

文章编号: 2097-5899(2026)09-0043-09 中图分类号: U2;TP391 文献标识码: A

DOI: 10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202506260002

引用格式: 李壮, 李建国. 铁路检修备件仓库优化设计研究[J]. 铁路物流, 2026, 44(9): 43-51.

LI Zhuang, LI Jianguo. Optimal Design of Railway Maintenance Spare Parts Warehouse[J]. Railway Logistics, 2026, 44(9): 43-51.

铁路检修备件仓库优化设计研究

李 壮¹, 李建国²

(1. 中铁十六局集团有限公司 铁运工程有限公司, 广东 广州 510000; 2. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 以某铁路检修备件立体仓库为研究对象, 针对其占地面积较大、布局不合理、吞吐效率低等问题, 提出基于穿梭式自动化立体库的改造优化设计方案。在不增加建筑面积的前提下, 从横向巷道数量与布局、I/O口位置优化等方面入手, 对仓库空间利用率与作业效率进行系统提升。通过对原仓库物流瓶颈的识别与结构重构, 配合设备运行路径优化与多设备协同调度策略, 最终将占地面积由1 288 m²压缩至1 200 m², 压缩了6.83%, 在保证吞吐效率不低于95%的前提下, 使存储容量增长至2 992盘, 显著提升了存储密度和空间利用率, 满足铁路运营对检修备件高效管理的需求。研究结果为老旧仓库智能化改造提供了可行路径, 具有良好的推广价值。

关键词: 铁路车辆检修; 备件仓库; 布局优化; 穿梭车系统; 多设备调度

0 引言

铁路车辆检修是确保铁路安全运输的重要环节, 不同车型的车体检修零配件类别繁多, 形状和尺寸也有较大差异^[1]。为了应对这种复杂性, 需要建立大容量的自动化立体库, 实现各类车体检修零配件的集中管理和智能化控制, 不仅可以提高零配件的存储和调配效率, 还可以降低管理成本和人力成本^[2]。

传统仓储模式具有以下不足。①主要依赖人工进行货物的入库、出库、盘点等操作, 不仅效率低下, 而且容易因为人为因素导致错误^[3]。②采用纸质记录方式进行数据管理, 不仅容易丢失、损坏, 而且数据更新不及时, 容易导致信息不准确^[4]。③缺乏现代化的技术应用, 如仓库管理系统、物流管理系统等, 导致仓储管理的信息化、自动化水平低^[5]。④由于信息不透明、不及时, 导致企业各部门之间、企业与供应链上下游企业之间的信息不对称, 影响决策效率和准确性。面对市场的快速变化, 传统仓储管理方式往往反应迟

钝, 难以快速响应客户需求^[6]。

自动化智能仓储系统是一种集成了先进技术与设备旨在实现仓储作业全自动化和智能化管理的系统^[7]。它结合了自动化设备和信息化系统, 通过智能监控和管理, 优化仓储设备和作业流程^[8], 不仅提高了仓储作业的效率, 降低了人力成本, 还提升了服务质量, 为仓储行业的现代化发展注入了新的活力^[9]。通过自动化智能仓储系统, 企业可以更好地应对市场变化, 满足客户需求, 实现持续的创新与发展^[10]。

国内外在智能仓储研究方面已取得广泛成果, Gu等^[11]系统回顾了仓库设计与绩效评估方面的研究, 为后续研究提供了理论框架与方法指导。张雨等^[12]聚焦于堆管类物资的立体存储区间利用, 强调了空间优化在现代仓库中的重要性。张争强^[13]则从智能化装备入手, 探讨了自动导引小车(Automated Guided Vehicle, AGV)和自动化存取系统(Automated Storage and Retrieval System, AS/RS)在提升仓储效率方面的作用。孙秋天等^[14]进一步研究了智能仓库自动配货与出库系统, 通过

收稿日期: 2025-06-26 修订日期: 2026-08-26

通信作者: 李建国(1974—), 男, 甘肃平凉人, 兰州交通大学自动化与电气工程学院副教授。

基金项目: 中铁十六局集团有限公司科技研究开发计划项目(K2022-20C, K2023-21C)

优化配货模型和流程提升作业效率。Sarker等^[15]研究了适用于双穿梭AS/RS系统的基于类别的存储调度方法,为自动化立体仓库的策略设计提供了基础支持。

基于自动化立体仓储理念,提出利用穿梭式立体库系统优化检修备件仓库布局与运行模式。该系统通过引入自动搬运设备、智能调度机制以及布局再设计,有效提升系统运行效率与空间利用率。通过对比不同的设计方案,最终确定了满足设计要求的备件仓库设备布局 and 调度方案。

1 原始仓库系统分析

某铁路检修备件仓库占地约1 288 m²,原检修备件仓库如图1所示,由8列双层货架构成,共640个货位,配备6台叉车,每台造价30万元,系统吞吐能力为40盘/h。随着检修任务日益增加,原系统面临容量不足、作业效率低下的问题。现需对其进行改造,改造目标为:在不超过原有占地面积的前提下,实现存储容量 $\geq 2\,500$ 盘、吞吐效率 ≥ 95 盘/h,总投资控制在1 700万元以内。

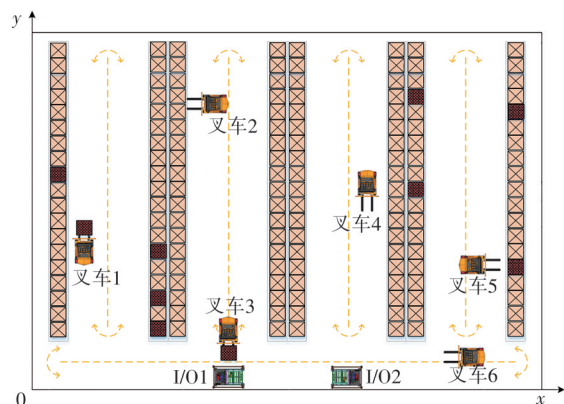


图1 原检修备件仓库

Fig.1 Original maintenance spare parts warehouse

传统仓储系统中货物的入库、出库和盘点等操作主要依赖人工完成,易受人员经验、操作规范等因素影响,存在效率低、差错率高的问题。为解决此类瓶颈,本系统引入穿梭车与提升机等自动化搬运设备,代替人工执行高频、重复性的存取任务,有效降低劳动强度和操作时间;货物入库、出库全过程的记录、管理、信息交互都由仓储系统自动完成。

