[文章编号] 1003－4684(2026)04-0056-07

移动打孔机器人多目的地路径规划方法研究

潘金宝，周 伟
（湖北工业大学机械工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 针对建筑施工场景下移动打孔机器人多目的地作业的全局路径优化需求，提出一种融合概率路线图（PRM）、改进 A* 算法与模拟退火（SA）的组合路径规划方法。首先采用 PRM 算法构建复杂施工环境的无向图模型，实现可行域离散化；其次，针对传统 A* 算法路径平滑度不足的问题，引入 Floyd 算法优化路径节点，提升轨迹平滑性与避障安全性；最后，基于模拟退火算法求解多孔位最优访问顺序，实现全局路径最短。仿真结果表明：改进 A* 算法较传统 A* 算法路径长度缩短约 10.3%，规划时长降低约 29.9%；在多孔位场景下，所提组合算法相比遗传算法、粒子群算法，全局路径更短、规划效率更高，可为建筑施工场景下移动打孔机器人多目标自主路径规划提供工程参考。

[关键词] 智能建造；移动打孔机器人；概率路线图（PRM）；改进 A* 算法；模拟退火；路径规划
[中图分类号] TP242.6 [文献标识码] A

建筑行业室内装修与设备安装依赖大量人工，施工前需人工划定标识线以避免墙体或设备受损[1]。放线作业中，基础孔洞定位至关重要，孔位偏差会直接影响后续施工精度。目前现场施工多采用手持钻孔作业，存在劳动强度大、效率低、精度差等问题；半自动打孔车难以满足间距控制、作业效率及复杂环境适配等施工需求[2]。因此，研发移动打孔机器人实现自动化打孔，对提升施工效率与质量意义重大。路径规划是其核心技术，直接影响作业效率，缩短作业路径、可提升工作效率并降低能耗[3]。图 1 为建筑室内机器人示意图。

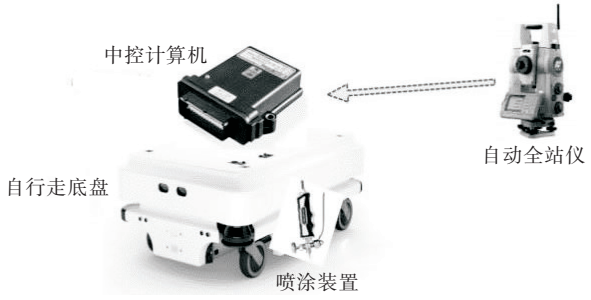


图 1 建筑室内机器人

移动打孔机器人进行定位孔施工时，核心是合理连接各孔洞位置，以总路径最短为目标，在多定位孔排序中确定最优打孔顺序，完成路径规划。多孔位一次性路径规划问题类似旅行商问题[4]，当孔位数量多、环境复杂时，需采用启发式算法（如遗传算法、模拟退火等）或图搜索算法（如 A 算法、Dijkstra 算法）求解[5]。孟浩德等融合改进模拟退火算法与 A 算法提升全局优化能力[6]，但该方法对 PRM 构建地图的适应性较差，且 A* 算法未针对地图特性优化。吕竞则等提出膨胀栅格建模方法，并结合蚁群算法优化 AGV 路径[7]，但未考虑多目的地场景，且栅格地图不适用于移动打孔机器人的定位方式。王步伟等提出改进鲸鱼优化算法以增强全局与局部搜索的平衡能力[8]，但该方法地图建模过于简单，未兼顾点对点单源路径规划需求。唐瑞东等基于改进人工势场法开展多目标点路径规划研究，但在复杂施工环境下的避障稳定性不足[9]。余文凯等研究了多目的地自主移动机器人路径规划，但未针对施工环境的障碍物特性优化[10]。上述研究表明，在全局静态路径优化框架下，启发式算法参与的路径规划，相比分步单目的地规划具有显著效率优势，但所有方法在 PRM 环境适应性、路径平滑性及多孔位全局优化方面仍存在不足。

针对上述问题，本文提出一种融合 PRM、改进 A* 算法与模拟退火的组合路径规划方法，即针对 PRM 拓扑地图环境下传统 A* 算法路径平滑度不足的问题，引入 Floyd 算法进行路径节点优化，并设置安全距离实现避撞，有效提升路径平滑性；再将模

