文章编号:1673-0291(2026)02-0200-14 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250032

智能配电网双模通信节点优化部署方案

李 尤[1,2],霍 炎[1],周忠国[2],高青鹤[1],颜 涛[2],荆 涛[1]
(1.北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044;2.四川中电启明星信息技术有限公司,成都 610200)

摘 要:电力线通信(Power Line Communication,PLC)与微功率无线通信相结合的双模通信技术,能够有效应对智能配电网中因电力线路干扰导致的通信中断问题,因此受到了广泛关注.针对智能电网中双模通信技术大规模应用中微功率无线通信模块部署成本高昂的问题,提出一种在有限成本约束下的双模通信节点部署优化方法.首先,构建面向智能配电网的双树网络拓扑结构,并设计双模节点优化部署方案.然后,建立以最小化信号强度衰减率与部署成本的加权和为目标函数的优化问题.最后,为求解该多约束混合整数规划优化问题,将问题分解成待部署双模设备数量固定和最佳成本不固定两种情况分别进行求解:针对双模设备数量固定的场景,采用深度确定性策略梯度(Deep Deterministic Policy Gradient,DDPG)算法优化智能电网无线通信模块的部署位置;针对最佳成本不固定的场景,采用动态规划(Dynamic Programming,DP)算法优化双模模块的数量和具体的部署位置.研究结果表明:当部署双模节点数量一定时,随着普通节点、中继节点与集中器的距离增大,系统性能降低,但基于DDPG算法的部署方案仍然优于将所有的双模模块优先部署在PLC通信性能较差的节点处、将所有的双模模块优先安装在无线通信性能更优的节点处以及随机部署的方案;相较于随机部署和中继节点优先方案,动态规划方案的目标函数值分别降低了6.8%和3.8%,证明了所提方案能够在部署成本与系统性能之间实现有效平衡.

关键词:智能配电网;双模通信节点部署;深度确定性策略梯度;动态规划
中图分类号:TN928 **文献标志码**:A

An optimized deployment scheme for dual-mode communication nodes in smart distribution grids

LI You[1,2], *HUO Yan*[1], *ZHOU Zhongguo*[2], *GAO Qinghe*[1], *YAN Tao*[2], *JING Tao*[1]
(1.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;2.AoStar Information Technologies Co., Ltd., Chengdu 610200, China)

Abstract: Dual-mode communication technology, which integrates Power Line Communication (PLC) and micro-power wireless communication, has garnered significant attention for its ability to effectively mitigate communication interruptions caused by power line interference in smart distribution grids. To address the high deployment costs associated with micro-power wireless communication modules during the large-scale application of dual-mode communication technologies, this paper proposes an optimal deployment method for dual-mode communication nodes under constrained costs.

收稿日期:2025-03-11;**修回日期**:2025-09-28
基金项目:国家自然科学基金(62572042,61931001)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62572042, 61931001)
第一作者:李尤(1991—),男,北京市人,博士生.研究方向为智能配电网.**email**:liyou@sgitg.sgcc.com.cn.
通信作者:高青鹤(1990—),女,河北衡水人,副教授,博士.**email**:qhgao@bjtu.edu.cn.

引用格式:李尤,霍炎,周忠国,等.智能配电网双模通信节点优化部署方案[J].北京交通大学学报,2026,50(2):200-213.
LI You, HUO Yan, ZHOU Zhongguo, et al. An optimized deployment scheme for dual-mode communication nodes in smart distribution grids[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(2): 200-213. (in Chinese)

First, a dual-tree network topology for smart distribution grids is constructed, and an optimal deployment scheme for dual-mode nodes is designed. Then, an optimization problem is formulated with the objective of minimizing the weighted sum of the signal attenuation rate and deployment costs. Finally, to solve this multi-constrained mixed-integer programming problem, it is decomposed into two scenarios for separate resolution: one with a fixed number of deployed dual-mode devices, the Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) algorithm is employed to optimize the deployment locations of the wireless communication modules. For the scenario with an unfixed optimal cost, a Dynamic Programming (DP) algorithm is adopted to optimize both the quantity and specific deployment locations of the dual-mode modules. Research results indicate that when the number of deployed dual-mode nodes is fixed, system performance degrades as the distance from ordinary and relay nodes to the concentrator increases. However, the DDPG-based deployment scheme consistently outperforms baseline strategies, including random deployment, prioritizing nodes with poor PLC performance, and prioritizing nodes with superior wireless performance. Furthermore, compared to the random deployment and relay node-first schemes, the DP-based scheme reduces the objective function value by 6.8% and 3.8%, respectively, demonstrating the effectiveness of the proposed approach in balancing deployment costs and system performance.

Keywords: smart distribution grid; dual-mode communication node deployment; deep deterministic policy gradient; dynamic programming

在全球能源格局深刻变革与信息技术飞速发展的时代背景下,智能电网作为现代电力系统的重要演进方向,已成为学术界与工业界广泛关注的核心议题.智能电网依托先进的传感技术、双向通信技术、控制技术、数据挖掘及智能决策技术,致力于实现电力系统在可靠性、安全性、经济性、高效性和环境友好性等方面的全面提升[1-3].作为智能电网与电力用户交互的关键环节,用电信息采集网络在保障电力数据传输可靠性方面发挥着重要作用,合理构建该网络对于提升系统整体性能具有重要意义[4-6].当前,用电信息采集网络主要采用微功率无线通信和电力线载波通信两种单模通信方式[7-8].两种技术在应用中各有优势与局限,单一通信模式在实现用电信息采集时,往往难以兼顾网络稳定性与数据采集成功率.因此,选择合适的通信传输技术对智能配电网的发展具有重要意义[9].

目前,电网通信广泛采用的是电力线通信(Power Line Communication,PLC)技术,这种通信方式因具备无需额外布设通信线路、安装便捷、环境适应性强等优势,在电网通信中得到了广泛应用,能够有效将电力通信网络延伸至电力监控终端,实现大规模电力数据的采集与控制[10].然而,PLC 技术采用的载波频率通常低于 500 kHz,导致数据传输速率低;同时,电力线信道存在信号衰减显著、噪声源复杂且负载干扰强烈等问题[11-12],这些因素对智能电网数据传输的稳定性构成挑战[13].相较而言,微功率无线通信技术工作在 475 MHz 频段,该频段属于民用计量设备的免许可频段,无需额外申请或支付通信费用.微功率无线通信技术基于自组网络架构,采用先进的网状拓扑结构,使得每个通信节点具备多条备用路径,支持网络的自主维护与修复,能够较好地适应复杂多变的现场环境,通信速率可达 19 200 bps.然而,该技术易受障碍物的影响,信号衰减较为明显.尽管如此,在小范围、短距离的自组网应用中,该技术仍展现出通信稳定性高、传输速率快的显著优势.单一的电力线载波或微功率无线通信在实际应用中均难以实现对所有节点的全面覆盖,致使用电信息采集网络的通信质量与数据采集成功率面临瓶颈.通信网络的不稳定性直接制约数据传输效率,进而对电网业务运行产生不利影响[14].针对上述问题,文献[15]提出了将微功率无线通信和电力线载波通信相结合的双模通信方案,利用两者在信号衰减特性上的互补优势,优化网络构建策略,从而提升用电信息采集网络的整体性能.

围绕这一研究方向,国内外学者及科研机构已开展了一系列研究.文献[16]系统阐述了双模通信的基本概念、技术特点及其典型应用场景,深入分析了用电信息采集系统的关键技术与所面临的挑战,为智能电网的发展提供了新思路.此外,为应对复杂通信环境下的应用需求,文献[17]提出了一种基于接收信号强度自适应机制的双模通信技术,通过优化信号强度判别算法及模块设计,有效提升了通

信系统的适应性与通信质量.在配电台区应用方面,为满足实际通信覆盖与可靠性要求,文献[18]引入了双模组网、IP化和中继等关键技术,验证了基于"高速电力线载波(High-speed Power Line Carrier, HPLC)+射频(Radio-Frequency, RF)台区智能终端+物联网通信单元"架构的HPLC+RF双模通信方案,所提出的方案在提升设备通信覆盖率与数据采集成功率方面具有显著优势,但由于中继节点选取方式存在随机性,信息传输速率仍有进一步优化的空间.文献[19]研究了信道及中继节点选择方法,提出以接收信号强度衰减率作为信道质量评估指标,实现了对电力线载波与微功率无线信道的自适应选择,从而显著提升了数据采集的完整性与传输效率.在双模通信检测领域,文献[20]设计并实现了一套双模通信互联互通测试系统,配套开发了相应的测试平台软件,平台支持通信性能测试、协议一致性测试及互操作测试,为双模通信技术的工程化应用提供了重要的验证手段.

