

TLS技术在地铁隧道断面测量中的应用

李志超, 闫阳阳, 王双雨

机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年4月3日; 发布日期: 2023年4月7日

摘要

针对传统测量方法在地铁隧道断面测量中存在的过程复杂、效率低下等问题, 本文采用地面三维激光扫描(TLS)技术, 使用标靶联系测量法和导线测量法进行外业数据采集。以设计线路为基准提取隧道的连续断面, 采用最小二乘法对提取的断面进行拟合, 获取断面的中心坐标, 与隧道设计中心进行比较, 获取隧道的断面尺寸。以合肥地铁某区间为例进行试验, 结果表明本文技术方法较传统监测方法能够快速实现隧道断面测量, 有效提升工作效率。

关键词

TLS, 地铁隧道, 断面测量

Application of TLS Technology in Metro Tunnel Boundary Measurement

Zhichao Li, Yangyang Yan, Shuangyu Wang

China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Feb. 21st, 2023; accepted: Apr. 3rd, 2023; published: Apr. 7th, 2023

Abstract

In view of the problems of complex process and low efficiency of traditional survey methods in metro tunnel section survey, this paper uses ground three-dimensional laser scanning (TLS) technology, target contact survey and traverse survey to collect field data. The continuous section of the tunnel is extracted based on the design line, and the least square method is used to fit the extracted section to obtain the center coordinates of the section, and the section size of the tunnel is obtained by comparing it with the tunnel design center. Taking a section of Hefei Metro as an example, the test results show that the technical method in this paper can achieve tunnel section measurement faster than the traditional monitoring method, and effectively improve the work efficiency.

Keywords

Terrestrial Laser Scanning, Subway Tunnel, Section Survey

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三维激光扫描技术又称“实景复制技术”，是一种高效率、高精度、非接触式的主动测量技术[1]，地面三维激光扫描系统主要由三维激光扫描仪、软件控制平台、电源及其他附属设备组成，它可以在多种观测条件下进行外业扫描，快速获取目标物体的表面三维坐标数据，同时可以通过激光扫描仪内置或外接的同轴数码相机拍摄的影像将点云赋上真彩色，建立数字表面模型，实景呈现扫描物体的真实场景。三维激光扫描由于其使用简单、扫描快速，操作安全且精度高等技术优势，可以极大地提高外业数据采集效率，降低工作人员的劳动强度，提高生产效率，已在诸多领域得到应用[2] [3] [4]。

张胜军[5]等采用三维激光扫描技术进行地铁隧道扫描，并开发了相应的数据处理软件，对采集的点云进行了精度验证，从内符合精度和外符合精度上证明了三维激光扫描技术能满足地铁隧道断面测量的要求。徐教煌[6]等阐述了三维激光扫描测量点云数据坐标转换优化设计，并详细介绍了三维激光扫描技术在地铁圆形盾构隧道检测中的点云数据采集流程、处理方法及成果分析，结合工程实例证明该方法能有效地获取地铁隧道断面测量、椭圆度检测、中心线等成果。张祥[7]采用三维激光扫描技术对地铁隧道进行健康监测，实现对地铁隧道管壁、中轴线及断面等典型特征的精确提取。王博群[8]等运用空间几何的方法从海量三维激光点云数据中快速、准确地提取地铁盾构隧道断面和中心点的方法，验证了三维激光扫描技术在地铁盾构隧道竣工测量中具有较强的实用性。地面三维激光扫描技术已经广泛应用于地铁隧道工程测量，在隧道中轴线提取、纵横断面及断面限界测量、调坡调线、三维建模等方面逐渐成熟，但是作业效率和数据处理精度仍需进一步提高[9] [10]。

2. TLS 技术应用于断面测量的工作流程

TLS 技术应用于地铁区间隧道主要工作流程：现场踏勘、收集资料、制定扫描方案；外业扫描，获取点云数据；点云数据预处理，包含点云数据拼接、配准、去噪和数据简化；数据转换、应用分析等。数据获取流程如图 1 所示。