2 穿梭式立体仓储系统

2.1 系统组成与特征

穿梭式立体库核心组成部分包括穿梭车、穿梭车

货架、提升机等。穿梭车作为该系统的关键设备,是一种专门用于穿梭式立体库的托盘搬运工具。根据不同的自由度要求,穿梭车可以分为两向行走穿梭车和四向行走穿梭车(Four-Way Shuttle, FWS)。

为了充分发挥穿梭车的效能,通常需要搭配使用提升机。FWS经常与固定升降机(Lift)结合使用,以实现对不同层高货物的存储需求。这种组合方式不仅提高了存储效率,还增强了系统的灵活性。穿梭式立体库系统以其高柔性而著称,可以根据实际需求进行灵活组合和配置。与传统的堆垛式立体库相比,穿梭式立体库的平面利用率提高了20%~30%,有效地提高了仓储空间的利用率。

2.2 设备运动模型

FWS的运动过程原理基于梯形速度曲线模型,核心在于判断运动过程中是否达到预设的最大速度。若距离足够长,其运动包含加速、匀速、减速3个阶段(梯形曲线);若距离较短,速度未达到最大速度,则仅有加速与减速2个阶段(三角形曲线)。根据FWS是否运行至最大速度,可将运动模型建立如式(1)所示。

$$t = \begin{cases} \frac{v_{\max}}{a_u} + \frac{D - D_u - D_s}{v_{\max}} + \frac{v_{\max}}{a_s} & D > (D_u + D_s) \\ \sqrt{\frac{2 \times D}{a_u \times \left(1 + \frac{a_u}{a_s}\right)}} \times \left(1 + \frac{a_u}{a_s}\right) & D \leq (D_u + D_s) \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为FWS运行距离, m; $v_{\max}$ 为FWS运行最大速度, m/s; a_u 为加速过程的加速度, m/s²; a_s 为减速过程的加速度, m/s²; D_u 为加速运动的距离, m; D_s 为减速运动的距离, m; t 为总运动时间, s。

考虑FWS为匀加速运行,FWS及Lift运动曲线如图2所示。图2c表示设备运行达到最大速度后匀速运行然后减速运行至停止,图2d则表示设备运行速度未达最大速度的运行情况。其中, t_u 为加速运动的时间, s; t_e 为匀速运动的时间, s; t_s 为减速运动的时间, s。

2.3 路径时间与能耗计算

在考虑能量回收系数、摩擦因子及载重情况下,建立单位路段运行能耗模型,并结合路径换向点数量构建路径总时间与能耗估算函数,为后续调度优化提供输入。路径时间与能耗计算如下。

(1) 路径长度计算。假设FWS起点坐标为 P_{start} ,终点坐标为 P_{end} ,从起点至终点路径用坐标集合 R 表示,如式(2)所示。

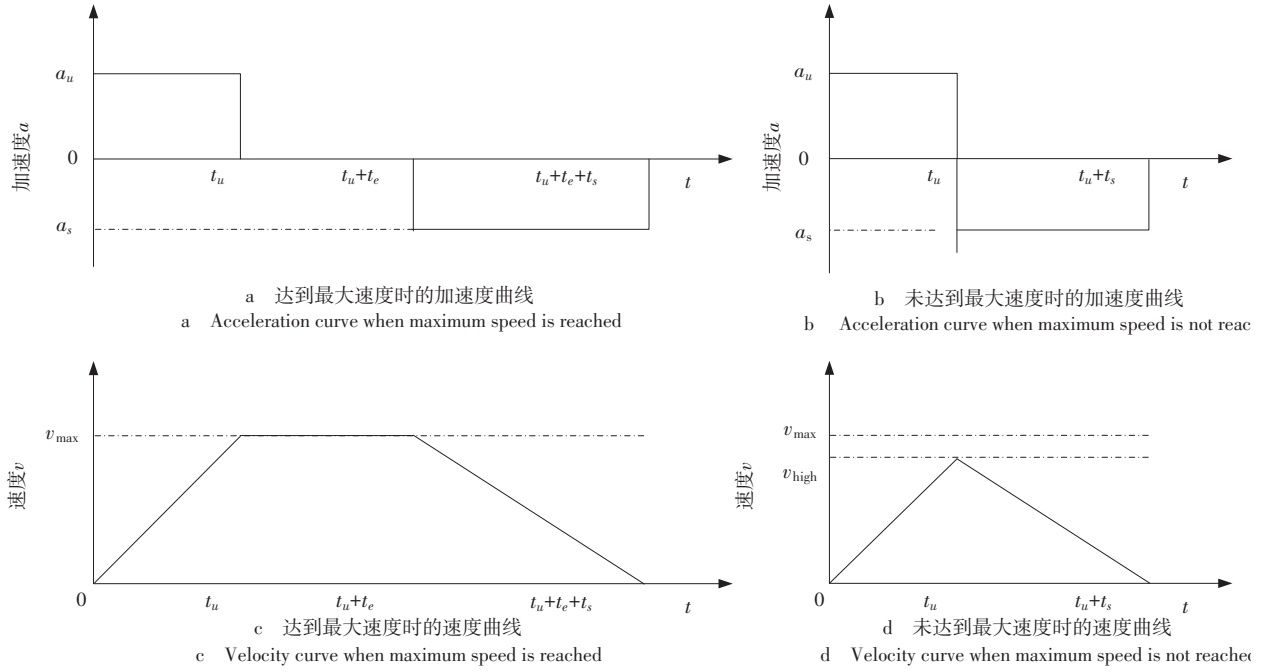


图2 FWS及Lift运动曲线

Fig.2 Motion curve of FWS and Lift

$$R = \begin{cases} \{P_{\text{start}}, P_{\text{end}}\} & m=0 \\ \{P_{\text{start}}, P_1^T, P_2^T, \dots, P_m^T, P_{\text{end}}\} & m>0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, m 为换向点个数, 个; P_1^T, P_2^T, P_m^T 为换向点坐标。为方便计算, 将集合 R 中坐标重新命名得到集合 R' , 如式(3)所示; 对集合 R' 中的坐标点依次进行计算获得每段实际长度, 如式(4)–(6)所示。

