doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.02.031

三维激光扫描技术在隧道限界中的应用

闫晓楠[1]，宋洪英[1]，徐　奇[1]，霍燕涛[1]，程　潇[1]
（1. 航天规划设计集团有限公司，北京 100162）

摘　要：针对新建地铁区间隧道限界是影响地铁安全运营重要因素之一，基于移动式三维激光扫描技术对新建地铁车站、隧道进行三维激光扫描作业，结果表明区间隧道管片椭圆度整体在10‰以内，椭圆度最大为12.5‰，椭圆度最小为1.6‰，整体拼装质量安全可靠；隧道水平直径与标准直径间存在偏差，最大偏差为41.7 mm，最小偏差为-0.8 mm，平均偏差为15.7 mm；对车站滑动门进行限界检测分析，发现共计存在15道滑动门侵界现象，侵界长度最大值为30.2 mm，最小值为2.2 mm，平均值为17.6 mm，侵界均为防踏空胶条不影响行车安全，移动式三维激光扫描技术为列车开通运营提供安全数据支持。

关键词：移动式；三维激光扫描；隧道；椭圆度；水平直径；限界
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）02-0146-03

Application of 3D Laser Scanning Technology in Tunnel Clearance

YAN Xiaonan[1], SONG Hongying[1], XU Qi[1], HUO Yantao[1], CHENG Xiao[1]
(1. Aerospace Architectural Design and Research Institute Co., Ltd, Beijing 100162, China)

Abstract: The clearance of new subway tunnel is one of the important factors affecting the safe operation of subway. In this paper, we used the mobile 3D laser scanning technology to scan new subway station and tunnel. The results show that the overall ovality of tunnel segment is less than 10‰, the maximum ovality is 12.5‰, and the minimum ovality is 1.6‰. The overall assembly quality is safe and reliable. The maximum deviation is 41.7 mm, the minimum deviation is -0.8 mm, and the average deviation is 15.7 mm. Through the limit detection and analysis of the station sliding doors, it is found that there are 15 sliding doors invading the boundary. The maximum length of the invading boundary is 30.2 mm, the minimum is 2.2 mm, and the average value is 17.6 mm. All the invading boundaries are anti tread rubber strips, which do not affect the driving safety. The mobile 3D laser scanning technology provides safety data support for the train operation.

Key words: mobile, 3D laser scanning, tunnel, ovality, horizontal diameter, clearance

三维激光扫描技术是上世纪九十年代中期开始出现的一项高新技术，是继GPS空间定位系统之后又一项测绘技术新突破[1-4]。它通过高速激光扫描测量的方法，大面积、高分辨率地快速获取物体表面各个点的三维坐标、反射率、颜色等信息，利用这些大量、密集的点信息可快速复建出1∶1的真彩色三维点云模型，为后续的内业处理、数据分析等工作提供准确依据。其具有快速性，效益高、不接触性、穿透性、动态、主动性，高密度、高精度，数字化、自动化、实时性强等特点，很好地解决了目前空间信息技术发展实时性与准确性的颈瓶[5-6]。与传统检测方法相比，移动式三维激光扫描新技术效率大大提高，是未来隧道检测技术的重要发展方向之一[7]。

地铁隧道限界是保证城市轨道交通列车运行安全的重要指标。随着轨道交通建设的不断发展，地铁相关的限界测量、断面测量、变形监测、地铁三维地理信息系统等信息对地铁建设、运营技术管理方面起着重要作用。本文基于移动式三维激光扫描技术对新建车站、区间隧道进行三维激光扫描作业，其结果旨在为地铁安全运营提供科学的数据支撑，同时为相关工程项目提供参考依据[8-10]。

1　三维激光扫描基本原理与方法

三维激光扫描系统主要由扫描系统、控制系统和计算机系统三部分组成，三维激光扫描仪通过高速转动的马达来使扫描头部转动，与此同时激光发射器发出激光，激光经过待测物体表面反射回到扫描系统，被扫描系统中的激光接收器接收，激光接收器根据激光反射回来的水平向扫描角度 α 和竖向扫描角度 β 、激光束从发射到被接收的往返传播时间 t 、信号强度等信息，由往返时间 t 求出扫描仪到目标物体之

收稿日期：2021-06-14。

间的距离 S，再配合扫描仪自身的位置信息，就可以反演得到目标物体表面的三维坐标信息及反射强度信息等。

在测量过程中每一台三维激光扫描仪都有自身的坐标系统，仪器的中心就是自身坐标系的原点，X 轴与 Y 轴相互垂直位于水平扫描视场，Z 轴垂直于 X、Y 轴构成的平面位于竖向视场，如图1所示。

