

分类号: TH18
学号: 20222109059

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



面向数字化线缆生产车间的多 AGV 任务调度与路径 规划研究

学位申请人	郭鹏飞
指导教师	葛云 教授 刘娜 副教授 刘振俊 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	机械工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年05月

分类号: TH18
学号: 20222109059

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



面向数字化线缆生产车间的多 AGV 任务调度与路径 规划研究

学位申请人	郭鹏飞
指导教师	葛云 教授 刘娜 副教授 刘振俊 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	机械工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2025 年 05 月

**Research on multi-AGV task scheduling and path planning for digital
cable production workshop**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Guo Peng-fei

(Mechanical Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Ge Yun

May, 2025

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：郭鹏飞

时间：2025年5月25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：郭鹏飞

时间：2025年5月25日

导师签名：郭

时间：2025年5月25日

摘要

随着“中国制造 2025”战略决策的出台，制造业正加速向着数字化、智能化发展。各企业为提高自身在市场上的竞争力，纷纷致力于数字化车间的建设，以此来提升产品质量和生产效率。相比于传统制造车间，数字化车间通过引入先进的自动化设备和智能系统，实现了生产过程的智能化和自动化。其中，自动导引车（Automated Guided Vehicle, AGV）运输系统作为数字化生产车间中多个环节衔接的关键，其效率直接影响整个车间的生产效率。因此，关于 AGV 系统的调度问题研究成为近年来的研究热点。本文基于以上背景，针对 A 企业数字化线缆生产车间中 AGV 系统存在的任务分配不合理、路径冲突解决耗时长等问题，开展车间 AGV 任务调度与路径规划研究，旨在提高车间整体生产效率和 AGV 运行效率。本文主要研究内容如下：

（1）针对数字化线缆生产车间现有 AGV 任务调度方案不合理导致加工设备等待时间长、车间整体生产效率较低的问题，提出一种基于混合多策略麻雀搜索算法加车辆分配算法的多 AGV 任务调度优化算法。首先，建立 AGV 与机器联合任务调度数学模型；其次，采用佳点集结合随机反向学习策略、天鹰搜索策略和柯西变异策略对麻雀搜索算法进行改进以提升算法性能，并针对调度问题特点加入启发式规则种群初始化、交叉变异算子及基于关键工序的邻域搜索策略，完成混合多策略麻雀搜索算法的构建，同时引入车辆分配算法解决 AGV 任务分配问题。最后，通过仿真实验验证改进策略的有效性，以及所提算法在解决 AGV 任务调度问题中的有效性和优越性。

（2）针对数字化线缆生产车间多 AGV 路径单一、冲突解决耗时长的问题，提出了一种基于改进蛇鹫优化算法的多 AGV 无冲突路径规划算法。首先，采用双混沌映射策略、鱼鹰搜索策略、自适应 T 分布策略对蛇鹫优化算法进行改进，全面提升算法性能；其次，将改进蛇鹫优化算法应用于路径规划问题，对 AGV 进行全局路径规划。此外，针对多 AGV 路径之间的冲突问题，构建了基于时间窗模型的多策略无冲突路径规划模型，通过时间窗进行冲突检测，并使用优先级分配法、速率调整法和重新规划法实现多 AGV 冲突消解，最终生成无冲突路径。最后，在数字化线缆生产车间栅格环境地图中进行多 AGV 路径规划仿真实验，结果表明所提算法能有效规划出合理且高效的无冲突路径。

（3）本文以数字化线缆生产车间为应用场景，对所提算法进行实例验证。首先，基于实际生产数据验证任务调度算法的有效性，结果表明，与车间现有调度方案相比效率提升 4.29%；其次，通过搭建模拟实验场景开展多 AGV 无冲突路径规划实验；最后，通过提取任务调度算法生成方案中的 AGV 任务信息，并利用路径规划算法重新生成路径，形成最终调度方案，相较于算法生成调度方案，最终方案在生产效率上进一步提升，AGV 运行效率提升 14.70%。

关键词： AGV；任务调度；麻雀搜索算法；无冲突路径规划；蛇鹫优化算法

Abstract

With the introduction of the ' Made in China 2025 ' strategic decision, the manufacturing industry is accelerating towards digital and intelligent development. In order to improve their competitiveness in the market, enterprises are committed to the construction of digital workshops to improve product quality and production efficiency. Compared with the traditional manufacturing workshop, the digital workshop realizes the intelligence and automation of the production process by introducing advanced automation equipment and intelligent systems. Among them, the Automated Guided Vehicle (AGV) transportation system, as the key to the connection of multiple links in the digital workshop, has a direct impact on the production efficiency of the entire workshop. Therefore, the research on the scheduling problem of AGV system has become a hot research topic in recent years. Based on the above background, this thesis aims to carry out the research on workshop AGV task scheduling and path planning for the unreasonable task allocation and time-consuming path conflict resolution of the AGV system in the digitized cable production workshop of enterprise A, with the aim of improving the overall production efficiency of the workshop and the operation efficiency of the AGV. The main research content of this thesis is as follows:

