

分类号：  
学号：20232108009

密级：公开  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于智能优化算法的多 AGV 调度系统 设计与实现

学位申请人	俞子鹏
指导教师	卫张亮 副教授 李志刚 教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子  
2026年5月

分类号：  
学号：20232108009

密级：公开  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于智能优化算法的多 AGV 调度系统 设计与实现

学位申请人	俞子鹏
指导教师	卫张亮 李志刚
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子  
2026年5月

**Design and Implementation of a Multi-AGV Scheduling System Based  
on Intelligent Optimization Algorithm**

A Dissertation Submitted to

**Shihezi University**

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

**Master of Engineering**

By

**Yu Zi-peng**

**(Electronic Information)**

Dissertation Supervisor: Prof. Wei Zhang-liang

Prof. Li Zhi-gang

May,2026

# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 俞子鹏

时间：2026年5月20日

## 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 俞子鹏

时间：2026年5月20日

导师签名： 卫张亮

时间：2026年5月20日

## 摘要

随着工业 4.0 与智能制造的深入推进，制造业正朝着柔性化、智能化与绿色化的方向转型。柔性作业车间作为实现多品种、小批量、快节奏生产的关键模式，其内部物流系统的效率直接影响整体生产效能。自动导引车（AGV）系统是柔性作业车间物流自动化与智能化的核心载体，其多车协同调度与路径规划能力是保障生产流程顺畅、提升资源利用率、降低运营成本的决定性因素。然而，实际柔性作业车间环境复杂，存在布局动态、任务随机、资源耦合度高以及 AGV 自身能耗与充电需求等多重约束，对传统的调度与路径规划方法提出了严峻挑战。针对上述问题，本文以提升柔性作业车间多 AGV 系统综合运行效能为目标，通过解决路径规划及任务分配的协调和鲁棒性问题，来满足复杂环境下的柔性制造的物流需求。本文的主要研究内容如下：

（1）提出一种考虑能耗的多 AGV 路径规划模型及改进的 AMOEA/D 优化算法。针对车间通道复杂、AGV 速度与载重时变、需兼顾运输效率与能耗的实际场景，构建以最小化最大完工时间与总能耗为目标的路径规划模型。为有效求解该多目标问题，在 MOEA/D 算法框架中引入佳点集初始化策略提升种群质量，设计动态自适应交叉机制平衡搜索能力，并采用切比雪夫聚合策略增强收敛性与解集分布性。经与其他智能优化算法对比，所提方法在超体积和反转世代距离指标上均表现更优，验证了其在节能与效率协同优化方面的有效性。

（2）针对柔性作业车间中任务随机到达与突发扰动并存的多 AGV 调度需求，提出一种融合静态任务分配与动态响应机制的多 AGV 调度方法。通过混合初始化生成多个子种群独立进化，并周期性地融入变邻域搜索、禁忌搜索和精英迁移等协同策略来对 NSGA-II 算法进行改进，提出改进的 NSGA-II-CVT 算法。在任务分配中，使用改进的 NSGA-II-CVT 算法生成高质量的初始调度方案，然后通过融合动态优先级评估与滚动时域重调度策略，实现了对任务插入、AGV 故障等突发事件的快速自适应调整，避免频繁全局重调度带来的系统振荡，实现系统效率与稳定性的统一。最后，通过不同 AGV 数量、任务规模及扰动类型下的仿真实验对比，验证了该协同调度策略在完工时间、负载均衡度及重调度次数等指标上的综合优势。

（3）构建一个多 AGV 调度系统，将柔性作业车间地图信息、运输任务信息、路径规划及任务分配结果以可视化形式展示。通过电子地图集成车间布局与资源信息，支持任务信息的动态录入与管理，并基于前述路径规划与任务分配算法实现运输任务的自动化调度。通过可视化界面，为车间管理人员提供直观的决策看板与调度干预工具，从而显著提升柔性作业车间的物流运输效率。

