

大数据技术在FAO线路信号设备故障预警中的应用

秦海鸣¹ 刘耀宇²

1. 徐州轨道交通运营有限公司, 中国·江苏 徐州 221000

2. 徐州地铁运营有限公司, 中国·江苏 徐州 221000

摘要: FAO 线路对信号设备可靠性、连续性和可维护性提出了更高要求。传统以计划检修和故障后处置为主的维护方式, 难以及时发现设备状态劣化趋势, 也难以满足全自动运行条件下快速判断、精准处置和持续优化的需要。大数据技术能够汇集信号、车辆、通信、供电、综合监控和维修管理等多源数据, 通过状态监测、趋势分析、关联判断和分级预警, 推动信号设备维护由被动抢修向主动防控转变。文章围绕 FAO 线路信号设备运行特点, 分析故障预警的数据基础、应用路径和管理机制, 并结合某市轨道交通线路实践进行探讨, 以期信号设备安全运行和运维体系优化提供参考。

关键词: 大数据技术; FAO 线路; 信号设备; 故障预警

Application of big data technology in fault early warning of FAO line signal equipment

Qin Haiming¹, Liu Yaoyu²

1. Xuzhou Rail Transit Operation Co., Ltd, China Jiangsu Xuzhou 221000

2. Xuzhou Metro Operation Co., Ltd, China Jiangsu Xuzhou 221000

Abstract: FAO lines put forward higher requirements for the reliability, continuity and maintainability of signal equipment. The traditional maintenance mode, which focuses on planned maintenance and post failure disposal, is difficult to detect the deterioration trend of equipment status in time, and to meet the needs of rapid judgment, accurate disposal and continuous optimization under fully automatic operation conditions. Big data technology can collect multi-source data such as signals, vehicles, communications, power supply, integrated monitoring and maintenance management, and promote the transformation of signal equipment maintenance from passive repair to active prevention and control through condition monitoring, trend analysis, correlation judgment and hierarchical early warning. Based on the operation characteristics of FAO line signal equipment, this paper analyzes the data basis, application path and management mechanism of fault early warning, and discusses it combined with the practice of a city's rail transit line, in order to provide reference for the safe operation of signal equipment and the optimization of operation and maintenance system.

Keywords: Big data technology; FAO line; Signal equipment; Fault warning

0 引言

随着城市轨道交通逐步向全自动运行方向发展, FAO 线路已成为提升运输效率、运营安全和服务水平的重要技术形态。与常规线路相比, FAO 线路弱化了司机现场判断和人工干预作用, 更依赖信号系统、车辆系统、通信系统、站台门系统和综合监控系统之间的协同工作。信号设备作为列车运行控制的核心, 直接关系到列车定位、移动授权、进路控制、车地通信、站台门联动和运营调度执行。一旦关键设备出现异常, 不仅会影响单个设备功能, 还可能引发列车降级运行、运行间隔扩大、站台作业受阻和客流组织压力增加。传统维护模式主要依靠周期检修、故障报修和人工经验判断, 对隐蔽性、渐进性和关联性故障识别不

足。部分设备在故障发生前会出现电流波动、通信延迟、动作时间变化、状态切换异常、报警频次增加等征兆, 如果不能及时捕捉, 就容易错过最佳干预时机。大数据技术的价值在于把分散在不同系统、不同专业和不同时间段的数据组织起来, 形成可追溯、可分析和可预警的设备状态信息链。通过数据采集、清洗、融合、建模和应用, 可以提高信号设备故障预警的准确性, 使运维人员在故障扩大前采取检修、调整、复核和备件准备等措施, 从而降低运营风险。