[收稿日期] 2024－12－03
[基金项目] 湖北工业大学博士基金资助项目（BSQD2019010）
[第一作者] 潘金宝（1998－），男，河南信阳人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为智能算法优化。
[通信作者] 周 伟（1976－），男，湖北武汉人，工学博士，湖北工业大学讲师，研究方向为智能制造。

拟退火算法应用于多孔位访问顺序优化，结合改进 A* 算法实现全局路径最短。相比遗传算法和粒子群算法，该方法具有更优的规划效果。

1　地面打孔问题建模

1.1　放线孔洞的数学描述

在地面打孔问题中，为了合理规划打孔顺序和机器人运动轨迹，需要对放线孔洞进行精确的数学建模。每个孔的位置是独立的点，数学描述需要将每个孔的位置定义为坐标点，总孔数记为 M，第 i 个孔位记为 $P_i(i=1,2,\cdots,M)$。孔位坐标定义为：

$$P_i=(x_i,y_i)\in\mathbb{R}^2 \tag{1}$$

障碍物区域定义为 Ω_{obs}，指因地下管线、建筑基础或其他障碍物存在而无法打孔的区域，满足任意孔位 $P_k\notin\Omega_{\text{obs}}(\forall k)$。

为优化打孔顺序，引入决策变量 $\pi=(\pi_1,\pi_2,\cdots,\pi_M)$ 表示打孔顺序。其中 π_i 表示第 i 个被打孔位置在总孔数中的索引，优化目标为总路径距离最小化：

$$\sum_{i=1}^{M-1}\|p_{\pi_{i+1}}-p_{\pi_i}\| \tag{2}$$

通过优化打孔顺序，可以减少机器人的移动时间，提高工作效率降低能耗。经过优化算法的处理，最终输出打孔机器人的运动轨迹：

$$\Gamma=\{P_{\pi_1}\rightarrow P_{\pi_2}\rightarrow\cdots\rightarrow P_{\pi_M}\} \tag{3}$$

该轨迹表示机器人从起始孔位 P_{π_1} 开始，依次移动到后续孔位，直至完成所有打孔任务。

1.2　移动打孔机器人工作环境建模

实际施工环境较图 2 更复杂。常用地图建模方法包括拓扑图法、栅格法、导航网络等。本文采用 PRM 算法进行环境建模，可高效处理复杂工作路径规划。该算法在解空间生成无向图，划分环境为可行与不可行区域：障碍物及施工设备占据区域标记为不可行区，机器人自由通行的空白区域为可行区[11]。通过在目标环境随机采样，将连续行驶空间离散化，对离散点进行碰撞检测，无碰撞点对加入连线集[12]，通过图搜索算法规划路径，PRM 完整构建流程如图 2 所示。此建模方式既提升路径规划灵活性，又保障机器人行驶安全。

构建无向图 $R=(N,E)$ 时，先初始化节点集 V 与边集 E 为空集。从自由空间随机选点 c 加入 V。迭代中选取当前节点 c，获取候选邻近节点集 V_c，若连接 c 与候选节点 n 成功，便将 (c,n) 加入边集 E 并更新图 R；若 c 无法连接任何候选节点，则更换节点重复操作，直至找到抵达终点的路径或完成所有可能连接，最终到达终点或完成全部连接时，流程

