

基于边缘计算的城市轨道交通弓网在线检测系统

黄明才 王泽洋 吉嵩

南京地铁运营有限责任公司, 江苏南京, 210012;

摘要: 随着城市轨道交通的快速发展, 弓网系统的可靠运行至关重要。城市轨道交通弓网运行在线检测是一种供电专业通过在列车顶部加装监控相机、红外相机、燃弧检测等设备实现对受电弓与接触网之间受流关系监测的装置与系统, 其技术涉及机器视觉、网络通讯技术、边缘计算技术、智能识别、软件开发与车辆工程等交叉学科。本文探讨了基于边缘计算的城市轨道交通弓网在线检测技术。首先阐述了边缘计算的概念及其在轨道交通领域应用的优势, 接着分析弓网系统常见故障类型与检测需求, 详细介绍基于边缘计算的弓网在线检测系统架构、检测原理与算法。通过实际案例分析验证该技术的有效性, 表明其能够显著提高弓网检测的实时性与准确性, 为城市轨道交通的安全高效运营提供有力保障。

关键词: 边缘计算; 城市轨道交通; 弓网; 在线检测

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 11. 023

引言

城市轨道交通作为现代城市公共交通的重要组成部分, 其安全可靠运行关系到广大乘客的出行安全与城市交通的高效运转。弓网系统作为轨道交通车辆的关键供电设备, 其运行状态直接影响列车的正常运行。传统的弓网检测方式存在一定的局限性, 如数据处理滞后、无法实时反馈等问题。边缘计算技术的出现为解决这些问题提供了新的思路, 将边缘计算应用于弓网在线检测具有重要的研究意义。

1 边缘计算概述及其在轨道交通的优势

1.1 边缘计算概念

边缘计算作为一种新兴的计算范式, 其核心理念是将数据处理任务从远离数据源的集中式云中心迁移至更接近终端设备的边缘节点。这种架构不仅实现了对原始数据的本地化实时分析与处理, 还能在列车运行过程中动态响应复杂多变的工况需求。以城市轨道交通为例, 在弓网系统监测中, 车载边缘计算设备可在受电弓工作瞬间完成图像采集、特征提取与异常识别, 极大提升了检测速度与决策效率。相比传统模式, 该技术有效规避了因数据长距离传输导致的信息滞后与丢包风险, 同时通过资源调度优化, 增强了系统整体的稳定性和鲁棒性。更重要的是, 边缘端具备协同学习能力, 能够在不依赖云端支持的前提下进行模型迭代和性能自适应提升, 为轨道交通智能化运维提供了坚实的技术支撑。

1.2 在轨道交通领域的优势

在城市轨道交通运行环境中, 弓网系统状态具有高度动态性与瞬时变化特征, 对数据处理的时效性要求极

高。边缘计算通过将计算任务部署于数据源附近, 使检测数据能够在本地迅速完成分析与决策, 大幅缩短响应时间, 从而保障系统对弓网异常的即时识别与干预能力。面对弓网检测过程中产生的海量原始数据, 若全部上传至云端集中处理, 不仅造成通信链路负载激增, 也易引发数据拥塞与传输延迟。借助边缘节点的前置化计算能力, 可在数据源头实现初步筛选、压缩与特征提取, 仅将关键状态信息上传至中心平台, 有效缓解网络带宽压力。弓网监测数据往往包含线路运行特征、设备健康状态等敏感信息, 其传输路径越长, 安全风险越高。采用边缘计算架构, 使核心数据在本地闭环处理, 减少对外部通信通道的依赖, 显著提升了数据存储与流转过程中的安全性。以车载边缘计算单元为例, 在受电弓升降瞬间即可完成图像采集与缺陷识别, 无需等待云端反馈, 真正实现了“感知—分析—响应”的一体化闭环控制机制。

2 弓网系统故障类型与检测需求

2.1 弓网系统常见故障类型

弓网离线现象多由接触网不平顺、受电弓高频振动或外部环境扰动引发, 其本质是弓网间动态接触关系的瞬时失稳。该类故障发生时, 电流被迫中断并以电弧形式释放能量, 局部高温可达数千摄氏度, 不仅造成碳滑板与接触导线的烧蚀损伤, 还可能引发电磁干扰, 危及牵引供电系统的稳定性。接触压力异常则体现为力值偏离设计阈值范围, 高压状态下加剧机械磨损速率, 致使滑板材料过早损耗, 低压状态则易诱发接触电阻增大, 导致局部过热甚至拉弧放电, 形成恶性循环。接触网几

何参数异常涵盖高度偏差、拉出值超限等情形,这些参数直接决定弓网间的空间匹配关系。若高度不达标,可能引起受电弓脱网运行;而拉出值异常则会导致滑板偏磨,破坏弓网耦合一致性,增加动态接触力波动,从而诱发弓网故障风险。上述三类典型故障在实际运行中往往交织出现,表现出强非线性与时变特性,对监测系统提出更高精度与更强实时响应能力的要求。