**关键词：**柔性作业车间；AGV 系统；路径规划；任务分配；智能优化算法

## Abstract

With the advancement of Industry 4.0 and intelligent manufacturing, the manufacturing industry is moving toward flexibility, intelligence, and sustainability. Flexible job shops, as a key mode for achieving multi-variety, small-batch, and fast-paced production, rely heavily on the efficiency of their internal logistics systems. Automated Guided Vehicle (AGV) systems serve as the core of logistics automation and intelligence in flexible workshops, and their multi-vehicle collaborative scheduling and path planning capabilities are crucial for ensuring smooth production flows, improving resource utilization, and reducing operational costs. However, actual flexible job shop environments are complex, featuring dynamic layouts, random task arrivals, high resource coupling, and constraints such as AGV energy consumption and charging requirements. These factors pose significant challenges to traditional scheduling and path planning methods. To address these issues, this thesis aims to enhance the overall operational performance of multi-AGV systems in flexible job shops by addressing the coordination and robustness issues in path planning and task assignment, thereby meeting the logistics demands in complex flexible manufacturing environments. The main research contents of this thesis are as follows:

(1) A multi-AGV path planning model considering energy consumption and an improved AMOEA/D optimization algorithm are proposed. Targeting the complex workshop channels, time-varying AGV speeds and loads, and the need to balance transportation efficiency and energy consumption, a path planning model is established with the objectives of minimizing the maximum completion time and total energy consumption. To effectively solve this multi-objective problem, an improved AMOEA/D algorithm is proposed within the MOEA/D framework. It incorporates a good point set initialization strategy to enhance population quality, a dynamic adaptive crossover mechanism to balance search capabilities, and a Chebyshev aggregation strategy to improve convergence and solution set diversity. Compared with other intelligent optimization algorithms, the proposed method shows superior performance in terms of hypervolume and inverted generational distance indicators, validating its effectiveness in coordinating energy efficiency and operational efficiency.

(2) To address the multi-AGV scheduling requirements in flexible job shops with random task arrivals and unexpected disturbances, a multi-AGV scheduling method integrating static task assignment and

dynamic response mechanisms is proposed. The NSGA-II algorithm is improved by generating multiple subpopulations through hybrid initialization, which evolve independently, and periodically incorporating cooperative strategies such as variable neighborhood search, tabu search, and elite migration. This results in the improved NSGA-II-CVT algorithm. In task assignment, the improved NSGA-II-CVT algorithm is used to generate high-quality initial scheduling solutions. Subsequently, a dynamic response mechanism combining dynamic priority evaluation and rolling horizon rescheduling is designed to enable rapid adaptive adjustments to unexpected events such as task insertions and AGV failures. This avoids frequent global rescheduling, which could cause system oscillations, thereby achieving a balance between system efficiency and stability. Finally, comparative simulation experiments under different AGV quantities, task scales, and disturbance types validate the comprehensive advantages of the proposed cooperative scheduling strategy in terms of completion time, load balance, and rescheduling frequency.

(3) A multi-AGV scheduling system is developed to visually display flexible job shop map information, transportation task information, path planning, and task assignment results. The system integrates workshop layout and resource information through electronic maps, supports dynamic input and management of task information, and automates transportation task scheduling based on the aforementioned path planning and task assignment algorithms. Through a visual interface, it provides workshop managers with an intuitive decision-making dashboard and scheduling intervention tools, significantly improving the logistics transportation efficiency of flexible job shops.

**Key words:** flexible job shop; AGV system; path planning; task assignment; intelligent optimization algorithm

# 目录

摘要 .....	I
Abstract .....	II
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 课题研究的背景及意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	2
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 AGV 研究现状 .....	2
1.2.2 AGV 任务调度研究现状 .....	3
1.2.3 考虑能耗的路径规划研究现状 .....	5
1.3 研究内容 .....	7
1.4 技术路线 .....	8
1.5 论文组织结构 .....	8
第 2 章 相关理论介绍 .....	10
2.1 路径规划概述 .....	10
2.2 任务分配概述 .....	10
2.3 AGV 电池管理 .....	11
2.4 车间环境电子地图 .....	11
2.4.1 环境地图建模方法 .....	12
2.4.2 柔性作业车间物流系统结构 .....	14
2.5 算法理论介绍 .....	15
2.5.1 基于分解的多目标进化算法 .....	15
2.5.2 非支配排序遗传算法 .....	16
2.6 本章小结 .....	17
第 3 章 复杂环境下考虑能耗的多 AGV 路径规划 .....	18
3.1 问题描述及环境建模 .....	18
3.1.1 问题描述 .....	18
3.1.2 车间地图环境建模 .....	18
3.2 模型假设与符号约定 .....	21
3.2.1 模型假设 .....	21

