

自动化监测技术在地铁变形管控中的应用与研究

郭 荃

中铁第六勘察设计院集团有限公司 天津 300131

摘 要：地铁结构长期处于复杂地下环境，各类内外荷载与地质变化容易引发变形病害，影响轨道交通运营安全。本文结合地铁变形的类型与产生机理，系统梳理传统监测模式的运行短板与适配缺陷，依托专业理论搭建完整的自动化监测技术体系，拆解系统架构、设备配置、数据采集与处理的运行逻辑。研究结合地铁运维实际场景，分析自动化监测技术在结构监测、土体监测、动态管控中的具体应用方式，探索技术迭代的优化方向，为地铁变形管控工作的精细化推进提供可行的技术参考。

关键词：地铁变形；自动化监测；监测体系；结构管控；动态管控

引言：轨道交通是城市公共交通体系的核心组成部分，地下隧道结构的稳定状态直接决定线路运营的安全水平。地质环境变化、长期行车荷载与自然环境波动，都会持续诱发地铁结构形变，逐步积累结构性隐患。传统人工监测模式存在作业间断、误差偏大、覆盖范围有限等问题，难以适配现代地铁长效、动态的形变管控需求。依托自动化监测技术完善地铁结构管控体系，弥补传统监测的各类不足，提升结构形变识别精度与管控效率，对保障城市轨道交通稳定运行具备重要的现实意义。

1 地铁变形管控与自动化监测基础理论

1.1 地铁变形产生的主要类型

地铁线路长期处于地下复杂环境中，结构会受各类内外因素影响产生不同形式的变形问题。按照形变表现形式可分为竖向变形与横向变形两类基础形态。竖向变形多表现为结构沉降、不均匀下陷以及局部隆起，大多出现在隧道道床、衬砌结构以及站台底板位置。横向变形以水平位移、结构收敛、侧壁偏移为主，会改变隧道原有断面形态。从形变发展状态区分，包含持续性缓慢变形和突发性瞬时变形，缓慢变形积累周期长，不易被及时察觉，瞬时变形多由外界环境变动引发，具备较强的不确定性^[1]。不同变形类型会对地铁结构稳定性、通行平顺性造成不同程度的影响，是地铁运维过程中需要重点关注的结构问题。

1.2 地铁变形形成的内在机理

地铁变形的产生源于结构受力状态的持续改变，整体受力体系失衡就会引发结构形态变化。地下土层应力分布会随时间出现自然重排，土层固结、岩土质地变化都会对隧道结构产生挤压或牵拉作用。地铁列车往复行驶会带来持续的动荷载，长期往复作用会逐步改变结构原有受力状态，加剧形变累积。周边地层水文环境出

现波动时，土体含水率、土层密实度发生改变，会弱化地层承载能力。结构自身材料老化、衬砌磨损、内部应力松弛等自身问题，也会让结构承载性能逐步下降，促使各类变形问题持续发生并不断发展。

1.3 地铁变形管控的基本内涵

地铁变形管控是围绕地下轨道交通结构安全开展的常态化管控工作，贯穿地铁运营的全周期流程。工作核心是掌握结构形变的发展状态，把控形变演化趋势，规避形变持续扩大引发的结构隐患。管控工作聚焦结构形变的动态变化过程，依托技术手段捕捉形变细微变化，明确结构当前的稳定状态。通过常态化的监测与分析，梳理形变发展规律，为结构养护、病害处理、状态调控提供理论支撑。完整的变形管控可以维持地铁结构的完整性，保障轨道交通运营的稳定与安全，夯实地下交通设施长效运行的基础条件。

1.4 自动化监测技术基础理论

自动化监测技术依托传感检测、数据传输、信息处理等多类技术融合而成，是适配地下结构监测的新型技术模式。技术核心依托物理传感原理，将结构形变的微小物理变化转化为可识别、可记录的数字化信号，可精准捕捉0.01mm级别的细微形变波动。通过固定布设的监测设备持续采集结构状态数据，摆脱人工监测的时段性局限，可实现24h全天候不间断数据采集。结合数据筛选、整理、分析的基础理论，完成海量监测数据的规范化处理，精准捕捉结构形变的细微波动。整套技术理论支撑监测工作实现全天候、连续性的数据采集与状态分析，为地铁变形管控提供稳定、精准的数据支撑，提升地下结构监测工作的精细化水平。

