

基于优化蚁群算法的配电通信网资源均衡分配方法

包正睿¹ 王海¹ 袁平亮¹

BAO Zhengrui WANG Hai YUAN Pingliang

摘要

为确保电力系统的稳定运行和高效管理,文章提出了一种基于优化蚁群算法的配电通信网资源均衡分配方法。通过对配电通信网网络结构进行了分析,确定网络计算节点的实际布局以及用户终端设备的计算能力。在此基础上,采用优化蚂蚁算法,实现最小延迟与能量消耗的网络资源平衡配置,并建立配电网资源平衡配置模型。最后,对上述模型进行求解,实现配电通信网的资源均衡分配。实验结果表明:基于优化蚁群算法的配电通信网资源均衡分配方法不仅提高了资源分配的效率,还确保了网络的稳定性和可靠性。

关键词

资源分配; 电力系统; 均衡分配; 配电通信网; 优化蚁群算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.07.018

0 引言

配电通信网作为智能电网中不可或缺的一个组成部分,其资源分配问题正变得日益关键。在实际操作过程中,由于网络资源的有限性以及需求的不可预测性,如何实现资源的均衡分配已经成为一个迫切需要解决的难题。传统的资源分配方法通常依赖于一些固定的规则和算法,这些方法在面对复杂多变的网络环境时往往显得力不从心。特别是在配电通信网的背景下,由于网络节点的多样性以及通信需求的动态变化,传统的资源分配方法往往无法实现理想的均衡分配效果。因此,寻找一种更加智能化、效率更高的资源分配方法变得尤为关键。

文献[1]开发了一个基于云平台的光网络通信数据交互模型,运用改良的粒子群算法评估光通信网络信道节点的适应度,选出信道内的连通节点,并解决了信道动态邻域决策函数的问题,以实现信道资源的均衡分配。然而,该方法的分配效率有待提升。文献[2]则着眼于最小化最大占用频隙号,构建了串扰优化模型,并应用分布式机器学习中的双鱼算法求解,旨在提升纤芯传输质量。该文献采用频谱切片方法进行弹性光网络资源的分配,计算资源碎片率,并据此为业务分配频谱-时间资源窗口,实现资源均衡,但其分配效果并不理想。

鉴于此,本研究针对配电通信网的特点和需求,融合蚁群算法的理念,实现了资源的智能高效分配。通过引入优化策略,本方法不仅加速了算法的收敛,还提高了求解精度,

确保了资源分配的均衡与合理。本研究提出的方案,通过模拟蚁群寻找食物的行为,利用信息素的正反馈机制,动态调整资源分配策略,从而达到优化资源利用的目的。此外,本研究还考虑了网络负载的实时变化,通过实时监控网络状态,动态调整资源分配,以适应网络负载的波动,进一步提高了资源分配的灵活性和适应性。

1 基于优化蚁群算法的配电通信网资源均衡分配方法的设计

1.1 配电通信网网络结构的分析

配电通信网在实现配电自动化的过程中扮演着至关重要的角色。不仅确保了电力系统的高效运行,而且对于提升电网的智能化水平和可靠性具有不可替代的作用。目前,配电自动化技术正受到广泛关注和深入研究。研究者们将目光聚焦在多个关键领域,包括但不限于配电通信网络的架构设计、高压电力设备的智能控制技术,以及网络服务质量的优化提升等方面。

图1展示了配电通信网的整体架构,作为一个复杂而精细的系统,由多个关键部分组成。这些部分包括配电主站系统,作为整个网络的控制中心,负责统筹和调度;综合接入平台,为不同类型的设备和系统提供接入接口;骨干层通信网络系统,作为网络的主干,确保数据的高速传输;接入层通信网络系统,直接连接配电站与配电终端,是实现终端设备接入的关键环节以及综合网管系统,负责整个通信网络的监控和管理。接入层通信网络系统的作用尤为关键,因为直接关系到配电站与配电终端之间的通信效率和稳定性,是确保电力系统可靠运行的基础。基于此,配电通信网的特点如下:

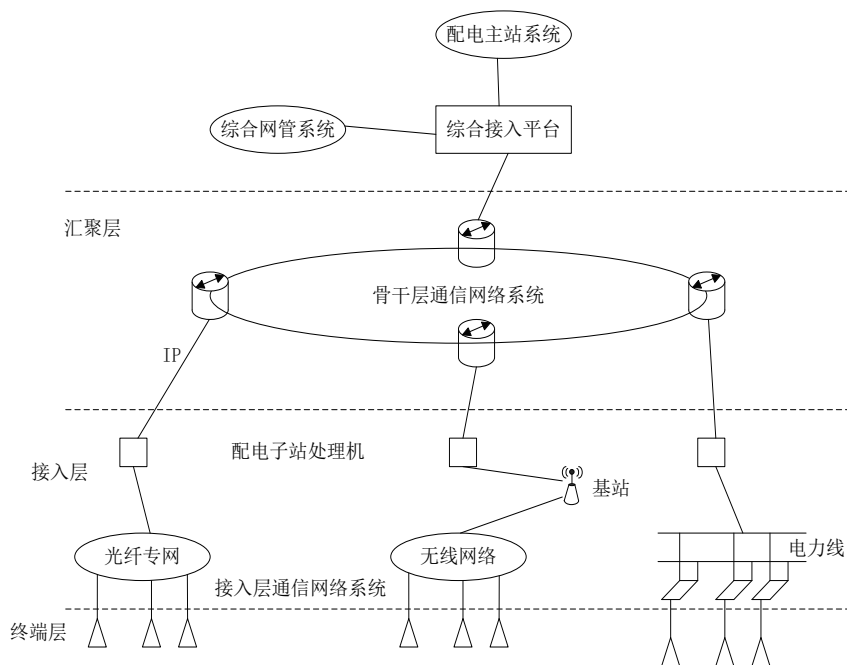


图1 配电通信网网络结构

(1) 业务多样性：在当前的电力系统中，配电通信网承载了多种业务，这些业务包括但不限于配电自动化系统，智能电表的远程读取与管理，配电监控系统以实时监控电网状态，储能系统以平衡电网负荷，微网系统以优化分布式能源的使用，以及电动汽车充电桩的智能管理等。

(2) 覆盖面积广泛：配电通信网作为智能电网的重要组成部分，其主要职责是作为接入层，确保能够连接到每一个终端用户。因此，必须具备广泛的覆盖能力，以覆盖从城市到乡村的每一个角落，确保无论用户身处何地，都能享受到智能电网带来的便利。

(3) 组网方式多样：为适应不同环境和需求，配电通信网采用了多种组网方式，主要包括电力线载波通信网、无线通信技术以及光纤通信技术。每种技术均具备特有的优点与限制，故在实际操作中，需依据具体的应用场景及需求来挑选最适宜的组网方案。然而，由于配电通信网的智能化需求日益增长，单一的组网技术往往难以满足所有需求，这就要求我们采取多种技术相结合的方式来构建一个更加智能、可靠和高效的通信网络。

(4) 终端设备分布广泛：配电通信网所覆盖的终端设备数量庞大，这些设备分布于电网的各个角落，从城市到乡村，从家庭到工业区。由于地理环境和用户需求的差异，这些终端设备的分布密度存在显著的不平衡现象。这就要求配电通信网在设计 and 实施时，必须考虑到这种分布的不均匀性，以确保网络的稳定性和可靠性。

1.2 基于优化蚁群算法构建资源均衡分配模型

通过分析上述配电通信网的网络结构，能够了解到网络

计算节点的实际布局以及用户终端设备的计算能力^[3]。基于此，本文采用优化后的蚁群算法来设计资源均衡分配方案，以最小化时延和能耗，从而构建一个配电通信网的资源分配模型。

