

地铁隧道变形监测中三维激光扫描技术的优化与实践

任 炯 杨洪飞

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西西安 710000

摘 要：随着我国城市化进程的加快，城市轨道交通作为一种重要的公共交通方式，其建设规模也越来越大。地铁隧道安全运营是保证城市交通正常运行、保障旅客安全的重要保障。隧道形变监测对保障地铁结构安全具有重要意义，能及时发现安全隐患，对维护与管理具有重要意义。近几年来，三维激光扫描技术以其高精度和高效率的特点，被广泛应用于地铁隧道的变形监测中。该方法可以快速获取隧道顶面的三维点云数据，为隧道形变分析提供数据支持。然而，随着技术水平的不断提高与应用需求的不断提升，如何进一步优化三维激光扫描技术，提高其在地铁隧道变形监测方面的应用效果，已成为亟待解决的重要问题。

关键词：地铁隧道变形监测；三维激光扫描；优化与实践

基于三维激光扫描技术的地铁隧道变形监测方法，可促进测绘技术和隧道工程的深度融合，为隧道变形监测提供更科学、更精确的手段，有助于提高地铁隧道监控效率、降低监控成本，提高数据的精度与可靠性，为地铁隧道的安全运营提供有力保障。同时，随着地铁建设的不断深入，隧道结构日趋复杂多样，迫切需要更先进的变形监测技术。通过优化三维激光扫描工艺，既能满足复杂环境条件下的监控要求，又能为隧道长期健康监测提供技术支撑。因此，开展基于三维激光扫描的地铁隧道形变监测优化及应用研究，对提高地铁隧道的安全管理水平具有重要意义。

一、地铁隧道变形监测中三维激光扫描技术的应用优势

（一）高精度与高效率的数据采集

传统测量方法多采用人工方式，受人为影响大，速度慢，难以满足复杂环境下地铁隧道快速监控的需要。与之形成鲜明对比的是，三维激光扫描技术可以在毫米级精度下快速获取隧道表面高密度点云数据，能准确反映隧道结构的细微变形^[1]。采用基于高精度数据获取的隧道结构变形监测方法，为隧道结构的早期预警与预防性维修提供了有力支撑。同时，三维激光扫描技术自动化程度高，可快速完成大范围扫描，极大地提高监控效率，降低人力与时间成本。

（二）全面覆盖与复杂环境适应性

三维激光扫描技术具有覆盖范围广、环境适应能力强等优点，在地铁隧道形变监测方面具有优势。地铁隧道结构复杂，设备多，管线多，支撑结构多，传统的测

量手段很难对其进行全面的监测。而三维激光扫描技术可以全方位、多角度地获取隧道内部的三维模型，实现对隧道结构的全方位覆盖。这种全覆盖的能力，使监控者可以对巷道各部位进行细致的变形分析，避免监控盲区带来的安全隐患。此外，三维激光扫描技术对复杂环境有较强的适应能力，可在潮湿、黑暗、狭窄等恶劣环境中正常工作，为地铁隧道形变监测提供可靠保证。

（三）数据可视化与分析的便捷性

将三维激光扫描技术应用于地铁隧道形变监测，具有方便快捷、数据可视化分析等优点。利用专用软件对扫描获得的点云数据进行处理分析，生成可视化的三维模型及变形分析报告。该可视化技术可使监控者更直观地了解隧道结构的变形状况，并迅速确定变形区及变形范围^[2]。同时，基于点云数据的隧道变形量、变形率等量化信息可为隧道安全评价及养护维修决策提供科学依据。且三维激光扫描技术可实现长时间数据存储与历史对比分析，为地铁隧道长期健康监测提供强有力的支撑，有助于监测人员及时发现安全隐患，并采取有效的维修措施。

二、地铁隧道变形监测中三维激光扫描技术的应用要点优化

（一）优化监测点布局与扫描范围设定

合理的监测点布设和扫描范围的设置，是实现地铁隧道形变监测精度的前提。应根据隧道结构特征、地质条件和已有的变形案例资料，确定监测点的布设方案。对盾构隧道而言，管片拼接处为结构相对薄弱的部位，按5~8圈布置1个监测点；对于曲线区段，由于受力复