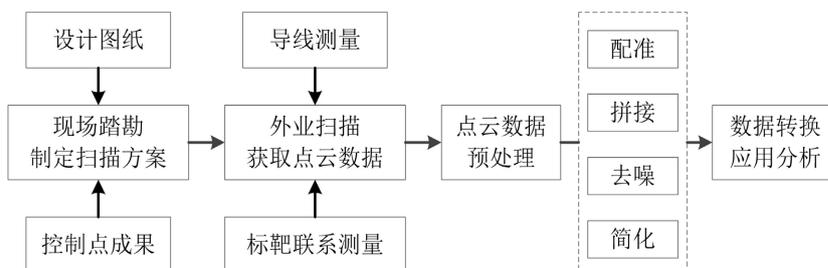


Figure 1. Ground 3D laser scanning data acquisition process

图 1. 地面三维激光扫描数据获取流程

地铁隧道区间为狭长空间，对于地面激光扫描仪的架设及外业测量工作极为不利，因此需要到现场进行踏勘，确定测站间距、标靶布设位置。扫描参数的合理设置有利于在确定的隧道长度和精度范围内使用最少的扫描时间，为确保扫描进度高效及点云质量。断面测量的目的是为后续调线调坡提供基础数据，为了获取区间断面的限界尺寸，点云数据要求为绝对坐标，作业时需要使用贯通测量控制点作为控制基准。三维激光扫描具体实施方案如下：

1) 现场踏勘，制定扫描方案

外业扫描前需要收集相关的设计图纸和控制点资料，现场踏勘、确认隧道内的控制点，对可用的控制点标记、保存。根据扫描目标的形状、位置、空间分布、精度要求以及扫描分辨率确定测站的位置、标靶的位置，根据扫描站位置考虑拼接方式。扫描方案包括项目概况、技术设计依据、测量控制点布设方案、数据处理方案、提交成果、项目工作进度计划、人员分组、后勤保障等。

测站点必须能够将本站目标物全部扫描到而且能和标靶点通视，标靶点需要和测站通视并且每个测站标靶点不得少于三个。隧道三维激光扫描采用的是高精度三维激光扫描仪，根据现场实际情况采用 $10\text{ m}@3\text{ mm}$ 的分辨率，以此来保证扫描区域的数据采集质量和点云数据精度。

2) 外业扫描

考虑到隧道管片没有明显的特征点用于匹配拼接，获取的点云数据要求为绝对坐标，外业扫描采用标靶联系测量法和导线测量法。激光扫描测站及标靶布置见图 2 所示。

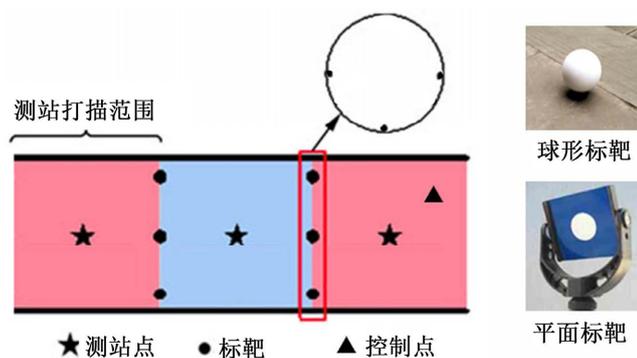


Figure 2. Layout of laser scanning station and target
图 2. 激光扫描测站及标靶布置示意图

标靶联系测量法进行三维扫描点云数据的采集，采用的为仪器自定义的坐标系，在扫描作业过程中同时将已知控制点扫描进来，后期在完成自由拼接的基础上再和已知控制点进行拼接，这样可以将仪器自带的坐标系转化为同一个坐标系，便于后续工作的开展。

对于扫描现场有部分已知控制点，而扫描项目又需要实现点云高精度拼接的情况，可以采用导线测量的方法进行扫描，导线布设样式如图 3 所示。主要步骤如下：1) 在扫描前布设导线点，即地面激光扫描仪架站点(A, B, C, D, T1, ..., Tn)；其中 A、B、C、D 为已知点；2) 仪器架设在 B 点，A 点架设标靶作为后视点，A、B 用已知坐标设站方法进行设站测量；3) 完成 B 点设站后开始扫描，同时对 T1 点架设前视标靶进行精扫；4) 将仪器搬站至 T1 点，使用已知后视点设站方法，扫描后视点 B 标靶完成定向后，进行后续扫描，同时扫描前视点 T2 标靶；5) 依次完成各个站的设站和扫描任务，直至扫描至 C 点为止，同时整个导线测量和扫描中量取仪器高和标靶高，确保获取正确的高程值，这样不仅完成了导线测量，同时完成了各站的扫描任务。6) 将导线测量数据导入后处理软件中查看、编辑，核对各站点的

