廖正豪, 黄波. 基于单元分解和 MTSP 的多无人清扫车全覆盖路径规划[J]. 智能计算机与应用,2026,16(7):199-204.
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24120801

基于单元分解和 MTSP 的多无人清扫车全覆盖路径规划

廖正豪, 黄 波
(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘 要: 如何实现大场景下多辆无人驾驶清扫车协同作业,高效完成清洁任务,是一个值得研究的问题。对此,本文提出一种基于单元分解和多旅行商(Multiple Traveling Salesman Problem,MTSP)策略的多无人清扫车全覆盖路径规划算法,用以解决该问题。首先,通过牛耕式单元分解法,将整体清扫区域划分成多个子清扫单元;其次,通过计算出各子清扫单元的所有可行清扫方向对应的单元高度,来判断该清扫方向下对应清扫车转弯次数的多少,并将高度最小的方向作为单元内的清扫方向;最后,将各个子清扫区域抽象成一个城市,采用 MTSP 算法原理,得到子单元覆盖路径的连接顺序,从而得到整体区域优化的全覆盖路径。通过不同应用场景仿真实验,结果证明该算法是有效和切实可行的。

关键词: 多无人清扫车; 全覆盖路径规划算法; 多起始点旅行商问题; 牛耕单元分解
中图分类号: TP242 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)07-0199-06

Multi-unmanned sweeper full coverage path planning based on unit decomposition and MTSP

LIAO Zhenghao, HUANG Bo
(School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: How to realize the collaborative work of multiple unmanned sweepers in a large scene and efficiently complete the cleaning task is a problem worth studying. To solve this problem, this paper proposes a full-coverage path planning algorithm for multi-unmanned sweepers based on unit decomposition and Multiple Traveling Salesman (MTSP) strategy. Firstly, the whole cleaning area is divided into several sub-cleaning units by the method of cattle-type unit decomposition. Secondly, by calculating the unit height corresponding to all feasible cleaning directions of each sub-cleaning unit, the number of turns of the corresponding sweeper under the cleaning direction is judged, and the direction with the smallest height is taken as the cleaning direction in the unit. Finally, each subsweeping area is abstracted into a city, and the connection order of the subunit coverage path is obtained by using the principle of MTSP algorithm, so as to obtain the full coverage path of the whole area optimization. The simulation results of different application scenarios show that the algorithm is effective and feasible.

Key words: multi-unmanned sweeper; full coverage path planning algorithm; multi-point travel salesman problem; decomposition of cattle farming units

0 引 言

无人清扫车全覆盖路径规划(Complete Coverage Path Planning, CCPP)[1-2]问题定义为:在满足一种或多种性能指标最优的情况下,避开障碍物,规划出一条可以遍历整个待覆盖区域的最优路径。CCPP 技术在道路清扫[3]、农业耕作[4-5]、军事运用[6-7]以及医学[8]等邻域都有着重要作用。

多无人清扫车协同 CCPP 可定义为:多辆无人清扫车从一个或多个起始点出发,通过互相协同完成对整个地图区域的覆盖,并使总体性能评价指标达到最优。多辆无人清扫车的协同工作可以提高区域覆盖的效率、减少任务完成的时间,相对于单辆无人清扫车系统有着极大的优越性[9]。

目前,存在 2 种处理多车辆协同 CCPP 的研究方法。一种是使用区域划分和任务分配(如拍卖算

作者简介: 黄 波(1975—),男,博士,讲师,硕士生导师。主要研究方向:AGV 自主定位,导航,调度。
通信作者: 廖正豪(2003—),男,硕士研究生。主要研究方向:路径规划,激光雷达 SLAM。Email:1224014127@njupt.edu.cn。

收稿日期: 2024-12-08

法[10-11])的方式将该问题转变为多个单车辆 CCPP,再分别进行求解。另一种是直接将整体地图区域划分为多个子区域,规划出每个子区域内部的清扫路径后使用启发式算法确定每辆车的任务区域和子区域的连接顺序,从而完成整体区域的覆盖[12]。

对于前者,如罗志远等学者[13]使用模糊 C 均值聚类方法来划分整体地图区域并进行分配,将多车辆 CCPP 转换成单车辆 CCPP 后再使用遗传算法求解,但在该情况下所有车辆都会启动,忽略了只需启动部分车辆就能使路径代价达到最优的情况。对于后者,如王钧琪等学者[14]在使用牛耕式单元分解[15-16]后又使用交叉算子遗传算法确定了子区域的连接顺序,虽然完成了全覆盖,但没有考虑车辆在转弯时需要消耗更多能量和时间,从而产生了额外路径代价。

