

Optimization and Engineering Application of Settlement Monitoring Technology along the Subway Shield Construction Line

Lei Zhang¹ Yulong Yang²

1. PowerChina Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing, 100070, China
2. Northwest Survey and Design Institute of China Electric Power Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

Subway shield tunneling, which traverses densely built urban areas and complex geological conditions, is prone to pipeline ruptures and structural cracks due to settlement along the route. Settlement monitoring serves as the primary safety measure. This study investigates optimization strategies for traditional monitoring technologies, addressing issues such as insufficient accuracy, data delays, and incomplete coverage. By refining the monitoring index system, optimizing sensor deployment, developing real-time data processing models, and enhancing early warning mechanisms, a precise and effective settlement monitoring framework is established. Using a subway shield tunnel section as a case study, the optimized monitoring technology achieved a 30% improvement in accuracy and reduced early warning response time to within 5 minutes, preventing three instances of excessive settlement. These findings provide technical support for settlement control in subway tunnel construction, thereby enhancing the safety of urban underground engineering projects.

Keywords

rail transit shield; construction line; settlement monitoring technology; optimization engineering strategy

轨道交通盾构施工沿线沉降监测技术优化与工程应用

张磊¹ 杨玉龙²

1. 中电建铁路建设投资集团有限公司, 中国·北京 100070
2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

轨道交通盾构施工由于穿越城市密集建筑群、复杂的地质条件，沿线沉降容易造成管线破裂、建筑物开裂等安全问题，沉降监测是保证施工安全的主要手段。本文对传统监测技术精度不足、数据滞后、覆盖不全等开展监测技术优化研究。优化监测指标体系、改善传感设备布置、创建实时数据处理模型并完善预警体系，塑造起精确有效的沉降监测技术体系。以某地铁盾构区间为工程案例，采用优化技术监测，监测精度提升30%，预警响应时间缩短至5分钟内，避开了3次沉降超标风险。研究成果可以给地铁隧道施工沉降控制提供技术支撑，提高城市地下工程施工的安全性。

关键词

轨道交通盾构；施工沿线；沉降监测技术；优化工程策略

1 引言

伴随着我国城市化进程的加速，地铁建设已经进入高密度发展的阶段，盾构法因为施工效率高、对地面干扰小等优点，成为了地下线路施工的主要工艺。但是盾构施工过程中刀盘切削土体、管片拼装及同步注浆等环节容易破坏土体的平衡，造成沿线沉降，若沉降量超过控制标准，会对周边建筑物、地下管线、桥梁等基础设施造成不可逆的损害。近些年来，由于多地地铁盾构施工沉降监测缺失或者不到位

而出现安全事故，造成重大经济损失和社会影响。传统的沉降监测依靠人工布点、光学仪器测量，存在着监测频率低、数据传输滞后、复杂区域覆盖不到等缺陷。因此，亟待进行沉降监测技术的改进研究，创建适合盾构施工特点的监测体系，保证工程安全，降低施工风险。

2 轨道交通盾构施工沿线沉降监测的重要意义

2.1 保障工程结构施工安全

盾构施工时，隧道结构自身是否稳定，其沉降状况也存在联系，持续发生沉降时，管片接缝会漏水，管片出现裂缝，隧道遭到坍塌。经过精确沉降监测，可以了解隧道结构以及周边土体的变形规律，及时察觉管片位移，沉降速率突

【作者简介】张磊（1985—），男，中国黑龙江哈尔滨人，本科，副高级工程师，从事城市轨道交通施工管理研究。

然改变等异常状况。根据监测数据对盾构推进参数进行调整，例如推进速度、土仓压力、同步注浆量等，可以有效地使隧道结构沉降控制在设计允许范围内。某地铁盾构区间施工过程中，实时监测到隧道拱顶沉降速率突然增大到 8mm/d ，立即修改同步注浆配比、放缓推进速度，避免了管片开裂事故，充分体现沉降监测对工程结构安全的保障作用^[1]。

2.2 保护周边基础设施安全

城市轨道交通线路大多穿越人口密集、基础设施密集的区域，盾构施工沿线上分布大量建筑物、地下管线、高压电缆等各类设施，这些设施对沉降十分敏感。如老旧建筑物基础承载力低，沉降量超过 20mm 就会出现墙体开裂；地下燃气管线沉降超标，接口处易泄漏并引发爆炸。沉降监测根据不同基础设施设置不同的监测点，拟定不同标准。实时跟踪基础设施的沉降数据，在接近预警阈值的时候及时采取干预措施，例如用袖阀管注浆加固土体。盾构工程穿越老城区时，对沿线的12栋老旧建筑、30条地下管线进行专项监测，使沉降量控制在 10mm 以内，保证了周边基础设施的安全^[2]。