随着智能电网中对中央控制系统与远程终端设备间敏感数据交换需求的提升,通信链路的可靠性与安全性成为关键问题.文献[21]研究了一种基于PLC与RF的混合通信系统,通过在两类信道中同时传输相同信息,实现通信链路的冗余设计,增强了系统在面对服务故障或数据丢失时的弹性.不同于文献[21]的方案,文献[22]针对协同电力线通信与广义空间调制系统中的安全传输问题,提出了一种基于区间量化的天线选择方案,实现了数据的自适应传输,并通过引入人工噪声有效提升窃听者的平均误码率,进一步保障了电网信息传输的安全性与可靠性.

在通信链路可靠性得到保障的基础上,无线通信节点的部署策略及其成本效益问题亦成为研究热点.文献[15]基于智能电表的分布特征、接入模式以及微功率无线与电力线载波在信号衰减特性上的差异,构建了一种双树网络架构,并结合两种通信方式的优势,提出了混合路由算法及适用于用电信息采集的双模信道接入策略,充分满足了电力数据特征、业务类型及信道资源需求.然而,现有电表部署方案往往通过增设仪表来降低监测不确定性,却未明确其与测量基础设施升级所带来的实际效益之间的关联.为在成本效益与监测精度之间取得平衡,文献[23]提出了一种基于成本效益分析的电表部署策略,利用状态估计输出的不确定性定义电压安全裕度,从而科学判断新增仪表的必要性与决定部署位置.此外,文献[24]提出了一种基于深度强化学习的无模型家庭能量管理系统,采用马尔可夫决策过程对系统进行建模,在兼顾系统运行成本与运营目标的同时,有效提升了功率因数等关键性能指标.

综上所述,目前已经存在的关于配电网场景中双模通信组网的研究,大多数是在所有节点均部署双模模块的前提下展开研究,并未考虑外界影响导致电力线中断通信的情况.然而在实际配电网环境中,智能电表规模庞大且部署成本有限,如何在预算约束下选择关键节点部署双模模块,以平衡经济性与可靠性,成为亟待解决的问题[25].为解决这一问题,本文提出了一种面向智能配电网的双模通信节点优化部署方案.首先,针对智能配电网中无线通信模块部署所面临的信号衰减与成本权衡问题,构建了一种双树网络拓扑结构,并设计了双模节点优化部署方案.在此基础上,以最小化信号强度衰减率与部署成本的加权和为目标,建立了相应的优化模型.其次,由于该问题属于多约束混合整数规划,求解较为复杂,本文将问题分解为待部署双模设备数量固定与最佳成本不固定两种情况分别进行求解.针对双模设备数量固定的场景,采用DDPG算法去优化这批节点的部署位置.针对最佳成本不固定的场景,则采用动态规划(Dynamic Programming, DP)算法确定双模设备的数量及具体的部署位置.通过上述方法,本文旨在为智能配电网中无线通信模块的优化部署提供有效的理论支撑与算法方案.

1 系统模型与问题建模

1.1 系统模型建立

本文面向智能配电网用户用电信息采集与监测场景,采用集中器-中继-普通节点构成的双树网络拓扑结构.该结构能够有效简化多跳通信路径,同时降低中继节点负载.模型中假设每个中继节点与两个普通节点相连,在未部署双模设备前,所有节点均采用电力线载波通信方式,其通信频率范围在3 kHz~500 kHz.普通节点将采集的信息传递给对应的中继节点,再由中继节点传输至集中器,从而实现用电信息的采集.图1为智能配电网双树网络拓扑架构图,设普通节点(智能电表)集合为$U=\{1,2,\cdots,N\}$,中继节点的集合为$S=\{1,2,\cdots,N/2\}$,其中N为普通节点的总数量.对于任意节点i,定义决策变量$x_i\in\{0,1\}$表示该节点是否部署双模通信模块,部署决策集合可表示为$X=\{x_1,x_2,\cdots,x_i,\cdots,x_{N+N/2}\}$,令$x_i=1$表示部署双模模块,否则$x_i=0$.双模通信模块包含电力线载波通信与微功率无线通信两种模式,其中微功率无线通信

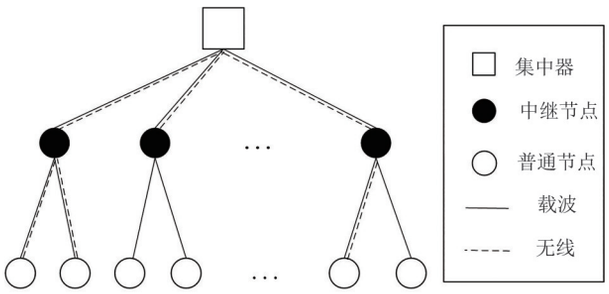


图 1　双树网络拓扑模型

Fig.1　Dual-tree network topology model

模式工作频率范围为 470 MHz～510 MHz.为避免同一分支内节点间以及中继节点至集中器传输过程中的信号干扰,本文模型中所有节点均采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)技术进行通信.

1.1.1　低压电力线信道模型

基于双导体传输线理论的电力线信道建模方法中,可将一段电力传输线视为一个单独二端口网络,进而将整个电力线网络建模为多个二端口网络的级联.因此,整个信道的传输矩阵可通过各级二端口网络(Two-Port Network,2PN)传输矩阵的级联获得.该建模方法采用自底向上的参数获取方式.由于二端口网络级联时,其整体传输特性由各子网络传输矩阵的乘积决定,因此该方法能够有效分析网络拓扑里各个元素的变化对传输特性的影响.图 2 为最简二端口网络示意图,其传输矩阵记为 $\boldsymbol{T}$,对应矩阵元素分别采用 T_{11},T_{12},T_{21},T_{22} 进行表示.

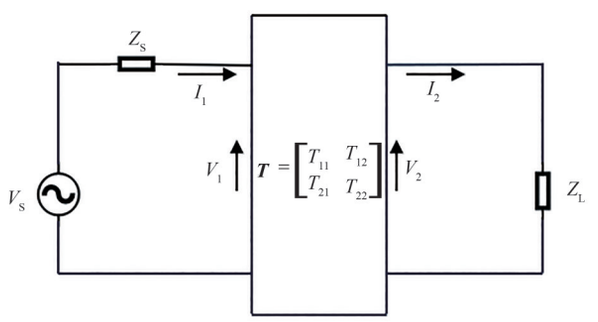


图 2　二端口(2PN)网络示意图

Fig.2　Dual-port (2PN) network model

发送端的电压 V_1 和电流 I_1 与接收端电压 V_2 和电流 I_2 的传输关系的计算式为

$$\begin{bmatrix}V_1\\ I_1\end{bmatrix}=\boldsymbol{T}\begin{bmatrix}V_2\\ I_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}T_{11} & T_{12}\\ T_{21} & T_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_2\\ I_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cosh(\gamma_0 l) & Z_0\sinh(\gamma_0 l)\\ \dfrac{1}{Z_0}\sinh(\gamma_0 l) & \cosh(\gamma_0 l)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_2\\ I_2\end{bmatrix}\tag{1}$$

式中:γ_0 为传播常量.

$$\gamma=\alpha+\mathrm{j}\beta=\sqrt{(R+\mathrm{j}\omega L)(G+\mathrm{j}\omega C_r)}\tag{2}$$

$$Z_0=\sqrt{\frac{(R+\mathrm{j}\omega L)}{(G+\mathrm{j}\omega C_r)}}\tag{3}$$

式中:l 为电力传输线的长度;γ 和 Z_0 分别为传输线的传输常量和特征阻抗;α 为衰减常量;β 为相位常量;j 表示虚部单位;R 为单位长度的电阻;L 为单位长度的电感;C_r 为单位长度的电容;G 为单位长度的电导;ω 为角频率.

二端口网络的传输函数计算式为

$$H(f)=\frac{Z_L}{T_{11}Z_L+T_{12}+T_{21}Z_L Z_S+T_{22}Z_S}\tag{4}$$

式中:$H(f)$ 为传输函数;Z_S 和 Z_L 分别为输入阻抗和负载阻抗;f 为载波频率.

