

# Structural Deformation Monitoring and Safety Management in Urban Rail Transit Operation

Rui Shao<sup>1</sup> Yang Zhang

1. Beijing Urban Construction Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100000, China

2. Wenzhou Xingfu Rail Digital Intelligence Technology Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China

## Abstract

The research focuses on the core issues of structural deformation monitoring and safety management during the operational phase of urban rail transit. It elaborates on the necessity of these measures in ensuring operational safety and extending the service life of structures. Traditional manual, automated, and intelligent monitoring methods for structural deformation, along with their operational processes, are analyzed. A safety management system is then established, incorporating risk classification and control, closed-loop hazard management, prevention and emergency response, and information-driven empowerment, aiming to achieve precise control over structural deformation risks.

## Keywords

Urban rail transit; Operational period; Structural deformation monitoring; Safety Management

## 城市轨道交通运营期结构变形监测及安全管理

邵瑞<sup>1</sup> 张阳<sup>2</sup>

1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 中国·北京 100000

2. 温州幸福轨道数智科技有限公司, 中国·浙江 温州 325000

## 摘要

研究聚焦城市轨道交通运营期结构变形监测和安全管理的核心问题, 阐述其在保障运营安全, 延长结构使用寿命等多方面的必要性。对结构变形常见的传统人工、自动化、智能化监测方法和运作流程进行分析, 并构建起风险分级管控、隐患闭环治理、防控应急处置和信息化赋能的安全管理体系, 达到精准管控结构变形风险目标。

## 关键词

城市轨道交通; 运营期; 结构变形监测; 安全管理

## 1 引言

当今城市化进程加快, 城市轨道交通凭借环保、便捷和高效等优势, 成为缓解城市交通拥堵问题, 支撑城市发展的重要基础设施。但轨道交通长期受到复杂地质环境、列车荷载反复作用和周边人类活动多因素影响, 容易产生沉降、位移和裂缝等变形问题<sup>[1]</sup>。若未及时采取有效的监测和安全管理措施, 可能会直接威胁运营安全, 引发重大安全事故。当前部分线路也存在监测方法适配性不够, 安全管理碎片化等问题, 较难满足城市轨道交通精细化运维需求。基于此, 研究围绕城市轨道交通运营期变形监测和安全管理开展研究, 探索科学的监测和安全管理方法, 为轨道交通运维安全水平提升提供助力。

## 2 城市轨道交通运营期开展结构变形监测和安全管理必要性分析

### 2.1 保障运营安全的核心需求

城市轨道交通是公共交通骨干, 其运营安全是不可逾越的红线。而保障运营安全的重要前提是结构稳定性, 变形监测和安全管理是保持结构稳定性的重要措施。城市轨道交通封闭性强、运行频次高、载客量大, 若结构异常变形未及时处理, 易引发结构坍塌、列车脱轨等灾难性事故, 不仅造成人员和财产损失, 还会阻碍城市交通网络, 影响社会运转。变形监测可实时捕捉结构沉降、位移和裂缝扩展等微小变化, 安全管理则基于监测数据及时防控, 从源头避免事故风险, 保障乘客生命财产安全和轨道交通稳定运营。

### 2.2 延长结构使用寿命的支撑

轨道交通工程投资规模大、建设周期长, 结构服役寿命与工程投资效益和长期运维质量直接相关, 采取科学有效的监测和管理措施, 可延长结构服役寿命。在轨道交通

【作者简介】邵瑞(1991—), 男, 中国吉林松原人, 硕士, 工程师, 从事岩土勘察与工程监测研究。

结构长期运营中,受环境侵蚀、荷载反复作用等因素影响,结构会产生损伤累积与性能劣化。若发现和处置不及时,小隐患会变成结构性病害,缩短结构服役寿命,导致维修改造成本增加。通过常态化的结构变形监测,精准捕捉早期劣化信号与变形隐患,再采用科学管理策略开展针对性修复和加固,可减缓结构损伤进程,延缓老化速度,在获得最大化投资效益的同时,降低长期运维压力。

### 2.3 应对复杂环境的必然要求

轨道交通路线常穿越城市核心区域,周边环境复杂多变,内外因素易引起结构变形,开展结构变形监测和安全管理是应对复杂工况的重要保障。外部环境中,人类活动如地面超载、过量开采地下水等,以及自然因素如地质沉降、暴雨等,会破坏结构周边受力平衡致其变形;内部因素如施工遗留缺陷、结构材料老化等会加剧变形风险。不同因素相互交织,影响复杂,仅靠经验难准确判断风险。开展变形监测可实时追踪各种因素导致的结构响应,安全管理则通过识别、评估和管控风险,构建动态调整机制,及时规避环境诱发的风险,确保结构应对复杂工况<sup>[2]</sup>。