在接入层通信网络系统中，不同本地终端与配电子站处理机提出的服务请求在能耗和时延上各有差异。为了分析配电子站处理机的时延和能耗，设定：在第*i*个无线网络中，于特定时隙*t*内，分配给本地终端的计算资源占比为 $Q_i(t)$ ，而本地终端未加以利用的资源占比则为 $1-Q_i(t)$ 。基于这一设定，可以推导出资源分配给本地终端所引发的时延 δ_1 的表达式为：

$$\delta_1 = \frac{[1-Q_i(t)]A_iW_i}{\chi_1} \quad (1)$$

式中： χ_1 代表本地终端的计算能力； A_i 代表分配给本地终端的无线网络计算资源量； W_i 代表本地终端在处理每单位资源时所需的中央处理器周期。

为使计算简单，假设配电网中各用户具有固定的CPU工作频率，并且其能量消耗只与用户端服务器的CPU有关。由此，可直接使用有关公式来计算局部终端的能量消耗 E_1 ，表示为：

$$E_1 = \delta_1(t) \times R_1 \quad (2)$$

式中： R_1 代表本地终端的CPU运转功率。

配电子站的处理机计算能力强大，在分配网络资源过程中，会考虑资源传输所需的时间延迟，以及将处理结果反馈至网络节点的延迟。因此，资源时延 δ_2 的计算公式可以表示为：

$$\delta_2 = \sum \frac{Q_i(t)W_i(t)}{v_i(t)} + \sum \frac{Q_i(t)W_i(t)}{\chi_2} \quad (3)$$

式中： χ_2 代表配电子站处理机的计算能力； $v_i(t)$ 代表网络计算资源在时隙*t*由配电主站传输至配电子站处理机的传输速率。

配电子站处理机在分配网络计算资源时，能耗 E_2 由两部分组成：一是资源传输到配电子站处理机的能耗，二是处理机执行计算任务时的能耗，计算公式为：

$$E_2 = \sum e_1 + \sum e_2 \quad (4)$$

式中： e_1 、 e_2 分别代表边缘服务器进行计算任务产生的能耗、网络计算资源传输至边缘服务器的能耗。

在深入探讨了蚁群算法的原理和应用之后，本文将着重于对蚁群算法进行进一步的优化分析。蚁群算法是一种

模拟自然界蚂蚁觅食行为的启发式算法，通过模拟蚂蚁在寻找食物过程中释放和追踪信息素的机制，来寻找图中从起点到终点的最优路径。在这一过程中，蚂蚁在探索路径时会释放信息素，这些信息素作为标记留在路径上，为后续的蚂蚁提供行进方向的指引。蚂蚁倾向于沿着信息素浓度较高的路径前进，可以有效地找到从食物源返回蚁巢的最短路径^[4]。值得注意的是，信息素的感知并非仅限于释放蚂蚁，其他蚂蚁也能感知到这些信息素，并且随着时间的推移，信息素会逐渐挥发和消散。所以，由于信息素的逐步累积，越近的路径就越明显，从而吸引了更多的蚁群。这种正反馈机制使得路径上的蚂蚁数量和信息素浓度之间形成了一种相互增强的关系。随着时间的推移，越来越多的蚂蚁会聚集在信息素浓度最高的路径上，最终几乎所有的蚂蚁都会选择这条最短的路径，从而在蚁群中形成一条从食物源到蚁巢的高效通道。

在优化蚁群算法的工作过程中，设定当前迭代次数为 p ，进入第 $p+1$ 次迭代时，搜索范围设定为 w_{p+1} 。每次迭代结束后，会执行信息素的局部更新步骤，其更新公式为：