实际的电力线网络通常呈现多节点拓扑结构,各节点连接着不同长度和负载特性的分支线路.此类网络可视为多个二端口网络的级联,其整体信道传输特性可由各级子网络的传输矩阵相乘得到.基于图 1 所示的双树拓扑模型,图 3 给出了相应的等效电路结构图.图 3 中:TX 表示发送数据线,RX 表示接收数据线.该模型主要用于分析单分支电力线拓扑的传输特性.电路模型由电源、两条传输线以及分支电路组成,对应传输矩阵分别记为 T_0、T_1、T_2 和 T_3.由此,整体信道的传输矩阵 T 可由 4 部分级联构成,对应的计算式为

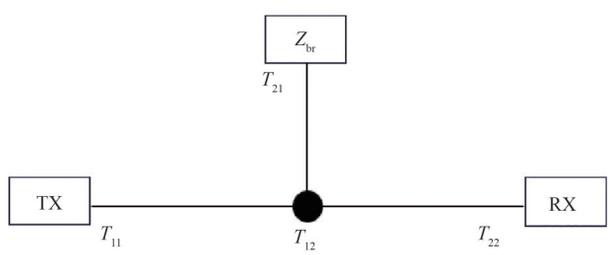


图 3　单分支电力线拓扑

Fig.3　Single-branch power line topology

$$\begin{cases}T_0=\begin{bmatrix}1 & Z_S\\ 0 & 1\end{bmatrix}\\ T_1=\begin{bmatrix}\cosh(\gamma_1 l_1) & Z_{c_1}\sinh(\gamma_1 l_1)\\ \dfrac{1}{Z_{c_1}}\sinh(\gamma_1 l_1) & \cosh(\gamma_1 l_1)\end{bmatrix}\\ T_2=\begin{bmatrix}1 & 0\\ \dfrac{1}{Z_{eq}} & 1\end{bmatrix}\\ T_3=\begin{bmatrix}\cosh(\gamma_2 l_2) & Z_{c_2}\sinh(\gamma_2 l_2)\\ \dfrac{1}{Z_{c_2}}\sinh(\gamma_2 l_2) & \cosh(\gamma_2 l_2)\end{bmatrix}\end{cases}\tag{5}$$

式中：Z_{c_1}和γ_1，Z_{c_2}和γ_2分别表示T_1和T_3的特征阻抗和传播常量；Z_{eq}为分支线的等效阻抗.

Z_{eq}的计算式为

$$Z_{eq}=Z_C\frac{Z_{br}+Z_C\tanh(\gamma_0 l)}{Z_C+Z_{br}\tanh(\gamma_0 l)} \tag{6}$$

式中：Z_{br}为该分支的终端负载；Z_C为该分支的特征阻抗.至此，2PN传输矩阵T的表达式为

$$T=T_0T_1T_2T_3=\begin{bmatrix}T_{11} & T_{12}\\ T_{21} & T_{22}\end{bmatrix} \tag{7}$$

根据式(5)，可以计算得到对应的矩阵元素，将结果代入式(4)中，可以得到该分支的传输函数$H(f)$，进而得到信道的损耗L_{dB}计算式为

$$L_{dB}=-20\lg(|H(f)|) \tag{8}$$

为有效应对配电网拓扑结构动态变化所引入的信道增益不确定性，可在本文系统模型的基础上引入支路追加法，逐个追加网络中的全部支路，构建出整个网络的信道矩阵.节点的接入与退出可对应为矩阵中相关行与列的增删操作，从而实现对信道传输特性的动态刻画与重构.需要指出的是，该方法主要适用于结构相对规则、分支数量适中的场景，如小区配电网等中等复杂程度的拓扑环境.对于拓扑结构更为复杂或状态切换频繁的应用场景，可进一步采用基于信息节点的精细化建模方法，或结合实测数据构建动态统计模型，以提升信道建模的适应性与准确性.

1.1.2 微功率无线信道模型

自由空间传播损耗主要取决于工作频率和传播距离，然而，电磁波的传播路径在实际环境中会受到多种因素的影响，如地面建筑、车辆等，导致其传播方式相比自由空间更为复杂，包括反射、绕射、散射和波导传播等.COST231-Hata模型作为一种半经验半理论的传播模型，广泛应用于复杂环境下的电波传输预测，在诸多场景中具有良好的适用性.然而，随着通信环境日益复杂化，如密集城区、双模组网等新型应用场景的出现，该模型在某些条件下的预测精度仍存在一定局限.为此，本文针对双模通信应用场景，采用改进后的COST231-Hata模型.

改进后的COST231-Hata模型的传输损耗的计算式为

$$L_M=56.222+(44.9-6.55\lg h_t)\lg d+33.9\lg f-\alpha(h_r)-13.82\lg h_t+C_0-0.1417d \tag{9}$$

式中：L_M为传输损耗；h_t和h_r分别为发射天线和接收天线有效高度；d为发射机和接收机之间的距离；C_0为传播环境校正因子(中型城市及郊区取0，密集大城市区取3)；$\alpha(h_r)$是接收天线高度修正因子.

大城市环境下，依据接收频率不同，接收天线高度修正因子的计算式为

$$\alpha(h_r)=\begin{cases}8.29\times(\lg 1.54h_r)^2-1.1 & f\leqslant 400\ \text{MHz}\\ 3.2\times(\lg 11.75h_r)^2-4.97 & f\geqslant 400\ \text{MHz}\end{cases} \tag{10}$$

此外，城市环境中的复杂地形对无线信号的传输损耗也会存在影响，可以根据实际情况增加新的影响因子，具体可参照文献[26].

1.1.3 电力线中断模型

随着使用时间的延长，电力线路可能因老化而导致中断，从而无法成功采集电力信息.研究表明，输电线路的老化过程通常可用威布尔分布来描述.因此，可以用形状与之相似的s形曲线来模拟输电线路中期和老年期的失效率，χ表示电力线已使用的年限，具体的老化率计算式为

$$f_0=\frac{1}{1+e^{-0.2(\chi-30)}} \tag{11}$$

1.1.4 性能指标

本文采用信号强度衰减率(Signal Strength Degrading Ration，SSDR)作为评估系统可靠性的关键指标.设w为节点的发射功率，rssi为接收信号强度，则SSDR的计算式为

$$\text{SSDR}=\frac{10\lg w-\text{rssi}}{10\lg w}\times 100\% \tag{12}$$

根据低压电力线信道模型和微功率无线信道模型，可分别求得节点n有线和无线信号强度衰减率，对应计算式为

$$s_n^{\text{wireless}}=\frac{10\lg(w_n^{\text{wireless}})-[10\lg(w_n^{\text{wireless}})-L_{ns}^{\text{wireless}}-L_s^{\text{wireless}}]}{10\lg(w_n^{\text{wireless}})}\times 100\% \tag{13}$$

$$s_n^{\text{wire}}=\frac{10\lg(w_n^{\text{wire}})-[10\lg(w_n^{\text{wire}})-L_{ns}^{\text{wire}}-L_s^{\text{wire}}]}{10\lg(w_n^{\text{wire}})}\times 100\% \tag{14}$$

式中：w_n^{wireless}和w_n^{wire}分别代表节点n的无线和有线发射功率；L_{ns}^{wireless}，L_{ns}^{wire}，L_s^{wireless}和L_s^{wire}分别代表无线和有线信道中信号从节点n传递至中继s及从中继节点s传递至集中器发生的损耗，dB.

鉴于电力线路可能因老化而导致通信中断，本文采用期望值来表征节点n的信号强度衰减率，表达式为

$$s_n^0=f_0(1-x_n)s_n^{\text{wire}}+(1-f_0)x_n s_n^{\text{wireless}} \tag{15}$$

式中，s_n^0为节点n对应的信号强度衰减率.

1.2　问题建模

本文针对有线和无线混合通信方式下的电信号采集系统,建立了相应的系统模型,选取信号强度衰减率作为衡量通信可靠性的指标.在建模过程中,考虑有线通信受外界影响可能发生中断,在系统总成本与可靠性之间权衡.以最小化信号强度衰减率与部署成本的加权和为目标函数,构建了一个多约束混合整数规划模型.模型的表达式为

$$X^{*}=\arg\min_{X} b\sum_{n=1}^{N}s_{n}^{0}+\sum_{n=1}^{N}(1-b)x_{n}p$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}C1:0\leqslant\sum_{n=1}^{N}x_{n}p\leqslant P\\ C2:x_{n}\in\{0,1\}\ \forall n\in N\end{cases}\tag{16}$$

式中:模型优化目标为得到最优部署决策集合X^{*};p为系统中部署单个双模模块的成本,P为总成本;b为权重系数,其值可根据成本与可靠性的相对重要性进行灵活调整;约束$C1$体现了系统成本的限制,同时也间接反映了对双模模块总数的约束$0\leqslant\sum_{n=1}^{N}x_{n}\leqslant N$;约束$C2$表示部署决策变量是二元的.此外,在计算过程中,成本与信号强度衰减率需进行归一化处理.