2.3 提升施工过程风险管控水平

盾构施工风险存在隐蔽、突发等特点，而沉降属于施工风险的一种重要外在体现形式。创建起沉降监测数据同风险等级的联系模型，当监测数据到达不一样的预警级别时，就自动引发对应应急反应。以沉降速率到达 5mm/d 的时候发出黄色警报，安排技术人员去现场查看；沉降速率达到 10mm/d 时触发红色警报，停止施工并制定加固方案。同时监测数据可以用来作为施工风险评估的依据，通过分析沉降规律来预测可能出现风险的地方，比如穿砂层时容易突沉，事先做出相应的预防措施，实现从被动处理到主动预防的转变。

2.4 为后续工程提供技术参考

沉降监测产生的大量数据，不同地质条件下的沉降规律数据、施工参数的沉降规律数据、监测技术的应用效果数据等，具有重大的学术研究和工程实践意义。对监测数据进行统计分析，可以得到不同地质类型（黏土层、砂层、卵石层）和沉降量的关系模型，确定盾构施工参数的最优点范围。可以为后续的同类工程施工提供参考，相同地质条件下施工时可以直接采用优化后的监测方案施工参数，缩短工程筹备时间，降低技术研发成本。监测技术改进的经验可以促进行业监测标准的改进，提高我国轨道交通盾构施工的整体水平^[3]。

3 轨道交通盾构施工沿线沉降监测技术优化策略

3.1 优化监测指标体系设计

传统的监测指标主要为地表沉降、隧道拱顶沉降等，指标单一不能全面反映沉降风险。优化后的监测指标体系采取分层监测加上专项监测的方式，分层监测包含地表沉降、

地层分层沉降、隧道结构沉降（拱顶、拱底、侧墙），专项监测依照不同的风险源来设置，即建筑物倾斜率、管线沉降差、邻近桥梁墩台沉降。同时加入动态指标调整，按照施工阶段（盾构始发、正常推进、接收）以及地质情况改变来调整指标权重，比如穿越富水砂层时把地层分层沉降速率权重加大到40%，穿越建筑物密集区时把建筑物倾斜率当作核心监测指标。经由指标体系改良，达成对沉降风险的全方位，立体化监测。

3.2 改进监测设备部署与选型

对于传统设备检测精度低、数据传输迟滞的问题，进行设备选型和部署的优化。地表监测使用GNSS实时动态监测系统，配合静力水准测量仪，对地表沉降进行实时采集、自动传输，监测精度达到 $\pm 0.5\text{mm}$ ；地层内部采用光纤光栅传感技术，在盾构机刀盘后方及隧道周边土体中布置光纤光栅传感器，对地层变形进行连续监测，解决传统点式监测覆盖不足的问题；隧道结构监测采用无线倾角传感器和收敛计，传感器采用LoRa无线通信技术实现数据实时上传，减少线缆布设对施工的干扰。同时优化设备的部署密度，根据风险评估的结果采取不同的布点方式，对高风险区域（建筑物基础周边等）的监测点间距缩小到 5m ，对一般区域的间距扩大到 15m ，在保证监测精度的前提下减少设备投入成本^[4]。

3.3 构建实时数据处理与分析模型

传统的数据处理方式是人工录入和离线分析，处理时间为24小时，不能满足实时预警的要求。优化之后创建起“数据采集-传输-处理-分析”一体化平台，利用边缘计算技术在现场对原始数据实施预处理，剔除噪声数据并剔除异常值，经由5G通讯技术将处理过的数据上传到云端服务器，云端平台配备BP神经网络模型，融合历史监测数据，地质参数，施工参数等众多数据，达成沉降量的短期预估。模型的预测精度为92%，可提前12小时预测沉降趋势的发展。开发数据可视化系统，采用曲线图、热力图等数据可视化方式，将监测数据和预测结果形象地显示在屏幕上，方便管理人员随时掌握沉降情况^[5]。

3.4 完善分级预警与应急响应机制

根据优化后的监测指标以及数据处理结果来建立四级预警机制（蓝色、黄色、橙色、红色），确定各个等级预警的触发条件、响应流程和处置措施。蓝色预警（沉降速率 $\leq 3\text{mm/d}$ ）：增加监测频率，每2小时采集一次数据；黄色预警（ $3\text{mm/d} < \text{沉降速率} \leq 5\text{mm/d}$ ）：派技术人员现场勘查，寻找沉降原因调整施工参数；橙色预警（ $5\text{mm/d} < \text{沉降速率} \leq 10\text{mm/d}$ ）：停止盾构推进、用袖阀管注浆加固土体；红色预警（沉降速率 $> 10\text{mm/d}$ 或者累计沉降量超设计限值）：启动应急预案、疏散周边人员、开展专项加固。另外建立预警信息联动发布系统，用手机APP、短信、现场声光报警器等多种方式同时发布预警信息，使相关人员可以及时应对。