3.2.2 符号约定 .....	21
3.3 模型建立 .....	22
3.4 考虑能耗的多 AGV 路径规划算法 .....	25
3.4.1 算法框架 .....	25
3.4.2 编码 .....	27
3.4.3 初始化种群 .....	27
3.4.4 差分进化操作 .....	28
3.4.5 邻域搜索 .....	30
3.5 实验结果与分析 .....	30
3.5.1 算例生成 .....	30
3.5.2 评价指标 .....	31
3.5.3 参数敏感性实验 .....	31
3.5.4 成分分离实验 .....	32
3.5.5 方法有效性验证 .....	34
3.5.6 对比实验 .....	36
3.6 本章小结 .....	37
第 4 章 融合静态任务分配与动态响应机制的多 AGV 调度优化 .....	38
4.1 多 AGV 任务调度问题分析与建模 .....	38
4.1.1 问题描述与分析 .....	38
4.2 基于 NSGA-II-CVT 算法的多 AGV 静态任务分配算法设计 .....	41
4.2.1 编解码机制设计 .....	42
4.2.2 混合初始化策略 .....	42
4.2.3 改进的 NSGA-II-CVT 算法 .....	43
4.3 基于动态优先级的双层协同调度策略设计 .....	46
4.3.1 基于动态优先级的指派算法 .....	47
4.3.2 基于滚动时域的重调度算法 .....	49
4.4 实验仿真与结果分析 .....	51
4.4.1 静态任务分配算法多目标优化性能分析 .....	51
4.4.2 动态调度策略有效性分析 .....	56
4.5 本章小结 .....	58
第 5 章 多 AGV 调度系统设计与实现 .....	59
5.1 需求分析 .....	59
5.1.1 功能性需求 .....	59
5.1.2 非功能性需求 .....	60

5.2 开发环境与技术.....	60
5.2.1 开发软硬件环境.....	60
5.2.2 开发技术.....	61
5.3 系统设计与实现.....	61
5.3.1 系统框架设计.....	61
5.3.2 数据库设计.....	62
5.3.3 功能展示模块.....	64
5.4 系统测试.....	69
5.5 本章小结.....	70
第 6 章 结论与展望.....	71
6.1 结论.....	71
6.2 展望.....	71
参考文献.....	73
致谢.....	78
作者简介.....	79

## 第 1 章 绪论

### 1.1 课题研究的背景及意义

#### 1.1.1 研究背景

随着工业 4.0 和智能制造的广泛应用，能源优化已成为企业提升生产效率、降低成本以及减少环境负担的关键目标之一。特别是在大规模制造和自动化生产过程中，能源消耗不仅直接影响企业的运营成本，还在全球节能减排的背景下肩负着日益重要的责任。面对经济健康发展与环境资源可持续性的双重压力，中国政府确立了 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的宏伟目标，并通过划分四个十年阶段、实施八个五年规划及二十项重点举措，构建倒逼机制，分步推进绿色改革与创新，从而实现从相对减排到绝对减排的全面转变<sup>[1]</sup>。

柔性制造过程中的智慧物料传输与调度，通过无线定位、物体标识追踪等技术，实现了生产过程中物料派发、运输、仓储和装卸等环节的无人化、自动化和智能化。及时、准确和高效的物料传输与调度是保证连续生产顺畅进行的基础，能够在降低物料流动时间和成本的同时，提高整体生产效率和仓储利用率，从而实现生产资源的合理分配与管理，具有重要的应用意义和作用。《中国制造 2025》明确指出以创新驱动为核心，以工业化与信息化深度融合为主线，聚焦智能制造，实现制造业数字化、网络化、智能化，全面提升质量效益和国际竞争力<sup>[2]</sup>。对于制造业而言，物料传输与调度不仅要求具备快速响应能力，还需支持多设备接入。

在柔性制造系统中，自动引导车（AGV）作为实现自动化物流和生产任务调度的核心设备，能够有效连接仓库与生产线之间、生产线与生产线之间的物理和信息流，推动车间物料传输与调度的自动化与智能化发展，并已广泛应用于各类工业环境<sup>[3]</sup>。在工厂车间中，AGV 通常承担着运输物料或产品的任务，往返于各个生产线和设备之间，显著加快了产品的生产制造流程<sup>[4]</sup>。通过自动化的物料搬运，AGV 不仅提高了生产线之间的连接效率，还能够减少人工操作带来的误差和时间延误，从而保证生产流程的连续性与顺畅。AGV 的灵活性和高效性使其能够在复杂的生产环境中自如地进行物料的运输和分配，优化车间布局，提升生产效率和资源利用率，为智能制造和精益生产提供了强有力的支持<sup>[5]</sup>。