杂, 监测点间距减小至3~5圈, 并在曲线外侧进行适当的加密处理。采矿法隧道在一次支护和二次衬砌结合处按4~6 m 布设监测点, 在关键地段如围岩破坏区缩短到2~3 m。扫描区域的设置应兼顾全面性和侧重点, 以监测点为中心, 向巷道两侧和顶板扩展^[9]。通常, 横向扫描范围应为隧道断面两侧2~3 m, 以保证在一定范围内获取隧道周围一定范围内的土体变形信息; 纵向扫描范围按隧道重要程度及变形危险程度确定, 新建或复杂地质条件下单次扫描长度在50 m 以内, 对运营多年且稳定性良好的隧道可适当缩短至30 m。且为了便于数据的比较和分析, 应保证各监测时段的扫描范围一致。在实际应用中, 可采用全站仪等仪器对监测点进行精密测量和定位, 误差小于 ± 5 mm。将各监测点的坐标输入到三维激光扫描系统中, 并与扫描数据进行对应。扫描前, 根据设定的扫描范围, 调整扫描装置的扫描角度和分辨率等参数。扫描角一般设为360度, 竖向180度, 可全面覆盖监控区域。根据隧道尺寸及形变监测精度要求, 分辨率一般为5~10 mm/点, 重点监控区域可提高至2~5 mm/点, 以实现隧道内微小形变信息的清晰捕捉。

(二) 改进扫描设备参数设置与数据采集流程

为保证数据的质量, 需要对三维激光扫描装置参数设置及数据采集流程进行优化。在设备参数的设定上, 根据隧道的环境条件以及监控精度的要求, 对扫描装置的发射功率、扫描频率等参数进行调节。隧道内光线较暗, 为保证回波信号的强度, 通常将发射功率设为设备最大功率的70~80%; 扫描频率随扫描范围及形变监测实时需求而调整, 当扫描范围较大且对实时性要求较低时, 扫描频率可设定在10~20 Hz, 以确保数据收集的完整性; 对关键部位或需实时监测的部位, 将扫描频率提高至50~100Hz, 以保证对微小形变的动态变化及时捕捉。在数据采集过程中, 建立标准化作业规范; 扫描前, 对仪器的水平度, 垂直度, 激光发射和接收系统的精度等都进行全面的检查与校正, 以保证仪器处于最佳的工作状态。标定误差控制在仪器允许的范围, 如角误差小于 ± 0.01 , 距离误差小于 ± 5 mm。在扫描时, 应遵循预先确定的扫描路径及顺序, 以防止扫描盲区及重复扫描区的产生^[9]。可采用多站扫描拼接方法, 使相邻测站间重叠度控制在30%~50%以内, 并在重叠区设置共同标志点, 采用专用软件对扫描数据进行拼接与融合, 以确保监测范围内数据的连续性与完整性。同时, 为降低环境因素对数据采集的影响, 可选取隧道内车流量不大的时段, 如清晨时段。扫描过程中, 如果遇到通风、照明

等设备干扰, 应及时调整扫描装置的位置和角度, 以防止干扰源的反射、折射而影响数据质量。实时检测数据, 观察其完整性、精度及噪音状况, 如有异常, 应立即重扫或修补。

(三) 强化数据处理与分析方法以精准评估变形

在数据处理方面, 首先采用专用数据处理软件对原始数据进行降噪处理; 采用高斯滤波和中值滤波等滤波算法, 消除设备噪声和环境噪声引起的离群点。根据数据噪声特征, 选择合适的滤波参数, 高斯滤波器的标准偏差通常为0.01~0.05 m, 中值滤波窗尺寸根据数据点密度确定, 一般为3~7个点, 以保证在去除噪声的同时尽可能地保持真实形变信息。去除噪声之后, 就是数据的配准与镶嵌。项目采用迭代近邻算法(ICP)等方法, 在不同扫描站重叠区域内选择同名特征点, 实现多站扫描数据的准确拼接, 构建隧道三维模型。为保证模型的精度与完整性, 拟合精度控制在 ± 5 mm以内。在建立隧道三维模型的过程中, 根据隧道设计图及实测数据, 对隧道进行纹理映射及坐标变换, 使之符合隧道的实际位置及尺寸^[9]。在资料分析上, 利用各种方法评价隧道的变形, 对不同监测时段的三维模型进行了对比分析, 得到了模型上各点的位移变化量。采用差分算法, 对相邻监测周期模型对应点进行坐标差分析, 获得位移向量, 实现对围岩变形量及变形方向的准确测量。在此基础上, 利用主成分分析等方法对隧道变形数据进行降维处理, 提取主要变形特征及趋势, 判定隧道是否存在整体沉降、水平或收敛变形。结合有限元方法, 结合隧道结构参数、地质条件及监测数据, 构建隧道有限元模型, 模拟不同工况条件下隧道变形状态, 并与实测数据进行对比分析, 验证监测结果的准确性, 预测未来的变形发展趋势。设置隧道结构水平位移预警(± 20 mm)和垂直位移(± 15 mm)两个预警阈值, 当监测数据超出预警阈值时, 及时发布预警信号, 保障地铁安全运行。

(四) 完善监测结果反馈机制与监测周期优化

完善监测结果反馈机制, 优化监测周期, 是及时掌握地铁隧道变形状态, 保证地铁安全运营的关键。在反馈机制上, 可建立高效的信息传输平台, 对数据进行处理与分析后, 将变形云、位移曲线等直观易读的形式, 并经由网络平台向地铁运营、设计、施工等相关各方实时传送。同时, 要建立定期监测报告制度, 按月、季、年编制详细的监测报告, 包括监测资料的统计分析、评价结果、存在的问题和对策。根据监测结果, 各有关方面根据变形情况, 及时采取相应措施, 对轻微变形部位,