### 2.4 规范行业运维的重要保障

在轨道交通行业快速发展背景下,运维规范化、标准化成为必然趋势,开展变形监测和安全管理是顺应此趋势的重要措施。我国轨道交通行业出台一系列运维规范,明确监测结构变形的频率、指标阈值、安全管理流程等要求。实际工作中落实结构变形监测和安全管理,既符合行业要求,也是推动运营管理标准落地的实践措施。通过构建统一监测数据标准、管理流程和责任体系,规范化开展运维工作,可提升行业整体运维水平。同时,监测和管理中积攒的数据和经验,能为优化行业标准、创新运维技术提供支持,助力轨道交通行业可持续、高质量发展。

## 3 城市轨道交通运营期结构变形监测方法

城市轨道交通有多样化的结构类型,工况也比较复杂,需要根据结构特性和监测需求差异,选择合适的监测方法,达到精准捕捉桥梁、车站、隧道等结构变形问题,为安全管理提供可靠的数据支持。

### 3.1 传统人工监测方法

传统人工监测方法,优势是成本适中、精度可控,仍然是轨道交通局部重点区域变形监测中的补充手段,适合定期复核和校准关键点位。水准测量适合监测车站站台、隧道道床等平面结构的沉降监测,通过水准点的布设,构建起完整的监测网络,定期对高程变化进行测量,使毫米级的沉降也能被精准捕捉。全站仪测量,适合监测车站立柱、桥梁墩台的位移和倾斜检测,通过坐标定位对空间位置变化进行追踪,适配曲线隧道、异形车站等复杂结构。裂缝尺检可监测车站墙体裂缝、隧道衬砌裂缝,对宽度和扩展速率进行直接测量,为跟踪病害结构提供直观数据。图1为传统人工监测

方法流程图。

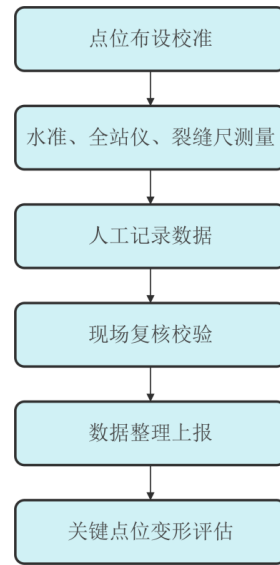


图1 传统人工监测方法流程图

### 3.2 自动化监测方法

自动化监测方法能完成数据的实时采集、传输和预警,满足轨道交通24小时不间断运营需求,也是核心区段常态化监测的主流方法。全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)可对地面车站、高架桥梁的整体位移进行实时监测,在屋面、墩顶等布设终端,对垂直和水平的微变形进行实时捕捉,还可应对温度、风等自然环境影响。静力水准监测,是隧道区间沉降监测中的常用方法,将传感器间隔布设在侧壁,根据连通管原理,实现沉降差值的自动采集,达到分钟级的数据传输和连续监测。光纤传感与桥梁主梁、隧道衬砌等适配,在结构中嵌入或粘贴传感器,对变形和应力变化实时捕捉,精准获取受力异常隐患<sup>[3]</sup>。

### 3.3 智能化监测方法

智能化监测基于新技术,达到大范围 and 高效监测的目标,较好弥补了传统人工和自动化监测方法的局限性,适合在应急监测与特殊结构场景中使用。无人机可搭载高清设备航拍地面线路、高架桥梁,并进行建模,对比模型差异,快速找到整体变形问题,使监测大跨度结构的效率提升。三维激光扫描可对车站的复杂节点、主体等进行扫描,借助云数据重建模型,对空间变形特征进行分析,并对异形结构的细微变化进行捕捉。雷达检测关注隧道和周边的岩土体,可以发挥穿透探测追踪作用,实时监测围岩沉降,为评估软弱、富水地层稳定性提供支持。图2为智能化监测方法运作流程图,见下图。

