doi：10.13413/j.cnki.jdxblxb.2023507

基于改进 A*算法的车间物料配送路径规划

白俊峰[1]，白一辰[2]，席嘉璐[1]，张今尧[3]
（1. 长春工业大学 机电工程学院，长春 130012；2. 吉林大学 机械与航空航天工程学院，长春 130025；
3. 长春工业大学人文信息学院 管理学院，长春 130122）

摘要：针对传统避障搜索算法在车间物料配送中仅能解决单点配送且未充分考虑多点配送及往返取货需求的问题，提出一种结合遗传算法优化的 A* 算法. 该方法利用 A* 算法的成本计算方式完成有障碍物条件下各配送点之间的成本计算，并融合遗传算法的迭代寻优特性，实现了对多点配送及往返取货需求的高效稳定全局搜索. 通过某车间物料配送的实际算例验证，该改进算法能有效规划障碍环境下的配送路径，显著提升配送效率.

关键词：路径规划；物料配送；遗传算法；A*算法；栅格环境
中图分类号：TP29 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5489(2024)06-1401-10

Workshop Material Distribution Path Planning Based on Improved A* Algorithm

BAI Junfeng[1], BAI Yichen[2], XI Jialu[1], ZHANG Jinyao[3]
(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun* 130012, *China*;
2. *School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun* 130025, *China*;
3. *School of Management, College of Humanities and Information Changchun University of Technology, Changchun* 130122, *China*)

Abstract: Aiming at the problem that traditional obstacle avoidance search algorithms could only solve single-point distribution and inadequately considered the needs for multi-point distribution and round-trip pickups in workshop material distribution, we proposed an A* algorithm that combined a genetic algorithm optimization. This method employed the cost calculation approach of the A* algorithm to complete cost calculation between various distribution points under obstacle conditions, and integrated the iterative optimization characteristics of the genetic algorithm to achieve efficient and stable global search for multi-point distribution and round-trip pickup requirements. Through the verification of a practical example of material distribution in a certain workshop, the improved algorithm can effectively plan distribution paths in obstacle environments and significantly improve distribution efficiency.

Keywords: path planning; material distribution; genetic algorithm; A* algorithm; grid environment

针对复杂障碍环境的路径规划，利用 A* 算法进行精确的邻域搜索选取策略并引入障碍物占用栅格率量化地图信息，有助于提升避障及路径规划的能力[1]. 传统 A* 算法存在遍历节点数多，转折角度

收稿日期：2023-11-29.

第一作者简介：白俊峰(1973—)，男，汉族，博士，副教授，从事生产系统管理和智能算法的研究，E-mail：baijunfeng@ccut.edu.cn. **通信作者简介**：白一辰(2000—)，女，汉族，硕士研究生，从事工业工程和智能算法的研究，E-mail：1512143531@qq.com.

基金项目：吉林省自然科学基金(批准号：YDZJ202201ZYTS545)和长春市工信局项目(批准号：146023).

大和搜索速度慢的问题[2]，在路径扩展搜索时采用8个方向上自适应调整搜索距离机制代替原有固定搜索距离，可减少扩展搜索节点数量，达到减少搜索时间的目的[3]. 遗传算法具有很好的改进路径规划算法的能力[4]，可使用遗传算法解决静态环境下具有可预测地形的移动机器人路径规划问题，该方法可在静态环境中处理不同类型的任务[5]. 在遗传算子的设计中，通过加入自适应调整方法使算法更完善，可解决进化过程中因陷入局部极小值而不能到达目标点的问题[6]，利用包括神经网络在内的算法输出建立遗传算法的适应度函数，并将其应用于遗传算法优化路径的规划方法，已被证明是有效的[7].

为使算法在复杂环境下具有更强的搜索寻优能力，提升其搜索路径的高效性和稳定性，本文通过分析A*算法和遗传算法的性能和搜索原理，提出一种利用栅格法对车间环境进行离散化处理的方法，以实现对存在障碍物的配送环境的有效模拟，利用A*算法的成本计算方式完成有障碍物条件下各节点之间的配送成本计算，并基于此融合遗传算法迭代寻优的搜索方式完成对最佳路径的搜索，以此进行避障和路径寻优目标的实现，使改善后的算法具有高效稳定的全局搜索能力，能有效完成车间复杂配送环境下的路径搜索规划.

1 遗传算法及A*算法

1.1 遗传算法

遗传算法提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架，具有较强的鲁棒性，在解决问题时并不依赖问题的领域，在解决路径规划这类问题上遗传算法应用广泛. 该算法常被应用在函数优化等领域，函数优化也是对遗传算法进行性能评价的常用算例.

在遗传算法中，将n维决策向量$\boldsymbol{V}=(v_1,v_2,\cdots,v_n)$用若干个记号$V_n$($n$为正整数)所组成的符号串$n$表示. 把每个$V_n$视为一个遗传基因，它的所有可能取值称为等位基因，从而V即可视为由n个遗传基因v所组成的一个染色体. 遗传算法通过对染色体V的搜索完成对最优解的搜索，因而所有染色体V即组成了问题的搜索空间. 遗传算法最优解的搜索是通过模拟自然界中生物进化过程中染色体的基因变异以及染色体之间的交叉等过程实现的，所以算法搜索寻优过程是一个进行反复迭代的过程. 在进行具体操作时，遗传算法从第t代群体$P(t)$，经过一代遗传和进化后，得到第$(t+1)$代群体$P(t+1)$. 这个群体不断地经过遗传和进化操作，并按问题求解的需求对遗传算法产生的群体进行筛选，最终在该群体中得到一个最优解[8].

