陶泽, 黄波. 改进 GA 算法的多 AGV 任务编排优化研究[J]. 智能计算机与应用,2026,16(6):226-231. DOI:10. 20169/j. issn. 2095-2163. 24092402

改进 GA 算法的多 AGV 任务编排优化研究

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

摘 要: 本文针对工厂自动化仓储系统中多自动导引车(Automated Guided Vehicle,AGV)的批量任务编排问题展开研究。首先将工厂多任务编排优化问题抽象成多旅行商问题(Multiple Traveling Salesman Problem,MTSP),其中任务被视为城市点,AGV 从一个任务到下一个任务的空跑距离被定义为城市之间的距离。为优化 AGV 的总空跑距离,同时考虑任务时间窗约束,采用改进的遗传算法(Genetic Algorithm,GA)。提出 2 种改进策略:改进交叉和变异算子,结合顺序交叉和混合变异算子;改进适应度函数,引入时间窗惩罚项以提高解的质量和可行性。实验结果表明,改进的遗传算法成功解决了多 AGV 多任务分配问题,并能够有效处理带有时间窗约束的任务。通过提出的改进策略,算法的收敛速度、稳定性和鲁棒性显著提升。这些改进使得算法在实际应用中更加高效和可靠。

关键词: 任务编排; 自动导引车; 多旅行商问题; 遗传算法; 时间窗约束
中图分类号: TP319 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)06-0226-06

Research on multi-AGV task scheduling optimization based on improved Genetic Algorithm

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

Abstract: This paper focuses on the batch task scheduling problem of multiple Automated Guided Vehicles (AGVs) in automated warehouse systems. Firstly, the multi-task scheduling optimization problem in factories is abstracted as the Multiple Traveling Salesman Problem (MTSP), where tasks are treated as cities and the empty travel distance for an AGV from one task to the next is defined as the distance between cities. To optimize the total empty travel distance of AGVs while considering task time window constraints, an improved Genetic Algorithm (GA) is employed. Two improvement strategies are proposed: enhancing the crossover and mutation operators by combining sequential crossover with hybrid mutation operators; and improving the fitness function by introducing a time window penalty to enhance solution quality and feasibility. The experimental results show that the improved Genetic Algorithm successfully addresses the multi-AGV multi-task allocation problem and effectively handles tasks with time window constraints. Through the proposed improvement strategies, the algorithm´s convergence speed, stability, and robustness have significantly increased. These enhancements make the algorithm more efficient and reliable for practical applications.

Key words: task scheduling; Automated Guided Vehicles (AGVs); Multiple Traveling Salesman Problem (MTSP); Genetic Algorithm (GA); time window constraints

0 引 言

在现代制造业中,自动导引车(AGV)作为一种关键技术,已经广泛应用于各个领域、有效地提升物流效率和降低生产成本。AGV 能够通过自动化操作实现物料的高效运输,显著减少人工干预,从而优化生产流程。在物流管理中,AGV 的任务分配调度起着至关重要的作用。合理的调度不仅可以最大限度地利用资源,还能确保生产线的连续性和稳定性,进而提高整体生产效率。为了提升 AGV 系统的整体效率,必须根据不同应用场景的需求,制定合理的任务分配和调度策略,以实现优化目标,如缩短完成

作者简介: 陶 泽(2000—),男,硕士研究生。主要研究方向:AGV 调度优化算法,任务分配优化算法。Email:taoze2000@ qq. com;黄 波(1975—),男,博士,讲师。主要研究方向:AGV 调度算法,工业信息网络和室内定位算法研究。

收稿日期: 2024-09-24

任务时间或减少能量消耗[1]。在路径规划方面，遗传算法因其卓越的全局寻优能力，成为解决 AGV 调度问题的重要工具。遗传算法通过模拟自然选择和遗传变异的过程，能够在复杂的搜索空间中找到最优解，保证 AGV 的运行路径最短且最节省能源。最终，AGV 的有效运用不仅提升了物流效率，也显著降低了运营成本，使得有关企业能够在激烈的市场竞争中保持领先地位。