对于上述优化问题,本文考虑了两种情况:一是针对待部署双模模块总数量固定的情况,优化这些双模模块的部署位置以最小化信号强度衰减率,在这种情况下,采用DDPG算法进行求解;二是在成本有限的情况下,以最小化成本消耗和信号强度衰减率为目标,优化双模模块的数量和具体的部署位置,在这种场景下,采用DP算法进行求解.

2　无线模块数量固定的最佳部署策略

本节首先考虑一种实际应用场景,假设某省国网公司已批量采购具备双模通信功能的智能电表等设备,则待部署的双模模块总数已确定.在此情况下,优化问题中的成本项为固定值,优化目标转化为在给定部署数量约束下,通过优化设备节点的部署位置,最小化信号强度衰减率.以图1所示的双树拓扑为例,候选部署位置包括所有中继节点和普通节点.令K表示每个中继节点连接的节点数量,共计有$NK+N$个节点,每个位置有"部署"与"不部署"两种状态,因此选择空间规模为2^{NK+N}.然而,实际配电网络的拓扑结构更为复杂,且通信链路具有动态特性,导致传统的优化方法难以有效求解此类问题.为此,本文采用强化学习的方法,利用DDPG算法对环境动态的感知能力及其对连续动作空间的函数拟合能力,实现部署位置的高效优化.

2.1　DDPG算法与配电网环境的交互

图4展示了DDPG算法与配电网场景交互的过程.图4中,θ^{Q}为评论家网络的参数在每一轮交互中,配电网环境首先给出当前环境状态信息;DDPG算法基于当前环境状态信息做出动作;配电网环境随后根据当前状态信息及动作计算出奖励值,并将其反馈给算法;该奖励作为DDPG神经网络训练的

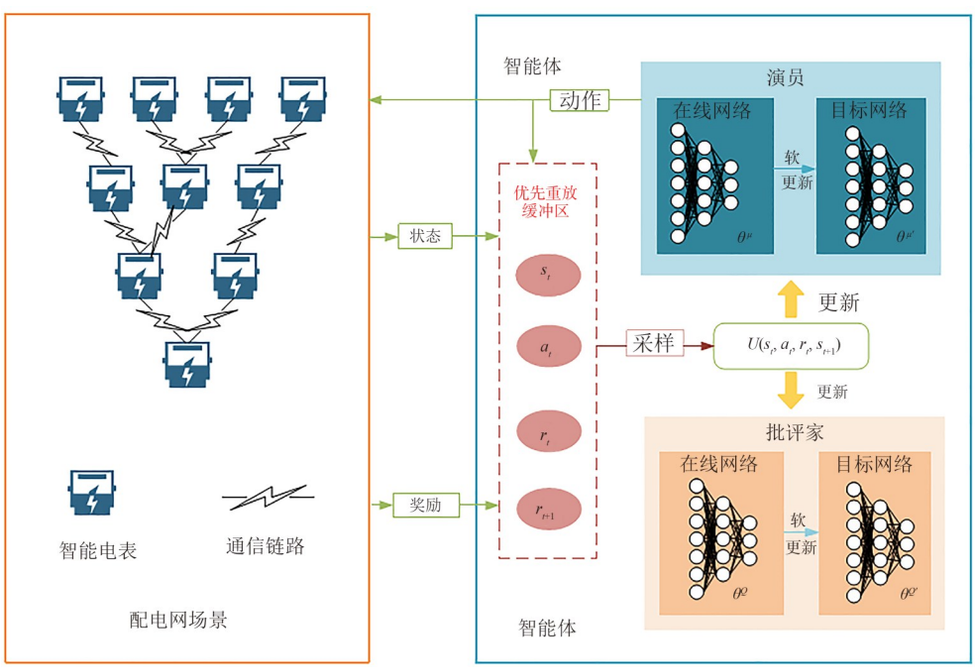


图4　DDPG算法与配电网环境交互示意图

Fig.4　Interaction between DDPG algorithm and SGD environment

依据，驱动算法在与环境的持续交互中逐步优化决策策略.具体的状态、动作、奖励函数设计如下.

状态函数(s_t)：以节点采用PLC通信方式及采用微功率无线通信方式时发射功率、路径损耗、电力线终端概率等指标作为神经网络状态输入.

动作函数(a_t)：决策变量X表示在某一位置是否部署双模模块.

奖励函数(r_t)：结合优化目标，奖励定义为信号强度衰减率的倒数，信号强度衰减率越大，奖励值越低，从而使训练过程向信号变化率更小的方向收敛.

2.2 基于DDPG的电网无线通信模块部署算法

DDPG算法的网络包括4个神经网络，分别是在线演员神经网络(Online Actor Network)、在线评论家网络(Online Critic Network)、目标演员神经网络(Online Actor Network)和目标评论家网络(Target critic Network).首先，智能体收集当前时刻t环境中的状态信息s_t，并将其作为在线演员网络μ的输入，在线演员网络根据当前网络参数θ^{μ}及随机噪声N_t获得当前动作a_t，对应计算式为

$$a_t=\mu(s_t,\theta^{\mu})+N_t \tag{17}$$

为了在训练过程中实现探索与利用的平衡，进一步引入了奥恩斯坦-乌伦贝克(Ornstein-Uhlenbeck，OU)随机噪声以生成时间相关的探索噪声.OU噪声可以通过动态控制鼓励策略在早期进行充分探索.随着训练的进行，逐步采用线性方式衰减噪声幅度，从而实现从探索向利用的平稳过渡，提高策略的收敛稳定性，降低智能体陷入局部最优的风险.

获得当前环境状态信息s_t及动作a_t后，计算得到奖励r_t，随后当前环境进入下一状态s_{t+1}.为了充分利用经验来加速网络训练，将该条经验(s_t,a_t,r_t,s_{t+1})存入经验回放缓冲区中.

在训练阶段，智能体根据采样得到a_t和s_t计算Q值，即评论家网络对演员网络进行打分.DDPG算法利用深度神经网络强大的函数拟合能力，采用神经网络来对Q函数进行逼近，根据贝尔曼函数，Q值对应的计算式为

$$Q^{\mu}(s_t,a_t)=E\left[r(s_t,a_t)+\lambda Q^{\mu}(s_{t+1},\theta^{Q})\right] \tag{18}$$

式中：λ是折扣因子.

假设每次采样的经验数目为M，评论家网络的训练类似于监督学习的方法，最小化损失函数的计算式为

$$L(\theta^{Q})=\frac{1}{M}\sum_{t=1}^{M}\left(y_t-Q(s_t,a_t,\theta^{Q})\right)^2 \tag{19}$$

式中：y_t的定义为$y_t=r_t+\lambda Q'(s_{t+1},\mu'(s_{t+1},\theta^{\mu'}))$；$L(\theta^{Q})$是评论家网络的损失函数.

采用梯度下降法的方式更新演员在线网络参数，根据蒙特-卡罗方法，更新梯度的计算式为

$$\nabla_{\theta^{\mu}}J(\mu)=\frac{1}{W}\sum_{t=1}^{W}\nabla_a Q\left(s,a\middle|\theta^{Q}\right)\Big|_{s=s_t,a=\mu(s_t)}\nabla_{\theta^{\mu}}\mu\left(s\middle|\theta^{\mu}\right)\Big|_{s=s_t} \tag{20}$$

式中：W为一个回合的总时间步数；$J(\mu)$为演员网络的目标函数；$\nabla_a Q\left(s,a\middle|\theta^{Q}\right)$是$Q$函数对动作$a$的梯度；$\nabla_{\theta^{\mu}}\mu\left(s\middle|\theta^{\mu}\right)$是演员网络输出对参数$\theta^{\mu}$的梯度.

最后，智能体对目标演员/评论家网络进行更新，通常取非常小的更新率τ，对应的更新过程的计算式为

$$\theta^{Q'}\leftarrow\tau\theta^{Q}+(1-\tau)\theta^{Q'} \tag{21}$$

$$\theta^{\mu'}\leftarrow\tau\theta^{\mu}+(1-\tau)\theta^{\mu'} \tag{22}$$

网络的训练和更新过程可总结为下列10个步骤.

步骤1：初始化演员和评论家神经网络的参数，并初始化经验回放缓冲区.

步骤2：进入回合循环，对于每个回合$w=1,2,\cdots,W_{\max}$，执行步骤3至步骤10.

步骤3：初始化配电网场景的环境状态s_0.

步骤4：进入时间步循环，对于每个时间步$m=1,2,\cdots,M_{\max}$，执行步骤5至步骤9.