1.2 A*算法

1.2.1 A*算法原理

A*算法搜索的核心是估价函数$f(n)$，该核心函数主要由从初始状态到当前状态的实际代价$g(n)$和从当前状态到目标状态的估计值，即估计需经过多少步才能到达目标点$h(n)$构成. 其中$f(n)=g(n)+h(n)$，扩展节点时，先将所有节点的值从小到大排序，然后对值较小的节点进行扩展.

在A*算法运算过程中，一般实际代价$g(n)$的数值是一定的，因此A*算法评估函数的重点是对估计值$h(n)$的设计. A*算法的运算性能和搜索结果的产生极大程度受估计值$h(n)$的影响，通过对估计值$h(n)$的有效设计可达到提升A*算法性能的目的. 本文采用节点a到目标点b的欧氏直线距离定义$h(n)$可完全满足上述估价函数值达到最小值的要求，保证寻找到的路径为最短路径[9].

1.2.2 环境栅格化

配送物料车间的可通行区域为连续区域且存在各种类型的障碍物，障碍物的几何形状也各不相同. 为简化计算并提升寻径效率，配送物料车间可将连续可通行区域通过单元分解划分为单元，既减少寻径计算强度，又确保寻径结果的准确性，同时考虑障碍物的多样性. 针对车间布局图，可构建具有分辨精度的栅格网格模型，将栅格划分为可通行和不可通行状态[10]. 当存在障碍及障碍边界空间时，栅格的被占用率为100%，用黑色表示；当不存在障碍及障碍边界空间时，栅格的被占用率为0，用白色表示. 图1为环境栅格化示意图.

1.2.3 栅格环境下A*算法的搜索方式

为清晰地描述A*算法在栅格环境下搜索路径的过程，本文描述的A*算法搜索模型如图2所示.

在栅格地图中黑色表示障碍物，蓝色方格表示起始节点，红色方格表示终止节点.

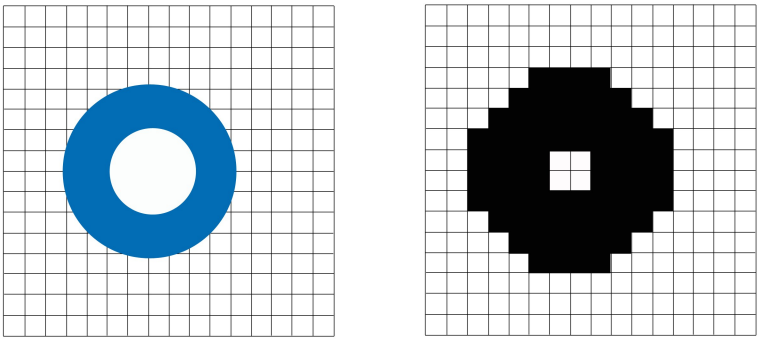


图 1　环境栅格化示意图

Fig. 1　Schematic diagram of environmental gridding

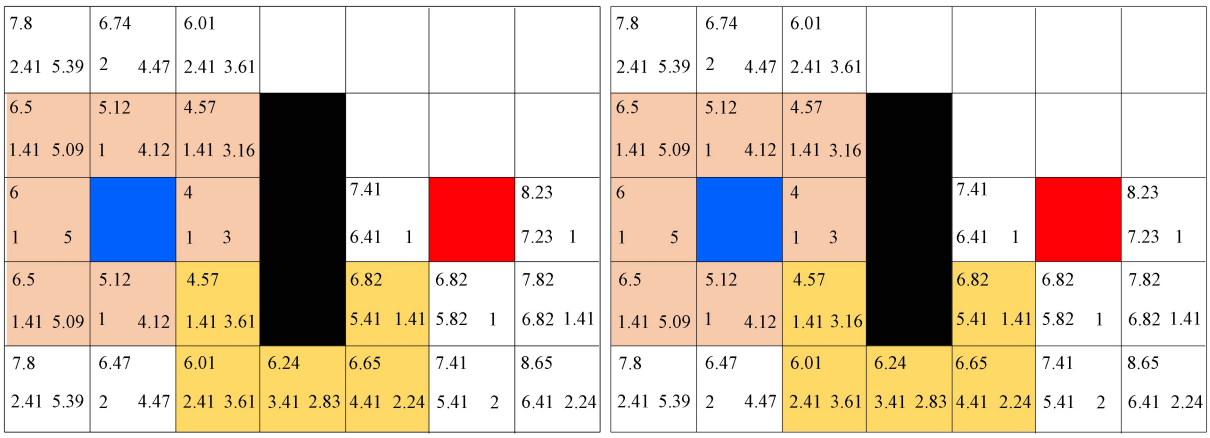


图 2　A* 算法栅格搜索示意图

Fig. 2　Schematic diagram of A* algorithm grid search

首先将起点放入开放列表，将可通行的相邻节点加入开放列表，障碍物则放入关闭列表. 栅格单元包含实际路径成本(左下)、预计消耗成本(右下)和总路径代价(左上)，采用欧氏距离描述路径. 在栅格环境下，A* 算法通过计算相邻节点，选择移动代价最低的点为下一个节点，并考虑转角碰撞，规划绕障路径. 路径代价相同时，算法随机选择路径.

