 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i6.10617

Technical Key Points of the Intelligent Inspection System for Railway Super-large Bridge Towers in Cold and Arid Regions

Fanlu Pan

China Railway HuHHT Bureau Group Co., Ltd. Construction Department, Hohhot, Inner Mongolia, 010030, China

Abstract

Combined with the engineering practice of Dengkou and Wuhai Yellow River super-large bridges of Baotou-Yinchuan high-speed railway, this paper addresses the operation and maintenance pain points of bridge towers in cold and arid areas, and studies the intelligent robot automatic inspection system. It discusses the overall structure, hardware selection, software platform, environmental adaptation, joint debugging and collaborative operation of the system. By summarizing its application value and technological innovation, it makes up for the shortcomings of manual inspection, and provides practical technical support for intelligent monitoring and fine maintenance of similar railway bridges.

Keywords

railway super-large bridge; bridge tower; anchorage zone; intelligent inspection system

寒旱地区铁路特大桥桥塔智能巡检系统技术要点

潘凡鲁

中国铁路呼和浩特局集团有限公司建设部，中国 · 内蒙古 呼和浩特 010030

摘　要

本文依托包银高铁磴口黄河特大桥、乌海黄河特大桥工程实践，立足寒旱地区特殊地域条件，针对铁路特大桥桥塔日常运维痛点，开展桥塔智能机器人自动巡检系统专项研究。文章逐层论述系统整体架构、硬件配套选型、智慧软件平台、复杂环境适配、设备联调集成、一体化协同运维等核心技术内容。对比传统人工作业模式，总结智能巡检的应用价值与技术创新，有效弥补人工巡检短板，可为寒旱地带及全国同类铁路特大桥桥塔智能监测、病害防控与精细化养护工作，提供实用技术参考与工程应用依据。

关键词

铁路特大桥；桥塔；锚固区；智能巡检系统

1 引言

我国寒旱地区高铁特大桥梁分布广，斜拉桥桥塔和拉索锚固区长期处于强风沙、极端温差、冻融循环等恶劣环境之中，结构锈蚀、混凝土开裂、涂层脱落等病害频发。传统的人工巡检存在着高空作业风险大、检测效率低、缺陷识别精度差、运维数据碎片化等弊端，不能满足现代铁路桥梁全生命周期养护的要求。

2 智能巡检系统总体架构设计

铁路特大桥桥塔智能巡检系统根据寒旱地区环境特点和桥梁运维的实际需要，以可靠性、适应性、扩展性、安全性为设计准则，采用硬件设备层、软件控制层、平台应用层三级分层结构，采用边缘计算和云端协同相结合的方式，各个层次之间通过标准化接口进行数据交换和指令传递，形成环境感知、设备控制、缺陷识别、数据分析、养护决策的全过程闭环管理，完全满足桥塔锚固区复杂检测要求。

3 系统核心硬件配置及技术要点

硬件设备的环境适应性以及运行稳定程度，都是铁路特大桥桥塔智能巡检系统落地应用的前提。根据桥塔结构尺寸、锚固区检测范围、寒旱地区环境条件等来确定核心硬件的选型及加强改造措施，对桥梁特殊工况提出相应技术参数和结构设计要求。

第一种垂直轨道爬行器。作为巡检系统移动平台的配套 44m 铝合金齿条轨道，用化学锚栓和高强度螺栓固定在

【作者简介】潘凡鲁（1972–），男，中国山东阳谷人，硕士，高级工程师，从事铁路工程建设、土建工程、智能建造、建设管理研究。

桥塔塔壁上，轨道安装垂直度偏差小于 2mm，保证全行程平稳运行。爬行器使用伺服电机驱动，配有高精度位移传感器，行走定位精度 ≤ ± 5mm，装有机械式防坠器、激光防碰撞传感器、过冲防护装置，具有断电自锁、紧急制动功能。机身全密封防尘设计、接口处加装防尘密封圈、优化抗风偏移控制算法，在 10 级大风下也能保持正常行驶，采用锂电池和市电双路供电模式，具备自动充电和低电量返航功能，可以满足全天候不间断巡检的要求。

第二，多自由度协作机械臂。搭载 6 轴高性能协作机械臂，负载 10kg，重复定位精度达到 ± 0.03mm，最大臂展 1.4m，可以全方位覆盖桥塔锚索锚固区、混凝土结合面、锚头连接件等关键检测点位。机械臂使用轻质合金材料，表面喷涂抗紫外线、耐腐蚀的涂层，减少低温下部件的磨损，内部装有高精度的光电传感器和运动控制算法，可以自由调节俯仰、旋转的角度，适合狭小空间、多角度近距离拍摄，消除检测盲区。

