

基于蚁群算法的多跳无线网络 非均匀节点部署算法

蒋 成

(湖北工程学院 计算机与信息科学学院, 湖北 孝感 432000)

摘要: 针对多跳无线网络中节点分布不均匀导致网络覆盖范围不全面, 不均匀节点的位置和密度增大部署的复杂性, 最优节点搜索易陷入局部最优解的问题, 提出一种基于蚁群算法的多跳无线网络非均匀节点部署算法。首先, 获取最小化加权距离决策变量, 降低 Sink 节点到各传感器间的传输距离; 其次, 计算节点消耗的能量, 最小化节点网络损耗, 构建节点部署优化模型, 引入折中规划方法将多目标模型进行单目标化处理; 最后, 引入蚁群算法对模型求解, 能有效遍历潜在解空间, 快速找到较优的部署方案。实验结果表明, 该算法的网络覆盖率为 97%, 能量消耗最高仅为 1.56×10^{-7} J, 能有效降低网络能量消耗, 生存周期达 1 500 轮, 可获取最佳节点部署方案。

关键词: 蚁群算法; 多跳无线网络; 非均匀节点; 节点部署

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2025)04-1157-07

Non-uniform Node Deployment Algorithm for Multi Hop Wireless Networks Based on Ant Colony Algorithm

JIANG Cheng

(School of Computer and Information Science, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, Hubei Province, China)

Abstract: Aiming at the problem that uneven distribution of nodes led to incomplete network coverage, the uneven position and density of nodes increased the complexity of deployment, and the search for the optimal node was prone to getting stuck in local optimal solutions in a multi hop wireless network, the author proposed a non-uniform node deployment algorithm for multi hop wireless network based on ant colony algorithm. Firstly, the author obtained the minimum weighted distance decision variable to reduce the transmission distance between Sink nodes and various sensors. Secondly, the author calculated the energy consumption of nodes, minimized node network loss, constructed a node deployment optimization model, and introduced compromise planning method to expand the multi-objective model into a single objective processing. Finally, the author introduced ant colony algorithm to solve the model, which could effectively traverse the potential solution space and quickly find the optimal deployment plan. The experimental results show that the network coverage of proposed algorithm is 97%, with a maximum energy consumption of only 1.56×10^{-7} J, which can effectively reduce network energy consumption. The survival cycle can reach up to 1 500 rounds, and the optimal node deployment plan can be obtained.

Keywords: ant colony algorithm; multi hop wireless network; non-uniform node; node deployment

收稿日期: 2024-03-12.

作者简介: 蒋 成(1982—), 男, 汉族, 硕士, 高级实验师, 从事计算机网络的研究, E-mail: xabrejiang49@126.com.

基金项目: 湖北省教育科学规划项目(批准号: 2021GB072).

在实际应用环境中,无线节点的分布通常是不均匀的,例如,在农村、城市边缘或人口稀少的区域,由于地理条件、资源限制或人口分布等原因,节点的密度会不同^[1-2].这种非均匀节点部署会对多跳无线网络的性能和效能产生重要影响.非均匀节点部署导致网络覆盖范围的不平衡以及增大了搜索空间和复杂性,为优化多跳无线网络的设计和性能带来了挑战.研究非均匀节点部署的目标是寻找合适的节点部署方案,以克服节点密度不平衡和空洞区域等问题,提高网络的连通性及覆盖范围.

目前,针对网络节点部署方法已进行了大量研究.滕文想等^[3]通过无线电通信原理,组建 WSNs 节点部署空间模型,对空间进行等距划分,引入概率函数计算各节点作为簇首节点的概率,实现节点部署.该方法采用等距划分的方式将空间均匀划分为网格,不考虑实际节点部署需求和环境特征.这种划分方式会导致在一些区域节点密度过高而覆盖范围重叠,而在其他区域节点密度过低而覆盖范围不足,并存在空洞覆盖的问题.杨力等^[4]根据迭代,结合网络分簇算法,筛选出边缘服务有效覆盖率最高的节点部署策略.虽然采用迭代和网络分簇算法有助于提高网络覆盖率和性能,但由于复杂的搜索空间和非均匀节点部署会导致算法陷入局部最优解,节点部署的效果受初始解的影响,选择不合适的初始解会导致最终结果不能达到全局最优.Yao 等^[5]通过蛾焰算法实现了网络节点部署,蛾焰算法虽然是一种优化算法,但其搜索机制或参数设置无法很好地适应无线网络中的节点部署问题,导致算法易陷入局部最优解.Gupta 等^[6]在设定的约束条件下进行网络节点部署,尽管约束条件可以减小搜索空间的范围和复杂性,但在无线网络中,节点部署问题的搜索空间仍很大,易陷入局部最优解.为有效解决上述算法存在的不足,本文提出一种基于蚁群算法的多跳无线网络非均匀节点部署算法.

