信设备的信息传输需求, 这一需求由区域内所有编队发送的总信息量决定, 即中继节点不会因为信息量过大而超负荷。这一假设确保了在任何情况下, 中继节点都能够有效地处理和转发信息, 从而保障了通信网络的稳定性和可靠性。

假设 2: 每个信息中继节点仅负责其特定配电范围内的信息转发任务, 确保信息的局部化处理, 减少传输复杂性和干扰。通过这种方式, 可以有效地降低网络中的数据拥堵, 提高信息传输的效率, 并且有助于减少潜在的通信错误和数据丢失。

在此基础上, 建立最小化每个中继节点与其所覆盖范围内的编队、汇聚节点与中继节点之间的距离与信息量之和的最优模型^[6]。这一目标函数可以表示为:

$$Y = \min D = \sum_{i \in N} \sum_{j \in O} BZ_{ij} \quad (4)$$

式中: Y 表示配电通信网节点优化部署目标函数; D 表示信息量和距离乘积之和最小值; N 表示所有配电通信设备编队的集合; Q 表示距离通信设备编队 i 小于距离上限的中继节点集合; Z_{ij} 表示 0~1 变量, 即中继节点是否需要向汇聚节点发送信息。

3 基于自适应 CNN 算法的最优部署方案筛选

在前述研究的基础上,运用自适应卷积神经网络(CNN)算法对配电网节点的优化部署进行深入研究。通过设定目标函数,旨在筛选出最优解,以实现配电网节点的优化配置。在自适应CNN的训练过程中,算法能够根据数据的内在特性以及具体任务的需求,自动地调整配电通信网络的结构和参数设置。这一过程的目的是达到对配电通信网络节点进行有效优化的目标。自适应CNN的核心组成部分包括卷积层、激活层、池化层以及softmax分类器。在这一框架下,将目标函数的潜在解作为自适应CNN的输入向量,通过卷积运算来提取输入数据中的关键特征。

具体而言,卷积运算采用一个卷积核对输入数据的每一个点进行遍历,利用权值共享的原理来显著降低网络训练所需的时间^[7]。在卷积操作过程中,输入特征与卷积核的对应区域会执行逐点相乘和求和的操作,并且会加上一个偏置项,最终形成一个输出特征值。这一过程可以用公式表示为:

$$c = W_n \otimes f_y + b_n \quad (5)$$

式中: c 表示卷积层输出特征,即输入可能接 f_y 下配电通信网特征; W_n 表示卷积核的权重; b_n 表示卷积层偏置项; $\otimes$ 表示卷积运算。

使用激活函数对卷积后的特征进行非线性变换,同时将变换后的网络特征输入到池化层,通过最大池化操作降低通信配电网特征维度,其用公式表示为:

$$v = P[\sigma c] \quad (6)$$

式中: v 表示池化层输出结果; P 表示最大池化操作; σ 表示激活函数^[8]。

将池化层输出的配电通信网特征向量输入到全连接层,将卷积层和池化层输出的网络特征展开成一维特征向量,并通过全连接的方式输出为多分类的向量,即符合配电通信网目标的最优节点部署方案。在全连接层中,每个神经元都与前一层的所有神经元相连接。其可以表示为:

$$U = \sigma(\varpi v + b) \quad (7)$$

式中: U 表示最优配电通信网节点部署方案; ϖ 表示全连接层的权重系数; b 表示全连接层的偏置项。

通过以上对目标函数的自适应迭代运算,得到最符合目标的通信配电网节点部署方案,以此实现基于自适应CNN算法的配电通信网节点优化部署。

4 实验论证

4.1 实验环境

为了验证本文所提出的自适应卷积神经网络(CNN)算法在配电通信网节点优化部署方法中的性能表现,选取了一个具体的配电网作为实验对象。在这个配电网中,需要部署12台监测设备,而通信网络的覆盖范围被设定为100 m。运用本文所设计的方法,对这个通信配电网的节点进行了部署优化。在实现本文提出的自适应CNN算法时,选择了PyTorch框架进行算法的编程和实现。所有相关实验均在统一的硬件环境下执行的,具体来说,即使用了NVIDIA Tesla T4处理器。此外,实验环境还配备了CUDA 10.2版本,这为实验提供了必要的计算能力和资源支持,从而确保了实验结果的准确性和可靠性。值得注意的是,为保证实验条件的

