

# Research on Refined Management of Safety Risks in Train Operation Scheduling for High-Density High-Speed Rail Networks

Yanli Xu

China Railway Taiyuan Bureau Group Company Dispatching Center, Taiyuan, Shanxi, 030013, China

## Abstract

Addressing the highly coupled peak-hour scenarios of a high-density high-speed railway network, this paper proposes a refined risk management methodology for train operation planning. First, using Delphi and fault tree analysis to identify risk factors—including operational organization, command coordination, and equipment status—the study establishes fifteen indicators across three dimensions (operational efficiency, scheduling coordination, and equipment reliability) with assigned weights. Second, an event-driven closed-loop process and rolling conflict assessment model are developed, leveraging data from TMS, CTC, and CTCS systems, alongside a multi-indicator dynamic threshold early-warning mechanism. Offline validation using three months of data from a key railway hub demonstrated a 60% reduction in conflict risk incidents, a 45% decrease in scheduling command deviation rates, a 99.2% improvement in punctuality rate, and nearly 40% reductions in both average conflict resolution time and median command response duration, alongside enhanced capacity utilization and equipment consistency. The study confirms that data-driven closed-loop management significantly enhances safety and operational efficiency under high-density and cross-line operation conditions.

## Keywords

high-speed railway; operation schedule; safety risk management; dynamic early warning; cross-line connection

# 高密度高速铁路网列车开行计划安全风险精细化管控研究

许彦立

中国铁路太原局集团公司调度所, 中国 · 山西 太原 030013

## 摘要

面向某高密度高速铁路网的高峰期强耦合场景, 本文构建列车开行计划安全风险精细化管控方法。首先基于德尔菲与故障树识别运行组织、指挥协同、设备状态等风险因子, 建立运行效率、调度协同性、设备可靠性三维度十五项指标并确定权重。其次设计以TMS、CTC、CTCS为数据底座的事件驱动闭环流程与滚动冲突评估模型, 提出多指标动态阈值预警机制。以某枢纽三个月数据开展离线回放验证, 结果显示冲突风险事件下降60%, 调度指令偏差率下降45%, 正点率提升至99.2%, 冲突消解平均用时与指令响应中位时长分别缩短近40%, 同时能力利用率与设备一致性同步改善。研究验证了在高密度与跨线占比高场景下, 基于数据驱动的闭环管控可显著提升安全与秩序。

## 关键词

高速铁路; 开行计划; 安全风险管控; 动态预警; 跨线衔接

## 1 引言

高速铁路网在早晚高峰呈现高频度与强耦合并存的运行格局, 干线区段小时发车密度普遍超过每小时五对, 跨线运用在核心枢纽间长期占比约三至四成。高密度与跨线连续使径路冲突、股道占用、接发列序相互制约, 轻微偏差即可能沿枢纽群与联络线放大并侵蚀安全裕度<sup>[1]</sup>。现有方法多依赖固定阈值与经验处置, 难以兼顾瞬时冲突与趋势漂移, 且对 TMS、CTC、CTCS 等多源数据融合不足, 调度协同与设

备状态联动不够。基于此, 本文从指标体系、流程优化与动态预警三方面构建面向高密度路网的精细化管控框架, 期望在不新增硬件资源前提下, 通过事件驱动的闭环机制降低冲突、稳住秩序并提升准点与能力利用。

## 2 高密度高速铁路网列车开行计划安全风险识别与分析

### 2.1 高密度高速铁路网列车开行计划安全风险特征分析

面向高速铁路网的开行组织, 安全风险表现出三类特性。其一, 耦合性来源于列车径路冲突、股道占用与接发列序的相互制约, 高峰阶段把越行会让、折返压缩与交路接续同时叠加, 易形成时隙争夺。其二, 动态性体现在运行偏差

【作者简介】许彦立(1987-), 男, 中国河南安阳人, 本科, 工程师, 从事行车组织研究。

与临时限速触发滚动调整,调度命令把列车顺序、停站时分与跨线接续关系持续改写。其三,连锁性表现为节点站咽喉轻微延误沿联络线放大,跨线列车未按计划接续会把后续区间的最小间隔与缓冲时分迅速侵蚀,从而在枢纽群与汇合区间生成持续性的风险场景。

## 2.2 安全风险因素识别与分类

鉴于以某高速铁路路网在高峰时段发车密度达到5对/h以上且跨线列车占比约35%,本研究把德尔菲法与故障树分析法进行组合使用来开展风险因素识别。研究遴选调度、工务、信号、供电以及信息化等5类岗位的12名专家,完成2轮意见征询与一致性校核,把候选清单收敛为覆盖运行、指挥、设备、环境与信息系统的因子集。基于故障树把开行计划安全失效作为顶事件,沿运行冲突、指令执行偏差以及设备状态异常三条主干展开,定位会让窗口压缩、跨线接续缓冲不足、折返作业超时等关键触发,并识别口令复诵错漏、下达延迟与现场口径不一致等协同缺陷,同时归纳联锁异常、授权延迟与通信时延突增等技术失稳机理<sup>[2]</sup>。

