

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.05.012

大规模自动分拣仓库运输车分区调度路径规划

刘冰洁

(安徽审计职业学院 商学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 常规运输车分区调度路径规划方法对运输车最佳路径调度参数的计算不准确, 会导致运输车运输时间较长, 为此提出大规模自动分拣仓库运输车分区调度路径规划方法。使用神经网络逼近算法, 对大规模状态下的 Q 值进行拟合, 并对种群数量进行计算, 将拥挤度最大的个体选取出来, 建立运输车分区调度路径规划模型。通过免疫遗传算法对最佳路径调度参数进行计算, 按照参数对货物的取货次序进行交换, 得到近状态下的近似输出动作指令, 运输车按照该动作指令进行调度, 完成运输车分区调度路径的规划。实验结果表明, 在本文方法规划的调度路径下, 运输车任务完成时间较短, 说明该方法具有较好的应用效果。

关键词: 大规模仓库; 自动分拣; 运输车; 分区调度; 路径规划; IGA 算法

中图分类号: TP18

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)05-0082-07

引文格式: 刘冰洁. 大规模自动分拣仓库运输车分区调度路径规划 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(5): 82-88.

Partition Scheduling Path Planning for Large Scale Automatic Sorting Warehouse Transport Vehicles

LIU Bingjie

(Business College, Anhui Audit College, Hefei 230601, China)

Abstract: In view of the inaccurate calculation of the optimal path scheduling parameters for transportation vehicles as well as the subsequent longer transportation time with the conventional transportation vehicle partition scheduling path planning method adopted, a partition scheduling path planning has thus been proposed for large scale automatic sorting warehouse transport vehicles. By using neural network approximation algorithm to fit the Q -values in large-scale states, a transportation vehicle partition scheduling path planning model is established, with the population size calculated, and with the individuals with the highest crowding degree selected. By using immune genetic algorithm to calculate the optimal path scheduling parameters, the order of goods pickup is exchanged according to the parameters so as to obtain approximate output action instructions in the near state, with the transport vehicle scheduled according to this action instruction for a completion of the planning of the transport vehicle partition scheduling path. The experimental results show that under the scheduling path planned by the currently proposed method, the completion time of transportation vehicle tasks is relatively short, indicating that the method is characterized with a good application effect.

Keywords: large scale warehouse; automatic sorting; transport vehicle; partition scheduling; path planning; IGA algorithm

收稿日期: 2024-05-29

基金项目: 安徽省质量工程智慧物流虚拟仿真实训基地基金资助项目 (2022xnfzjd009)

作者简介: 刘冰洁, 女, 安徽审计职业学院讲师, 主要研究方向为物流工程, 供应链管理, E-mail: lbj113@126.com

0 引言

大规模仓库仓储的货物较多,其分拣调度路径会直接影响仓库的作业效率。对运输车分区调度路径进行合理规划,有利于降低生产成本,提高仓库综合效益^[1]。目前,自动化立体仓库的运输车调度由传统的人工运输方式逐步被自动化系统取代。大规模自动分拣仓库的运输车分区调度路径规划,一直是仓库运输领域研究的重要课题^[2],众多学者对此进行了研究。

