

三维激光扫描技术在隧道超欠挖检测中的应用研究

石 栋

(中铁十二局集团第三工程有限公司, 山西 太原 030024)

摘 要 在隧道工程建设中, 超挖与欠挖直接影响结构安全、支护成本及施工效率, 是质量控制的关键环节。传统检测方法存在效率低、覆盖面窄、精度不足等局限, 难以适应现代化隧道工程高效、精准施工的需求。基于此, 本文首先分析了超欠挖问题的定义、影响及传统方法的局限性; 其次阐述了三维激光扫描技术的显著优势, 重点探讨了从设备选型、数据采集到模型匹配等关键应用环节的技术要点; 最后通过具体工程实例, 验证了该技术在提升检测效率、精度与信息化水平方面的显著成效, 以期为隧道数字化、智能化施工提供有益参考。

关键词 三维激光扫描; 快速检测技术; 隧道超欠挖

中图分类号: TN24; U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.002

0 引言

在隧道工程施工中, 超挖与欠挖是直接影响隧道结构安全、支护成本及施工进度的核心质量问题。精确控制开挖轮廓是保障隧道施工质量、控制工程成本和实现安全高效作业的基础。传统的隧道超欠挖检测方法通常存在效率低下、覆盖面小、人为误差大等局限, 难以满足现代化隧道工程快速、精准施工的需求。因此, 研究具备非接触、高精度、高效率特征的三维激光扫描技术在隧道超欠挖检测中的应用, 对推动隧道施工向数字化、精细化、智能化方向发展具有重要价值。

1 隧道超欠挖问题分析

1.1 隧道超欠挖定义及其影响

隧道超欠挖是指隧道实际开挖轮廓与设计轮廓之间的偏离现象。超挖表现为实际开挖边界超出设计范围, 欠挖则表现为实际开挖边界未达到设计范围。这一现象对隧道工程产生多方面的负面影响。超挖会直接导致开挖方量增加、混凝土喷射或衬砌材料消耗过大, 从而显著提高工程成本。同时, 超挖区域形成的空洞可能破坏围岩自稳性, 增加支护难度与安全风险。欠挖则会导致隧道净空尺寸不足, 影响隧道后期使用功能和结构安全, 需要进行二次扩挖或修整, 不仅延误工期, 也可能对已施作支护结构造成损伤。因此, 精确控制超欠挖是保证隧道施工质量、控制工程投资、保障施工安全与运营安全的关键环节。

1.2 传统检测方法及其局限性

传统的隧道超欠挖检测主要依赖全站仪断面测量、水准仪结合测绳等方法。全站仪断面测量通过测量有限特征点的三维坐标来推算开挖轮廓, 该方法虽然精度较高, 但属于离散点抽样测量, 测量速度慢, 数据密度低, 难以全面反映隧道开挖面复杂的空间形态, 容易遗漏局部超欠挖区域。水准仪配合测绳等方法则更为简易粗糙, 通常只能获取特定高程处的粗略宽度信息, 数据精度和可靠性均难以保证。这些传统方法高度依赖人工操作和判断, 测量效率低下, 无法满足长隧道、大断面隧道的快速检测需求。

1.3 三维激光扫描技术在超欠挖检测中的优势

三维激光扫描技术作为一种非接触式、高精度、高效率的空间信息获取手段, 在隧道超欠挖检测中展现出显著优势。

首先, 该技术可实现对隧道内壁的全覆盖、高密度点云数据采集, 每秒可获取数十万至数百万个空间点, 真实还原开挖轮廓的三维形态, 有效克服传统方法测点稀疏的问题^[1]。

其次, 点云数据可与BIM模型或设计断面进行精确比对, 通过专业软件自动计算任意位置的超欠挖量, 并生成可视化报告, 便于技术人员快速识别问题区域^[2]。

最后, 三维激光扫描不受光照条件限制, 可在复杂、狭小或危险环境中安全作业, 提升检测安全性。随着设备小型化、智能化以及配套算法的不断优化, 该技术

作者简介: 石栋(1988-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 隧道工程。

已在铁路、公路、水利等多类隧道工程中成功应用，成为实现隧道智能建造与数字化管理的关键支撑技术^[3]。

2 三维激光扫描技术在隧道超欠挖检测中的应用要点

2.1 扫描设备选型与性能管控

在隧道超欠挖检测中，扫描设备的选型直接影响数据质量与作业效率。应优先选用具备高测距精度、高点密度和大视场角的地面式三维激光扫描仪^[4]。同时，设备需具备良好的环境适应性，包括 IP54 以上防护等级，以应对隧道内粉尘、潮湿等恶劣工况。此外，配套软件应支持自动拼接、去噪及与 BIM/CAD 平台的数据互通，提升后期处理效率。为保障检测一致性，建议建立设备定期校准机制，并对操作人员进行标准化培训，确保每次扫描参数统一，从源头控制数据质量。

