

面向动态需求的某智能仓储系统功能模块设计

高源 赵安 刘巍巍

沈阳工业大学 机械工程学院 辽宁 沈阳 110870

【摘要】：随着汽车制造业向个性化定制深度转型，汽车总装车间物流系统面临拣选效率低下、货位分配不合理与堆垛机调度响应不足等实际问题，针对该智能仓储系统在动态生产环境中的实际运行瓶颈，本文聚焦货位优化与动态调度两大核心功能，设计了面向动态需求的闭环式仓储管理系统。该系统通过模块化集成订单处理、货位智能分配、任务实时调度与全流程监控，实现从任务下达到设备执行的全链路设计，为企业提升仓储系统对生产波动的适应性与整体作业效率提供实践参考。

【关键词】：智能仓储系统；货位优化；动态调度；汽车总装物流；功能模块

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.060

引言

随着制造业加速向个性化定制转型，汽车总装车间作为整车制造的最后环节，其内部物流系统的高效稳定运行对保障生产节拍与产能释放至关重要。自动化立体仓库已成为主流汽车制造企业的核心存储单元，但在个性化定制生产量逐步升高的实际生产场景下，系统普遍面临拣选效率低下、货位配置不合理、堆垛机调度响应不足等问题，严重制约了物流系统的整体效能与生产体系的柔性。

针对智能仓储系统的货位分配与任务调度等关键问题，国内外学者已开展了广泛研究。在货位分配方面，Hausman等人^[1]从系统整体视角对分类存储策略进行建模分析，发现行程时间随分类数量增加而减少。Malmberg^[2]进一步比较了不同货位分配原则下的平均取货费用。柳赛男等^[3]提出了基于映射的货品与货位耦合库区分配策略，而马永杰等^[4]则在考虑堆垛机容量等约束条件下，运用遗传算法实现动态货位分配，提升了方案的工程实践价值。在任务调度领域，Tanaka^[5]将多载位自动化立体库任务调度归纳为车辆路径问题，并设计了精确算法求解。罗键等^[6]针对自动小车存取系统建立了复合作业数学模型，杨玮等^[7]则依据货位是否同层构建了两种复合作业路径优化模型。此外，吴涛^[8]针对多订单场景，采用融合模拟退火算法的改进遗传算法进行求解，有效提升了任务分配的效率。现有研究多针对负载轻、规模小的场景，在汽车总装这类高度复杂、需求实时波动的环境中，如何提高系统的适应性与稳定性还需进一步深入研究。

本文聚焦某汽车总装车间实际生产场景，针对其自动化立体仓库在动态需求下面临的货位配置与调度响应问题，进行智

能仓储系统的功能模块设计。通过剖析车间“周期固定、日间波动”的物流特征，构建以智能算法为核心的模块化闭环仓储管理框架，实现从静态货位规划到动态任务调度的全面优化，以提升仓储系统对个性化定制生产模式的适应性与整体作业效能。

1 某汽车总装车间仓储系统现状分析

1.1 物流现状概述

本文研究的汽车总装车间的生产模式，为A、B两款主力车型的混线装配。该生产组织呈现宏观周期稳定与短期波动的显著特征，即在一个既定的生产周期（通常为一周）内，A、B两款车型的装配数量比例关系保持总体稳定，且各自涵盖的装配工艺与标准工序序列均已固化；然而受上游市场销售订单不确定性的传导影响，每日具体需要完成的各车型装配数量及其组合比例，会在总体框架内发生动态调整。

这种生产计划的动态性直接影响到物流环节，表现为每日所需配送的零部件种类、精确数量及其配送时序处于持续变化之中。通过解构并分析现有的物流作业流程与时间构成，可将总装车间的物料供应过程归纳为三个主要阶段：立体仓库内部的零部件拣选与出库作业阶段、自动导引运输车的调度与等待发车阶段、以及最终向线旁指定装配工位的物料配送阶段。时间数据分析表明，零部件在立体仓库内部完成拣选与调取所需的作业耗时最为显著，其在整体物流时长中占据最大比重，成为制约供线流程响应效率的核心瓶颈。因此，对仓储系统内部作业流程进行优化，特别是压缩零部件从存储货位到出库平台的调取时间，已成为提升总装物流整体效能的核心问题。

作者简介：

高源(2000-)，男，辽宁省锦州市黑山县，硕士研究生，研究方向：现代物流与供应链管理。

赵安(2000-)，男，辽宁省大连市，硕士研究生，研究方向：现代物流与供应链管理。

刘巍巍(1973-)，女，辽宁省怀仁县，教授，博士生导师，研究方向：企业资源优化。

1.2 立体仓库布局与作业特性

1.2.1 仓库物理布局

本文所述自动化立体仓库采用典型的巷道式布局结构，每条巷道两侧对称布设高层货架，并由一台专用堆垛机负责该巷道的存取作业，实行“一巷道一机”的独立管理模式。仓库内所有货位均采用三维坐标进行唯一标识，分别对应巷道、列与层信息。堆垛机可在水平与垂直方向上复合运动，但由于不同方向运行速度存在差异，存取不同位置货位的时间成本显著不同，这为基于时间效率的货位优化提供了直接依据。