应加强日常巡查与监测；对未达预警临界值的工程，组织专家论证，采取局部加筋、调整施工工艺等有针对性的处理方案^[6]。一旦地铁变形达到临界值，立即启动应急预案，采取停运和疏散旅客的措施，保证地铁的安全运行。同时，建立围岩变形反馈跟踪机制，持续监测围岩变形状况，评价支护措施的效果，及时调整支护方案。在监测周期的优化方面，根据隧道的运营年限、地质条件及变形状况，动态调整监测周期。对新建隧道，在投入运营初期，每周进行1-2次监测，以及时发现可能出现早期变形问题，随隧道使用年限的延长及隧道稳定性的改善，监测周期可逐步延长至2-4周。对于地质条件复杂、潜在形变隐患的隧道，应加大监测周期，视危险程度分别设定为每日1-2次、每周3-5次，采用时序分析等方法，对监测周期进行优化，以保证地铁运营安全，提高监测效率。

三、地铁隧道变形监测中三维激光扫描技术的应用案例分析

(一) 案例概况

项目所涉地铁隧道位于某特大城市中心地带，全长约15km，包括多座地下车站及区间隧道（项目概况如表1）。隧道采用盾构法施工，隧道内径6m，衬砌结构采用钢筋混凝土管片拼装。项目拟在前期研究的基础上，通过多个重点商业街区、历史街区、复杂地质条件下的软土层、砂土层等，对隧道变形监测提出了更高的要求。为保证隧道的安全稳定，项目组决定利用三维激光扫描技术对隧道进行变形监测。项目旨在实时掌握隧道变形状态，及时发现安全隐患，为地铁运营与养护管理提供科学依据。

表1 项目概况

地理位置	特大城市中心地带
隧道长度	15公里
施工方法	盾构法
隧道内径	6m
衬砌结构	钢筋混凝土管片拼装
监测目标	实时掌握隧道变形状态，发现安全隐患
监测技术	三维激光扫描技术

(二) 应用过程

在监测过程中，项目组对隧道进行详细的前期调查，确定重点监测区域及监测频次。三维激光扫描仪安装在隧道内固定点上，每隔两个星期就会对隧道进行一次完整的扫描，每次扫描范围大约为500公尺。该扫描仪采

用高精度激光扫描技术，可生成高密度点云数据，每平方米可达1000个点。利用无线网络将扫描数据实时传送至数据中心，由专门的软件对其进行分析处理。在分析过程中，软件可以自动识别隧道结构的变形状态，建立三维变形模型，通过与历史数据的对比分析，判断隧道的变形趋势。在此基础上，监测团队将监测结果定期提交给地铁运营管理层，以反馈隧道变形状态，辅助运营决策。

(三) 应用结果

经过一年多的监测，三维激光扫描技术在实际应用中取得了显著效果。监测资料表明，隧道整体结构稳定，整体变形不明显。但是，在一些局部地段，如隧道与车站连接处以及穿越软土地层的区段，却发现一些细微的变形迹象。在此基础上，利用三维形变模型，实现对隧道变形区域的准确识别和评价。根据监测结果，地铁运营管理部门及时采取措施，消除地铁安全隐患。同时，监测结果也可作为长期维修计划的重要参考依据，并可协助优化维修资源配置。

结束语

综上所述，三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用和优化，对保证地铁隧道的安全运营具有重要意义，可为地铁隧道的养护管理提供更多的科学依据。展望未来，随着科技进步与应用需求的不断提高，三维激光扫描技术将会更广泛、更深入地应用于地铁隧道的变形监测。应进一步推进三维激光扫描技术与其它监测技术的融合，形成更全面、更高效的地铁隧道安全运营方案，促进城市轨道交通可持续发展。

参考文献

- [1] 吴超. 绿色包装设计理念下的思政教育研究[J]. 上海包装, 2024, (12): 184-186.
- [2] 张伏虎. 基于绿色环保理念的农产品包装设计探究[J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(06): 70-75.
- [3] 刘泓杉, 纪向宏. 绿色印刷在包装中的应用研究[J]. 绿色包装, 2024, (11): 23-26+31.
- [4] 徐霄. 绿色设计理念在礼盒包装设计中的应用研究[J]. 绿色包装, 2024, (11): 126-129.
- [5] 张康宜, 陈婷. 基于生态循环农业理念的农特产品绿色包装设计研究[J]. 绿色包装, 2024, (11): 122-125.
- [6] 刘琳. 基于绿色设计理念的月饼包装设计研究[J]. 绿色包装, 2024, (11): 168-172.