本文提出的算法基于后一种求解思路。首先,使用牛耕式单元分解法将整体地图区域划分成多个子单元。其次,找到每个子单元的最优路径清扫方向,并根据该方向得到相应单元内的清扫路径。然后,找到单元之间的最短连接路径。接着,根据得到的清扫路径计算出单元内清扫路径和单元间连接路径的代价,并生成相关的代价矩阵和节点图。最后,求解该代价矩阵对应的 MTSP,完成整体区域的全覆盖路径规划。算法流程如图 1 所示。目前对于求解 MTSP 已有大量理论和实际成果[17-19]。本文使用 JSPRIT 库求解 MTSP,JSPRIT 库是一个用于求解 TSP 及其变种问题的启发式算法库。

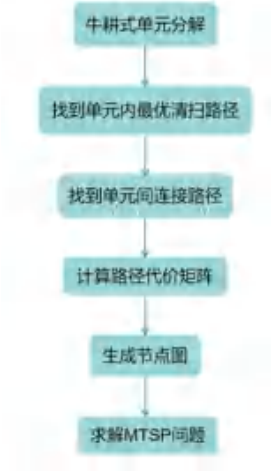


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the algorithm

1 算法实现

1.1 单元分解

本文采用牛耕式单元分解法将整个地图区域划分成多个子单元,通过运行子单元内部的覆盖和子单元之间的连接流程来实现对整体区域的覆盖。牛耕式单元分解示意如图 2 所示。牛耕式单元分解法指用扫描切片的方式对地图区域进行划分。通过使用扫描线沿特定方向进行扫描,在扫描线经过障碍物沿扫描方向两端的顶点时形成分割线并产生子单元。

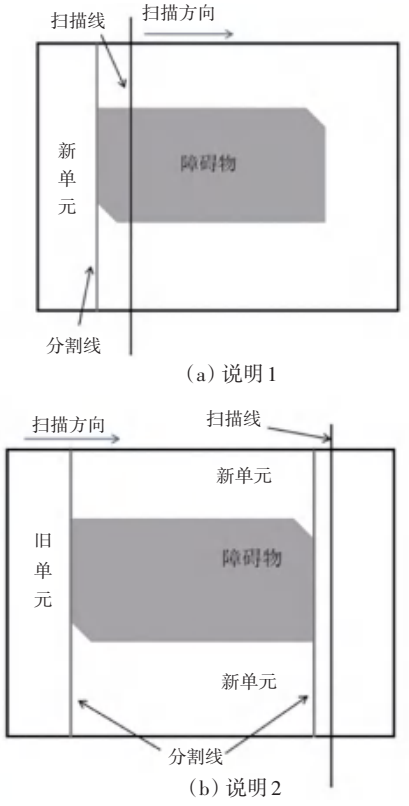


图 2 牛耕式单元分解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of decomposition of cattle-type units

1.2 清扫路径生成

本文采用牛耕式覆盖确定单元内的清扫路径。牛耕式覆盖指使用平行线覆盖整个单元,每 2 条平行线之间的转弯路径不会显示,但会被考虑。牛耕式覆盖可以确保单元内清扫路径的全覆盖率,但采用不同清扫方向和起始点会直接影响清扫路径的转弯次数。本文重点关注无人清扫车在转弯时的路径代价。因为当无人清扫车在子单元内的转弯次数过多时,增加的路径代价甚至可能大于子单元之间连接路径的路径代价。因此,本文采用使清扫路径转弯次数最少的方向作为单元内清扫的方向来尽可能减少无人清扫车转弯时产生的额外路径代价。

而在牛耕式覆盖中,垂直于清扫方向的单元高度越小转弯次数也就越小。因此最优清扫方向即对应单元高度最小的方向。所以在单元分解后,本文会先找到每个单元的所有可行清扫方向,再计算出