1 多跳无线网络非均匀节点部署算法

1.1 节点部署模型建立

考虑到多跳无线网络的组成结构,由于节点分布不均匀会导致网络覆盖范围不平衡,因此可将数据传输到最优的 Sink 节点(汇聚节点)上,更有效利用节点的通信能力,提高网络的连通性,减少节点之间的跳数及传输延迟和能量消耗.其中, Sink 节点是在网络中的一个特殊节点,其主要功能是对从其他节点采集到的数据进行聚合和转发,将数据传输到指定的目的地,如监控中心或数据存储设备,具有较强的处理能力和通信能力,且位置选择会根据网络拓扑结构和通信要求确定.

为降低 Sink 节点到各传感器间的传输距离,组建最小化加权距离决策变量,在考虑节点间距离的同时,还需充分考虑网络的覆盖范围.最小化节点间的直接距离 X_j 和节点位置间的相对距离 Y_{ij} 可分别表示为

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{节点 } j \in \text{Sink 节点,} \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (1)$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 被 Sink 节点 } j \text{ 服务,} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

考虑节点之间的距离,组建非均匀节点布局目标函数 O_1 对应的数学模型为

$$\min O_1 = M \cdot h_i \cdot d_{ij} \cdot X_j \cdot Y_{ij}, \quad (3)$$

其中 h_i 表示固定时间范围内网络非均匀节点 i 发送的请求总数, d_{ij} 表示非均匀节点 i 与节点 j 两者之间的欧氏距离, N 表示非均匀节点的总数, M 表示候选 Sink 节点数量.

在多跳无线网络中,布设多个传感器用于数据的采集,完成数据采集后,先将其传输至 Sink 节点,再根据真实需求选取对应的网络传输至监控中心.由于 Sink 节点适用于规模较大且可靠性较高的网络,多跳无线网络中节点密度与节点之间的距离较大,所以借助相关的分层路由协议完成数据的传输工作.由于节点间的通信负载不均匀或节点位置分布不均匀,因此可能导致部分节点消耗能量过快,从而影响整个网络的稳定性和可靠性.通过计算各轮节点的能量消耗情况,可及时发现、监测并调整节点能量的分布,实现节点能量的均衡,提高网络的整体性能和稳定性.假设各传感器节点在设定的时间内发送 l_i 位数据,则各轮多跳无线网络非均匀节点消耗的能量 C_{s_i} 可表示为

$$C_{s_i} = \begin{cases} l_i C_{elec} + l_i c_{ft} d^2, & d < d_0, \\ l_i C_{elec} + l_i c_{mp} d^4, & d \geq d_0, \end{cases} \quad (4)$$

其中 C_{elec} 表示接收或发送单位数据的无线电路损耗能量, d_0 和 d 分别表示距离门限与各传感器到簇头节点之间的距离, c_{ft} 和 c_{mp} 表示不同功率对应的放大系数.

设在多跳无线网络中簇头节点数量为 K , 则每一轮簇头消耗的能量总和 C_{ch_j} 可表示为

$$C_{ch_j} = l_i C_{elec} + (l_i + l_j) C_{da} l_j + (l_i + l_j) C_{elec} + C_{s_j} \psi, \quad (5)$$