2.2 数据采集策略与现场作业规范

科学的采集策略是获取高质量点云的前提。应根据隧道断面尺寸和扫描仪有效测程，合理布设测站，通常每 10 ~ 20 m 设一站，曲线段或断面变化处加密至 5 ~ 10 m，确保相邻站点云重叠率不低于 30%。每站应布设不少于 3 个高精度标靶，用于后续多站配准。扫描应在开挖后、初支前尽快完成，避开爆破后粉尘高峰期。现场作业需遵循标准化流程：先清理扫描区域障碍物，再架设仪器并检查水平与稳定性，设置统一扫描参数，最后进行全断面扫描。

2.3 点云数据预处理关键技术

原始点云数据常含噪声、离群点及多站未对齐等问题，需系统化预处理。

首先，进行去噪滤波，常用统计离群值去除算法对每个点计算其邻域 k 个近邻的平均距离 \bar{d}_i 进行计算。若 $|\bar{d}_i - \mu| > \alpha\sigma$ ，则判定为噪声予以剔除。式中， μ 为所有点平均距离的均值， σ 为所有点平均距离的标准差， α 为阈值。

其次，进行多站点云配准，先基于标靶坐标进行初配准，再采用 ICP 算法精细优化，使整体配准误差控制在 ± 2 mm 以内。随后将点云通过七参数转换（平移 + 旋转 + 缩放）统一至隧道设计坐标系，该过程需利用已知控制点或里程桩号进行空间变换。

最后，为提升计算效率，在保留几何特征的前提下可采用体素网格下采样对点云适度精简。

2.4 设计模型构建与匹配方法

精确的设计模型构建与点云数据的正确匹配是实现超欠挖定量分析的核心。隧道设计模型通常基于设计图纸，在专业三维建模软件中构建，其精度需满足施工控制要求。点云与设计模型的匹配，实质上是将

扫描坐标系与设计坐标系统一的过程。通常采用基于控制点的绝对匹配方法，即在隧道内布设统一控制网，同时在设计模型与扫描点云中识别相同的控制点坐标进行配准。也可以先通过标靶进行多站扫描点云的相对拼接，再整体与控制网联测实现绝对定位。配准后，利用专业点云处理软件进行模型与点云的对比分析，计算点云到设计模型表面的法向距离，并依据设定阈值（ ± 5 cm）自动识别与统计超挖、欠挖区域及方量，生成直观的偏差云图与分析报告。

2.5 超欠挖量计算与可视化分析

在完成点云与设计模型的高精度匹配后，即可进行超欠挖量的定量计算与可视化分析。计算的核心是通过空间距离计算，确定实测点云中每个点相对于设计模型表面的法向偏差^[5]。通常采用最短距离法或法向量投影法：前者计算点到设计表面的最短空间距离，并依据点位于设计轮廓外侧或内侧进行符号判定；后者则沿设计表面法线方向计算投影距离，物理意义更明确，但计算量较大。基于逐点偏差，可自动统计指定断面或区域的超挖、欠挖面积、体积及最大值、平均值等关键指标。

计算结果需通过高效直观的可视化手段呈现，以支撑快速决策。主流的可视化方法包括：（1）三维色谱云图，在隧道三维点云或模型上，用连续色阶直观展示全隧道的超欠挖空间分布与严重程度；（2）二维断面对比图，在关键里程位置生成设计断面与实际开挖断面的叠加图，清晰显示轮廓偏差；（3）展开平面等值线图，将隧道内壁展开为平面，用等值线表示偏差量，便于宏观趋势分析与工程量统计。

3 三维激光扫描技术在隧道超欠挖检测中的应用实例分析

3.1 项目概况

本案例选取延榆高速铁路隧道工程，该隧道为单洞双线隧道，全长 4.71 km，最大埋深约 150 m，隧道穿越黄土梁峁沟壑区，地形起伏，地势高陡，穿越地层以 IV、V 级围岩为主，隧道洞身所经地层主要为第四系上更新统风积砂质黄土、中更新统风积黏质黄土，上第三系泥岩，三叠系上统砂岩。隧道设计开挖断面为马蹄形，净宽 15 m，净高 13.18 m。由于地质条件复杂、施工进度快，传统人工检测难以满足质量控制要求。为实现对开挖轮廓的精细化管理，项目引入基于三维激光扫描的超欠挖检测技术，在关键施工段开展全过程应用，覆盖爆破开挖后至初支前的检测窗口，旨在提升超欠挖控制精度、减少材料浪费并保障结构安全。