$$R' = \begin{cases} \{P'_0, P'_1\} & m=0 \\ \{P'_0, P'_1, P'_2, \dots, P'_m, P'_{m+1}\} & m>0 \end{cases} \quad (3)$$

$$D = \begin{cases} D^0 = |P'_0 - P'_1| & m=0 \\ \sum_{i=0}^{m+1} D^i = \sum_{i=0}^{m+1} |P'_i - P'_{i+1}| & m>0 \end{cases} \quad (4)$$

$$D = \begin{cases} D^0 & m=0 \\ \sum_{i=0}^{m+1} D^i & m>0 \end{cases} \quad (5)$$

$$D = \begin{cases} |x_0 - x_1| \times w + |y_0 - y_1| \times l & m=0 \\ \sum_{i=0}^{m+1} (|x_i - x_{i+1}| \times w + |y_i - y_{i+1}| \times l) & m>0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: w 为货架实际宽度, m ; l 为货架实际长度, m ; D 为 FWS 从起点到终点的运行距离, m ; x_i, y_i 为货架坐标; i 为 FWS 运行经过的货架序号; D^i 为第 i 个货架直线路径的实际长度, m 。

(2) 运行时间计算。由式(6)与式(1)联立计算可得

FWS 从起点至终点路径所消耗的时间, 如式(7)–(8)所示。

$$t^i = \begin{cases} \frac{v_{\text{max}}^F}{a_u} + \frac{D^i - D_u^i - D_s^i}{v_{\text{max}}^F} + \frac{v_{\text{max}}^F}{a_s^F} & D^i > (D_u^i + D_s^i) \\ \sqrt{\frac{2 \times D^i}{a_u^F \times \left(1 + \frac{a_u^F}{a_s^F}\right)}} \times \left(1 + \frac{a_u^F}{a_s^F}\right) & D^i \leq (D_u^i + D_s^i) \end{cases} \quad (7)$$

$$t = \begin{cases} t^0 & m=0 \\ \sum_{i=0}^{m+1} t^i + t^T \times m & m>0 \end{cases} \quad (8)$$

(3) 能耗计算。FWS 能耗由所经各段路程加速运动、匀速运动、减速运动能耗总和构成, 计算过程如式(9)–(16)所示。

$$F_u^i = m_{\text{FWS}} \times (a_u^F + g \times \mu) \quad (9)$$

$$E_u^i = F_u^i \times D_u^i \quad (10)$$

$$F_e^i = m_{\text{FWS}} \times g \times \mu \quad (11)$$

$$E_e^i = F_e^i \times D_e^i \quad (12)$$

$$F_s^i = -m_{\text{FWS}} \times (a_s^F + g \times \mu) \quad (13)$$

$$E_s^i = F_s^i \times D_s^i \times E_{er} \quad (14)$$

$$E^i = E_u^i + E_e^i + E_s^i \quad (15)$$

总能耗为

$$E = \sum_{i=0}^{m+1} E^i \quad (16)$$

式中: F_u^i , F_e^i , F_s^i 分别为 FWS 在第 i 个货架加速阶段、匀速阶段、减速阶段所做的功, J; E_{er} 为制动能量回收系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; μ 为摩擦系数; m_{FWS} 为 FWS 质量, kg; E^i 为分段路程的能耗, J; E_u^i 为分段路程加速运动能耗, J; E_e^i 为分段路程匀速运动能耗, J; E_s^i 为分段路程减速运动能耗, J; E 为路径总能耗, J, 等于各分段路径能耗之和。

3 阻塞死锁分析

集成穿梭式自动化立体存取系统(Integrated Shuttle-Based Automated Storage and Retrieval System, ISB-AS/RS)涉及多台 FWS 及 Lift 在货架系统中同时作业, 且很难避免相互阻塞死锁情况发生, 导致作业效率降低甚至系统停运。多设备调度是对 ISB-AS/RS 系统内穿梭车、提升机等自动化搬运设备进行统一协调与调度控制的过程, 而阻塞死锁分析是进行 ISB-AS/RS 多设备调度的基础之一, 通过阻塞死锁分析的具体情况提出相应的解决方法。

阻塞是 2 台或 2 台以上 FWS 在某个节点或某条路径发生同向冲突, 主要由满载和空载 FWS 速度不一致, 且满载 FWS 在空载 FWS 之前运行造成阻塞。而死锁是 2 台或 2 台以上 FWS 在某个节点或某条路径发生相向冲突, 如仓库内设置巷道为双向运行时, 可能在某个节点或某条路径上发生死锁。有货物要同时进出仓库时, 在 I/O 口会发生死锁; 或有 FWS 发生故障时, 导致所在的节点或路径发生阻塞或死锁。除水平方向多台 FWS 会发生阻塞或死锁问题外, 当多台 FWS 同时请求同一 Lift 也会在垂直方向产生相同问题。

3.1 水平方向阻塞死锁分析

7 种常见水平阻塞死锁情况如图 3 所示, 主要发生在同层 2 台或以上 FWS 在同一时间经过货架内纵、横巷道交叉处时发生。冲突 a 为 2 台 FWS 同时到达路径节点(换向点)时向相背的方向行驶; 冲突 b 为 2 台 FWS 同时到达路径换向节点时向着相同的方向行驶; 冲突 c 为 2 台 FWS 同时到达冲突节点时左侧 FWS 换向与右侧直行的 FWS 相同方向行驶; 冲突 d 为 3 台 FWS 同时到达冲突节点时向着相同路径行驶。

图 3 中, 阻塞为 2 台 FWS 同向行驶且左侧 FWS 速度 v_1 大于右侧 FWS 速度 v_2 时造成左侧 FWS 行驶受阻, 为避免二者碰撞使得左侧 FWS 减速或停止行驶进一步导致阻塞情况发生; 死锁 a 为 2 台 FWS 在同一巷