2 地铁变形传统监测模式与现存短板

2.1 地铁传统监测常用技术形式

地铁传统监测工作依托人工测量设备开展,依靠基础勘测技术完成隧道结构形变排查,是地铁运维早期普及的监测手段。常用技术包含水准测量、距离测量、断面测量和定点位移观测等基础方式。水准测量多用于排查隧道道床、底板的竖向形态变化,甄别沉降与隆起问题。距离测量与定点观测主要服务隧道衬砌和侧壁结构,用来判断墙体位移和断面收敛情况。断面测量能够记录隧道整体轮廓形态,对比不同阶段的结构外形差异^[2]。这类技术操作门槛较低,设备便携易操作,长期承担地铁日常结构巡检和状态摸排工作。

2.2 传统监测作业实施流程

传统监测工作拥有固定的实施流程,全部环节依靠人工落地执行。作业前期需要工作人员深入隧道现场,结合隧道结构特征选取合适监测点位,做好点位标记与现场清理工作,保障测量作业顺利开展。作业中期依靠人工手持设备逐点采集数据,手动记录各类测量数值,完成现场数据的初步核对。作业后期对原始数据进行筛选整理,剔除无效数值,统一规整后完成资料归档留存。整套流程步骤繁琐,人力参与度极高,作业质量完全依托工作人员的操作经验与专业水平。

2.3 传统监测模式作业局限

传统监测模式受现场条件、人力状态、作业时间限制,存在诸多不可规避的短板。人工勘测设置固定作业周期,数据采集存在间隔,结构瞬时产生的细微形变无法完整收录。地下隧道作业空间狭小、采光条件差,现场作业环境复杂,人员进场勘测存在一定安全风险。人工读数、记录、整理的全过程容易产生人为误差,降低监测数据的真实精度。长距离、大范围的地铁线路监测需要消耗大量人力物力,作业耗时久,整体工作效率偏低,难以适配高精度、高频次的现代监测需求。

2.4 传统监测适配地铁管控的不足

地铁地下结构形变具备连续演化的特点,外界环境和运营荷载都会持续改变结构状态,传统监测模式难以适配这类动态管控场景。间断采集的模式无法完整还原形变演化全过程,关键形变阶段容易出现数据断层。数据更新速度偏慢,运维人员无法及时掌握结构真实状态,不利于隐患的前置处置。老旧线路、复杂断面的隧道结构存在大量监测死角,人工勘测难以实现全覆盖摸排,难以支撑地铁结构长期、精细化的安全管控工作。

3 地铁变形自动化监测技术体系构建

3.1 自动化监测系统整体架构

地铁变形自动化监测系统为分层级的一体化技术架构,围绕地下结构形变管控需求搭建完整运行体系。整

体架构分为现场感知层、数据传输层、数据处理层和终端应用层,各层级承担专属工作职能。感知层作为前端基础载体,按照每5~10m布设一个监测点位的标准,捕捉隧道结构、周边土体的形变动态信息。传输层承担数据流转工作,打通前端设备与后端平台的信息通道。处理层完成原始数据的规整与解析,筛选有效监测信息。应用层面向运维工作,实现数据可视化展示与结构状态研判。分层设计让整套系统运行逻辑清晰,层级分工明确,可高效适配地铁复杂环境下的形变监测工作^[3]。

3.2 自动化监测传感设备配置形式

传感设备是自动化监测系统的前端核心装置,设备配置结合地铁隧道结构特征与监测需求统筹布设。常用设备包含位移传感器、沉降传感器、收敛传感器及温湿度传感装置,适配地铁各类形变监测场景。设备采用定点固定安装的布设方式,稳固搭载于隧道衬砌、道床、侧壁等关键结构位置。不同类型设备可针对性采集竖向沉降、水平位移、断面收敛等各类形变数据。科学的设备布局能够全面覆盖隧道关键监测点位,保障监测工作的覆盖范围与数据真实性。

3.3 监测数据采集与传输体系

数据采集与传输体系是保障监测连续性的关键环节,支撑整套系统的常态化运转。采集环节依托前端传感设备自主开展,按照预设采集频率持续捕捉结构形变数据,填补人工监测间断作业的缺陷。采集模式支持全天候不间断运行,能够捕捉结构任意时段的细微形变变化。传输体系依托工业网络与物联网通讯技术搭建,采用专线传输模式保障数据稳定流转。数据传输过程设置加密与防干扰机制,削弱地下复杂环境对信号的干扰作用,维持监测数据传输的完整性与稳定性。

3.4 自动化监测数据处理架构

自动化监测数据处理架构承担数据规整、分类、解析的核心职能,是实现精细化监测的重要支撑。架构针对海量原始监测数据开展系统化处理,剔除环境干扰产生的无效数据、异常数据。有效数据会按照形变类型、监测点位、采集时间完成分类归档,搭建规整的数据库体系。系统通过内置运算逻辑梳理数据变化规律,提炼结构形变的波动特征。这套数据处理模式能够深度挖掘监测数据的有效价值,精准反映地铁结构形变的真实状态。