步骤5：根据当前状态s_t和当前策略网络$\mu(s_t)$，获取当前动作$a(t)$，并执行该动作，得到下一状态$s'(t)$和即时奖励$r(t)$.

步骤6：判断经验回放缓冲区中存储的经验数量是否小于单次采样个数M_{b}.若小于，则将当前经验元组存入缓冲区；否则，用当前经验元组替换缓冲区中最早存储的经验.

步骤7：从缓冲区中随机采样M_{b}条经验，通过最小化损失函数$L(\theta^{Q})$更新在线评论家网络的模型参数.

步骤8：从缓冲区随机采样M_{b}条经验，根据最大化策略价值函数$J(\theta^{\mu})=(1/M_{\mathrm{b}})\sum_{t=1}^{M_{\mathrm{b}}}Q(s_t,a_t,\theta^{Q}|a_t=\mu(s_t))$更新在线演员神经网络的参数.

步骤9：采用软更新方式更新目标演员网络和目标评论家网络的参数.

步骤10：结束当前回合，进入下一回合，直至完成所有回合.

2.3 算法复杂度分析

DDPG算法的时间复杂度主要由演员网络和评论家网络这两组神经网络的复杂度决定.为便于分

析,定义以下符号:设G_a和G_c分别为演员神经网络和评论家神经网络的层数,R为算法与环境交互回合数,H为每个回合交互的步数;令J_k^{actor}和J_k^{critic}分别表示演员网络和评论家网络第k层的通道数.基于以上定义,DDPG算法的时间复杂度可以表示为演员网络和评论家网络的神经网络复杂度之和:$O\left(\sum_{k=1}^{G_a} R\cdot H\cdot J_{k-1}^{\text{actor}}\cdot J_k^{\text{actor}}+\sum_{k=1}^{G_c} R\cdot H\cdot J_{k-1}^{\text{critic}}\cdot J_k^{\text{critic}}\right)$.

3　无线模块成本受限的最佳部署策略

本节在部署成本受限的条件下,以最小化总成本与信号强度衰减率为目标,对双模设备的部署数量与位置进行联合优化.原问题可分解为两个约束一致的子问题:子问题1以最小化部署成本为目标,优化设备部署数量;子问题2以最小化信号强度衰减率为目标,优化设备部署位置.子问题2的最优解直接决定了子问题1的解,二者共同构成原问题的最优解.该最优子结构性质使得原问题适合采用动态规划算法进行求解.

3.1　动态规划算法步骤

动态规划算法通常包含状态定义、状态转移方程的建立、边界条件的确定、计算顺序的规划以及最优解的求解过程等关键步骤,具体的计算过程包含5个步骤.

步骤1:首先将子问题2按照分支进行划分,每个分支的部署求解定义为动态规划算法中的阶段,该阶段所处的各种不同客观情况定义为状态,可以记为$f_{i,j}\left(0\leqslant i\leqslant 150, 0\leqslant j\leqslant 50\right)$,代表在前$j$个分支中,部署$i$个节点所能得到的最小损耗.

步骤2:状态转移基于前一阶段的决策和状态递推当前阶段的状态.基于相邻阶段状态之间的关联,建立状态转移方程.针对当前分支(第j个分支),需要参考前$j-1$个分支在安装不同数量的双模设备下的最小损耗,遍历各种可能的部署方案,从中选择最小值作为当前阶段的最优解.单独考虑单个分支的部署情况,共有5种情况,将在3.2节给出详细分析和说明.

步骤3:状态转移方程是一个递推式,因此需要考虑递推终止的条件.一是对应$i=0$,即$f_{0,j}$,对于每一个分支任何位置都不部署,则整个网络不进行双模设备的部署,对应方案数是1.二是对应$j>50$,没有需要再进行优化部署的分支.

步骤4:采用自底向上的计算顺序,从边界条件开始,逐步计算出所有$f_{i,j}\left(0\leqslant i\leqslant 150, 0\leqslant j\leqslant 50\right)$.

步骤5:$f_{i,50}$即为在整个网络中安装i个设备时,所能达到的最低损耗,优化问题的最优解可以表示为$\min\limits_i bf_{i,50}+(1-b)i\times p$.

3.2　分支配置情况

对于网络中的任意两个节点,可以使用路径损耗的损失函数计算两节点之间的信道损耗.路径损耗的损失函数的计算式为

$$\text{Loss}=\begin{cases}(1-F)P_1+FP_0 & \text{wireless}\\ (1-F)P_1+FP_{\text{tx}} & \text{wire}\end{cases}\tag{23}$$

式中:F表示有线线路发生故障的概率;P_{tx}表示对应链路的发射功率;P_1和P_0分别为有线和无线传输损耗;变量wireless和wire用于表示该链路使用和不使用无线传输方式,出于系统成本优化考虑,若某节点部署了微功率无线模块,则该节点利用无线信道传输信号.P_1和P_0的参数更新过程为:$P_1:=P_1+\min\{P_{\text{tx}}-P_1,0\}$,$P_0:=P_0+\min\{P_{\text{tx}}-P_0,0\}$.

首先对模型进行简化处理,以单分支结构为例进行分析.该分支由一个中继节点I和两个与之相连的普通节点A和B构成,针对此拓扑结构,共有5种可能的双模设备配置情况.以下将用F_{A}、F_{B}和F_{I}分别表示节点A到中继节点I、节点B到中继节点I及中继节点I到集中器之间有线线路的故障概率;P_{A}^{tx}和P_{B}^{tx}分别表示节点A和节点B的发射功率;$P_{\text{A}}^{\text{wire}}$和$P_{\text{B}}^{\text{wire}}$分别表示节点A和B到中继节点I之间的有线信道损耗,而$P_{\text{A}}^{\text{wireless}}$和$P_{\text{B}}^{\text{wireless}}$分别表示节点A和B到中继节点I之间的无线信道损耗;$P_{\text{I}}^{\text{wire}}$和$P_{\text{I}}^{\text{wireless}}$分别表示中继节点I到集中器之间的有线和无线信道损耗.

1)情况1:I,A和B均不部署微功率无线模块.

在此情况中,该分支无需额外安装双模设备,节点A和节点B均通过有线通信方式将各自采集的电力信息传输至集中器,节点的信道损耗和总信号强度衰减率之和如表1所示.

2)情况2:I部署微功率无线模块,A和B均不部署微功率无线模块.

在此情况中,该分支仅需要部署一台双模设备,节点A和节点B均采用有线通信方式,将各自采集的电力信息传输至中继节点,随后该节点通过无线链路将接收到的信号转发至集中器.关于各节点的信道损耗及总信号强度衰减率之和的数据如表2所示.

3)情况3:I和A部署微功率无线模块,B不部署微功率无线模块.

在此情况中,系统需部署两台双模设备,节点A采用无线通信方式将采集的电力信息传输至集中器,而节点B则通过有线链路将信号发送至中继节

表 1 I, A 和 B 均不部署微功率无线模块

Tab.1 I, A, B do not deploy micro-power wireless modules

信号强度衰减	传输路径	计算公式
信道损耗	节点 A 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{0}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{A}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{False})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{0}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{0},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{False})$
信道损耗	节点 B 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{0}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{B}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{False})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{0}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{0},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{False})$
综合损耗	节点 A 与节点 B	$l^{0}=\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{0}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{0}}{P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}}+\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{0}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{0}}{P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}}$

表 2 I 部署，A 和 B 均不部署微功率无线模块

Tab.2 I deploys a micro-power wireless module, while A and B do not

信道强度衰减	传输路径	计算公式
信道损耗	节点 A 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{1}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{A}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{False})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{1}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{1},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
信道损耗	节点 B 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{1}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{B}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{False})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{1}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{1},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
综合损耗	节点 A 与节点 B	$l^{1}=\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{1}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{1}}{P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}}+\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{1}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{1}}{P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}}$

点 I，该中继节点随后利用无线传输技术将接收到的的信息转发至集中器，节点的信道损耗和总信号强度衰减率之和如表 3 所示.

4)情况 4：I 和 B 部署微功率无线模块，A 不部署微功率无线模块.

表 3 I 和 A 部署，B 不部署微功率无线模块

Tab.3 I and A deploy micro-power wireless modules, while B does not

信道强度衰减	传输路径	计算公式
信道损耗	节点 A 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{2}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{A}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{2}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{2},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
信道损耗	节点 B 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{2}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{B}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{False})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{2}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{2},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
综合损耗	节点 A 与节点 B	$l^{2}=\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{2}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{2}}{P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}}+\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{2}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{2}}{P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}}$

在此情况中，该分支需配置两台双模设备，节点 A 利用有线信道将信号传输至中继节点 I，随后该中继节点通过无线信道将收到的信息进一步转发至集中器，节点 B 直接采用无线传输技术将采集到的电力信息传输至集中器，节点的信道损耗和总信号强度衰减率之和如表 4 所示.