2　改进 A* 算法

A* 算法是一种应用于连通图的经典搜索算法，能在短时间内完成静态环境的路径规划. 但传统的 A* 算法仅适用于障碍环境下从一个节点到另一个节点的路径规划，而遗传算法则能有效完成多点之间的路径规划. 如果能融合 A* 算法的避障寻径能力和遗传算法的多点路径规划能力，则可能解决多目标点车辆路径规划问题. 改进的 A* 算法吸取了这两种算法的优点，既考虑了现实避障的需求，也保持了搜索的全面性和高效性.

2.1　融合遗传算法的改进 A* 算法

利用遗传算法良好的全局搜索能力对 A* 算法进行改进，设计一种遗传 A* 算法，在保障全局搜索稳定的同时，又能使算法适应车间复杂的配送环境，可以更好地完成路径规划. 改进 A* 算法的流程如图 3 所示. 由遗传算法改进的 A* 算法流程如下.

模块 1：利用 A* 算法计算有障碍条件下各目标点两两之间的距离.

步骤 1）对环境进行栅格化处理，记录行进路径的目标点 $V_1, V_2, \cdots, V_n$；

步骤 2）判断各节点间距离是否完成，若未完成则执行步骤 3），若完成则执行步骤 15）；

步骤 3）随机挑选两个节点，记为起始节点和终止节点；

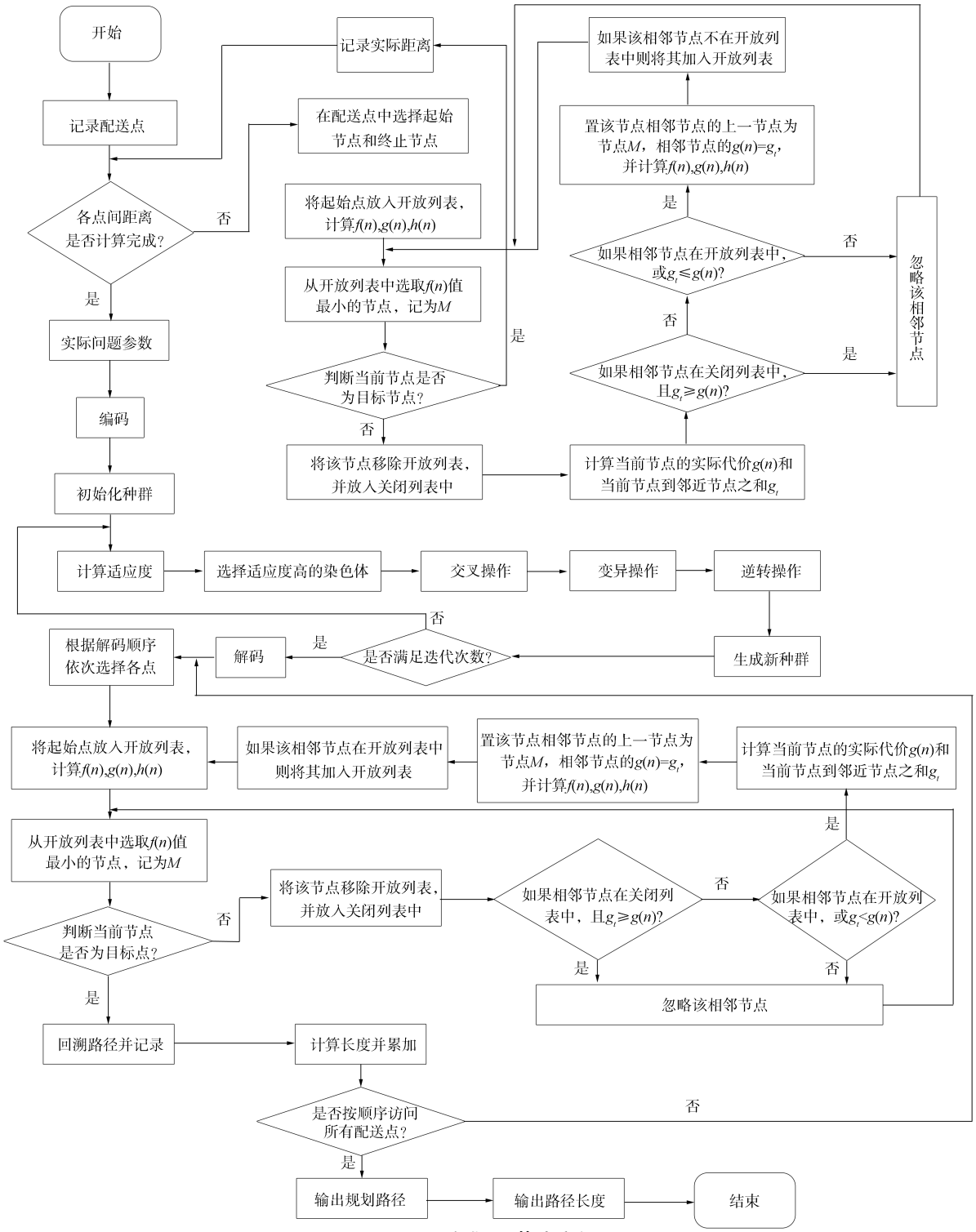


图 3 改进 A* 算法流程

Fig. 3 Flow chart of improved A* algorithm

步骤 4) 将起始节点放入开放列表中(其中开放列表是存放待检查节点的表格),并计算评估函数 $f(n)$、起始点到节点实际代价 $g(n)$以及从节点到目标点最优路径的估计代价 $h(n)$;