每个清扫方向上对应的单元高度，并将单元高度最小的方向作为该单元的路径清扫方向。牛耕覆盖中转弯次数与单元高度相关原理如图 3 所示。

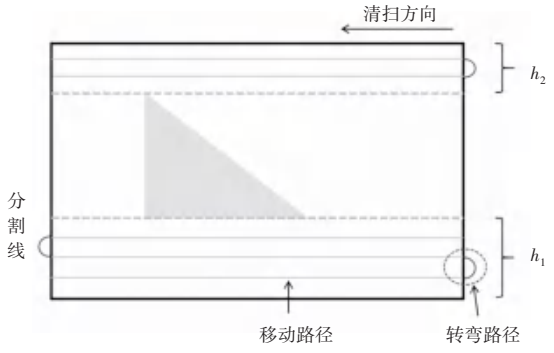


图 3　牛耕式覆盖中转弯次数与单元高度相关图

Fig. 3　Correlation between the number of turns and the height of the unit in the cow-tillage mulch

对于不同单元间连接路径的确定，本文使用了可视图法[20]。可视图法可以计算出两点之间不会与障碍物发生碰撞的最短欧几里得路径。这可以尽可能减少单元间连接路径的路径代价。

1.3　覆盖路径规划

本文将全覆盖路径规划转换成 MTSP 问题，再使用启发式算法库求解相应的 MTSP。在得到所有子单元内部的清扫路径和单元之间的连接路径后，便可以得到对应 MTSP 问题的邻接图，如图 4 所示。在邻接图 $G=(N,A)$ 中，$N=\{n_1,\cdots,n_n\}$ 为节点集，$A=\{(n_i,n_j)\mid n_i,n_j\in N,\ i\neq j\}$ 为有向弧集。N_{si} 为第 i 个起始节点，每个起始节点都是一个储存无人清扫车的仓库，可以作为一辆或多辆无人清扫车的起始点与终点。

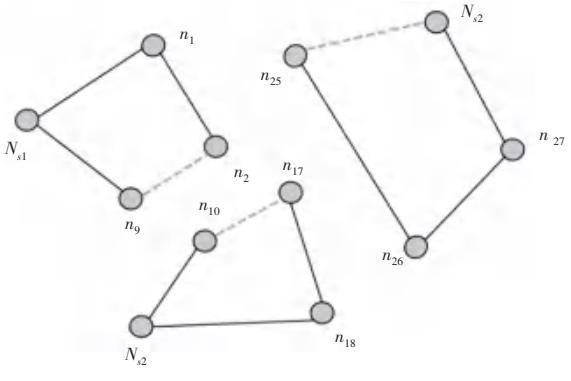


图 4　三起始点覆盖路径规划邻接图

Fig. 4　Adjacency diagram of three starting points covering path planning

在邻接图中，每个节点表示一个单元内包含起始点与终点的清扫路径，每条有向弧表示连接上一个单元内清扫路径的终点和下一个单元内清扫路径的起始点的最短路径。每个起始节点都有指向所有单元节点的输出弧，也可以接收所有单元节点的输入弧，但起始节点之间相互无法连接。

在得到相应的邻接图和代价矩阵后，即可使用 JSPRIT 库中的启发式算法求解该邻接图对应的 MTSP 问题。JSPRIT 库提供了多种用于求解 TSP 及其变种问题的启发式求解算法，本文采用其中基于大邻域搜索和迭代局部搜索的混合算法来求解 MTSP 问题。在得到节点之间的连接顺序后，就可得到最终的覆盖规划路径。

1.4　路径代价计算

路径的代价通常以时间、路程长度、能量等作为计量单位。本文使用无人清扫车的清扫时间作为路径代价。无人清扫车在运行时，为了保证地面能被清理干净，移动速度较低、且一般情况下速度不会发生改变。因此，本文假设无人清扫车在直线行驶时移动速度不会发生改变，即保持匀速。为此求得无人清扫车在 2 个转弯点之间的直线路径代价为：

$$t_l=\frac{d}{v} \tag{1}$$

其中，t_l 表示 2 个转弯点之间的直线路径段中路径代价；d 表示 2 个转弯点之间的路径长度；v 表示无人清扫车在直线行驶时保持的速度。

分析可知，无人清扫车在转弯时的速度必定存在变化，且转弯时的路径与转弯角度、清扫车宽度、清扫车移动速度等均相关，计算难度较高。而在本文算法中，无人清扫车在单元内使用牛耕式覆盖方式进行清扫，绝大多数单元内的转弯点都是 180°转弯，且转弯时的速度和路径都近乎不变。不妨设无人清扫车在转弯时的路径代价为一固定时间 t_s，且可以额外增加该时间代价，用于弥补无人清扫车在直线路段中加减速时被忽略的代价。2 个转弯点之间的路径代价 T 的计算公式如下：