曾亮等学者[2]提出了一种基于文化算法框架的改进遗传算法用于多 AGV 调度，通过将 AGV 调度与任务分配编码并进行交叉遗传操作，以最小化最大完工时间为目标实现了任务调度和路径规划的同步优化。李缘[3]改进了粒子群遗传算法的多任务分配优化策略，并进一步考虑了周期任务的分配。Wang 等学者[4]提出了一种基于多决策点模型的异构多 AGV 耦合任务调度方法，通过混合模拟退火与禁忌搜索算法优化，解决了制造系统中异构 AGV 的复杂任务调度问题。Hu 等学者[5]提出了一种基于任务绑定策略和改进粒子群优化的混合任务分配方法，用于处理装配线中单 AGV 任务和多 AGV 任务的分配问题。上述研究集中在静态任务分配问题上。冯开团等学者[6]考虑了 AGV 工作速率和运行成本，提出了一种改进的注水算法用于离散车间 AGV 任务分配，但其适用范围较为有限。丁一等学者[7]提出了一种两阶段优化模型，通过改进的模拟退火算法和时空网络路径规划算法，实现自动化集装箱码头 AGV 的有效调度，显著降低总作业时间和冲突数量。Li 等学者[8]提出了一种改进的和谐搜索算法，通过优化总行驶距离、工作负荷标准差及任务交付时间预测误差，实现了高效的任务分配和排序。这种方法在提高效率的同时，依然面临算法收敛速度的问题。杨玮等学者[9]则提出了一种变邻域模拟退火算法，用于多 AGV 仓储系统任务分配优化。与遗传算法相比，该算法在不同任务规模下有效降低了总代价，并提高了收敛性和搜索效率，展现出在动态环境下的优越性。然而，该方法在处理复杂度较高的实际应用时，仍需进一步验证其可行性。杨智飞等学者[10]采用自适应多目标遗传-差分进化算法，针对智能生产车间中的多 AGV 调度问题进行优化。该研究通过改进算法质量和收敛速度，旨在实现多目标优化，尽管如此，如何平衡多个目标之间的冲突仍需开展深入的探讨研究。马千慧等学者[11]构建了以最小化最大完工时间、最小化总延期及设备总负荷为目标的 AGV 双约束多目标调度模型，应用于智能制造环境中的柔性作业车间。然而，该模型的复杂性可能限制其在实际场景中的应用。Zhang 等学者[12]提出的混合载荷 AGV 调度模型，通过遗传算法优化，成功降低了混合模型汽车装配线的物流系统总成本。但仍需指出，该研究未能充分考虑调度中动态因素对效率的影响。王赟等学者[13]的基于改进鲸鱼优化算法的多目标优化调度模型，针对柔性作业车间中的 AGV 调度问题，利用模糊隶属度理论获得最优折衷解。然而，如何确保算法在实际应用中的稳定性和效率，仍需进一步的实验验证。张艳菊等学者[14]提出的改进遗传算法(IGA)，用于多搬运任务的 AGV 路径规划，优化了 AGV 与托盘的匹配、单 AGV 路径以及多 AGV 的碰撞避免。这一方法的提出为解决 AGV 调度中的实际问题提供了新的思路。