步骤 5) 从开放列表中选出并计算评估函数 $f(n)$值最小的节点,记为 M 点;

步骤 6) 判断当前选取的节点是否为终止节点,如果当前节点是终止节点则记录实际移动的距离,返回步骤 2)进行判断;

步骤 7) 如果当前节点不是终止节点,则将当前节点移出开放列表,放入关闭列表中(关闭列表存

放不需要被检查的节点)，并检查临近节点；

步骤 8) 计算起始点到当前节点的实际代价 $g(n)$与当前节点到临近节点距离之和 g_t；

步骤 9) 如果相邻节点在关闭列表中且 g_t 大于等于相邻节点的实际代价 $g(n)$，则忽略该节点并重新寻找相邻节点；

步骤 10) 如果相邻节点不满足步骤 9)的条件，则判断临近节点是否在开放列表或 g_t 小于相邻节点的实际代价 $g(n)$，若不满足则忽略该节点并重新寻找相邻节点；

步骤 11) 如果满足步骤 10)的条件则置该节点为新的当前节点 M，相邻节点的 $g(n)=g_t$，并计算评估函数 $f(n)$和从节点到目标点的最佳路径的估计代价 $h(n)$；

步骤 12) 如果新的当前节点不在开放列表中，则将其加入，并返回步骤 5)继续操作，通过步骤 6)进行判断；

步骤 13) 如果操作通过步骤 6)的判断，则记录实际移动距离并通过步骤 2)判断上述各目标点两两之间距离是否计算完毕，如果完成计算，则重复步骤 3)的操作.

模块 2：根据模块 1 计算出的距离，利用遗传算法完成对最优路径的搜索.

步骤 14) 如果满足步骤 13)，则获得 $D(V_i,V_j)$，$D(V_i,V_j)$表示在有障碍条件下从地点 i 到地点 j 的距离，继续执行如下步骤；

步骤 15) 确定各项参数，将种群初始化，产生一个初始的路径规划编码，然后确定初始化种群的规模，初始化种群的个体编码为 $V_1,V_2,\cdots,V_n$；

步骤 16) 计算适应度函数，根据步骤 15)的种群顺序依次移动，根据载具返回配送中心补货的情况对每个个体生成独立的路径轨迹编码 $v_1,v_2,\cdots,v_n$，其中 v_1 表示配送中心，最终可表示为 $K_1,K_2,\cdots,K_n$；

步骤 17) 选择操作，通过一个与适应度值相关的概率(适应度值越大则对应的概率越大)选择个体到新的种群；

步骤 18) 交叉操作，采用部分映射杂交；

步骤 19) 变异操作；

步骤 20) 进化逆转操作；

步骤 21) 判断，如果不满足迭代次数则执行步骤 16)，如果满足迭代次数则进行解码，生成新种群择优选择找出最佳个体对应的路径各点 v 的排序.

模块 3：根据最优路径规划方案，完成有障碍条件下完整的路径生成及计算.

步骤 22) 根据最优排序依次对各点排序，按顺序依次挑选两点；

步骤 23) 将起始节点放入开放列表中(其中开放列表是存放待检查节点的表格)，并计算评估函数 $f(n)$、起始点到节点的实际代价 $g(n)$以及从节点到目标点最优路径的估计代价 $h(n)$；

步骤 24) 从开放列表中选出并计算评估函数 $f(n)$值最小的节点 M；

步骤 25) 判断当前选取的节点是否为终止节点，如果当前节点是终止节点则回溯路径，记录实际移动的距离；

步骤 26) 如果当前节点不是终止节点，则将当前节点移出开放列表，放入关闭列表中(关闭列表存放不需要被检查的节点)，并检查临近节点，如果是终止节点则转步骤 32)；

步骤 27) 计算起始点到当前节点的实际代价 $g(n)$与当前节点到临近节点距离的和 g_t；

步骤 28) 如果相邻节点在关闭列表中，且 g_t 大于等于相邻节点的实际代价 $g(n)$，则忽略该节点并重新寻找相邻节点；

步骤 29) 如果相邻节点不满足步骤 28)的条件，则判断临近节点是否在开放列表中或 g_t 小于相邻节点的实际代价 $g(n)$，如果不满足则忽略该节点并且重新寻找相邻节点；

步骤 30) 如果满足步骤 29)的条件则置该节点为新的当前节点 M，相邻节点的 $g(n)=g_t$，并计算评估函数 $f(n)$及从节点到目标点最优路径的估计代价 $h(n)$；

步骤 31) 如果新的当前节点不在开放列表中，则将其加入，并返回步骤 24)继续操作，通过步骤 25)进行判断；

步骤32)如果操作通过步骤25)的判断,则记录回溯路径并将实际的移动距离相加,判断是否按步骤22)给出的顺序完成访问所有的配送节点,如果未完成则返回步骤22),按顺序继续依次选择节点,进行操作,如果访问完成配送节点则输出规划路径,计算路径总长度完成算法的路径规划.

