



图 3-2 钢筋安装

2. 混凝土浇筑与养护：采用 C50 高强度混凝土，掺入聚丙烯纤维（掺量  $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ ）抑制早期收缩裂缝；浇筑时采用分层浇筑（分层厚度  $\leq 300\text{mm}$ ），振捣时间控制在 20-30s/点，养护采用“蒸汽养护+洒水养护”结合，确保 7d 抗压强度达到设计值的 80% 以上。

3. 应力监测：在岔管段关键部位（如分岔角处、断面突变处）埋设应力传感器，实时监测预应力施加后的应力分布，若发现局部应力集中（超过设计值 10%），及时调整张拉顺序或补充预应力筋<sup>[3]</sup>。

### 3.3 检修井与进出口段：先张法预应力，提升整体刚度

检修井（如隧洞中间检修平台）、进出口段需承受竖向荷载与水平土压力，且需与隧洞衬砌衔接，采用先张法预应力混凝土结构，技术要点如下：

1. 预应力筋布置：采用  $\Phi 12\text{mm}$  预应力钢丝（抗拉强度  $1570\text{MPa}$ ），沿检修井竖向、水平向双向布置，间距 200-250mm；在预制厂完成先张法张拉，张拉控制应力取  $0.7f_{\text{ptk}}$ ，持荷 2h 后浇筑 C50 混凝土，确保预应力均匀传递。

2. 与隧洞衬砌衔接：检修井与衬砌连接处设置预埋钢板与剪力钉，混凝土浇筑时采用微膨胀混凝土（膨胀率 0.02%-0.03%），避免衔接处出现缝隙；浇筑后养护 28d，确保衔接部位抗压强度与衬砌一致<sup>[4]</sup>。

## 4 工程应用案例

以“珠江三角洲水资源配置工程中的输水隧洞”为例，

该隧洞总长 113km，直径 6.4m，设计内水压力 1.2MPa，穿越花岗岩地层，预应力隧洞段长采用 C50 高强度预应力混凝土衬砌，具体应用效果如下：

1. 抗裂性能：通过环向预应力（ $\sigma_{\text{con}}=1395\text{MPa}$ ，预应力 3.2MPa），衬砌在 1.2MPa 内水压力下无可见裂缝，渗水率  $< 0.1\text{L}/(\text{m}\cdot\text{d})$ ，远低于规范要求的  $0.5\text{L}/(\text{m}\cdot\text{d})$ 。

2. 结构效率：衬砌厚度从普通混凝土的 100mm 减至 500mm，减少混凝土用量约 35 万  $\text{m}^3$ ，降低工程成本约 2800 万元；隧洞过流能力提升 12%，满足设计输水流量  $35\text{m}^3/\text{s}$  的要求。

3. 耐久性监测：投运 5 年后，衬砌混凝土碳化深度  $< 5\text{mm}$ ，钢筋锈蚀电位  $> -200\text{mV}$ （无锈蚀风险），耐久性指标符合设计预期，无需维修养护<sup>[5]</sup>。

## 5 结论

高强度预应力混凝土凭借抗裂性强、承载效率高、耐久性优的特点，在输水隧洞关键部位的应用效果显著，可有效解决传统混凝土衬砌的渗漏、结构厚重、寿命短等问题，尤其适用于高内水压力、复杂地质条件下的长距离输水隧洞工程。未来研究与应用可聚焦三方面：

1. 开发“超高强度混凝土(C100)+无粘结预应力体系”，进一步降低结构厚度，提升施工效率；

2. 结合 BIM 技术与智能监测系统，实现预应力施加过程的数字化控制与服役期应力实时预警；

3. 研究低温、高腐蚀等极端环境下的预应力损失规律，优化预应力补偿工艺，扩大技术应用范围。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. SL 191-2020 水利水电工程混凝土结构设计规范[S]. 北京：中国水利水电出版社，2020.
- [2] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2018：156-178.
- [3] 李建林，刘有志. 南水北调中线穿黄隧洞预应力混凝土衬砌设计与施工[J]. 水利学报，2021，52(8)：987-996.
- [4] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范（2015年版）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
- [5] 张勇，王鹏. 高强度预应力混凝土在输水隧洞岔管段的应用[J]. 水利水电技术，2022，53(11)：145-153.