1 FAO 线路信号设备故障预警的应用基础

FAO 线路信号设备故障预警的基础, 是对设备运行过程形成连续认识。信号系统包含列车自动监督、列车自

动防护、列车自动运行、区域控制器、计算机联锁、计轴或轨道区段检测、应答器、转辙机、信号电源、数据通信网络和车载控制设备等多个组成部分,各设备之间联系紧密,故障表现也具有较强的链条性。某一通信链路质量下降,可能表现为车地信息传输延迟;某一道岔转换阻力增大,可能先体现为动作电流和转换时间异常;某一电源模块性能衰退,可能先表现为电压稳定性下降或切换记录增多。因此,故障预警不能只盯住单个报警点,而应将设备状态、运行环境、操作记录、检修履历和历史故障放在同一业务链中分析。大数据技术进入信号运维后,并不是简单增加数据量,而是让数据服务于风险识别。其应用基础包括稳定的数据采集通道、统一的数据标准、清晰的设备编码、可靠的时间同步、规范的故障分类和可执行的预警流程。只有这些基础工作扎实,后续趋势分析、状态评价和预警推送才有意义。对于 FAO 线路而言,设备故障预警还应突出运营场景意识。预警结果不能停留在技术指标层面,而要转化为对行车组织、列车运行间隔、车站作业和应急处置的影响判断,使维修人员和调度人员能够同时理解设备风险与运营风险。

2 大数据技术在信号设备故障预警中的关键环节

2.1 多源数据采集与标准化治理

故障预警首先依赖数据来源的完整性和可信度。FAO 线路信号设备运行数据分布在信号维护监测系统、列车控制系统、数据通信系统、电源监测系统、综合监控系统和维修管理平台中,既有电压、电流、温度、通信质量、动作时间等结构化数据,也有报警文本、维修记录、巡检记录和故障处置报告等信息。若采集范围过窄,系统只能看到局部现象;若数据口径不统一,又容易出现设备名称、故障描述和时间记录不一致的问题。为保证预警有效,应建立统一的设备台账标准,明确设备编号、安装位置、接口关系和维护责任,并统一采集频率、字段含义、报警等级和故障分类。关键设备还应实现运行数据与维修数据对应,避免异常发现后无法在工单中追溯。信号设备数据治理需重视定义漂移、采集链路断点、设备日志重复、人工填报偏差,经过数据管控平台,实施清洗过滤、补全修复、校验比对及标准化归类后,为预警分析奠定基础。

2.2 设备状态特征提取与关联分析

信号设备故障并非总以突发报警形式出现,许多故障在发生前已有可观察的状态变化。大数据技术的作用,是从长期运行数据中提取反映设备健康状态的特征。转辙机

可关注动作电流、转换时间、锁闭状态、表示状态和动作次数;信号电源可关注输出电压、负载变化、模块温度、蓄电池状态和切换记录;车地通信设备可关注丢包率、延迟、重传次数和链路切换情况。单一指标偶尔波动不一定代表故障,但多个指标同时偏离正常范围,或某一指标持续劣化,就需要关注。关联分析可把设备状态与运行场景结合起来,区分短时负荷、环境影响、检修操作和真实故障征兆。例如报警在高温时段集中出现,需关注散热条件;某一区段多设备同时通信异常,则可能与网络链路或供电条件有关。通过特征提取和关联分析,故障预警可由单点判断转向系统判断。

2.3 预警模型构建与分级响应机制

信号设备故障预警不能只追求复杂算法,更要强调可解释、可验证和可执行。实际应用中,可采用阈值判断、趋势外推、同类设备对比、历史故障匹配和健康评分等方法建立模型。阈值判断适用于电压越限、通信中断和状态不一致等问题;趋势外推适用于动作时间延长、电流峰值升高和报警频次增加等渐进变化;同类设备对比可发现相同条件下的异常个体;历史故障匹配可将当前征兆与既有经验联系起来。预警结果应分为提示、关注、预警和严重预警等层级,并对应不同处置要求。低等级预警提示班组复核,高等级预警应生成检修任务,并向调度提示影响范围。预警规则还需结合运行结果持续修订,避免预警过多影响日常生产,也要避免预警不足错失干预时机。