2.2 栅格环境下A*算法搜索节点拓展原则

A*算法在搜索过程中需拓展搜索节点,即节点拓展机制.不同节点拓展机制会影响算法搜索的结果,其中四邻域搜索的每个搜索方向之间夹角都为90°,易导致路径转折点过多,搜索路径的移动成本偏高.八邻域搜索在四邻域搜索的基础上又增加了4个邻域,使搜索方向之间的夹角变为45°,优化了搜索角度,扩大了搜索节点的范围[11].八邻域的搜索方式在较复杂的地图环境中易不精确,忽略障碍物的存在.节点的拓展方法如图4所示.

四邻域与八邻域搜索各有局限,本文结合实际需求,采用混合策略:远离障碍物时用八邻域提升精度,靠近障碍物时用四邻域确保避障安全[12].图5为当在障碍物附近和不在障碍物附近时,A*算法分别采取四邻域搜索和八邻域搜索的最终结果[13].

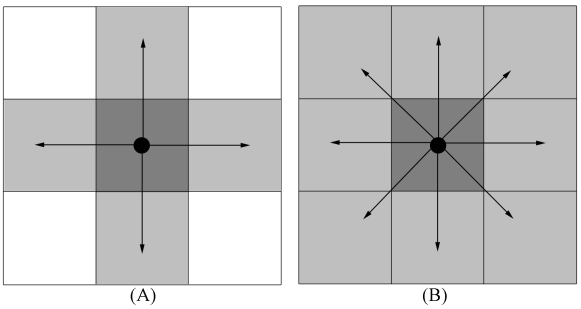


图4 四邻域(A)和八邻域(B)拓展节点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 4 neighborhood (A) and 8 neighborhood (B) expansion nodes

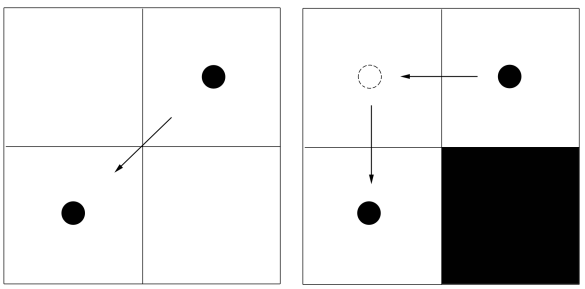


图5 载具移动模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of vehicle movement mode

3 问题建模

3.1 车间物料配送问题描述

为验证本文算法有效性,选择某车间的配送问题作为研究对象.当前该车间仅有一个物料配送中心,物料配送中心有足够的能力保障各物料需求点的物料需求;车间内物料需求点的位置已知且固定,各物料需求点单次物料需求量小于运输载具的最大载荷.每个物料需求点仅需一辆配送载具进行配送;配送载具从配送中心出发,完成本次配送任务后返回配送中心,并接受下一次调度;车间内每条物料配送路径上的载具能满足该条配送路径上的物料需求之和.本文研究中,在满足各需求点物料供应的前提下,配送载具的总配送距离越短即认为配送成本越低.该车间栅格化后的情况如图6所示.

3.2 车间物料配送规划问题模型

根据该车间具体问题的描述,本文的物料配送路径规划问题模型如下:

目标函数为

$$Z=\min\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N}\sum_{k=1}^{N}d_{ij}x_{ijk}, \tag{1}$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^{N}m_i y_{ik}\leqslant Q,\quad k=1,2,\cdots,K, \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{K}y_{ik}=1,\quad i=2,3,\cdots,N, \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^{K}y_{0k}=K, \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N}x_{i0k}=K, \tag{5}$$