作为柔性作业车间生产流程中的关键组成部分，多 AGV 调度与路径规划是车间调

度中的一个复杂优化问题，通常被归类为多目标优化问题<sup>[6]</sup>。与传统的车辆路径问题（VRP）或带时间窗的多旅行商问题（TSP）不同，柔性制造系统中的多 AGV 调度问题更为复杂，优化目标不仅包括最短路径和最小时间，还需要兼顾生产过程中各工位的负载平衡和任务优先级。具体而言，AGV 调度和路径规划需要在考虑车间环境以及布局、设备运行状态、物料流动要求等因素的基础上，合理安排 AGV 的运输路线与任务顺序，并确保各 AGV 之间的协调合作，避免冲突和无效运输，从而提高整体生产效率。此外，柔性制造中的 AGV 调度问题还需在动态环境下进行实时调整和优化，这与传统的静态路径规划问题求解方式截然不同<sup>[7]</sup>。由于生产线上的任务和需求变化频繁，AGV 调度和路径规划算法必须具备自适应能力，能够根据车间环境的实时变化进行优化，以确保生产活动的高效进行。因此，智能制造中的多 AGV 调度和路径规划问题具有更高的复杂性和实际应用价值。

### 1.1.2 研究意义

在现代制造业中，多任务 AGV 系统已成为车间物料搬运的重要载体，其核心挑战在于如何在复杂多变的动态环境中为每辆 AGV 合理分配搬运任务，并在保证安全无碰撞的前提下，搜索出最优行驶路径。本研究不仅通过规划出短距离无冲突的路径来提升车间的工作效率，还积极响应绿色节能号召，减少企业的能源消耗并为企业降低运营成本、增加效益。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 AGV 研究现状

自动导引车（AGV）作为自动化物流与生产系统的重要组成部分，已有较长的发展历史。最早在 1913 年，福特公司将搬运车安装在轨道上，开创了自动搬运应用的先河。1950 年代初，美国 Barrett 电子公司研制出世界上第一辆 AGV，用于仓库的货物运输<sup>[8]</sup>。随后的技术革新中，英国企业在 1950 年代中期发明了电磁感应导引 AGV，避免了对地面轨道的依赖，为 AGV 技术的广泛应用奠定了基础<sup>[9]</sup>。

进入 1960 年代，AGV 技术在欧洲得到了进一步发展。计算机控制技术的引入，使得 AGV 的系统控制更加精准，且开始从仓储应用拓展到柔性制造系统。1970 年代，AGV 技术不仅继续服务于仓库中的物料运输，还进入了汽车制造领域。瑞典 Volvo Kalmar 轿车工厂于 1974 年研制出了多 AGV 控制系统，推动了 AGV 在汽车生产中的应用<sup>[10]</sup>。

中国的 AGV 研究起步相对较晚，主要由于劳动力成本低，自动化程度较低，AGV 技术未能迅速普及。然而，随着科技进步和国家对智能制造的重视，AGV 技术逐渐得到应用。1976 年，北京起重搬运机器研究所成功研制出中国第一台电磁导通 AGV。1991 年，各研究机构相继研发出了适用于邮政枢纽和汽车装配线的 AGV，标志着国内 AGV 技术的初步发展<sup>[11]</sup>。

近年来，随着“中国制造 2025”战略的推进，国内 AGV 技术发展迅速，并已广泛应用于制造业和物流业<sup>[12]</sup>。这两个行业是 AGV 应用的主要领域，主要得益于其对提升生产力和效率的持续需求，以及自动化技术的普及。无线网络、传感器和智能生产技术等科技进步，为自动化设备的广泛应用提供了支持。无线网络技术使 AGV 能够实现远程控制，提升了操作的灵活性与便捷性；传感器技术则增强了 AGV 的定位与导航能力，同时能够精准检测和避让障碍物；智能制造方法为 AGV 系统的优化提供了理论基础和实践指导<sup>[13]</sup>。随着国内消费增长，工业制造和物流行业也在不断扩大，AGV 作为柔性制造中的重要组成部分，必将迎来更为强劲的需求<sup>[14]</sup>。然而，尽管 AGV 技术不断进步，但在面对更加复杂的工作环境和订单任务时，仍需要进一步完善路径规划和任务调度等相关技术，开展更加深入的研究。

