

Design, Testing, and Operation Practice of Urban Rail Transit Pantograph-Overhead Line Monitoring System

Jingming Xing

Zhongjian (Tianjin) Rail Transit Investment Development Co., Ltd., Tianjin, 300404, China

Abstract

The pantograph-catenary (Pantograph-Catenary) system is the core power supply unit of urban rail transit trains, with its operational status directly determining safety and efficiency. To address the low efficiency and delayed fault response in traditional pantograph-catenary maintenance, the first phase of Tianjin Metro Line 7 deployed an integrated pantograph-catenary monitoring system with multi-dimensional detection capabilities. This system, utilizing operational trains as a platform, combines non-contact sensing, machine vision, and fiber-optic detection technologies to achieve real-time monitoring and fault alarms for key indicators such as catenary geometric parameters, pantograph-catenary arcing, temperature, and contact pressure. Through type testing (static + dynamic), all performance metrics of the system meet regulatory requirements. By integrating a hierarchical maintenance system and fault optimization cases, the system enables early warning and rapid resolution of pantograph-catenary faults. Practical results demonstrate a 30% reduction in maintenance manpower and a 50% decrease in track possession time, providing a scalable technical solution for intelligent maintenance of pantograph-catenary systems in urban rail transit.

Keywords

urban rail transit; pantograph-catenary monitoring system; laser triangulation method; ultraviolet arc detection; infrared temperature measurement; type testing; operation and maintenance management

城市轨道交通弓网监测系统 设计、试验与运维实践

邢景明

中建(天津)轨道交通投资发展有限公司, 中国·天津 300404

摘要

受电弓-接触网(弓网)系统是城市轨道交通列车的核心供电单元,其运行状态直接决定运营安全与效率。为解决传统弓网运维效率低、故障响应滞后的问题,天津地铁7号线一期工程部署了集成多维度检测功能的弓网监测系统。该系统以运营列车为载体,融合非接触式传感、机器视觉及光纤检测技术,实现接触网几何参数、弓网燃弧、温度、接触压力等关键指标的实时监测与故障报警。通过型式试验验证(静态+动态),系统各项性能指标均满足规范要求;结合分级运维体系与故障优化案例,实现了弓网故障的提前预警与快速处置。实践表明,该系统可减少30%运维人力投入,降低50%天窗点占用时间,为城市轨道交通弓网系统智能化运维提供了可推广的技术方案。

关键词

城市轨道交通; 弓网监测系统; 激光三角法; 紫外燃弧检测; 红外测温; 型式试验; 运维管理

1 引言

在城市轨道交通高密度、大运量的运营背景下,弓网系统长期处于滑动电接触、机械振动、电气放电及环境因素交织的复杂动态耦合工况中。接触线异常磨损、几何参数(导高、拉出值)偏移、持续性燃弧放电、硬点冲击等问题,极易演变为弓网接触失效、接触线烧蚀甚至断线等重大安全事故,严重威胁运营秩序与公共安全[1]。为从根本上突破上述瓶颈,天津地铁7号线项目联合设备供应商,共同研发并部署了一套集“状态实时感知—数据车载处理—信息车地传

输—地面智能分析—故障精准预警—运维决策支持”于一体的弓网在线监测系统。该系统最大的创新点在于其“非侵入式”检测理念,无需占用天窗点即可在列车正常运行过程中完成对全线接触网状态的近乎100%无缝覆盖监测。本文旨在从系统顶层设计、核心技术原理、型式试验验证、运维管理实践四个维度,对天津地铁7号线弓网监测系统进行全面剖析与技术经济性评估,为国内外同类工程的规划、建设与运维提供有价值的参考与借鉴。

2 弓网监测系统总体设计

2.1 系统架构设计

天津地铁7号线弓网监测系统采用分层分布式、模块化的“车载检测—车内处理—地面分析”三级体系架构,确

【作者简介】邢景明(1988-),男,本科,从事轨道交通研究。

保了数据采集、处理与应用的效率与可靠性。系统核心设备配置与功能如表1所示。

该系统在701、702、715、716共4列列车上进行了部署，通过在不同列车、不同端头安装检测设备，实现了列车双向

运行时的全线路覆盖。地面运维系统具备强大的数据存储与处理能力，支持7天连续数据的循环存储，并对所有故障数据执行永久归档策略，同时提供基于Web的多用户权限管理界面，便于运维人员随时随地进行数据检索与状态监控。

