

# 基于点云数据的隧道超欠挖计算方法<sup>\*</sup>

张志鹏<sup>1,2</sup> 程文明<sup>1,2</sup> 杜润<sup>1,2</sup> 陈鹤天<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都; 2. 轨道交通运维技术与装备四川省重点实验室, 610031, 成都)

**摘要** [目的]在隧道施工过程中,使用钻爆法开挖隧道始终无法避免超欠挖问题,为了准确识别超欠挖位置并对超欠挖进行计算,提出一种基于隧道纵向断面线的超欠挖计算模型。[方法]对由三维激光扫描仪采集到的点云数据进行数据预处理,并提取隧道中轴线;基于三维 Delaunay 算法对点云数据进行曲面重建,在曲面上提取横向和纵向断面线;通过对比横断面实际轮廓线和理论轮廓线,计算超欠挖面积;结合纵向断面线三次样条曲线拟合结果,得到单位半径占有的超欠挖面积,进而分析超欠挖面积与隧道里程之间的函数关系式。[结果及结论]结合横断面超欠挖面积和纵向断面线三次样条曲线拟合结果,沿纵断面线积分计算超欠挖方量的方法,在体积微元形状上考虑了体积微元沿隧道里程方向的变化情况,将超欠挖方量的最小单位简化为曲边棱台,能够通过积分计算超欠挖方量。将所提计算模型应用于实际隧道的超欠挖分析时,在体积微元划分相同的条件下,其计算精度较其他计算方法更高,并能通过色谱图和等值线图,直观地展示隧道超欠挖情况。

**关键词** 隧道; 超欠挖; 点云数据

**中图分类号** U455.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.026

## Calculation Method of Tunnel Over-Under Excavation Based on Point Cloud Data

ZHANG Zhipeng<sup>1,2</sup>, CHENG Wenming<sup>1,2</sup>, DU Run<sup>1,2</sup>, CHEN Hetian<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Technology and Equipment of Rail Transit Operation and Maintenance Key Laboratory of Sichuan Province, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] During tunnel construction using the drilling and blasting method, over-excavation and under-excavation issues are always unavoidable. To accurately identify over-under excavation positions and calculate the over-under excavation, an excavation calculation model based on tunnel longitudinal section lines is proposed for this issue. [Method] Point cloud data collected by the 3D laser scanner are pre-processed and the tunnel central axis is extracted. The 3D Delau-

nay algorithm is applied for curved surface reconstruction of point cloud data, and the transverse and longitudinal section lines are extracted on the curved surface. Over-under excavation areas are calculated by comparing actual cross-section profile lines with theoretical profile lines. Combined with cubic spline curve fitting results of longitudinal section lines, the over-under excavation areas per unit radius are obtained, thereby conducting analysis of the functional relationship between over-under excavation areas and tunnel mileage. [Result & Conclusion] Combining transverse section over-under excavation area with cubic spline curve fitting results of longitudinal section lines, and the method for calculating over-under excavation volumes by integrating along longitudinal section lines, the volume element changes along the tunnel mileage direction in terms of volume element shape are taken into account. The minimum unit of over-under excavation volumes is simplified into a curved prismoid, enabling over-under excavation volume calculation through integration. When applied to the actual tunnel over-under excavation analysis, under identical volume element division condition, the proposed calculation model demonstrates higher calculation accuracy than other calculation methods, while intuitively displaying tunnel over-under excavation situation through chromatograms and contour maps.

**Key words** tunnel; over-under excavation; point cloud data

钻爆法是山岭隧道建设的主流施工方法,但其始终无法避免超欠挖问题,如何准确地检测出超欠挖值、超欠挖面积和超欠挖方量对施工效率至关重要。传统的超欠挖检测采用断面仪、全站仪等设备对隧道进行断面检测<sup>[1-2]</sup>,虽然检测精度较高,但传统检测方法的检测效率低,覆盖面窄,无法反映隧道整体的超欠挖程度。而三维激光扫描仪的检测精度高,同时还可以实现从单点到面的高采样率数据采集,快速获取隧道面整体的点云信息,为隧道超欠挖检测提供了良好的数据来源。

