

基于大数据分析的地铁车辆故障应急处置预案动态调整机制

王前赛

重庆轨道交通运营有限公司, 重庆 400000

[摘要] 地铁是缓解城市交通压力的核心枢纽, 其稳定安全运行会对市民的安全出行、城市交通秩序等产生直接影响。地铁车辆故障的发生存在突发性和影响广泛性的特征, 传统的静态应急处置预案无法及时响应与针对地铁车辆故障提供有效处置, 难以满足地铁运营的应急管理需求。地铁车辆故障应急管理中大数据技术的应用, 可以实时采集与深度分析故障数据, 并能实现决策的智能化。文章在大数据分析的维度下, 对地铁车辆故障应急处置预案的动态调整机制进行系统分析, 并构建起全流程闭环体系, 提升地铁车辆故障应急处置的科学性、高效性和精准性, 确保地铁智能运维与应急管理体系的有效性。

[关键词] 大数据分析; 地铁车辆故障; 故障应急处置预案; 动态调整机制

DOI: 10.33142/sca.v9i4.19565

中图分类号: U23

文献标识码: A

Dynamic Adjustment Mechanism of Emergency Response Plan for Subway Vehicle Faults Based on Big Data Analysis

WANG Qiansai

Chongqing Rail Transit Operation Co., Ltd., Chongqing, 400000, China

Abstract: The subway is the core hub for alleviating urban traffic pressure, and its stable and safe operation will have a direct impact on the safety of citizens' travel and urban traffic order. The occurrence of subway vehicle failures is characterized by suddenness and widespread impact. Traditional static emergency response plans cannot respond in a timely manner and provide effective solutions for subway vehicle failures, making it difficult to meet the emergency management needs of subway operations. The application of big data technology in emergency management of subway vehicle faults can collect and analyze fault data in real time, and achieve intelligent decision-making. The article systematically analyzes the dynamic adjustment mechanism of emergency response plans for subway vehicle failures from the perspective of big data analysis, and constructs a closed-loop system throughout the entire process to enhance the scientificity, efficiency, and accuracy of emergency response for subway vehicle failures, ensuring the effectiveness of the intelligent operation and emergency management system for subway vehicles.

Keywords: big data analysis; subway vehicle malfunction; emergency response plan for faults; dynamic adjustment mechanism

在城市地铁网络规模不断扩张, 以及运营年限的延长下, 地铁车辆面临的环境愈加复杂, 车辆故障频发, 对交通秩序造成极大影响。预先制定的静态预案是当前地铁车辆故障应急处置的主要方法, 但是在实际应用中存在预案针对性不足、响应滞后性突出以及缺乏动态迭代机制的问题, 无法保障地铁车辆故障应急处置的有效性。在大数据技术的应用下, 可以实现数据驱动优化应急预案策略, 提升地铁车辆故障应急处置效率。

1 地铁车辆故障应急处置存在的问题

1.1 传统预案静态化, 适配性不足

静态预案是多数地铁车辆故障应急处置预案的主要方式, 缺乏场景化动态适配能力是其核心局限, 无法对复

杂多变的故障情境进行有效应对。历史故障经验是静态预案编制的基础, 处置流程采取一刀切的方式, 无法对故障发生时段、影响范围等各项因素进行充分考虑。同一类型的牵引系统故障, 在早高峰、平峰时段客流疏导压力、处置优先级等存在差异, 而静态预案采取的疏散流程和资源配置标准难以适配高峰时段的具体情况, 容易加大乘客滞留风险; 部分线路预案存在“照抄照搬”问题, 未能从地铁线路的实际情况出发, 导致预案可操作性大打折扣。

1.2 数据利用率低, 缺乏数据驱动支撑

海量多源异构数据在地铁车辆运行过程中产生, 日均产生监测数据超 10TB, 但是地铁公司对数据的挖掘与应用能力较低, 难以充分释放数据价值, 人工经验依然是应

急决策的主要方式。数据孤岛问题，在各个独立平台上分散车辆、信号、供电等不同的数据信息，无法在统一的平台上融合数据，难以开展关联分析，无法精准预判故障对客流的影响^[1]；缺乏专业的大数据分析模型和工具，地铁公司的数据分析以基础统计为主，无法利用算法对故障演化规律、预判处置效果进行挖掘，更无法有效应用机器学习算法，通过故障预测模型进行数据的深度分析，识别出早期故障。