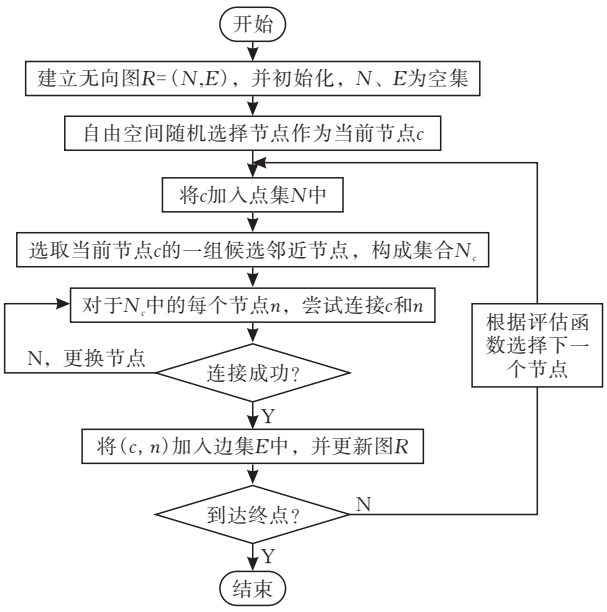


图 2　PRM 算法构建流程

结束。图 3 为无向图构建完成后的效果，图 4 为无向图构建完成的基础上规划路径。

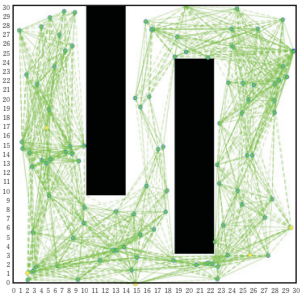


图 3　PRM 算法构建的环境无向图

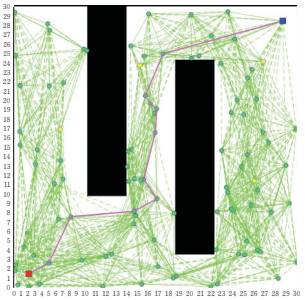


图 4　PRM 环境下单孔路径规划结果

2　任意位置的单孔路径规划

2.1　传统 A* 算法

A* 算法[13]是一种经典的启发式图搜索算法，它通过综合实际代价与启发式估计代价寻找最优路径。在 A* 算法中，解空间内任意路径解的评估函数由两部分组成：预估代价函数值与实际代价函数值之和。其中，实际代价函数 $g(v,S)$ 表示了从起点 S 到当前节点 v 的实际成本，启发式估计代价函数 $h(v,T)$ 表示从节点 v 到终点 T 的估计成本。具体表达式如下：

$$g(v,S)=\sqrt{(x_v-x_s)^2-(y_v-y_s)^2} \tag{4}$$

式中：(x_s,y_s) 作为机器人的工作起点；(x_v,y_v) 作为机器人当前的实时位置；$g(v,S)$ 则是初始坐标位置 S 到当前节点 v 的真实代价函数值。而估计代价函数 $h(v,T)$ 则采用曼哈顿距离：

$$h(v,T)=|x_t-x_v|+|y_t-y_v| \tag{5}$$

其中：(x_t,y_t) 作为最后一个目标孔位的坐标点，从实时节点 n 到终点节点 T 的估计代价函数值为 $h(n,t)$。

估计代价函数 $f(v)=g(v,S)+h(v,T)$。单孔位路径规划中，移动打孔机器人从起始位置到各孔位坐标的路径可简化为最短路径问题。借助 A* 算法，通过估价函数 $f(v)$ 评估、比较扩展节点代价，沿代价最小的节点方向迭代，从而规划出高效工作路径[14]。

2.2 改进 A* 算法

PRM 算法通过随机生成采集点构建图结构，再利用 A* 或迪杰斯特拉算法搜索最优路径，虽能处理复杂环境路径规划，却易出现路径不平滑、急弯问题[12]。例如，PRM 建模下传统 A* 规划的路径（S，p_1，p_2，p_3，p_4，p_5，p_6，p_7，p_8，p_9，T）存在多次锐角转折、节点仅依赖随机采样点邻近连接的缺陷，平滑度不足。为此，采用 Floyd 算法处理静态路径拐点，并设置路径节点与障碍物的安全距离以避碰撞。

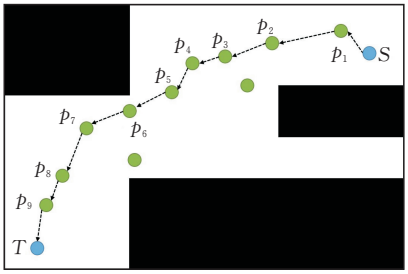
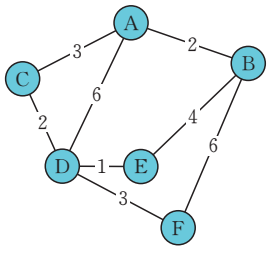


图 5 传统 A* 算法路径图

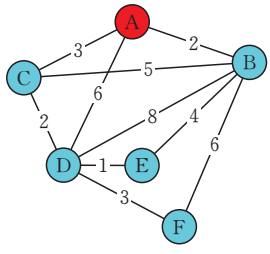
Floyd 算法既可用于栅格地图，也适用于 PRM。基于动态规划原理，若两点直接距离大于经其他点中转的距离，便将最短距离更新为经第三点的距离。如图 5 所示，初始状态下，随机生成的点仅知晓与直接相连点的距离，对间接相连点的距离未知。