$$y \leftarrow (1-l)y + \sum_{p+1}^{w_{p+1}} \Delta y \quad (5)$$

式中： y 代表信息素； l 代表蚂蚁选择最优移动方式的概率； Δy 代表信息素的挥发度。

优化蚁群算法最成功的就是运用在资源分配问题上，因此，本文运用优化蚁群算法对资源均衡分配模型的构建进行设计，该模型的表达式为：

$$f = \min y[-\phi(E_1 + E_2) - \varphi(\delta_1 + \delta_2)] \quad (6)$$

式中： f 代表在最小化网络计算资源分配中的能耗与时延的目标函数； ϕ 、 φ 分别代表用于衡量能耗与时延优化在整体目标中所占的比重。

在建立资源平衡配置模型时，本文将以降低能量消耗、降低延迟为目标的混合蚁群算法来实现资源配置优化。

1.3 基于模型求解的配电通信网资源均衡分配

基于上述构建的模型，本文将对其进行求解，进而实现配电通信网的资源均衡分配。

考虑到网络资源平衡配置是一类完备的多项式不确定性问题，采用穷举方法解决的计算复杂性较高，难以应用到现实中^[5]。在此基础上，提出了一种基于遗传算法的配电网资源平衡配置模型，并对其进行了求解，其可行解的表达式为：

$$X = \begin{bmatrix} 1, 2, \dots, u, \dots, U \\ h_1, h_2, \dots, h_u, \dots, h_U \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： h_u 代表分配到网络使用者 u 的运算资源，包含副载波、功率等资料； U 代表整个配电网网络使用者数目。

与此同时，将真实的可变数据引入到无线网络的资源平衡分布模型中，通过对遗传算法的初始化，实现了对系统的初始化。然后，对模型的约束进行检验，剔除不符合式(7)的解，生成新的群体。然后，按照群体中各方案的优劣顺序，将最佳方案放在第一个位置，其他方案按此顺序进行。最后，对最优方案进行验证。当终止条件满足时，该算法终止，并输出一个最佳的结果；若不满足，则通过对其进行交叉、突变等操作，产生新一代的群体，如此反复，直到其满足终止条件，才能获得最优解并输出，最终实现配电网资源的最优平衡配置。

2 实验测试与分析

2.1 实验准备

为证明基于优化蚁群算法的配电通信网资源均衡分配方法的有效性，现进行实验测试，本次实验选取文献[1]和文献[2]中提及的两种常见分配算法作为参照，用以评估本文所提出的优化蚁群算法在解决均衡分配问题上的性能，本次实验的具体配置参数如表1所示。

表1 实验参数

配置	参数
网络区域	圆形区域，半径为 250 m
用户业务延迟需求	60 s
基站 / 用户	80 个 / 40 户
用户业务数据需求	0.2 MB~ 120 MB
用户移动速度	1.5~ 2.5 m/s
发射功率	30 dBm
网络带宽	20 MHz

同时，本次测试采用资源利用率和网络能耗作为评估指标，对前述方法的资源均衡分配设计方案进行了考量。资源利用率(RUB)的提升，意味着配电通信网的资源得到了更有效地利用。RUB计算公式为：

