

基于车载式激光雷达的隧道变形动态巡检技术研究

谭远鑫¹ 吕润华² 施鹏程²

(1. 新疆大学建筑工程学院, 830046, 乌鲁木齐; 2. 清华大学土木工程系, 100084, 北京)

摘要 [目的] 针对我国隧道变形监测手段实时性差、成本高、效率低的现状, 须有效提升隧道变形监测效率, 对此提出基于车载式激光雷达的隧道变形监控量测方法。[方法] 利用激光雷达传感器扫描收集隧道全断面三维数据, 通过整体最小二乘法对隧道点云数据进行平差及曲面拟合, 根据拟合的隧道断面椭圆参数进行形变分析, 实现隧道变形情况的快速动态巡检。[结果及结论] 试验结果表明, 该方法能够快速准确地获取隧道全断面数据, 结合整体最小二乘法对数据进行处理分析可有效获取隧道变形情况, 基本实现在不影响隧道正常交通的情况下有效完成隧道变形动态实时监测。

关键词 隧道变形监测; 车载式激光雷达; 整体最小二乘法; 动态巡检

中图分类号 U456.3⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.050

Dynamic Inspection Technology of Tunnel Deformation Based on Onboard LIDAR

TAN Yuanxin¹, GUO Runhua², SHI Pengcheng²

(1. College of civil engineering and architecture Xinjiang University, 830046, Urumqi, China; 2. Department of civil engineering Tsinghua University, 100084, Beijing, China)

Abstract [Objective] In view of the poor real-time performance, high cost and low efficiency of tunnel deformation monitoring methods in China, it is necessary to effectively improve the efficiency of tunnel deformation monitoring. Hence, a monitoring and measuring method of tunnel deformation based on onboard LIDAR (light laser detection & ranging) is proposed. [Method] The LIDAR sensor is used to scan and collect the three dimensional data of the whole tunnel section, and the total least squares is used to adjust the cloud data of the tunnel points and fit the surface. The deformation of tunnel section is analyzed according to the fitted ellipse parameters to realize rapid dynamic inspection of the tunnel deformation. [Result & Conclusion] The experimental results show that with this method the tunnel full section data can be obtained quickly and accurately. The tunnel deformation condition can be effectively obtained through the data processing and analysis with total least squares, basically realizing the dynamic real-time monitoring of the tunnel deformation without affecting the

normal traffic in the tunnel.

Key words tunnel deformation monitoring; onboard LIDAR; total least squares; dynamic inspection

隧道在建设阶段和通车运营阶段中遭遇降雨、地表堆载、周边基坑开挖^[1]等因素会引起隧道内部产生不同类型、不同程度的变形。隧道变形轻则影响隧道使用寿命, 重则会造成隧道结构损坏而影响隧道交通的运营安全, 危害通行车辆的人员安全^[2]。因此, 实时对隧道变形状况进行监控量测, 对预防隧道突发重大灾害、确保隧道运营安全具有重要意义。

传统隧道变形量测方法一般采用经纬仪、水准仪、收敛仪、全站仪等仪器对隧道数据进行采集^[3], 传统监测手段受技术人员主观因素影响大, 并且检测周期长和检测成本高等缺点较为明显。三维激光扫描技术以其精确度高、非接触式测量、监测速度快、全覆盖等特点在监控测量领域备受瞩目。文献^[4]早在 2008 年就曾提出了将三维激光扫描技术应用到隧道收敛变形。现如今随着三维激光扫描技术的逐渐成熟, 其在隧道变形监测领域的应用研究也与日俱增。如文献^[5]提出了基于隧道中轴线的隧道断面点云连续提取方法, 并通过试验验证了该方法能够直观表现隧道的整体变形。文献^[6]则通过色谱分析法来分析隧道点云, 进而对隧道的内部整体变形进行定性分析。文献^[7]提出了一种确定隧道整体变形的方法, 该方法根据降维点云到参考基准之间的距离变化来计算隧道变形情况。

目前, 研究人员们主要选用的是静态站式三维激光扫描技术来进行隧道数据采集。该类方法需要对各站点采集的点云数据进行拼接处理, 数据采集效率低且容易造成误差积累^[8]。综合传统方法与新兴技术的优缺点, 本文提出使用车载式激光雷达对隧道内表面进行数据采集, 选用同时考虑系数矩阵误差和观测误差的整体最小二乘法^[9-10]进行数据平差处理, 随后通过隧道断面数据拟合完成隧