## 1.2.2 AGV 任务调度研究现状

任务调度是柔性作业车间多 AGV 系统运行管理中的关键环节，其核心在于在保障生产需求的前提下，通过合理分配运输任务并协调各 AGV 的执行顺序，以提升系统整体运行效率。与侧重于空间维度优化的路径规划不同，任务调度更关注时间维度上的资源协调，旨在保障任务按时完成，同时避免 AGV 处于闲置或过载状态。

根据调度策略的不同，相关研究主要分为静态调度与动态调度两个方向<sup>[15]</sup>。静态调度在生产周期开始前基于已知信息生成固定的任务分配方案，具有计算资源消耗少、方案稳定性高的特点，适用于任务相对确定的场景；而动态调度则依托实时监控与调整机制，以应对生产过程中的突发事件与环境变化，从而提升 AGV 系统的适应性与鲁棒性。在实际应用中，静态调度为系统提供了初始的调度框架，动态调度则在此基础上进行实时调整与优化，两者相互配合，共同构成柔性制造车间任务调度的完整体系<sup>[16]</sup>。

在早期的研究与应用中，调度规则因其显而易见的优势而广泛应用。这些规则通常易于理解和执行，且具备较强的通用性，能够在不同场景中直接移植使用，如先到先服务（FCFS）、最短距离优先和最近邻原则等。随着自动引导车（AGV）技术的不断发展，国内的学者们根据实际工作环境的特点，提出了更加针对性的调度规则，以进一步提升系统的调度效率与灵活性。张彦如等<sup>[17]</sup>针对考虑 AGV 可变速度和载重量的多 AGV

多目标任务调度问题，建立了以最小化最大完工时间、AGV 使用数量和总功耗为目标的数学模型，并提出一种改进的自适应遗传算法（IAGA），通过优化初始种群和自适应策略提升了收敛速度。秦新立等<sup>[18]</sup>提出了一种融合遗传算法变异算子优化任务序列与改进模拟退火机制（基于 Metropolis 准则接受次优解）的改进蚁群算法，改进了传统蚁群算法收敛慢且易陷入局部最优的缺陷。陈玉全等<sup>[19]</sup>提出一种改进分数阶粒子群算法（IFOPSO），通过引入分数阶列维随机步长及其自适应调整机制增强全局搜索能力和收敛精度，能有效降低调度成本，快速生成合理的多无人车取送货方案。李峥峰等<sup>[20]</sup>在研究 AGV 调度问题时引入了充电需求等能耗因素，并建立了一个多 AGV 调度模型。该模型深入分析了 AGV 使用规模和能耗等因素的影响，并设计了一种结合车间调度特点的改进遗传算法，通过编解码方式进行优化。王凡通等<sup>[21]</sup>针对传统 NSGA-II 收敛慢、多样性差的问题，提出改进算法：采用顺序交叉与混合变异算子优化解，创新非线性平均绝对差拥挤度计算以保多样性，并设计局部、全局双视角参数自适应策略，显著提升了收敛速度、稳定性与算法鲁棒性。郭天文<sup>[22]</sup>提出了一种针对特定场景的 AGV 调度策略，主要应用于烟草制造系统。该策略通过动态算法调整任务优先级，并控制任务分配数量，有效解决了 AGV 运输过程中可能出现的车辆堵塞和无法调整优先级等问题，从而提高了 AGV 运输效率和烟草吞吐量效率。霍凯歌等<sup>[23]</sup>研究了自动化装载码头的 AGV 调度问题，提出通过遗传算法和混合整数规划模型相结合的方式，以实现总费用的最小化。程文龙等<sup>[24]</sup>提出了一种改进的遗传算法，用于解决多 AGV 在智能仓库中的调度问题，结合距离最近原则、适应性交叉、等价交换变异和算法重启策略，通过对比实验验证了该算法在最大完工时间最小化方面优于现有方法。杨智飞等<sup>[25]</sup>针对智能生产车间中的多 AGV 调度优化问题，提出了一种自适应多目标遗传-差分进化算法（AMOGA-DE），旨在最小化完工时间、AGV 数量和惩罚成本。考虑车间物料配送中存在资源受限的情况，胡晓阳等<sup>[26]</sup>立了以完工时间最小化为优化目标的数学模型，并提出了一种结合贪心启发式规则的改进迭代局部搜索算法来求解该模型。