文献[3]采用半径搜索和矩形分割算法对隧道

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51675450); 中车“十四五”科技重大专项科研课题(2021CHZ010-3); 四川省重点研发项目(2022YFG0241)

断面点云进行分割,并基于多边形相交算法对超欠挖面积进行统计。文献[4]在提取隧道断面后,通过定积分计算设计轮廓线与实际轮廓线间的超欠挖面积,并以超欠挖面积与断面间距的乘积作为超欠挖方量。对于由点云投影获得的横断面轮廓,文献[5]将理论轮廓线和实际轮廓线间的面积微分成多个梯形和三角形,进而计算超欠挖面积。文献[6-7]将常用曲线拟合中的三次 B 样条曲线拟合方法推广应用于隧道曲面拟合中的双三次 B 样条曲面拟合,提出一种基于设计面外法线的隧道超欠挖检测模型。

然而,已有研究在断面提取时多采用截取一定厚度的点云来提取隧道轮廓线的方法,截取厚度对断面线提取精度有很大的影响。此外,在使用微元法计算超欠挖方量时,已有研究没有考虑体积微元沿隧道轴向的变化量。鉴于此,本文提出一种隧道超欠挖计算模型,首先对采集到的点云数据进行预处理,通过双面投影法获取隧道中轴线,基于三维 Delaunay 算法对点云数据进行曲面重建,再根据中轴线对曲面进行断面提取,对沿里程方向的纵向断面线进行三次样条曲线拟合,通过曲线方程和超欠挖面积之间的关系将超欠挖体积微元简化为曲边棱台,以便后续进行超欠挖方量计算。本文研究可为隧道的后续爆破和喷浆提供有效的借鉴与指导。

## 1 隧道点云预处理与超欠挖计算

### 1.1 隧道点云数据预处理

#### 1.1.1 点云数据去噪及下采样

由激光扫描仪采集到的原始点云数据噪声较大,特别是灰尘、水汽会造成大量的离群点。此外,原始点云数据量巨大,将会影响程序处理的精度和效率,因此,采用统计滤波算法去除原始点云数据中的离群点。

在原始点云数据去噪后,其数据量仍然较大,对算法处理的速度和效率极为不利,因此需采用下采样以降低数据量。考虑到需保留原始点云数据的关键特征,本文采用体素化网格实现下采样。

#### 1.1.2 隧道中轴线提取

隧道中轴线能够体现隧道的整体走势,在计算超欠挖前,需求出隧道中轴线方程。由于试验中的隧道为直线型隧道,采用精度较高的双向投影法提取隧道中轴线。首先,将原始点云数据分别投影到  $xOy$  水平面和  $yOz$  水平面,采用滚球法提取边界点

云,用最小二乘法拟合边界直线,然后求出原始点云数据在这两个投影面的中线方程,最后将两条平面直线合成为一条空间直线作为隧道中轴线。

### 1.2 断面线提取

断面线提取是计算超欠挖的基础,在直线型隧道中,根据横断面与中轴线的正交关系可以求出断面线。首先,基于三维 Delaunay 算法对隧道进行曲面重建,重建后的隧道表面为大量连续的三角面片;其次,根据设计轮廓线获取横断面设计轮廓点;最后,计算设计断面轮廓线法线向量与隧道实际曲面的交点,并将其作为实际断面轮廓点。

根据所需横断面位置可以确定设计断面轮廓线方程,以一定步长取设计断面轮廓线上的点  $p_d$ ,在设计断面轮廓线方程已知的情况下,可求出点  $p_d$  坐标及其对应的法线向量,再通过 KD 树算法找出与设计轮廓点  $p_d$  距离为  $L$  的所有点,并找出与这些点相关的所有三角面片,通过三角面片顶点求出每一个三角面片所在的平面方程,再结合点  $p_d$  与其对应的法线向量,求出该法线向量所在的直线方程,并计算出该直线方程与每一个三角面片的交点。