$$T=t_l+t_s \tag{2}$$

因此，节点 j 所对应的子单元内清扫路径的代价之和 T_j 为：

$$T_j=\sum_i^m T_i \tag{3}$$

其中，m 表示该子单元内清扫路径的段数。每 2 个节点之间有向弧路径代价 C_{ij} 是从节点 i 到节点 j 之间的最短路径代价 T_{ij} 和节点 j 所对应的单元内清扫路径代价 T_j 之和。推得的公式为：

$$C_{ij}=T_{ij}+T_j \tag{4}$$

由于每个单元内清扫路径的起始点和终点不是同一个点，因此 2 个节点之间的 2 条有向弧的代价是不

同的、即 $C_{ij} \neq C_{ji}$，也就是路径代价矩阵是不对称的。

2 实验及结果分析

2.1 实验步骤

为验证多无人清扫车全覆盖路径规划算法的有效性，本文在基于 ROS 的环境中使用 C++与 RVIZ、CGAL 库建立了一个仿真模型。该模型使用 RVIZ 构建的多个地图进行仿真模拟，地图区域均为 100×100 的大小。然后，使用 CGAL 库完成单元分解与子单元内部清扫路径的规划，并生成相应的代价矩阵。接着，调用 JSPRIT 库求解对应的 MTSP 问题，并将最终结果显示在 RVIZ 中。

本文使用该仿真模型在多个不同的地图区域上进行了测试。实验场景 *a* 所在地图区域包含 12 个障碍物、45 个障碍物顶点；实验场景 *b* 所在地图区域包含 15 个障碍物、70 个障碍物顶点。本次研究所有仿真测试均使用 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12500H@ 2.50 GHz 完成。

2.2 实验结果分析

图 5 为使用 jsprit 库得到的代价收敛图。从图 5 可以看出随着迭代次数的增加，总路径代价从最开始的波动到趋于稳定。说明本文使用的 jsprit 库找到了该地图区域对应的 MTSP 的最优解，且能得到最优的全覆盖清扫路径。

图 6(a)为在实验场景 *a* 下进行仿真得到的规划路径结果示意图。其中，地图区域外的每个 *S* 点都是一辆无人清扫车的起始点和终点。从图 6(a)中可以明确看到有 3 辆无人清扫车从不同起始点出发，分别覆盖了该地图区域的部分区域，最终三车协同使整个地图区域均被覆盖。

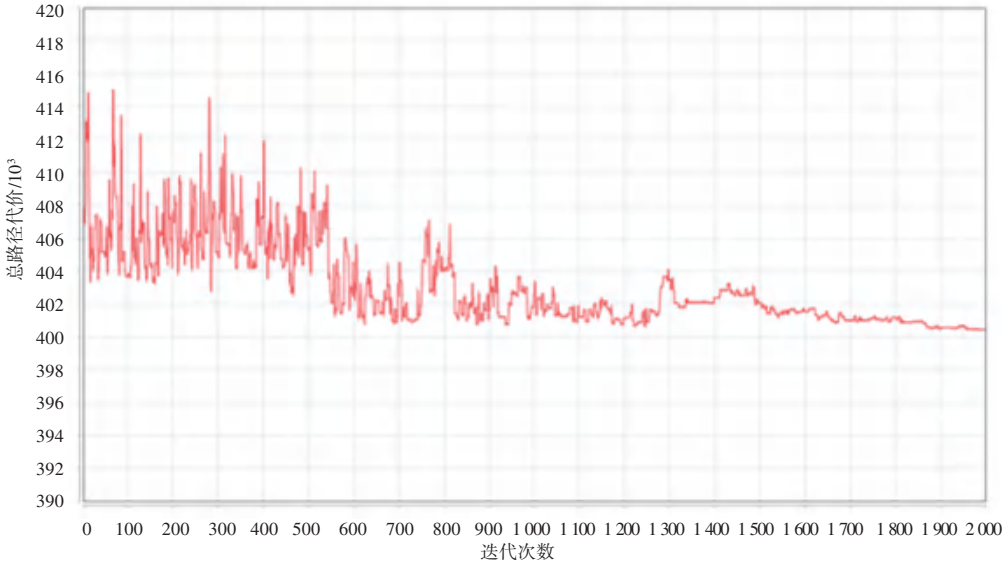
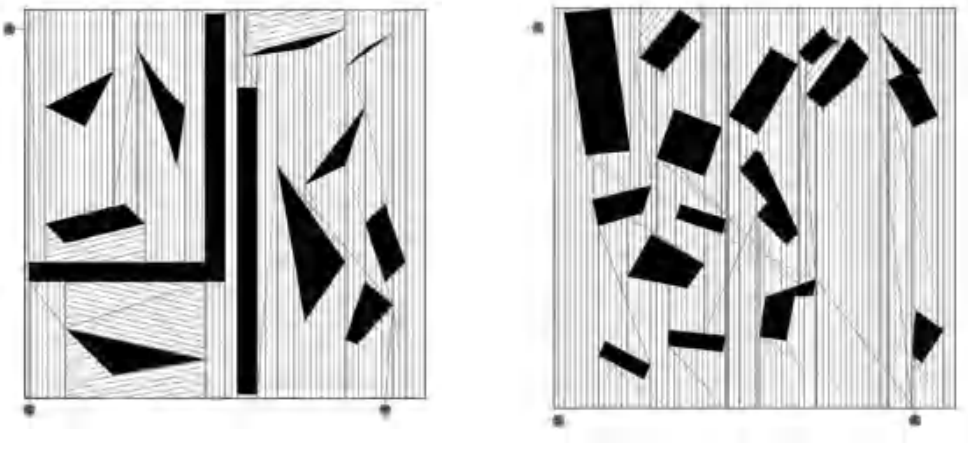


