

面向仓储物流的 AGV 调度与路径规划优化

李锋 130582198402220610

摘要：随着电商行业与智能制造的快速发展，仓储物流环节对自动化作业的需求持续提升，自动导引车（AGV）作为仓储自动化的核心设备，其调度效率与路径规划合理性直接决定了仓储系统的整体运行成本与作业效率。本文针对传统仓储 AGV 应用中存在的路径冲突、调度响应滞后、死锁拥堵等问题，分析了 AGV 调度与路径规划的核心约束条件，梳理了现有算法的应用局限，提出了基于动态权重调整的改进 A* 算法结合遗传调度优化的整合方案，并对方案的应用效果进行了仿真验证。研究结果表明，该优化方案能够有效降低 AGV 的平均作业路径长度，减少冲突等待时间，提升仓储物流的整体作业效率，可为现代化智能仓储的 AGV 系统设计提供参考。

关键词：仓储物流；AGV 调度；路径规划；智能优化

一、引言

近年来，我国仓储物流行业呈现出规模化、自动化的发展趋势，据中国物流与采购联合会统计数据显示，2023 年我国智能仓储市场规模已经突破 2500 亿元，其中自动导引车（Automated Guided Vehicle, AGV）的市场保有量年增长率超过 30%。AGV 能够实现货物的自动搬运与转运，无需人工干预即可完成标准化作业，在降低人力成本、提升作业准确率、适应复杂仓储环境等方面具有显著优势，已经成为电商仓储、原料仓储、成品仓储等场景的核心自动化装备。

二、仓储 AGV 调度与路径规划的核心问题与约束

2.1 核心问题界定

仓储场景下的 AGV 作业流程可以概括为：系统接收到货物搬运订单后，调度模块为订单分配可用 AGV，随后路径规划模块为 AGV 规划从当前位置到取货点、再从取货点到送货点的无冲突最优路径，最终 AGV 完成搬运任务返回待命区或承接下一个任务。因此 AGV 调度与路径规划可以分为两个关联的核心问题：第一是调度问题，即在多订单、多 AGV 的场景下，完成订单-AGV 的任务分配，同时确定所有 AGV 的作业顺序，目标是最小化整体任务的完成时间与运行成本；第二是路径规划问题，即在仓储的路网环境中，为每一台 AGV 规划满足通行约束的最短或次优路径，同时避免与其他 AGV 发生运行冲突。

2.2 主要约束条件

仓储场景下 AGV 运行的约束条件主要分为四类：第一是路网拓扑约束，仓储中道路存在单向通行路段、节点容量限制，即同一时间一个道路节点只能允许一台 AGV 占用，AGV 的路径必须在现有路网拓扑范围内生成，不能跨越货架等障碍物。第二是任务约束，每一个搬运订单必须依次完成取货、送货两个环节，AGV 必须在规定的窗口内完成任务，否则会影响后续的分拣、出库作业。第三是冲突避免约束，多个 AGV 运行时不能发生节点冲突、相向冲突以及超车冲突，节点冲突指多台 AGV 同时进入同一个道路节点，相向冲突指两台 AGV 在单向路段上对向行驶，超车冲突指一台 AGV 在单向路段超越前方另一台 AGV，三种冲突都可能导致系统运行中断。第四是 AGV 自身性能约束，每台 AGV 的载重、电量都有上限，不能分配超过载重能力的任务，低电量 AGV 需要优先调度至充电区补能。

三、现有方法的应用局限分析

目前传统 AGV 路径规划常用方法包括人工势场法、Dijkstra 算法、传统 A* 算法等。人工势场法通过构建引力场与斥力场引导 AGV 运动，原理简单但容易陷入局部最优，在仓储多障碍物环境中规划成功率较低。Dijkstra 算法可以搜索得到全局最短路径，但算法遍历的节点数量过多，计算效率较低，无法满足动态场景下的实时规划需求。传统 A* 算法通过启发函数缩小搜索范围，计算效率高于 Dijkstra 算法，但传统 A* 算法采用固定的启发权重，在多 AGV 动态运行场景中，无法根据实时的路网占用情况调整搜索策略，容易生成距离道路节点较近的路径，增加冲突发生的概率。