其中 C_{da} 表示簇头融合后在单位时间内消耗的能量, ψ 表示簇头融合后全部数据传输到多跳无线网络消耗的能量总和, l_j 表示发送的数据位数信息, C_{s_j} 表示多跳无线网络内簇内节点消耗的数据总量. 结合上述分析, 将多跳无线网络非均匀节点网络损耗最小化, 组建多跳无线网络非均匀节点部署模型为

$$\min O_2 = C_{ch_j} + C_{s_j}. \quad (6)$$

利用折中规划方法将多目标函数转换为单目标函数, 假设 O_1^* 为布局优化的最优目标, O_2^* 为网络能耗最优目标, ω 表示 O_1^* 和 O_2^* 的相位权重, 将以上多目标优化问题转换为单目标优化问题, 则非均匀节点部署优化目标函数的总数学模型 O_3 为

$$O_3 = \omega \times \frac{O_1 - O_1^*}{O_1^*} + (1 - \omega) \frac{O_2 - O_2^*}{O_2^*}. \quad (7)$$

1.2 基于蚁群算法的非均匀节点部署模型求解

在处理非均匀节点部署问题时, 由于搜索空间庞大且复杂, 因此传统的优化方法会陷入局部最优解. 而蚁群算法能通过社会性规则和信息素的更新机制, 有助于跳出局部最优解, 实现全局最优解的搜索. 在非均匀节点部署情况下, 蚁群算法可根据不同的节点位置和密度, 灵活调整蚁群的搜索路径, 从而更好地适应网络的特点. 同时, 其具有较强的并行处理能力, 可加速问题的求解过程. 因此, 完成非均匀节点部署模型建立后, 考虑最小化加权距离与网络损耗最小化, 通过蚁群算法求解确定最佳节点部署方案^[7-8].

当蚂蚁在搜索食物及回巢时, 会在各路径上释放信息素. 若一群蚂蚁出发寻找食物, 一旦有蚂蚁成功找到食物, 则它会沿原来的路径返回巢穴. 在返回途中, 这只蚂蚁会释放出外激素, 这些外激素会逐渐向四周扩散并导致其浓度逐渐降低. 假设有两只蚂蚁都寻找到同一个食物, 则会按如图 1 所示的路径返回.

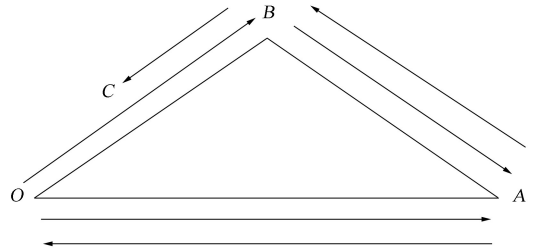


图 1 蚂蚁觅食路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ants foraging path

图 1 中, 设定食物在 A 点, 蚂蚁从 O 点出发, $OA < OBA$, 如果第一只蚂蚁直接回到 O 点时, 则第二只蚂蚁返回至 C 点. 在蚁群算法^[9-10]中, 设定各条路径上的信息素初始值为 $\tau_{ij}(0) = \tau_0$, 在多个位置随机放置的蚂蚁数量为 m , 则下一个位置被选择概率 $p_{ij}^k(t)$ 可表示为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(0)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\text{allowed}_k [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in \text{allowed}_k, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (8)$$

其中 τ_{ij} 和 τ_{is} 分别表示边 (i, j) 和 (i, s) 上的信息素, $\eta_{ij}(t)$ 和 $\eta_{is}(t)$ 表示启发因子, α 和 β 表示调节因子, allowed_k 表示蚂蚁 k 下一步被允许访问的位置集合.

在实用过程中, 采用禁忌表追踪并记录每只蚂蚁经过的位置. 当蚁群中的全部蚂蚁完成第一次遍历处理后, 需统计并计算各蚂蚁经过的路径长度总和, 保存并记录长度最短的路径. 在上述操作基础上, 将各边上的信息素进行及时更新, 主要包括信息素自然挥发和信息素补充等步骤. 对信息素补充对应的计算公式为

$$\tau'_{ij} = \begin{cases} (1 - \rho) \tau_{ij} p_{ij}^k(t), \\ \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^k, \end{cases} \quad (9)$$

其中 ρ 表示信息素挥发系数, $\Delta\tau_{ij}^k$ 表示第 k 只蚂蚁在所经过边释放的信息素浓度。

当蚂蚁完成一次巡回后, 重置其禁忌表并重返其起始位置, 为下一次巡回做准备。结合上述分析, 利用蚁群算法^[11-12]求解非均匀节点部署模型的基本操作流程如图 2 所示。

