

# Analysis of Key Points of Modern Surveying and Mapping Technology in the Application of Metro Tunnel Deformation Monitoring

Haijin Yun

Beijing Huan'an Engineering Testing Co., Ltd., Beijing, 101304, China

## Abstract

During long-term operation, subway tunnels are prone to deformation caused by geological conditions, surrounding construction activities, and load variations, which directly impact structural safety and operational stability. Modern surveying technologies, characterized by high precision, efficiency, and real-time capabilities, provide reliable technical support for tunnel deformation monitoring. This paper systematically examines the integrated application of modern surveying technologies through a case study of a subway foundation pit project in Changping District, Beijing. It explores key implementation aspects of deformation monitoring in adjacent construction environments, covering the entire process from scheme design and benchmark establishment to data collection, intelligent analysis, and early warning feedback. Additionally, the study proposes optimization strategies addressing current challenges, including error control, technical adaptation, intelligent analysis upgrades, and enhanced safeguard mechanisms, to improve the overall performance and reliability of monitoring systems. These insights provide valuable references for the safe operation and maintenance of subway tunnels.

## Keywords

modern surveying and mapping technology; subway tunnel; deformation monitoring; data processing; intelligent analysis

## 现代测绘技术在地铁隧道变形监测中的应用要点分析

负海金

北京环安工程检测有限责任公司, 中国·北京 101304

## 摘要

地铁隧道在长期运营过程中,受地质条件、周边施工、荷载变化等多种因素影响,容易发生变形,直接影响结构安全与运营稳定。现代测绘技术以其高精度、高效率、实时性强等特点,为隧道变形监测提供了可靠的技术支持。本文结合北京昌平某邻近地铁基坑项目,系统阐述现代测绘技术的组合应用模式,并从方案设计、基准建立、数据采集、智能分析与预警反馈全流程,深入探讨其在邻近施工环境下地铁隧道变形监测中的关键实施要点。同时,针对当前应用中存在的问题,提出若干优化策略,包括误差控制、技术适配、智能分析升级与保障机制完善等方面,以提升监测系统的整体效能与可靠性,为地铁隧道的安全运维提供参考。

## 关键词

现代测绘技术; 地铁隧道; 变形监测; 数据处理; 智能分析

## 1 引言

随着城市轨道交通网络的迅猛进步,地铁隧道作为关键的地下交通载体,其结构安全与长期稳定性日益受到关注。隧道结构在施工以及运营期间,受外部环境以及内部荷载的作用,极易出现沉降、位移以及收敛等变形状况。倘若无法及时发现和管控,可能诱发严重安全事故,为此构建系统、准确、高效的变形监测体系极为迫切。近些年来,以GNSS、全站仪、三维激光扫描等为代表的现代测绘技术蓬

勃发展,给隧道变形监测带来全新解决思路。鉴于此,本文依照实际工程需求,系统剖析现代测绘技术在地铁隧道变形监测里的应用流程与关键环节,同时针对其优化给出可行建议,推动该技术在实践中的深入应用。

## 2 现代测绘技术概述

现代测绘技术是将电子、信息、激光、遥感等多种技术相融合的新型测量体系,其核心特性呈现为高精度、实时性、自动化以及集成化。在地铁隧道监测这一领域当中,常用的现代测绘技术主要覆盖了GNSS、全站仪以及三维激光扫描等<sup>[1]</sup>。GNSS技术可开展全天候、广覆盖的定位监测工作,特别适宜于隧道地表基准点的长期观测;全站仪凭借其

【作者简介】负海金(1989-),男,中国内蒙古镇人,本科,工程师,从事地铁检测和监测研究。

高精度角度与距离的测量能力,于隧道内部断面收敛监测之中发挥着关键的作用;三维激光扫描技术依靠非接触式高速采集隧道表面点云数据的方式,可全方位反映出隧道结构的形态变化,特别适合于大范围、复杂结构的变形检测。这些技术各有特点,在实际监测过程当中一般会依据工程需求进行组合运用,形成多源数据融合的监测网络,大幅度提高监测的全面性与可靠性。

### 3 现代测绘技术在地铁隧道变形监测的应用流程

在地铁隧道运营环境中,传统监测设备常面临三大痛点:预埋传感器破坏结构完整性、固定式采集设备难以适应多变工况、密集客流限制设备维护窗口。通过有效应用现代测绘技术,可以更好地获取相关监测数据,对数据展开分析,有利于及时发现隧道变形情况,采取有效对策加以处理,避免产生相关的安全隐患。以下结合北京市昌平新城东区二期邻近地铁区间第三方监测的具体实践,阐述现代测绘技术的系统化应用流程。

