

多线共站条件下列车运转作业协同优化机制

王志刚

国能新朔铁路大准公司燕庄站区丹洲营车站 内蒙古 乌兰察布 012000

摘要：针对多线共站枢纽列车作业时空耦合、动态扰动及资源冲突频发的运营难题，本文系统剖析作业冲突形成机理，明确优化约束与核心需求。构建多目标协同优化数学模型，依托改进 NSGA-II 算法完成求解，搭建常态化与应急双维度协同优化机制。经轨道交通仿真验证，该机制可有效压缩列车周转时长、降低作业冲突率，平衡运营效率、安全与成本，为枢纽行车组织优化提供可行方案。

关键词：多线共站条件；列车运转作业；协同优化机制

引言：轨道交通线网规模化发展下，多线共站枢纽成为客流与行车作业核心节点。多线路作业交叉耦合、资源竞争激烈，叠加设备故障、客流波动等扰动，易引发作业紊乱、列车晚点及级联延误问题，传统单线独立调度模式难以适配复杂运营场景。为破解多线作业协同壁垒，提升枢纽运营稳定性与作业效率，本文开展列车运转作业协同优化研究，构建科学优化机制，助力线网高效有序运营。

1 多线共站条件下列车运转作业特性及冲突机理分析

1.1 多线共站枢纽运营与作业体系概述

(1) 多线共站枢纽类型划分：按线路交汇形式分十字交叉、并行接入及环线引入；按站台布局分分层立体与同层并列；按运营制式分统一制式与多制式混合。三类维度叠加决定作业组织差异，其中多制式混合因信号、限界不同最为复杂。(2) 列车运转核心作业：涵盖到站停靠、通过越行、终点折返、区间临时停车、车辆检修出入库、清客换乘等全流程。各作业对站台、股道、道岔等资源的占用时长与时机各异，构成冲突的资源基础^[1]。(3) 多线作业协同主体与权责：调度中心负责运行图编制与行车指挥；车站承担接发列车、乘客组织及现场处置；车辆段负责检修与出入段管理；各线路班组执行行车任务。四者通过信息共享与指令传递联动，权责清晰度直接影响协同效率。

1.2 多线共站列车运转作业运行特性

(1) 时空耦合特性：多线路列车到发时刻在车站内高度重叠，站台和股道的占用时序彼此关联，一条线路作业调整将连锁影响其余线路的进路安排，作业窗口相互制约。(2) 动态扰动特性：客流瞬时激增、信号设备故障、列车晚点等扰动源在共站节点被放大，作业偏

差沿线路传导引发全局性延误，具有显著的级联传播效应。(3) 资源约束特性：车站股道数量、站台容量、道岔通过能力、乘务人员配置等均为有限资源，作业需求量超出资源供给能力时形成硬性瓶颈，限制多线作业同步开展。

1.3 多线作业冲突类型与形成机理

(1) 空间资源冲突：多线列车同时申请一股道或站台停靠引发竞争，道岔转换冲突致进路无法同时开放，本质为有限空间资源与密集作业需求之间的供需失衡。(2) 时序作业冲突：列车到发顺序衔接不当、折返作业时间不足、跨线列车通过窗口重叠，造成作业序列紊乱与拥堵积累，本质为作业时序安排违背安全间隔与设备转换时间约束。(3) 调度协同冲突：单线独立调度模式下各线调度员信息获取不对称，跨线运行指令缺乏同步机制，应急预案响应不一致，本质为多主体决策缺乏全局协调与统一信息平台支撑。

1.4 作业协同优化核心需求与约束条件

(1) 核心优化需求：在保障安全前提下最大化作业并行效率，减少冲突引发的列车晚点，压缩站内停留时间，维持线网整体运营均衡性与抗干扰能力。(2) 硬性约束条件：设备安全限界、信号联锁逻辑、线路运行图基准时刻、行车安全间隔、客流承载上限构成不可逾越的边界条件。(3) 软性约束条件：运营维护成本、乘务人员劳动工时、应急处置标准流程等弹性边界可适度调整，在安全底线之上寻求运营效益与服务质量的最优平衡。多目标协同寻优是解决冲突问题的核心逻辑。

2 多线共站条件下列车运转作业协同优化模型构建

2.1 优化模型总体思路与基本假设

(1) 模型构建思路: 以“资源最优配置、时序精准衔接、扰动有效抑制”为核心, 构建多目标协同优化框架。模型将空间资源分配、作业时序编排、扰动应对策略纳入统一优化体系, 通过分层递进方式实现列车作业方案的综合优化, 最终形成可适配不同枢纽类型的通用建模方法论。(2) 模型基本假设: 为降低建模复杂度, 作出如下假设——列车严格按运行图运行且区间运行速度恒定; 各线路列车在共站枢纽内运行规则统一且互认; 车站股道与站台资源状态预先可知且无突发占用; 客流到达与换乘需求在较短时间内保持稳定, 忽略微观随机波动对模型精度的干扰^[2]。(3) 优化目标界定: 确立三大核心目标——作业效率最优 (最小化列车在站平均周转时间与折返作业时长)、冲突率最低 (最小化多线作业空间与时间冲突次数及级联影响范围)、运营成本可控 (在满足效率和冲突约束前提下降低列车启停能耗与人力调车成本), 三目标构成优化模型的顶层评价体系。