Mahmoudinazlou 等学者[15]的研究利用混合遗传算法解决多旅行商问题(mTSP)，通过动态规划评估和新型交叉算子优化最长路径长度，展示了遗传算法在复杂调度问题中的潜力。Gutiérrez-Aguirre 等学者[16]提出了一种多算子遗传算法，旨在解决旅行商问题与作业时间问题，目标是最小化最后完成任务的时间，然而，该方法在实际应用中的适应性和通用性尚需更多实证支持。杨青等学者[17]提出了结合 NSGA-II 和 CSA 的 INGCSA 算法，用于优化灵活车间中 AGV 与机台的调度，实验表明其具有较高的稳定性和收敛性。孙爱红等学者[18]基于深度强化学习和卷积神经网络，提出了 AGV 与机器的联合调度算法，展现了智能化解决复杂调度问题的潜力。于琪等学者[19]通过融合任务优先级的蚁群算法，实现了多 AGV 路径规划中的精准防撞，为多 AGV 路径优化提供了有效方案。诸葛沁沁等学者[20]基于图论的方法，优化了大规模无人仓库中 AGV 的数量配置与调度问题，在提升求解速度和降低运输成本方面表现优异。苗培仁等学者[21]提出的改进麻雀搜索算法有效解决了 AGV 约束下的管道加热器柔性作业车间调度问题，但主要集中于单一优化目标，未充分探讨任务时间窗和多目标调度的复杂性。尽管这些研究在各自领域取得了突破，但仍有部分算法在任务时间窗和多目标调度的处理上存在不足，而本文通过改进遗传算法，进一步提升了多 AGV 任务编排和调度的效率。

针对自动仓储系统中多 AGV 的多任务分配问题，现有研究较少关注优化 AGV 的空跑距离，且存在效率低和调度不均衡的情况，同时缺乏任务时间

窗的约束。传统调度方法、如粒子群优化(PSO)在动态环境中常面临收敛速度慢和局部最优的问题。因此,本文采用改进遗传算法(GA),因其在全局搜索和适应性方面表现优越,适合处理多 AGV 调度的复杂性。将多任务编排优化抽象为多旅行商问题(MTSP),引入时间窗约束,综合考虑 AGV 的总空跑距离和时间成本,以实现高效任务分配。提出顺序交叉和混合变异算子,提高性能和收敛速度。最后,使用工厂实际数据进行验证和分析。

1 多 AGV 调度模型与多旅行商问题

1.1 多 AGV 调度模型

自动导引车(AGV)因其优越的适应能力,广泛应用于工业生产中。在多 AGV 调度研究中,通常假设以下条件:

(1)场景中有 X 个 AGV 作业点,彼此间有通路且已知距离。

(2)系统中有 N 台正常运行的 AGV,工作独立且无冲突。

(3)共有 M 个任务,每个任务从一个作业点到另一个作业点,忽略作业时间。

(4)AGV 为单负载,每次仅执行一个任务,且任务数量超过 AGV 数量。

(5)AGV 以恒定速度行驶,忽略负载和转弯对速度的影响。

模型参数及变量定义:n 表示 AGV 数量;m 表示任务数量;t_{ij} 表示 AGV v_i 执行任务 a_i 所需的时间;d_i 表示 AGV v_i 的行驶路程;d_{ij}^{unload} 表示 AGV v_i 执行任务 a_i 的空载路程;d_{ij}^{load} 表示 AGV v_i 表示执行任务 a_i 的负载路程;v 表示 AGV 的运行速度。

本文以所有 AGV 的总行程最小化作为优化目标。设每台 AGV 的总路程分别为 d_1, d_2, …, d_N, 则目标函数为:

$$\min f = \sum_{m=1}^{N} d_m \tag{1}$$

由于每个 AGV 的负载路程是确定的,优化所有 AGV 的总行程等同于最小化其总空载行程(总空跑路程)作为优化目标,目标函数为:

$$\min f = \sum_{m=1}^{N} d_m^{\text{unload}} \tag{2}$$

1.2 抽象成多旅行商问题

将工厂多 AGV 调度问题抽象成多旅行商问题(MTSP),其中每个城市点位代表一个 AGV 任务 a_i,城市的 value 为 d_{ij}^{load}, 其含义是 AGV 执行该任务从 A 点送货到 B 点需要行驶的距离,而从一个城市到下一城市的路程相当于任务 a_i 的目标终点到任务 a_{i+1} 的起点的路程。多 AGV 调度问题抽象 MTSP 示意如图 1 所示,B 点到 C 点的距离即为城市 1 和城市 2 之间的路程,也即空跑距离。最终所有城市之间的路程之和即为所有 AGV 的总空跑路程 $\sum_{m=1}^{N} d_m^{\text{unload}}$。