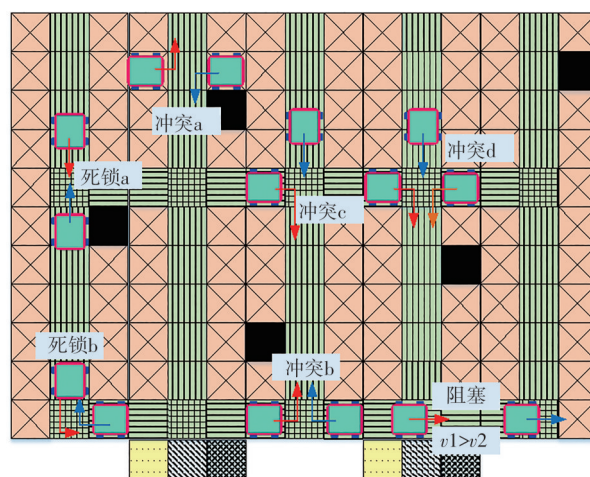


图3 水平阻塞死锁情况

Fig.3 Horizontal blocking deadlock

道相向行驶, 不论二者速度快慢都极易造成调度瘫痪, 且只能通过终止任务重新规划路径解开死锁状态; 与之类似的, 死锁 b 为 2 台 FWS 在同一节点进行相反方向的换向作业, 导致节点死锁。因此要避免死锁情形发生, 当 2 台以上 FWS 所规划的路径出现相向重叠部分, 则需要重新进行路径规划。

3.2 垂直方向阻塞死锁分析

FWS 具有很高的灵活性, 可以进行跨巷道及跨层作业, 当 FWS 进行跨层作业时便会出现垂直层冲突如图 4 所示。图 4a 为同向非同层冲突, 多台不在同一层货架的 FWS 同时请求同一台 Lift 同时上升或下降, 势必会造成不同层 FWS 跨层时的阻塞, 导致 FWS 跨层时间增加进而影响作业效率; 图 4b 为同向同层冲突, 多台在同一层货架的 FWS 同时请求同一台 Lift 同时上升或下降; 图 4c 展示了反向跨层非同层冲突, 多台不在同一层货架的 FWS 同时请求同一台 Lift 同时向相反层跨层作业; 图 4d 为同层 FWS 反向跨层冲突。上述 4 种垂直方向的冲突都可以看做是图 3 中水平节点冲突在垂直方向的变化。

图 4e 为垂直层死锁情形, 左侧 Lift 载 FWS 向第二层货架运行, 且 Lift 上的 FWS 将在 Lift 到达第二层时向第二层巷道红色箭头所示方向行驶, 同时右侧在第二层的 FWS 任务路径如蓝色箭头所示将要搭乘 Lift 从第二层货架向上跨层作业, 由此产生了死锁情况, 与图 3 中水平死锁情形类似。

通过上述分析, 基本概括了水平及垂直方向的阻塞死锁情况, 但实际任务执行过程中可能会发生水平及垂直方向组合的阻塞死锁情形, ISB-AS/RS 多设备调度更为复杂。

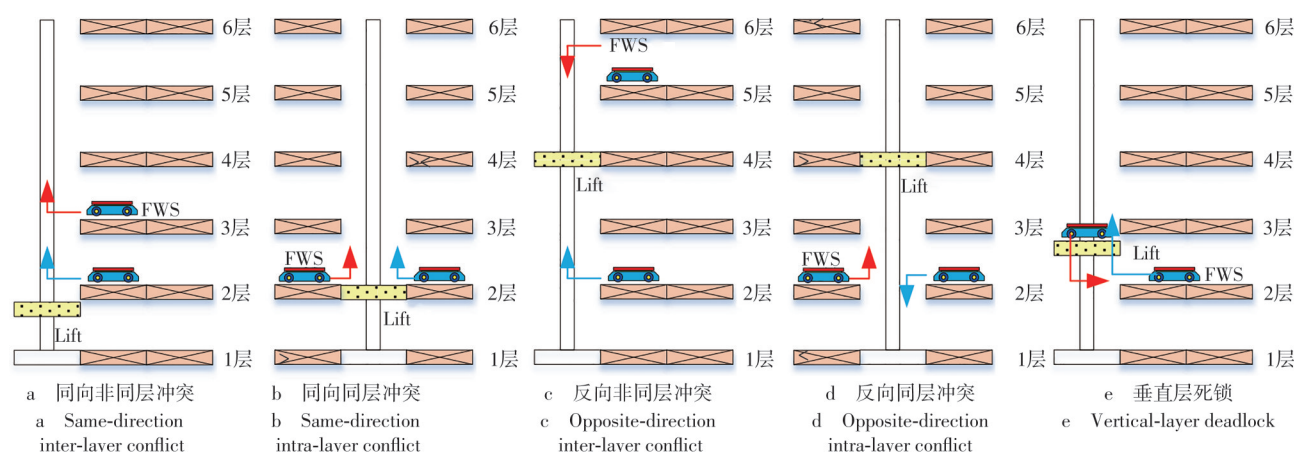


图4 垂直层冲突

Fig.4 Vertical-layer conflict

4 多设备调度策略

4.1 任务优先级划分

进行多设备调度时, 任务优先级划分可以对任务池中同时段的任务进行排序, 通过优先级划分可以在一定程度上降低设备调度复杂性, 为后续设备分配提供一定基础, 其划分依据可以从以下方面考虑。

(1) 任务紧急性。如进行设备故障抢修、紧急出入库任务时相关的穿梭车载货、提升机载穿梭车转运至需要执行紧急任务的货架层时将优先执行。

(2) 作业流程关联度。如穿梭车作为核心设备与货物存/取流程直接相关联, 一般拥有较高的优先级; 提升机载穿梭车至需要执行任务的货架层时优先级也会较高。

(3) 避免阻塞死锁。如穿梭车作业时会将避免多台设备死锁作为最高优先级, 其次考虑避免阻塞情况的发生, 保证巷道、换向节点畅通。

(4) 均衡作业任务量。如货架中某区域货物出入库任务较多, 则对应区域的穿梭车载货、提升机优先级高于其他相对空闲区域的设备。

以作业流程相关度为例, 进行任务优先级划分时考虑到 ISB-AS/RS 货架中货物的入库及出库主要由穿梭车和提升机来完成货物搬运或穿梭车跨层转运, 则有 5 种基本的设备状态: 穿梭车空载、提升机空载、穿梭车载货、提升机载货、提升机载穿梭车, 优先级排序(从高到低)为提升机载穿梭车、穿梭车载货、提升机载货、穿梭车空载、提升机空载。具体分析如下。