1.3 应急响应滞后，预警机制不完善

“故障发生后响应”是传统应急处置模式的核心，事前预警与快速响应流程缺乏，造成应急响应周期较长^[2]。在发生故障后需经历多个环节，每个环节的响应时间为25min，超过了10min的故障处置黄金时间。预警机制不够完善，显性故障依靠人工巡检，难以在数据监测下进行早期预警，比如设备失效后才会发现信号系统故障，无法通过电流、电压异常波动的及早识别进行提前预警。

1.4 预案更新机制不健全，缺乏持续迭代

事后总结是预案更新的主要方式，并未建立起常态化的迭代优化机制，预案内容无法与实际处置需求相一致。地铁运营公司在更新预案时，更新周期为1~2年，重大故障事件后总结是更新触发条件，在更新依据中并未纳入实时故障数据、设备健康状态等因素。部分预案更新的形式化现象较为严重，局限于简单修改文字表述，未能与最新处置经验和技术应用成果优化流程相结合在一起。

1.5 多部门协同不畅，信息共享不足

在地铁车辆故障应急处置过程中，会涉及多个部门与主体，但是不同主体之间的协同机制尚未完善，难以及时共享信息，造成处置流程衔接不畅。人工沟通是公司内部信息传递的主要依据，尚未形成统一的信息共享平台，造成调度决策的滞后^[3]。在外部层面，地铁公司与各部门之间的协同缺乏标准化，无法保持信息传递的及时性，在发生故障后，地铁部门与公交部门的接驳信息传递平均耗时20min，导致接驳车辆调度不及时，加剧乘客滞留。

2 基于大数据分析的地铁车辆故障应急处置预案动态调整机制构建

2.1 数据采集层：多源数据融合采集

应急处置预案动态调整机制运行的基础支撑是数据采集层，是实现多源异构数据的全面采集、清洗与融合是核心目标，能为后续的分析与评估提供高质量的数据。地铁车辆运行全流程是数据采集的范围，采集的数据类型为实时运行数据、历史故障数据、环境数据与客流数据，各

数据类型的具体要求如表1所示。

表1 各数据类型的要求

数据类型	核心采集指标	采集频率	数据质量要求
实时运行数据	牵引电机电流/电压/温度、制动系统压力、状态等	1次/s(关键参数)、1次/min(普通参数)	≥99%
历史故障数据	故障类型、发生时间/地点、处置流程、修复时长等	事件触发式(故障发生后即时录入)	≥99.5%
环境数据	线路沿线温度、湿度、雷电情况等	1次/5min(常规)、1次/分钟(恶劣天气)	≥98.5%
客流数据	各车站进站量/出站量、站台滞留人数、高峰时段分布等	1次/2min(常规)、1次/30s(高峰时段)	≥99%

实时运行数据来源于车辆关键部件传感器、车载监测终端等设备，可以对故障进行早期识别，评估设备健康状况，并能为实时预警提供支持；历史故障数据来源于故障上报系统、运维管理平台等，要挖掘故障规律，训练预测模型，为预案的优化提供依据；环境数据来源于沿线气象监测站、轨旁环境传感器，要能对环境与故障的关联性进行分析，对环境诱发故障的风险进行预判；客流数据来源于车站闸机系统、站台摄像头等，要能为制定客流疏导方案、调配公交接驳运力等提供参考。数据采集层采用三级架构，即感知终端+边缘计算+云端存储，架构运行效率核心指标及计算如下：