文献[3]提出了基于小生境遗传算法,首先利用货格所在行列的奇偶性,根据曼哈顿距离公式,建立了仓库内任意两拣货点(含复核台)之间的距离计算公式。然后将整个拣货-复核作业过程映射为一个旅行商问题,构建了0-1规划模型。最后选用小生境遗传算法进行求解,在变异策略中引入小生境技术,保证了种群的多样性,较好地克服了标准遗传算法中种群早熟和易陷入局部最优的缺点。但是由于计算过程较为复杂,导致在实际应用过程中存在一定的局限性。文献[4]提出了使用并行排序蚁群算法,规划仓库AGV(automated guided vehicle)路径,按照非递减的顺序对货物数进行排序,考虑了插入货物时产生的时间、成本等因素,通过带约束的多目标优化,利用算法的遍历性和内在随机性,实现了全仓库运输车路径的全局优化,但是运输车完成任务时间大幅度增加。文献[5]给出了考虑任务优先级的多AGV系统路径规划算法,并基于仓库复杂环境下AGV作业方式提出了动态避障策略。以二维空间建立多AGV运作拓扑地图,采用改进的A*算法求解单AGV最优路径,并应用Logistic函数描述多AGV系统路径使用频次的负载因子,减少多AGV系统阻塞路段以提高系统运作效率;同时提出了两项同步并行避碰机制以解决多AGV运作环境下存在的4种碰撞类型。但使用Logistic函数描述多AGV系统路径,使用频次的负载因子存在局限性,如AGV电量、维护状态、货物紧急度等因素难以全面反映,影响负载评估准确性。文献[6]提出了USV(sport utility vehicle)的多目标路径规划问题,该问题的目标是最小化行驶距离,并行最大化轨迹的平滑性和能量效率。为了解决这一具有矛盾项的多目标路径规划问题,采用了流行的蚁群优化算法,并在所提出的模糊Pareto框架基础上进行了改进。然后通过Mamdani模糊推理系统对这些解进行评估,以确定最优解。但蚁群优化算法的性能很大程度上取决于其参数设置,如信息素挥发率、信息素强度等。不恰当的参数设置可能导致算法收敛速度慢或陷入局部最优解。

为解决上述方法存在的问题,本文提出一种大规模自动分拣仓库运输车分区调度路径规划方法,通过研究以期缩短运输车完成任务的时间,提高运输车在自动分拣仓库中的分区调度效率和准确性,为仓库物流管理提供更有有效的解决方案。

1 运输车分区调度路径规划模型与参数

1.1 调度路径规划模型

为了实现对大规模自动分拣仓库运输车分区调度路径的规划。考虑到大规模仓库存在的状态空间过大的问题,使用神经网络逼近算法,对大规模状态下的 Q 值进行拟合,如图1所示。

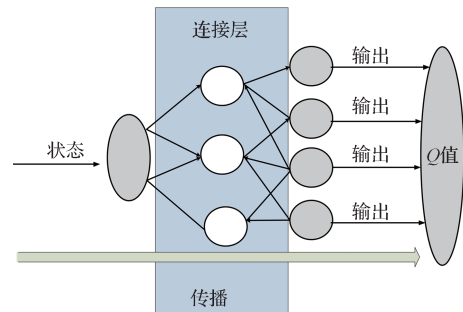


图1 Q 值拟合示意图

Fig. 1 Q -value fitting diagram

由图1可知,该神经网络结构由多个连接层和一个输出层组成。每个连接层都与特定的状态相关联,并通过一系列权重向量将信息传递给下一层。这些权重向量在训练过程中被不断调整,以更准确地反映状态与行动之间的关系。在输出层,得到了一个 Q 值,它代表了在当前状态下执行某一行动的预期回报。这个 Q 值是通过神经网络对大量历史数据进行学习后得出的,它提供了一种评估不同行动优劣的方式。整个神经网络的运行是通过传播过程实现的,即从输入层开始,信息逐层传递,最终到达输出层并产生 Q 值。这个传播过程在训练时用于计算梯度并更新权重,而在实际应用中则用于根据当前状态快速生成 Q 值。通过神经网络逼近算法对大规模状态下的 Q 值进行拟合,能更加高效地处理复杂的仓库环境,并为运输车提供准确的路径规划建议。这种方法不仅提高了自动分拣仓库的运行效率,还降低了人为错误的可能性,为现代物流领域带来了显著的进步。

按照拟合的 Q 值参数,对 Q 值差值的期望值进行计算,从而得到 Q 值差值的期望参数 R_z ,可用公式表示为

$$R_z = \sqrt{A_1 + b_1 \times C} + (s_0 \times j_2) / (r + a_1), \quad (1)$$

式中: A_1 为网络参数; b_1 为目标 Q 值参数; C 为损失函数; r 为训练动作系数; j_2 为衰减系数; a_1 为学习率参数。

根据 R_z 对 Q 值函数进行更新, 计算公式如下:

$$x_3 = 1/X_1 + (1+V+B)/C_1 \times R_z + a \times O. \quad (2)$$

式中: X_1 为学习率系数; C_1 为优势函数; V 为公共部分的网络参数; B 为动作集合; a 为整个系统的状态; O 为运输车的状态。

在此基础上, 对运输车的动作进行表示, 公式为

$$Z_1 = (f_2 + x_3 \times H \times l \times f) / \sum \sqrt{K \times J}, \quad (3)$$