四、AGV 调度与路径规划优化方案设计

4.1 改进的动态 A* 路径规划算法

针对传统 A* 算法的不足，本文提出引入动态冲突权重的改进 A* 算法，算法的代价函数如公式（1）所示：

$$f(n) = g(n) + (w1 + w2 * c(n)) * h(n) \quad (1)$$

其中 $g(n)$ 为从起点到当前节点 n 的实际路径代价， $h(n)$ 为从节点 n 到终点的预估代价， $w1$ 为基础启发权重， $w2$ 为冲突调整权重， $c(n)$ 为节点 n 的历史冲突次数。当某一个节点被多次规划为路径节点，发生冲突的概率较高，改进算法会提高该节点的预估代价，引导算法搜索其他冲突概率更低的路径，在保证路径长

度较短的同时降低冲突发生的可能性。在路网预处理阶段，本文将仓储环境转换为栅格路网模型，标记障碍物节点与可通行节点，为路径规划提供基础。

4.2 基于遗传算法的多 AGV 动态调度优化

在路径规划的基础上，采用改进遗传算法实现多 AGV 的调度优化，优化目标设定为最小化所有订单的总完成时间与平均等待时间。首先对调度问题进行编码，采用订单-AGV 关联的实数编码方式，每一条染色体代表一种任务分配与排序方案。初始种群生成时，保留一部分传统规则调度的可行解，同时随机生成其余个体，提升初始种群的质量。在交叉变异环节，采用自适应交叉变异概率，当种群多样性较高时采用较高的交叉概率与较低的变异概率，加快收敛速度；当种群多样性降低时，提高变异概率避免算法陷入局部最优。

五、仿真验证与结果分析

为验证本文提出的优化方案的效果，采用 Matlab 搭建仿真环境，模拟某电商仓储的 100m*80m 仓储区域，设置 20 个分拣节点、10 台 AGV，生成 50 个随机搬运订单，分别采用传统 A*+FCFS 调度、传统 A*+遗传调度、本文改进方案三种方式进行仿真实验，得到的结果如下表所示：

方案类型	平均路径长度 (m)	总任务完成时间 (s)	平均冲突等待时间 (s/ 台)
传统 A*+FCFS	68.25	1428	12.36
传统 A*+遗传调度	67.14	1215	9.82
本文优化方案	62.38	987	4.15

从仿真结果可以看出，本文提出的优化方案相比于另外两种传统方案，平均路径长度降低了 8.6%~9.2%，总任务完成时间降低了 18.8%~30.9%，平均冲突等待时间降低了 57.7%~66.4%，各项指标都有明显的优化，说明本文提出的改进方案能够有效提升多 AGV 的运行效率，减少冲突等待，适配仓储场景的动态作业需求。

六、结论

面向仓储物流的 AGV 调度与路径规划是提升智能仓储运行效率的核心问题，

本文针对传统方法在动态场景下的不足，提出了改进动态权重 A* 路径规划结合自适应遗传调度的整合优化方案，通过仿真验证证明了方案的有效性。该方案实现简单，计算效率能够满足实时性要求，适合在中小型多 AGV 仓储系统中应用。未来的研究可以进一步考虑 AGV 动态充电、紧急订单插入等更复杂的场景约束，进一步提升优化方案的适应性。

参考文献

- [1] 张磊, 王健. 智能仓储多 AGV 路径规划与调度研究综述[J]. 物流技术, 2022, 41(05): 1-6+31.
- [2] 刘二辉, 姚锡凡. 基于改进遗传算法的自动导引小车路径规划及其实现[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(03): 465-473.
- [3] 刘辉, 江帆, 陈玉虎. 面向智能仓储的多 AGV 动态调度优化方法研究[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(08): 45-50.