#### 3.1 前期准备

监测团队首先要运用隧道所处的地质环境、结构设计特性以及运营期的荷载状况,来明确监测的关键参数。以昌平新城项目为例,监测方案依据《穿越城市轨道交通设施检测评估及监测技术规范》及专项安全评估报告,明确将区间结构与轨道的竖向位移、水平位移、收敛变形、管片错台等十三个项目列为监测重点,并具体规定了 $\pm 1.0\text{mm}$ 的变形控制值和 $0.5\text{mm/d}$ 的速率控制值。接着,技术人员需拟订详细的监测计划,其中监测点的布设位置、密度及方式尤为关键。在该项目中,遵循《城市轨道交通工程监测技术规范》的布点原则,对临近基坑平行段隧道每10米、其他区段每20米布设一个监测断面,形成了涵盖结构、道床、轨道的立体测点网络<sup>[2]</sup>。为保障所有观测数据都基于可靠基准,仪器设备的严格校准与检定乃是必需的前置环节。基准控制网的布置与复测工作一同进行,这些基准点一般选在隧道影响区域之外的稳定地方,并且依靠高等级测量方式展开精密定位以及定期复核,它们组成了整个变形监测体系的“坐标系原点”,其自身稳定性直接决定了后续所有变形量分析的可靠性。

#### 3.2 数据采集

在隧道区间沿线关键断面那里,自动化监测系统发挥着核心作用。昌平新城项目在区间结构运用了静力水准仪自动化监测系统,以实现施工期间60分钟一次的高频数据采集工作,可持续捕捉施工全过程连续沉降的变化情况。针对需要多点、快速获取三维位移信息的状况,要依靠高精度全站仪(如Leica TM50)来进行人工监测操作。在这个项目当中,技术人员依据一等水平位移监测网的技术要求,针对

布设在管片和道床上的棱镜标志开展周期性的观测,高效地获取特征点的三维位移信息。而当有精细记录局部变形形态的需求之时,就会选用更为专业的局部测量手段。比如对于道床裂缝和管片错台,这个项目运用游标卡尺来径直量测,其精度可达到 $0.02\text{mm}$ ,对于轨道几何形位,则利用轨距尺来直接测量。对于基坑支护桩体的深层水平位移,借助测斜仪来监测,以掌握支护体系自身的稳定性,这样自动化和人工监测相结合、整体与局部观测相补充的模式,构建出了多层次、全覆盖的数据采集体系。3.3 数据处理与分析

数据处理先从“净化”着手,运用数学统计手段以及专业软件工具,对原始观测值实施去噪、剔除粗差以及校正必要的系统性误差的工作。比方说,全站仪测量数据得开展温度、气压等气象因素的改正工作,水准测量数据就得检查闭合差并依照规定来平差。于昌平新城项目里,基准网数据运用专业平差软件来做严密平差,监测点数据则依靠计算累计变化量、变化速率去作初步整理。接着经过预处理的高质量数据拿来构建分析模型并且进行安全评判<sup>[3]</sup>。此项目设立了明确的预警管理体系:当监测数据达到控制值( $U_0$ )的70%(黄色预警)、80%(橙色预警)或100%(红色预警)时,系统就会触发相应警报。技术人员借助时间序列分析,绘制出变形时程曲线,判断变形究竟是处于加速、匀速或者稳定阶段。例如方案中明确规定,工程结束后要监测至变形稳定,这个标准就是最后100天的平均速率不超过 $0.01\text{mm/d}$ 。这样基于模型以及阈值的分析,可以量化当前风险,而且能给趋势预测和决策提供直接依据。所有分析过程及其结论最终由系统进行梳理,形成规范的日报、警情快报、阶段性报告以及总结报告。

#### 3.4 结果反馈与应用

依靠信息化的项目管理平台,所分析得出的变形数据、预警信息以及专业报告被实时或者定期运用到地铁运营管理、设施维护以及安全监管等相关职能部门,这些经过细致加工的信息给管理者的决策提供了直接的根据。举例来讲,当监测数据说明某区间隧道沉降速率超出了预警阈值的时候,运营方可以依据这个来及时调整列车的运行方案,例如实施限速;养护部门可以迅速组织对相应区段开展针对性的检查,必要的时候启动结构加固或者渗漏水治理等维修措施。而在隧道邻近区域存在外部工程施工的情况下,持续的监测数据是评定工程施工对隧道影响程度、并且动态优化施工工艺参数的核心依据<sup>[4]</sup>。这种从数据采集一直到分析、再到决策支持的完整的链条,打造了一个“监测—预警—响应—验证”的闭环式的管理流程。它可以实现对已出现变形的有效的处置,而且可借助趋势预判来推动安全管理从事后补救向事前预防进行转变,极大提升地铁隧道全生命周期运营维护的精细化以及智能化程度,给城市轨道交通系统的安全、高效运转提供了坚实的、可靠的技术依托。

## 4 现代测绘技术在地铁隧道变形监测中应用的优化策略

### 4.1 强化监测全流程误差控制体系

监测团队不能只是运用高精度仪器,而是要建立起一套全方位的误差管理意识,从监测的源头到最终结果都要进行系统化管理。展开来说,在前期进行基准点布设的时候,除了要选用稳固的地点以外,还得要充分考虑到和监测点之间的几何图形强度,并借助增加多余观测以及定期开展复测工作来检测其稳定性。在采集数据的过程里,操作人员要严格地遵照规程,例如使用全站仪进行测量的时候要避免旁折光等环境干扰,三维激光扫描则需依据隧道表面的材质以及湿度来优化扫描参数,以降低噪点。更加关键的是,应当建立起统一的、标准化的数据处理流程,对于所有的原始观测值都要进行系统性的改正和平差计算,明确各类误差的修正模型和允许范围。依靠把误差控制融入方案设计、外业观测以及内业处理的每一个环节之中,形成一个紧密相连的“防护网”,可以有效地提高最终变形量提取结果的可靠性与精度。