(a) Floyd算法构建1

	A	B	C	D	E	F
A	0	2	3	6	∞	∞
B	2	0	∞	∞	4	6
C	3	∞	0	2	∞	∞
D	6	∞	2	0	1	3
E	∞	4	∞	1	0	∞
F	∞	6	∞	3	∞	0

(b) 节点对应图表1



(c) Floyd算法构建2

	A	B	C	D	E	F
A	0	2	3	6	∞	∞
B	2	0	5	8	4	6
C	3	5	0	2	∞	∞
D	6	8	2	0	1	3
E	∞	4	∞	1	0	∞
F	∞	6	∞	3	∞	0

(d) 节点对应图表2

图 6 Floyd 算法构建过程（含 a/b/c/d 子图）

设置安全距离阈值 $d_{safe}=k\cdot l$。其中 l 为相邻路径节点间的连线长度，k 为安全系数（$k>1$，本文取 $k=1.5$），用于确保路径与障碍物保持足够间隔。Floyd 算法基于动态规划原理：若节点 i 到节点 j 的直接距离大于经中间节点 k 中转的距离，则更新最短路径为经 k 中转的路径。通过遍历所有中间节点，可获得任意两点间的最短距离。图 6 展示了 Floyd 算法的构建过程及对应距离矩阵的更新。根据图生成的距离表如图 6b 所示。k 可以根据实际应用场景的需求进行调整。具体的改进优化步骤如下：

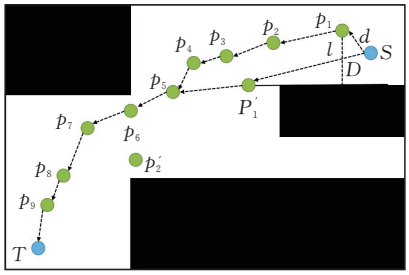


图 7 路径优化前距离判断示意图

步骤 1：以 p 为起点，以 $p+n$ 为终点，保留到起点与终点连线垂直距离最小的中间节点。处理后路径为 $S\rightarrow p_5\rightarrow p_6\rightarrow p_8\rightarrow p_9\rightarrow T_i$。

步骤 2：从起始点 S 的 0°角方向，对刚才保留下来的两个端点 p_i、p_j 之间以 k 长作为单位搜索附近的随机点 m，且与两端点的前一端路径随机点连线判断。若连线穿过障碍物，则保留路径节点；若连线无碰撞，则计算节点间距离 d 并记录。

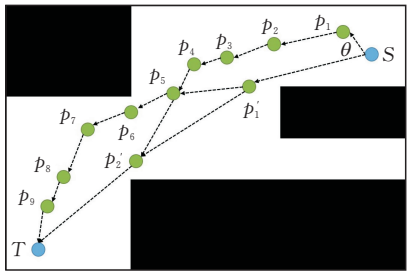


图 8 路径优化后距离判断示意图

图 6 中，路径节点 S 的坐标为 (x_a,y_a)，p_1' 的坐标为 (x_b,y_b)，障碍点 C 的坐标为 (x_c,y_c)。判

断距离 d 为点 C 与节点 A、B 之间线段的垂直距离，l 为障碍点 C 到节点 S 与节点 $p_1^{'}$ 之间线段的竖直偏移量，节点 A、B 之间线段与横轴之间的夹角为 θ。由 S、$p_1^{'}$ 及 C 三点坐标，可求出障碍点到路径的距离 d。

$$l = \left| y_c - \left(\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b}(x_c - x_a) + y_a\right)\right| \tag{7}$$

$$\theta = \left| \arctan\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b}\right| \tag{8}$$

$$d = l\cos\theta \tag{9}$$

判断障碍物与两点间连线的距离 d_{obs} 与设置的安全距离阈值 d_{safe} 的关系：若 $d_{\text{obs}} \geqslant d_{\text{safe}}$，则路径节点不变；若 $d_{\text{obs}} < d_{\text{safe}}$，则将该点标记为新的路径节点。如图 7 所示，处理后的路径为 $S \rightarrow p_1^{'} \rightarrow p_5 \rightarrow p_6 \rightarrow p_7 \rightarrow p_8 \rightarrow p_9 \rightarrow T_i$。

