

基于大数据分析的轨道交通系统故障预测与智能运维策略研究

刘富明

重庆市轨道交通（集团）有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i4.7926

[摘要] 我国城市轨道交通的发展面临着政治、经济、社会等方面的差异，使得城市轨道交通运营管理体系表现出多元化、区域化的特点。要实现车辆智能化运维系统对现有系统的高兼容性、高可扩展性、对不同环境的适应能力，就需要从系统到元件到设备，都要按照平台、组件和设备的设计思想，根据本地的国情和用户的使用习惯，对运营管理模式、系统运行环境等做出差别化的设计。

[关键词] 城市轨道交通；智能运维；5G 通信；网络安全；故障预测

Research on fault prediction and intelligent operation and maintenance strategy of orbit communication system based on big data analysis

Liu Fuming

Chongqing Rail Transit (Group) Co., LTD.

[Abstract] The development of urban rail transit in China is faced with the differences in politics, economy, society and other aspects, which makes the operation and management system of urban rail transit show the characteristics of diversification and regionalization. To realize the vehicle intelligent operational system of the existing system of high compatibility, high scalability, ability to adapt to different environment, you need from system to components to equipment, according to the platform, components and equipment design of ideas, according to the local conditions and the user habits, the operation management mode, system operation environment to make differential design.

[Key words] urban rail transit; intelligent operation and maintenance; 5G communication; network security; fault prediction;

以计划检修和故障检修为主的常规维护模式，不能对设备退化趋势进行实时监测，故障定位手段匮乏，预防性修复措施匮乏，在某种意义上限制了高品质维护的发展。随着数字技术、智能分析技术的发展，如何有效减少非必要的维护费用，减少工人的劳动强度，及时有效的发现潜在的危险，实现故障之前的预测维修，在故障状态下迅速定位故障的原因，提高设备的可靠性与使用性，是目前我国的一项重要工作。

一、智慧运维平台的建设思路

针对目前信号专业运行维护存在的难点问题，建立了“精准监测、精准定位、精准预测、精准管理”的智能维护平台，主要内容包括：（1）通过对系统监测数据进行整合和完善，借助中央监控平台，辅助和代替人工完成设备“巡、检”，实

现设备状态和设备参数的实时监控，降低巡检投入，提高巡检质量。（2）通过对装备进行智能化的诊断与分析，能够对装备进行准确、快速的定位，为装备的维修提出意见和必要的零部件，从而提升了装备的紧急处理能力；（3）通过对装备性能退化的智能化预警分析，对装备性能退化趋势进行监控，使其能够在装备性能下降的情况下，对其进行维护，为装备的视情修复，提升装备的可用度和可靠性。（4）利用该系统，对运行和维护失效的数据进行了自动化的统计和分析。对设备进行管理，提高了设备评估和失效规则的时效性、准确性，为规范、操作规范和系统的修订，提供了一个科学的、量的基础。提升了管理的效能与管理品质，以此来提升辅助的决策能力。利用状况修，可以减少人力、财力、物力的浪费，达到精确维

护的目的。(5)通过对工作、工程等工作程序进行信息化的程序设计,以增强工作执行的效率和控制的效率与品质,并通过对工作任务的监测与预警,对整个工作过程进行闭环的追踪和控制,从而切实地提高运输检查的效率,减少维修费用。(6)通过对设备运行状态进行科学评估,实现多维度、多角度的设备运行状态评估,实现设备运行状态的多维度、多角度的管理。

二、系统设计

1. 车载装置设计。提出了一种基于模块化、平台化的思想来支撑服务模块的增减,并在此基础上实现对复杂场景中高层服务场景与功能要求的支撑,并对基础功能的扩展提供支撑。它是一款模块化、一体化的机盒型结构,后板采用了一条总线的形式,它的功率板可以支持 110 V 的输入,DC 5 V, DC 24 V 的输出,它不但具有一个控制板(俗称“板”),无线通讯板,以太网交换板,防火墙板,PHM 板,大容量记忆板,MVB 通讯板,以及许多扩充板,如 CAN 通讯板,DIO 通讯板等,并且可以为不同的服务场合,提供多种灵活性的配置,满足不同的应用场合的需要。主控板负责实现相应的基本应用程序;该通讯卡可提供 3 G、4 G、5 G、WLAN 等多种无线通讯以及 GPS/BD 系统的 GPS/BD 系统;该网络接口可实现 100 Mb/s, 1000 Mb/s 的传输速率,支持全双工/半双工,在线顺序(MDI/MDIX)。采用耐火壁板对边界进行保护,对网络进行了安全隔离;PHM 模块的核心是完成一些对运算能力有很高需求的功能,如故障预警,专家诊断,寿命预测等;大容量内存面板使用了行业内的 SSD,并且可以提供 TB 级别的数据。