表 4 I 和 B 部署，A 不部署微功率无线模块

Tab.4 I and B deploy micro-power wireless modules, while A does not

信号强度衰减	传输路径	计算公式
信道损耗	节点 A 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{3}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{A}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{False})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{3}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{3},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
信道损耗	节点 B 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{3}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{B}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{3}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{3},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
综合损耗	节点 A 与节点 B	$l^{3}=\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{3}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{3}}{P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}}+\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{3}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{3}}{P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}}$

5)情况 5：I，A 和 B 均部署微功率无线模块.

在此情况中，需要安装的设备数量为 3，节点 A 和节点 B 通过无线信道将电表信息传输至集中器，节点的信道损耗和总信号强度衰减率之和如表 5 所示.

表 5 I, A 和 B 均部署微功率无线模块

Tab.5 I, A, B all deploy micro-power wireless modules

信号强度衰减	传输路径	计算公式
信道损耗	节点 A 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{4}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{A}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{4}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{4},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
信道损耗	节点 B 到中继节点 I	$\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{4}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{B}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
信道损耗	中继节点 I 到集中器	$\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{4}=\mathrm{loss}(F_{\mathrm{I}},P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}-\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{4},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wire}},P_{\mathrm{I}}^{\mathrm{wireless}},\mathrm{True})$
综合损耗	节点 A 与节点 B	$l^{4}=\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{A}}^{4}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{A}}^{4}}{P_{\mathrm{A}}^{\mathrm{tx}}}+\frac{\widetilde{l}_{\mathrm{B}}^{4}+\widetilde{\widetilde{l}}_{\mathrm{B}}^{4}}{P_{\mathrm{B}}^{\mathrm{tx}}}$

3.3 算法复杂度分析

中继节点总数量为 N，每个中继节点连接的节点数量为 K，则可选的部署位置总数为 $NK+N$. 对于每个分支来说，K 个普通节点中只要有一个节点安装了无线模块，则该分支的中继节点也必须安装无线模块，才有可能起到改善链路通信效果的目的；

然而,如果该分支的中继节点安装了无线模块,则允许的K个普通节点都不安装无线通信模块.因此对所有中继节点来说共有2^N-1种可能的配置情况,对应每种情况,K个普通节点有2^K种部署方案,因此动态规划算法的时间复杂度为$O([2^N-1]2^K)$,即$O(2^{K+N})$.在分析案例中,$K=2$,因此总时间复杂度为$O(2^{N+2})$.

4　实验验证与结果分析

4.1　实验环境配置

构建了一个包含50个分支的双树拓扑结构,每个分支由1个中继节点和2个普通节点组成,共计150个节点(不包括集中器).不失一般性,假设中继节点和普通节点安装双模通信模块的成本为150.无线通信频率为500 MHz,发射机的高度为1.5 m,接收机的高度为2 m,权重系数b为0.5.同时,将对部分变量进行均匀随机采样,具体采样范围详见表6.

在算法实现方面,基于PyTorch框架设计DDPG算法.演员网络和评论家网络均采用四层全连接神经网络,包含两个隐藏层.在线演员神经网络和目标演员神经网络结构相同,两层隐藏层神经元数量分为512和128;在线评论家神经网络和目标评论家神经网络结构相同,两层隐藏层神经元数量分为512和256.激活函数方面,在线及目标演员神经网络的输出层采用Sigmoid函数,其他层均采用ReLu函数.网络参数优化采用自适应矩估计(Adaptive Moment Estimation,Adam)方法,其中在线演员神经网络和目标演员神经网络的学习率分别为0.000 01和0.000 1;在线评论家神经网络和目标评论家神经网络的软更新率为0.01.经验缓冲区的大小R_B为50 000,奖励折扣设为0.95,单次采样批次大小为64.需要指出的是,神经网络对超参数较为敏感,所采用的超参数均通过反复试验调参确定.

表6　部分变量取值范围

Tab.6　Value ranges of selected variables

参数名称	取值	参数名称	取值
使用时间/年	1～30	发射机高度/m	1.5
发射功率/dB	16～32	接收机高度/m	2
普通节点与中继节点距离/m	5～15,50～150	中继节点与集中器距离/m	20～30,200～300
端接阻抗/Ω	20～30	权重系数	0.5
L/(μH/m)	0.96	C/(pF/m)	17.5
无线通信频率/MHz	500	$RF_{存}$/Ω	9.34

4.2　DDPG算法仿真与分析

本节对所提算法的性能进行分析.首先,针对DDPG算法中关键的超参数——神经网络学习率,开展参数优化配置的探索研究;其次,将本文提出的无线微功率模块部署方案与3种基线策略进行对比,通过实验仿真验证所提算法设计方案在实际场景中的优越性与可行性.

4.2.1　算法收敛性能

DDPG算法在不同神经网络学习率下的收敛性能如图5所示,其中算法中的奖励为信号强度衰减率的倒数.由图5可知:随着迭代次数的增加,在不同学习率下本研究方案奖励值均逐渐收敛到一个稳定值,这证明了所提算法的有效性;通过对神经网络设置不同的学习率,发现分别设置演员神经网络学习率(actor_lr)和评论家神经网络学习率(critic_lr)为0.000 01和0.000 1时,算法能够收敛至更优的结果.因此,在后续仿真过程中采用该学习率设置.

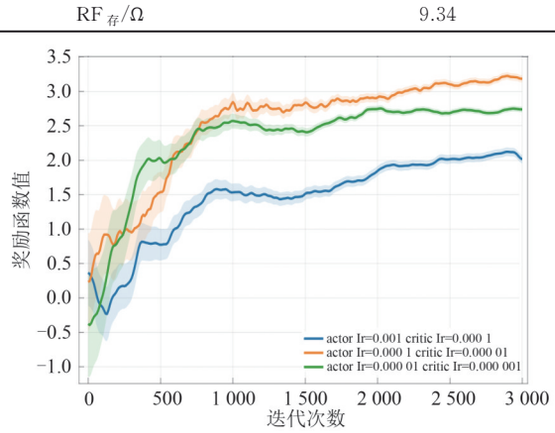


图5　DDPG算法收敛效果图

Fig.5　Convergence of DDPG algorithm

4.2.2　算法性能及方案对比

DDPG算法通过部署双模设备,最大化提升智能配电网网络通信水平.为了探究本文设计方案的有效性,将本研究方案与其他基准方案进行对比.

方案1:将所有的双模模块优先部署在PLC通信性能较差的节点处.

方案2:将所有的双模模块优先安装在无线通信性能更优的节点处.

方案3:随机部署双模模块.

在近距离通信场景和远距离通信场景中部署不同数量的双模设备时，已有智能电表总数对配电网系统性能的影响如图 6 和图 7 所示．由图 6 和图 7 可知：由于在智能电表增多的过程中，产生了两种通信方式性能相差更大的部署位置，相比于基准方案，随着系统中网络规模的增大，所提部署方案的提升优势越明显；在基准方案 1 中，尽管将双模设备部署到通信性能较差的位置能够有效提升系统的通信性能，但是 PLC 通信性能非常差时，相应的位置无线通信通信性能也很差，即使部署了双模设备，对性能提升依然非常有限，因此基准方案 1 的性能差于所提方案性能；基准方案 2 将双模设备优先部署到无线通信性能更优的电表节点处，一定程度上有效提升系统性能，但由于 PLC 传输性能较差的位置未进行改善，因此基准方案 2 性能差于基准方案 1；在基准方案 3 中，随机部署方案很难使得模块被部署至 PLC 通信性能较差且无线通信通信性能更优的位置；在部署相同数量双模设备的条件下，随着普通节点及中继节点与集中器之间距离的增大，4 种方案的系统性能均有不同程度的下降，但基于 DDPG 算法的部署方案仍能保持较优的通信性能，表现出良好的鲁棒性．综上所述，所提出的双模节点部署方案在不同场景下均具有有效性，且在网络规模增大时性能提升更为显著．