点号及仪器高和标靶高是否正确。核对完成后对设站数据进行拼接，拼接报告中可以查看各导线点的坐标信息，导线总长度和闭合差信息。

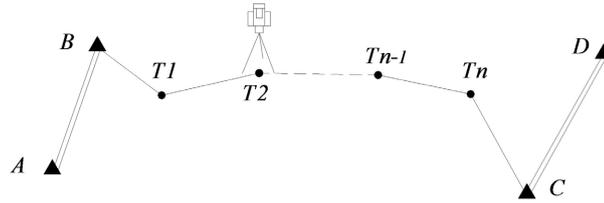


Figure 3. Ground 3D laser scanner traverse method
图 3. 地面三维激光扫描仪导线测量法

扫描站点布设在隧道中间位置，采用 360°扫描方式对隧道全方位扫描，开始扫描时，从开始的一端优先对控制点上的标靶进行精细扫描，由设备拟合出标靶中心点坐标，后进行完整扫描。每一站扫描结束后移动前进方向尾部的两个靶球至前方，保障每相邻两站数据间存在至少 4 个公共靶球，作为点云拼接的依据。由于隧道狭长，由于隧道内径仅有 5.4 m，未必免入射角过大的激光采集会的数据反射率较低，采用约 10 m 一个站点的方式，不仅保证的数据的重叠范围，也保证了靶球的可识别率。

3) 点云数据预处理

点云数据预处理主要包括：点云配准、点云拼接、点云去噪和点云简化。通过数据预处理，可以有效剔除点云中的噪声和外点，在保持几何特征的基础上实现点云数据简化，并将不同角度扫描的点云统一到同一坐标系下，为后续工程应用提供数据基础。

a) 点云配准

点云配准就是将不同坐标系下的点云数据通过刚性变换关系，将它们变换到同一坐标系下。点云配准主要分为两个步骤，一是在待配准点云重叠区域寻找它们的对应点，二是通过对对应点求解待配准点云之间的变化关系。假设相邻两站点云数据 P 和 Q 的刚性变换为 H，(x, x') 为这两站点云的一组对应点，那么这组对应点满足如下变换关系：

$$X' = HX \tag{1}$$

其中，X 和 X' 表示 x 和 x' 的齐次形式，刚体变换矩阵 H 是由一个 3 × 3 的旋转矩阵 R 和一个 3 × 1 的平移矩阵组成 T 矩阵：

$$H = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

关系式也可以表示为 $x' = R_{3 \times 3} \cdot x + T_{3 \times 1}$

其中旋转矩阵 $R_{3 \times 3}$ 为正交旋转矩阵，可以表示为：

$$R_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中，α、β、γ 分别表示沿 x、y、z 轴的旋转角。由上式可以看出刚性变换包含 6 个配准参数，从理论上来说，要计算出六个参数至少需要三组不共线的对应点。

b) 点云拼接

点云拼接其实就是把不同测站的点云转化到具有统一坐标系统的整体空间平台下,即数据的拼接。在两个右手坐标系的三维直角坐标系中,通过旋转、平移使得两个坐标原点不同、坐标轴方向不同的坐标系统统一到同一坐标系下。本文采用基于控制点的拼接和基于标靶的拼接两种方法。

c) 点云去噪

点云去噪是指将不属于扫描对象的多余数据去除。拼接后的三维点云数据,并不是所有的点云都是有效和有用的,对获取的点云数据和影像数据进行预处理,去除原始点云中与被测物无关的点云数据,应用某些滤波算法剔除初始点云中的错误点和误差点。地铁隧道点云数据中需要剔除的噪声主要包括管道、电线、支撑结构以及工作人员等。

d) 点云简化

在外业扫描时,点云数据的采样密度较高,存在巨大的冗余,造成数据量的庞大,对后期的处理和成图、存储、显示带来困难,同时也造成计算资源和人力资源的浪费,因此对点云数据的简化处理尤为必要。

