

# 移动机器人在仓储物流中的应用与调度优化研究

文豪 谭春莉 陈锐

重庆移通学院 重庆 401420

**摘要:** 当前, 电商行业的迅猛发展对仓储物流系统的效率、准确性和柔性提出了前所未有的高要求。传统以人工作业为主的仓储模式面临劳动力成本持续上涨、订单波动性大、效率提升遭遇瓶颈等多重挑战。在此背景下, 以移动机器人为代表的智能仓储技术应运而生, 成为推动物流体系向自动化、智能化转型升级的关键力量, 其应用与调度优化已成为行业研究的核心焦点。本文旨在系统分析移动机器人在仓储物流中的核心应用场景与显著优势, 并重点探讨其调度系统的关键技术架构与优化策略, 以期为行业实践提供理论参考。

**关键词:** 移动机器人; 仓储物流; 应用; 调度优化

## 引言

移动机器人技术作为智能物流的核心装备, 其应用对现代仓储发展具有重大意义。该技术通过“货到人”拣选、自动化搬运等模式, 从根本上提升了仓储作业的效率与准确性。更为关键的是, 高效的多机器人调度系统实现了仓储资源的最优配置, 大幅增强了物流系统的响应速度与处理能力。深入研究其应用与调度优化, 对推动仓储物流的智能化升级、构建柔性供应链具有重要的理论价值与实践指导意义。

## 1 移动机器人在仓储物流中的应用优势

### 1.1 运营效率的显著提升

移动机器人通过自动化与智能化手段, 直接优化了仓储作业的核心效率指标。它们能够实现近乎连续的二十四小时运行, 大幅提升了单位时间的作业产出。在路径规划与集群调度算法的支持下, 机器人能够自主选择最优路径, 有效规避拥堵, 将无效的行走与等待时间降至最低。特别是在“货到人”拣选场景中, 彻底消除了人员长距离步行寻找货物的时间消耗, 使得订单履行周期显著缩短, 吞吐量获得数倍增长。这种效率提升是系统性且量化的, 直接增强了仓储物流的响应能力与处理能力。

### 1.2 运营成本的优化与控制

机器人的应用从多个维度助力企业实现运营成本的优化与长期可控。首先, 它降低了对熟练工的依赖, 缓解了劳动力成本上涨和人员流动性大的压力。其次, 自动化流程减少了人为操作失误带来的商品错发、破损等损失, 提升了作

业准确性。在系统柔性方面, 机器人解决方案通常具备模块化扩展能力, 企业可根据业务规模灵活增减设备, 避免了传统自动化项目初期的一次性巨额投资风险, 实现了从资本性支出向运营性支出的转变, 使成本结构更优。

### 1.3 系统柔性及可扩展性的增强

移动机器人系统赋予了仓储物流极高的柔性与可扩展性, 这是其区别于传统固定自动化系统的关键优势。系统布局无需对仓库基础设施进行大规模改造, 机器人运行路径可通过软件重新规划, 从而快速适应业务高峰季的波动、SKU数量的变化甚至仓库布局的调整。这种敏捷性使得企业能够以较低的试错成本和极快的速度响应市场变化。产能的扩展如同增加机器人单元一样简便, 实现了仓储能力真正的“按需部署”, 为构建未来敏捷供应链提供了核心支撑。

## 2 移动机器人在仓储物流中的主要应用

### 2.1 货到人拣选作业

这是移动机器人应用中最具革命性的场景。其核心在于彻底改变了“人找货”的传统拣选模式。机器人系统, 无论是顶升式潜伏机器人背负整个货架移动, 还是料箱式机器人将特定货箱送至工作站, 都实现了货物与拣选人员的精准对接。员工无需再长时间行走于庞大的仓库中, 只需在固定的工位上完成确认和分拨动作。这种模式带来的效益是巨大的。它首先极大提升了拣选效率, 通常有数倍的提升, 并显著缩短订单履行周期。其次, 它降低了员工的劳动强度和所需的技能门槛, 将人力从重复性行走中解放出来, 专注于价值更高的操作。此外, 这种模式优化了仓库布局, 可以采用