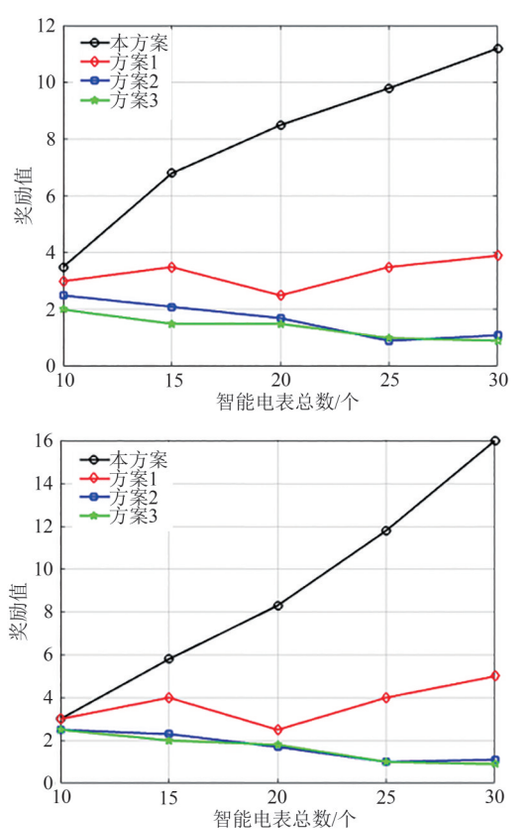


图 6　近距离通信场景下部署双模设备数量对性能的影响（普通节点与中继节点的距离为 5~15 m、中继节点与集中器距离设置为 20~30 m 时）

Fig.6　Impact of the number of deployed dual-mode devices on performance in short-range communication scenarios (distance between ordinary and relay nodes is 5-15 m; distance between relay nodes and the concentrator is 20-30 m)

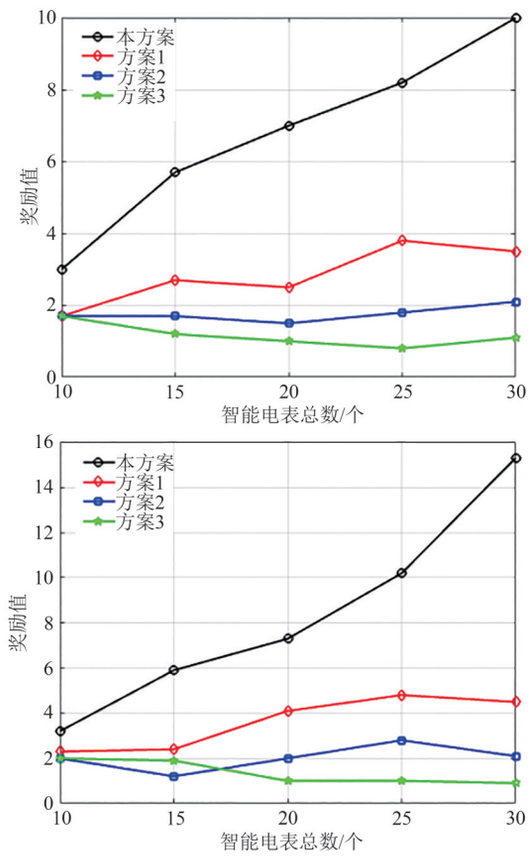


图 7　远距离通信场景下部署双模设备数量对性能的影响（普通节点与中继节点的距离为 50~150 m、中继节点与集中器距离设置为 200~300 m 时）

Fig.7　Impact of the number of deployed dual-mode devices on performance in long-range communication scenarios (distance between ordinary and relay nodes is 50-150 m; distance between relay nodes and the concentrator is 200-300 m)

4.3　动态规划算法仿真与分析

本节仿真基于动态规划的成本受限最佳部署算法的性能．

4.3.1　部署双模设备数量对于目标函数的影响

当权重系数分别为 0.2、0.5 和 0.8 时，双模模块部署数量对目标函数的影响如图 8 所示．由图 8 可知：①可部署双模设备数量与目标函数之间大致呈现目标函数值随着可部署模块预算的增加先下降再上升的趋势，说明部署双模模块能够有效降低信号强度衰减率，提升系统可靠性．②当目标函数中权重系数为 0.5 时，目标函数最小值对应的可部署双模

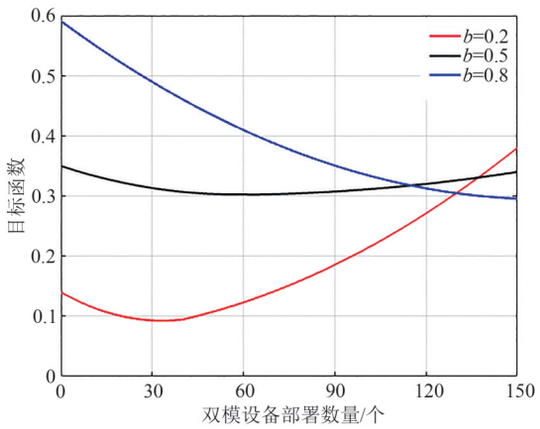


图 8　仿真结果图

Fig.8　Simulation results

设备数量为 64,说明当可部署模块超过 64 个时,边际效益递减,导致成本上升主导目标函数变化,同时信号强度衰减率的下降幅度也相应减少.③当权重系数降低时,主导变化趋势的是双模设备的部署成本,目标函数最低点对应的可部署双模设备数量小于系数为 0.5 的情况,说明权重系数的降低导致部署成本占比增加,部署成本的增加提前达到了边际效应;对应权重系数大于 0.5 的情况,成本占比较小,增加双模部署数量时对信号变化率改善效果在双模数量更多时达到边际效应.因此,二者权衡可以得出最佳部署数量不是越多越好,需要合理设计.

双模模块具体的部署结果如表 7 所示.其中中继节点按顺序依次编号为 1～50,第 n 个中继节点连接的两个普通节点分别表示为 $n.1$ 和 $n.2$,在此情况下,最优的双模设备部署数量为 64 个,具体的位置由黑色加粗字体标示.

4.3.2　性能比较

为了更全面地评估本方案的性能优势,本节将所提出方案与以下两种基准方案进行对比分析.

方案 1:随机(Random)方案,在总预算范围内,随机选择部署双模设备的位置.

方案 2:中间优先(Intermediate First)方案,在总预算范围内,优先为最优的中继节点部署双模设备,然后随机选取普通节点所在位置部署双模设备.

不同方案下双模设备部署数量对目标函数值的影响如图 9 所示.由图 9 可知:随着双模设备部署数量的增加,所提方案的目标函数值均低于随机部署和基准动态规划方案,如当部署 60 个双模模块时,目标函数值分别降低了 6.8% 和 3.8%,证明了所提方案的优越性;当部署 60 个双模模块时,所提方案的目标函数值最小,实现了成本与系统可靠性的最佳权衡.

表 7　最优部署方案表

Tab.7　Table of optimal deployment scenarios

中继节点标号	普通节点 1($n.1$)	普通节点 2($n.2$)	中继节点标号	普通节点 1($n.1$)	普通节点 2($n.2$)
1	1.1	1.2	**26**	**26.1**	26.2
2	2.1	**2.2**	**27**	27.1	**27.2**
3	3.1	3.2	**28**	**28.1**	28.2
4	4.1	4.2	29	29.1	29.2
5	**5.1**	**5.2**	**30**	**30.1**	**30.2**
6	6.1	**6.2**	**31**	31.1	31.2
7	7.1	**7.2**	**32**	32.1	32.2
8	**8.1**	8.2	33	33.1	33.2
9	**9.1**	9.2	34	34.1	34.2
10	10.1	10.2	35	35.1	35.2
11	**11.1**	11.2	36	36.1	36.2
12	**12.1**	12.2	**37**	37.1	37.2
13	13.1	**13.2**	**38**	**38.1**	**38.2**
14	14.1	14.2	**39**	39.1	39.2
15	15.1	**15.2**	40	40.1	40.2
16	16.1	16.2	**41**	**41.1**	41.2
17	**17.1**	17.2	**42**	42.1	**42.2**
18	18.1	18.2	**43**	43.1	43.2
19	19.1	**19.2**	**44**	**44.1**	**44.2**
20	20.1	**20.2**	**45**	45.1	45.2
21	21.1	21.2	**46**	46.1	**46.2**
22	**22.1**	**22.2**	**47**	47.1	**47.2**
23	23.1	23.2	48	48.1	48.2
24	24.1	24.2	**49**	49.1	49.2
25	25.1	25.2	50	50.1	50.2

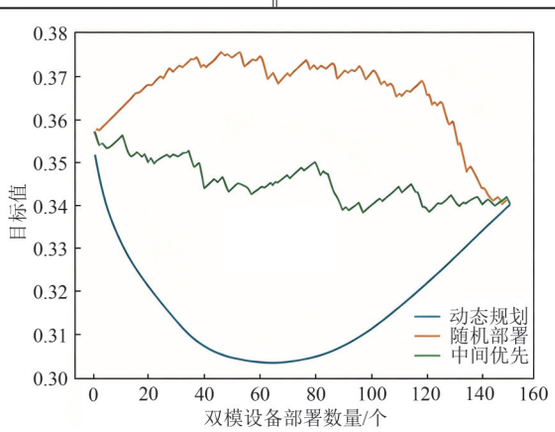


图 9　方案对比图

Fig.9　Comparison of different schemes

5　结论

1)针对配电网面临的成本与性能之间的权衡问题,研究了有限成本下双模设备的最佳部署方案.本文考虑电力线故障因素,以信号强度衰减率期望和成本为目标构建优化问题,运用 DP 算法和 DDPG 算法求解出最佳部署方案,包括最佳部署个

数和最佳部署位置.