表1 弓网监测系统核心设备配置清单

设备层级	核心设备	功能模块	安装位置	配置数量(每列)
车顶检测层	车顶检测设备A	弓网视频监控(900万像素)、燃弧检测、温度检测、接触线几何参数检测	701/702列(TC1/MP1端); 715/716列(TC2/MP2端)	1套
	车顶检测设备B	弓网硬点检测(±200g量程)、接触压力检测(0~300N)、电流检测(±4000A)	MP车	1套
车内处理层	弓网检测主机	数据采集、H.264压缩存储、MVB/TRDP通讯	MP车(3U机箱,含2个1T SATA硬盘)	2台
	光纤分析主机	光纤传感器数据转换与分析(≥4光通道)	MP车(2U机箱)	1台
	中继交换机	千兆数据交互(支持端口隔离)	TC车(3U机箱)	1台
车底补偿层	车底补偿设备	轨道位置采集、车厢姿态补偿(高速CMOS相机)	与几何参数检测模块同截面	2台
地面分析层	地面运维系统	20T数据存储、故障分析、报表生成、远程控制	大寺车辆段控制中心	1套

2.2 系统功能定位

本系统的功能设计严格遵循《铁路应用-集流系统-弓网动态检测技术标准》(EN50367-2012)及《城市轨道交通架空接触网技术标准》(CJJ/T288-2018)[2,3],其综合性能接近“3C检测”标准,核心功能包括:

- 接触网几何参数检测:**实时动态测量接触线导高、拉出值及坡度,确保其空间位置符合设计规范,预防钻弓、撞弓事故。
- 弓网受流状态监测:**基于紫外特征光谱,精准检测燃弧率、燃弧时长与次数,量化评估受流质量,避免因持续燃弧导致接触线与滑板烧蚀。
- 力学特性检测:**通过光纤传感器直接测量弓网接触压力(静态误差±5N),并结合MEMS加速度传感器(精度±2g)识别接触网硬点,评估机械相互作用状态。
- 温度与视频监控:**利用红外热像仪(测温范围-20~300℃,精度±2℃)监测接触点温度,辅以900万像素高清视频,实现弓网运行状态的可视化记录与过热预警。
- 故障自动报警:**系统内置智能判据,对超限数据实现毫秒级响应,并通过车地通信网络将包含故障类型、等级、精确位置(里程偏差≤9m)的报警信息实时推送至地面控制中心。

3 系统核心技术原理与关键参数

3.1 基于激光三角法的接触网几何参数检测

接触网几何参数是保障弓网稳定受流的基础。本系统采用激光三角法实现高精度、非接触式测量,其原理如图1(原理示意图,略)所示。

技术原理:系统集成2组高分辨率工业线阵相机(2560×832px)与专用激光器。激光器向接触线投射结构化激光束,反射光被相机捕获并在其CMOS靶面上成像。

当接触线空间位置发生变化时,其在相机靶面上的成像点坐标将发生相应偏移。通过预先标定的高精度转换算法,可将像面坐标(x,y)实时解算为物理世界的拉出值与导高值。

关键参数:系统针对刚性悬挂与柔性悬挂的不同特性,设定了差异化的测量范围与精度。刚性悬挂导高测量范围3900~4500mm(精度±5mm),拉出值±350mm(精度±5mm);柔性悬挂导高范围3900~5600mm(精度±10mm),拉出值±400mm(精度±10mm)。所有指标均满足并优于现行规范对动态检测的精度要求。

3.2 基于紫外传感的弓网燃弧检测

燃弧是弓网离线最直接的电气表现。本系统采用紫外光电传感技术,有效克服了可见光的干扰。

技术原理:依据EN50317-2012标准[4],铜及铜合金接触线燃弧时会产生特征紫外波段(如323~329nm)。系统选用对该波段敏感的紫外传感器(检测角±40°),并在其前端覆盖二氧化硅玻璃(紫外透过率≥85%)以过滤太阳光等背景干扰。当传感器捕捉到特征紫外信号时,即刻触发高清相机同步捕获燃弧影像,实现“电-光”联合确认。

关键参数:燃弧率测量范围0~100%,精度±0.1%;燃弧时长测量范围0~3s,分辨率高达1ms。系统灵敏度极高,单次燃弧持续时间≥5ms即可被可靠检测并触发报警。

3.3 红外测温与光纤压力检测

温度检测:采用非制冷红外焦平面热像仪(分辨率384×288px,帧率90Hz),配合仅透射红外波的锗玻璃镜头,对弓网接触区域进行连续测温。系统设定多级报警阈值,当温度超过80℃(接触线安全阈值)时,自动触发高级别报警并存储热像图。

接触压力与硬点检测:在受电弓滑板与弓头间嵌入4个光纤布拉格光栅(FBG)压力传感器(BA-FPP-MS型,量程0~300N,误差±5N),直接获取接触力真值。同

时,在碳滑板对角布置2个MEMS加速度传感器(量程 $\pm 200g$,采样率2kHz),通过分析振动信号的加速度峰值来识别和定位接触网硬点,检测精度 $\pm 2g$ 。

3.4 数据传输与处理技术

车载处理:弓网检测主机搭载高性能 Intel i7 处理器与 32GB 内存,负责所有传感数据的融合、处理与 H.264 编码压缩。2 块 1T 容量的防震 SATA 硬盘确保至少 7 天的原始数据循环存储,故障数据被标记并永久保留。