2.2 多线作业协同优化变量与约束体系设定

(1) 决策变量设定: 定义列车到发时刻变量 $t_{i,j}^{\text{arr}}, t_{i,j}^{\text{dep}}$ (表示线路 i 第 j 列车到达/发车时刻); 作业时长变量 $\Delta t_{i,j}^{\text{op}}$ (包括停站、折返、通过等作业类型); 股道分配二元变量 $x_{i,j,k} \in \{0, 1\}$ (列车 j 是否占用股道 k); 折返时序变量 $y_{i,j}$ (确定折返列车先后顺序), 共同构成多维决策空间。(2) 约束方程构建: 构建全维度约束体系——空间资源约束 (任一时刻一股道仅能被一列车占用, $\sum_{i,j} x_{i,j,k}(t) \leq 1$); 作业时序约束 (发车时刻不早于到达时刻加最小停站时长, $t^{\text{dep}} \geq t^{\text{arr}} + t^{\text{min-stop}}$); 行车安全约束 (同向列车追踪间隔与进路转换时间满足安全阈值); 运力匹配约束 (实际开行列数不超出客流需求上限与设备通过能力), 形成完备的不等式方程组^[3]。(3) 参数标定: 基于目标枢纽历史运营数据, 采用统计回归与专家经验相结合的方法完成核心参数标定, 包括最小作业间隔、股道转换时间、列车制动/启动附加时长、客流高峰时段弹性系数等。标定结果经灵敏度检验确保其不同运营场景下的稳健性。

2.3 多目标协同优化数学模型建立

(1) 作业效率优化子模型: 以列车周转时间最小化为核心, 同时考虑折返衔接时长最短、站台利用率均衡化。目标函数形式为 $\min \sum_{i,j} (t_{i,j}^{\text{dep}} - t_{i,j}^{\text{arr}}) + \alpha \cdot \sum_{i,j} t_{i,j}^{\text{turn}}$, 其中 α 为权重系数, 实现停站与折返作业的综合效率评估。(2) 冲突规避优化子模型: 以多线作业总冲突次数和级联晚点时长最小化为双重目标。构建冲突惩罚函数, 对空间冲突、时序冲突分别赋予差异化惩罚权重, 形成 $\min \sum_{c \in C} p_c \cdot \delta_c + \beta \cdot \sum_d D_d$ 形

式, 其中 δ_c 为冲突标识, D_d 为扰动传播导致的晚点时长累加。(3) 运营均衡优化子模型: 构建各线路运力分配均衡指数与作业负荷均衡指数, 目标函数 $\min \sum_i (Load_i - Load)^2$ 确保各线路在共站枢纽处的作业压力分布相对均匀, 避免单线路过度拥挤而其他线路资源闲置, 提升整体运营稳定性和服务质量^[4]。

2.4 模型求解算法设计

(1) 算法选型分析: 针对本模型多变量、多约束、多目标的混合整数非线性特征, 对比分析三类主流算法——遗传算法全局搜索能力强但收敛较慢, 粒子群算法收敛速度快但易陷入局部最优, 模拟退火算法对初始解敏感但渐进收敛性好。综合权衡后选用改进型非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 作为主求解框架, 兼顾多目标帕累托最优解的求解需求。(2) 算法优化改进: 针对多线耦合特性进行三项改进——设计双层编码策略 (上层编码线路分配方案、下层编码时序作业方案); 引入自适应交叉变异概率以平衡全局探索与局部开发; 增设精英保留机制与拥挤度距离算子, 确保帕累托前沿解的分布均匀性和多样性。改进后算法在多线耦合场景下求解效率提升约 30%。(3) 求解流程设计: 搭建“数据输入 → 参数初始化 → 种群生成 → 非支配排序与拥挤度计算 → 选择/交叉/变异操作 → 精英保留 → 收敛判断 → 帕累托最优解集输出”的完整求解闭环。在流程中嵌入可行性校验模块, 对违反硬性约束的个体进行定向修复, 保证所有输出方案均满足行车安全与设备操作规范, 最终输出可供调度人员直接参考的优化作业方案集。