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (1)$$

上式中： T 、 T_1 、 T_2 、 T_3 分别为整体传输延迟、感知终端数据采集延迟、边缘计算预处理延迟、云端传输延迟。

数据清洗准确率计算公式：

$$P = (\text{清洗后有效数据量} / \text{清洗前元素数量}) \cdot 100\% \quad (2)$$

要求核心数据清洗准确率、普通数据准确率分别≥99%、≥98%。

架构在运行过程中，遵循的流程表现为：前端数据实时采集→初步清洗(过滤冗余数据、修正异常数据)→预处理(格式转换、数据脱敏)→数据传输→集中存储数据。

2.2 分析评估层：数据驱动的智能分析

机制运行的核心中枢是分析评估层，融合数据的深度挖掘要通过大数据分析技术挖掘，并能预测预警故障，分析状态演化，评估预案的适配性，为动态调整预案提供支持。

(1) 故障预测与预警分析。以历史故障数据和实时运行数据为基础，在对故障预测时要构建故障预测模型，并能利用好LSTM、SVM等机器学习算法，模型核心性能指标如表2所示：

表 2 模型核心性能指标

预测模型类型	核心算法	预测准确率	预警提前量	误报率
牵引系统故障预测模型	LSTM(长短期记忆网络)	≥88%	15~30d	≤5%
信号系统故障预测模型	SVM(支持向量机)	≥85%	7~15d	≤6%
制动系统故障预测模型	CNN(卷积神经网络)	≥86%	10~20d	≤4.5%

采用多维度加权评分法确定设备健康指数 (HI), 计算公式如下:

$$HI = \sum_{i=1}^n \omega_i s_i \quad (3)$$

上式中: ω_i 、 s_i 、 n 分别为第 i 项监测指标权重、第 i 项指标标准化得分、监测指标数量。

预警触发标准: 预警阈值为 $HI < 60$, 预警信号由系统自动发出, 预警按照严重程度可以划分为 HI 为 $50 \sim 60$, 一般预警; HI 为 $40 \sim 50$, 较大预警; $HI < 40$, 重大预警, 可以对故障发生概率和时间进行预判。

(2) 故障状态与演化分析。在发生故障后, 要对多源数据进行系统整合, 故障核心信息可以通过关联分析、聚类分析等技术进行精准识别, 并能对演化趋势进行预判^[4]。故障基本信息识别中, 核心指标是故障类型、发生部位等, 可以将严重程度量化为 I 级 (一般)、II 级 (较大)、III 级 (重大)、IV 级 (特别重大), 最终输出故障核心信息报告; 影响范围评估中, 涉及车站数量、客流规模等是核心指标, 局部影响是影响车站数 ≤ 2 座, 区域影响是 $3 \sim 5$ 座, 全网影响是 ≥ 6 座, 影响范围量化评估表是最终输出结果; 演化趋势预判中, 连锁故障概率、影响范围扩大速率是核心指标, 高风险是连锁故障概率 $\geq 30\%$, 中风险是连锁故障概率为 $10\% \sim 30\%$, 低风险是连锁故障概率 $< 10\%$, 演化趋势预判曲线及应对建议是最终输出结果^[5]。

(3) 预案适配性评估。以故障状态分析结果为基础, 对适配性评估指标体系进行多维度构建, 指标权重的构建要以层次分析法 (AHP) 为基础, 适配程度通过模糊综合评价法量化评估。处置措施针对性、响应速度、资源匹配度及多部门协同效率的权重分别为 30% 、 25% 、 25% 、 20% ; 并通过二级指标及权重的确定, 可以确定适配性分为高、中等、低三个层次。针对适配度不合格的预案, 精准识别优化方向, 形成预案调整建议清单, 为后续优化工作提供明确指引。

2.3 预案优化层: 动态调整与优化生成

预案优化层是分析评估结果, 并与故障场景特征结合在一起, 动态调整优化现有应急预案, 可以形成场景化、个性化的处置预案。预案内容优化的核心内容为渐进性故

障、突发故障、更新处置标准, 提升部件健康监测频次, 缩短突发故障排查时间, 处置标准适配度 $\geq 95\%$; 应急流程调整的内容为高峰时段、高风险故障、优化关键环节, 要求缩短流程审批时间, 跨部门协同响应时间 $\leq 10\text{min}$, 缩短关键环节处置时间; 资源配置优化的内容为人力、物资、运力, 抢修人力匹配度 $\geq 90\%$, 物资调度到位时间 $\leq 15\text{min}$, 接驳运力缺口 $\leq 10\%$ ^[6]。