步骤 3：从目的地点 T 方向，反向搜索随机点使用步骤 2 的方式进行判断，输出全局静态优化路径 $Path$，算法结束。如图 8 所示，优化后路径为 $S \rightarrow p_1^{'} \rightarrow p_2^{'} \rightarrow T_i$。

3　组合路径规划算法

3.1　孔位排序的模拟退火策略

模拟退火算法（simulated annealing，SA）源于物理领域固体退火机理，整体分为加热、等温平衡、降温冷却三个阶段。其中，内能 U 会随着温度上升而增加，固体内部的粒子转为无序状态；到了等温阶段，固体内部的无序粒子逐渐趋向有序，固体达到平衡态；冷却阶段中，粒子逐步稳定，内能 U 减少并趋于最低[15]。

设退火开始时的固体温度为 T_o，此时的初始端点记为 x，首次计算该端点的生存函数值 $f(x)$；在退火过程中以 Δx 作为随机产生的扰动模拟退火的扰动因子，并得出新随机位置点 $x^{'} = x + \Delta x$，计算新点函数的值 $f(x^{'})$，以及两者之间的函数值差值 $\Delta f = f(x^{'}) - f(x)$。

假如 $\Delta f \leqslant 0$，则记录当前新生成的随机点，并在下一次模拟退火开始时，以它为模拟退火的起始端点。

假如 $\Delta f > 0$，则计算新点接收概率：$P(\Delta f) = \exp\{-\Delta f/(K \cdot T)\}$，生成区间[0，1]上均匀分布的伪随机数 r。

1）解空间与初始解　多目标点依次遍历问题，本质是从起始点出发选择一条穿过所有目的地，最后再回到起始点的路径构成一个环，这个环的周长对应解空间 Ω 中的一个解[11]。设由起点和所有目标孔位组成的点集共有 $M+1$ 个点可生成 $(M+1)!$ 种排列组合记其中任意一个解为 $\omega = c_1, c_2, \cdots, c_n, M$ 个点可生成 M 种排列组合。由于最终模拟出的最优解与初始值无关，因此本文令初始解设置为 $\omega_0 = c_1, c_2, \cdots, c_n$。

在多目标点遍历问题中，可将回路距离作为代价函数，通过求解代价函数最小值，即可输出孔位最优访问顺序：

$$C(c_1, c_2, \cdots, c_M) = \sum_{i=1}^{M+1} d(c_i, c_{i+1}) + d(c_1, c_M) \tag{10}$$

2）产生新解　任选序号 m、k，交换解中第 m 个元素和第 k 个元素之间的访问顺序[16]，若交换前的路径解为 $S_i = (c_1, c_2, \cdots, c_m, \cdots, c_k, \cdots, c_M)$，则交换后的路径为新路径解[17]：

$$S_i^{'} = (c_1, \cdots, c_{m-1}, c_k, c_{m+1}, \cdots, c_{k-1}, c_m, c_{k+1}, \cdots, c_M) \tag{11}$$

3）目标函数差　计算变换前、后目标函数的差值：

$$\Delta C = C(S_i^{'}) - C(S_i) \tag{12}$$

4）Metropolis 接受准则　接受准则：

$$P = \begin{cases} 1 & \Delta C < 0 \\ \exp(-\Delta C/T) & \Delta C > 0 \end{cases} \tag{13}$$

式中，P 为接受概率。若 $\Delta C < 0$，表示变换后的解代价小于变换前的解，选为新解；若 $\Delta C > 0$，表示变化后的解代价上升，则通过概率 P 评估新解，概率 P 越大，接受可能性越大[9]。

5）降温函数　初始温度 $T_{\max}$、终止温度 $T_{\min}$ 及降温速率 $r(0 < r < 1)$ 用于控制循环执行次数，其降温函数

$$T' = T \times r \tag{14}$$

其中，T' 为选择新解并完成降温后的温度。

3.2　孔位排序的算法步骤

综合上述算法原理，得出基于模拟退火算法的孔位访问顺序排序算法，步骤如下：

步骤 1：创建目的地 $c_1, c_2, \cdots, c_M$，确定初始温度 $T_{\max}$、终止温度 $T_{\min}$ 及降温速率 $r(0 < r < 1)$；将 $c_1, c_2, \cdots, c_M$ 组成 $M!$ 个排列组合的解集 $S = \{(c_1, c_2, \cdots, c_M)\cdots\}$，并生成初始解 $S_o = (c_1, c_2, \cdots, c_M)$。