式中: f_2 为下一个时刻的状态参数; J 为车辆状态转换系数; H 为与静态障碍的交集为空的概率; l 为交集不为空时的动作; f 为相向冲突概率; K 为取货目标状态。

就此得到运输车的动作表示, 在此基础上, 对个体的运输车拥挤度距离进行表示^[7], 如图 2 所示。

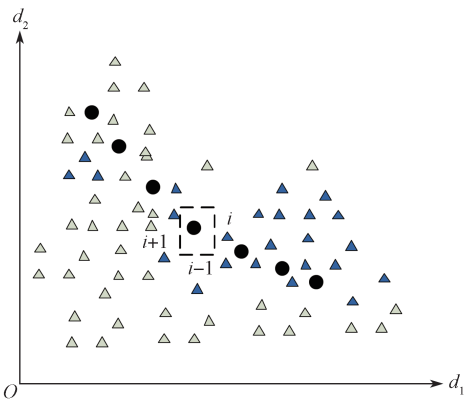


图 2 个体的拥挤度距离

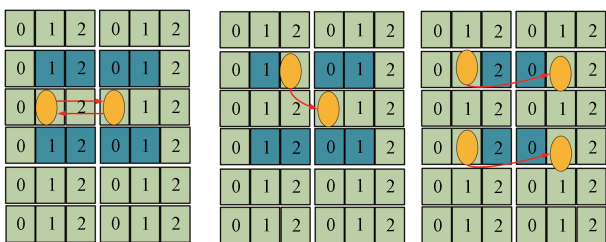
Fig. 2 Individual crowding distance

根据个体拥挤度距离, 对静态障碍物集合进行表示, 公式为

$$x = \sum f_0 / L + (m+M)/(j_1+U) \times Z. \quad (4)$$

式中: f_0 为障碍物所在坐标; m 为动作选择次数; M 为正向奖励值; j_1 为当前时刻的距离奖励; L 为负向奖励系数; U 为静态障碍物的无序搜索系数。

在此基础上, 根据运输车的冲突模式不断更新环境参数^[8], 运输车的冲突模式如图 3 所示。



a) 平行交叉冲突 b) 直角转弯冲突 c) 相向对遇冲突

图 3 运输车冲突模式

Fig. 3 Transport vehicle conflict mode

按照运输车的冲突模式, 去除不可选择的动作, 并对时刻状态进行记录, 以此建立调度路径规划模型, 如下式所示:

$$G = \sum N / \sum \sqrt{E} + (G+x+j) / \sqrt{l_2 \times k_1}, \quad (5)$$

式中: E 为下一状态更新频次; N 为添加动作剪枝之后的动作; G 为障碍物与运输车冲突概率; l_2 为距离优先级系数; j 为当前动作状态; k_1 为内存池中存储的单个解系数。

从而得到调度路径规划模型, 根据该模型, 对运输车最佳路径参数进行计算。

1.2 运输车最佳路径调度参数

根据调度路径规划模型, 对运输车之间的动作差值进行计算, 公式为

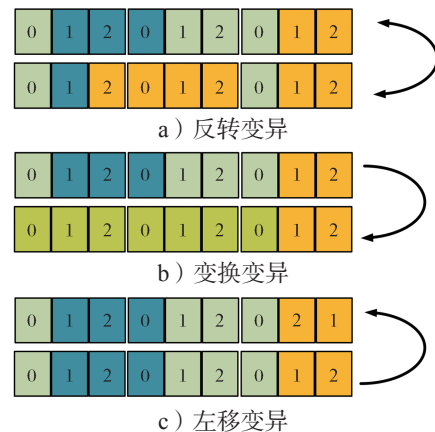
$$R = (\sum r_1 + t_1 \times y_1) / (l + X_z) + 1/D, \quad (6)$$