道变形情况分析。本文方法不影响隧道正常交通,半自动化的数据处理方式能快速、及时地定位隧道内部危险区域,进而预防隧道变形引起的灾害发生,达到隧道实时动态巡检的目的。

1 隧道点云数据采集及处理

1.1 数据采集方法

本文选用美国 Velodyne 激光雷达公司生产的 HDL-64E 型车载式激光雷达(实物见图1)进行试验研究。该设备为64线程激光雷达传感器,视角更新频率为5~20 Hz,每秒能扫描获取1 300 000~2 200 000个点云数据,扫描视场范围为360°(水平)×26.8°(竖直),角分辨率为0.08°~0.35°(水平)和0.4°(竖直)。



图1 HDL-64E 型车载式激光雷达实物图

Fig.1 HDL-64E on-board lidar picture

HDL-64E 型车载式激光雷达属于脉冲式激光雷达,根据发射激光与接收激光的时间差来计算被测点与传感器之间的距离。同时以传感器为坐标原点,建立空间直角坐标系。该坐标系以与地面平行且与前进方向相垂直的方向为X轴方向,以与地面平行且与前进方向相平行方向为Y轴方向,Z轴方向则垂直于XY平面竖直向上。传感器根据发射激光与参考平面的夹角来确定被测物体中各点的三维坐标,示意图如图2所示。

目标点P的三维坐标为:

$$\begin{cases} X = L \sin \alpha \sin \beta \\ Y = L \sin \alpha \cos \beta \\ Z = L \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中:

L——被测点与传感器之间的距离,根据光的飞行时间(TOF)法确定激光发射速度为光速c,则 $L = c\Delta t/2$, Δt 为激光发出至反射接收的时间间隔;

α ——传感器记录的脉冲激光观测角;

β ——传感器记录的脉冲激光纵向角。

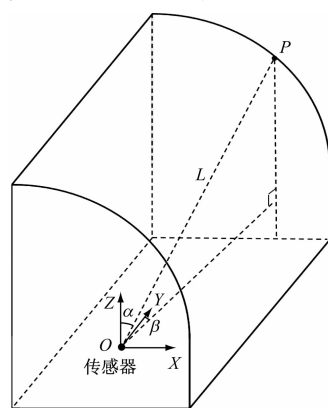


图2 三维坐标系

Fig.2 Three dimensional coordinate system

当传感器开始旋转扫描时64个激光发射器同时发射激光,传感器一个轮询周期内获取的点云数据是一段隧道的内表面点云,较单点测量方式可大幅度增加数据采集效率。数据以点云流的方式进行储存,点云流中包含了点云数据的点ID(标识)、方位角、时间戳,三维坐标、距离、强度等信息。使用激光雷达传感器进行隧道数据采集时无需设置测站及标靶,实现了隧道正常通行情况下进行一站式扫描。

1.2 点云数据处理

激光雷达传感器扫描得到的点云数据通常会受环境因素、仪器自身内部因素、被测物体性质等因素影响传感器接收的激光束质量,形成噪声点。这些噪声点对监测结果有着很大的影响,一般情况下需要将点云数据中的噪声点去除。

本研究在 CloudCompare 软件中完成对点云数据的去噪处理工作。原始点云中通常包含非常规因素导致的大尺度噪声,而直通滤波对大尺度噪声去除具有良好效果^[11-12]。在大尺度噪声剔除后,点云中仍留有较多明显的离群噪声点,本文使用统计滤波与双边滤波相结合的方式剔除这些离群的噪声点。统计滤波算法根据噪声点在空间中分布密度稀疏特征对噪声点进行选中并去除。首先,搜索选择K个中心点周边的最近邻域点,计算中心点到邻域点的平均距离,将处于平均距离之外的点云定义为噪声点并将之剔除,以达到离群噪声点去噪的效果。双边滤波算法则是通过修正中心点的位置来达到平滑滤波去除小噪声点的效果,中心点的修正值根据空间域和频率域上的高斯滤波确定。

假设隧道内某一断面点云集为P,则点云集P

中的点 p 经滤波平滑修正后可形成新的点 p_0 , 该过程的双边滤波算法表达式为:

$$p_0 = p + \omega n \quad (2)$$

式中:

n —— p 点的法向量;

ω ——双边滤波因子。

ω 的定义为:

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^k W_c(\|p - p_i\|) W_s(\|\langle p - p_i \rangle\|) (p - p_i, n)}{\sum_{i=1}^k W_c(\|p - p_i\|) W_s(\|\langle p - p_i, n \rangle\|)} \quad (3)$$

式中:

p_i —— p 点的最近邻域点集 P_i 中的点;

k ——最近邻域点集 P_i 中点的个数;

