仓储多AGV系统调度优化与避碰方法研究

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

2020年10月，党的十九届五中全会制定了“十四五”规划，提出要培育先导性和支柱性产业，推动战略性新兴产业的发展。物流行业作为最新型的产业之一，也是规划中重要的一部分（数字化背景下智慧物流研究文献综述）。近年来，随着科技的快速发展和网络电商的兴起，物流仓储行业也日益旺盛。传统物流仓储主要是以人为主要劳动力，完成货物的分拣、搬运等工作，在仓库面积较大时，需要更多的人力资源，花费更多的时间。自动导引车AGV（Auto Guided Vehicle）、物联网技术、大数据等技术的发展，也带给传统物流仓储行业一次重大革命。2009年12月，国际商业机器公司IBM（International Business Machines Corporation）率先提出智慧物流的概念，指通过智能软硬件、大数据技术、物联网技术等智慧化手段，实现物流仓储各环节精细化、动态化、可视化管理，以提高物流仓储系统智能化分析决策和自动化操作执行能力，进而提升整体运作效率的现代化物流模式（中外智慧物流发展现状及未来趋势研究）。

智能仓储是智慧物流中的一个重要组成部分。智能仓储是指运用软件技术、物联网技术、人工智能等先进的科学手段和设备，对货物的进出库、存储、分拣、包装、配送等进行有效的计划、执行和控制（面向智能仓储的多AGV路径规划算法研究\_盛阳）。AGV行动快、结构简单、工作效率高、安全性好、可控性强的特点使其快速应用于智能仓储中，是货物入库、分拣、出库等操作的执行单位（仓储多AGV的动态调度与避碰决策研究）。AGV通常以可充电的蓄电池为动力来源，装备有非接触式导航装置，沿着事先规划好的路径自动行驶，到达任务目的地，执行相应的动作。AGV的作业区域无需铺设轨道，几乎不受道路、场地和空间的约束，柔性高。随着工业4.0的到来，京东、菜鸟等网络电商的迅速崛起，以及AGV的研发、制造成本的降低，AGV在仓储中的应用也将愈来愈广泛。

1.1.2 研究意义

AGV作为仓库内货料运输、物品分拣、成品运输等操作的执行单位，在自己的工作范围内可以精确、稳定、快速地完成任务。智能仓储多AGV系统应具备资源合理分配的能力，对AGV进行合理的调度，再加上行驶途中合理、有效的避碰方法，以提高整个仓储多AGV系统的运行效率。

目前关于仓储多AGV系统的调度方法研究多数是在已知条件上、小规模、静态环境下进行的（考虑充电的多AGV的作业车间调度问题\_李峥峰、基于文化混合算法的多AGV调度研究\_曾亮、考虑运输时间的分布式柔性作业车间绿色调度\_张洪亮）。但在网络电商迅速崛起的今天，仓库的面积不断增大，AGV的数量随之增多，订单任务逐渐向多品种、多批次转变，并且实际仓储系统中通常要面对AGV数量变化、AGV电量不足、任务数量激增等问题，对仓储多AGV系统的调度优化提出了更高的要求。当仓储系统中AGV数量达到几十台甚至上百台时，单纯的调度方法很难有效地解决AGV之间的冲突、死锁等问题。因此，一方面，仓储多AGV系统需根据系统实时状态进行动态调度优化；另一方面，需要根据系统实时状态而局部管控或为特定的AGV进行局部路径规划以避免冲突和死锁。在未来的智能仓储行业发展中，多AGV系统配以高效的调度优化方法和避碰方法，对提高工作效率、降低劳动成本、改善传统仓储行业的作业模式有着十分重要的意义。