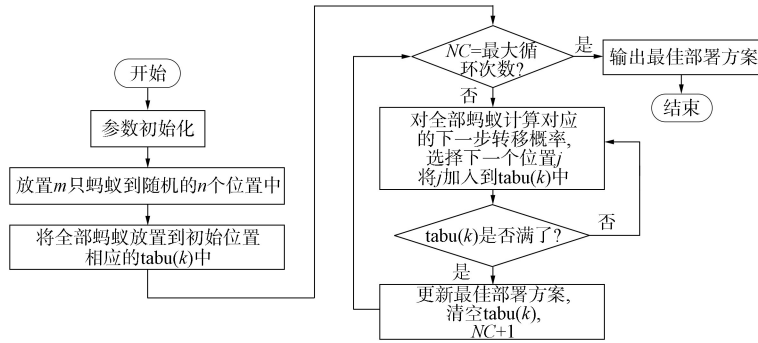


图 2 蚁群算法操作流程

Fig. 2 Flow chart of ant colony algorithm operation

基于上述分析, 采用蚁群算法^[13-14]进行多跳无线网络非均匀节点部署模型的求解, 操作步骤如下。

1) 将全部变量进行初始化处理。

2) 将多跳无线网络非均匀节点的拓扑图进行初始化处理。将各节点发送的位置存储到数据库内, 计算随机两个节点的通信距离 $W\langle a, b \rangle$, 在规定时间内对其进行更新。假设在限定时间内存在没有更新的节点, 则将该点设定为不可到达:

$$W\langle a, b \rangle = Z(L\langle a, b \rangle)^2, \quad (10)$$

其中 $L\langle a, b \rangle$ 表示节点 a 与节点 b 之间的物理距离, Z 表示比例系数。

3) 在循环开始后, 需根据实际需求设定最大的循环次数。

4) 全部蚂蚁依次遍历多跳无线网络非均匀节点: 利用式(8)实现转移概率计算后, 以此为依据判断蚂蚁下一步将达到的节点, 并将相关节点直接加入到禁忌表中; 假设当前多跳无线网络非均匀节点为目标节点, 则下一个蚂蚁开始遍历。

5) 经过计算和比较每只蚂蚁的路径长度后, 将最短路径直接存储于全局变量中, 路径长度计算公式为

$$d_{ij} = \frac{\chi}{N-1} \times \Delta\tau_{ij}^k \times \frac{W\langle a, b \rangle}{\tau'_{ij}}, \quad (11)$$

其中 χ 表示削弱的信息素量。

6) 对各蚂蚁经过的路径进行信息素更新, 在搜索过程中逐渐学习到更好的非均匀节点部署方案。较好路径上蚂蚁释放的信息素浓度会增加, 而较差路径上的信息素浓度会减少。通过不断迭代更新, 信息素会逐渐趋于平衡, 最终获取全局最优解。对每只蚂蚁经过的路径进行信息素更新 $\tau_{ij}(t+n)$, 输出最佳的多跳无线网络非均匀节点部署方案:

$$\tau_{ij}(t+n) = O_s \times (\rho'_{ij} + \Delta\tau_{ij}^k). \quad (12)$$

2 实验分析

为验证本文基于蚁群算法的多跳无线网络非均匀节点部署算法的有效性, 以 CC2530 ZigBee 无线传感器作为多跳无线网络的数据采集设备, 通信半径为 20 m。数据采集实验环境如图 3 所示。

在 MATLAB 平台上进行实验分析, 仿真区域为 1 500 m × 1 500 m, 选取 10 只虚拟蚂蚁, 设定迭代次数为 50 次, 信息素挥发系数为 0.1, 每 5 min 采集一次数据。

在设定区域内, 对本文算法的覆盖性能进行实验分析, 实验结果如图 4 所示。由图 4 可见: 在未采用本文算法进行多跳无线网络非均匀节点部署前, 在覆盖区域内出现了多处空白; 而采用本文算法进行部署优化后, 覆盖率得到显著提升, 说明本文算法有较好的覆盖效果。这是因为本文算法通过最小化加权距离决策变量, 降低传感器到 Sink 节点的传输距离, 缩短了数据传输路径, 减少了能量消耗和