3 大数据技术在 FAO 线路信号设备故障预警中的应用策略

3.1 建立面向全寿命周期的数据底座

FAO 线路信号设备数量多、分布广、接口复杂,数据底座建设应贯穿设计、建设、调试、运营和更新改造全过程。传统运维中,设备资料、故障记录、维修记录和备件信息常常分散在不同部门及纸质存档,导致数据不能连续使用。大数据应用要发挥作用,首先应把设备从安装投用开始形成完整档案,记录设备型号、软件版本、参数配置、安装位置、调试结果、运行状态、维修记录和部件更换情况,使每台设备都有可追溯的电子运行履历。数据底座不是简单资料库,而是故障预警的基础支撑。只有掌握设备原始状态、历史变化和维修过程,才能判断当前异常是偶发波动、老化趋势还是维护质量问题。全寿命周期数据还可以帮助运维单位掌握不同型号设备的稳定性差异,分析不同工况下设备性能变化,为备件采购、检修周期调整和更新改造提供依据。建设数据底座时,应避免重平台、轻

数据的倾向,不能只追求界面展示,而忽视基础数据准确性。对 FAO 线路而言,数据底座还应与运营组织需求衔接,当行车关键设备健康状态下降可能影响列车折返、进路办理、站台门联动或通信覆盖时,系统应能够提示相关岗位提前准备。

3.2 构建设备健康状态画像

故障预警的核心不是发现已经发生的故障,而是判断设备是否正在偏离正常状态。设备健康状态画像可以把分散指标整合为较为直观的状态描述,使运维人员快速了解设备风险。画像内容应包括实时状态、趋势变化、同类对比、历史故障、维修质量和影响等级等方面。对于道岔设备,画像可重点反映动作过程是否平稳、转换时间是否稳定、表示状态是否可靠、缺口数值有无变化、近期维护后是否仍有异常;对于信号电源,画像可重点反映供电稳定性、模块负载、温度变化和电池性能;对于车载控制设备,画像可关注通信交互、定位信息、休眠唤醒率、模式切换和车地数据一致性。健康画像不能完全依赖单次检测结果,而应结合连续运行数据形成动态评价。设备状态有其正常波动范围,预警系统应识别趋势性、重复性和组合性异常,避免把正常波动误判为故障。画像结果还应从岗位角度出发,以能够理解的方式呈现,既保留关键技术指标,并给出风险原因、可能影响和建议措施。这样一来,维修人员可以快速确定检查方向,调度人员也可以判断是否需要调整运行组织。健康画像的建设有助于改变经验判断为主的维护方式,使设备状态评价更加连续、客观和可追溯。

3.3 完善故障预警与处置闭环

预警只有进入处置流程,才能真正发挥安全价值。FAO 线路信号设备故障预警应形成发现、确认、派工、处理、反馈和优化的闭环机制。系统发出预警后,应自动关联设备位置、历史故障、当前运行状态和可能影响范围,帮助维修人员快速确认风险性质及影响范围。对于一般预警,可由专业班组安排复核;对于可能影响行车安全或运营效率的预警,应同步通知调度岗位,并根据预案采取监视、限速、降级准备或检修天窗处置等措施。工单生成后,维修人员应在处置过程中记录检查结果、实际原因、处理措施和恢复情况,避免预警信息与维修结果脱节。处置结束后,系统应对预警准确性进行复盘,判断预警是否及时、等级是否合理、处置是否有效。如果某类预警长期误报,应调整规则和数据条件;如果某类故障未能提前识别,应补充监测指标和分析逻辑。闭环管理的意义在于让预警系统持续学习现场经验,逐步提高实用性。对于 FAO 线路,