①提升机载穿梭车: 穿梭车在货架中的分布直接影响各层的作业效率。若某层缺乏穿梭车, 该层作业将停滞。提升机需优先将穿梭车运至需求层, 确保系统各

区域均衡运作。②穿梭车载货: 对于已载货的穿梭车需尽快完成运输任务从而释放设备资源, 使得设备尽快进入下一运输任务避免货物积压, 保障出入库效率, 因此优先级仅次于提升机载穿梭车。③提升机载货: 提升机运行于货架层间连接的通道, 决定了非 I/O 层货物的运输效率以及穿梭车跨层调运的速度, 对整体作业效率同样关键, 故优先级稍低于穿梭车载货。④穿梭车空载: 当穿梭车空载时为提高设备利用率, 避免设备资源闲置, 应尽快为其分配新任务, 如移动至将要存货或取货的待命区, 因此优先级低于载货任务。⑤提升机空载: 提升机空载时通常处于待命状态, 根据调度系统需求动态响应更高优先级任务(如运输穿梭车或货物)。无紧急任务时, 可保持待命以节省能耗。

实际应用时, 调度系统还需根据实时订单状态、设备故障等情况对优先级进行动态调整。同时, 任务耗时也是不可忽略的因素, 如提升机载穿梭车耗时较长时, 需评估对其他任务的影响, 避免因长时间占用资源导致效率下降, 最后还要保证穿梭车与提升机的协同性避免相互等待时间过长。

4.2 时间窗冲突分析

(1) 引入路径时间窗概念, 通过计算设备在路径关键点的占用时段, 实现多任务并发执行时的时域避让, 减少路径冲突与等待时间。针对阻塞死锁情形可以通过任务优先级规则结合时间窗方法进行处理, 即多台设备同时执行各自任务时, 计算对应设备作业路径下的时间窗, 计算公式如式(17)~(24)所示。

$$L_{R1} = |Start_{P1} - Stop_{P1}| \quad (17)$$

$$L_{R2} = |Start_{P2} - Stop_{P2}| \quad (18)$$

$$L_{R1} = |Start_{P1} - T_{11}| + |T_{11} - T_{12}| + \dots + |T_{1\alpha} - Stop_{P1}| \quad (19)$$

$$L_{R2} = |Start_{P2} - T_{21}| + |T_{21} - T_{22}| + \dots + |T_{2\beta} - Stop_{P2}| \quad (20)$$

$$t_{W1} = t_{W1} + \{t_{WT11} + t_{WT12} + \dots + t_{WT1\alpha}\} \quad (21)$$

$$t_{W2} = t_{W2} + \{t_{WT21} + t_{WT22} + \dots + t_{WT2\beta}\} \quad (22)$$

$$[t_{W1} \sim t_{W1}] = \{t_{W1}, t_{WT11}, t_{WT12}, \dots, t_{WT1\alpha}, t_{W1}\} \quad (23)$$

$$[t_{W2} \sim t_{W2}] = \{t_{W2}, t_{WT21}, t_{WT22}, \dots, t_{WT2\beta}, t_{W2}\} \quad (24)$$

式中: L_{R1} 为 FWS1 从 $Start_{P1}$ 至 $Stop_{P1}$ 的路程, $Start_{P1}$ 为 FWS1 起始位置, $Stop_{P1}$ 为 FWS1 冲突停止位; L_{R2} 为 FWS2 从 $Start_{P2}$ 至 $Stop_{P2}$ 的路程, $Start_{P2}$ 为 FWS2 起始位置, $Stop_{P2}$ 为 FWS2 冲突停止位; $T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1i}, \dots, T_{1\alpha}$ 为 FWS1 路程所经过的换向点坐标, α 为 FWS1 路径中的换向点个数, 个; $T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2i}, \dots, T_{2\beta}$ 为 FWS2 路程所经过的换向点坐标, β 为 FWS2 路径中的换向点个数, 个; t_{W1} 为 FWS1 启动时刻; t_{W1} 为 FWS1 经过路径的总时间, s, $t_{WT11}, t_{WT12}, \dots, t_{WT1i}, \dots, t_{WT1\alpha}$ 为 FWS1 各换向点所用时间, s; t_{W2} 为 FWS2 经过路径的总时间, s, $t_{WT21}, t_{WT22}, \dots, t_{WT2i}, \dots, t_{WT2\beta}$ 为 FWS2 各换向点所用时间, s; $[t_{W1} \sim t_{W1}]$ 为 FWS1 时间窗; $[t_{W2} \sim t_{W2}]$ 为 FWS2 时间窗。

多设备冲突路径与时间窗示意图如图 5 所示, 图中 Col_p 为交叉冲突点。

(2) 计算 FWS 和 Lift 在时间窗条件下设备利用率。

$$F_{util} = (t_{FWS}/T) \times 100\% \quad (25)$$

$$L_{util} = (t_L/T) \times 100\% \quad (26)$$

式中: F_{util} , L_{util} 分别为 FWS, Lift 的设备利用率; t_{FWS} , t_L 分别为 FWS, Lift 的执行任务时长, s; T 为完

成任务的总时间, s。

4.3 调度策略融合改进 A* 路径规划

引入设备换向时间作为启发因子, 提出基于换向时间 A* 路径算法与时间窗融合的多设备调度策略, 以解决 ISB-AS/RS 系统中的多设备调度问题, 调度策略流程如图 6 所示。具体步骤如下。