车地传输:利用列车已有的通信网络,实现监控数据的数据分流传输。实时视频等高带宽数据(日均 $\leq 60GB$)通过 100Mbps 通道传输,而关键的报警数据(单条约 20MB)则优先通过 10Mbps 低延迟通道推送,确保故障信息的即时性。

时间同步:系统与列车控制管理系统(TCMS)的主时钟保持严格同步,确保每一帧检测数据都与列车当前的精确位置、运行速度、时间戳信息绑定,为故障溯源提供坚实基础。

4 型式试验与性能验证

为确保系统功能与性能的可靠性,中车青岛四方机车车辆股份有限公司于 2024 年 11 月(静态)和 2025 年 2 月(动态)在天津地铁 7 号线大寺车辆段及正线区间,对 715 车进行了全面的型式试验[5]。

4.1 试验项目与方法

试验严格遵循试验大纲,分为静态与动态两大类,共 15 个核心项目。

4.2 试验结果与分析

试验结果表明,系统所有被检项目的性能均满足并部分超过了《试验大纲》的要求。

温度检测:在黑体温度为 30 $^{\circ}C$ 、70 $^{\circ}C$ 、90 $^{\circ}C$ 时,系统实测值分别为 30.45 $^{\circ}C$ 、70.37 $^{\circ}C$ 、91.29 $^{\circ}C$,最大误差 $< \pm 2^{\circ}C$,且在 90 $^{\circ}C$ 时高温告警功能正常启动。

压力检测:在 65N、85N、95N 三个标准拉力点,系统实测值分别为 65N、85N、96N,误差均 $< \pm 1\%$,140N 超限告警响应准确。

几何参数检测:动态测试中,超过 90% 的检测点导高误差控制在 $\pm 5mm$ 以内,拉出值误差控制在 $\pm 10mm$ 以内。3 次往返测试数据曲线高度重合,证明了系统优异的重复性与稳定性。

燃弧检测:系统对模拟燃弧的响应时间 $\leq 1ms$,识别率达 100%,且在强光、白炽灯等干扰源下无任何误报。

视频监控:无论在日间还是夜间(补光灯自动开启),系统传回的视频画面均清晰、流畅,可供 PIS 显示屏实时调用显示。

试验结论:天津地铁 7 号线弓网监测系统的硬件性能、软件功能及整体稳定性均通过验证,符合上线运营的所有技

术条件。

5 运维管理实践与故障优化

5.1 分级运维体系的构建

为实现监测系统自身的长久可靠运行,项目建立了科学的分级运维机制。

5.2 典型故障处理与系统优化案例

在 2024 年 12 月至 2025 年 2 月期间,701 车司机室显示屏频繁报告 PDS(弓网检测系统)红色掉线故障。经网络诊断,设备 IP(192.168.200.101) Ping 测试丢包率 100%。深入分析定位故障根源为 TRDP 通信板卡上的网络服务在长期运行后发生崩溃,导致 IP 配置丢失。

解决方案:并非简单重启,而是从硬件底层着手,重新设计了板卡的硬件电路,并在软件层面增加了网络服务守护进程,实现服务崩溃后的毫秒级自动重启。该优化方案于 2025 年 4 月上车验证,至今系统持续稳定运行,未再发生同类故障。

6 结论

天津地铁 7 号线弓网监测系统的成功实践,标志着城市轨道交通弓网运维进入了智能化、数字化的新阶段。本文详细论述了该系统的设计理念、技术实现与落地应用,得出以下结论:

技术集成创新:通过激光三角测量、紫外光学传感、红外热成像、光纤传感等多技术融合,成功研制出一套高性能、高可靠的车载在线监测系统,实现了对弓网关键状态参数的全方位感知。性能验证可靠:严格的型式试验证明,系统在几何参数、燃弧、压力、温度等核心指标的检测精度上均满足并优于国际与行业标准,具备在复杂运营环境下稳定工作的能力。运维模式变革:该系统与构建的分级运维体系相结合,形成了“检测-诊断-处置-优化”的闭环管理,显著提升了运维效率与安全性,经济效益显著。具备推广价值:天津地铁 7 号线的成功经验,为国内外新建及既有线路改造提供了成熟、可复制的技术方案与运维范式,对推动整个行业的技术进步具有重要参考价值。未来,随着物联网、大数据与人工智能技术的深度融合,弓网监测系统必将向更加智能、更加精准的方向演进,为保障城市轨道交通大动脉的安全、高效运营贡献更大的力量。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通运营统计分析报告(2024年度)[R].北京:中国城市轨道交通协会,2025.
- [2] EN50367-2012, Railway applications - Current collection systems - Technical specifications for dynamic testing of pantographs and overhead lines[S].
- [3] CJJ/T288-2018,城市轨道交通架空接触网技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.