(1) Aiming at the problem that the existing AGV task scheduling scheme in the digital cable production workshop is unreasonable, which leads to the long waiting time of processing equipment and the low overall production efficiency of the workshop, a multi-AGV task scheduling optimization algorithm based on hybrid multi-strategy sparrow search algorithm plus vehicle allocation algorithm is proposed. Firstly, the mathematical model of AGV and machine joint task scheduling is established. Secondly, the sparrow search algorithm is improved by using the good point set combined with the random reverse learning strategy, the Aquila search strategy and the Cauchy mutation strategy to improve the performance of the algorithm. According to the characteristics of the scheduling problem, the heuristic rule population initialization, the crossover and mutation operator and the neighborhood search strategy based on the key process are added to complete the construction of the hybrid multi-strategy sparrow search algorithm. At the same time, the vehicle assignment algorithm is introduced to solve the AGV task assignment problem. Finally, the effectiveness of the improved strategy and the effectiveness and superiority of the proposed algorithm in solving the AGV task scheduling problem are verified by simulation experiments.

(2) Aiming at the problems of single multi-AGV path and long time-consuming conflict resolution in digital cable production workshop, a multi-AGV conflict-free path planning algorithm based on improved snake vulture optimization algorithm is proposed. Firstly, the double chaotic mapping strategy, Osprey search strategy and adaptive T distribution strategy are used to improve the snake vulture optimization

algorithm and comprehensively improve the performance of the algorithm. Secondly, the improved snake vulture optimization algorithm is applied to the path planning problem, and the global path planning of AGV is carried out. In addition, aiming at the conflict problem between multiple AGV paths, a multi-strategy conflict-free path planning model based on time window model is constructed. The conflict detection is carried out through the time window, and the multi-AGV conflict resolution is realized by using the priority allocation method, the rate adjustment method and the re-planning method, and finally the conflict-free path is generated. Finally, the multi-AGV path planning simulation experiment is carried out in the grid environment map of the digital cable production workshop. The results show that the proposed algorithm can effectively plan a reasonable and efficient conflict-free path.

(3) In this thesis, the digital cable production workshop is used as the application scenario to verify the proposed algorithm. Firstly, the effectiveness of the task scheduling algorithm is verified based on the actual production data. The results show that the efficiency is improved by 4.29 % compared with the existing scheduling scheme of the workshop. Secondly, the multi-AGV conflict-free path planning experiment is carried out by building a simulation experiment scene. Finally, by extracting the AGV task information in the task scheduling algorithm generation scheme, and using the path planning algorithm to regenerate the path, the final scheduling scheme is formed. Compared with the algorithm generation scheduling scheme, the final scheme is further improved in production efficiency, and the AGV operation efficiency is improved by 14.70 %.

Key words: AGV; Task Scheduling; Sparrow Search Algorithm; Conflict-free Path Planning; Secretary Bird Optimization Algorithm

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	IV
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 AGV 任务调度研究现状.....	2
1.2.2 AGV 路径规划研究现状.....	3
1.2.3 研究评述.....	4
1.3 研究内容.....	5
1.4 技术路线.....	5
第 2 章 相关理论与方法概述.....	8
2.1 数字化线缆生产车间现状分析.....	8
2.1.1 线缆工艺介绍.....	8
2.1.2 车间布局分析.....	9
2.1.3 车间 AGV 运输现状及特征分析.....	10
2.1.4 车间 AGV 调度现状及问题分析.....	11
2.2 车间环境地图构建.....	11
2.2.1 环境建模方法.....	11
2.2.2 车间地图建模.....	12
2.3 相关算法介绍.....	13
2.3.1 麻雀搜索算法.....	13
2.3.2 蛇鹫优化算法.....	15
2.4 本章小结.....	16
第 3 章 数字化线缆生产车间多 AGV 任务调度研究.....	17
3.1 构建 AGV 与机器联合任务调度模型.....	17
3.1.1 问题描述.....	17
3.1.2 问题假设.....	17
3.1.3 模型构建.....	18
3.2 HMSSA+VAA 算法求解集成任务调度模型.....	20
3.2.1 多策略改进麻雀搜索算法.....	20