2. 天馈系统设计。馈源系统在 3 G、4 G、5 G、LTE、WLAN 和专用网络(LTE-R/5 G 专用网络)中,既要满足我国电信公司的标准,又要兼顾欧美,亚洲,南美,非洲等各大电信公司的手机标准。根据不同的使用情况,要求的设置也有很大的差别,如果仅仅要求有一个移动公用网络或者一个 WLAN 的要求,那么就可以不使用一个合路器,而汽车上的设备则可以通过相应的界面将其与一个天线通讯界面相连接。5 G 公共网络的 5 G 网络中,采用多输入多输出技术中,5 G 的天线需 2、4、8 支;5 G 专用网络中,为了满足车载和地面的通讯需求,必须自定义天线和支持的地面基站。

三、智能运维车载子系统关键技术

1. 无线通信技术。其中,无线通讯是车载与地上通讯的核心,也是车载与地面之间的远程、实时、双向通讯的核心。当前,我国在地铁上采用的无线通讯技术有 2 G/3 G/4 G, WLAN 和 LTE-R (LTE-R) 等。在原有的线路上增加和改建,使用公共手机通讯更加方便,能够迅速地完成信息的转变。无线局域网是一种典型的无线局域网,它是建立在 IEEE802.11 b/g/n 或更高的基础之上,并具有 2.4-5.8 GHz 的双频网络,其功能是

将离线的数据传输到地面。LTE-R 既能实现 GSM-R 的互联,又能承载列控、列调、公交信息系统、视频监控等多种服务。在 LTE-R 系统中,通过减小终端节点(BSC)等节点,可以有效地减小数据传输时延,增强系统的可靠性。5 G 是一种全新的移动通讯方式,极大地提高了系统的频谱利用率。其中之一是以原来的频宽来提供较高的通讯率;另外,利用高频带可以有效地解决目前频谱资源紧缺的问题,实现高速短距离通信。当前在轨道交通方面 5 G 技术的运用还处在起步发展的初期,它使用的是两种模式,即:移动公用网络 5 G 通信和专用网络 5 G 通信。它们具有千兆量级的传输速率和微秒量级的空中界面延迟特性,这既能够保证列车实时数据、视频流等数据的高密度、平稳地传送,也能够对列车离线文档进行高速的车地无线转移。

2. 网络安全技术。列车行车网络的安全性是一项系统工程,单凭某一种装置是不可能完成的。车辆上的设备是以加密技术和防火墙技术来保证车辆的安全性,并起到边境保护、权限管理等作用。加密方法分为对称加密、非对称加密以及非对称加密 3 大类,分别应用于数据的安全保护,身份识别,访问验证,防止数据泄漏、非法窃听和伪造等。在铁路系统中,轨道车辆的访问鉴别与身份识别一般都是使用了不对称密码与不可逆密码两种方法;为了实现对实时信息的传送,采取了对称的加密方法。该系统的核心技术有:包过滤、抗攻击扫描、深度信息解析、安全审计、网络地址变换(NAT)和虚拟私有网(VPN)等。

3. 故障预测与健康健康管理技术。列车故障预测与健康健康管理(PHM)通过对各个系统进行信息收集,通过大数据挖掘、特征提取、模型推理、深度融合等多种方法,达到对列车故障进行诊断、预测和使用寿命预测的目的,提高维修效率,减少人机比例,减少维修费用。车内小灵通是面向实时需求的应用,它能有效地发挥边缘网络的自然分布特性,实现实时探测与故障报警,为保障列车运行的安全性提供保障。

4. 多信息融合技术。列车运行状态、控制、维修和媒体等多个子系统的基本状态、控制、维护和媒体等多个来源的数据,通过高效解析、清洗、重组和关联,获得列车关键事件、运行态势和隐患等具有重要意义的重要情报,实现专家诊断、应急处置和关联分析等相关评价与决策。

5. 图像识别技术。图像的辨识通常包括影像输入、影像预处理、影像特征提取、辨识与分析、辨识的步骤。通过对驾驶员室、客室、道路、弓网等多个视角的视频数据进行分析与处理,实现对弓网监控、乘客行为监控、火灾监控、障碍物检测等多个方面的有力支持,提高行车运行的安全性与管理水平。

四、大数据技术助力轨道交通通信系统故障预测的

关键路径

1. 数据整合与特征提取。(1) 多源异构数据融合。通过部署振动、温度、位移等传感器网络，实时采集设备运行状态数据，并与历史维护记录、环境参数等异构数据结合，形成多维度数据池，为故障预测提供完整信息基础。激光位移传感器与温度数据的关联分析可识别设备异常发热或物理形变风险。

(2) 高维数据智能处理。利用高维数据可视化技术对海量数据进行清洗、归类和标准化处理，结合智能算法提取关键特征（如噪声频谱、信号延迟等），降低数据冗余并提升分析效率。