根据图1几何关系，即可得到目标物体的三维坐标计算公式。

$$\begin{cases} X = S \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \\ Y = S \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta \\ Z = S \cdot \sin\beta \end{cases} \tag{1}$$

式中，S 为扫描仪到物体的距离；α、β 分别为水平向扫描角度和竖向扫描角度。

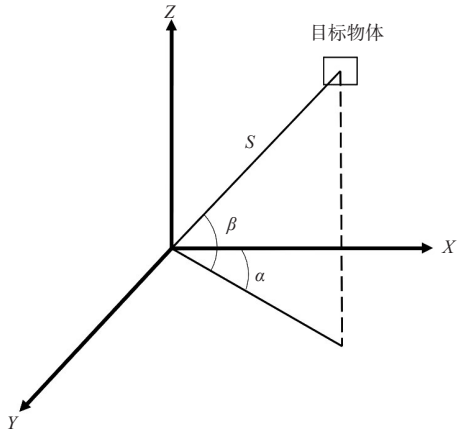


图1　三维激光扫描原理图

2　项目概况

本项目主要完成某新建地铁车站、区间隧道三维激光扫描任务，对扫描数据进行分析、形成成果报告等，其中车站仅扫描站台部分，站台长约120 m，区间隧道约1.5 km。在线路正式开通前，以三维激光扫描方式开展新线普查，可以全面了解新线结构现状，为新线接收、缺陷整改、试运行期间地铁结构维修提供科学依据。

3　作业流程与数据处理

三维激光扫描作业先进行外业作业再进行内业数据处理，外业扫描作业主要是数据采集的工作，内业数据处理相对复杂。本次三维激光扫描内业数据处理流程如图2所示。

由图2可知，三维激光扫描的外业作业采集的数据会通过扫描系统将采集所得数据进行数据预处理，主要包括将原始数据进行数据转换、线性化、轨迹解算处理等等，扫描系统数据预处理后得到点云数据；点云数据进行格式转换、点云去噪处理；将得到点云数据通过Cyclone软件处理，得到区间隧道椭圆度、水平直径和限界等信息。最终的成果输出资料主要包括区间隧道、车站三维空间信息、区间隧道、车站点云数据模型、正射影响图、区间隧道椭圆度、水平直径和限界等成果资料。

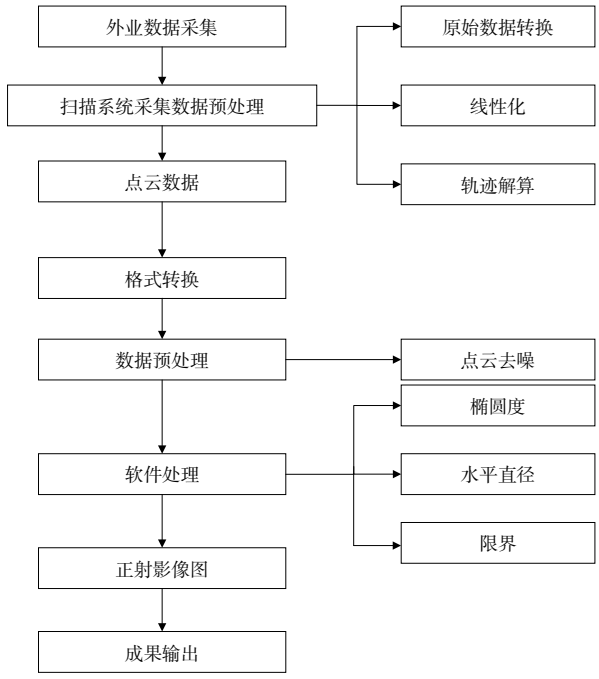


图2　数据处理流程图

4　案例分析

4.1　椭圆度分析

目前地铁隧道基本上都采用盾构法施工，区间隧道在设计施工时为圆形，但在施工后会变形为离心率很小的椭圆，椭圆度的大小可以表示施工的工艺质量。对区间隧道三维激光扫描结果中椭圆度进行可视化分析，结果如图3所示。