步骤 2：通过二变换法产生新解 $S_i^{'}$，如式(11)所示，再由式(12)计算变换前、后目标函数的差值 ΔC。

步骤 3：根据 Metropolis 接受准，通过式(13)判断接收概率 P，选出下一代新解；并通过式(14)计算降温函数降温，更新温度 T。

步骤 4：判断模拟退火降温后的温度 T' 是否达到终止温度 $T_{\min}$：满足条件，则输出解；否则，循环执行步骤 3 及步骤 4。

4 仿真实验及结果分析

4.1 仿真参数设置

仿真环境为 30 m×30 m 的二维平面，其中设置 2 个矩形障碍物(20 m×4 m)。孔位坐标根据实际施工需求随机生成于可行区域内。PRM 算法采样点数分别设置为 50、100、200、500、1000，节点连接阈值为 3 m。改进 A* 算法中安全距离系数 $k=1.5$。模拟退火算法参数设置如下：初始温度 $T_{max}=1000$，终止温度 $T_{min}=1\times10^{-3}$，降温速率 $\alpha=0.995$，等温迭代次数 $L=200$。遗传算法种群规模为 50，交叉概率 0.8，变异概率 0.05，迭代 500 次。粒子群算法粒子数为 50，惯性权重 0.7，学习因子 $c_1=c_2=1.5$，迭代 500 次。

为验证本文改进算法的可行性与有效性，基于 MATLAB R2021a 平台开展算法验证实验。仿真实验所用计算机硬件配置如下：CPU 为 Intel Core i7-8700，内存(RAM)32GB。MATLAB 仿真实验具体步骤如下：

实验一：将改进 A* 算法与传统 A* 算法在任意单源路径场景下进行对比，各独立运行 150 次，取平均路径长度与规划时长，通过图表记录传统 A* 算法与改进 A* 算法的对比结果(表 1)。PRM 采样次数设定为 100。

表 1 传统 A* 算法与改进 A* 算法性能指标对比(150 次均值)

算法	PRM 采样次数	规划长度/m	规划用时/s
传统 A* 算法	50	47.33	4.24
	100	45.76	5.45
改进 A* 算法	50	43.63	2.98
	100	41.06	3.82

实验二：将 SA 与改进 A* 算法组合算法，分别与遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)进行对比，分析 3 种算法在 4 个孔位场景下的路径规划效果。对比结果见表 2。

表 2 三种组合算法性能对比(150 次均值)

算法	PRM 采样次数	规划长度/m	规划用时/s
本文组合算法	200	49.82	4.92
	500	44.15	6.8
	1000	40.03	15.24
PSO-A*	200	53.43	4.62
	500	50.54	6.04
	1000	47.42	12.51
GA-A*	200	55.11	3.37
	500	52.92	5.28
	1000	48.43	12.11

4.2 本文算法与传统 A* 算法对比

由图 9 和图 10 可知，传统 A* 算法会规划出转折角度过大的路径，直接影响整体路径规划效果。仿真实验 150 次的平均数值具体如表 1 所示。由表 1 可知，在 PRM 采样次数为 100 时，改进 A* 算法路径长度为 41.06 m，较传统 A* 算法(45.76 m)缩短约 10.3%；规划时长为 3.82 s，较传统 A* 算法(5.45 s)降低约 29.9%。结果表明，改进 A* 算法在路径长度和规划效率方面均优于传统 A* 算法。

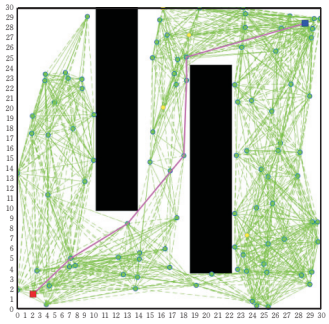


图 9 改进 A* 算法路径规划结果

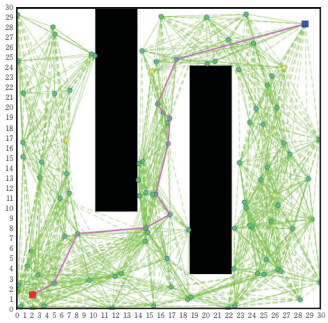


图 10 传统 A* 算法路径规划结果

4.3 多孔位打孔路径规划实验

将定位孔数量设定为 4 个时，3 种算法规划出的路径如图 11 所示。从图中可见，所有算法均成功避开障碍物，其中 SA-改进 A* 算法从整体效果上看更优。PSO 算法(黑色虚线)和 GA 算法(蓝色虚线)在出发点到 C1 的规划中更高效，但难以在全局规划上做得更好；SA-改进 A* 算法(红色实线)规划的路径相较其他算法更平滑，且在全局总路径规划效果上最优。