图 5 场景 *a* 路径代价收敛图

Fig. 5 Path cost convergence diagram in scenario *a*



(a) 实验场景 *a* (b) 实验场景 *b*

图 6 多路径仿真结果实例图

Fig. 6 Example diagram of multipath simulation results

图 6(b)为在实验场景 *b* 下进行仿真得到的路径规划结果示意图。在该区域中,本文设置了 3 个起始点、即 3 辆无人清扫车用于清扫该地图区域。但是在经过本文的路径规划算法后得到的最优路径规划结果是仅使用一辆无人清扫车。路径代价收敛曲线如图 7 所示。从图 7 中可以明显看出最终路径代价依旧收敛于一个固定值,说明在实验场景 *b* 下地图区域中使用一辆无人清扫车进行清扫获得的路径代价就是最优的。

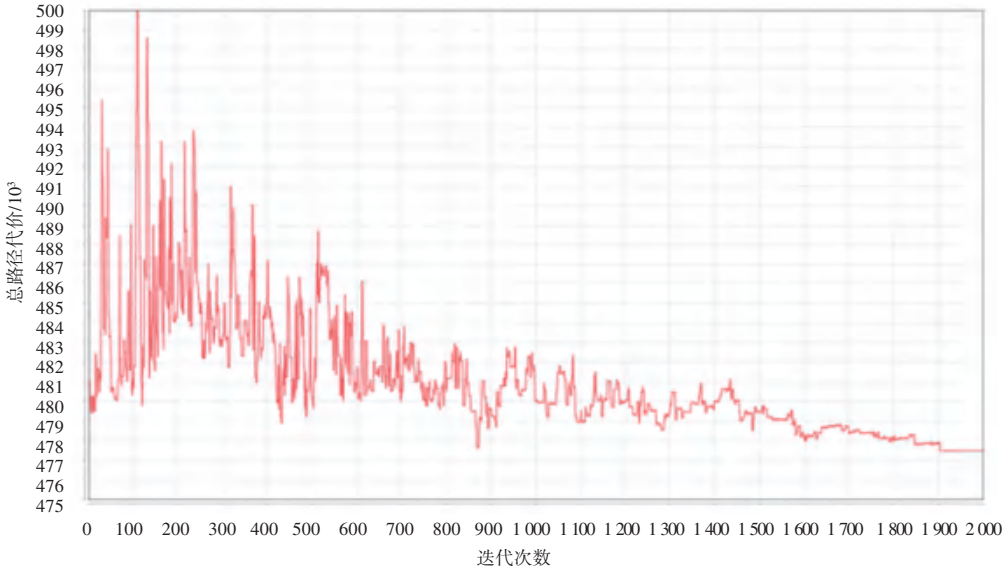


图 7　场景 *b* 路径代价收敛图

Fig. 7　Path cost convergence diagram in scenario *b*

从上述结果图中可以看出,本文提出的算法不会完全考虑起始点的数目,而是以到达最少路径代价为目标进行优化,即使在只启动了一辆无人清扫车的情况下,只要到达规划路径最优的方案也会被采用。