3.2.2	问题编码方案	22
3.2.3	启发式规则种群初始化策略	24
3.2.4	交叉变异算子	24
3.2.5	基于关键工序的邻域搜索	25
3.2.6	车辆分配算法	26
3.2.7	基于 VAA 算法的解码方案	27
3.2.8	算法流程	28
3.3	算法仿真验证	30
3.3.1	策略有效性验证	30
3.3.2	算法有效性验证	34
3.4	本章小结	39
第 4 章	数字化线缆生产车间多 AGV 路径规划研究	41
4.1	多策略改进 SBOA 算法	41
4.1.1	双混沌映射初始化种群	41
4.1.2	鱼鹰优化算法捕食策略	42
4.1.3	自适应 T 分布策略	43
4.1.4	改进后的算法流程	43
4.2	基准测试函数的仿真	45
4.2.1	测试函数简介	45
4.2.2	改进策略分析	47
4.2.3	对比算法分析	50
4.3	基于 ISBOA 算法的路径规划算法	52
4.3.1	算法实施步骤	52
4.3.2	算法仿真与对比分析	54
4.4	多 AGV 无冲突路径规划策略研究	57
4.4.1	AGV 冲突类型	57
4.4.2	多 AGV 无冲突调度策略	58
4.4.3	速率调整法	59
4.4.4	优先级分配法	59
4.4.5	时间窗模型	59
4.4.6	基于时间窗的路径规划算法流程	62
4.4.7	冲突策略仿真实验验证	64
4.5	线缆车间多 AGV 路径规划验证	67
4.6	本章小结	71

第 5 章 AGV 调度实验验证	73
5.1 实验环境及实验设备	73
5.1.1 实验环境介绍	73
5.1.2 实验设备介绍	74
5.2 AGV 任务调度算法仿真实验	75
5.3 AGV 路径规划算法模拟实验	78
5.3.1 AGV 小车运行规则设定	79
5.3.2 AGV 路径规划模拟实验	79
5.4 融合任务调度与路径规划方案的综合调度实验	81
5.5 本章小结	83
第 6 章 结论与展望	84
6.1 结论	84
6.2 展望	85
参考文献	86
致 谢	92
作者简介	93

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

近年来，中国政府高度重视制造业的数字化转型，将其作为推动经济高质量发展的关键举措。《“十四五”数字经济发展规划》明确提出，到2025年，数字经济核心产业增加值占GDP比重达到10%，并强调要大力推进产业数字化转型。此外，国务院还发布了《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》，推动工业互联网平台建设，为制造业的数字化转型提供了坚实基础。线缆行业作为制造业的重要组成部分，正加速从传统制造模式向数字化制造转型^[1]。数字化线缆生产车间作为线缆行业数字化转型的关键环节，其建设已成为驱动线缆行业转型升级的关键所在。

相较于传统线缆生产车间依赖人工经验调度、设备离散化运作的局限性，数字化线缆生产车间通过引入先进的自动化设备和智能系统，实现了生产过程的智能化和自动化。其中，自动导引车（Automated Guided Vehicle, AGV）作为车间内物料运输的关键设备，其应用不仅提高了物流搬运效率，降低了出错率，还显著减轻了工人的劳动强度。在数字化线缆生产车间中，AGV的应用带来了诸多好处和优势。首先，AGV能够根据车间机台排产计划自动规划道路，快速将各种物料配送至对应加工设备，提高了车间的生产效率。其次，AGV具有速度快、准确度高、灵活性强、安全可靠等优点^[2]，能够24小时连续作业，进一步提升了车间的生产效率。此外，AGV的应用还减少了人为干扰，提高了产品质量，降低了企业生产成本。通过AGV的智能化调度，车间的物流配送更加高效，物料处理更加精准，整体生产流程更加顺畅。

然而，尽管AGV在数字化线缆生产车间中具有诸多优势，但在实际应用中，其调度问题仍然存在诸多挑战。首先，AGV调度系统需要处理多个AGV之间的任务分配和路径规划^[3]，随着AGV数量的增加，调度难度呈指数级上升。其次，当前的AGV调度系统在任务分配的合理性、路径规划的效率以及碰撞风险的控制方面仍存在不足。这些问题不仅导致AGV的运行效率低下，还可能引发碰撞事故，增加生产成本，降低生产安全性。这些问题不仅影响了生产效率和产品质量，还增加了生产成本和安全风险，严重制约了数字化线缆生产车间的进一步发展。

因此，面向数字化线缆生产车间的多AGV任务调度与路径规划问题的研究具有重要的现实意义。通过构建高效的调度算法和路径规划模型，优化AGV的任务分配和行驶路径，可以显著提高AGV的运行效率，减少碰撞风险，降低生产成本，提升车间的