2.2 弓网检测需求

弓网系统的检测需求不仅体现在对运行状态的动态掌握,更在于通过精准感知与快速响应,实现对潜在故障的前瞻性干预。系统需具备毫秒级的数据采集与处理能力,在列车高速运行状态下,仍能捕捉弓网接触过程中的微小异常,如接触压力瞬时波动、离线时间突变等关键参数变化,确保在故障尚未显性化前即可识别并预警。同时,检测精度要求达到亚毫米级形变识别与牛级力值分辨,以支撑对滑板磨损、接触不良等微观损伤的准确判断。面对轨道交通场景中普遍存在的强电磁干扰、复杂气候条件及剧烈机械振动,检测设备必须具备高环境适应性 with 长期运行稳定性,保障数据连续性和诊断可信度。此外,系统还需具备自校准功能与容错机制,在传感器漂移或局部失效情况下,仍能维持基本检测性能,为运维决策提供持续支持。这种融合了高动态响应、精细化测量与强鲁棒性的检测体系,构成了弓网安全运行的重要技术保障。

3 基于边缘计算的弓网在线检测系统架构

3.1 硬件架构

在弓网系统运行过程中,传感器层承担着关键的数据采集任务。通过在受电弓关键部位布置高灵敏度加速度传感器、动态压力传感元件以及高速图像采集装置,能够实现对弓网振动特性、接触压力分布及滑板表面形貌的全方位感知。这些传感器以嵌入式或贴合式方式安装于弓头、弓臂与支架连接点等结构敏感区域,确保所采集信号能真实反映弓网耦合状态下的动态响应特征。边缘计算节点作为系统核心处理单元,通常由工业级边缘计算网关与车载嵌入式计算平台构成,具备低延迟数据处理与实时分析能力。传感器原始数据经由高带宽数据链路传输至边缘节点后,在本地完成初步滤波、降噪与特征提取操作,如利用小波变换提取振动频谱特征、通过滑动窗口统计压力波动趋势等。这一过程有效降低了冗余信息传输量,提升了整体系统的响应效率。通信网络架构采用分层式拓扑设计,车内局域网部分基于高速以太网或 CAN FD 总线实现多节点协同通信,车地通

信则依赖于 5G 或 LTE-R 无线传输技术,确保边缘节点处理结果可实时上传至列车控制中心与地面监测平台。整个系统通过分布式部署与本地智能决策相结合的方式,构建起具备高鲁棒性与环境适应性的在线检测体系,为弓网状态评估与故障预警提供坚实的技术支撑。

3.2 软件架构

数据采集模块采用多通道同步方式,从加速度计、压力传感器及图像采集装置获取原始信号,并通过时间戳对齐与数据融合技术,确保多源信息在时空维度上高度一致。模块内置自适应校准机制,能够根据传感器特性动态调整增益与采样率,显著提升数据精度并保障系统长期稳定运行。边缘计算处理模块部署于嵌入式平台,基于轻量化信号处理算法实现本地实时分析。具体包括:采用改进型卡尔曼滤波器对振动信号降噪,结合小波包分解提取弓网动态接触过程中的关键频域特征,并利用主成分分析(PCA)压缩特征空间,保留最具判别力的状态表征参数。故障诊断模块依托深度学习框架构建智能识别模型,使用训练完成的卷积神经网络(CNN)对特征向量进行分类推理,自动识别离线打火、接触不良、滑板磨损等典型故障类型,并输出置信度评估结果,为维护决策提供科学依据。数据传输模块则按照通信协议,将诊断结果及相关数据高效上传至列车控制系统或地面监控中心。

4 基于边缘计算的弓网在线检测原理与算法

4.1 检测原理

弓网系统的动态接触特性可通过多源传感器进行实时监测,借助边缘计算架构实现本地化数据处理与智能分析。在受电弓运行过程中,加速度传感器捕捉其振动响应,通过频谱分析识别异常频率成分的变化趋势,进而推断弓网间是否存在离线或滑动接触等非理想状态。同时,压力传感器采集弓网接触点的法向力信息,结合时域统计方法对压力波动范围、极值分布及变化率等指标进行量化评估,从而判断接触稳定性是否满足安全运行要求。该检测机制融合物理量测与信号处理技术,在不依赖云端支持的前提下,完成对弓网服役状态的即时感知与初步诊断。

4.2 算法应用

为提升数据采集精度,需对原始信号实施滤波预处理。考虑到弓网系统运行环境复杂、干扰因素多,选用自适应卡尔曼滤波算法对加速度传感器输出序列进行动态修正。该方法依据系统噪声统计特性在线调整滤波参数,实现对高频随机噪声的有效抑制,同时保留弓网振动特征的时域完整性,确保后续分析不丢失关键状态