处置闭环还应体现运营协同,信号专业不能独立完成全部风险控制,必要时需要车辆、通信、供电、站务和调度共同参与。

3.4 强化跨专业协同与安全管控

FAO 线路的设备故障往往具有跨专业影响,信号设备异常可能与通信链路、电源质量、车辆状态、站台门接口和综合监控信息有关。因此,大数据预警不能建设成信号专业内部封闭系统,而应在安全边界清晰的基础上推动跨专业数据共享。跨专业协同首先体现在数据关联上,同一时刻的列车状态、进路状态、站台门状态、通信状态和电源状态应能够被统一采集并分析,减少因信息割裂造成的误判。其次体现在处置协同上,当预警涉及多个专业时,应明确牵头专业、配合专业和反馈要求,避免出现各查各的、信息不通的情况。再次体现在安全管控上,预警平台应设置权限管理、操作留痕、日志审计和数据备份,确保关键数据不被随意修改,关键操作能够追溯。大数据技术的应用还应服务于管理决策,通过统计高频故障、重复故障、超期未闭环问题和备件消耗情况,推动运维资源向风险较高的设备和区段倾斜。跨专业协同不是简单增加系统接口,而是让不同岗位围绕同一风险形成共同语言和一致行动,使预警结果真正转化为安全保障能力。

4 某 FAO 线路信号设备故障预警应用案例分析

某轨道交通某 FAO 线路开通后,信号设备维护压力逐渐增大。一方面,线路运行密度较高,全自动运行对信号系统连续性要求更强;另一方面,信号设备类型多,部分隐患在常规巡检中不易发现。为提高预警能力,运营单位建设了面向信号设备的大数据监测与分析平台,将转辙机、计轴设备、车地通信设备、信号电源、联锁设备和车载控制设备纳入统一监测范围,并与维修工单系统建立关联。平台上线后,运维人员能够查看关键设备实时状态、历史趋势和报警分布。以道岔设备为例,系统不再只判断动作是否成功,而是持续关注动作电流、转换时间和表示状态及缺口变化。当某组道岔连续多日出现转换时间缓慢增加时,平台将其列为重点关注对象,维修人员利用非运营时间检查,发现机械部位阻力增大,及时完成调整和润滑,避免故障扩大。以信号电源为例,平台通过输出稳定性、模块温度和切换记录分析,发现个别模块状态波动,提前安排更换和复测,降低了电源设备突发故障风险。实践表明,大数据技术能够把隐蔽状态变化转化为可识别预警信息,但其效果取决于基础数据质量、规则合理性和处置闭环。经过持续优化,该线路信号维护逐步由定期检查

和故障抢修, 转向状态监测、趋势预警和计划干预相结合。

5 结语

大数据技术为 FAO 线路信号设备故障预警提供了新的技术路径。其核心价值不在于简单收集更多数据, 而在于通过数据治理、特征分析、状态评价和闭环处置, 提前识别设备劣化趋势, 降低突发故障对运营安全的影响。FAO 线路信号设备故障预警应以可靠数据为基础, 以设备健康状态为主线, 以运营安全影响为导向, 形成跨专业协同和持续优化机制。未来, 随着设备监测能力和运维管理体系不断完善, 故障预警将更加贴近现场需求, 为城市轨道交通全自动运行提供更稳定的技术支撑。

参考文献:

[1] 李传建. 城市轨道交通信号智能运维系统的设计与

应用[J]. 设备管理与维修, 2023(8): 10-13.

[2] 赖治平, 高宁, 鲁怀珂. 城市轨道交通列车运行控制系统智能运维系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 51-53.

[3] 石卫师, 黄祖宁, 商晖. 城市轨道交通道岔转辙机智能运维系统研究[J]. 都市快轨交通, 2024(3): 18-21.

[4] 于柯, 王超. 既有线信号系统智能运维平台建设思考[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(5): 103-108.

[5] 顾臻浩. 轨道交通信号电源的智能健康管理系统[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(11): 29-31.

作者简介: 秦海鸣 (1988.11-), 男, 汉族, 江苏徐州人, 研究生, 工程师, 研究方向: 全自动运营地铁信号系统维护。