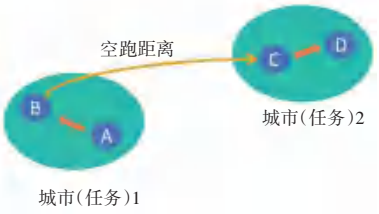


图 1 多 AGV 调度问题抽象 MTSP 示意图

Fig. 1 Multi-AGV scheduling problem abstracted as MTSP diagram

2 改进的遗传算法求解多旅行商问题

2.1 改进交叉与变异算子

为减少查找空间和冗余解,算法采用两段式染色体编码表示多旅行商问题(MTSP),如图 2 所示。第一部分长度为 n,表示城市的随机排列;第二部分长度为 $m-1$,表示将路径分为 m 个旅行商的间断点,递增编号。以 $n=14$、$m=4$ 为例,城市(编号 1~14)通过随机生成的断点(如 3、7、11)划分。每个旅行商依次遍历特定城市,城市和旅行商对应于 AGV 任务和 AGV。



图 2 带断点位置的 2 部分染色体编码原理图

Fig. 2 Schematic diagram of chromosome encoding with breakpoint positions

本文对多旅行商问题中的传统交叉和变异操作进行了改进,提出了一种顺序交叉和双重变异的策略,以提升算法的整体性能和种群多样性。

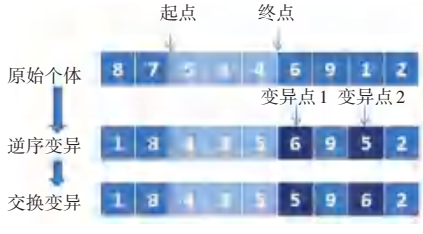
交叉操作方面,采用顺序交叉方法以保留染色体的部分有序性。具体操作如图 3(a)所示,在父代个体中选择交叉点,将一段染色体基因直接复制到子代个体中,同时保证基因的顺序性以提高新个体的质量。假设父代个体 1 为[8, 7, 5, 3, 4, 6, 9, 1, 2],父代个体 2 为[1, 8, 4, 7, 9, 5, 2, 6, 3]。在选择交叉点后,子代个体 1 和子代个体 2 将分别继承父代个体的部分基因序列,生成的子代个体 1 为[1,8, 7, 3, 4, 6, 9, 5, 2],子代个体 2 为[8, 3,

4，7，9，5，2，6，1]。这种顺序交叉方式不仅保留了染色体的部分有序性，还能有效提升交叉后个体的质量和搜索效率。

变异操作则结合了逆转变异和交换变异两种方法，进一步增加种群的多样性。图 3(b)展示了具体的变异过程。首先，通过逆转变异对染色体中的一段基因进行逆转，如对染色体[8，7，5，3，4，6，9，1，2]的第 3~6 个基因进行逆转，结果为[1，8，4，3，5，6，9，5，2]。其次，通过交换变异对染色体中任意 2 个基因的位置进行交换，例如在相同的染色体中交换第 5 个和第 7 个基因，结果为[1，8，4，3，5，5，9，6，2]。这种双重变异策略在增加种群多样性的同时，增强了算法跳出局部最优解的能力，有助于提高全局搜索能力。



(a) 交叉算子



(b) 变异算子

图 3　交叉算子与变异算子

Fig. 3　Crossover operators and mutation operators

2.2　改进适应度函数

在实际工厂中，AGV 系统的任务调度需遵守严格的时间窗约束。本文在适应度函数中引入时间窗惩罚项，以降低未在指定时间窗内完成任务的适应度，从而提升算法的准确性和效率。适应度函数 F 为优化目标函数的倒数，定义以下通用的适应度函数改进模板：

$$F' = F - \alpha F_{\min} \cdot h(k) - \beta P_{\text{penalty}} \tag{3}$$

其中，$\alpha F_{\min} \cdot h(k)$ 表示修正部分；$F_{\min}$ 表示迭代到目前为止适应度函数的最小值，α 和 β 为权值，一般取 0~1 的浮点数；P_{penalty} 表示时间窗惩罚项，用于惩罚未在时间窗内完成任务的个体。设某任务要求的时间窗为(t_a, t_b)；t_a、t_b 分别表示该时间窗的开始时间和结束时间，$(t_{\text{va}}, t_{\text{vb}})$ 表示 AGV 执行该任务的时间窗，P_{penalty} 表示 AGV 执行该任务的开始结束时间与任务要求的时间窗的差值，定义见下式：

$$P_{\text{penalty}} = \gamma(\max(0, t_{\text{va}} - t_a) + \max(0, t_b - t_{\text{vb}})) \tag{4}$$