2. 智能分析与预测模型构建。(1) 机器学习驱动的故障预测。基于深度学习模型（LSTM、CNN）对历史故障数据进行建模，实现设备潜在故障的精准预测。例如，声纹识别技术通过分析通信设备噪声频谱，异常预警准确率达 89%；轨道几何形变预测模型精度达 98.7%。(2) 多模态知识图谱应用。融合通信设备传感器数据、信号系统日志、网络流量监测等多模态信息，构建轨道状态知识图谱，增强对设备健康状态的综合评估能力。

3. 实时监测与动态优化。(1) 流式计算与异常检测。借助流式计算框架对传感器数据进行毫秒级实时处理，快速识别信号延迟、数据包丢失等瞬时异常。例如，部署的智能分析系统实现故障平均处理时间缩短 20%，响应效率显著提升。(2) 动态维护策略生成。基于设备剩余寿命预测和实时负载数据，构建“感知-分析-决策-反馈”闭环系统，动态调整维护计划。例如，优化通信模块更换周期后，突发故障率降低 50%，设备使用寿命延长。

4. 全生命周期管理及实践案例。(1) 全周期健康管理。从设备安装、运行到退役的全生命周期数据跟踪，结合故障根因分析和模式识别，建立预防性维护知识库，运维效率提升 40% 以上。(2) 典型应用成效。某地铁：通过声纹识别与形变预测模型，通信链路中断风险下降 60%；地铁：采用智能决策系统，故障处置效率提升 40%，网络安全攻击检出率大幅提高。

5. 技术延伸与创新方向。数字孪生与虚拟调试：通过物理设备与虚拟模型的数据融合，缩短新设备调试周期并优化运行参数；备件库存智能预测：基于设备损耗规律预测备件需求，降低库存成本并保障关键部件供应。以上路径表明，大数据技术通过数据驱动的智能分析能力，显著提升了轨道交通通信系统的可靠性、安全性和运维效率。

五、大数据技术在轨道交通通信系统故障预测中的应用

1. 多源数据采集与预处理。轨道交通通信系统通过部署传感器网络（如振动、温度、位移传感器等）实时采集设备运行

状态数据，并结合历史维护记录、环境参数等信息构建多维度数据池。借助高维数据可视化技术，可实现海量异构数据的清洗、归类与标准化处理，为后续分析提供高质量数据基础。

2. 多模态数据融合与特征提取。通过融合通信设备传感器数据、信号系统日志、网络流量监测数据等多模态信息，构建轨道状态知识图谱。这种融合方式能够更全面地反映设备健康状态，例如通过激光位移传感器和温度数据的关联分析，识别通信设备异常发热或物理形变风险。

3. 机器学习驱动的故障预测模型。基于深度学习算法（如 LSTM、CNN）对历史故障数据进行建模，可预测通信设备的潜在故障。例如，在深圳地铁试点中，采用声纹识别技术分析通信设备噪声特征，异常预警准确率超过 89%；轨道几何形变预测模型精度达 98.7%，显著降低通信链路中断风险。

4. 实时分析与异常检测。通过流式计算框架对传感器数据进行实时处理，快速识别通信系统的瞬时异常（如信号延迟、数据包丢失）。例如，天津地铁部署的智能分析系统可将故障平均处理时间缩短 20%，实现毫秒级异常响应。

5. 动态维护策略优化。基于预测结果构建“感知-分析-决策-反馈”闭环系统，动态调整维护计划。例如，结合设备剩余寿命预测和实时负载数据，优化通信模块更换周期，降低 50% 突发故障率，同时延长关键设备使用寿命。

6. 全生命周期健康管理。利用大数据技术对通信设备从安装、运行到退役的全周期数据进行跟踪，实现故障根因分析和寿命预测。例如，通过分析设备历史故障模式，建立预防性维护知识库，提升运维效率 40% 以上。以上应用表明，大数据技术通过数据驱动的分析方法和智能化算法，已成为提升轨道交通通信系统可靠性和运维效率的核心支撑。

总之，在轨道交通信号系统中应用大数据技术，既能对故障进行精确预测，又能帮助管理人员提前预防故障，还能在出现故障的情况下，对故障部位进行定位，对故障产生的原因进行分析，从而使故障检修人员的野外工作需要得到充分的满足。同时，利用大数据分析的方法，可以有效地提升信号系统相关装备的维修工作，保证城市轨道交通运行的安全性。为此，应注重大数据应用于城市轨道交通的信号管理，发挥大数据的优势，建设智慧化的城市轨道交通运营管理系统。

[参考文献]

- [1]邵志鹏.大数据分析的轨道交通通信系统故障预测与智能运维策略.2023.
- [2]李光宇,基于大数据分析的轨道交通通信系统故障预测与智能运维策略探讨.2022.