式中: r_1 为优先级训练参数; t_1 为样本的初始概率; y_1 为迭代次数; X_z 为状态改变系数; D 为冲突次数优化系数。

通过免疫遗传算法 (immune genetic algorithm, IGA) 对种群中选择个体的数量进行计算^[9]。在运输车路径规划问题中, 种群中每个个体代表一种特定的运输车路径分配方案, 通过编码将具体的路径分配方案转化为遗传算法可以理解的染色体形式。使用整数编码, 其中每个整数代表一个任务或位置, 染色体顺序代表运输车任务执行顺序, 计算公式为

$$Z_3 = \sum W / (f_3 + s_r) + 1 + R / h_e \times g, \quad (7)$$

式中: f_3 为任务编号序列; s_r 为断点部分参数; W 为任务执行顺序系数; h_e 为运输车数量; g 为断点部分的间断点最大值, 从而得到种群中的个体数量。结合染色体变异参数对位置的基因交换系数进行计算^[10], 如图 4 所示。



c) 左移变异

图 4 染色体变异方式

Fig. 4 Chromosome variation

按照染色体变异操作流程^[11-13], 对位置的基因交换系数进行计算, 公式为

$$Z_2 = \sum \frac{1}{f_4 + s_i} + \frac{R_0}{h_c \times g_r} + Z_3. \quad (8)$$

式中: f_4 为新的染色体数; s_i 为改进后的变异操作的插入系数; h_c 为反转变异系数; g_r 为任务序列的基因数量, 为随机生成新的断点参数; R_0 为初始种群中的个体数量^[14-15]。

根据基因的交换系数建立新种群的条件判断条件^[16], 如下所示:

$$d = \begin{cases} 1, & (1+V_s)/(H_z + j_4) > S_1 + A + Z_2; \\ 0, & (1+V_s)/(H_z + j_4) = S_1 + A + Z_2; \\ -1, & (1+V_s)/(H_z + j_4) < S_1 + A + Z_2. \end{cases} \quad (9)$$

式中: V_s 为反转插入系数; H_z 为新种群条件判断系数; S_1 为个体的适应度参数; A 为最高的染色体复制比例^[17-18]; j_4 为染色体数量。

根据判断条件, 对路径参数进行迭代计算, 如图5所示。

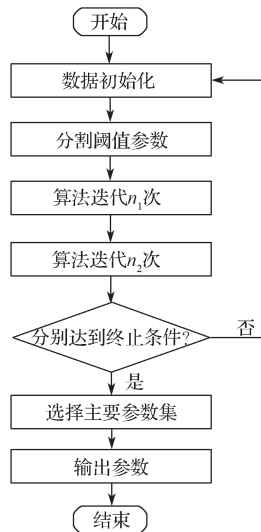


图5 迭代计算流程

Fig. 5 Iterative calculation process

在进行迭代计算后, 得到最终的运输车路径调度参数为

$$U = \sum (T+Y)/(b+m) + (k_2+1)/\sqrt{F+d \times J_2}. \quad (10)$$

式中: T 为条件判断结果; Y 为结束条件的染色体数; b 为迭代循环次数; m 为初始种群的阈值; k_2 为分割阈值参数; F 为暂时种群执行次数; J_2 为初始化种群系数。