信号衰减，增强了网络的连通性和覆盖范围。

为进一步验证本文算法的覆盖性能，将网络覆盖率作为测试指标，分析 3 种不同算法的覆盖性能，实验结果如图 5 所示。由图 5 可见，本文算法的网络覆盖率为 97%，明显高于另外两种算法，进一步验证了本文算法在网络覆盖方面的性能。这是因为蚂蚁释放的信息素可以引导其他蚂蚁选择路径，在节点部署问题中，能引导蚂蚁集中选择覆盖率较高的区域进行部署，从而提高整体网络的覆盖率。经过多次迭代，信息素会趋向平衡，网络的覆盖性能也会得到提升。

在多跳无线网络非均匀节点部署方面，分析 3 种不同算法的能量开销，实验测试结果列于表 1。由表 1 可见，采用本文算法进行多跳无线网络非均匀节点部署的能量消耗明显更低，最高仅为 1.56×10^{-7} J，主要是因为本文算法引入了蚁群算法求解模型，具有全局搜索和信息素引导机制，能有效遍历潜在解空间，快速找到较优的部署方案。蚁群算法可以帮助优化节点部署，降低了整个网络的能量消耗。

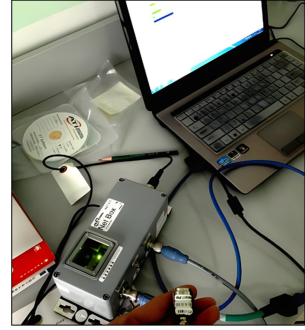


图 3 多跳无线网络传感器数据采集实验环境
Fig. 3 Experimental environment for data acquisition of multi hop wireless network sensor