1.2 课题研究的国内外现状

AGV的调度是指，在系统约束条件和优化目标下，建立数学模型，利用算法等对任务和AGV合理分配及排序并进行路径规划，避开障碍物，将货物搬运至指定地点完成任务的过程（自动导引车调度优化研究综述）。由于有多个AGV同时在运行，途中可能会发生AGV之间冲突等情况，还需要合理的避碰方法避免冲突。美国亚马逊公司在2012年斥资7.75亿美元收购Kiva System仓储机器人公司，率先将AGV应用于仓储工作中。科尔摩根等公司在叉式AGV调度系统方面也取得了丰硕的成果，最大可以同时调度120台AGV。国内公司如菜鸟，在2018年无锡的机器人仓中实现了700台AGV在3万平方米仓库中的协同作业；上海宾通、深圳格局等公司也在AGV调度系统的研究中取得了成果。多AGV的调度主要分为静态调度和动态调度两种。

1.2.1 静态调度方法研究现状

静态调度，是指针对系统的某一个静态时刻，在AGV正式开始执行任务之前，按照已知的系统约束、一个或多个优化目标，完成任务分配及排序、路径规划。系统约束和优化目标根据具体应用场景和需求而改变，常见的约束有AGV数量、AGV电量、AGV可通行区域等，优化目标常见的有AGV总行程最短、系统总成本最小、系统总作业时间最短、最小化最大完工时间等。因此静态调度主要有两个阶段：任务分配及排序，路径规划。AGV在开始执行任务后，按事先调度的方案执行。静态调度方法的优点在于能够事先安排好调动，减少在系统运行过程中的开销；缺点是缺乏灵活性，不能根据系统实时状态进行及时调整。

（1）任务分配及排序方法研究现状

静态调度中任务分配及排序常用的研究方法主要有传统分析法、智能优化算法等（自动导引车调度优化研究综述）。传统分析法主要包括整数规划、混合整数规划、分支界定法等。传统分析法计算结果准确，能够得到理论最优解，但计算量很大，计算耗时长。Rahman Humyun Fuad（Scheduling automated transport vehicles for material distribution systems）研究提出了一种适用于集装箱码头的AGV调度方法，建立了一个混分整数规划模型以及提出了两个基于元启发式算法，有效地减少物资配送任务的时间，提高了作业效率；杨雅洁等人（考虑AGV避碰的自动化码头多资源协同调度）针对自动化码头AGV、岸桥、场桥协同调度，在考虑任务分配和AGV的避碰约束下，建立以最小化任务最大完成时间为目标的混合整数规划模型并进行求解，提高了整个作业流程的效率。

传统分析法的弊端，使许多学者投入到智能优化算法的研究中。智能优化算法主要应用于一些复杂优化问题的求解，常用的优化算法有遗传算法（Genetic Algorithm，GA）、蚁群算法（Ant Colony Optimization，ACO）、粒子群算法（Particle Swarm Optimization，PSO）、模拟退火算法（Simulated Annealing Algorithm,SAA）、人工蜂群算法（Artificial Bee Colony Algorithm,ABCA）等。智能优化算法所求的是近似解，即较优解，通常都不是理论上的最优解，但是其在计算量以及计算复杂度上面来说，比传统分析法小很多，因此广泛应用于调度中。

遗传算法最早是由美国的John Holland学者于20世纪70年代提出，是一种模拟达尔文生物进化论的计算模型，在模拟自然进化中搜索最优解的优化算法，主要包括选择、交叉、变异、迭代等过程。遗传算法有较好的快速随机搜索的能力，较好的优化效果，但容易过早收敛，陷入局部最优。为了弥补传统遗传算法的不足，研究者们针对不同的使用场景进行改进，获得了更好的优化效果。Maryam Mousavi（Multi-objective AGV scheduling in an FMS using a hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization）等人针对柔性制造系统中的多AGV调度问题，以最小化完工时间和AGV的数量为目标，建立数学模型并结合进化算法（遗传算法（GA）、粒子群优化算法（PSO）和混合GA-PSO算法），优化AGV的任务调度；周亚勤（密集仓储环境下多AGV/RGV调度方法研究）等人针对密集仓储环境下的出入库作业，构建了考虑多出入库任务的多AGV/RGV作业调度模型，并提出基于遗传算法的协同调度方法，减少了出入库作业的总时间，提高了仓储作业整体效率；Ruifeng Yang（An improved genetic algorithm for solving flexible job shop）根据柔性作业车间调度的特点，建立了最小化最大完工时间的数学模型，并提出了一种采用多点交叉的改进遗传算法进行求解，有效改善了传统遗传算法容易陷入局部最优的问题。