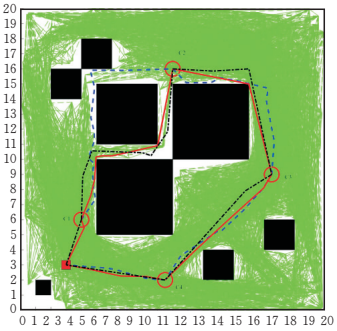


图 11 四孔位场景下三种算法路径对比

3 种算法对比的平均结果如表 2 所示。可见，随着 PRM 算法采样因子增加，各算法规划效果均有提升，但规划时间变长。对比图 12、图 13，在多孔任务路径规划中，SA-改进 A* 组合算法始终保持较优的规划能力。此外，孔位数量较少时，3 种算法规划速度差异不大；当一次性打孔数量超过 3 个时，规划速度差异显著，其中 PSO 算法耗时最长，SA-改进 A* 组合算法规划效率更高。传统 A* 算法时间复杂度为 $O(N\log N)$，其中 N 为搜索节点数，本文改进 A* 算法引入 Floyd 路径优化，Floyd 算法复杂度为 $O(n^3)$（n 为路径节点数），但由于路径节点数远小于 PRM 采样节点总数，实际计算开销较小。模拟退火算法复杂度为 $O(L \cdot K)$，其中 L 为每温度迭代次数，K 为降温步数。整体组合算法在小规模孔位场景（孔位数＜20）下可在秒级完成规划，满足实际施工需求。

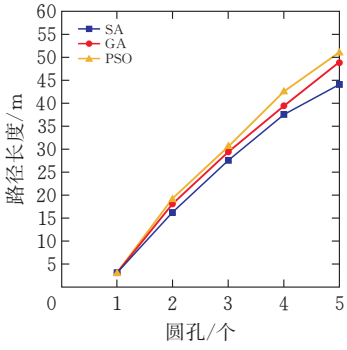


图 12　孔位数量与路径长度关系

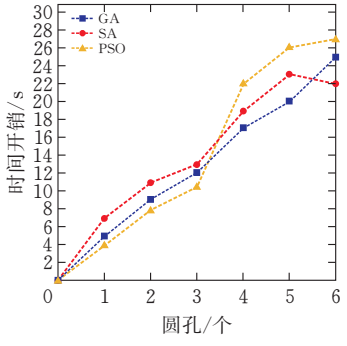


图 13　孔位数量与规划时间关系

5　结论

针对建筑施工场景下移动打孔机器人的多目的地路径规划问题，本文构建了融合概率路线图、改进 A* 算法与模拟退火算法的三层组合路径优化框架。通过环境建模、路径平滑优化与多目标访问顺序全局寻优，有效解决了复杂障碍环境下路径不平滑、规划效率低及多孔位全局路径非最优等问题。仿真结果表明，所提方法在路径长度、平滑度与规划耗时方面均优于传统算法及主流智能优化算法，可为移动打孔机器人在室内施工环境下的自主路径规划提供可行的技术参考。后续可结合动态障碍物避让、实时路径重规划及多机协同调度等方向开展进一步研究，以提升算法在复杂动态施工场景下的适应性与工程应用价值。

[参　考　文　献]

[1] 鲍跃全，李惠.人工智能时代的土木工程[J].土木工程学报，2019,52(05):1-11.

[2] 安园园，马晓宁.改进遗传算法与多目标优化模型的航班路径规划[J].计算机工程与科学，2024,46(09):1660-1666.

[3] 张猜，黄林，彭超达，等.基于约束多目标优化的多区域无人机路径规划[J].计算机仿真，2024,41(07):66-71.

[4] 曾俊海，廉胤东，彭雄峰，等.面向矩阵式制造车间 AGV 调度的改进模拟退火算法[J].自动化与信息工程，2024,45(05):32-39.