4 自动化监测技术在地铁变形管控的应用拓展

4.1 地铁结构形变持续监测应用方式

地铁隧道主体结构长期埋藏于地下环境,受地层应力、运营荷载、环境因素持续作用,形变问题大多缓慢

滋生、逐层累积,细微变化很难通过传统巡检手段识别。自动化监测依托现场布设的各类传感装置,搭建长效化的数据采集机制,针对隧道衬砌、道床、侧壁以及站台结构开展常态化数据采集。设备按照预设采集频率自主运行,记录结构沉降、断面收敛、水平偏移等关键形变参数,留存完整的结构状态资料。长期不间断的数据记录能够还原形变滋生与发展的完整过程,捕捉短期不易察觉的微小波动^[4]。技术人员可以依托连续化的数据资料掌握结构形变演化规律,精准区分正常形变与异常形变,让地铁结构安全管理摆脱人工巡检周期限制,实现长期稳定的状态把控。

4.2 地铁周边土体变形监测应用形式

地铁线路依托地下土层铺设,土体状态变化会直接作用于隧道结构,影响整体稳定性能。土层固结、水位波动、地层松动都会引发土体形变,改变隧道结构的外部受力条件,逐步诱发衬砌开裂、结构偏移等问题。自动化监测技术可向外延伸监测范围,覆盖隧道沿线地表、地下土层及周边基坑区域。监测设备捕捉土体竖向沉降与水平位移变化,记录地层在不同环境条件下的状态波动。地下土体形变具备极强的隐蔽性,常规巡检难以排查这类隐性隐患。自动化监测手段可以全天候捕捉地层细微变化,积累土层形变数据,总结地层变化规律,为隧道结构防护、地层加固、隐患前置处置提供可靠的数据支撑。

4.3 地铁运营期形变动态管控模式

地铁正式投运后,行车荷载反复作用、环境温度湿度波动、地层应力持续调整,都会让结构形变处于动态变化状态。传统人工监测固定周期的作业模式,无法跟上结构状态的变化节奏,容易造成数据断层和隐患遗漏。自动化监测体系可搭建适配运营场景的动态管控机制,依靠不间断数据更新,实时跟进结构变形状态。系统收录不同行车密度、不同环境工况下的形变数据,积累多场景下的结构变化资料,清晰展现工况变动对结构的影响程度。监测工作可依据实时数据调整管控重心,对形变波动较为明显的区段增加养护频次,优化地铁运营资源分配。动态管控模式摒弃刻板的周期性运维方式,以结构实际形变为依据开展精细化管控,适配地铁

长期运营的安全保障工作。

4.4 自动化监测技术优化发展方向

轨道交通建设规模不断扩大,复杂地质区段、深埋隧道、老旧运营线路持续增多,监测工作面临的环境更加复杂,监测标准也逐步提升。自动化监测技术可从硬件性能、数据处理、系统适配等多个维度完成优化升级。监测硬件设备可强化环境适应能力,提升传感灵敏度与抗干扰性能,降低地下潮湿、粉尘、电磁干扰带来的数据偏差,提升原始数据采集质量。数据处理环节可优化运算逻辑,细化数据筛选与分析标准,强化微弱形变、长周期累积形变的识别能力。监测系统可深化信息化融合程度,优化数据归档、查询、分析流程,提升监测数据的利用价值。技术迭代能够持续完善地铁变形监测体系,提升结构管控的精细程度,助力轨道交通工作高质量开展^[5]。

结束语

地铁结构形变具备隐蔽性、持续性、动态性的特点,传统监测模式难以满足现代地铁精细化的工作要求。自动化监测技术依托完整的软硬件架构与数据处理体系,有效弥补人工监测的各类短板,实现地铁主体结构及周边土体形变的常态化监测。通过搭建动态化管控模式,深化监测技术应用场景,持续优化监测设备与数据处理逻辑,能够精准把控地铁结构形变发展状态,强化轨道交通工程结构安全管控能力,为地铁常态化安全运营提供稳固的技术支撑。

参考文献

- [1]邢泽远,范鹏程.自动化监测技术在地铁隧道变形监测中的应用[J].中国高新科技,2026(9):102-104.
- [2]刘建刚.自动化监测技术在地铁隧道变形监测中的应用研究[J].工程技术研究,2024,9(20):66-68.
- [3]王文龙,居龙泉.自动化监测技术在地铁隧道稳定性评估中的应用[J].智能城市,2025,11(11):45-48.
- [4]程胜一,刘飞.电水平尺自动化监测技术在地铁结构变形中的应用[J].城市道桥与防洪,2025(10):320-324.
- [5]屈城.自动化监测技术在运营地铁隧道中的应用[J].运输经理世界,2024(1):1-3.