更密集的存储方式, 因为不再需要为人员通行预留宽阔通道。货到人系统是应对电商海量 SKU 和爆发式订单增长的关键技术, 已成为现代智能仓储的核心标志。

## 2.2 自动化搬运与对接

移动机器人无缝替代了传统由人工操作叉车或地牛完成的各类水平搬运任务, 实现了物料在仓库内不同功能区之间的自动流转。这包括从收货区到上架区的托盘或料箱搬运, 从存储区到拣选区的补货作业, 以及将拣选完成的订单商品运送到打包区或发货区。机器人通过调度系统与上层管理软件集成, 接收指令后能够自主、准确地将物料送达指定地点。这不仅提升了搬运环节的效率和准确性, 避免了人为错误, 更通过二十四小时不间断运行, 大幅提升了物流节奏。更重要的是, 它实现了物流环节间的无缝衔接, 将离散的作业点串联成一条流畅的自动化流水线。同时, 自动化搬运也减少了场内叉车等设备的使用, 提升了作业安全性, 创造了一个更安全的工作环境。

## 2.3 订单分拣与排序

在更为复杂的物流场景中, 移动机器人超越了简单的搬运功能, 直接参与到订单的精细分拣与排序环节。例如, 在面向生产线的物料配送或电商订单合并处理时, 需要将不同品类的物品按照特定顺序进行归集。多台机器人可以在调度系统的统一指挥下协同工作。它们分别从不同货位取出商品, 然后按照预设的订单逻辑和序列, 依次汇集到同一个订单箱或工作站, 或者直接将物品按配送顺序排列在出发区域。这个过程实现了高度动态和精准的订单组装, 替代了传统需要大型分拣机和复杂输送线的系统。它提供了极高的灵活性, 能够轻松应对多批次、小批量的分拣任务, 快速响应生产线的工位需求或最后一百米的配送优化, 是实现精益物流和准时制生产的重要工具。

## 2.4 动态库存盘点与巡检

移动机器人通过搭载 RFID 读写器、计算机视觉摄像头或激光扫描仪等传感设备, 化身为自主移动的盘点员和巡检员, 实现了库存管理的自动化和实时化。机器人可以按照预设路线或根据指令, 在仓库内自主巡弋, 无需人工干预即可快速读取货架上的商品信息, 完成库存数据的采集。相比传统人工盘点需要停止作业且易出错, 机器人可以在业务低峰期或甚至不间断运行期间进行扫描, 实现近乎实时的库存数据更新, 确保了账实相符率。此外, 它们还可以同步执行安

全巡检任务, 监控仓库环境如温度湿度是否异常、消防通道是否畅通、设备是否有潜在风险等。这将库存管理从周期性、样本式的抽查, 转变为全天候、全范围的精准监控, 为管理者提供了前所未有的数据可视性和决策支持。

# 3 移动机器人调度系统关键技术

## 3.1 多智能体路径规划技术

该技术是调度系统的核心算法层, 旨在为大量机器人群体规划无冲突、无死锁的最优或近似最优路径。其核心挑战在于如何在共享的二维栅格地图或拓扑网络中, 解决多智能体之间的空间竞争问题。传统方法依赖严格的交通规则, 如单行道或预约机制, 但可能牺牲效率。现代先进算法如基于冲突的搜索, 通过识别潜在路径冲突并为其规划替代路径, 能在动态环境中实现高效、安全的协同移动。该技术的目标是确保每个机器人都能以最短时间或最低能耗抵达目标点, 同时维持整个系统的高流量。

## 3.2 实时任务分配与优化技术

调度系统需将源源不断的搬运任务动态、合理地分配给最合适的机器人执行单元。这本质上是一个复杂的组合优化问题, 需在瞬息万变的环境中快速做出决策。优化目标通常是总任务完成时间最短、系统吞吐量最大或总体能耗最低。调度算法需综合考虑每个机器人的当前位置、电量状态、当前任务负载以及到任务起点的距离等因素。常用的方法包括基于规则的启发式算法, 以及更先进的元启发式算法如遗传算法, 以求在计算复杂度和解决方案质量之间取得最佳平衡。

## 3.3 集中式协同与交通管理技术

为确保数十乃至上百台机器人在密集空间中有序运行, 必须有一套高效的集中式协同与交通管理机制。该系统作为全局大脑, 实时监控所有机器人的位置和状态, 并统一协调其移动。关键技术包括死锁的预测与解除, 例如通过资源预约或优先级设定来避免循环等待。对于局部拥堵, 系统能进行动态流量疏导, 如临时调整路径权重或分配替代路线。此外, 该系统还需集成充电调度策略, 基于机器人电量预测和任务队列, 智能安排其自主插拔充电, 确保 7x24 小时不间断运营。