步骤 1: 接受下发任务。

步骤 2: 任务下发后根据任务优先级规则对其进行任务等级的划分。

步骤 3: 分配空闲且符合作业条件的 FWS 及 Lift 组合。

步骤 4: 对每组匹配的设备利用改进 A* 算法进行路径规划。

步骤 5: 进一步计算每台设备任务执行的时间窗。

步骤 6: 从备选设备组合中选出作业时间最短、能耗最低、换向点最少的一组, 若无匹配结果则返回步骤 3, 再次进行设备分配。

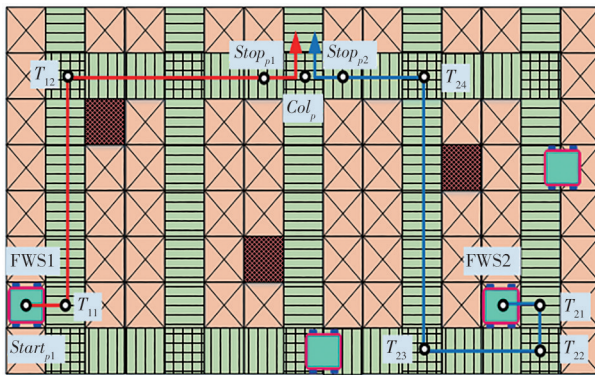
步骤 7: 对性能最优的设备组合结合规划的路径和时间窗分别计算每台设备到达每段路径及途经换向点的时间。

步骤 8: 将计算的路径点时间数据与其他任务进行对比是否存在路径时间重叠或节点冲突的情况, 若存在冲突则将任务等级低的任务返回步骤 2, 重新进行任务分级, 否则按照分配的设备及规划的路径执行任务。

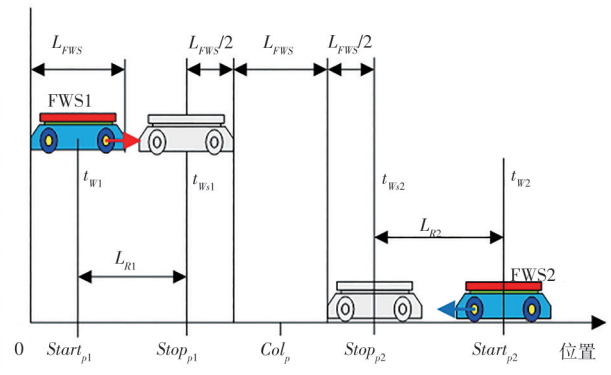
5 仿真验证

以图 1 所示的检修备件仓库升级改造实例进行综合仿真, 对货架布局、设备配置及多设备调度策略进行验证。

为满足日益增多的检修任务, 保证检修零件及时



a 多设备冲突路径示意图
a Multi-device conflict paths



b 多设备冲突时间窗位置关系图
b Positional relationship of multi-device conflict time window

图 5 多设备冲突路径与时间窗示意图

Fig.5 Multi-device conflict paths and time window

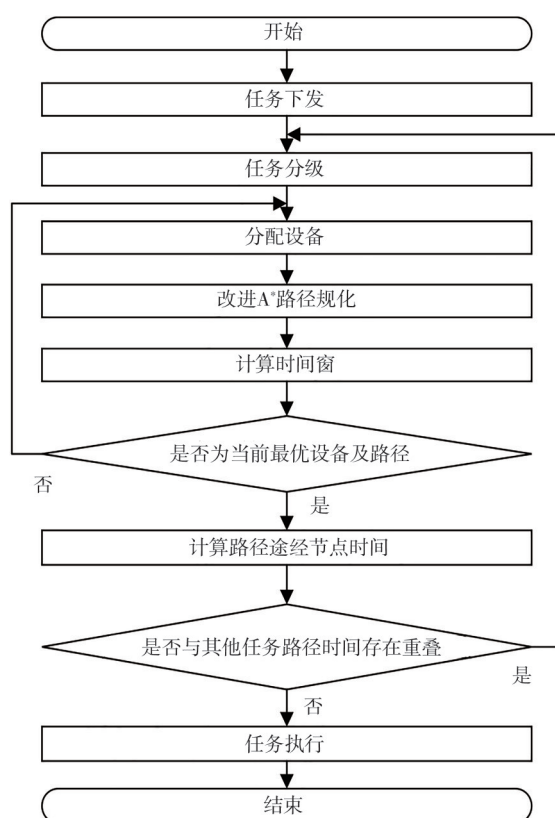


图6 调度策略流程

Fig.6 Scheduling strategy process

准确出入库，改造升级要求在不大于原占地面积的基础上，使得存储容量不低于2 500盘，作业效率不低于95盘/h，且总投资不高于1 700万元。

5.1 仿真参数与方案

根据改造要求，利用改进A*算法、时间窗进行设备调度优化，库内采用FWS与Lift协同将零件托盘存入货架内。在相同占地与约束条件下，设计了3种改造方案，各方案的仿真参数如表1所示。改造方案0为原方案；方案1采用单深度穿梭货架，配备4台FWS和2台Lift；方案2采用双深度穿梭货架，减少巷道数以提升存储容量；方案3在方案2基础上增加1条中间横向巷道，并合理优化I/O口位置。改造方案1如图7所示，改造方案2如图8所示，改造方案3如图9所示。改造方案结构与设备配置如表2所示。其中 l , w , h 分别为货架的长、宽、高； a , v , m , C 分别表示FWS和Lift的加速度、速度、质量和造价；货格与货物基础参数设定为：货格长 $l_{\text{cell}} = 1.2\text{m}$ 、宽 $w_{\text{cell}} = 1.0\text{m}$ 、高 $h_{\text{cell}} = 0.8\text{m}$ ，单个托盘货物质量 $m_{\text{SKU}} = 500\text{kg}$ ，I/O口造价 $C_{\text{IO}} = 1.5$ 万元。

不同方案在调度优化前后的仿真结果对比如表3所示。未优化调度策略时，方案1存储容量为2 440盘，略低于改造需求；方案2存储容量为3 056盘，作业效

表1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

FWS 参数		Lift 参数	
$a_u^F/(\text{m/s}^2)$	0.5	$a_u^L/(\text{m/s}^2)$	0.3
$a_s^F/(\text{m/s}^2)$	0.5	$a_s^L/(\text{m/s}^2)$	0.3
$v_{\max}^F/(\text{m/s})$	1.5	$v_{\max}^L/(\text{m/s})$	1.0
m_{FWS}/kg	300	m_L/kg	300
$C_{\text{FWS}}/\text{万元}$	20.0	$C_L/\text{万元}$	30.0