1.2.2 仓储作业动态特征

总装车间仓储作业与生产计划紧密相关，呈现全局稳定与局部波动的特征。从全局生产周期的视角来看，为完成一个确定周期内全部A、B车型装配任务所需从仓库调取的所有零部件总量是固定不变的。这为周期性货位静态规划提供了基础。然而，从每日执行层面来看，由于每日具体装配的车型及数量组合处于动态变化之中，导致每日实际需要从仓库调取的具体零部件品类、数量及其需求发生的时间序列持续波动。这种日内波动性对仓储系统的实时感知响应与动态资源调度能力提出刚性要求。

基于上述特征，本研究确立了仓储系统设计的两个核心层面与方向：其一，在全局层面，通过科学的货位规划与分配，旨在最小化完成整个生产周期全部装配任务所需的总零件调取时间，奠定系统高效运行的基础布局；其二，在局部执行层面，通过智能的任务排序与调度策略，致力于缩短应对每日动态变化的装配任务集所需的当日零件调取时间总和，提升系统的实时响应效能。

1.3 线旁物料拉动与堆垛机作业逻辑

1.3.1 物料拉动机制

零部件供应遵循‘拉动式’原则，以上游制定的周度生产计划为根本依据。每种零件通常以标准化包装箱为单位，在装配作业开始前一个工作日集中送达并完成入库，单次到货量精确匹配该零件在当前生产周期内的预估总消耗量。

出库作业则由总装线旁各工位的实时物料消耗情况直接触发。每个工位均设有最低安全库存阈值，当物料消耗至阈值以下时，操作人员通过制造执行系统扫码发起补货请求。仓储管理系统根据货位信息、堆垛机状态与任务队列，实时生成最优拣选指令。零件经堆垛机取出后，通过衔接的自动导引运输车或专用输送线，直接配送至发出请求的线旁工位，实现需求驱动的精准确配。

1.3.2 堆垛机作业模式与系统约束

系统调度中堆垛机主要支持两种基本作业模式以适应不同任务场景：单作业循环模式，即堆垛机单独执行一次入库或

一次出库作业后返回巷道口复位；双作业循环（亦称复合作业）模式，即堆垛机在一次往复行程中连续执行一次入库与一次出库作业，通过任务配对减少空载移动时间提升设备利用率。

为保障系统安全有序运行，调度过程必须遵循一系列核心物理与流程约束：堆垛机严格遵循巷道专属原则，禁止跨巷道作业；堆垛机单次运行仅能承载一个标准货物单元（货箱）；在作业流程层面，入库操作需依据零件到货的紧急程度或预设优先级进行排序，而出库操作则必须严格遵循先进先出规则，并与总装生产线的实际节拍保持同步，确保物料供应的及时性与准确性。

2 系统功能模块设计与实现

2.1 设计目标与核心理念

本设计将“静态规划奠基、动态调度响应、系统闭环协同”理念转化为面向高动态环境的智能仓储系统功能架构，以实现货位优化与动态调度目标。

设计目标聚焦于解决总装车间仓储系统在拣选效率、货位配置与堆垛机调度等方面的核心瓶颈。旨在缩短零部件在仓储环节的调取时间，提升堆垛机等关键设备的综合利用率，并系统性增强对日级生产计划波动的快速响应与适应能力。

系统设计由四大核心模块构成闭环体系如图1：

(1) 订单与任务管理模块是任务处理的起点，接收来自制造执行系统的周度生产计划与实时补货请求，并将宏观订单转换为一系列具体的仓储作业任务。该模块对任务进行结构化处理，包括任务拆分、优先级判定（依据生产节拍、物料紧急程度等），并维护整个任务队列的生命周期状态。该模块还负责协调紧急插单等异常情况的处理逻辑，确保生产需求能够被系统及时响应。

(2) 库存与货位管控模块负责维护仓库实时状态。该模块管理所有存储货位的状态信息（空闲/占用/锁定），并记录每个货位上的物料信息、批次、入库时间。在入库环节，模块依据预设策略（如基于产品关联性、出入库频率的货位优化规则）为物料分配具体储位；在出库环节，严格遵循先进先出等规则进行货位锁定与拣选指导。模块还需处理盘点、移库等内部库存调整作业，确保库存数据的精确性与实时性。