W_c 、 W_s ——高斯核函数,前者表示空间域权重(调节光滑程度),后者表示特征域权重(控制原始点云特征的保留程度)。

2 隧道曲面拟合及变形分析

2.1 隧道曲面拟合

隧道变形分析通常是基于隧道断面拟合后所得隧道椭圆断面的参数进行隧道的断面收敛变形分析,或是对比分析隧道中轴线偏差进而获取隧道整体变形情况^[13]。在处理分析隧道点云数据时最小二乘法常被用于对数据进行误差消除和椭圆拟合^[14]。该算法仅考虑观测量的偶然误差,而整体最小二乘法弥补了这个缺点,还同时考虑了监测数据中系数矩阵对结果的影响以及偶然误差的影响,提高了拟合结果的真实性。

曲面拟合时假定隧道断面为椭圆,载具车前进方向为 z 轴,隧道横截面为 xoy 平面,且长短半轴与坐标轴平行,此时椭圆一般方程中没有交叉项。将隧道断面点云投影至 xoy 平面中,假设隧道断面的椭圆方程为:

$$ax + by + cx^2 + dy^2 + 1 = 0 \quad (4)$$

式(4)线性方程组的形式为:

$$AX = I \quad (5)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ x_2 & y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

设定观测误差矩阵与系数矩阵误差分别为 E_A 、 E_I ,则结合式(5)可得:

$$(A - E_A)X = I - E_I \quad (7)$$

式(7)可化为:

$$([A \quad I] - [E_A \quad E_I]) \begin{bmatrix} X \\ -1 \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

令增广矩阵 $B = [A \quad I]$, $\Delta = [E_A \quad E_I]$,则式

$$(8) \text{ 等价于: } (B - \Delta) \begin{bmatrix} X \\ -1 \end{bmatrix} = 0.$$

对 B 进行奇异值分解后,可得 U 、 Σ 、 V^T 3 个矩阵,即:

$$B = U\Sigma V^T \quad (9)$$

其中:

$$U = [u_1 \quad \cdots \quad u_n] \in R_{n \times n},$$

$$V = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4 \quad v_5] \in R_{5 \times 5},$$

$$\Sigma = \text{diag}\{\sigma_1 \quad \cdots \quad \sigma_5\}$$

奇异值 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \sigma_4 \geq \sigma_5 \geq 0$, 由于 $\sigma_5 \neq 0$, 则增广矩阵 B 的秩为 5。经推导可得出式(5)的整体最小二乘解为:

$$X = \frac{-1}{v_{5,5}} [v_{1,5} \quad \cdots \quad v_{4,5}] \quad (10)$$

2.2 隧道变形情况分析

根据隧道断面拟合结果可获取该隧道断面的椭圆参数 a 、 b 、 c 、 d , 经过进一步数学推导可求出该断面的长、半轴数值, 据此可进行隧道断面收敛变形分析。车载激光雷达扫描获取是完整的隧道全断面三维点云数据, 数据处理分析时需从完整点云中截取出所需帧数的断面点云数据进行处理。选取同一隧道断面不同时期的断面拟合曲线进行对比分析, 可得出隧道断面的水平、竖直收敛变形情况。在各区间内选取横截面, 对其 X 、 Y 半轴长度变化情况取平均值, 再计算各个横截面的半轴长度变化相对于平均值的残差, 以分析隧道的整体变形情况。

3 实例与分析

本次试验选择北京市某隧道进行数据采集, 该隧道全长 2 825 m, 全线基本呈直线。本次试验使用载具车以 40 km/h 的速度匀速通过隧道, 激光雷达传感器以 10 Hz 的扫描频率进行隧道全断面扫描, 仅 5 min 即可完成数据采集工作。本试验测得隧道完整点云流共计 2 652 帧, 根据载具车行驶速度、激光雷达传感器数据采集帧率可将点云流按照

隧道位置进行区间划分。帧数每间隔 100 帧,对应隧道内部距离为 106.5 m,故此将隧道共分为 27 个区间,取每个区间第一帧和隧道终点帧的点云数据进行隧道变形分析,示意图见图 3。

