

城市轨道交通安全监测系统研究

马文胜¹ 丁金昕² 张冠科¹ 李兆森¹ 杨军辉¹

1. 郑州市轨道交通设计研究院有限公司 河南 郑州 450000

2. 国机工业互联网研究院(河南)有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 随着郑州市轨道交通网络的快速扩张与运营里程的不断增长,保障其庞大地下与高架结构的长周期运营安全已成为城市公共安全管理的核心议题。安全监测系统作为感知风险、预警隐患的“神经中枢”,其体系的完善性与技术的先进性直接关系到整个线网的安全与可靠。本文以郑州市城市轨道交通为研究对象,首先阐述了安全监测的背景与极端重要性,继而系统剖析了监测系统的核心构成、技术体系及标准依据。结合郑州市已发布的《运营突发事件应急预案》、动态检测技术试点、大规模第三方监测项目等实践,分析了当前监测体系的特点与成效。同时,基于行业发展趋势,指出了系统在数据融合、智能预警、全生命周期管理等方面面临的挑战。最后,提出了构建更智能、更精准、更高效的新一代结构安全监测体系的优化建议与未来展望。

关键词: 城市轨道交通;安全监测;郑州地铁;智能运维

1 引言

城市轨道交通是现代化都市的交通动脉,其安全运营关乎千万市民的出行与社会经济的稳定运行。轨道交通结构,包括隧道、高架桥梁、车站、轨道等,在长期列车动荷载、地质环境变化、周边工程施工及自然灾害等多重因素影响下,会产生沉降、收敛、裂缝、渗漏等病害,威胁运营安全。因此,建立一套科学、实时、精准的结构安全监测系统,实现从“被动抢险”到“主动预防”的转变,是保障轨道交通可持续发展的必然要求。在此背景下,深入研究其结构安全监测系统的构建、应用与优化,具有重大的现实意义和理论价值。

2 郑州市轨道交通发展概况与安全监测挑战

截至2025年底,郑州地铁已开通运营十余条线路,运营总里程显著增长,日均客流量巨大。网络化运营带来了更高的安全复杂度与管理难度。在极端天气下,结构防洪抗灾能力、监测预警响应机制等方面存在的短板,郑州市政府及运营单位高度重视安全体系建设,相继出台并强化了《郑州市城市轨道交通运营突发事件应急预案》等一系列法规与标准,并将结构安全监测提升至前所未有的战略高度。

3 安全监测系统的重要性与核心目标

安全监测系统是通过布设传感器网络、利用数据采集与传输技术、结合数据分析模型,对轨道交通土建结构的变形、内力、环境等参数进行长期、连续或定期观测与评估的系统。其核心目标在于:(1)预防事故:通过实时感知结构状态微小变化,在病害萌芽或发展初期及时预警,避免累积成重大险情。(2)评估健康:为隧

道、桥梁等结构建立“健康档案”,科学评估其服役状态与剩余寿命,指导养护维修决策。(3)保障运营:确保轨道交通设施始终处于可控、安全的状态,为每日数百万乘客的平安出行提供基础保障。(4)支持决策:为运营单位的维修计划、资源调配以及政府的宏观安全管理提供数据支撑和决策依据。

4 安全监测系统的构成与技术体系

一个完整的城市轨道交通安全监测系统通常由感知层、传输层、数据层、应用层及标准规范体系共同构成。

4.1 感知层(传感器网络)

感知层是系统的“感官”,负责采集各类物理、化学参数。主要监测项目包括:

变形监测: 竖向位移(沉降)、水平位移、隧道净空收敛、桥梁挠度、建筑倾斜、变形缝张量等。常用仪器包括静力水准仪、全站仪、测斜仪、收敛计等。

结构内力监测: 混凝土应变、钢筋应力、土压力等。常用光纤光栅传感器、振弦式传感器等。

环境与病害监测: 裂缝宽度与扩展、渗漏水量与水压、地下水位、振动加速度等。常用裂缝计、渗压计、水位计、加速度传感器等。

几何状态监测: 轨道轨距、水平、高低、轨向,以及隧道断面形状。采用轨道检查仪、车载动态检测设备、三维激光扫描技术等。

4.2 传输层与数据层

传输层负责将感知层采集的数据稳定、可靠地传输至数据中心,通常采用有线(工业以太网、光纤)与无线(4G/5G、LoRa)相结合的方式。数据层则对海量监

测数据进行接收、存储、清洗、管理，并建立结构安全专题数据库。

4.3 应用层（监测预警平台）

应用层是系统的“大脑”，实现数据可视化、智能分析、状态评估与预警发布。其核心功能包括：

数据可视化与综合展示：在统一的GIS+BIM平台上，集成展示所有监测点的实时数据、历史曲线、空间分布。

智能分析与预警：基于阈值法、趋势分析法、机器学习模型等，对异常数据进行自动识别与多级预警。

结构健康评估与预测：利用有限元模型修正、数据同化等技术，评估结构安全状态，预测未来变形趋势。

应急联动与决策支持：与《郑州市城市轨道交通运营突发事件应急预案》系统联动，在预警触发时自动启动相应应急流程，为指挥调度提供支持。

4.4 标准规范体系

系统的建设与运行需严格遵循国家及行业标准，主要包括：《城市轨道交通工程监测技术规范》（GB 50911-2013）、《城市轨道交通结构变形监测技术规范》（CH/T6007-2018）、《城市轨道交通运营期结构安全监测技术规程》（DBJ-T13-336-2020）、《城市轨道交通运营线路结构监测技术规范》（DB45/T 2127-2020）等，对监测内容、方法、精度、频率等做出了更具体的规定。

5 郑州市轨道交通结构安全监测的实践与应用

近年来，郑州地铁在结构安全监测方面进行了大量探索与实践，体系日趋完善。

5.1 政策与机制建设

郑州市政府于2026年初印发了新版《郑州市城市轨道交通运营突发事件应急预案》，明确了运营单位与政府部

门的双重监测责任，要求建立健全监测体系，并详细规定了监测内容、预警分级与信息报告流程^[1]。这为监测系统的运行提供了坚实的制度保障。同时，河南省交通运输厅也持续推进安全风险分级管控和隐患排查整治专项行动，要求加强设施设备全生命周期管理，充分利用监测手段实现“事前预防”。中国城市轨道交通协会在《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》中强调：建立基于BIM的综合运维监管系统，可直观、快速、全面的获取设备运行状态数据，进行设备的健康管理和寿命预测，结合设备定期维护计划和流程，使设备得到适当的维修保养^[2]。

5.2 常态化监测项目开展

郑州地铁运营分公司定期组织开展大规模、专业化的第三方监测。例如，“郑州市轨道交通2023-2026年地铁保护区第三方监测入围项目”及“2026-2028年度运营期监测项目”，覆盖了全线网已运营线路，监测内容涵盖竖向位移、水平位移、隧道收敛、桥梁挠度、三维激光扫描、地质雷达探测等，形成了覆盖全面、项目完整的长期监测网络。

5.3 郑州轨道交通安全监测系统研发

2022年，郑州地铁启动本系统的研发工作，基于BIM+GIS+IoT数据，构建高保真的轨道交通结构数字孪生体。利用大数据、人工智能技术，开发能够学习历史数据、融合多物理场模型的智能预警算法，实现从“阈值报警”到“趋势预测”和“风险画像”的跨越。采用边缘计算处理实时性要求高的数据，云端进行大数据存储与复杂模型分析，形成高效协同的处理体系，减轻网络负载，提升响应速度。围绕郑州地铁结构安全生产管理流程，整合相关系统资源，实现运维管理的信息化、可视化、智慧化。



图1 领导驾驶舱管理界面



图2 健康管理中心界面

本系统主要功能包括：运行监测中心、健康管理中心和维修生产中心。运行监测中心将各专业运行监测数据与数字资产地图相结合，提供设备状态监测、设备报警处置状态、设备预警和报警、可视化数据统计分析等功能。健康管理中心提供设备健康状态、设备寿命预估、设备故障预测等功能，将获取的健康分析数据与数字资产地图相结合，在郑州地铁一张图中呈现数据分析结果，更好的辅助相关人员进行设备的巡检，隐患排查。维修生产中心提供维修类型占比、故障类型占比、备品备件、维修概况、维修状态等功能，在郑州地铁一张图中呈现当前设备维修实时状态，便于维修管理人员对整体把控决策维修计划，实时跟踪关键故障设备。

6 未来与展望

未来的郑州轨道交通安全监测系统，将朝着“全息感知、智能诊断、自主决策、协同联动”的方向发展。通过集成北斗高精度定位、量子传感、人工智能等前沿技术，实现对基础设施毫米级甚至更细微变化的实时感知与智能诊断。系统将成为保障郑州超大规模轨道交通

网络安全、高效、绿色运营的智慧基石，为郑州建设国家中心城市提供坚实的安全支撑。

结束语

郑州市城市轨道交通安全监测系统经过多年建设，已形成了以政策法规为引领、以常态化第三方监测为基础、以技术创新为驱动的基本框架，并在动态检测、灾后评估等实践中取得了积极成效。然而，面对网络化运营的复杂性和极端灾害的挑战，系统在数据智能融合、预警模型精度和全生命周期管理等方面仍有提升空间。未来，应继续推动监测技术与人工智能、数字孪生等深度融合，构建智慧化的监测预警与运维决策体系，从而实现轨道交通结构安全的可知、可防、可控，确保郑州市轨道交通这一城市生命线的长期安全与稳定运行。

参考文献

- [1] 郑州市人民政府. 郑州市城市轨道交通运营突发事件应急预案 2026 郑政办〔2026〕9
- [2] 中国城市轨道交通协会《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》2020