根据得到的运输车路径最佳调度参数, 对仓库运输车调度路径进行分区规划。

1.3 分区规划仓库运输车调度路径

根据计算的最佳路径参数, 规划仓库运输车分区调度路径。以计算的最佳路径参数为基础数据, 通过

快速非支配排序, 对种群数量进行计算, 并将拥挤度最大的个体选取出来^[19-20], 种群选择示意图如图6所示。

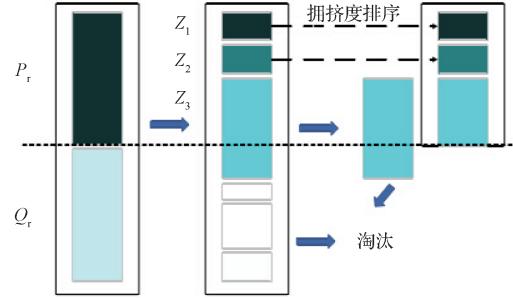


图6 种群选择示意图

Fig. 6 Population selection diagram

按照种群选择, 在考虑众多约束条件的基础上, 对某一位置的参数进行选取, 并按照染色体选择流程, 生成满足约束的个体, 染色体选择过程见图7。

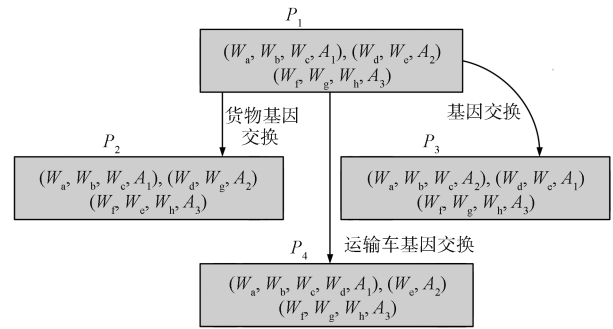


图7 染色体选择方式示意图

Fig. 7 Schematic diagram of chromosome selection method

根据染色体选择过程^[21-22], 随机选择两个货物基因, 对货物的取货次序进行交换, 在此基础上, 对运输车的状态和动作信息进行记录, 并对 Q 值函数进行拟合, 得到近状态下的近似输出动作指令, 运输车按照该动作指令进行调度, 从而完成大规模自动分拣仓库运输车分区调度路径规划。

2 实验与结果分析

为了验证设计的大规模自动分拣仓库运输车分区调度路径规划方法的有效性, 进行仿真实验。

2.1 实验仿真

本文以某大规模分拣仓库作为研究对象进行仿真实验。仿真实验的配置信息如表1所示。

表1 实验配置信息

Table 1 Experimental configuration information

名称	参数	名称	参数
CPU 型号	Intel i5-7500@ 3.4 GHz	开发语言及版本	Python
内存类型	1 600 MHz 8 GB	开发工具	PyCharm
硬盘容量	8 TB	数据库	MySQL
操作系统	Windows 10	网络带宽	1 Gbps
显示器配置	分辨率 1 920 × 1 080	存储扩展	SSD

该自动分拣仓库主要设计的部分为传送装置、立体货架等。按照仓库的情况，对仓库进行建模，假设仓库的大小为 1 200 m×1 200 m，而运输车的速度为 0.5 m/s，并且处于匀速行驶状态，使用栅格表示仓库中的货架。为了增加实验的可靠性，设置两种不同的仓库模型，仓库环境栅格图如图 8 所示。

两种仓库的大小相同，但是其货架与运输车的情况有一定差别，实验算法参数取值如表 2 所示。

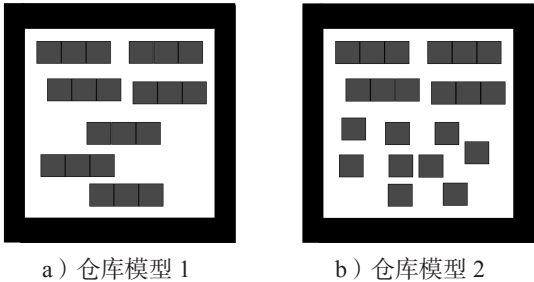


图 8 仓库环境栅格图
Fig. 8 Experimental configuration information

表 2 实验算法参数取值

Table 2 Parameter values for experimental algorithms

参 数	取值	参 数	取值
信息素重要程度 z_g	3	能见度重要程度 d_l	5
信息素挥发系数 z_h	0.7	增加强度系数 d_v	2.0
总个数 r_u	4	交叉概率 τ	0.6
变异概率 ζ	0.01	加速指数 λ	4
种群数目 R_w	300	总个数 r_f	6