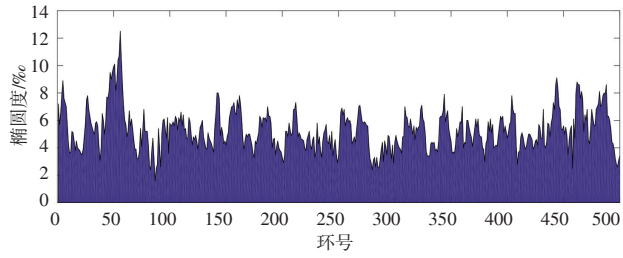


图3　椭圆度可视化结果

由图3可知，椭圆度最大在56环，表现为12.5‰，椭圆度最小表现在87环，椭圆度为1.6 ‰，总体而言，500个管片椭圆度基本在10‰以内，整体拼装质量可靠。

4.2 水平直径分析

标准盾构隧道为圆形，外径6.3 m，标准隧道水平直径为5.5 m，衬砌采用拼装管片，管片厚度0.35 m。对区间隧道三维激光扫描结果中水平直径与标准内径进行偏差分析，对其结果进行可视化分析，如图4所示。

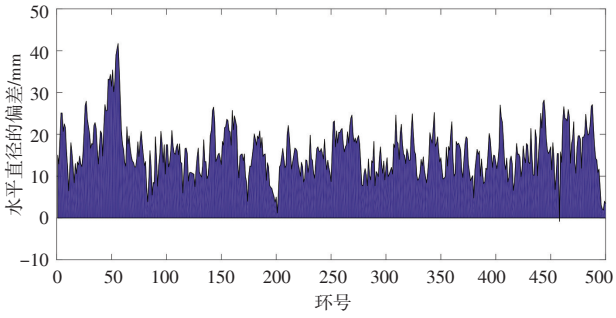


图4 水平直径偏差可视化结果

由图4可知，隧道水平直径与标准直径间存在偏差，99.9%隧道水平直径整体大于标准直径，只有一环管片小于标准直径；隧道水平直径与标准直径间最大偏差为41.7 mm，最小偏差为−0.8 mm，平均偏差为15.7 mm。

4.3 限界分析

以轨面中心线为基准，导入设计限界图，计算扫描点云与限界边线的最小距离，判断车辆是否侵限，同时确定侵限长度大小。对车站28道滑动门进行限界检测分析，结果表明共计存在15道滑动门侵界，分析查看后确认均为防踏空胶条侵界，不影响行车安全；15道滑动门侵界长度最大值为30.2 mm，最小值为2.2 mm，平均值为17.6 mm。

5 结 语

本文基于三维激光扫描技术对某新建地铁车站、区间隧道三维激光扫描作业，并对其成果进行分析，结果表明500个管片椭圆度基本在10‰以内，整体拼装质量可靠，椭圆度最大为12.5‰，椭圆度最小为1.6‰。隧道水平直径与标准直径间存在偏差，最大偏差为41.7 mm，最小偏差为−0.8 mm，平均偏差为15.7 mm；对车站28道滑动门进行限界检测分析，发现共计存在15道滑动门侵界，侵界长度最大值为30.2 mm，最小值为2.2 mm，平均值为17.6 mm。本文通过三维激光扫描技术确定了地铁隧道限界，保障了地铁行车安全，也为今后同类项目提供参考依据。

参考文献

[1] 张琰,孔祥思,徐西桂. 基于移动三维激光扫描的隧道结构监测方案研究与应用[J]. 矿山测量,2021,49(1):20-25

[2] 刘永锋,李翅,黄兵杰,等. 移动三维激光扫描轨检小车在地铁盾构隧道椭圆度检测中的应用[J]. 城市勘测,2020(6):119-122

[3] 张丽,丛晓明,赵生良. 移动三维激光扫描技术在隧道结构监测中应用[J]. 测绘通报,2020(8):153-156

[4] 陆培庆,唐超. 移动式三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 测绘通报,2020(5):155-157+160

[5] 杜荣武,翁顺,曾铁梅,等. 基于移动三维激光扫描的地铁隧道结构监测方法[J]. 土木工程与管理学报,2020,37(1):139-145

[6] 王倩. 三维激光扫描技术在地铁隧道监测中的应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019

[7] 夏金周. 移动式三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用研究[D]. 南京:东南大学,2019

[8] 盛方剑. 移动三维激光扫描系统在地铁盾构隧道管片椭圆度检测中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市,2021(5):136-137

[9] 张亚勇. 基于移动激光扫描三维点云的限界检测技术研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(5):44-48

[10] 刘新根,陈莹莹,刘学增. 激光扫描盾构隧道断面变形快速检测[J]. 交通运输工程学报,2021,21(2):107-116

第一作者简介：闫晓楠（1989—），工程师，从事大地测量理论与应用研究工作。