$$RUB = \frac{\sum_{j \in J} |C_j|}{\sum_{j \in J} (|C_j| + |K_j|)} \quad (8)$$

式中： $|C_j|$ 代表链路 j 中的工作频谱隙的数量； J 代表网络链路集合； $|K_j|$ 代表保护频谱隙的数量。

网络能耗是衡量配电通信网资源分配效率的一个直观指标：能耗越高，通常意味着资源分配的效果不理想，反之，能耗越低，则往往反映出资源得到了更有效的分配。

2.2 实验结果与分析

基于上述实验准备,3种方法的资源利用率测试结果如图2所示。

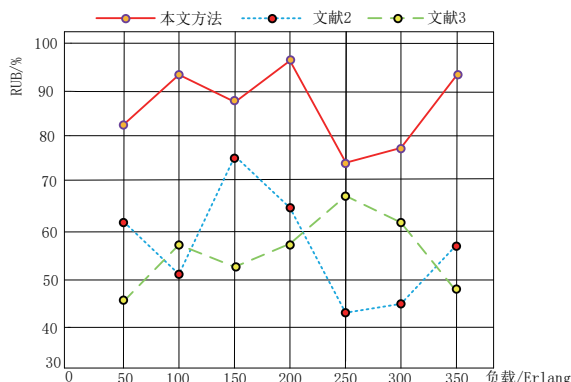


图2 资源利用率测试结果

由上述测试结果可知,与另外两种方法相比,本文所提方法在资源利用率方面显著更优,证明了该方法在配电通信网资源分配中能有效提升资源的使用效率。

其次,3种方法在分配过程中产生的网络能耗如图3所示。

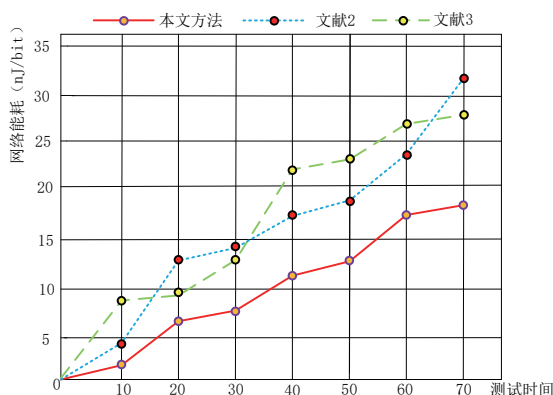


图3 网络能耗测试结果

根据上述测试结果可以看出,本文方法产生的能耗远低于其余两种方法。

经过深入分析和实验验证,可以得出结论,即基于优化蚁群算法的配电通信网资源均衡分配方法在实际应用中展现出了卓越的性能。这一方法通过精细地调整和优化,显著提升了资源分配的效率,同时确保了整个网络的稳定运行和高度可靠性。进一步,该优化蚁群算法展现了极佳的适应性和灵活性,能够轻松应对不同规模和复杂度的配电通信网络。因此,可以预见,优化蚁群算法在配电通信网资源均衡分配这一领域将拥有非常广阔的应用前景和潜力。

3 结语

本研究聚焦于基于优化蚁群算法的配电通信网资源均衡分配方法,旨在为配电通信网的资源管理提供一种创新的

解决方案,并通过实际应用案例验证了该方法的可行性和有效性。蚁群算法,作为一种模拟进化算法,其独特的启发式搜索机制和信息正负反馈机制,赋予了该方法在解决复杂组合优化问题时的显著优势。通过深入研究和改进蚁群算法,研究者们成功地将其应用于配电通信网的资源均衡分配问题中,实现了网络资源的优化配置,从而显著提升了网络的整体性能和稳定性。实验结果清晰地展示了该方法在减少网络拥塞、提高资源利用率以及降低运营成本等方面取得的显著成效。此外,本研究还进一步探讨了蚁群算法在配电通信网规划中的其他潜在应用,例如在故障恢复策略中的应用,为后续的研究工作奠定了坚实的基础。随着技术的不断进步和算法的持续优化,预计蚁群算法将在配电通信网资源管理领域发挥更加重要的作用。综上所述,基于优化蚁群算法的配电通信网资源均衡分配方法是一项具有创新性和实用性的研究成果,对于推动配电通信网的智能化、高效化发展具有深远意义。

参考文献:

- [1] 廖俊东,刘丹.基于云计算平台的光通信网络信道均衡分配方法[J].激光杂志,2023,44(9):161-165.
- [2] 甘朝松,单桂娟,徐洪敏.基于分布式机器学习的弹性光网络资源均衡分配研究[J].激光杂志,2024,45(11):139-144.
- [3] 魏德宾,王英杰,梁超.卫星网络混合负载均衡策略下的多径流量分配算法[J].计算机工程与设计,2024,45(6):1654-1660.
- [4] 孙雨潼,毕美华,习雨,等.用于带限DML-IMDD系统中的深度神经网络均衡器简化方案[J].光通信技术,2023,47(4):73-78.
- [5] 欧阳远江,张倩武,黄烨恬,等.基于MIMO预均衡的模分复用无源光网络模式间串扰的消除方法[J].中国激光,2023,50(6):131-140.

【作者简介】

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。

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

(收稿日期:2025-02-19 修回日期:2025-07-10)