一致性,所有实验都严格遵循相同的硬件和软件环境进行。这样的实验设置能够对实验结果进行更为精确的比较和分析,从而更有效地评估自适应CNN算法在配电通信网节点优化部署中的实际应用效果。

4.2 实验流程及评价指标

实验中利用公式(1)~(3)构建该配电通信网全联通模型,通过公式(4)建立该配电通信网节点优化部署目标函数。收集该配电通信网多种情况下运行数据作为数据样本,利用自适应CNN算法对目标函数(4)求解,自适应CNN算法参数设置如表1所示。

表1 自适应CNN算法参数表

序号	参数	设定值
(1)	卷积核数量	20
(2)	卷积核权重	0.152
(3)	卷积层偏置项	0.001
(4)	全连接层权重	0.261
(5)	全连接层偏置项	0.001

通过自适应CNN算法计算,得到配电通信网节点优化部署方案,具体如图2所示。

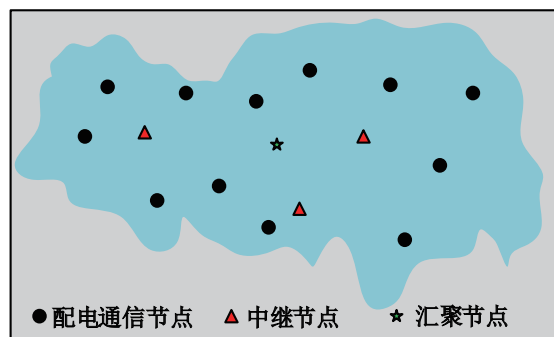


图2 配电通信网节点部署结果

为确保本研究具备相应的参考价值与学术意义,实验设计中纳入了文献[2]所提出的能量受限约束下的节点部署策略,以及文献[3]所提出的基于复杂图论的节点部署策略,作为研究的对照组。为便于区分,将这两个对照组分别命名为对照组1和对照组2。在对节点部署效果进行评估时,选取了配电通信网中继节点至汇聚节点的距离以及数据传输能耗作为关键指标。具体而言,中继节点与汇聚节点间距离越长,数据传输过程中的能耗相应增加,这通常指示配电通信网节点部署效果欠佳。通过这些评估指标,本研究能够对所设计方法在实际应用中的效果进行精确评价。