# 4 移动机器人调度优化策略

## 4.1 时空协同路径规划

此策略的核心是在路径规划阶段即引入时间维度, 实

现多机器人轨迹在时空上的协同。它要求为每台机器人规划的路径不仅包含空间坐标序列, 还需附带精确的时间戳, 形成一条四维时空轨迹。系统通过预测所有机器人的未来轨迹, 可以提前识别出在特定时间、特定地点可能发生的路径冲突。一旦预测到潜在冲突, 系统不是采用简单的停车让行规则, 而是通过主动、微小的速度调整, 例如指令一台机器人略微加速而另一台稍作减速, 使它们在时空上错开交汇点。这种方法从根源上避免了停车等待带来的效率损失和连锁反应, 确保了高密度机器人群体能够流畅、高效地运行。

#### 4.2 预测性能管理

该策略旨在通过前瞻性的能源管理, 保障机器人集群的长期连续稳定运行。其重点是对机器人的能耗与充电行为进行主动干预和优化。系统基于历史数据与实时监控, 持续预测每台机器人的电量衰减趋势和未来任务能耗, 从而智能地规划充电时机与次序。优化逻辑并非被动响应低电量警报, 而是将充电任务无缝嵌入日常作业流程。例如, 系统会优先安排即将低电量且下一任务恰好在充电站附近的机器人进行充电, 或在业务低谷期主动轮换部分机器人进行能量补充。这种预测性策略有效避免了用电高峰期的集中充电需求, 确保了在任何时刻都有充足比例的机器人处于可工作状态, 从而维持了系统产出的平稳性与连续性。

#### 4.3 多目标协同优化

该策略旨在平衡调度系统中多个相互冲突的绩效指标, 实现整体效能的最优配置。在实际运营中, 优化目标往往不是单一的, 可能同时包含最小化任务完成时间、最大化机器人利用率、均衡系统负载、降低总能耗等多个维度。这些目标之间存在着内在的权衡关系, 例如追求最短任务时间可能导致部分机器人超负荷运转, 而强调负载均衡则可能略微延长平均作业周期。该策略通过建立多目标优化模型, 并运用加权求和或帕累托最优等决策方法, 在多个竞争目标之间找到一个可接受的平衡点。调度系统根据实时的运营需求和管

理策略, 动态调整各目标的权重, 从而实现系统综合效能的最优, 而非单一指标的极致化。

#### 5 结束语

综上所述, 移动机器人技术通过“货到人”拣选、自动化搬运等创新应用, 显著提升了仓储物流的作业效率与运营弹性。其核心价值不仅体现在效率提升和成本优化层面, 更通过智能调度系统实现了仓储资源的动态优化配置。随着人工智能、数字孪生等技术的深度融合, 移动机器人调度系统将向更智能、更协同的方向发展。未来研究应重点关注人机协同优化、系统韧性提升等方向, 为构建下一代智能仓储体系提供支撑。

#### 参考文献:

- [1] 康丽丽. 智能仓储物流移动机器人任务协同调度方法研究 [J]. 现代计算机, 2024, 30(11): 40-44.
  - [2] 蔡志勇. 不确定场景的仓储物流机器人视觉导航技术研究 [D]. 广东工业大学, 2024.
  - [3] 顾瑶. 面向仓储物流环境的多自主移动机器人协同编队控制方法 [D]. 大连理工大学, 2024.
  - [4] 牛威杨. 机器人技术在智能仓储物流中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(04): 166-167.
  - [5] 鲁媛. 面向物流场景的多机器人路径规划方法研究 [D]. 湖南大学, 2022.
  - [6] 熊昕霞. 智能仓库中多移动机器人路径规划研究 [D]. 浙江理工大学, 2021.
  - [7] 吕仕宪, 区强, 田冰新, 等. 仓储物流机器人多目标点导航系统解决方案 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20(08): 30-33+37.
- 基金项目:** 2024 年重庆市教育委员会科学技术研究项目, 项目名称: 复杂物流环境下移动机器人障碍物识别及导航研究 (项目编号: KJQN202402405)