除了遗传算法，国内外学者们还对其它智能优化算法做了大量的研究。郑小虎等人（基于模拟退火遗传算法的纺纱车间调度系统）为解决纺纱车间多约束条件下的AGV调度问题，以最小化最大完工时间为优化目标建立了调度模型，提出了模拟退火遗传算法进行求解，相比传统的模拟退火算法和遗传算法，更有效地减少了最大完工时间；董海（基于改进细菌觅食算法的AGV作业车间多目标优化）等人针对AGV作业车间调度优化问题，建立了以生产机器可靠性最大化、AGV可靠性提升程度最大化以及总成本最小化的多目标调度优化模型，提出了一种基于激素调节机制的细菌觅食算法进行求解并验证了该算法的有效性；Qiangwen Zhou（An effective multi-objective evolutionary algorithm for solving the AGV scheduling problem with pickup and delivery）等人矩阵制造车间中AGV调度问题，以客户满意度最大化和成本最小化为优化目标建立了调度优化模型，提出了一种有效的多目标进化算法进行求解；潘迎新（基于差分进化算法的自动化集装箱码头AGV调度问题\_潘迎新）等人为提高自动化集装箱码头的水平运输作业效率，以极小化岸桥的完工时间为目标建立优化模型，设计了离散差分进化算法求解并验证了模型和算法的有效性。上述学者们针对不同的应用场景和优化目标分别建立了优化模型，求解模型所采用的智能优化算法也各不相同。

（2）路径规划方法研究现状

任务分配及排序完成后，就需要根据每台AGV的任务为它进行路径规划。AGV的路径规划是指在一个有障碍物的地图中，从起点到终点避开障碍物规划出一条最优路径，最优路径的评价指标一般有总路程最短、总耗时最短、总成本最低等（面向智能仓储的多AGV路径规划算法研究\_盛阳）。AGV的路径规划可以分为全局路径规划和局部路径规划，全局路径规划是静态的，也称之为离线的，在AGV行动前就规划好路径；局部路径规划是动态的，也叫在线的，在AGV运行过程中由于各种突发情况而进行的路径再规划（智能包装车间AGV路径规划与动态调度研究\_褚俊娴）。局部路径规划是建立在全局路径规划基础上的，可以有效应对各种情况，但方法较复杂，且对调度系统的实时性能要求较高。

目前常见的路径规划算法主要有Dijkstra算法、A\*算法、蚁群算法、人工势场算法等。

Dijkstra算法是最经典的路径搜索算法，基于贪心思想，每次遍历离初始节点最近且没有检查的点，遍历到终点为止。这种算法的优点在于能够保证找到一条最短可行的路径；缺点在于要遍历很多的节点，导致算法的效率很低。因此学者们更青睐于对其进行一定的改进后使用它求解问题。王芝麟（一种基于二叉堆的Dijkstra最短路径优化方法\_王芝麟）将最小二叉堆作为Dijkstra算法的辅助数据结构来优化算法，通过实验证明改进的算法在相同数据量下求得最短路径的时间较原始算法有明显的减少，提高了计算效率；Yinghui Sun（AGV Path Planning based on Improved Dijkstra Algorithm）把八角搜索法和Dijkstra算法相结合以提高节点搜索效率，进而提升整个算法的求解效率。姜辰凯（基于改进Dijkstra算法的AGVs无碰撞路径规划\_姜辰凯）则是将研究重点放在了多AGV无碰撞路径的规划上，提出基于时间窗的改进Dijkstra算法，利用时间窗排布AGV的出发顺序以避免冲突，不足地方在于所研究的AGV数量较少，难以满足实际需求。