2.2 实验数据

基于大规模自动仓库，对仓库的实验数据进行设置，相关数据情况如表 3 所示。

表 3 实验数据

Table 3 Experimental data

参 数	取值	参 数	取值
面积 m_g	1 200 m×1 200 m	运输车运行速度 v_j	0.5 m/s
路径宽度 z_f	12 m	运输车负载 g_t	30 t
层高 k_m	2 m	可用运输车数量 u_h	80
货架数 u_v	30	工作中心数量 z_x	5
货架高度 h_o	2 m	运输车取货时间 t_b	4 s

根据仓库的数量设置不同的任务，根据该参数进行分析。

2.3 实验过程

为了实现大规模自动分拣仓库运输车的分区调度路径规划，整个算法过程可以概括为以下几个关键步骤：首先，利用神经网络逼近算法对大规模状态下的 Q 值进行拟合，通过收集训练数据并训练神经网络来准确预测给定状态下的 Q 值。接着，采用遗传算法（IGA）对调度路径进行优化，通过编码、初始化种群、评估适应度、选择、交叉、变异等操作，迭代搜索最佳路径调度方案。在遗传算法中，结合神

经网络逼近的 Q 值评估个体的适应度，并通过染色体变异和迭代计算逐步优化路径参数。在得到优化后的路径参数后，建立调度路径规划模型，通过计算 Q 值差值期望、动作表示、拥挤度距离等，进一步细化调度方案。随后，基于最佳路径参数，通过快速非支配排序和选择操作，从种群中选取最优个体作为运输车的调度路径。最后，根据染色体选择过程，随机交换货物的取货次序，生成满足约束的个体，并拟合值函数得到近似输出动作指令，指导运输车进行分区调度路径的规划和执行。

2.4 实验结果与分析

使用本文设计方法进行实验，为了验证实验的有效性，同时使用文献 [3-6] 的方法作为对比方法进行实验，对任务数量为 10 时的工作完成时间进行统计，可以得到如图 9 所示实验结果。

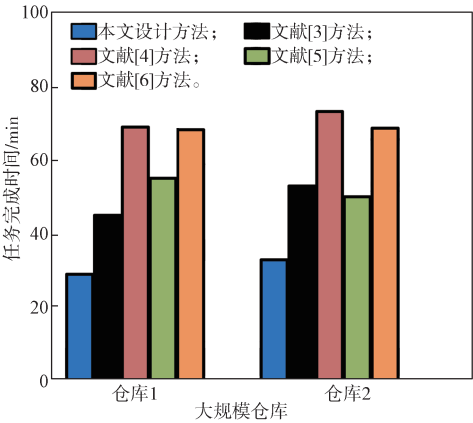


图 9 运输时间统计

Fig. 9 Transportation time statistics

从图 9 中可以看出，本文设计的方法，运输车对任务完成的时间较短，说明其路径规划较好，缩短了运输时间，具有较好的应用效果。

对不同仓库任务完成时间进行统计，得到仓库 1 的结果如表 4 所示。

表 4 仓库 1 任务完成时间统计

Table 4 Warehouse 1 task completion time statistics

任务数量	本文方法	文献 [3] 方法	文献 [4] 方法	文献 [5] 方法	文献 [6] 方法
10	33	56	72	58	68
20	35	62	83	64	73
30	36	79	97	77	75
40	42	86	109	85	86
50	59	98	115	90	89
60	65	104	121	94	93
70	71	115	134	98	97
80	84	129	145	103	105
90	95	136	156	110	114
100	109	143	163	128	126
110	117	156	177	130	132

对仓库2的任务完成时间进行统计,可以得到如表5所示的结果。

表5 仓库2任务完成时间统计

Table 5 Warehouse 2 task completion time statistics

任务数量	任务完成时间/min				
	本文设计 方法	文献[3] 方法	文献[4] 方法	文献[5] 方法	文献[6] 方法
10	33	55	72	59	69
20	42	69	85	69	83
30	55	77	98	76	88
40	69	81	109	82	98
50	78	95	112	89	105
60	84	106	125	95	115
70	95	114	134	107	120
80	106	122	142	112	128
90	111	139	15	128	131
100	122	148	169	135	139
110	137	156	171	140	145