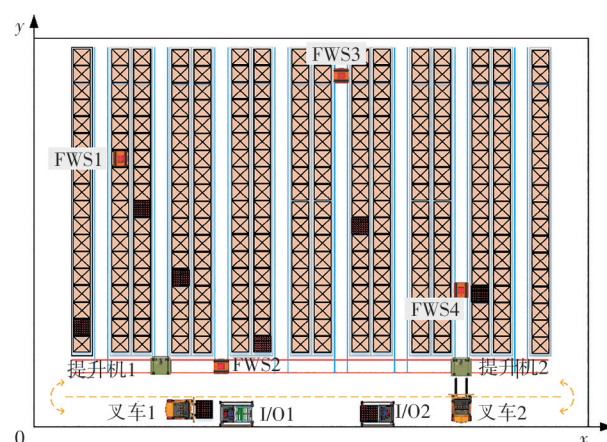


图7 改造方案1

Fig.7 Transformation plan 1

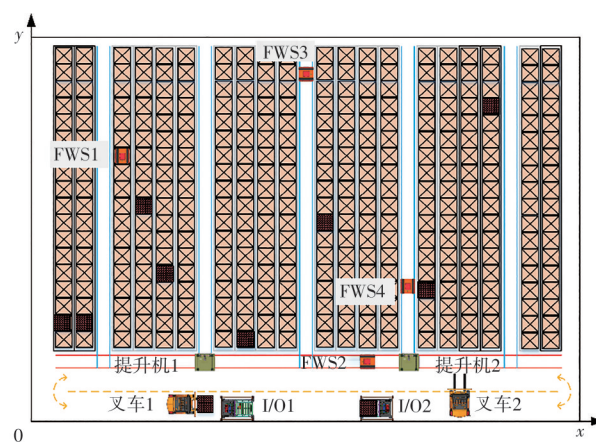


图8 改造方案2

Fig.8 Transformation plan 2

率为90.51盘/h，略低于改造需求；方案3作业效率为105.37盘/h，在满足各项改造需求的同时总投入也较低。当应用与融合改进A*算法与时间窗约束的多设备调度策略时，3种方案作业效率分别为109.20盘/h、96.63盘/h、124.32盘/h，FWS利用率提升了12.25%，9.64%，13.36%，Lift利用率提升了3.30%，2.81%，3.36%，换向次数减少了11.47%，10.87%，6.96%，路径冲突减少了6.02%，4.68%，10.61%。

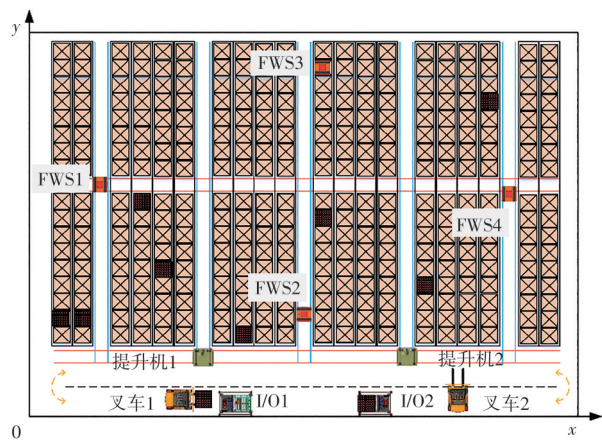


图9 改造方案3

Fig.9 Transformation plan 3

表 2 改造方案结构与设备配置

Tab.2 Structure and equipment configuration of Transformation plans

方案编号	方案0(原方案)	方案1	方案2	方案3
货架排数	8	16	20	20
巷道数	2	4	4	4
FWS/台	0	4	4	4
Lift/台	0	2	2	2
中间横巷道/条	0	0	1	2
货架深度/层	1	1	2	2
叉车/台	6	2	2	2
占地面积/m ²	1 341	1 200	1 250	1 250
存储容量/盘	640	2 440	3 056	2 992
总投入/万元	1 260	1 531	1 689.2	1 676.4

结合仿真结果分析各方案特点：方案1无库内横巷道，FWS在库内作业缺少路径，多台FWS在同一层作业时容易产生阻塞情况；方案2在方案1基础上增加货架深度减少巷道数使得FWS的作业路径进一步减少，多FWS作业时阻塞情况加重导致利用率降低；方案3优化了货架布局、设备配置，在库中心处设置了1条横巷道，且I/O口位置设置合理，为FWS库内作业提供了更多作业路径，使设备阻塞发生的概率降低，更利于路径规划。综上所述，方案3在调度优化前综合投入成本、作业效率、占地面积减少到1 200m²，占地面积压缩了6.83%，调度控制等方面最优，满足项目改造需求，且调度优化后作业效率提升17.98%，满足改造需求且留有足够的设备冗余。通过该案例证明了货架布局、设备配置及多设备调度方案的有效性。

表 3 仿真结果对比

Tab.3 Comparison of simulation results

状态	性能指标	方案0	方案1	方案2	方案3
未调度 优化	作业效率/(盘/h)	40	96.84	90.51	105.37
	FWS利用率/%	—	77.13	75.49	79.27
	Lift利用率/%	—	95.76	95.88	95.62
	换向次数/次	—	6 742	9 078	8 437
	路径冲突次数/次	—	83	171	66
调度 优化后	作业效率/(盘/h)	40	109.20	96.63	124.32
	FWS利用率/%	—	86.58	82.77	89.86
	Lift利用率/%	—	98.92	98.57	98.83
	换向次数/次	—	5 969	8 091	7 850
	路径冲突次数/次	—	78	163	59

6 结束语

围绕穿梭式立体仓库的布局优化与调度机制开展研究，提出融合改进A*算法与时间窗约束的多设备调度策略，解决了传统仓库作业效率低、路径冲突频发等问题。通过对某检修备件仓库优化实例的综合仿真，验证了服务于ISB-AS/RS系统的综合货架布局、设备配置及多设备调度方法的有效性。仿真结果表明，该策略可显著提升设备利用率与吞吐效率，为改造铁路检修备件智能仓储系统提供了有效技术路径。经济性分析表明，改造后每年可节省人力成本约40万元，设备调度准确率可达到95%以上；项目总投资约1 700万元，预计年节约效益为80万~100万元，静态投资回收期约为17~21 a。研究所提出的优化方案主要适用于备件出入库频繁、具有长期运营需求的中大型铁路车辆段或零配件集中管理的维修基地，对于小型作业单位，应结合经济性进一步评估适用性。

参考文献：

[1] 万鑫兴. 基于物流时效性的平面横移调车设备研究与设计[J/OL]. 铁路物流, 1-8[2026-07-09]. <https://doi.org/10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202507080002>.