国外研究在 AGV 任务调度方面起步较早，且有更深入的理论探讨。Mousavi 等<sup>[27]</sup>提出了一个多目标 AGV 调度模型，利用基于遗传算法和粒子群优化算法的混合 GA-PSO 算法来优化工期、AGV 数量以及电池电量。Chen XC 等<sup>[28]</sup>提出了一种基于多商品网络流模型和交替方向乘子法（ADMM）的集成起重机与 AGV 调度方法，能够高效解决自动化码头中 AGV 与起重机的协调调度问题。Xinyue K 等<sup>[29]</sup>提出的 NBA-P 算法，通过引入随机顶点成本通道图（SAG）结构，解决了精密农业中不确定性任务规划问题，能够在多种预算和随机成本条件下优化任务分配。Xie 等<sup>[30]</sup>探讨了仓库系统中的 AGV 调度问题，提出了一种 AGV 辅助混合货架存储方案，将订单处理及 AGV 调度与路径规划问题建模为网络流模型，并设计了变邻域搜索算法来求解该问题，展现了良好的求解性能。Kusiak 等<sup>[31]</sup>则将博弈论思想引入多 AGV 协调控制系统，从而有效降低了多 AGV

系统中空闲 AGV 的等待时间。Li 等<sup>[32]</sup>提出的 PDER 算法通过允许部分装载的 AGV 在前往卸货目的地的途中拾取和卸下额外货物，从而有效提高了柔性制造系统中多载荷 AGV 的吞吐量和系统运行效率，显著优化了生产过程的时间和资源利用。Singh 等<sup>[33]</sup>提出了一种基于自适应大邻域搜索（ALNS）的混合启发式算法，用于解决单载荷 AGV 调度问题，能够在考虑异构 AGV 车队、软截止日期和充电任务等因素的基础上，显著提高调度效率和 AGV 车队利用率。Boccia 等<sup>[34]</sup>研究了带电池约束的 AGV 调度问题（ASP-BC），提出了一种基于瓶颈广义分配问题的混合整数线性规划模型以及三步法启发式算法，并通过模拟和实际实例验证，结果证明该方法在有效性和可扩展性方面表现优异。Lacomme 等<sup>[35]</sup>提出了一种用于多台自动导引车的分散控制算法，通过自主路径规划和运动协调确保安全运行，并通过冲突解决机制、优先级方案及私人区域机制实现车辆之间的有效协作。针对 AGV 调度与路径规划过程中的不确定性，Mehrabian 等<sup>[36]</sup>提出了一种二目标数学编程模型，将流车间调度与 AGV 调度集成，考虑了需求、交货期和加工时间等模糊参数，并采用非支配排序遗传算法 II（NSGA-II）和多目标粒子群优化（MOPSO）算法进行求解。

### 1.2.3 考虑能耗的路径规划研究现状

随着“双碳”政策的实施和绿色制造的不断推进，自动化系统中的路径规划能耗问题在制造领域逐渐成为重要的研究课题。为了推动工业运输的可持续发展，越来越多的研究开始将能效问题纳入 AGV 路径规划和任务调度的优化框架中，探索如何通过合理的调度与路径规划策略，优化能量消耗与运输效率之间的平衡。

国内学者邢大宁等<sup>[37]</sup>提出了一种改进的基于时空网络的无冲突节能路径规划方法，通过构建可根据时间更新的 AGV 时空路网，并采用 TSN 算法解决路径冲突和优化能耗，实验结果表明该方法在运算时间、总运行时间和能耗方面优于传统的 Astar 和 CBS 算法，有效提升了自动化集装箱码头的运作效率。郑晓军等<sup>[38]</sup>提出了一种基于改进变邻域搜索的混合遗传算法（GA-VNS）解决带时间窗约束的 AGV 集配货绿色路径规划问题，通过优化能耗和时间偏离能耗，提供了一种可行的节能减排方案。郭兴海等<sup>[39]</sup>以最短路径和最大平滑度为优化目标，运用量子粒子群算法求解。再对路径拟合处理，得出能耗低的路径。宋栓军等<sup>[40]</sup>针对多自动导航小车 AGV 系统路径，解决了冲突时的部分耗电过快、能耗不平衡问题，提出了一种基于能耗测算的 AGV 路径冲突解决策略。对多 AGV 系统中各 AGV 的路径基于时间窗进行判定，在此基础上，建立了受负载和时间控制的能耗计算方法，并以系统能耗最低为目标构建 AGV 冲突消解模型。江磊等<sup>[41]</sup>根据轮式移动机器人运行过程中的能耗构成，综合考虑电机效率、地面摩擦力、地形、速度变化、