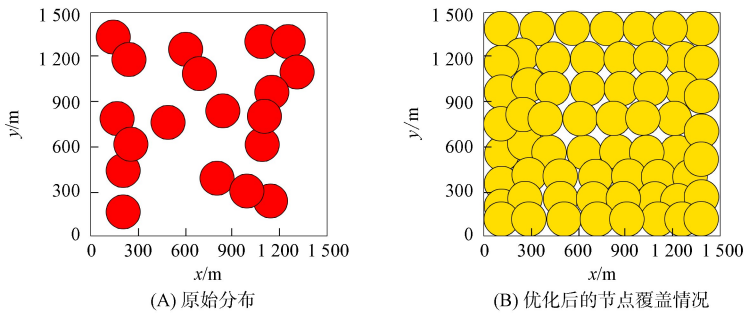


图 4 本文算法的覆盖性能测试结果

Fig. 4 Coverage performance test results of proposed algorithm

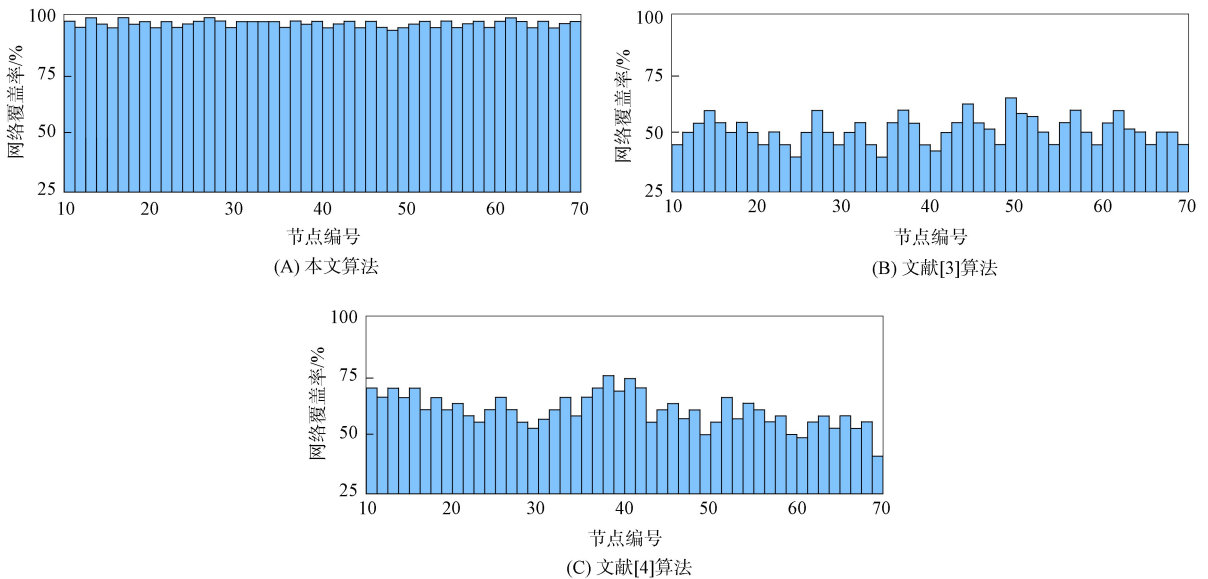


图 5 不同算法的网络覆盖率测试结果比较

Fig. 5 Comparison of network coverage test results for different algorithms

表 1 不同算法的能量开销测试结果比较

Table 1 Comparison of energy cost test results for different algorithms

测试节点编号	本文算法	文献[3]算法	文献[4]算法	测试节点编号	本文算法	文献[3]算法	文献[4]算法
10	0.70×10^{-7}	0.88×10^{-7}	0.97×10^{-7}	60	1.01×10^{-7}	1.51×10^{-7}	1.62×10^{-7}
20	0.78×10^{-7}	0.96×10^{-7}	1.09×10^{-7}	70	1.12×10^{-7}	1.66×10^{-7}	1.74×10^{-7}
30	0.83×10^{-7}	1.14×10^{-7}	1.20×10^{-7}	80	1.24×10^{-7}	1.83×10^{-7}	1.86×10^{-7}
40	0.88×10^{-7}	1.27×10^{-7}	1.34×10^{-7}	90	1.35×10^{-7}	1.95×10^{-7}	1.99×10^{-7}
50	0.94×10^{-7}	1.39×10^{-7}	1.48×10^{-7}	100	1.56×10^{-7}	2.14×10^{-7}	2.20×10^{-7}

图 6 为不同算法在各分区的节点生命周期测试结果比较. 由图 6 可见, 在不同分区下, 分别采用不同算法进行多跳无线网络非均匀节点部署处理后, 各算法对应的节点生命周期均发生了不同程度的变化. 与另外两种算法相比, 本文算法的节点生存周期明显更长. 当区号为 25 时, 生存周期高达 1 500 轮, 具有更高的使用价值. 因为通过计算节点消耗的能量, 最小化节点网络损耗, 并采用折中规划方法综合考虑能耗和其他指标, 使节点能更有效地利用能量资源, 并减少能量消耗. 通过降低能耗, 节点的能量消耗速度较慢, 从而延长了节点的生存周期.

综上所述, 针对传统多跳无线网络非均匀节点部署算法存在的不足, 本文提出了一种基于蚁群算法的多跳无线网络非均匀节点部署算法. 实验测试结果表明, 本文算法可大幅度提升网络覆盖性能, 降低能量开销, 延长节点生命周期, 获取更满意的多跳无线网络非均匀节点部署方案.

参 考 文 献

[1] 黄悦华, 刘恒冲, 陈庆, 等. 基于 USRNet 与改进 YOLOv5x 的输电线路绝缘子故障检测方法 [J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3437-3446. (HUANG Y H, LIU H C, CHEN Q, et al. Transmission Line Insulator Fault Detection Method Based on USRNet and Improved YOLOv5x [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3437-3446.)

[2] 黄悦华, 陈照源, 陈庆, 等. 基于边缘计算和改进 YOLOv5s 算法的输电线路故障实时检测方法 [J]. 电力建设, 2023, 44(1): 91-99. (HUANG Y H, CHEN Z Y, CHEN Q, et al. Real-Time Detection Method for Transmission Line Faults Applying Edge Computing and Improved YOLOv5s Algorithm [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 91-99.)

[3] 滕文想, 何继鹏, 刘鹏宇. 窄长空间无线传感器网络节点部署策略研究 [J]. 煤炭工程, 2023, 55(7): 151-157. (TENG W X, HE J P, LIU P Y. Deployment Strategy of Wireless Sensor Network Nodes in Narrow and Long Space [J]. Coal Engineering, 2023, 55(7): 151-157.)