[2] 姜少坤. 货运转型背景下郑州局集团公司铁路物流中心货运安全管理提升路径探析 [J]. 铁路物流, 2026, 44(6): 72-76.

JIANG Shaokun. Analysis on Improvement Paths of Freight Safety Management in Railway Logistics Centers of China Railway Zhengzhou Group under Background of Freight Transport Transformation[J]. Railway Logistics, 2026, 44(6): 72-76.

- [3] 吴志伟, 滕雪鸥, 陈立明, 等. 面向铁路物流领域的审计数字化探索研究[J]. 铁路物流, 2026, 44(4): 17-24.
WU Zhiwei, TENG Xue'ou, CHEN Liming, et al. Exploration and Research on Audit Digitalization in Railway Logistics Field[J]. Railway Logistics, 2026, 44(4): 17-24.
- [4] 马立华. 铁路车辆检修中自动化立体库的需求与应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(4): 88-90.
MA Lihua. Requirement and Application of Automated Solid Base in Railway Vehicle Inspection and Repair[J]. Automation & Instrumentation, 2017(4): 88-90.
- [5] 沙悦寒, 许绍兴, 刘雪斐. 铁路货场现代物流化发展对策研究[J]. 铁道运输与经济, 2010, 32(5): 71-73.
SHA Yuehan, XU Shaoxing, LIU Xuefei. Research on Countermeasures of Modern Logistics Development by Freight Yards[J]. Railway Transport and Economy, 2010, 32(5): 71-73.
- [6] 张博强, 燕金浩, 吴 兰, 等. 自动化立体仓库在粮食仓储中的应用前景[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(1): 146-152.
ZHANG Boqiang, YAN Jinhao, WU Lan, et al. Automated Three-Dimensional Warehouse in the Field of Grain Storage Application Prospects[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(1): 146-152.
- [7] 姜荣奇. 自动化立体库: 市场稳步扩大, 创新不断增强[J]. 物流技术与应用, 2015, 20(3): 51-53.
- [8] 张云玲, 罗婷婷, 赵瑞雪, 等. 国际开放仓储目录整合研究与实践[J]. 数字图书馆论坛, 2022, 18(1): 26-36.
ZHANG Yunling, LUO Tingting, ZHAO Ruixue, et al. Research on Integration of the International Open Access Repositories[J]. Digital Library Forum, 2022, 18(1): 26-36.
- [9] 祝凌瑶, 周 丽. 现代仓储中心存储布局的优化研究[J]. 工程数学学报, 2022, 39(6): 862-874.
ZHU Lingyao, ZHOU Li. Study on Storage Layout Optimization of Modern Warehouse Center[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2022, 39(6): 862-874.
- [10] 雷 斌, 金彦彤, 王致诚, 等. 仓储物流机器人技术现状与发展[J]. 现代制造工程, 2021(12): 143-153.
LEI Bin, JIN Yantong, WANG Zhicheng, et al. The Technology Statues and Trend of Warehouse Logistics Robot[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(12): 143-153.
- [11] GU J X, GOETSCHALCKX M, MCGINNIS L F. Research on Warehouse Design and Performance Evaluation: A Comprehensive Review[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 203(3): 539-549.
- [12] 张 雨, 贺 芑. 现代仓库堆管类物资立体存储区间利用的研究与应用[J]. 中国物流与采购, 2024(20): 91-92.
- [13] 张争强. 智能化装备在立体仓库中的应用与仓储效率提升研究[J]. 模具制造, 2024, 24(7): 186-188.
ZHANG Zhengqiang. Research on the Application of Intelligent Equipment in Three-Dimensional Warehouses and the Improvement of Storage Efficiency[J]. Die & Mould Manufacture, 2024, 24(7): 186-188.
- [14] 孙秋天, 张笑然, 王玄平, 等. 物流行业智能仓库自动配货出库研究[J]. 起重运输机械, 2024(9): 71-75.
SUN Qiutian, ZHANG Xiaoran, WANG Xuanping, et al. Research on Automatic Distribution of Goods in Intelligent Warehouse of Logistics Industry[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2024(9): 71-75.
- [15] SARKER B R, MANN L J, LEAL DOS SANTOS J R G. Evaluation of a Class-Based Storage Scheduling Technique Applied to Dual-Shuttle Automated Storage and Retrieval Systems[J]. Production Planning & Control, 1994, 5(5): 442-449.

(责任编辑: 吴文娟)

Optimal Design of Railway Maintenance Spare Parts Warehouse

LI Zhuang¹, LI Jianguo²

(1. Railway Transport Engineering Co., Ltd., China Railway 16th Bureau Group Corporation Limited, Guangzhou 510000, Guangdong, China; 2. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: A certain three-dimensional warehouse for railway maintenance spare parts was taken as the research object. In response to challenges such as excessive spatial occupation, irrational layout, and inefficient throughput, an optimal transformation design scheme was proposed based on a shuttle-type automated three-dimensional warehouse. Without expanding the building area, the warehouse space utilization and operational efficiency were systematically enhanced by optimizing the number and layout of horizontal aisles, as well as the position of input/output (I/O) ports. Through the identification and reconfiguration of logistical bottlenecks in the original warehouse, along with the optimization of equipment operation paths and the implementation of multi-device collaborative scheduling strategies, the site area was ultimately reduced from 1 288 m² to 1 200 m², representing a 6.83% decrease. While maintaining a throughput efficiency of no less than 95%, the storage capacity was increased to 2 992 trays, significantly improving storage density and space utilization to meet the demands of efficient management of railway maintenance spare parts. The research findings offer a viable approach for the intelligent transformation of outdated warehouses and possess considerable potential for widespread application.

Keywords: Railway Vehicle Maintenance; Spare Parts Warehouse; Layout Optimization; Shuttle Vehicle System; Multi-Device Scheduling