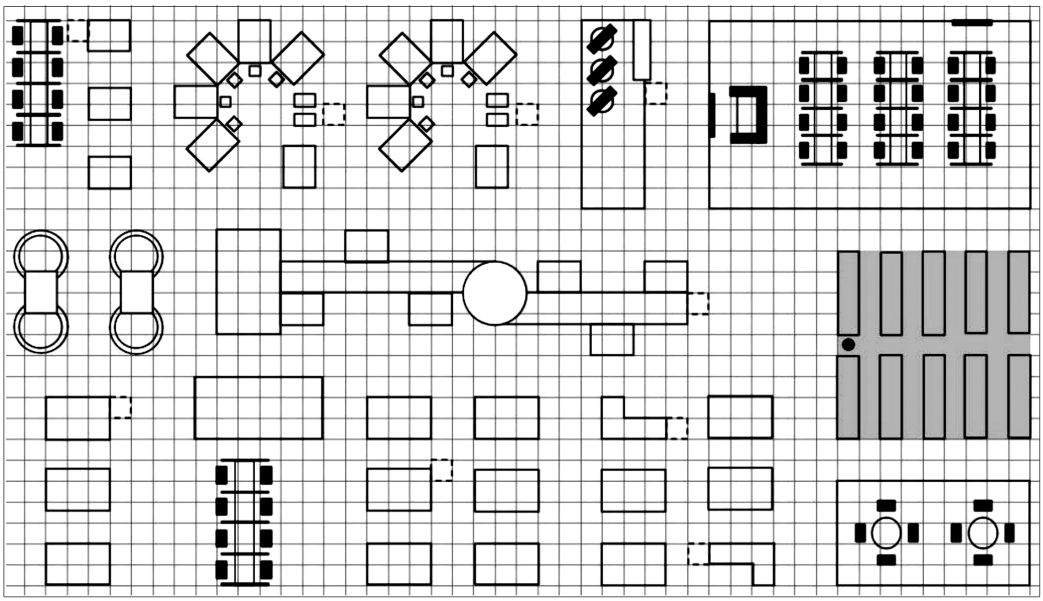


图 6　车间栅格化划分示意图

Fig. 6　Schematic diagram of workshop grid division

其中：K 为配送中心载具数量；Q 为配送中心载具最大载荷；N 为车间内物料需求点数；m_i 为第 i 个物料需求点的物料需求量；d_{ij} 为载具从车间内地点 i 到地点 j 的移动距离；若第 k 辆载具从地点 i 到地点 j，则 $x_{ijk}=1$，否则 $x_{ijk}=0$；若第 k 辆载具完成地点 i 的配送，则 $y_{ik}=1$，否则 $y_{ik}=0$. 上述公式表示了配送路径问题的限制，其中式(2)表示每辆载具的配送路线上各需求点物料需求量之和不应超过载具最大荷载量；式(3)表示每个物料需求点只能由一辆载具完成配送，配送服务仅一次完成；式(4)表示所有载具仅从同一配送中心出发；式(5)表示载具完成配送后返回同一配送中心.

在进行实际搜索计算时，为简化计算结构，载具的运输姿态不应过度考虑在内[14]，理想状态下将载具视为一个质点更方便计算，但由于现实条件下存在运输载具的几何尺寸限制，在进行区域划分时应注意运输单元的划分大于载具的几何尺寸，避免实际应用时载具无法通过构建的可通行单元或发生碰撞[15]. 可通行单元的尺寸 a 应大于载具的最大尺寸 l，即

$$a \geqslant \max l. \tag{6}$$

4　改进 A* 算法应用及性能分析

4.1　改进 A* 算法应用

根据图 6 车间布局的特性，对车间内连续空间进行划分，构建一个 52×52 的模拟配送环境栅格图，对划分好的栅格进行编码，每个栅格通过向上取整进行坐标表达，小栅格为白色表示可通过区域，黑色表示不可通过区域，圆点表示包括配送中心在内的各配送节点[16]. 建立车间布局图的栅格模型如图 7 所示.

根据建立的栅格模拟环境的特性及各配送点的物料需求量建立配送点的信息列于表 1. 在算法开始搜索前，仍需对改进 A* 算法的参数进行设置，改进 A* 算法的重点参数设置如下：栅格坐标尺寸为 52×52，载具配送能力为 1，栅格尺寸比例为 1∶1，交叉概率为 0.9，变异概率为 0.05，代沟参数为 0.9，种群规模为 50×N(N 为需求点数量)，迭代次数为 100×N(N 为需求点数量)[17]. 参数设立完成后，利用改进 A* 算法对车间内配送路径的搜索结果如图 8 所示.

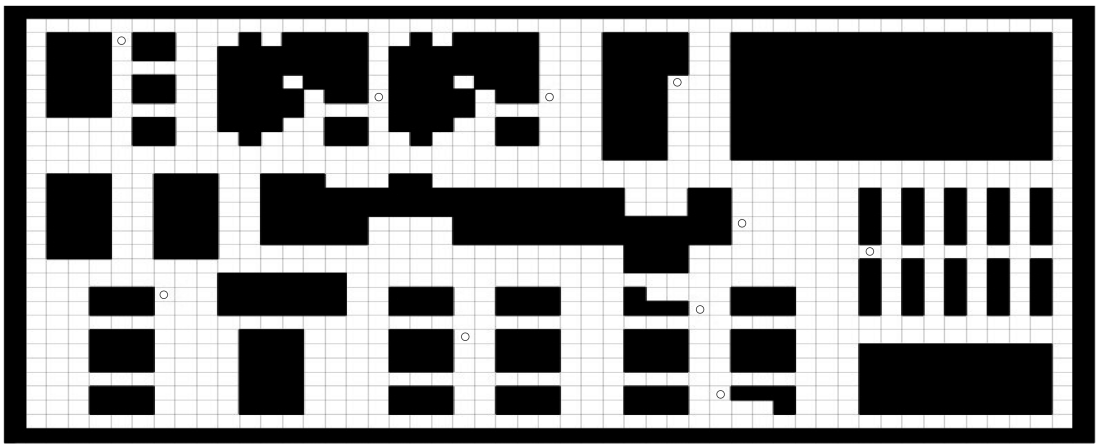


图7 车间环境模拟模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of workshop environment simulation model