由于与设计轮廓点  $p_d$  距离为  $L$  的点有多个,与这些点相关的三角面片并不唯一,所以计算后所得的直线方程与这些三角面片有多个交点,再通过判断交点是否在对应三角面片的内部来找出隧道曲面与直线方程的实际交点。若交点在对应三角面片的内部,则说明该点是实际交点,即隧道实际断面轮廓点。最后,按照一定步长在隧道圆周方向上取多个设计轮廓点,使用上述计算步骤可得到多个实际断面轮廓点,依次连接轮廓点即可获取断面线。

### 1.3 超欠挖计算方法

超欠挖指开挖隧道实际表面和设计表面之间的关系,若设计表面在实际表面内,则称为超挖;若设计表面在实际表面外,则称为欠挖。超欠挖计算主要包括超欠挖值、超欠挖面积、超欠挖方量计算。

#### 1.3.1 超欠挖面积计算

超欠挖面积是指设计断面线与实际断面线间围成的区域。基于微元法思想,将相邻两点到隧道设计轮廓间的区域等价为梯形和三角形,将实际轮廓点到设计轮廓点间距离作为梯形的上下底边,将相邻两个设计轮廓点间的距离作为梯形的高<sup>[5]</sup>。基于这些量,可以计算出沿圆周方向上第  $i$  个梯形面积  $S_{A,i}$ 。

沿圆周方向上第  $i$  条纵向断面线的单位半径占

有的超欠挖面积  $S_{r,i}$  可以表示为:

$$S_{r,i} = \frac{S_{A,i}}{|R_{tho,i} - R_{act,i}|} \quad (1)$$

式中:

$R_{act,i}$ ——第  $i$  个梯形处的隧道实际半径;

$R_{tho,i}$ ——第  $i$  个梯形处的隧道理论半径。

采用 1.2 节所述的断面轮廓线提取方法,沿隧道里程方向提取纵向断面,得到一系列实际断面轮廓点后,将这些交点作为曲线控制点,通过三次样条曲线对纵断面线进行断面线拟合;随后,通过三次样条曲线方程可以获取任意待测点的实际半径,即超欠挖值;最后,结合  $S_{r,i}$  可以计算出任意点的超欠挖面积。

沿圆周方向上第  $i$  条纵向断面线上,隧道里程为  $y$  处的超欠挖面积  $S_{iy}$  可以表示为:

$$S_{iy} = S_{r,i} (R_{act,i} - R_{tho,i}) \quad (2)$$

### 1.3.2 超欠挖方量计算

超欠挖方量指隧道设计曲面与开挖实际曲面之间的体积。采用体积微元法将这部分体积划分为多个曲边棱台,分别计算出这些微元的体积,最后再对整个隧道的超欠挖方量数据进行统计。

1) 通过  $S_{r,i}$  与拟合后的三次样条曲线  $\tau_i(y)$  之间的关系,可以获得第  $i$  条纵向断面线的欠挖面积与隧道里程方向  $y$  的函数  $S_i(y)$ , 则有:

$$S_i(y) = S_{r,i} (\tau_i(y) - R_{tho,i}) \quad (3)$$

2) 对  $\tau_i(y)$  进行积分可以求出体积微元曲边棱台体积。第  $i$  条纵向断面线上,隧道里程为  $y$  处的曲边棱台体积  $V_{iy}$  可以表示为:

$$V_{iy} = \int_y^{y+\Delta y} S_i(y) dy \quad (4)$$

式中:

$\Delta y$ ——曲边棱台高度。

3) 所有体积微元相加后可以得到开挖面超欠挖体积总量。设  $V_1$  为超挖体积与欠挖体积的差值,可以表示为:

$$V_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} \quad (5)$$

式中:

$V_{ij}$ ——第  $i$  条纵向断面线上的第  $j$  个曲边棱台体积,超挖为正,欠挖为负。

设  $V_2$  为超挖体积与欠挖体积之和,可以表示为:

$$V_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |V_{ij}| \quad (6)$$

联立式(5)和式(6)可以求出隧道整体超挖方量  $V_{超}$  与欠挖方量  $V_{欠}$ , 则有:

$$V_{超} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (7)$$

$$V_{欠} = \frac{V_2 - V_1}{2} \quad (8)$$

此外,在式(5)和式(6)中,若  $i$  值固定,则可在式(7)和式(8)中单独求出隧道圆周某一位置的超挖方量和欠挖方量。

## 2 实际工程应用

选取武汉大学测绘与遥感信息工程国家重点实验室提供的 WHU-TLS 基准数据集集中的 WHU-TLS Excavation 数据集进行隧道超欠挖分析。由三维激光扫描仪 RIEGL VZ-400 扫描 12 次获得点云数据,共计 4 亿余点。由于数据量较大,截取其中一段长度约为 6 m 的隧道点云数据进行超欠挖分析,并将这段隧道中间的一个横断面点云数据进行最小二乘法椭圆拟合,将其作为该段隧道的理论轮廓线。采用 C++ 软件结合开源库 Point Cloud Library (PCL)<sup>[8]</sup> 编写算法。

### 2.1 断面线提取

在点云数据预处理和隧道中轴线提取后,采用三维 Delaunay 算法生成的三角面片示意图,如图 1 所示。接着,根据得到的隧道中轴线方程提取隧道横断面。任取一断面,在该断面圆周上等间距取 88 个点,计算在此理论断面上 88 个点的法线,得到 88 个法线向量;分别计算这些法线向量与实际隧道面的交点,用直线连接所有交点即可得到隧道纵断面线(见图 2);采用文献[5]的方法计算面积微元,即可得到横断面超欠挖面积。

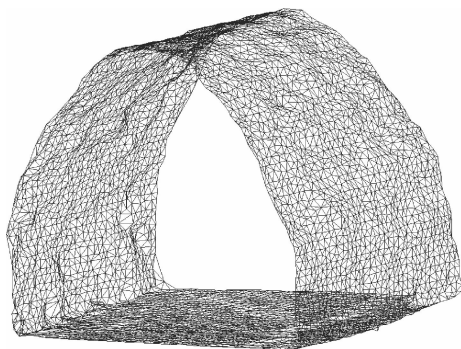


图 1 三维 Delaunay 算法生成的三角面片示意图

Fig. 1 Schematic diagram of triangular facets generated by 3D Delaunay algorithm



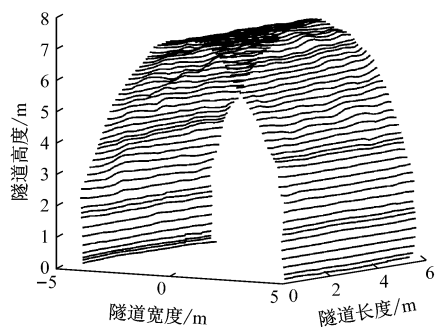


图2 隧道超欠挖纵断面线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tunnel over-under excavation longitudinal section lines

提取纵断面的方法与提取横断面的方法相同,沿隧道中轴线等间距(0.14 m)取点,得到 88 条位于隧道圆周不同位置的纵向断面线,分别对每条断面线进行三次样条曲线拟合。隧道纵向断面线提取结果如图 3 所示。