其中，γ 表示惩罚系数。

$h(k)$ 为修正函数，直接决定了适应度函数中修正部分的影响，并随当前迭代次数 k 的增加而变化。本文选择 Sigmoid 修正函数，其形式为：

$$h(k) = \frac{1}{1 + e^{-\delta(k - \frac{R}{2})}}, \quad k = 1, 2, 3, \cdots, R \tag{5}$$

其中，R 表示最大迭代数，δ 表示修正系数。选择 Sigmoid 函数作为修正函数的原因在于其平滑的非线性特性。在迭代初期，Sigmoid 函数对适应度值进行适度修正，以避免算法过早陷入局部最优解；而在后期，修正幅度逐渐增大，从而增强全局搜索能力。这一特性使得 Sigmoid 修正函数在优化过程中更加有效。

3　实验与分析

为了验证改进的遗传算法在解决多 AGV 任务编排优化问题方面的有效性、鲁棒性等性能，本文以工厂中实际采集到的数据进行实验测试。本次测试用例涵盖了工厂 2024 年 7 月 1 日到 7 月 5 日的每日 AGV 任务数据，每天的任务数量平均在 200 个以上，可调度的 AGV 数量在 4~6 辆之间。任务数据包括了任务起始点、终止点以及任务执行时间等详细信息。实验设置算法的参数为：种群规模数 (N) 为 500，最大迭代次数 (Gen) 为 2 000，交叉概率 (Pc) 为 0.8，变异概率 (Pm) 为 0.08。

为了更贴合实际工厂使用场景，设计了多种不同的编排方式：每天编排一次当日所有任务和每小时编排一次当前小时内的任务，以及加入任务的时间窗约束后每小时进行编排实验。

图 4 列出了改进 GA 算法针对各个实例采用不同编排方式的实验结果比较。实验使用了工厂 2024 年 7 月 1 日到 7 月 5 日的每日 AGV 任务数据，该 5 日的任务数量分别为 218 条、196 条、174 条、257 条和 250 条任务，可调度的 AGV 数量均为 5 辆。实例 7 月 1 日任务，相较于初始就近编排方式，使用改进的遗传算法进行每日编排和每小时编排后，总空跑分别减少了 52% 和 30%。在加入时间窗约束后，编排结果在满足时间窗要求下较初始数据也有一定提升。综合 7 月 1 日到 7 月 5 日数据的实验结果，3 种编排方式下综合实验结果分别提升了 50%、30%以及 20%以上。

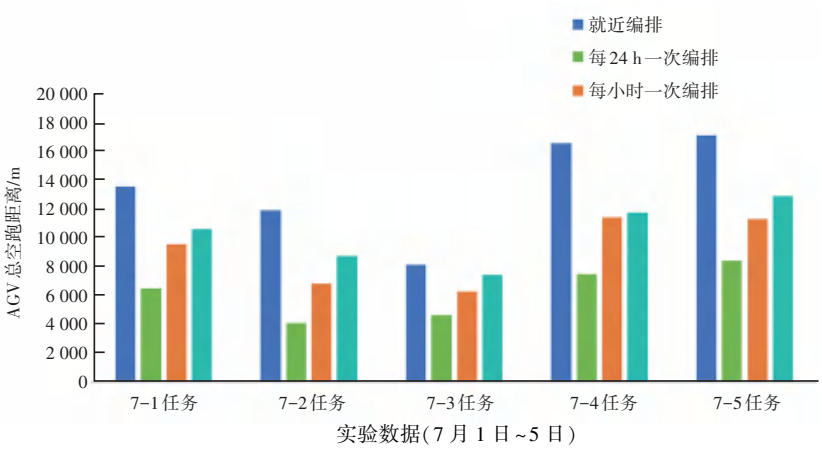


图 4 改进 GA 算法对各个实例采取不同编排方式的实验结果比较

Fig. 4 Experimental comparison of improved GA with different scheduling strategies