整体生产效益。这不仅有助于推动数字化线缆生产车间的智能化升级，也为其他制造业领域提供了有益的借鉴和参考，对于促进我国制造业的高质量发展具有重要的战略意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 AGV 任务调度研究现状

AGV 任务调度是通过为每个 AGV 安排合理的运输任务，从而提升系统运行效率及整体生产效率。随着 AGV 系统的作业场景不断增多，越来越多的国内外学者开始关注 AGV 任务调度问题。

对于 AGV 任务调度问题，有学者将其视为多重旅行商问题^[4-10]或车辆路径问题的一个变种问题^[11-16]进行研究。然而，这些相关研究都未考虑物料运输系统中多 AGV 任务调度的实际需求和特征^[17]，在实际生产场景中多 AGV 任务调度十分复杂。尤其是在复杂离散制造系统中开展多 AGV 任务调度时，需在确保运输效率的同时，同步协调立体仓库、工件、工装、机床、刀具等配套资源，这使得多资源协同的 AGV 调度问题成为研究热点。对于该领域研究方法主要分为两类：精确求解方法与近似优化方法。

精确求解方法主要针对小规模调度问题，包括数学规划法和分支界定法。Heger 等人^[18]提出了一个混合整数线性规划模型，针对可重入作业车间中具有不同作业阻塞的复杂 AGV 调度问题，以最小化制造周期为目标；Yao 等人^[19]提出了一种高效的混合整数线性规划模型，并使用该模型成功证明了 EX 基准测试集中的 15 个算例以及最具挑战性的 FJSPT7 基准算例的最优结果；李昆鹏等人^[20]构建了一种基于数学模型求精确解和基于时间优先级的两阶段算法，并将其用于解决半导体生产车间的 AGV 调度问题。

近似优化方法主要针对较大规模调度问题，包括构造方法、人工智能方法以及智能优化算法。Zou 和 Pan 等人^[21]针对矩阵生产车间中的 AGV 实时调度问题，以最小化总成本为目标，提出了一种改进迭代算法用于问题求解；Fontes 等人^[22]提出了一种混合粒子群优化和模拟退火算法的新算法，并使用 73 个 AGV 任务调度基准算例对算法性能进行了验证；Miao 等人^[23]针对矩阵制造车间中的多 AGV 任务调度问题，以 AGV 最大完工时间最小为优化目标建立数学模型，并提出了人工蜂群算法进行求解；Tian 等人^[24]针对电极箔生产车间中的 AGV 与机器联合任务调度问题建立了混合整数线性规划模型，并提出了离散灰狼优化算法用于模型求解；刘二辉等人^[25]提出一种基于改进花授粉算法的车间调度算法，用于求解 AGV 与机器联合任务调度问题，并通过搭建集成调度实验平台验证了所提改进算法的有效性；杨智飞等人^[26]针对具有多台 AGV 的智能生产车间，建立了多目标调度优化模型，并提出了一种自适应多目标遗传差分进化算法进行求解。

伍乐等人^[27]以最大完工时间为优化目标,提出了一种混合变邻域搜索的改进离散差分进化算法,并将其用于柔性制造系统中的AGV与机器联合任务调度问题;马千慧等人^[28]为解决智能制造环境中具有多AGV约束的柔性作业车间调度问题,建立了机器-AGV双约束多目标调度模型,并且为求解该模型,设计了新的AGV调度规则和改进NSGA-II算法,通过四个案例仿真测试验证了改进算法的有效性;张国辉^[29]针对智能制造环境中的有限AGV运输资源车间调度问题建立了集成调度模型,并提出了改进的NSGA-II求解算法,以标准测试算例和航空企业实际生产案例对算法求解调度问题进行了有效性验证,同时分析了不同AGV数量下调度模型的有效性。

1.2.2 AGV 路径规划研究现状

AGV 路径规划可分为单 AGV 与多 AGV 两类。单 AGV 规划只需考虑路径最短或拐点最少等目标;多 AGV 规划则需兼顾个体路径优化与 AGV 间潜在冲突,避免冲突并规划合理路径是其核心目标。