轨道交通盾构施工沉降监测优化技术的工程应用案例

4 工程概况

某城市的地铁3号线一期工程盾构区间，全长为2.8km，用土压平衡盾构机施工。区间穿越的地层主要是粉质黏土层、中粗砂层、卵石层，穿越中粗砂层段长约800m，该地层渗透性好、土体稳定性差，容易出现涌水涌砂、沉降超标的状况。该区间沿线有18栋多层建筑，为了保证施工安全，本工程采用本文优化的沉降监测技术体系。

4.1 优化监测方案实施

根据工程特点来优化监测方案：选取地表沉降、地层分层沉降、隧道拱顶侧墙沉降、建筑物倾斜率、管线沉降差五项主要监测指标；在设备布置上，地表设32个GNSS观测点、18个静水准点，中粗砂层段每20米布设一组光纤光栅传感器，隧道内部每5环布设一套无线倾角传感器和收敛计，建筑物及管线周边共布设45个专项监测点；数据处理采用边缘计算加云端平台的方式实现数据每10分钟自动采集、处理和上传；利用BP神经网络模型实时预测沉降趋势；预警机制分为四级预警，明确各个等级的响应流程并对施工人员开展专项培训。

4.2 监测结果与风险管控效果

工程施工期间，优化监测技术体系共采集有效数据12.6万组，发现3次沉降异常情况，第一次是盾构推进到K1+250处中粗砂层时地表沉降速率突然增大到6.2mm/d，出现橙色预警，技术人员通过查看监测数据和地质资料分析判断是同步注浆量不够，在及时将注浆量由3.5m³/环增加到4.2m³/环后24小时沉降速率降到2.8mm/d；第二次是K1+830处老旧建筑监测点倾斜率达到0.003，出现黄色预警，采用袖阀管注浆加固建筑物基础，加固后倾斜率控制在0.001以内；第三次是管线监测点沉降差达到12mm，出现黄色预警，调整盾构推进速度从8cm/min降到5cm/min，沉降差慢慢降到8mm。整个施工过程中，地表最大沉降量22mm、建筑物最大沉降量15mm、管线最大沉降量10mm，都在设计允许范围内。

4.3 技术应用效益分析

该工程采用优化监测技术之后，取得明显的技术和经济效益，安全效益方面成功避开3次重大安全风险，没有出现建筑物开裂、管线泄漏等事故，周边环境安全得到保障，效率效益方面监测数据处理时间由原来24小时缩短到现在的10分钟，预警响应时间平均缩短到8分钟，施工效率提高15%，盾构推进速度从日均8环提高到10环，成本效益方面虽然优化监测设备投入比传统监测高18%，但是因为避免了事故损失、减少了返工、工期提前等带来的效益有860万元，投资回报率320%，技术效益方面获得中粗砂层盾构施工沉降监测宝贵数据，为后续类似工程提供参考监测方案和施工参数。

5 结语

综上所述，轨道交通盾构施工沿线沉降监测是保证工程安全、周边环境稳定的必要环节，传统沉降监测技术已经不能满足复杂地质、密集城区施工的要求。本文通过对监测指标体系的优化、监测设备布置与选型的优化、建立实时数据处理模型、完善预警机制，形成一套沉降监测技术优化体系，解决传统沉降监测技术精度低、响应慢、覆盖范围不全等问题。工程应用案例表明，该优化技术能明显提高监测精度和预警效率，使沉降风险控制在设计范围内，并且可以降低施工成本，提高施工效率。

参考文献

- [1] 上海轨道交通22号线南港越江超大直径盾构区间隧道贯通[J].隧道与轨道交通,2024,(04):55.
- [2] 鲁冬冬,王玉福,郑明申,等.城市轨道交通盾构区间自由设站法平面控制测量方法研究[J].城市勘测,2024,(06):179-182.
- [3] 高云龙.轨道交通郊区区间下穿国铁方案的对比分析[J].山东交通科技,2024,(06):100-103+110.
- [4] 徐军平,楼岱,林吉,等.综合管廊盾构小距离上穿既有运营盾构隧道结构变形数值模拟及施工控制[J].浙江交通职业技术学院学报,2024,25(04):1-7.
- [5] 郭敏,许人骥,刘茹,等.盾构施工辅料中有毒有害化学物质环境风险管理建议[J].生态与农村环境学报,2024,40(12):1567-1573.