3. 隧道断面数据处理

隧道断面数据处理主要包括:根据设计文件生成线路数据;以设计线路为准进行点云数据切片、中心线提取和限界计算。

1) 生成设计线路

针对传统方法在地铁隧道断面数据处理中效率低、三维可视化效果差、检查困难等问题,采用 C#编程语言和 .NET API 对 AutoCAD 进行了二次开发,编制了地铁隧道断面数据处理程序。根据平曲线、竖曲线、断链、隧中偏移、隧中升降等设计数据按照一定的间距绘制平曲线和竖曲线及相关控制线。

2) 点云切片

点云的切片的目的是为点云的拟合做准备。以隧道的设计中线为基准,沿中轴线方向创建垂直于隧道中线的隧道断面,点云数据切片的厚度根据实际需要进行设定。按照设计要求,直线段每 6 m、曲线段每 4.5 m 提取一个断面。

3) 椭圆度计算

在提取断面后进行长短半轴的测量,并求取椭圆度,参照公式(4)进行计算:

$$T = 2 \times (a - b) / D \quad (4)$$

式中 T 为椭圆度, a 为长半轴, b 为短半轴, D 为隧道内径。

4) 中心线提取

将切片点云投影到与设计中线垂直的平面上,断面点云坐标由三维空间变换至二维空间,以便于隧道断面拟合。根据转换系数可实现断面点坐标正向转换和反向转换。根据二维平面中断面位置点和噪点判断距离,剔除噪点,然后拟合隧道圆,获取圆心和半径。隧道圆拟合采用最小二乘法进行。

4. 工程实例

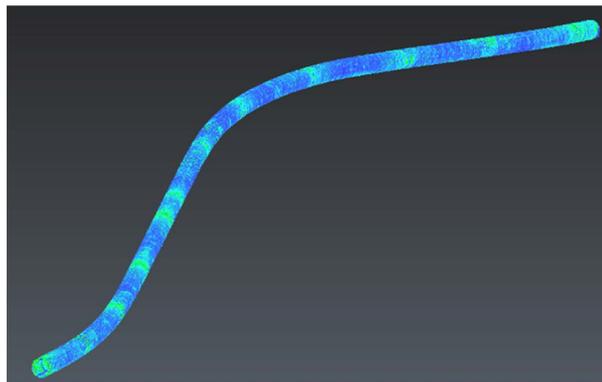
本文以合肥某地铁盾构区间为例,外业使用徕卡 P40 激光扫描仪获取点云数据,该仪器的主要技术指标见表 1。

为得到扫描区域的整体三维点云数据,设置扫描区域为全景扫描,即横向 360 度,竖向 270 度进行全景扫描,扫描过程中对标靶球和安置在控制点上的标靶点进行精细扫描,便于后期点云数据的拼接。公共点使用靶球固定在具体的扫描部位上,保证标靶的稳定性且具有一定的高差。为满足点云数据的拼接要求,相邻测站有 3 个公共点重合。

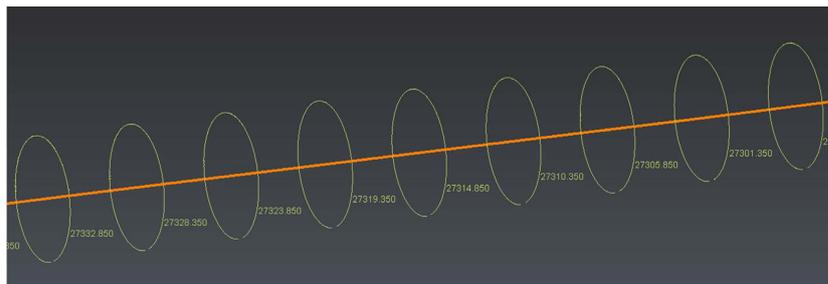
Table 1. Main technical indicators of Leica P40**表 1.** 徕卡 P40 的主要技术指标

| 型号 | 测距原理 | 扫描范围(m) | 扫描视场(°) | 扫描精度 | 最大测速(点/秒) | 配套软件 |
|-----------|------|---------|---------|------------|-----------|---------|
| Leica P40 | 相位式 | 0.4~270 | 270*360 | 6 mm@100 m | 1,000,000 | Cyclone |