2）使用PyCharm搭建了仿真平台，得出了最佳部署方案，能够在有限成本预算内提升系统可靠性，实现配电网场景通信性能的最大化提升，为保障智能交通系统的电力监控数据的高效传输提供了新的思路.研究结果表明，当部署60个双模模块时，与随机方案和中继节点优先方案相比，动态规划方案的目标函数值分别降低了6.8%和3.8%，证明了本文所提方案的有效性.

研究工作主要围绕在有限成本约束下的双模通信节点部署优化方法，具有一定实用价值，但还有进一步优化的空间.因此，未来研究可以将本文提出的基于DDPG算法的最佳部署方案应用于半实物仿真平台或实际平台中，验证其在真实复杂配电网环境中的适应性与鲁棒性.

参考文献(References)：

[1] 耿达，杨林.智能电网技术在电网监控系统中的应用[J].通信电源技术，2020，37(1)：157－158.
GENG Da，YANG Lin. Application of smart grid technology in power grid monitoring system[J]. Telecom Power Technology，2020，37(1)：157－158.(in Chinese)

[2] 吕国远.基于智能电网下电力信息通信技术研究分析[J].信息通信，2019，32(11)：136－138.
LV Guoyuan. Research and analysis of power information communication technology based on smart grid[J]. Information & Communications，2019，32(11)：136－138.(in Chinese)

[3] 汪德寿.智能配电网中通信传输技术的应用分析[J].中国新通信，2024，26(11)：16－18.
WANG Deshou. Application analysis of communication transmission technology in intelligent distribution network[J]. China New Telecommunications，2024，26(11)：16－18.(in Chinese)

[4] 胡江溢，祝恩国，杜新纲，等.用电信息采集系统应用现状及发展趋势[J].电力系统自动化，2014，38(2)：131－135.
HU Jiangyi，ZHU Enguo，DU Xingang，et al. Application status and development trend of power consumption information collection system[J]. Automation of Electric Power Systems，2014，38(2)：131－135.(in Chinese)

[5] 张少敏，王志男，王保义.基于可信计算的用电信息采集终端完整性检测方案[J].电力自动化设备，2017，37(12)：60－66.
ZHANG Shaomin，WANG Zhinan，WANG Baoyi. Terminal integrity detection scheme of electricity information acquisition system based on trusted computing[J]. Electric Power Automation Equipment，2017，37(12)：60－66.(in Chinese)

[6] CAO X M，LU W K，CHEN P，et al. Research on real-time monitoring technology of power quality in distributed smart grid[C]//2024 6th International Conference on Energy Systems and Electrical Power (ICESEP). Wuhan，2024：790－794.

[7] 李宗恩，周程远，张慧群，等.HPLC技术在用电信息采集系统中的应用[J].大众用电，2022，37(4)：32－33.
LI Zongen，ZHOU Chengyuan，Li Zongene，ZHANG Huiqun，et al. Application of HPLC technology in electricity information collection system[J]. Popular Utilization of Electricity，2022，37(4)：32－33.(in Chinese)

[8] 郭雨龙.用电侧停电信息监控方案的研究与实现[D].西安：西安工程大学，2021.
GUO Yulong. Research and implementation of power side outage information monitoring scheme[D]. Xi'an：Xi'an Polytechnic University，2021.(in Chinese)

[9] 吴佳伟.智能配电网中通信传输技术的应用研究[D].上海：上海交通大学，2010.
WU Jiawei. Research on application of power communication in intelligent distributed network with distributed generation[D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2010.(in Chinese)

[10] MUDRIIEVSKYI S. Power line communications：State of the art in research，development and application[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications，2014，68(7)：575－577.

[11] 王阳.配电网电力线载波信道建模与特性分析[D].北京：华北电力大学，2021.
WANG Yang. Channel modeling and characteristic analysis of power line communication in distribution network[D]. Beijing：North China Electric Power University，2021.(in Chinese)

[12] 王杨.基于电力线通信的电缆老化联合监测方法研究[D].西安：西安理工大学，2023.
WANG Yang. Research on joint monitoring method for cable aging based on power line communication[D]. Xi'an：Xi'an University of Technology，2023.(in Chinese)

[13] 吴道平.电力线载波通信技术在用电信息采集系统中的应用[J].电子科学技术，2016，3(4)：410－412.
WU Daoping. Application of power line carrier communication technology in electric information acquisition system[J]. Electronic Science & Technology，2016，3(4)：410－412.(in Chinese)

[14] 陈光胜.异构双模通信技术的分析与展望[J].电子技术，2024，53(1)：100－103.

CHEN Guangsheng. Analysis and prospect of heterogeneous dual-mode communication technology[J]. Electronic Technology, 2024, 53(1): 100－103. (in Chinese)

[15] 孙永民. 面向用电信息采集的双模通信组网与接入技术研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2020.
SUN Yongmin. Research of networking and access technology for dual-model communication of power information acquisition system[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020. (in Chinese)

[16] 王书林, 苗兴, 朱德良, 等. 基于用电信息采集系统的双模通信技术研究[J]. 科技创新与生产力, 2024, 45(10): 101－106.
WANG Shulin, MIAO Xing, ZHU Deliang, et al. Research on dual-mode communication technology based on power consumption acquisition system[J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2024, 45(10): 101－106. (in Chinese)

[17] FAN H C, LI W X, ZHU S J, et al. RSSI-adaptive local dual-mode communication for the Internet of Things in power distribution[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2024, 9: 20231231.

[18] 付志达, 闫冠峰, 丁浩, 等. 高速电力线载波和微功率无线双模通信在配电台区的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(6): 50－56.
FU Zhida, YAN Guanfeng, DING Hao, et al. Application of HPLC and RF dual-mode communication in distribution transformer area[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(6): 50－56. (in Chinese)

[19] 李新家, 宋煜, 祝永晋, 等. 一种台区本地双模通信网络信道与中继节点选择方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(4): 194－198.
LI Xinjia, SONG Yu, ZHU Yongjin, et al. A channel and relay node selection method for local dual-mode communication network in station area[J]. Automation & Instrumentation, 2021(4): 194－198. (in Chinese)

[20] 陆欣, 任学荣, 赵金玉, 等. 电力线双模通信技术的测试与评估方法研究[J]. 电工技术, 2024(16): 227－230.
LU Xin, REN Xuerong, ZHAO Jinyu, et al. Study on test and evaluation methods of power line dual-mode communication technology [J]. Electric Engineering, 2024(16): 227－230. (in Chinese)

[21] GUAIANA S, ARTALE G, CATALIOTTI A, et al. A data communication redundant solution based on RF and PLC systems for smart grid applications[C]//2024 IEEE 14th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS). Caserta, 2024: 1－6.

[22] DING Q F, SHI H, LUO J. Adaptive secure transmission based on collaborative communication in smart grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 823－832.

[23] PAU M, GINOCCHI M, PACHECO D, et al. A meter placement strategy for distribution grids based on cost-benefit analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1004812.

[24] ALDAHMASHI J, MA X D. Real-time energy management in smart homes through deep reinforcement learning[J]. IEEE Access, 2024, 12: 43155－43172.

[25] 周忠国, 李尤, 肖思思, 等. 配电网络规划方法装置电子设备及存储介质: CN2023112867153[P]. 2024-02-02.
ZHOU Zhongguo, LI You, XIAO Sisi, et al. Method, device, electronic equipment, and storage medium for distribution network planning: CN2023112867153[P]. 2024-02-02.(in Chinese)

[26] 蔺莹. 城市地形对电波传播的影响及传播模型的修正[J]. 甘肃联合大学学报(自然科学版), 2007, 21(4): 52－55.
LIN Ying. Effect of city terrain on propagation and correction in propagation model[J]. Journal of Gansu Lianhe University (Natural Sciences Edition), 2007, 21(4): 52－55. (in Chinese)