信息。在特征提取层面,引入主成分分析(PCA)对降噪后的多维时序数据进行线性变换。通过计算协方差矩阵的特征值与特征向量,构建低秩特征空间,将冗余信息压缩至少数主成分中。实验表明,前三个主成分累计贡献率可达 87% 以上,足以反映弓网接触状态的关键变化趋势。故障识别模块采用改进型 BP 神经网络结构,结合 Levenberg-Marquardt 优化算法加快收敛速度。训练阶段采用交叉验证策略防止过拟合,输入层节点数与主成分维度匹配,隐含层引入 Sigmoid 激活函数增强非线性映射能力。实测数据显示,模型对离线打火、滑板偏磨等典型故障的识别准确率达到 92.4%,相较传统阈值判断方法具有显著优势。

5 实证分析

5.1 案例选取

选取某城市轨道交通线路作为案例研究对象,该线路全长逾 40 公里,贯穿城区核心区域,日均客流量大,运行频次高。受长期高负荷运营及环境温湿度变化影响,弓网系统在实际运行中频繁出现接触不良、滑板磨损不均等故障现象,尤以隧道区段电弧放电问题突出,直接影响列车供电稳定性与设备使用寿命,具备典型研究价值。

5.2 系统部署与数据采集

在该线路的部分列车上部署基于边缘计算的弓网在线检测系统,依据系统架构中对传感器布局的拓扑优化方案,在受电弓关键受力点与接触网相对滑动区域精准布设加速度计、压力传感器及电流互感器等多模态传感单元。数据采集覆盖列车全天候运行工况,同步记录弓网动态接触力、滑板振动加速度、牵引电流波形等关键参数,涵盖正常接触、轻微离线、持续拉弧等多种状态下的实测样本。前端边缘计算模块以内嵌式部署方式嵌入数据预处理算法,实现原始信号的实时滤波降噪与特征帧提取,仅上传状态判别所需的核心特征向量至云端数据库,从而降低通信链路负载并提升故障响应时效。

5.3 结果分析

系统投入运行后,通过对多列车次连续数周的监测数据进行统计分析,弓网离线故障识别准确率稳定在 90% 以上,接触压力异常类故障检测命中率亦达 85% 以上,表明模型具备较强的状态判别能力与泛化性能。相较于传统基于阈值设定的判断方式,该系统引入时频域融合特征提取与轻量化深度学习算法,在复杂工况下仍能保

持较高稳定性与一致性。在响应速度方面,边缘节点本地处理机制显著缩短了诊断延迟,实验数据显示,系统可在故障发生后 1 秒内完成识别并触发预警,相较传统集中式处理架构提升近四倍。此外,得益于前端嵌入式模块对原始信号的高效压缩与特征蒸馏策略,在相同采样频率与检测周期条件下,上传至云端的数据量仅为传统模式的三成左右,大幅缓解了通信带宽压力,同时降低了后台服务器的处理负荷。实际部署过程中还发现,该架构在隧道区段电弧放电频繁区域表现尤为突出,有效提升了弓网接触状态的可监控性与运维决策的时效性。

6 结论

本文围绕基于边缘计算的城市轨道交通弓网在线检测技术展开研究。通过剖析边缘计算在轨道交通领域的应用优势,结合弓网系统常见故障类型与检测需求,构建了融合边缘计算架构的在线检测系统,深入阐述其系统结构、检测原理及核心算法,并结合实际案例验证技术可行性。实验结果表明,该技术显著提升了弓网检测的实时性与准确性,有效降低网络传输压力,在保障城市轨道交通弓网系统安全运行方面具有突出价值。展望未来,随着边缘计算与检测技术的持续进步,系统性能与故障预测能力将进一步提升,助力城市轨道交通智能化、高效化发展。

参考文献

- [1] 顾笛儿,卢华,谢人超,等.边缘计算开源平台综述[J].网络与信息安全学报,2021,7(02):22-34.
- [2] 杨铮,贺晓武,吴家行,等.面向实时视频流分析的边缘计算技术[J].中国科学:信息科学,2022,52(01):1-53.
- [3] 尹晓东.基于边缘计算的轨道交通智慧运控平台解决方案[J].自动化博览,2021,38(02):104-107.
- [4] 李兴,侯伟,杨宇,等.论电力基建业务中边缘计算的应用与实践[J].电气工程学报,2020,15(04):153-160.

作者简介:黄明才(1977.06—),男,汉,高级工程师,本科学历。

王泽洋(1988.11—),男,汉,高级工程师,本科学历。

吉嵩(1977.11—),男,汉,工程师,本科学历。