Dijkstra算法作为经典的最短路径搜索算法，人们对它的研究一直没有停止，主要集中在Dijkstra算法的效率问题上。1968年，Nillson等人提出了一种新的算法，在Dijkstra的贪心思想上加入了启发式函数，极大地提高了搜索速度，这就是A\*算法。Dijkstra算法是广度优先搜索，A\*算法则属于深度优先搜索，前者保证能够找到一条最短路径，以时间换效果；后者通常能够找到最短路径，并不是一定，综合了时间和效果。

A\*算法的高效性使其很快得到了广泛的应用，如同时保证了路径与障碍物之间安全距离的无人水面艇路径规划中Anh Hoa Vo（Modified A\* Algorithm for Obstacle Avoidance for Unmanned Surface Vehicle）、根据城市网人群密度而实时改变的无人机路径规划中（基于人群密度风险的无人机动态路径规划研究\_焦庆宇）、提高安全距离和剔除冗余路径点的移动机器人路径规划中（基于运动约束的移动机器人路径规划\_陈艺文）。针对不同的场景，为了获得更高的效率和更好的路径，许多学者提出了改进的A\*算法。当场景很大，路径点很多，A\*算法的效率也不足以满足需求时，Xin Lai（Enhanced Center Constraint Weighted A Algorithm for Path Planning of Petrochemical Inspection Robot）提出了一种新的中心约束加权A\*算法，在启发式函数中增加了自适应阈值，同时每个路径节点赋予不同的动态权重，加快了搜索速度，缩短了规划时间。

蚁群算法是一种群智能算法，由一群个体通过彼此协作寻找最优解，灵感来源于自然界中蚂蚁觅食行为。蚁群算法采用正反馈的机制，在搜过过程中不断收敛，逐步逼近最优解，计算效率高，广泛应用于旅行商问题（Traveling Salesman Problem，TSP）、指派问题、调度问题等。

1.2.2 动态调度方法研究现状

动态调度是相对于静态调度而言，任务分配和路径规划都是在系统运行过程中进行的，同时考虑动态扰动情况下，如任务变更、路径冲突死锁、设备发生故障等，因此可以根据系统实时状态进行调度。动态调度相比于静态调度有更好的灵活性，但由于动态调度需要在线进行，会增大系统负荷，并且为了保证实时性，调度算法不能太复杂。

1.2.3 多AGV避碰方法研究现状

1.3 研究现状总结

1.4 本文研究内容及结构安排

第2章 仓储多AGV系统及优化分析

2.1 仓储多AGV作业系统

2.1.1 仓库模型

2.1.2 “货到人”工作模式

2.1.3 地图建模（包含点，线，面）

2.2 优化分析

2.2.1 调度优化问题分析

2.2.2 避碰问题分析

2.3 研究框架

2.4 本章小结

第3章 仓储多AGV系统调度优化方法

3.1 基于遗传算法的多AGV任务分配及排序方法

3.1.1多AGV任务分配优化目标和模型

3.1.2 融合蚁群算法的改进遗传算法

3.2 基于改进A\*算法的单AGV路径规划方法

3.2.1 单AGV路径规划优化目标和模型

3.2.2 传统A\*算法

3.2.3 考虑减少转弯次数的改进A\*算法

3.3 基于系统短期状态预测的多AGV调度优化方法

3.3.1 考虑减少冲突节点数量的多AGV调度优化目标和模型

3.3.2 基于系统短期状态预测的多AGV调度优化方法

3.4 仿真与分析

3.4.1 改进A\*算法仿真分析

3.4.2多AGV调度优化方法仿真分析

3.5 本章小结

第4章 基于在线监控的多AGV避碰方法

4.1 仓储多AGV系统避碰问题描述

4.1 在线监控系统设计

4.1.1 通信方案设计

4.1.2 软件设计

4.2 基于在线监控的多AGV避碰方法

4.2.1 AGV死锁与冲突

4.2.2 AGV实时信息获取

4.2.3 基于在线监控系统的多AGV避碰方法

4.3 实验设计与分析

4.4 本章小结

第5章 实验平台搭建与验证

5.1 仓储多AGV调度优化系统平台搭建

5.2 调度优化方法实验设计与分析

5.3 避碰方法实验设计与分析

5.4 本章小结

第6章 总结与展望

参考文献