本文针对 AGV 多任务编排问题,改进了传统遗传算法的交叉变异算子和适应度函数,以同时满足带时间窗任务的要求并提高算法的收敛速度。对比改进前后的遗传算法,以及粒子群优化算法(PSO)和蚁群算法(ACO)的优化平均性能,结果见表 1。为减少误差影响,每个算例运行 30 次,结果取平均。结果显示,改进后的 GA 算法在求解结果和效率上均优于传统 GA、PSO 和 ACO。例如,在 2024 年 7 月 1 日的 218 条任务实例中,改进的 GA 算法的平均空跑距离为 6 797 919 m,平均耗时为 12.0 s,而传统 GA 算法的平均空跑距离为 7 539 752 m,耗时同样为 12.0 s。此外,PSO 和 ACO 算法的平均空跑距离分别为 7 408 789 m 和 8 289 727 m,平均耗时分别为 8.1 s 和 16.9 s。图 5 展示了改进前后遗传算法以及 PSO 和 ACO 算法在 7 月 1 日任务数据上的收敛曲线。结合表1中的算法平均耗时结果,就可以看出改进后的算法收敛速度显著优于其他算法,且其运行时间约为传统 GA 算法的三分之一。综上所述,改进算法不仅确保了优化结果,还能有效减少迭代次数,提升优化速度,展现出显著的优势。

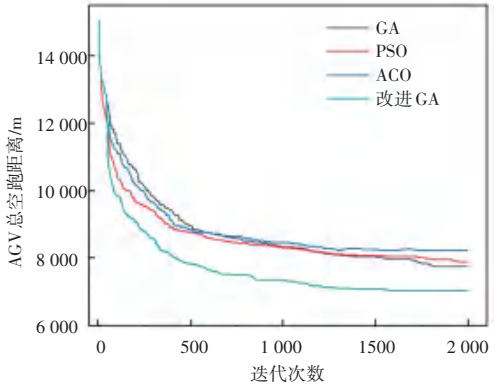


图 5 对比不同算法收敛曲线

Fig. 5 Convergence curves of different algorithms

表 1 不同算法运行 30 次平均性能比较

Table 1 Comparison of average performance of different algorithms running 30 times

实例	算法	平均空跑/m	算法平均耗时/s
2024 年 7 月 1 日 218 条任务 $M = 5$	GA 算法	7 539 752	12.0
	粒子群优化算法(PSO)	7 408 789	8.1
	蚁群算法(ACO)	8 289 727	16.9
	改进的 GA 算法	6 797 919	4.3
2024 年 7 月 2 日 196 条任务 $M = 4$	GA 算法	4 942 910	11.20
	粒子群优化算法(PSO)	5 001 513	6.4
	蚁群算法(ACO)	5 437 201	14.7
	改进的 GA 算法	4 140 908	4.1
2024 年 7 月 3 日 174 条任务 $M = 4$	GA 算法	5 336 016	8.5
	粒子群优化算法(PSO)	4 935 613	7.3
	蚁群算法(ACO)	5 869 617	11.2
	改进的 GA 算法	4 687 884	3.8

4　结束语

本文研究了多 AGV 共同作业的任务调度问题，将其抽象为多旅行商问题（MTSP），重点优化 AGV 的总空跑距离。针对传统遗传算法收敛速度慢及工厂任务时间窗需求，提出 2 种改进策略：一是采用顺序交叉算子与逆转变异和交换变异相结合的混合变异算子；二是改进适应度函数，增强算法的择优能力。最后，基于实际采集的工厂数据进行多组实验。结果表明，改进的遗传算法在多 AGV 任务分配中展现了显著优势，能够有效处理带有时间窗约束的任务，并提升了收敛速度、稳定性和鲁棒性。

参考文献

[1] 付建林，张恒志，张剑，等. 自动导引车调度优化研究综述[J]. 系统仿真学报，2020，32(9)：1664-1675.