第三，高清图像采集设备。选择工业级 400 万像素高清透雾球机，装有 30 倍光学变焦镜头，具有宽动态、强光抑制、自动补光等功能，在阴天、沙尘、逆光、昏暗塔内等环境下可以采集到高清图像。设备集成自动镜头清洁模块，用喷淋、除尘装置定期清理沙尘污渍，防止镜头被污染影响检测精度；防水等级达到 IP66，具有防潮、防冻、防结露的能力，适合高湿度、低温结霜的桥塔内部环境。

第四，为辅助配套硬件。包括工业级无线通信模块、边缘智能网关、恒温控制柜、各种类型的传感器等。通信模块支持 WiFi、4G 多链路冗余传输，在信号弱的地方加定向中继天线来保证高清视频和控制指令的及时传输，边缘网关用 ARM+Linux 架构，有 0.5T 本地算力，可以做 AI 边缘端的实时推理，密封式控制柜配加热除湿、恒温调节装置，能抵御极端低温给电气元件造成的伤害，温度、湿度、信号强度、电机负载等状态传感器全域布置，随时采集设备运行参数，提早发出故障警报。

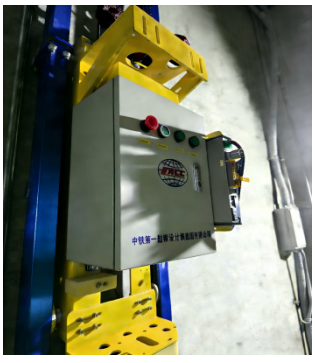


图 1 轨道及轨道爬行器

4 软件系统功能与智能识别技术要点

4.1 核心软件功能模块

软件系统采用微服务架构进行开发，模块化设计方便后期的功能升级和设备扩展，主要功能包含自动化巡检、人工远程控制、设备状态监控、数据存储分析这四个部分。自动巡检功能可以自定义巡检路径、检测点位、拍摄参数和巡检周期，系统按照预设的程序自主完成爬行器移动、机械臂姿态调整、图像采集、缺陷识别、数据存储全流程作业，单次桥塔锚固区巡检时长控制在 2 小时以内，比人工巡检效率提高 3 倍以上 [1]。远程手动控制功能支持运维人员实时操作设备，利用高清实时视频画面对机械臂的角度、镜头的变焦等进行手动调节，对锈蚀、裂缝等重点区域进行详细拍摄和反复检查，满足应急排查、专项检测等个性化作业的要求。设备状态实时监控模块用仪表盘对电池电量、电机温度、信号强度、设备位置等运行参数进行可视化展示，使用红黄绿三级预警，参数异常时自动弹窗、声光报警，同步记录故障信息，给设备检修提供数据支持。数据管理与分析模块具有大容量本地离线存储和云端备份功能，按照时间、区域对巡检视频和图像资料进行分类存储，可以实现视频回放、帧截图、多周期图像对比等功能，并且能够自动产生缺陷统计报表、巡检工作报告等，可以快速导出 PDF、Excel 格式的文件，符合铁路养护档案管理的要求。

4.2 AI 缺陷智能识别技术

系统融合深度学习算法，用 YOLOv8 模型建立双层 AI 识别系统，采用边缘端初步筛查加云端精准复核的方式，保证缺陷识别的效率和准确性。在边缘端部署轻量级的算法模型，对采集到的图像做快速分析，初步识别出疑似病害区域；云端用高精度模型二次判断，确定出缺陷种类、位置、大小。AI 识别算法经过寒旱地区桥梁样本数据专项训练，可以准确识别出铁路桥塔常见的病害，即锚具锈蚀、混凝土表面裂纹、防护涂层脱落、锚头螺栓松动、构件风化剥落等典型缺陷，最小可以识别出 0.5mm 级的细微裂缝，整体识别准确率达到 95% 以上。针对西北沙尘天气造成的图像模糊、逆光偏色、低温画面噪点等状况，内置图像降噪、对比度增强、沙尘滤波预处理算法，改善了复杂工况下的识别稳定性。系统还具有缺陷历史数据对比分析的功能，可以自动标记出缺陷扩大、恶化的区域，对病害的发展速度进行量化，为结构状态的评价提供数据支持。

5 极端环境适配与系统安全关键技术

5.1 寒旱地区环境适配技术

根据西北高铁沿线极端环境的特点，系统制定全方位的防护方案来解决低温、风沙、强风、信号弱这四个问题。抗低温上，所有电气元件使用宽温域工业级器件，配有电池热管理系统和设备恒温防护壳，用加热模块控制柜体及设备温度，防止低温卡顿、电池亏电、线路老化等状况发生，保证 -30℃极端低温环境下稳定工作 [2]。抗风沙时全设备采用密封防尘结构设计，转动部分、接口处加装防尘密封件，镜头自动清洁、机体防尘涂层技术，减小沙尘堆积和磨损，抗强风时优化轨道固定结构，使用 8.8 级高强度螺栓和化学锚