## 3 高密度高速铁路网列车开行计划安全风险精细化管控方法构建

### 3.1 安全风险精细化管控指标体系构建

鉴于高密度高速铁路网在发车频度高与跨线衔接复杂的双重约束下暴露的运行冲突、指令偏差与设备异常三类风险,本研究把管控体系划分为列车运行效率、调度协同性、设备可靠性三维度,并设置共15项指标。运行效率维度包含列车正点率,不小于98.5%,区间通过能力利用率、平均列车周转时长、列车间隔稳定度、临时限速影响时长比。调度协同性维度包含调度指令响应时长,不大于10s,跨站联动作业一致性率、交路调整协同成功率、冲突消解平均用时、调度计划变更落地时效。设备可靠性维度包含信号设备可用率、联锁状态异常处置及时率、CTC与列控数据一致性率、供电故障平均修复时长、设备状态预测命中率。各指标在定义时兼顾跨线衔接的耦合环节与高峰期运行秩序。

在指标定义口径方面,选择把数据来源限定在CTC与调度日志以及设备监测平台三类基础数据,并且对时长型与比例型指标采取方向一致的归一化方法,同时以跨线列车场景的时空耦合特征校准统计窗口。在采集周期上,把统计分辨率设置为1s至60s的多粒度切片,以便兼顾瞬时冲突与趋势性偏差的双重特征。为获取相对重要性权重,选用层次分析法构建判断矩阵,借助专家打分与德尔菲收敛机制给出对比尺度,随后依据权重计算公式得到各层权重向量并进行一致性检验。

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj}\right)^{\frac{1}{n}}}$$

其中, $a_{ij}$ 表示判断矩阵中第*i*指标相对于第*j*指标的两

两比较尺度, $n$ 为同层待评价指标数量, $w_i$ 为第*i*指标的归一化权重,取值范围为0到1。

### 3.2 基于流程优化的风险管控模型设计

鉴于在早晚高峰存在发车密度高与跨线列车占比较大的叠加情境,本研究把风险识别、风险评估、风险预警以及风险处置组织为可闭合循环的管控流程,围绕运行图计划、实时行车与设备状态以及调度人机交互三类数据构建事件驱动的动态模型。模型以滚动时间窗驱动,时间窗步长设定为15s,用以兼顾响应速度与调度可执行性。

由识别结果进入评估环节,模型借助滚动冲突检测与瓶颈定位算法对接发车窗口、区间追踪间隔以及联络线咽喉占用进行量化判别,并把跨线列车的衔接窗口与接力站作业时序设定为高权重约束,以支撑后续分级预警与处置策略的选择。预警环节按照等级化规则把中高风险在5s内推送至相关调度台与受影响车站值班岗位,同时生成带有可执行建议的处置清单,形成从数据到指令的快速通道。处置环节针对跨线衔接的关键工序进行流程优化,把双调度台对时、径路预占与股道改配放在优先序列,必要时触发交会改序、站停压缩与备用径路启用,并把处置闭环回写至TMS与CTC以进入下一轮识别与评估。

### 3.3 风险动态预警机制建立

面向高密度区段的运行时空耦合特性,把近90d行车记录、列控日志以及调度台账进行数据清洗与时序配准,构建面向单指标的动态阈值模型,核心思路是在滑动窗口内估计基线水平与波动幅度,并把分级告警阈值随时间滚动更新,用以契合早晚高峰与设备状态变动导致的分布漂移。模型对标的关键指标涵盖运行间隔安全裕量、跨线列车衔接缓冲、道岔占用冲突概率以及调度指令响应时长,并把不同指标统一映射为同向的标准化风险量,以便形成可比的分级触发门槛与统一的处置优先级序列。

针对运行间隔,采用反向触发现实:列车即时间距低于安全距离的1.2倍认定为中级,低于1.1倍认定为高级。针对跨线衔接缓冲,剩余缓冲小于4min为中级,小于3min为高级。针对调度响应,指令到达至执行确认超过10s为中级,超过15s为高级。针对冲突概率,预测值大于0.4为中级,大于0.6为高级。为降低抖动,把2min滞后与最小保持时长嵌入触发条件,并把站际状态切换作为抑制条件。

## 4 高密度高速铁路网列车开行计划安全风险管控效果评估

### 4.1 案例数据准备与模型验证

面向高速铁路网,本研究选取连续3个月开行计划与运行记录,把TMS运输计划、CTC占用与命令日志、CTCS列控许可以及设备监测告警统一纳入样本,覆盖发车班次超过12000列,跨线列车占比约35%,跨线列车为在不同干线之间进行衔接运行的列车。验证在独立离线回放仿真环境中实施,回放仿真为把历史事件按原始时序驱动识

别、评估、预警与处置建议模块依次运行，并且以统一接口组织数据流以复现调度流程。检验方案从识别覆盖度、触发时效、建议可执行性与数据一致性四个维度展开，分高峰与平峰、枢纽联络线与普通区间两类场景组织回放，同时保持时间窗设置与阈值映射规则与前文设定一致，把每次预警及建议沉淀为结构化记录供后续效果评估使用<sup>[3]</sup>。