4.3 实验结果与讨论

图3为3种方法应用下配电通信网5个区域中继节点到

汇聚节点之间的距离；图 4 为 3 种方法应用下配电通信网传输数据能耗。

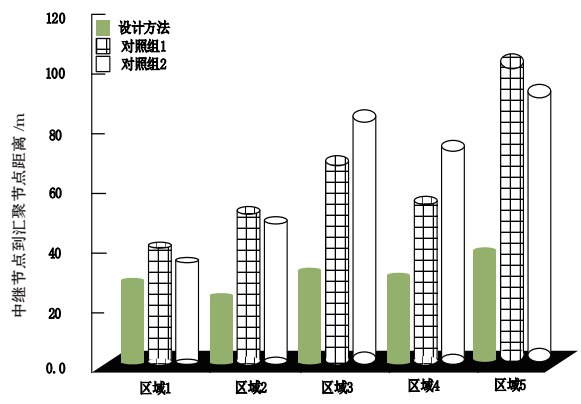


图 3 三种方法部署中继节点到汇聚节点的距离

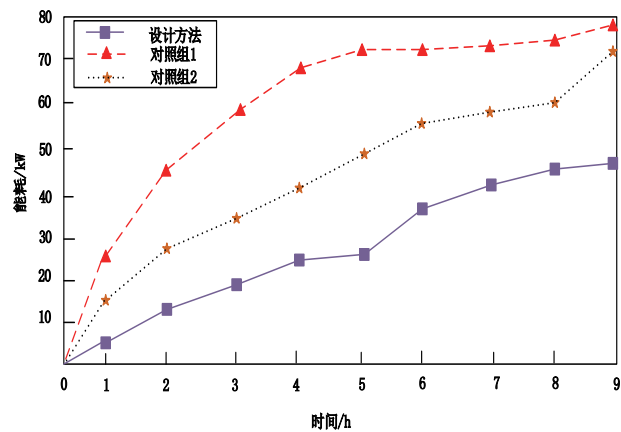


图 4 配电通信网能耗

通过图 3 可以看到，在配电通信网的部署过程中，采用本研究设计的方法所设置的中继节点与汇聚节点之间的距离最短，且比对照组 1 和对照组 2 所展示的距离要短；进一步地，通过图 4 的分析可以发现，在配电通信网的能耗方面，采用本研究设计的方法所得到的结果是最低的，而对照组 1 的能耗则是最高的。基于这些对比数据，可以得出结论，本研究提出的设计方法在配电通信网节点优化部署方面表现出了明显的优势，能够有效地促进配电通信网实现快速且节能的通信。

5 结语

本项研究工作提出了一种创新的配电通信网络节点优化部署策略，这一策略是建立在自适应卷积神经网络（CNN）算法的基础之上的。通过深入挖掘和利用深度学习模型中所蕴含的自适应学习能力，该方法成功地克服了传统部署策略在网络拓扑结构复杂、业务需求多变等复杂场景下所面临的挑战和不足之处。在一系列精心设计的实验中，观察并记录到，当采用自适应 CNN 算法进行配电通信网络节点的优化

部署时，网络传输效率得到了显著的提升，节点能耗得到了有效的降低，网络整体的鲁棒性也得到了增强。

展望未来，研究团队计划继续深入探索自适应 CNN 算法在配电通信网络节点部署领域的应用研究，致力于寻找更加高效的模型训练和优化策略，旨在进一步提升算法的性能和实用性。同时，研究团队也将密切关注新兴通信技术对配电通信网络可能产生的影响，例如第五代移动通信技术（5G）、物联网（IoT）等。研究的目标是探讨如何将这些前沿技术有效地融入配电通信网络节点部署策略中，以构建一个更加智能、高效和可靠的配电通信网络，为社会的可持续发展提供坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 杨利红, 陈霞. 基于优化虚拟力矩阵的农业通信节点部署方法 [J]. 计算机仿真, 2024, 41(4):378-381.
- [2] 吴强. 能量受限约束下的舰船通信网络节点动态协同部署 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45(4):171-174.
- [3] 朱赖红, 王娟. 基于复杂图论的光通信网络节点部署研究 [J]. 激光杂志, 2023, 44(4):140-145.
- [4] 黄宗伟. 基于 B-CNN 算法的无线通信网络通信抗毁节点优化仿真 [J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(7):108-111.
- [5] 贾徐庆, 李杰, 曹鹏飞. FFT 算法下物联网异构节点部署优化仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(12):446-450.
- [6] 熊泽凯, 王素红, 王靖君, 等. 移动边缘计算中服务功能链的自适应优化部署策略 [J]. 电讯技术, 2023, 63(11):1678-1686.
- [7] 蒋金陵, 徐胜超. 面向智慧教室的无线传感网边缘节点智能部署方法 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4):334-340.
- [8] 曾志区. 面向物联网网关的边缘云优化部署算法 [J]. 粘接, 2023, 50(12):151-153.

【作者简介】

袁平亮（1990—），男，河南商丘人，硕士研究生，副高级工程师，研究方向：电力通信。

包正睿（1992—），男，甘肃庆阳人，硕士研究生，中级工程师，研究方向：电力通信。

王海（1994—），男，山西运城人，硕士研究生，中级工程师，研究方向：电力通信。

（收稿日期：2025-02-26 修回日期：2025-07-01）