[2] 曾亮，詹逸鹏，王粟. 基于文化混合算法的多 AGV 调度研究[J]. 现代电子技术，2021，44(9)：105-109.

[3] 李缘. 多 AGV 路径规划算法与任务分配调度策略研究[D]. 杭州：浙江大学，2022.

[4] WANG Xingkai，WU Weimin，XING Zichao. Multi-decision points model to solve coupled-task scheduling problem with heterogeneous multi-AGV in manufacturing systems[J]. International Journal of Industrial Engineering Computations，2023，14(1)：49-64.

[5] HU Y，WU X，ZHAI J，et al. Hybrid task allocation of an AGV system for task groups of an assembly line[J]. Applied Sciences，2022，12(21)：10956.

[6] 冯开团，袁杰. 在离散车间下的 AGV 任务分配规划研究[J]. 现代电子技术，2022，45(18)：69-74.

[7] 丁一，袁浩，方怀瑾，等. 考虑冲突规避的自动化集装箱码头 AGV 优化调度方法[J]. 交通信息与安全，2022，40(3)：96-107.

[8] LI G，LI X，GAO L，et al. Tasks assigning and sequencing of multiple AGVs based on an improved harmony search algorithm[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing，2019，10：4533-4546.

[9] 杨玮，李然，张堃. 基于变邻域模拟退火算法的多自动导引车任务分配优化[J]. 计算机应用，2021，41(10)：3056-3062.

[10] 杨智飞，苏春，胡祥涛，等. 面向智能生产车间的多 AGV 系统多目标调度优化[J]. 东南大学学报（自然科学版），2019，49(6)：1033-1040.

[11] 马千慧，梁晓磊，刘星雨，等. 多 AGV 和机器集成的多目标柔性作业车间调度研究[J]. 计算机工程与应用，2023，59(1)：278-290.

[12] ZHANG L，HU Y，GUAN Y. Research on hybrid-load AGV dispatching problem for mixed-model automobile assembly line[J]. Procedia CIRP，2019，81：1059-1064.

[13] 王赟，马荣，唐思源. 基于改进鲸鱼优化算法的 AGV 柔性作业车间多目标优化调度[J]. 现代制造工程，2024(7)：17-25.

[14] 张艳菊，吴俊，程锦倩，等. 多搬运任务下考虑碰撞避免的 AGV 路径规划[J]. 计算机应用研究，2024，41(5)：1462-1469.

[15] MAHMOUDINAZLOU S，KWOM C. A hybrid genetic algorithm for the min - max Multiple Traveling Salesman Problem[J]. Computers & Operations Research，2024，162：106455.

[16] GUTIÉRREZ-AGUIRRE P，CONTRERAS-BOLTON C. A multioperator genetic algorithm for the traveling salesman problem with job-times[J]. Expert Systems with Applications，2024，240：122472.

[17] 杨青，席珍珍，葛亮，等. 融合 NSGA-II 和 CSA 的多目标车间调度[J]. 计算机工程与应用，2024，60(4)：315-323.

[18] 孙爱红，雷琦，宋豫川，等. 基于深度强化学习求解作业车间机器与 AGV 联合调度问题[J]. 控制与决策，2024，39(1)：253-262.

[19] 于琪，张静. 基于融合任务规则优先级蚁群算法的多 AGV 路径规划实现研究[J]. 机电工程技术，2024，53(3)：190-194.

[20] 诸葛沁沁，许钢焱，周耀明. 基于图论的 AGV 数量配置与调度优化方法[J]. 工业工程与管理，2024，29(2)：217-226.

[21] 苗培仁，李晓东，胡凯，等. 基于 AGV 的管道加热器柔性作业车间调度方法研究[J]. 计算机测量与控制，2024，32(4)：151-158.