表1 配送点信息

Table 1 Distribution point information

编号	节点性质	x 轴坐标	y 轴坐标	需求量
1	配送点	41	25	0
2	需求点	35	27	0.1
3	需求点	34	15	0.4
4	需求点	33	21	0.4
5	需求点	32	37	0.2
6	需求点	26	36	0.25
7	需求点	22	19	0.54
8	需求点	18	36	0.33
9	需求点	8	22	0.34
10	需求点	6	40	0.22

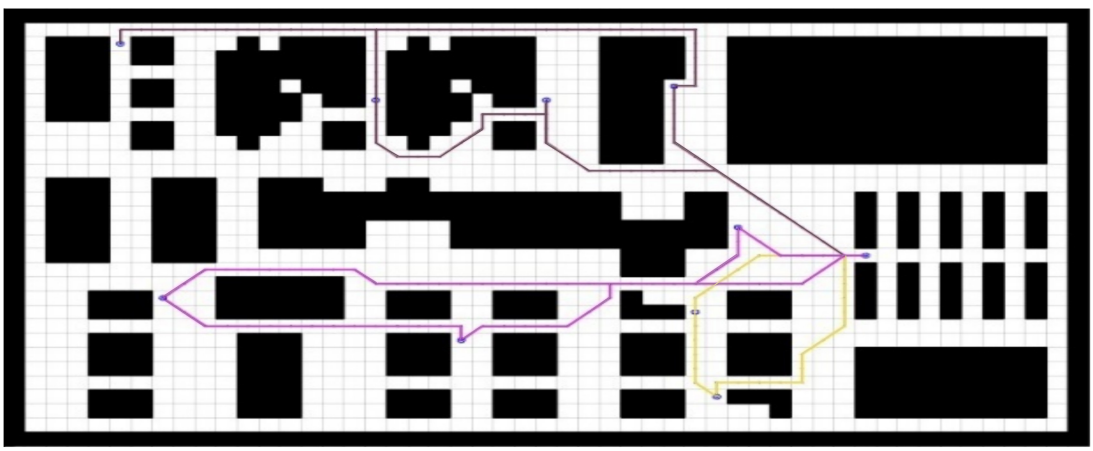


图8 改进 A^* 算法最终搜索结果示意图

Fig. 8 Schematic diagram of final search results of improved A^* algorithm

4.2 算法稳定性验证

为验证算法的稳定性，本文对改进 A^* 算法进行重复搜索运算，算法的各项主要指标列于表2. 由于本文将车间内物料配送路径规划任务转换为利用算法对配送载具的最终移动轨迹进行规划，启发式算法在搜索过程中会根据适应度函数以一定的概率选择搜索节点，所以算法在搜素路径时，对总运输任务下的子任务(各小循环)的出发顺序或出发方向(顺时针或逆时针)会略有不同，规划路线经过各点的顺序也不相同，但从配送任务的全局规划角度，若配送载具的最终移动轨迹和经过的轨迹长度未发

生变化，则可认为规划结果相同，表 2 中不同运行次数给出的经过各点顺序不同，但最终得到的路径规划结果却始终一致，算法的搜索结果均为 211.15，规划路径给出的路线轨迹相同，说明本文算法稳定性较好.

表 2　改进 A* 算法搜索各项指标

Table 2　Improved A* algorithm searches for various indicators

运行次数	运行时间/s	运行结果	收敛代数/次	规划路线经过各点顺序
1	18.46	211.15	100	1—5—10—8—6—1—3—4—1—7—9—2—1
2	18.02	211.15	80	1—3—4—1—5—10—8—6—1—2—7—9—1
3	17.33	211.15	114	1—9—7—2—1—3—4—1—5—10—8—6—1
4	17.53	211.15	141	1—9—7—2—1—3—4—1—5—10—8—6—1
5	18.58	211.15	39	1—4—3—1—7—9—2—1—5—10—8—6—1
6	17.70	211.15	161	1—3—4—1—5—10—8—6—1—2—7—9—1
7	17.97	211.15	15	1—5—10—8—6—1—3—4—1—7—9—2—1
8	18.03	211.15	88	1—4—3—1—7—9—2—1—5—10—8—6—1
9	17.78	211.15	15	1—5—10—8—6—1—3—4—1—9—7—2—1
10	17.52	211.15	211	1—4—3—1—5—10—8—6—1—2—9—7—1

由表 2 可见，改进 A* 算法的搜索时间稳定且均未超过 19 s，算法的最大收敛代数为 211 次，最小收敛代数为 15 次，均未超过 300 次. 实验结果表明，本文改进的 A* 算法在解决规划配送路径问题上具有高效性. 相比于传统 A* 算法，利用遗传算法改进的 A* 算法可保持良好的全局搜索能力，且实用效果较好，因此改进后的 A* 算法具有解决车间物料配送路径规划的能力.

综上所述，本文通过引入遗传算法改进传统 A* 算法的路径规划方式，解决了存在障碍物情况下的车间物料配送问题. 在实际生产过程中，充分考虑了车间内部复杂的障碍环境，采用栅格法对具有障碍限制条件的车间物料配送环境进行离散化建模. 该方法不仅合理描述了环境，还确保了算法能对车间环境进行高效的路径搜索. 同时，利用遗传算法的选择、交叉、变异等操作，增强了传统 A* 算法的全局搜索能力，使算法能精确且高效地完成有障碍环境下的路径搜索及规划任务.