3 多线共站条件下列车运转作业协同优化机制与仿真验证

3.1 常态化运营协同优化机制

(1) 多线运行图协同编制机制: 以共站枢纽为耦合节点, 将各线路运行图在站作业时段进行联合编排, 统筹安排不同线路列车的到发时序与折返窗口, 确保接续换乘衔接顺畅的同时, 从源头分散高峰密集到达波, 降低站内瞬时作业负荷。(2) 车站资源动态分配机制: 实时采集列车运行位置与预计到站时刻, 结合站内股道、站台占用状态, 动态生成资源分配方案。对运力紧张时段采用弹性股道共用策略, 对低峰时段实施资源集约管理, 实现资源供给与作业需求的多时间尺度动态匹配。(3) 多岗位联动协同作业机制: 构建“调度—车站—车辆段”三位一体的联控体系, 统一各岗位作业指令格式与信息传递规范。通过联合调度台设置、作业标准互通、指令同步下发等方式, 消除跨岗位信息壁垒, 保障多主体协同响应的及时性与一致性。

3.2 突发扰动场景应急协同优化机制

(1) 扰动快速识别与研判机制: 构建基于实时监测数据的扰动分级识别体系, 对列车晚点时长、设备故障等级、站台区域客流密度等指标进行阈值判别, 结合历史案例库快速匹配扰动类型并推演影响范围, 为应急决策提供精准情报支撑。(2) 动态调度调整机制: 根据扰动等级与波及范围, 分级触发调度调整策略。轻度扰动采用时刻表微调与作业窗口压缩策略, 中度扰动启动列车跳停、交路折返点变更等措施, 重度扰动实施班次动态增减、备用车加开等全网协同调整方案^[5]。(3) 扰动传播阻断机制: 在扰动影响范围内设置缓冲隔离区, 通过延长受影响列车作业间隔、提升相邻列车优先级排序、临时封闭冲突进路等方式, 切断扰动传导路径。同时依托共站节点多线路解耦能力, 将扰动能量限定在局部范围内逐步消解。

3.3 仿真实验方案设计

(1) 仿真平台选取: 选用 Railsys 轨道交通运营仿真系统作为实验平台, 该平台支持路网拓扑建模、列车牵引计算、信号系统仿真及多场景批处理运行, 满足多线共站复杂作业场景的仿真需求。(2) 仿真参数设置: 以某实际两线共站枢纽为蓝本, 录入站场平面几何数据 (含 8 条股道、6 组道岔、4 座站台)、线路技术参数 (最高运行速度、制动距离、折返时间标准)、全日行车计划 (双线合计 180 对列车) 及作业规则 (安全间隔、进路解锁时序), 完成仿真场景搭建与初始状态标定。(3) 对比实验设计: 设置对照组与实验组, 对照组采用各线路独立运行图与固定资源分配规则, 实验组加载本文协同优化机制。在相同基础运行图与客流输入下各执行 30 次仿真推演, 并分别在平峰与高峰时段各引入 3 类典型扰动事件 (5 分钟晚点、信号故障、客流骤增), 全面评估机制适应性。

3.4 仿真结果分析与机制有效性验证

(1) 作业效率指标对比: 实验组列车平均站内周转

时长由对照组的 9.6 分钟压缩至 7.3 分钟, 折返作业衔接等待时间减少约 26%, 高峰时段站线利用率由 71% 提升至 89%, 列车正点发出率较对照组提升约 17 个百分点。(2) 冲突防控指标对比: 实验组各类时空作业冲突总次数由对照组平均每小时的 4.8 次降至 2.1 次, 晚点列车占比由 21.3% 下降至 8.7%。扰动发生后平均恢复时间缩短约 32%, 相邻线路受波及概率由 46% 降至 15%, 表明冲突规避与扰动抑制效果显著。(3) 综合运营效益分析: 实验组在运力供给与需求匹配度上提高约 22%, 站内列车启停次数减少降低了约 9% 的牵引能耗, 各线路作业负荷方差缩小约 41%。综合验证了协同优化机制在多线共站场景下能够有效平衡效率、安全与成本等多维运营目标, 具备实际推广应用价值。

结束语

本文立足多线共站枢纽运营痛点, 完成作业冲突机理分析、优化模型构建、算法改进及机制搭建, 通过仿真实验验证了优化方案的有效性。研究成果有效解决了多线作业资源冲突、时序紊乱、协同不足等问题, 显著提升枢纽作业效率与抗扰动能力。后续可结合复杂极端运营场景完善模型参数, 深化智能调度适配研究, 进一步拓展机制的工程应用价值。

参考文献

- [1] 王萌, 张星臣, 陈军华. 多线共站枢纽列车接发作业协同调度优化 [J]. 铁道学报, 2024, 46(07): 10-18.
- [2] 李洋, 鲁工圆, 徐光明. 城轨多线共站跨线列车运行组织协同优化 [J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(05): 142-153.
- [3] 刘杰, 代明睿. 多线交汇车站列车作业冲突辨识与协同优化策略 [J]. 中国铁道科学, 2025, 46(02): 168-176.
- [4] 张宇, 王凯. 高速铁路多线共站枢纽列车群协同调度优化模型 [J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(09): 56-63.
- [5] 周文韬, 陈思远. 多线共站条件下列车作业时序协同与资源配置优化 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(11): 392-399.