对于单 AGV 路径规划问题而言,主要方法包括以快速扩展随机树算法^[30](Rapidly Exploring Random Trees, RRT)为代表的概率采样算法、以 Dijkstra 算法^[31]和 A*算法^[32]为代表的图搜索算法、以强化学习^[33]和深度学习^[34]为代表的新型学习算法和以遗传算法^[35]、蚁群算法^[36]等为代表的智能优化算法。当前研究多基于这四类算法的改进与融合,Wu 等人^[37]提出了一种 Fast-RRT 算法与随机转向策略相结合,以提高窄通道场景中的算法搜索性能;Li 等人^[38]提出了一种跳跃进化的蚁群优化算法,通过建立最优路径预测模型,预测路径信息素矩阵扩展进化趋势,节省了算法运行时间;Shi 等人^[39]通过改进蚁群优化算法的启发式函数和遗传算法的适应度函数,并引入删除算子、精英保留等策略,提出了一种改进的遗传和蚁群混合算法,将其用于智能车辆路径规划问题;王玉等人^[40]将双向蚁群算法与跳跃点搜索策略相结合,加快了搜索速度,并且解决了蚁群算法易被凹形障碍物卡住的问题;栾添添等人^[41]提出了一种基于动态变采样区域的 RRT 算法,解决了传统 RRT 算法在节点搜索过程中的盲目性、随机性及路径曲折问题;曾明如等人^[42]提出了一种具有自适应贪婪因子的深度强化学习路径规划算法,采用自适应调节的贪婪因子平衡了算法在探索和利用的关系,通过实验证明了算法在最优路径和迭代次数上都优于深度 Q 网络(Deep Q-Network, DQN)算法;赵学健等人^[43]提出了一种融合改进 D*与 RRT 算法的路径规划算法,相比于传统算法显著提升了路径规划性能。

多 AGV 路径规划过程中要考虑可能出现的路径冲突问题,对于该问题,国内外学者研究侧重点略有不同,国外学者侧重于协调控制、解决死锁等问题,国内学者侧重于动态避障、多任务组合优化等方面。Malopolski 等人^[44]为解决方形拓扑结构地图中的多 AGV 路径规划问题,提出了一种基于预约链原则的方法;Mohammadi 等人^[45]为解决多

AGV 路径规划中的冲突问题，提出了一种基于前瞻机制避免冲突的方法；Hu 等人^[46]通过构建 AGV 行为树模型，并使用强化学习方法建立自适应规则选择模型，使 AGV 可以在多种场景下避免冲突；Sarkar 等人^[47]通过引入四种不同算子增强算法搜索能力，有效解决了移动机器人单源路径规划问题，同时对多机器人问题，通过有效调整目标顺序和中间节点的选择，实现了无冲突路径；张素云等人^[48]提出了一种改进速度控制策略，通过控制 AGV 在冲突节点处的行驶速度，解决冲突问题；张中伟等人^[49]通过将时间窗模型和动态优先级结合，提出了一种 AGV 无冲突路径规划方法；黄翼虎等人^[50]在传统 Dijkstra 算法基础上结合了任务优先级和时间窗实现无冲突路径规划；周昱等人^[51]提出了一种基于改进 A* 算法和时间窗检测法相结合的方法为所有 AGV 生成一条初始无冲突路径；李腾等人^[52]为了实现了 AGV 在机器人履约系统中的高效运行，提出了一种基于动态避障优先级与预测的无冲突路径规划策略。

1.2.3 研究评述

当前部分 AGV 任务调度研究未充分考虑物料运输系统的实际需求与问题特征。生产制造场景下的调度问题需兼顾 AGV 状态与车间生产资源配置，因此，考虑 AGV 与机器的联合任务调度问题更符合实际需求。关于 AGV 任务调度的求解方法主要分为精确求解方法与近似优化方法：精确求解方法在小规模问题中可获得精确解，但面对大规模问题时效率显著降低；近似优化方法虽无法保证最优解，却能快速获得可行解。因此，采用近似优化方法成为当前研究 AGV 任务调度问题的首选，如何通过方法创新提升求解精度以实现最优调度，是当前研究热点与难点。

对于单 AGV 全局路径规划问题而言，目前主流方式是对四种类型路径规划算法进行改进或融合等方式来实现新路径规划算法，且相关研究已经较为成熟，但是由于实际生产车间环境复杂，单 AGV 全局路径规划无法满足实际生产需求。而对于多 AGV 路径规划问题，目前大多数研究针对场景为码头集装箱，对于车间地图也往往是针对一些复杂度较低的单向电子地图，对于生产车间中的较高复杂度路径研究相对不足。

综上所述，本文针对车间多 AGV 任务调度问题，开展 AGV 与机器联合任务调度的建模与求解算法研究，以提升车间 AGV 任务调度水平；针对车间多 AGV 路径规划问题，开展基于改进智能优化算法的单 AGV 路径规划研究，以及基于时间窗的多策略融合多 AGV 无冲突路径规划研究，旨在提高车间 AGV 运行效率、减少冲突死锁问题，提升车间整体生产效率。