转弯等因素建立能耗模型, 基于 A\* 算法提出了最优节点搜索方法, 用于轮式移动机器人在最优能耗目标下的运行轨迹规划。陈炫锐等<sup>[42]</sup>在考虑 AGV 运行中的能耗和充电情况的基础上, 优化了多级层货架自动小车存取系统的资源配置。该模型以最小化投资成本和平均任务能耗成本为目标函数, 并以平均任务周期时间和平均空闲 AGV 数量为约束, 建立了一个随机非线性整数规划模型。郭亚铭等<sup>[43]</sup>基于拓扑地图法构建了柔性制造车间电子地图模型, 结合 AGV 的直行与转向行驶模式, 提出了以运输路径和能耗为优化目标的单 AGV 节能路径规划模型, 并通过 Dijkstra 算法求解。张天瑞等<sup>[44]</sup>针对蚂蚁群算法在路径规划过程中出现大转弯角和慢收敛速度问题, 在节点选择概率公式中添加转弯启发式函数, 增强了路径选择的方向性, 提高了搜索速度。

国外学者 Zou 等<sup>[45]</sup>针对绿色制造问题, 提出了以能源消耗、AGV 使用数量和客户满意度为优化目标的多目标数学模型, 并基于问题特性设计了一种多目标贪心算法。该算法在初始解生成、贪心操作和解的迭代过程中采用了多项有效策略, 并引入了一种能够降低计算复杂度的构造算子。Śmieszek 等<sup>[46]</sup>考虑了 AGV 轨迹的形状对能源消耗的影响。AGV 轨迹由直线和曲线组成。对于给定的 AGV 轨迹, 其速度和时间受到运动学和动态特性的限制, 特别是在沿曲线轨迹运动时。进而提出运用计算机模拟对轨迹进行研究。Wang 等<sup>[47]</sup>在研究 AGV 调度问题时, 根据车间实际复杂度考虑对 AGV 能耗的影响, 合理安排 AGV 的运输路径。Riazi 等<sup>[48]</sup>提出了一种高效的优化方法, 旨在同时降低 AGV 系统的能耗和提高其生产效率, 证明了通过优化完成时间、延迟和延误总和等性能标准, 并调整巡航速度, 可以在不影响系统效率的情况下显著减少能耗, 且实验结果表明该方法能将能耗减少约 38%。Kancharla 等<sup>[49]</sup>考虑电动汽车负载对电池消耗的影响, 并提出一种具有特殊算子的自适应大邻域搜索算法求解。Zhou 等<sup>[50]</sup>从 AGV 装载重量与行驶距离对 AGV 能耗进行分析, 提出了一种改进的粒子群优化算法 (TEPSO), 旨在通过将最小化能源消耗与执行物料配送任务的操作标准相结合, 优化混合型号装配线的调度。

综合以上文献可以发现, 通过分析国内外专家学者对于多 AGV 系统任务分配与路径规划问题的相关研究, 可以总结得出以下结论:

(1) 在多 AGV 路径规划领域, 现有成果大多以仓储系统为背景, 以路径最短、时间最少为主要优化目标, 较少关注柔性作业车间中动态、复杂环境下的 AGV 运行特征。研究中对 AGV 速度调节、载重变化、实时能耗以及充电需求等实际约束的建模尚不充分, 难以直接适用于具有多工序、高动态特性的柔性作业车间场景。

(2) 在任务分配方面, 现有的多 AGV 任务调度的研究主要集中于静态场景下的分配优化, 即在固定任务集与确定环境条件下进行一次性调度。然而, 在实际柔性作业车间中, 任务随机到达、设备状态变化、路径临时占用等动态扰动事件频繁发生, 而现有研究在静态模型基础上系统引入动态响应机制的工作相对较少, 多数方法仍依赖于周期性重调度或人工干预, 在实时性、平稳性与效率方面存在明显不足。因此, 如何在静态