### 4.2 优化测绘技术与复杂工况适配

优化测绘技术去契合复杂工况,这意味着不能直接套用固定的技术模式,而是要依照监测对象的独特性以及现场的限制条件来“量身打造”。比如说,在空间狭小、通视状况不佳的已经运营的隧道区间,或许更适宜部署使用基于静力水准的自动化沉降监测系统或者测量机器人,而对于正在建设的盾构隧道,则可以借助移动三维激光扫描快速获取拼装管片的初期形变情况。当隧道穿越特殊地质带或者受到邻近施工影响的时候,就需要提高监测频率,并且有可能运用多种技术交叉验证,像使用高精度全站仪对关键点位移进行监测,同时还辅以定期的断面扫描去捕捉整体的形变趋向<sup>[5]</sup>。这种动态的适配还在硬件集成与改进方面体现出来,例如为扫描仪安排便于在隧道内轨道上进行移动的搭载平台,或者开发出适合隧道昏暗、潮湿环境的传感器防护设施,以此保证技术装备可以在实际的条件下稳定、高效地运行。

### 4.3 推动监测数据智能分析升级

优化重点为引入并运用更先进的算法以及选用更新的平台,推动分析工作由“描述现象”往“预测趋势”方向发展。监测团队可借助机器学习的方式,对历史变形数据进行深度训练,使得计算机学会辨别正常波动和异常变形的模式区别,实现对微小的、渐进式病害的早期智能诊断。也可尝试搭建隧道结构变形的数字孪生模型,把实时监测数据跟地质力学模型、荷载历史等信息相融合,在虚拟空间里对隧道的受力以及变形开展仿真推演,评估不同外部扰动时的结构响应,为潜在风险给出前瞻性预判。这便要求数据处理平台要

有强大的计算能力,还要构建规范、开放的数据接口,务必保证从自动化采集设备到云端分析服务器的数据传输流畅,为智能化分析提供持续不断的动力<sup>[6]</sup>。

### 4.4 完善技术应用保障与迭代机制

管理部门需要着力开展地铁隧道监测各环节技术标准和作业指南的制定工作,为一线实践运用明确规范。在这个过程中,建立常态化的技术培训以及交流机制极为关键,依靠定期组织培训、研讨会以及现场实操,不断提高技术人员对于新设备、新方法的掌握水平以及解决复杂问题的能力。应当鼓励形成“实践—总结—创新”这样的良性循环,支持监测团队和科研机构、设备厂商进行合作,针对实践当中所碰到的技术瓶颈开展联合攻关,比如说研发更加耐用的监测点标志、提高扫描数据在潮湿环境之下的精度等。借助建立该类知识积累以及技术迭代的通道,可保证应用于地铁隧道变形监测的现代测绘技术体系自身保有活力,持续吸收最新科技成果,持续提升地铁运营安全保障的技术韧性以及前瞻性。

## 5 结语

总的来讲,现代测绘技术给地铁隧道变形监测运用了高精度、高效率、多维度的技术办法,提高了监测工作的科学性与可靠性。运用系统化的应用流程,从方案设计到数据采集,到分析反馈,现代测绘技术已慢慢成为隧道安全监测系统中不可缺少的一部分。未来,随着传感器技术、物联网、人工智能等发展,现代测绘技术会越来越智能化、集成化,可达到更实时、更精准的隧道健康诊断与预警。

## 参考文献

- [1] 徐光华, 李亚鹏, 张振辉, 钟启伦. 从传统测量到实时建模: GOSLAM技术在地铁隧道数字化中的革新与应用[J]. 城市轨道交通, 2025, (11): 71-72.
- [2] 艾中亮, 鲍艳, 郭飞, 孔恒, 鲍逸玮, 卢建军. 基于三维激光扫描技术的地铁盾构隧道中轴线高程提取方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (03): 68-71+77.
- [3] 吴勇, 黄小斌, 郑佳佳. 为地铁隧道做全身“CT体检”华东测绘安全突破三维激光扫描关键技术, 实现新的探索[J]. 今日科技, 2022, (07): 58-60.
- [4] 宋云记, 王智. 利用三维激光扫描技术进行地铁隧道施工质量管控及病害检测[J]. 测绘通报, 2020, (05): 150-154.
- [5] 柏文锋. 基于全自动全站仪的地铁隧道自动化变形监测系统的设计与实现[J]. 城市勘测, 2014, (03): 97-99.
- [6] 曹先革, 李东海, 冯金宇, 杨金玲, 刘妍, 司海燕. 基于地面激光扫描技术获取地铁隧道3维点云数据的设计与试验[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36 (10): 12-14+18.