三维激光扫描仪获得点云数据之后,导入 Cyclone 软件,进行点云的拼接和预处理。在 Cyclone Register 模块下,对预拼接后的点云根据扫描路线进行优化,然后对点云数据进行去噪和抽稀,得到完整的地铁隧道点云数据。点云效果如图 4 所示。

**Figure 4.** Schematic diagram of 3D laser point cloud of target and tunnel**图 4.** 标靶及隧道三维激光点云示意图

将点云数据导入 3Dresaper 软件中,提取隧道断面的中轴线。本项目采用 3Dresaper 软件进行中轴线拟合提取,由于该段隧道为圆形断面,设置时以圆形为依据创建隧道中线,圆的拟合采用的是最小二乘法进行拟合。隧道点云提取断面示意如图 5 所示。

**Figure 5.** Schematic diagram of tunnel point cloud extraction section**图 5.** 隧道点云提取断面示意图

由于断面数据处理工作量较大,本文基于 C#编程语言和.NET API 对 AutoCAD 进行了二次开发,编制了地铁隧道断面数据处理程序。内业数据可批量处理,极大地提高了效率,并实现了断面测量数据的三维可视化,在三维空间中便于查询、检查。

断面测量程序的运行环境为 AutoCAD,使用 netload 命令加载.dll 文件,程序界面如图 6 所示。程序使用的主要流程有:1) 工程信息配置:设计线路参数;2) 运行程序,根据设计参数绘制平曲线和竖曲线,

计算逐桩坐标；3) 导入断面数据，对每个断面进行空间圆拟合，得到实测圆心和半径。结合设计线路求出横向和竖向偏差，根据隧道断面测量示意图计算出左右横距和顶底点高程；4) 将计算成果按照设计要求的格式输出，绘制断面图，断面效果图如图 7 所示；5) 对数据进行检核，如果不合格，对工程配置和线路参数进行检查。



Figure 6. Program dialog interface

图 6. 程序对话框界面图

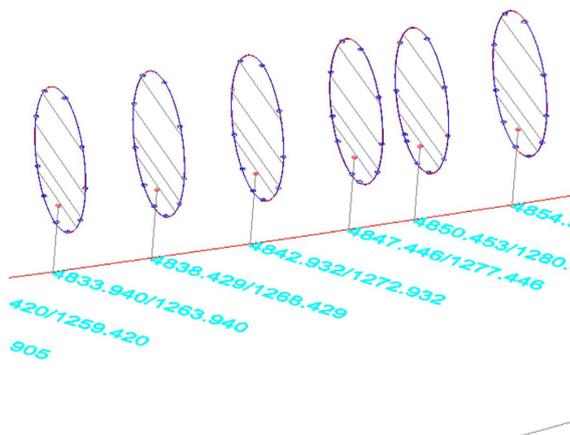


Figure 7. 3D section processing

图 7. 断面处理三维图

对得到的部分结构断面进行分析，参照椭圆度计算公式，计算出椭圆度见表 2。经计算得到的 10 个断面中椭圆度最大为 0.0039，《盾构法隧道施工与验收规范》[11]要求的地铁隧道椭圆度限值为 $\pm 5\%D$ 。结果表明，隧道断面椭圆度在地铁隧道的椭圆度限值之内。

最后拟合出隧道断面的中心，与设计隧道中心点坐标进行对比，得到隧道的限界成果，见表 3。按照设计院要求的格式整理断面测量成果表，作为调线调坡的基础测量数据。

Table 2. Ellipticity calculation results
表 2. 椭圆度计算成果表

| 断面编号 | 长轴 a | 短轴 b | 椭圆度 |
|------|--------|--------|--------|
| 1 | 5.411 | 5.398 | 0.0024 |
| 2 | 5.418 | 5.397 | 0.0039 |
| 3 | 5.408 | 5.393 | 0.0028 |
| 4 | 5.421 | 5.402 | 0.0035 |
| 5 | 5.406 | 5.393 | 0.0024 |
| 6 | 5.404 | 5.389 | 0.0028 |
| 7 | 5.406 | 5.399 | 0.0013 |
| 8 | 5.403 | 5.401 | 0.0004 |
| 9 | 5.416 | 5.402 | 0.0026 |
| 10 | 5.401 | 5.397 | 0.0007 |