栓加固，结合抗风姿态控制算法，抑制大风天气设备晃动，保证拍摄画面稳定和运行安全。通信适配上使用双链路冗余通信方案，工业 WiFi 为主、4G 为备用，信号切换没有延迟、不会中断；增设离线缓存机制，在网络中断的时候可以自动保存巡检数据，在网络恢复之后可以自动同步上传，彻底解决了偏远山区信号不稳定的问题。

5.2 系统安全与冗余设计

为了满足铁路设备高可靠运行的要求，从硬件、软件、操作三个角度进行安全防护和冗余设计。硬件上采用双机备份的驱动电机方案，主设备出现故障的时候备用设备可以立刻完成切换工作，防坠落、防碰撞的双重安全保护机制联动起来，机械式的防坠器能够瞬间锁定，激光和超声波结合使用来探测障碍物，从而避免发生设备的碰撞或者坠落的情况[3]。软件层面设置指令重发、异常捕捉、故障自愈等机制，对通信超时、数据溢出、程序卡顿等常见问题预先设置处理办法，使用 AES256 数据加密传输和存储，并且用 RBAC 分级权限来区分管理员、运维人员、观察员的操作权限，防止误操作以及数据泄露。从结构安全角度出发，利用有限元仿真计算方法对强风、低温、荷载耦合作用下轨道及支架的应力情况进行模拟，保证固定结构的承载力可以满足长期运行的要求，从根本上消除设备脱落、结构变形等安全隐患。

6 系统集成调试与桥梁运维协同应用

6.1 集成安装与分段调试

桥塔智能巡检系统采用模块化集成安装的方式，在乌海黄河特大桥 44#、45# 桥塔上完成永久安装，轨道、爬行器、机械臂、控制柜分步安装，严格控制安装精度和结构牢固性[4]。系统调试分为实验室调试和现场调试两个阶段，在实验室阶段对设备进行低温、沙尘等工况的模拟实验，完成算法优化、设备联调、路径规划测试；在现场阶段进行电力接入、网络联调、全流程自动巡检试验，根据现场环境调整运行参数，迭代升级操作界面和预警阈值，使设备长时间保持稳定工作状态，整体设备稳定运行率大于 98%。

6.2 与桥梁健康监测系统协同融合

桥塔智能巡检系统不是独立存在的，可以和铁路大桥原有的桥梁健康监测系统深度集成，形成力学监测和视觉检测相结合的运维模式。采用标准化协议对接健康监测平台，使索力、混凝土应变、结构位移等力学监测数据和巡检图像数据联动采集。当监测系统发现结构应力异常、索力超限时，系统就会自动启动定点精确巡检，去查找周边结构表观上的问题；巡检时发现有裂缝、锈蚀等病害，就立即提高周边测点的监测频率，一直跟踪结构的力学状态改变情况。双系统数据融合分析可以实现表面表观缺陷和内部结构受力状态的关联判断，准确地找出环境侵蚀、结构受力等病害诱因，克服单一检测方式的不足之处，使桥梁健康状况评价更全面、更科学，给养护方案的制定赋予了两方面的数据支撑[5]。

7 结语

铁路特大桥桥塔锚固区结构复杂、环境恶劣，属于铁路桥梁养护管理的重点难点。智能巡检系统依靠机器人技术、AI 视觉识别、边缘计算和环境适应性技术，创建起一套集自动化作业、智能化识别、数字化管理、协同化运维为一体的综合解决办法。经过合理的设计架构、定制化的硬件配置、严格的环境防护、完备的软件功能，很好地解决了传统人工巡检安全风险高、效率低、精度差、数据碎片化等问题。目前，桥塔智能巡检系统在西北寒旱地区高铁特大桥上已经得到了成功的实施和验证，技术成熟稳定、应用效果好。

参考文献

[1] 老关.无人机智能巡检为桥梁管养注入“空中动能”[J].公路交通技术,2026,42(01):223.

[2] 李斐,阮小丽,董彦,周雄才,李睿,涂飞达.桥梁施工阶段无人机智能巡检技术研究[J].无人机,2026,(01):87-90.

[3] 黎伟捷,朱尧于,林晋镪,刘涛,陈伟泽.BIM+GIS+IoT平台在大跨径悬索桥智能巡检中的应用研究[J].土木建筑工程信息技术,2025,17(S1):163-169.

[4] 丁泉.基于无人机巡检的桥梁表观病害智能识别方法[J].工程技术研究,2025,10(21):225-227.

[5] 秦勇,孟凡腾,张紫城,孟彤,刘鹏帅,徐礼前,崔京,仇宁海,于重重,王志鹏,秦法波,文琦,钱利文.轨道交通基础设施自主无人机智能巡检体系框架及其技术发展综述[J].北京交通大学学报,2025,49(05):145-175.