(3) 智能调度与优化模块是系统决策核心，负责将任务需求与实时资源状态转化为可执行的设备指令。该模块基于当前的任务队列、设备实时位置与状态、货位布局等信息，运用算法进行动态调度决策。其核心功能包括：为堆垛机规划最优的存取作业序列（支持单作业与复合作业模式）；在满足巷道专属、单次单载等约束下，实现多台堆垛机间的任务均衡分配；对出入库任务进行智能配对以减少空载行程。该模块的输出是可下发给堆垛机控制器和AGV系统的详细动作指令序列。

(4) 数据监控与报表模块提供可视化与决策支持。该模块通过实时数据看板展示设备运行状态、任务执行进度、库存水平等关键指标。它从历史运行数据中提取模式与洞见，生成如设备综合效率报告、拣选出库耗时分析、库存周转率统计等多维度报表。该模块还集成预警功能，当系统性能偏离预期或库存低于安全阈值时主动提醒，为管理者的持续改进决策提供数据基础。

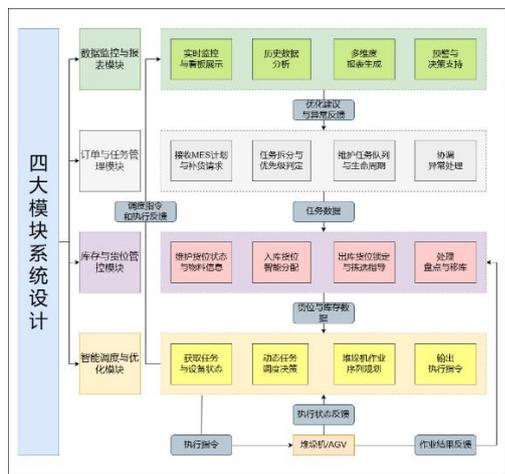


图1 四大模块系统设计图

2.2 系统实现

本系统通过模块协同与数据闭环实现高效运行。各模块间的逻辑关系与数据流转机制如图2。

系统运行始于生产订单的输入，经由任务解析、智能调度决策，最终驱动物理设备执行作业。执行结果与状态数据实时反馈至系统，一方面更新库存与系统状态，另一方面通过监控模块形成管理洞察与决策支持。反馈数据驱动算法持续优化，形成‘感知-决策-执行-优化’闭环，使系统能够动态适应生产波动，并朝着效率提升的方向自主改进。

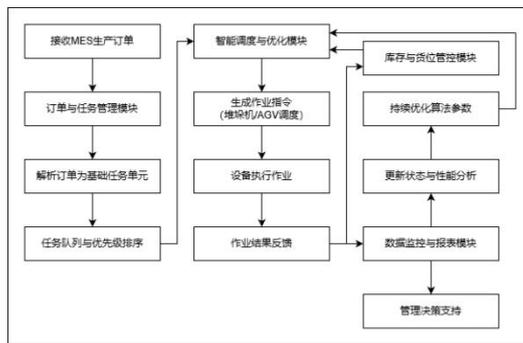


图2 系统整体闭环运行流程图

3 结论

本文针对汽车总装车间仓储系统在个性化定制环境下效率低、配置不合理、响应不足等问题，提出了一种以智能算法为核心的闭环仓储管理框架。该框架围绕货位优化与动态调度两大核心，通过模块化集成订单处理、货位分配、实时调度与全过程监控，实现任务到执行的全面闭环管理，系统提升了仓储作业效率与生产适应能力。未来可融合数字孪生、机器学习等技术，进一步强化系统智能决策与动态优化能力。

参考文献:

[1] Hausman W H,Schwarz L.B,Graves S C.Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems[J].Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems,1976,22(6):629-638.

[2] Heskett J L.Cube-per-order index-a key to warehouse stock location[J].Transportation and Distribution Management,1963,3(1):27-31.

[3] 柳赛男,柯映林,李江雄,等.基于调度策略的自动化仓库系统优化问题研究[J].计算机集成制造系统,2006,(9):1438-1443.

[4] 马永杰,蒋兆远,杨志民.基于遗传算法的自动化仓库的动态货位分配[J].西南交通大学学报,2008,(3):415-421.

[5] Tanaka S,Araki M.An Exact Algorithm for the Input/Output Scheduling Problem in an End-of-Aisle Multi-Shuttle Automated Storage/Retrieval System with Dedicated Storage[J].Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers,2006,42(9):1058-1066.

[6] 罗键,吴长庆,李波,等.基于改进量子微粒群的轨道导引小车系统建模与优化[J].计算机集成制造系统,2011,17(2):321-328.

[7] 杨玮,岳婷,李国栋,等.子母式穿梭车仓储系统复合作业路径优化[J].计算机集成制造系统,2018,24(9):2349-2356.

[8] 吴涛.四向穿梭车系统配置与路径优化[D].长春:吉林大学,2021.