# Precision Control and Practice of 3D Laser Scanning in Construction Surveying of Rail Transit

Xiaoming Wang<sup>1</sup> Yulong Yang<sup>2</sup>

1. PowerChina Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing, 100070, China

2. Powerchina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shanxi, 710000, China

## Abstract

As rail transit projects evolve toward greater complexity and scale, the demand for construction surveying precision has become increasingly stringent. Traditional surveying techniques can no longer meet the requirements for efficient and accurate measurements. 3D laser scanning technology, as an innovative spatial data acquisition method, has gained widespread adoption in rail transit construction surveying due to its advantages of speed, high precision, and non-contact operation. This paper focuses on precision control in 3D laser scanning applications for rail transit construction, detailing its implementation and significance. It analyzes key precision control steps and practical measures, with concrete engineering cases demonstrating the technology's effectiveness. The study provides reliable technical support for quality control, offering substantial engineering value.

## Keywords

3D laser scanning; construction surveying of rail transit; precision control strategy

## 三维激光扫描在轨道交通施工测量中的精度控制与实践

王晓明<sup>1</sup> 杨玉龙<sup>2</sup>

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

伴随着轨道交通工程朝着复杂化、大型化方向发展, 对施工测量精度的要求越来越高, 传统的施工测量技术已经不能满足高效、精准的施工测量需求。三维激光扫描技术作为一种新的空间数据采集技术, 因为具有快速、高精度、非接触等优点, 在轨道交通施工测量领域得到了广泛的应用。本文以三维激光扫描技术在轨道交通施工测量中的精度控制为核心, 介绍三维激光扫描技术的应用及意义, 重点分析精度控制的关键步骤和实际措施, 用具体的工程案例验证技术应用效果, 为工程质量控制提供可靠的技术支撑, 有很重要的工程应用价值。

## 关键词

三维激光扫描; 轨道交通施工测量; 精度控制策略

## 1 引言

轨道交通工程属于城市基础设施建设的重要组成部分, 施工质量直接影响运营安全及使用寿命, 施工测量作为工程质量控制的重要环节, 对于工程轴线、高程和结构尺寸的精确把控起着决定性的作用。传统施工测量技术, 全站仪、水准仪等存在着工作效率低、劳动强度大、数据整体性差的缺点, 在复杂的施工环境中出现精度误差的情况比较多。近些年来, 由于三维激光扫描技术具备着“快速扫描、海量数据、精确建模”的特性, 所以突破了传统测量技术的局限性。本文根据轨道交通施工测量的精度要求, 系统分析三维激光扫描技术的应用价值, 梳理精度控制要点, 给出相应的实践策

略, 为该技术在轨道交通施工测量中的规范化应用提供理论和实践依据。

## 2 三维激光扫描技术在轨道交通施工测量中的核心概述

### 2.1 三维激光扫描技术的基本原理

三维激光扫描技术又叫“实景复制技术”, 其实质是用激光发射器向被测物体发出高频激光束, 用接收器接收物体表面反射回来的激光束, 然后根据激光测距原理(如脉冲法、相位法)来测定激光发射点到目标点的距离。同时设备内装的陀螺仪、倾角仪等姿态传感器以及 GPS、北斗等定位系统可以实时得到扫描设备的空间位置及姿态参数, 利用空间坐标转换算法, 把大量的离散激光点坐标转换成三维点云数据, 最终得到目标物体的三维实景模型。在轨道交通施工测量中可以对施工区域的地形地貌、结构构件、施工场景

【作者简介】王晓明(1984-), 男, 中国吉林长春人, 本科, 高级, 从事轨道交通施工管理研究。

进行全方位的数据采集,给后续的测量分析提供完整的数据基础<sup>[1]</sup>。

## 2.2 轨道交通施工测量的技术特性

轨道交通施工测量具有很强的行业特点,其一,精度要求极高,轨道线路的轴线偏差、高程误差必须控制在毫米级,否则会直接影响到列车的平稳、安全运行;其二,作业环境复杂,施工地点大多处于城市核心区,周围建筑多、地下管线纵横交错,传统的测量方法很容易受到遮挡的影响;其三,动态特征明显,在施工期间,结构构件不断安装,地形地貌不断变化,需要进行跟踪测量。

## 2.3 三维激光扫描技术的核心设备构成

三维激光扫描系统主要由核心扫描设备、数据处理软件、辅助设备三大部分组成。核心扫描设备分为地面式、车载式和机载式,轨道交通施工测量中以地面式为主,如 Faro Focus S 系列、Leica ScanStation P 系列,扫描距离可达 100 米到 1000 米,点云精度最高可达到 0.1 毫米,满足不同的施工场景;数据处理软件是精度控制的关键,主流软件包括 Cyclone、CloudCompare、Trimble RealWorks 等,具备点云去噪、拼接、建模、对比分析等功能;辅助设备有标靶、棱镜、三脚架、笔记本电脑等,标靶用于扫描站间拼接定位,棱镜用于传统测量数据的校准,三脚架保证扫描设备的稳定性。设备的性能参数以及适配性会直接影响到测量的精度,需要根据施工的场景来合理的选择<sup>[2]</sup>。