[4] 杨力, 何兆斌, 孔志翔. 天地一体化智能网络智能节点部署策略 [J]. 小型微型计算机系统, 2022, 43(1): 159-164. (YANG L, HE Z B, KONG Z X. Deployment Strategy of Intelligent Node in Integrated Intelligent Network [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2022, 43(1): 159-164.)

[5] YAO Y, HU S, LI Y, et al. A Node Deployment Optimization Algorithm of WSNs Based on Improved Moth Flame Search [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(10): 10018-10030.

[6] GUPTA S K, KUMAR S, TYAGI S. Energy Efficient and Effective Node Deployment for Wireless Sensor Network [J]. International Journal of Communication Systems, 2022, 35(9): e5139-1-e5139-17.

[7] 张孟健, 汪敏, 王霄, 等. 混合粒子群-蝴蝶算法的 WSN 节点部署研究 [J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(6):

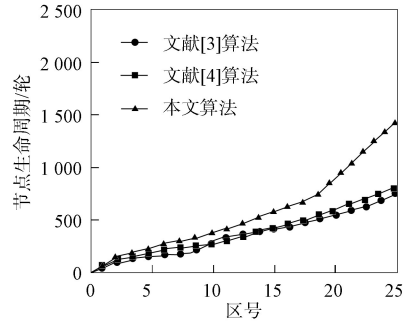


图 6 不同算法在各分区的节点生命周期测试结果比较

Fig. 6 Comparison of node lifecycle test results for different algorithms in each partition

- 1013-1022. (ZHANG M J, WANG M, WANG X, et al. A Hybrid Particle Swarm-Butterfly Algorithm for WSN Node Deployment [J]. Computer Engineering & Science, 2022, 44(6): 1013-1022.)
- [8] 赵越, 李赞, 李冰, 等. 面向多源时差定位的鲁棒节点部署算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2022, 49(6): 15-22. (ZHAO Y, LI Z, LI B, et al. Robust Node Placement in TDOA-Based Multiple Sources Localization [J]. Journal of Xidian University, 2022, 49(6): 15-22.)
- [9] 张佩, 游晓明, 刘升. 融合动态层次聚类 and 邻域区间重组的蚁群算法 [J]. 计算机应用研究, 2023, 40(6): 1666-1673. (ZHANG P, YOU X M, LIU S. Robust Node Placement in TDOA-Based Multiple Sources Localization [J]. Computer Application Research, 2023, 40(6): 1666-1673.)
- [10] 周桥梁, 刘妮妮. 蚁群算法在重介质智能化选煤过程中的应用 [J]. 煤炭技术, 2022, 41(9): 246-248. (ZHOU Q L, LIU N N. Application of Ant Colony Algorithm in Intelligent Coal Preparation Process of Dense Medium [J]. Coal Technology, 2022, 41(9): 246-248.)
- [11] 马康康, 王雷, 李东东, 等. 基于信息素差异分布策略的路径规划蚁群改进算法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 100-107. (MA K K, WANG L, LI D D, et al. An Improved Ant Colony Algorithm for Path Planning Based on Pheromone Differential Distribution Strategy [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 100-107.)
- [12] 李金磊, 翟海亭. 改进蚁群算法的超密集网络资源分配方法仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 377-381. (LI J L, ZHAI H T. Simulation of Super Dense Network Resource Allocation Method Based on Improved Ant Colony Algorithm [J]. Computer Simulation, 2023, 40(4): 377-381.)
- [13] 葛翔, 谭成伟, 薛亚勇, 等. 无线传感器网络覆盖的部署及调度算法 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2024, 42(3): 400-405. (GE X, TAN C W, XUE Y Y, et al. Deployment and Scheduling Algorithms for Network Coverage of Wireless Sensor [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2024, 42(3): 400-405.)
- [14] 宋佳艳, 苏圣超. 基于改进蚁群优化算法的自动驾驶多车协同运动规划 [J]. 计算机工程, 2022, 48(11): 299-305. (SONG J Y, SU S C. Multi-vehicle Collaborative Motion Planning for Autonomous Driving Based on Improved Ant Colony Optimization Algorithm [J]. Computer Engineering, 2022, 48(11): 299-305.)

(责任编辑: 韩 啸)