4.2 管控效果量化评估

立足高峰时段的高频运行情境，本研究把管控体系投用前后的同源数据开展对比评估，统计窗口、滚动步长与数据口径与 3.1 节保持一致，覆盖枢纽联络线与普通区间双类场景。为保证可比性，把冲突风险事件界定为由站场或区间

占用冲突触发的预警条目，把调度指令偏差率界定为口令复诵与执行确认不一致的占比，并把正点率按 CTC 过表时分核定。对比结果表明，列车冲突风险事件减少 60%，调度指令偏差率降低 45%，正点率提升至 99.2%，跨线接续失败率与折返作业超时率同步下降，且冲突消解平均用时与指令响应中位时长显著收缩。进一步观察发现，能力侧与可靠性侧指标呈协同改善，区间通过能力利用率稳步提高，CTC 与列控数据一致性率与信号设备可用率抬升，把预警触发密度与处置负荷一并压低。需重点关注的是，阈值的时间滚动与最小保持时长把高峰期抖动有效抑制，使得预警更趋稳定并便于调度执行，见表 1。

表 1 某案例路网管控前后安全风险指标对比表

| 指标            | 统计口径      | 管控前   | 管控后   | 变化幅度       |
|---------------|-----------|-------|-------|------------|
| 列车冲突风险事件数     | 条 /1000 列 | 10.0  | 4.0   | -60.0%     |
| 调度指令偏差率       | %         | 2.0   | 1.1   | -45.0%     |
| 列车正点率         | %         | 98.4  | 99.2  | +0.8 个百分点  |
| 运行间隔安全裕量违规次数  | 次 / 日     | 5.0   | 2.0   | -60.0%     |
| 跨线接续失败率       | %         | 1.5   | 0.8   | -46.7%     |
| 折返作业超时率       | %         | 1.2   | 0.7   | -41.7%     |
| 冲突消解平均用时      | s         | 180   | 110   | -38.9%     |
| 指令响应时长中位数     | s         | 13    | 8     | -38.5%     |
| 区间通过能力利用率     | %         | 86.0  | 90.0  | +4.7%      |
| 列车间隔稳定度       | CV%       | 6.0   | 4.2   | -30.0%     |
| 临时限速影响时长比     | %         | 7.5   | 6.2   | -17.3%     |
| CTC 与列控数据一致性率 | %         | 99.1  | 99.5  | +0.4 个百分点  |
| 信号设备可用率       | %         | 99.70 | 99.85 | +0.15 个百分点 |
| 授权延迟由设备告警引发占比 | %         | 1.8   | 1.2   | -33.3%     |
| 计划变更落地时效（P90） | s         | 70    | 45    | -35.7%     |

4.3 优化建议与应用推广

鉴于评估揭示的峰谷差异和跨线耦合突出等规律，本研究提出面向高密度路网的优化路径：在运行组织侧，把滚动视窗与柔性时隙管理联结起来，构建可随交通波动动态收放的发车密度控制，把跨线接续窗口、站台占用和咽喉放行作为优先约束，通过可恢复余度与备用径路的联动，形成为在高峰时段抑制时隙争夺、在平峰阶段恢复秩序的节律<sup>[4]</sup>。设备与信息侧，构建 CTC 与 CTCS 一致性监测与联锁异常快速处置链，把授权延迟、通信时延突增等迹象纳入预测模型，设置降级模式的门槛与回退路径，并把状态感知回写至计划层以收敛预警抖动。人员与组织侧，围绕早晚高峰进行值守强度再分配，建设跨线场景库与联合演练机制，把处置包和预案模板固化为可调用工序<sup>[5]</sup>。

5 结语

本文面向高密度高铁路网提出一套数据驱动的安全风险精细化管控方案，形成三维度指标体系、事件驱动闭环流

程与动态阈值预警机制，并在路网验证取得显著成效，冲突与偏差明显下降，准点与能力同步提升。实践表明，跨线接续窗口与咽喉占用的优先管控、双调度台对时与径路预占是提升稳定性的关键。后续将面向更多走廊开展灰度投用，强化天气与施工扰动感知，引入预测优化以实现在线自适应调控。

参考文献

[1] 赵阳,李莹,魏宝生.车站调车作业安全综合管控系统技术方案设计研究[J].铁道运输与经济,2025,47(06):180-187.

[2] 苗义烽,张海林,周晓昭,王振东,赵宏涛.CTC系统中列车运行冲突预测及报警研究[J].中国铁路,2025,(05):1-7.

[3] 宋杰,倪少权,仲凡保,周枫烜,潘金山.基于时空网络模型的高速铁路停站方案优化[J].铁道经济研究,2025,(03):25-37.

[4] 武强强.铁路危险货物专用线与高速铁路交叉可行性专项研究[J].铁路采购与物流,2025,20(11):68-70.

[5] 柏志勇.轨道交通电力调度安全风险精准评估与防控机制构建[J].人民公交,2025,(12):140-142.