另外,在实验场景 *b* 中,本文在完成单元分解后分别随机生成了单无人车、双无人车、三无人车的单元遍历顺序,并计算了对应全覆盖路径的总路径代价(见表 1)。将其与本文算法得到的全覆盖路径的总路径代价对比,可以发现本文算法可以显著降低覆盖路径代价。

表 1　路径代价对比表

Table 1　Comparison of path cost

路径生成方法	本文算法	随机单车辆路径	随机双车辆路径	随机三车辆路径
总路径代价	477 468	482 915	487 962	485 774

3　结束语

本文提出了一种基于牛耕单元分解和 MTSP 策略的多无人清扫车全覆盖路径规划算法,并在多个清扫地图中进行仿真实验,结果表明提出的算法可以在各种复杂环境中正常运行,并得到相应的最优路径。且本文提出的算法找到的规划路径可以使清扫车的转弯次数达到最小,进一步提高多无人清扫车协同作业的效率。

参考文献

[1] Wu G,Wang M, Guo L. Complete coverage path planning based on improved Genetic algorithm for unmanned surface vehicle[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(6): 1025-1050.

[2] 李姝颐. 移动机器人全覆盖路径规划算法的研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学, 2023.

[3] 史程. 复杂环境下扫地机器人全覆盖路径规划研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2024.

[4] 金宝龙, 夏长高, 韩江义. 多机协同作业全覆盖路径规划[J]. 农机化研究, 2024, 46(12): 28-33.

[5] Pham T H, Ichalal D, Mammar S. Complete coverage path planning for pests - ridden in precision agriculture using UAV [C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Networking Sensing and Control (ICNSC). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1-6.

[6] Bahnemann R, Lawrance N, Chung J J, et al. Revisiting Boustrophedon coverage path planning as a generalized traveling salesman problem [C]//Proceedings of the 16th International Conference on Field and Service Robotics (FSR). Cham: Springer, 2021: 277-290.

[7] Jia Z, Xin D, Qi C D. Distributed collaborative complete coverage path planning based on hybrid strategy[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2024, 35(2): 463-472.

[8] 张晓文. 多消毒机器人全覆盖路径规划研究[D]. 上海:上海电

机学院, 2023.
[9] Wu Y, Nie M, Ma X, et al. Co-evolutionary algorithm-based multi-unmanned aerial vehicle cooperative path planning[J]. Drones, 2023, 7(10): 606-622.
[10] Gerkey B P, Mataric M J. Sold: Auction methods for multirobot coordination[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 758-768.
[11] 冒如权, 丁峰, 杨恒瑞. 多无人船协同多目标遍历路径规划[J]. 船舶工程, 2024, 46(5): 97-102.
[12] 王宁, 武慧慧, 张宇航. 考虑操纵约束的无人艇海域全覆盖路径规划[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(6): 210-218.
[13] 罗志远, 丰硕, 刘小峰, 等. 一种基于分步遗传算法的多无人清洁车区域覆盖路径规划方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 43-50.
[14] 王钧琪, 张小俊. 基于 GA-MTSP 的多机器人同步覆盖路径规划[J]. 制造业自动化, 2023, 45(3): 109-113.
[15] Miao X, Jaesung L, Bo Y K. Scalable coverage path planning for cleaning robotsusing rectangular map decomposition on large environments[J]. IEEE Access, 2018, 40(6): 38200-38215.
[16] 马铭言, 黄思荣, 邓仁辉, 等. 考虑子单元数量与起始位置的全覆盖路径规划[J]. 西安工程大学学报, 2024, 38(4): 1-8.
[17] Sui J, Ding S, Huang X, et al. A survey on deep learning-based algorithms for the traveling salesman problem[J]. Frontiers of Computer Science, 2024, 19(6): 196322.
[18] 孙鉴, 刘品, 李昊, 等. 基于 Spark 的双阶段 SA 及 GA 求解 MTSP[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(4): 62-69.
[19] 石承豪. 松鼠搜索算法及应用于求解旅行商问题研究[D]. 南宁:广西民族大学, 2023.
[20] Latombe J C. Robot motion planning[M]. Cham: Springer, 1991.