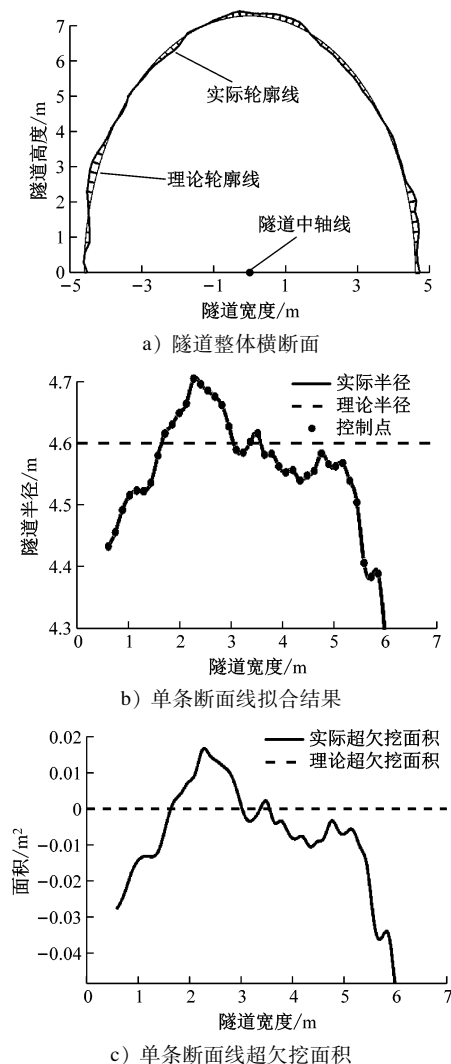


图3 隧道纵向断面线提取结果

Fig. 3 Extraction results of tunnel longitudinal section lines

## 2.2 超欠挖计算分析

分别沿隧道 88 条纵向断面线进行超欠挖方量计算,不同圆周方向的超欠挖方量统计分析如表 1 所示。当圆周角度为  $9^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $42^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 、 $116^{\circ} \sim 141^{\circ}$ 、 $168^{\circ} \sim 188^{\circ}$  时,隧道面主要存在欠挖问题。当圆周角度为  $18^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 、 $78^{\circ} \sim 111^{\circ}$  时,隧道面主要存在超挖问题。其余圆周角度位置处,超挖方量与欠挖方量相差不大。超挖方量和欠挖方量的最大值均在圆周角度为  $7^{\circ}$  的拱脚处,分别为  $0.512 \text{ m}^3$  和  $0.738 \text{ m}^3$ 。基于上述数据分析,可对超挖方量和欠挖方量较大的圆周位置进行周边眼炮孔布置优化,进而提高隧道爆破质量。

表1 不同圆周方向的超欠挖方量统计分析

Tab. 1 Statistical analysis of over-under excavation volumes data in different circumferential directions

| 圆周角度/<br>( $^{\circ}$ ) | 平均超挖<br>方量/ $\text{m}^3$ | 平均欠挖<br>方量/ $\text{m}^3$ | 最大超挖<br>值/ $\text{m}$ | 最大欠挖<br>值/ $\text{m}$ |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0                       | 0.007                    | 0.024                    | 0.101                 | 0.321                 |
| 2.07                    | 0.187                    | 0.181                    | 0.045                 | 0.172                 |
| 4.14                    | 0.434                    | 0.336                    | 0.058                 | 0.170                 |
| 6.21                    | 0.512                    | 0.738                    | 0.037                 | 0.214                 |
| 8.28                    | 0                        | 0.145                    | 0                     | 0.168                 |
| $\vdots$                | $\vdots$                 | $\vdots$                 | $\vdots$              | $\vdots$              |
| 180.00                  | 0.095                    | 0.144                    | 0.108                 | 0.382                 |

以设计隧道面法线到实际隧道开挖面三角网的距离作为超欠挖值,计算三角网中每个三角形顶点的超欠挖值,并将此数据进行可视化处理。超欠挖值色谱图如图 4 所示,其中:灰度值越小代表超挖越严重;灰度值越大表示欠挖越严重。由图 4 可知:在隧道面底部和两侧上方欠挖情况较为严重,顶部和两侧中下方超挖情况较为严重;在整段隧道中,最大超挖值为 0.29 m,最大欠挖值为 0.38 m。

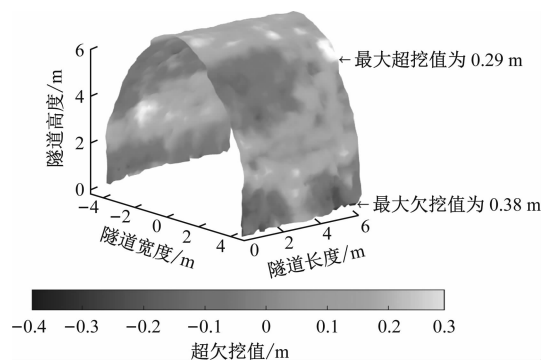


图4 超欠挖值色谱图

Fig. 4 Chromatogram of tunnel over-under excavation values

将隧道面沿径向展开,可以更完整地观察隧道整体的变形情况,超欠挖展开示意图如图5 a)所示。将其展开图投影到 $xOy$ 平面上绘制等值线图,如图5 b)所示。以二维方式展现超欠挖分布,可以更加准确地定位与表征超欠挖位置和超欠挖数值。