[5] 白俊峰，白一辰，席嘉璐，等.基于改进 A* 算法的车间物料配送路径规划[J].吉林大学学报(理学版)，2024,62(06):1401-1410.

[6] 孟浩德，吴征天，吴闻笛，等.基于改进模拟退火算法的灭火小车多目标路径规划[J].计算机与数字工程，2024,52(02):394-398.

[7] 吕竞则，乔文俊，刘顺.基于膨胀栅格的多目标站点 AGV 路径规划方法[J].机械设计与研究，2023,39(06):6-10.

[8] 王步伟，潘鹏程.基于改进鲸鱼优化算法的移动机器人多目标点路径规划[J].机器人技术与应用，2023,(06):14-19.

[9] 唐瑞东，游向荣.基于改进人工势场法的多目标点路径规划[J].农业装备与车辆工程，2023,61(08):105-109.

[10] 余文凯，章政，金震，等.多目的地自主移动机器人的路径规划[J].计算机工程与设计，2020,41(10):2934-2941.

[11] 林韩熙，向丹，欧阳剑，等.移动机器人路径规划算法的研究综述[J].计算机工程与应用，2021,57(18):38-48.

[12] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680.

[13] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(02): 100-107.

[14] 周伟，潘金宝，王林琳，等.基于改进鲸鱼算法和 A* 算法的地面放线机器人路径规划[J].现代制造工程，2023(12):68-75.

[15] 习凤，林逢春.结合模拟退火算法与遗传算法的动态协同路径规划研究[J].舰船科学技术，2024,46(19):161-164.

[16] Tsai C F, Tsai C W, Yang T. A Modified multiple-searching method to genetic algorithms for solving traveling salesman problem[C]. 2002 IEEE Int Conf

on Systems, Man, and Cybernetics. Hammamet: IEEE, 2002: 1-6.

[17] 李勇,仝春灵.基于多目标的车辆导航最优路径规划研究[J].科学技术创新,2021,(26):27-28.

Path Planning for Multi-destination Mobile Drilling Robots

PAN Jinbao, ZHOU Wei

(*School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: To address the global path optimization requirement for mobile drilling robots performing multi-destination operations in construction scenarios, a composite path planning method integrating Probabilistic Roadmap (PRM), improved A* algorithm, and Simulated Annealing (SA) is proposed. First, the PRM algorithm is employed to construct an undirected graph model of the complex construction environment, achieving discretization of the feasible domain. Second, to overcome the insufficient path smoothness of the traditional A* algorithm, the Floyd algorithm is introduced to optimize path nodes, enhancing trajectory smoothness and obstacle avoidance safety. Finally, the simulated annealing algorithm is applied to determine the optimal visiting sequence of multiple hole positions, minimizing the total path length. Simulation results demonstrate that the improved A* algorithm reduces path length by approximately 9.9% and planning time by approximately 25.3% compared with the traditional A* algorithm. In multi-hole scenarios, the proposed composite algorithm achieves shorter global paths and higher planning efficiency than genetic algorithm and particle swarm optimization approaches.

Keywords: intelligent construction; mobile drilling robot; Probabilistic Roadmap (PRM); improved A* algorithm; simulated annealing; path planning

[责任编校: 张 众]

(上接第 37 页)

Research on the Suppression of Groove Torque of Axial Flux Motor with Unequal Polar Arc Coefficient

YUE Mingqiang, LIU Cheng, WANG Xiaoguang

(*Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Cogging torque can deteriorate motor performance and reduce system stability. In order to weaken the cogging torque of axial flux motor, a rotor structure optimization method with unequal arc coefficients is proposed. The expression of slot torque, which establishes the relationship between slot torque and polar arc coefficient of an axial flux motor, is derived for a two-rotor single-stator axial flux motor using energy method and Fourier decomposition, and the polar arc coefficient of permanent magnet which minimizes the cogging torque is also obtained. Based on the principle that the total energy of the air gap magnetic field does not change, the optimum unequal pole arc ratio is obtained based on theoretical derivation and three-dimensional finite element analysis. The simulation results show that the cogging torque is reduced by 63%. The comparison of no load back potential, output torque and loss before and after optimization fully verifies the feasibility and effectiveness of the above method and analysis.

Keywords: cogging torque; axial flux motor; unequal polar arc coefficient

[责任编校: 赵 瞳]