参　考　文　献

[1] 贾明超，冯斌，吴鹏，等. 一种融合改进 A* 算法与改进动态窗口法的文旅服务机器人路径规划 [J]. 图学学报，2024，45(3)：505-515. (JIA M C，FENG B，WU P，et al. Path Planning for Cultural Tourism Service Robots Integrating Improved A* Algorithm and Enhanced Dynamic Window Approach [J]. Journal of Graphics，2024，45(3)：505-515.)

[2] 张涌，成海飞，赵奉奎. 基于自适应 A* 算法的自动驾驶车辆路径规划方法研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2024，43(2)：115-121. (ZHANG Y，CHENG H F，ZHAO F K. Research on Path Planning Method for Autonomous Vehicles Based on Adaptive A* Algorithm [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)，2024，43(2)：115-121.)

[3] 王殿君. 基于改进 A* 算法的室内移动机器人路径规划 [J]. 清华大学学报(自然科学版)，2012，52(8)：1085-1089. (WANG D J. Path Planning for Indoor Mobile Robots Based on an Improved A* Algorithm [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology)，2012，52(8)：1085-1089.)

[4] SAMADI M，OTHMAN M F. Global Path Planning for Autonomous Mobile Robot Using Genetic Algorithm [C]//International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems. Piscataway，NJ：IEEE，2014：726-730.

[5] TAHARWA A L. A Mobile Robot Path Planning Using Genetic Algorithm in Static Environment [J]. Journal of Computerence，2008，4(4)：341-344.

[6] 郝博，秦丽娟，姜明洋. 基于改进遗传算法的移动机器人路径规划方法研究 [J]. 计算机工程与科学，2010，32(7)：104-107. (HAO B，QIN L J，JIANG M Y. Research on Path Planning Method for Mobile Robots Based on Improved Genetic Algorithm [J]. Computer Engineering and Science，2010，32(7)：104-107.)

[7] 刘玲，王耀南，况菲，等. 基于神经网络和遗传算法的移动机器人路径规划 [J]. 计算机应用研究，2007，24(2)：

264-265.(LIU L, WANG Y N, KUANG F, et al. Path Planning for Mobile Robots Based on Neural Network and Genetic Algorithm [J]. Application Research of Computers, 2007, 24(2): 264-265.)

[8] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB智能优化算法30个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 38-39.(SHI F, WANG H, YU L, et al. 30 Case Studies of Intelligent Optimization Algorithms in MATLAB [M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 38-39.)

[9] 黄琦. 履带式无人车辆的路径规划方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.(HUANG Q. Research on Path Planning Methods for Crawler-Type Unmanned Vehicles [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.)

[10] 叶小艳, 钟华钧, 邓可儿. 一种基于改进 A* 算法的室内导航路径规划方法 [J]. 计算机技术与发展, 2022, 32(2): 202-206.(YE X Y, ZHONG H J, DENG K E. An Indoor Navigation Path Planning Method Based on Improved A* Algorithm [J]. Computer Technology and Development, 2022, 32(2): 202-206.)

[11] 王淼弛. 基于 A* 算法的移动机器人路径规划 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.(WANG M C. Path Planning for Mobile Robots Based on A* Algorithm [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.)

[12] 张世清. 自动化工厂的多 AGV 系统路径规划及调度机制研究 [D]. 西安: 西京学院, 2021.(ZHANG S Q. Research on Path Planning and Scheduling Mechanism of Multi-AGV System in Automated Factories [D]. Xi'an: Xijing University, 2021.)

[13] 孙齐, 卞强, 童余德. 基于地磁匹配辅助导航的改进 A* 算法路径规划 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 696-703.(SUN Q, BIAN Q, TONG Y D. Path Planning of Improved A* Algorithm Based on Geomagnetic Matching Aided Navigation [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(6): 696-703.)

[14] 李宇昊, 赵又群. 基于双层控制策略的四轮独立转向无人驾驶汽车路径跟踪 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 386-393.(LI Y H, ZHAO Y Q. Path Tracking of 4WIS Autonomous Vehicle Based on Double-Layer Control Strategy [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(4): 386-393.)

[15] 李玉堂, 赵竞争, 王民水, 等. 基于位置分配模型的避震疏散最优路径规划 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 2018-2028.(LI Y T, ZHAO J Z, WANG M S, et al. Optimal Path Planning for Earthquake Evacuation Based on Location Assignment Model [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 2018-2028.)

[16] 刘仁云, 张美娜, 姚亦飞, 等. 一种新的全局排序高维多目标优化算法 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 60(3): 664-670.(LIU R Y, ZHANG M N, YAO Y F, et al. A Novel High-Dimensional Multi-objective Optimization Algorithm for Global Sorting [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2022, 60(3): 664-670.)

[17] 秦剑, 张飞凯, 张映辉, 等. 基于地理信息数据的货运索道选址及路径规划方法 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 2081-2088.(QIN J, ZHANG F K, ZHANG Y H, et al. Location and Path Planning Method of Freight Ropeway Based on Geographic Information Data [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 2081-2088.)

(责任编辑: 韩 啸)