## 2.4 三维激光扫描技术的作业流程

轨道交通施工测量中,三维激光扫描技术的标准作业流程为,前期准备、数据采集、数据处理、成果输出。前期准备阶段要确定测量范围和精度指标,搜集设计图纸,现场勘察资料,规划扫描站点和标靶布设地点;数据采集阶段通过架设设备,设置扫描参数(分辨率,扫描速度,距离模式),逐个扫描各站点,并记录现场环境参数(温度,湿度,气压);数据处理阶段是精度控制的关键环节,包含点云去噪(去除噪声点,重复点),拼接(按照标靶或者特征点的多站数据融合),配准(同设计模型或者传统测量数据校准),建模(创建三维实景模型或者结构化模型);成果输出阶段按照施工需求,产出点云数据报告,三维模型,偏差分析图表等成果,给施工决策给予支撑。

# 3 三维激光扫描技术应用于轨道交通施工测量的重要意义

## 3.1 提升施工测量效率,保障施工进度

传统测量需要逐点测量,在复杂的结构或者大面积区域内要几天甚至几周才能完成数据采集,三维激光扫描技术可以一键式快速扫描,单站扫描时间只需 5 到 10 分钟,在地铁车站、隧道等典型的场景下,一天之内可以完成全区域的数据采集。数据处理软件自动化功能大大缩短了数据处理的时间,如 Cyclone 软件可以实现点云拼接建模的自动化操

作,与手工绘制相比,效率提高了 80% 以上。高效的测量作业可以及时给施工提供数据支撑,减少因测量滞后造成的停工时间,在轨道交通工程中,由于工期紧张、任务繁重,高效测量作业更有利于保证施工进度按计划进行<sup>[3]</sup>。

## 3.2 提高测量精度,降低工程质量风险

轨道交通施工测量的精度直接决定工程质量,传统的测量受人为操作误差、环境干扰等因素的影响,精度很难稳定控制,而三维激光扫描技术采用非接触式的测量方式,不会受到人为操作对测量结果的影响,其点云数据的精度可以达到 0.1mm 级,远远高于传统全站仪的毫米级精度。采用多站数据拼接、交叉验证的方式能够很好地消除单点测量误差,保证测量成果的一致性、可靠性。如地铁隧道施工时,用三维激光扫描技术对隧道断面实施监测,可以准确捕捉隧道沉降,位移等变形数据,及时发出质量风险警报,同传统的断面仪测量办法比,偏差检测精确度改善超过 50%,很大程度削减了由于检测不准引发的工程返工危险。

## 3.3 优化施工管理模式,实现动态管控

三维激光扫描技术得到的三维点云数据,可以创建出和施工现场完全一致的实景模型,这个模型可以与设计 BIM 模型进行准确对比,快速找出施工偏差,比如结构尺寸不符、管线碰撞等,实现施工质量的可视化检测。除了在施工各个阶段定期获取点云数据之后,在动态数据库之中会产生动态模型,可以方便地对结构的变形趋势、施工进度落后等重要数据展开剖析,并为施工管理提供数字化的决策建议。轨道交通桥梁施工当中,针对不同的工期对点云模型展开比较,可以对桥梁墩柱的垂直度以及标高变化展开实时监测,及时对施工工艺做出调整,实现施工过程的动态控制。以数据为驱动的管理模式比传统的以经验为驱动的模式更加科学、具有前瞻性,从而提高了施工管理的水平<sup>[4]</sup>。

## 3.4 降低作业风险,保障施工安全

轨道交通施工环境比较复杂,比如地下隧道、高空作业区域等,传统的测量人员必须到危险区域去进行作业,存在着高空坠落、坍塌等安全风险。三维激光扫描技术用远距离非接触的方式测量,测量人员在安全的地方就能进行数据采集,不需要到危险的工作面去工作,大大降低了工作安全风险。地铁暗挖隧道施工中,隧道内部地质条件复杂,容易发生坍塌事故,利用三维激光扫描技术从隧道口向内部扫描,可以得到隧道内部完整的地形地质数据,不需要人员进入隧道内部作业,有效地规避了安全风险。同时利用点云数据对施工区域开展安全隐患排查,识别出管线裸露、结构裂缝等隐患,给安全管理提供准确的依据,保障施工安全。

# 4 轨道交通施工测量中三维激光扫描的精度控制与实践策略

## 4.1 前期准备阶段的精度控制策略

前期准备阶段为精度控制打基础,关键在方案设计、