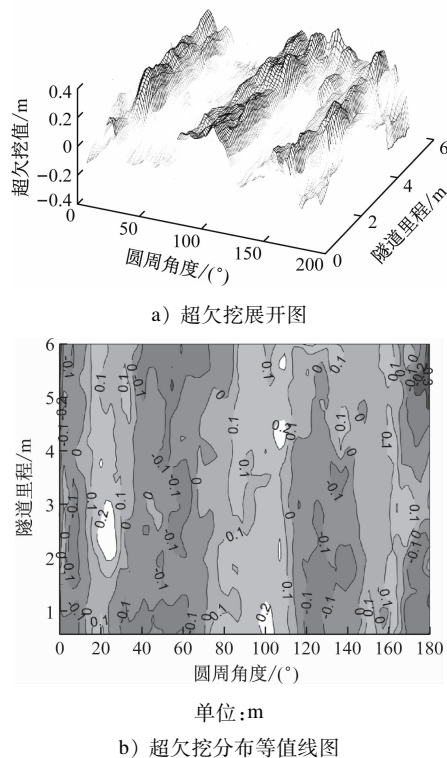


图5 超欠挖展开及超欠挖分布等值线图

Fig.5 Expansion view and distribution contour map of tunnel over-under excavation

### 3 结语

本文在隧道断面提取过程中,首先通过三维Delaunay算法重建曲面,把原来离散的点云数据转变为连续的三角面片,在保留原始点云空间特征的基础上进行断面提取,得到了精度较高的断面线。以横断面超欠挖面积和纵向断面线三次样条曲线拟合为基础,得到了单位半径占有的超欠挖面积,再沿纵断面线进行积分计算超欠挖方量。本文所提方法考虑了超欠挖体积微元沿隧道纵向横截面面积的变化情况,在体积微元大小划分相同时,本文所提方法的计算精度较其他方法更高。最后,通过色谱图和等值线图从不同角度表现了超欠挖的情况,直观地表现了隧道超欠挖问题,为隧道后续爆破和喷浆提供参考。

### 参考文献

- [1] 杨志坚. 隧道结构断面测量方法及对比分析[J]. 测绘通报, 2019(11): 160.  
YANG Zhijian. Methods and comparative analysis of tunnel structure section measuring[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(11): 160.
- [2] SUN H, LIU S, ZHONG R, et al. Cross-section deformation analysis and visualization of shield tunnel based on mobile tunnel monitoring system[J]. Sensors, 2020, 20(4): 1006.
- [3] 许磊, 王长进. 基于激光点云的隧道超欠挖检测方法研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 77.  
XU Lei, WANG Changjin. Research on the detection method of tunnel under-over break using point cloud[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(12): 77.
- [4] 方剑, 周雪云, 盛吉崇, 等. 基于三维激光点云数据隧道超欠挖分析及应用[J]. 科学技术创新, 2022(11): 145.  
FANG Jian, ZHOU Xueyun, SHENG Jichong, et al. Analysis and application of over and under excavation of tunnel based on 3D laser point cloud data[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(11): 145.
- [5] 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(1): 145.  
ZHENG Xiangle. A laser scanning method for the detection of tunnel over-under excavation[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2022(1): 145.
- [6] 张豪, 谢明君, 韦征, 等. 基于隧道点云数据的超欠挖检测应用研究[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(5): 539.  
ZHANG Hao, XIE Mingjun, WEI Zheng, et al. Research on application of overbreak-underbreak detection based on tunnel point cloud data[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2021, 49(5): 539.
- [7] 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(1): 135.  
WEI Zheng, ZHOU Zhen, YU Mintao, et al. Research on detection method for tunnel underbreak and overbreak based on 3D laser scanning point cloud integral analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(1): 135.
- [8] RUSU R B, COUSINS S. 3D is here: point cloud library (PCL) [C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011: 1.

· 收稿日期:2023-03-30 修回日期:2023-05-06 出版日期:2025-05-10

Received:2023-03-30 Revised:2023-05-06 Published:2025-05-10

· 通信作者:张志鹏,硕士研究生,1149185355@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license