从表4~5中可以看出,随着任务数量的增加,运输车的任务完成时间也有所增加,但是相对于其它的方法,在本文设计方法规划的调度路径下,运输车的任务完成时间较短,说明本文研究设计方法的应用效果较好。

3 结语

本文提出了一种大规模自动分拣仓库运输车分区调度路径规划方法。通过使用神经网络逼近算法,对大规模状态下的 Q 值进行了拟合,并对种群数量进行了计算,规划的调度路径下,运输车的运输时间大幅度减少,实际应用效果较好。大规模自动分拣仓库运输车分区调度路径规划研究,可以优化车辆的行驶路径,减少空转和重复行程,从而提高仓库的整体物流效率。不仅如此,通过合理的路径规划,可以减少运输车辆的行驶距离和时间,降低运输成本,避免不必要的等待和拥堵,减少能源消耗和车辆损耗,进一步降低运营成本。这些贡献对于仓储物流行业和自动化分拣领域都具有重要意义。

参考文献:

- [1] 余娜娜,李铁克,王柏林,等.自动化分拣仓库中多AGV调度与路径规划算法[J].计算机集成制造系统,2020,26(1):171-180.
YU Nana, LI Tieke, WANG Bailin, et al. Multi-AGVs Scheduling and Path Planning Algorithm in Automated Sorting Warehouse[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 171-180.
- [2] 柴亚珂,卢东旭,郭斌峰.智能车在复杂环境下的路径规划与跟随控制算法研究[J].时代汽车,2023(15):190-192.
CHAI Yake, LU Dongxu, GUO Binfeng. Research on Path Planning and Following Control Algorithm of Intelligent Vehicle in Complex Environment[J]. Auto Time, 2023(15): 190-192.
- [3] 蒲晶,谭代伦,郭潇.基于小生境遗传算法的仓库拣货-复核路径规划[J].四川轻化工大学学报(自然科学版),2022,35(1):84-92.
PU Jing, TAN Dailun, GUO Xiao. Warehouse Picking-Review Path Planning Based on Niche Genetic Algorithm[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2022, 35(1): 84-92.
- [4] 于军琪,李若琳,赵安军,等.并行排序蚁群算法规划仓库AGV路径研究[J].机械科学与技术,2021,40(4):609-618.
YU Junqi, LI Ruolin, ZHAO Anjun, et al. Planning Warehouse AGV Path with Parallel-Ranking Ant Colony Optimization Algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(4): 609-618.
- [5] 孙兆臣,孙晓琴,杨文.智能化仓库的AGV路径规划与紧急避障系统[J].山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(3):483-488.
SUN Zhaochen, SUN Xiaoqin, YANG Wen. AGV Path Planning and Emergency Obstacle Avoidance System in Intelligent Warehouse[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(3): 483-488.
- [6] NTAKOLIA C, KLADIS G P, LYRIDIS D V. A Fuzzy Logic Approach of Pareto Optimality for Multi-Objective Path Planning in Case of Unmanned Surface Vehicle[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2023, 109(1): 21.
- [7] 李馨远,孟铃翔.无人钢材仓库智能起重机路径规划[J].起重运输机械,2019(20):106-110.
LI Xinyuan, MENG Lingxiang. Path Planning of Intelligent Crane in Unmanned Steel Warehouse[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2019(20): 106-110.
- [8] 邵建娜,张雅秀,曾欣怡,等.机器人针刺成型异形预制体的路径规划[J].固体火箭技术,2023,46(4):600-610.
SHAO Jianna, ZHANG Yaxiu, ZENG Xinyi, et al. Path Planning for Robot Needle-Punching Forming of Special-Shaped Preforms[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2023, 46(4): 600-610.
- [9] 任志伟,胡平,闫方,等.基于蚁群-改进人工