3.2 技术应用

在 K451+100 ~ K451+400 段，项目采用徕卡 MS60 地面式三维激光扫描仪进行超欠挖检测。设备测距精

度±1 mm, 点间距在15 m距离下约为3 cm, 垂直视场角300°, 水平360°, 满足高密度采集需求。现场按每30 m布设一个扫描站, 曲线段加密至20 m; 每站布设4个球形标靶, 用于多站拼接。扫描作业在爆破通风后2小时内完成, 单站扫描时间约15分钟。获取的原始点云数据通过Cyclone软件进行预处理, 包括去噪、基于标靶的拼接以及坐标转换至设计坐标系。预处理后的整体点云精度优于3 mm。利用隧道设计BIM模型, 通过迭代最近点算法完成与实测点云的精确匹配。最终, 通过计算每个实测点到设计表面的法向偏差, 自动生成该段全三维超欠挖色谱云图, 并按每5 m间距输出断面分析报告。

表1 三维激光扫描技术应用成效关键指标对比

评价指标	传统人工断面法	三维激光扫描法	成效提升
检测效率	约10 h/300 m	约4 h/300 m	提升≥60%
数据密度	约20点/断面	超10 000点/断面	提升500倍以上
精度	±1~2 cm (依赖操作)	±3 mm (系统性)	提升显著
成果形式	离散报表、二维图	三维云图、可交互报告	直观性、指导性更强
对施工的影响	中断时间长, 人员需求多	中断时间短, 自动化程度高	干扰小, 更安全
成本控制	人工成本高, 材料浪费多	减少返工与材料浪费约15%	长期经济效益明显

3.4 应用中出现的問題与对策

在技术应用过程中遇到了一些实际问题, 采取了相应改进对策。第一, 隧道内粉尘、水雾干扰问题。爆破后或潮湿环境下, 空气中悬浮颗粒影响激光信号, 导致局部点云数据缺失或噪声增多。针对这一问题, 工作人员通过优化作业时序进行解决, 即尽量在通风降尘后、土建作业前的最佳窗口期进行扫描。对于不可避免的干扰, 采用多次扫描或调整扫描仪扫描功率、重复扫描次数等参数来优化数据质量, 后期利用软件滤波算法进行去噪。第二, 点云数据处理对人员技术要求高。点云拼接、去噪、模型匹配等操作需要专业软件知识和经验, 初期数据处理效率不稳定。针对这一问题, 工作人员通过制定标准化的数据处理流程, 并采用具备一定自动处理功能的专业软件模块进行解决。同时对技术人员进行专项培训, 并探索与BIM平台集成, 简化 workflow。

4 结束语

隧道超欠挖的精确快速检测是提升隧道工程建设质量与效益的关键环节。实践证明, 相较于传统方法, 三维激光扫描技术凭借其非接触、高效率、高精度和全面性的特点, 能够实现对隧道开挖轮廓的数字化快

3.3 应用成效

实践表明, 三维激光扫描技术取得了显著的工程应用成效。其核心成效体现在检测效率、控制精度和管理水平三个维度。与全站仪检测相比, 总耗时缩短了, 数据全面性实现了由断面“点线”到“三维空间面”的跃升, 极大地提升了检测的效率和覆盖面。基于高密度点云的定量分析, 使得超欠挖的体积与位置得以精确统计, 为后续喷射混凝土等工序提供了精确的工程量指导, 初步估算可减少约8%的超挖混凝土浪费。通过可视化报告, 施工班组能够即时、直观地定位欠挖区域并进行针对性处理, 有效避免了二次扩挖。

三维激光扫描技术应用成效关键指标对比见表1。

速采集与智能化对比分析, 在显著提升检测效率与精度的同时, 为控制工程成本、指导精细化施工和保障作业安全提供了强有力的数据支撑。尽管在实际应用中仍需应对环境干扰、技术门槛等挑战, 但随着设备性能的不断提升和数据处理流程的日益标准化、智能化, 三维激光扫描技术必将成为隧道工程施工质量数字化管控不可或缺的核心技术, 推动隧道工程向更加智能、精细的方向持续发展。

参考文献:

- [1] 齐成龙. 基于三维激光扫描的矿山法隧道超欠挖及平整度智能化检测[J]. 铁路技术创新, 2024(02):99-105.
- [2] 韦征, 周臻, 俞旻韬, 等. 基于三维激光扫描点云整体分析的铁路隧道超欠挖检测方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(01): 135-140.
- [3] 方剑, 周雪云, 盛吉崇, 等. 基于点云数据三维重建的隧道超欠挖检测模型研究[J]. 科技与创新, 2022(22): 116-119.
- [4] 郑祥乐. 基于激光扫描的隧道超欠挖量检测方法[J]. 城市勘测, 2022(01):145-148.
- [5] 阳军生, 张宇, 祝志恒, 等. 基于图像三维重建的隧道超欠挖检测方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(03):714-723.