## 4 城市轨道交通运营期结构安全管理

监测数据是城市轨道交通运营期结构安全管理的核心支撑,需构建起风险预判、隐患治理、防控应急、信息化赋能的全流程管理体系,实现精准管控结构变形风险,保障

线路能持续稳定运营。

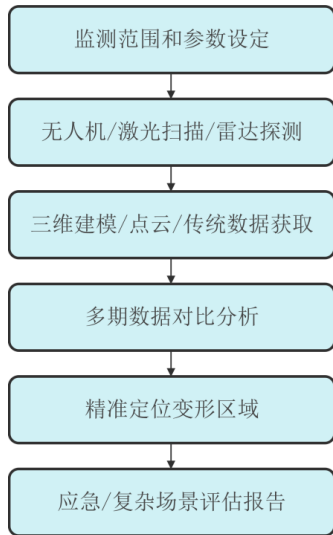


图2 智能化监测方法运作流程图

#### 4.1 风险分级管控方法

在安全管理中，风险分级管控是前置环节，需结合隐患情况和监测数据科学划分风险等级，实现精准化和差异化管控，避免管控疏漏与资源浪费。风险分级基于结构变形监测数据、运营环境复杂程度、结构病害程度等核心指标，参照行业标准划分，具体分为四个等级：一是一般风险，变形小且稳定、无明显病害，采取常规定期监测，每月更新风险评估报告；二是较大风险，变形缓慢、有轻微病害，每周监测1-2次并派专人跟踪；三是重大风险，适用于病害扩大、变形加速区段，立刻加强监测和现场巡查，暂停高风险区域周边施工；四是特别重大风险，变形突变且有坍塌隐患，立即启动应急响应，疏散人员、关停对应线路。同时，明确不同风险等级责任主体，确保管控措施有效落地。

#### 4.2 隐患排查和闭环管理方法

防范风险升级主要通过排查隐患和闭环管理，构建标准化流程，实现从识别到销号的全链条管控，确保隐患及时清除。隐患排查分日常、专项、定期三种模式。日常巡查由运维人员每天目视检查桥梁、车站、隧道等核心结构，重点排查构件破坏等显性隐患；专项排查针对极端天气等特殊工况，重点排查外部因素致结构变形；定期排查要求每季度与专业机构联合，基于监测数据全面排查，深入研判隐性隐患。排查出的隐患要及时登记，明确整改责任人、措施和时限，建立电子台账并定期跟踪进度。整改完成后需第三方验收，合格后销号。对难整改、短时间无法清零的隐患，制定临时防控和长期整改方案并跟踪落实，直至消除隐患，形成识别、登记、整改、检验、销号的闭环管理机制<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 防控和应急处置方法

防控和应急应当坚持预防为主、防治结合的原则，在制定预防性措施遏制风险滋生的同时，也需持续完善应急机制，更好应对突发情况，使损失最大程度降低。根据不同风

险源，需采取针对性的预防性防控措施，比如：结构自身病害，可采取裂缝封闭注浆、粘贴碳纤维布等技术修复，使结构承载力提高；地基沉降引起的变形，可通过微型桩支护、注浆加固方式稳定地基，减缓沉降速率；周边施工外部风险，可签订管控协议，要求施工单位采取防护措施。

应急处置需要完善应急预案体系，对坍塌风险、结构开裂、变形超标等多种场景制定专项应急预案，明确应急响应流程、人员分工和处理措施。另外还需配备交通疏导工具、监测设备、加固材料、应急队伍等，定期开展应急演练，促使应急处置水平提升。一旦发生突发事件，能更快启动对应的等级应急预案，快速组织人员疏散，开展应急监测，实施临时加固。

#### 4.4 信息化管理方法

安全管理效率提升的重要方法之一是开展信息化管理，通过一体化平台的搭建，达到整合数据和可视化管控目标，为管理决策的科学性提升提供支持。图3为城市轨道交通结构安全信息化管理平台示意图。平台搭建完成后，可对变形监测数据、排查隐患记录、应急资源、整改情况等各种信息进行整合，达到实时上传、查询和共享数据目标。平台同时还具备数据可视化功能，借助模型、图表等可对结构的变形趋势、风险等级、隐患分布等核心信息有直观了解，使管理人员能对安全状态进行实时掌握<sup>[5]</sup>。另外，还将风险预警算法嵌入平台，基于监测数据，对风险等级开展自动研判，在系统发现异常情况后会将预警信息及时传递给对应责任人。平台也能实现运维流程线上化，登记隐患、审批整改措施、验证销号等多个环节都可以线上完成，促使安全管理效率提升。



图3 城市轨道交通结构安全信息化管理平台

### 5 结语

城市轨道交通运营期结构变形监测和安全管理是保障线路稳定运营的重要措施，不同监测方法的适配场景不同，需要结合场景差异选择。安全管理体系则需以监测数据为基础，形成多环节协同管理机制。未来可持续强化智能化监测技术和信息化管理平台的深度融合，对风险预判算法进行优化，加快安全管理朝着高效、精准模式升级。

## 参考文献

- [1] 任飞.城市轨道交通运营期结构变形监测技术及实践[J].交通科技与管理, 2025(8):101-103.
- [2] 陈波.多监测技术在地下轨道交通工程中的应用研究[J].测绘通报, 2024(S02):115-121.
- [3] 王芳,张辉映.城市轨道交通安全管理策略研究[J].城市轨道交通研究, 2024, 27(5):10017-10018.
- [4] 张磊,李振国.基于双重预防机制的城市轨道交通运营安全实践探索与问题浅析——以重庆轨道交通4号线为例[J].中国安全生产科学技术, 2024, 20(S1):155-160.
- [5] 严晗,程晓卿,马小平,等.基于数字孪生的城市轨道交通主动安全保障系统架构与关键技术[J].铁道运输与经济, 2025(6):170-179.