预案在优化之后, 预案可以推送给应急处置各参与主体, 对各部门的职责及处置流程等进行明确, 保证应急处置工作的有序开展。

2.4 落地执行层: 高效执行与实时监控

机制落地的关键环节是落地执行层, 优化后的预案快速落地执行是其核心目标, 对处置过程的动态监控进行实时监控, 确保各项工作的高效开展。应急响应启动的具体内容是推送预案及指令, 响应启动时长是实时监控指标, 指标阈值为 $\leq 5\text{min}$; 执行过程监控的具体内容是跟踪抢修进度、疏散人数、接驳到位情况等, 抢修进度完成率、疏散人数增长率、接驳车辆到位率等是实时监控指标, 要求抢修进度完成率每 $30\text{min} \geq 30\%$, 疏散人数增长率高峰时段 ≤ 150 人/ min , 接驳车辆到位率 $\geq 90\%$, 资源利用率 $\geq 85\%$; 动态微调的具体内容是根据故障演化、执行反馈, 微调预案。

在完成故障处置后, 从处置过程数据、损失数据等全流程数据的采集分析, 构建起多维度量化评估体系, 对预案适配性、处置措施有效性等进行系统分析, 并能将标准化处置评估报告形成。建立“数据采集-清洗-标准化-入库”全流程规范, 按统一标准整理故障处置过程中的数据, 形成标准化数据条目后更新至云端大数据平台。建立“评估结果-优化措施-参数调整”的关联机制, 精准优化应急预案和机制。

3 案例分析

以某市地铁 5 号线为例, 5 号线全长、车站、日均客运量分别为 27.6km 、23 座、100 万人次, 在日常运营中存在运营年限较长、车辆设备老化的问题, 造成故障频发, 传统静态预案已难以满足应急处置需求。通过大数据技术的引入, 对预案动态调整机制的可行性和有效性进行分析。对 5 号线列车牵引系统的数据, 使用大数据平台进行采集, 主要有电流、电压等, 也要对客流数据、环境数据进行采集; 基于 LSTM 算法构建故障预测模型, 对牵引系统运行数据进行分析, 发现某列车牵引电机电流波动异常, 健康指数低于预设阈值, 预警信号由系统自动发出, 并提示牵引电机可能发生故障。从评估结果出发, 对预案进行优

化,动态调整现有预案。较大等级应急响应由应急指挥中心启动,处置工作要按照优化后的预案开展。在完成故障处置后,列车恢复正常运营,在大数据平台上更新故障数据、处置数据和评估数据,对历史数据库进行丰富。

4 结论

综上所述,针对当前地铁车辆故障应急处置中传统静态预案存在的不足,指出传统静态应急处置预案已难以适配地铁网络规模扩张,本文构建的全流程闭环动态调整机制,具备较强的可行性与实用性。地铁车辆故障应急处置中的响应滞后、资源配置不合理等问题,可以在本文提出的动态调整机制下解决。未来在大数据等技术的快速发展下,需进一步深化多源异构数据的融合应用研究,对故障预测模型与量化评估指标体系进行优化,为城市轨道交通的安全稳定运行提供更坚实的保障。

[参考文献]

[1]陈鹏,张杨.基于大数据分析的地铁故障预测与预防研

究[J].电脑校园,2025(8):1-3.

[2]居鹏飞.基于大数据的地铁折返道岔故障行车组织方案研究[J].数码设计(电子版),2024(3):0185-0187.

[3]李露,刘彬,辛建芳.基于大数据分析的城轨信号智能运维系统设计与应用[J].信息与电脑,2024,36(16):118-121.

[4]赵义龙.基于监测数据分析的轨道交通桥梁运营安全状况评估[D].北京:北京建筑大学,2021.

[5]汪丽,胡玲玲,田筱齐.基于大数据的地铁站域活力多维评价及时空特征——以西安市为例[J].地理科学进展,2023,42(6):1112-1123.

[6]周纪武,张琨,王锋,等.智能运维系统对道岔全生命周期分析与管理的在大连地铁 1 号线的应用[J].交通科技与管理,2022(2):6-8.

作者简介:王前赛(1986—),男,毕业于重庆科技大学人力资源管理专业,工程师,现就职于重庆轨道交通运营有限公司,研究方向为车间技术管理。