Table 3. Tunnel section survey results
表 3. 隧道断面测量成果表

| 序号 | 设计值(m) | | | 实测值(m) | | | 差值(mm) | | |
|----|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|-------|------------|------------|------------|
| | X | Y | H | X | Y | H | ΔX | ΔY | ΔH |
| 1 | ***67.656 | ***89.896 | 8.663 | ***67.646 | ***89.913 | 8.618 | 10 | -17 | 45 |
| 2 | ***68.945 | ***90.654 | 8.666 | ***68.931 | ***90.678 | 8.623 | 14 | -24 | 43 |
| 3 | ***84.466 | ***99.785 | 8.632 | ***84.442 | ***99.827 | 8.665 | 24 | -42 | -33 |
| 4 | ***89.616 | ***02.815 | 8.607 | ***89.600 | ***02.843 | 8.609 | 16 | -28 | -2 |
| 5 | ***94.790 | ***05.859 | 8.574 | ***94.781 | ***05.873 | 8.560 | 9 | -14 | 14 |
| 6 | ***99.970 | ***08.906 | 8.541 | ***99.956 | ***08.929 | 8.540 | 14 | -23 | 1 |
| 7 | ***05.134 | ***11.945 | 8.502 | ***05.117 | ***11.974 | 8.496 | 17 | -29 | 6 |
| 8 | ***10.306 | ***14.988 | 8.456 | ***10.289 | ***15.017 | 8.448 | 17 | -29 | 8 |
| 9 | ***15.473 | ***18.027 | 8.402 | ***15.455 | ***18.057 | 8.387 | 18 | -30 | 15 |
| 10 | ***20.633 | ***21.063 | 8.342 | ***20.621 | ***21.084 | 8.305 | 12 | -21 | 37 |

5. 结束语

本文阐述了地面三维激光扫描(TLS)技术应用于地铁隧道断面测量的外业工作和内业数据处理流程,外业使用徕卡 P40 激光扫描仪获取点云数据,内业使用 Cyclone 软件进行点云数据预处理。使用 3DReshaper 软件以隧道设计轴线为基准连续提取隧道断面,采用最小二乘法对截取的断面进行拟合,通过与隧道设计轴线比较,获取每个断面的限界尺寸。试验证明采用地面三维激光扫描技术进行断面测量,可以克服传统断面测量点位采集量少、断面数量少、作业效率低等缺点,提高断面测量作业效率及精度,在工程项目中具有较强的实用性。本文研究的地铁隧道断面形式为圆形,且选取的研究区域为盾构区段。当地铁隧道发生工后沉降变形,形状变为椭圆形,或者隧道形式为矩形或马蹄形时,需要采取新的方法提取限界尺寸。

参考文献

- [1] 谢宏全. 地面三维激光扫描技术与工程应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2013.
- [2] 闫阳阳, 李永强, 王英杰, 等. 三维激光点云联合无人机影像的三维场景重建研究[J]. 测绘通报, 2016(1): 84-87.
- [3] 许少辉. 地面三维激光扫描技术在地铁隧道竣工测量中的应用[J]. 城市勘测, 2016(5): 68-72.
- [4] 王峰, 王清泉, 王红新, 等. 三维激光扫描技术在地铁工程测量的应用综述[J]. 工程勘察, 2019, 47(1): 56-60.
- [5] 张胜军, 杨志刚, 康妍斐. 三维激光扫描技术在地铁隧道断面测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(6): 197-200.
- [6] 徐教煌, 王嘉伟. 三维激光扫描技术在地铁圆形盾构隧道检测中的应用[J]. 北京测绘, 2018, 32(6): 674-680.
- [7] 张祥. 基于三维激光点云数据的真圆型隧道典型特征提取方法研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [8] 王博群, 鲍艳, 孔恒, 等. 基于点云数据的盾构隧道竣工测量方法[J]. 北京测绘, 2019, 33(2): 184-190.
- [9] 刘宝华, 王智, 宋云记. 三维激光点云和无人机倾斜模型的融合应用[J]. 测绘通报, 2021(6): 159-162, 165.
- [10] 曹建军. 三维激光扫描技术在市政道路工程断面测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(4): 108-109.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50446-2017 盾构法隧道施工与验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.