- 势场法的移动机器人路径规划[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2023, 51(4): 52-63.
- REN Zhiwei, HU Ping, YAN Fang, et al. Mobile Robot Path Planning Based on Ant Colony and Improved Artificial Potential Field Method[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(4): 52-63.
- [10] 程 俊, 董学平, 张志军. 基于改进狼群算法的 AGV 路径规划[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(7): 879-885.
- CHENG Jun, DONG Xueping, ZHANG Zhijun. AGV Path Planning Based on Improved Wolf Pack Algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2023, 46(7): 879-885.
- [11] 毕 桂. 染色体重组鱼群算法的机器人导航路径规划[J]. 机械设计与制造, 2021(6): 197-201.
- BI Gui. Robot Navigation Path Planning Based on Chromosome Recombination Fish Swarm Algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(6): 197-201.
- [12] 陈泽峰, 李华山, 赵瑞云, 等. 基于改进基因算法的海洋平台巡检机器人路径规划[J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(2): 173-177.
- CHEN Zefeng, LI Huashan, ZHAO Ruiyun, et al. Path Planning of Offshore Platform Inspection Robot Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Computing Technology and Automation, 2023, 42(2): 173-177.
- [13] 辛 钢, 宋少忠, 张 慧, 等. 基于改进遗传算法的路径规划问题应用[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2022, 40(6): 946-953.
- XIN Gang, SONG Shaozhong, ZHANG Hui, et al. Route Planning Problem Application Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2022, 40(6): 946-953.
- [14] 周加全. 基于改进遗传算法路径规划问题的研究[J]. 微型电脑应用, 2021, 37(11): 1-3, 8.
- ZHOU Jiaquan. Research of Path Planning Problem Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Microcomputer Applications, 2021, 37(11): 1-3, 8.
- [15] 陈高远, 宋云雪. 改进遗传算法在移动机器人路径规划中的应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(2): 302-307.
- CHEN Gaoyuan, SONG Yunxue. Application of Improved Genetic Algorithm in Mobile Robot Path Planning[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(2): 302-307.
- [16] 冯培伦, 于小洁, 刘 强, 等. 改进遗传算法在强边界路径规划中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 170-173, 180.
- FENG Peilun, YU Xiaojie, LIU Qiang, et al. Research on the Application of Improved Genetic Algorithm in Strong Boundary Path Planning[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(9): 170-173, 180.
- [17] 吴元君, 徐玉林. 基于改进混合遗传算法的教学楼火灾逃离路径优选研究[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 75-79.
- WU Yuanjun, XU Yulin. Study on Optimum Evacuation Path of Teaching Building Fire Based on Improved Hybrid Genetic Algorithms[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 75-79.
- [18] 吴玉文, 牛智越, 李珍萍. 基于改进遗传算法的货箱机器人拣选路径规划[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(5): 1086-1097.
- WU Yuwen, NIU Zhiyue, LI Zhenping. Picking Path Planning of Container Robots Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(5): 1086-1097.
- [19] 于佳乔, 李 岩. 基于改进遗传算法的自动驾驶小车路径规划调度[J]. 机床与液压, 2022, 50(5): 16-20.
- YU Jiaqiao, LI Yan. Research on AGV Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(5): 16-20.
- [20] 宋启松, 李少波, 栢龙炫, 等. 基于改进遗传算法的自动导引小车路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(7): 88-92.
- SONG Qisong, LI Shaobo, ZHE Longxuan, et al. Path Planning for Automatic Guided Vehicle Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(7): 88-92.
- [21] HAMED I A H, ABOLGHASEMI H, MOAYEDI N F. Integrating Artificial Immune Genetic Algorithm and Metaheuristic Ant Colony Optimizer with Two-Dose Vaccination and Modeling for Residual Fluid Catalytic Cracking Process[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2023, 48(12): 16329-16341.
- [22] ASADUJJAMAN M, RAHMAN H F, CHAKRABORTTY R K, et al. Multi-Operator Immune Genetic Algorithm for Project Scheduling with Discounted Cash Flows[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 195(6): 116589.1-116589.22.

(责任编辑: 姜利民)