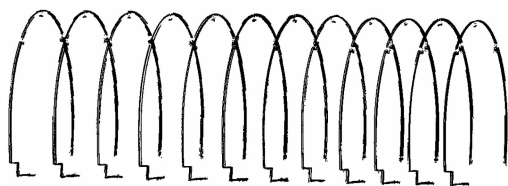


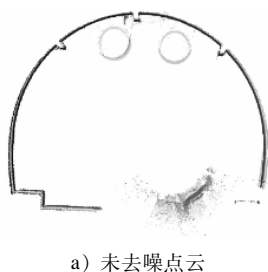
图3 隧道断面提取示意

Fig.3 Extraction of tunnel section

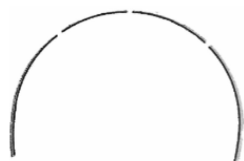
3.1 数据处理

3.1.1 点云降噪

本文选用直通滤波、统计滤波和双边滤波算法相结合进行点云降噪,并在 CloudCompare 软件中实现点云数据降噪处理工作。降噪前后效果图如图 4a) 及图 4b) 所示。



a) 未去噪点云



b) 去噪后点云

图4 点云去噪

Fig.4 Point cloud denoising

3.1.2 断面拟合

点云流中每一帧点云所包含的都是一段隧道内表面点云数据。本文选用 Matlab 软件实现基于整体最小二乘法的隧道断面点云数据平差拟合,进而获取该断面的椭圆参数。隧道点云数据拟合处理结果如图 5 所示。

3.2 隧道变形分析

3.2.1 隧道收敛变形分析

从间隔 7 个月的隧道点云拟合得到隧道各断面长短半轴变化情况如表 1 所示,统计结果如图 6 所示。从间隔 7 个月的两期数据拟合结果可以看出,

该隧道整体变形较大且变形分布不均匀。各区间断面长短半轴变形量基本在 5 cm 以内,其中最大变形量达到了 7.91 cm。隧道长半轴变形量普遍大于短半轴变形量,即竖直方向变形大于水平方向变形,这是由于隧道顶部所受压力大于隧道在水平方向上受到的压力,形成隧道顶部下沉、隧道拱脚处扩张的正常现象。

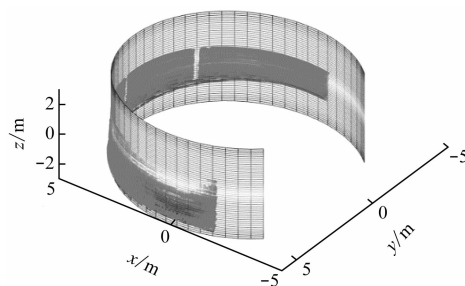


图5 隧道断面拟合

Fig.5 Tunnel section fitting

表1 隧道收敛变形表

Tab.1 Table of tunnel convergence deformation

区间号	长半轴变形量/cm	短半轴变形量/cm	区间号	长半轴变形量/cm	短半轴变形量/cm
1	-0.74	0.93	15	-1.57	1.50
2	-5.03	1.32	16	-6.65	-1.37
3	-2.34	1.03	17	-1.36	4.39
4	-4.41	0.55	18	-4.28	1.23
5	-3.98	0.40	19	-3.44	1.16
6	-0.19	0.91	20	-3.14	2.05
7	-2.14	1.31	21	-1.44	-1.43
8	2.05	4.44	22	-1.18	2.77
9	7.91	6.13	23	-0.63	1.17
10	-2.79	1.71	24	-0.68	0.22
11	3.54	0.61	25	-5.56	0.84
12	-2.19	0.01	26	-6.83	2.81
13	1.79	3.13	27	-5.82	0.78
14	3.83	3.83	28	-3.15	1.39

3.2.2 隧道整体变形分析

以第一期隧道断面数据为基准,截取隧道两期数据中在各区间处于同一位置的 28 个断面进行椭圆长短轴变形情况统计,并计算各断面变形量的残差。隧道在 X、Y 半轴的变形量残差值可认作隧道整体形状在各截面处的相对变形程度,根据隧道断面椭圆参数计算长短半轴残差,隧道各截面的整体变形情况如图 7 所示。从图 7 中可以看出,该隧道

变形主要分布在中段与后半段位置, X 、 Y 半轴方向的最大残差值均位于第 9 号区间, 表明该区间相较于其他区间变形较大, 在隧道整体中属于需要重点监测关注的对象。

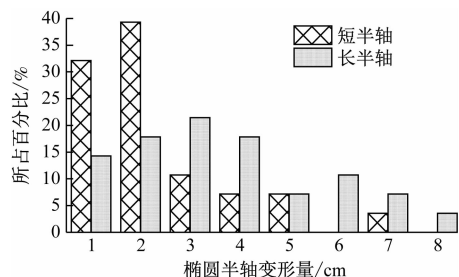


图6 隧道椭圆断面长短半轴变形量统计图

Fig. 6 Statistical diagram of long and short half axle deformation of tunnel elliptical section

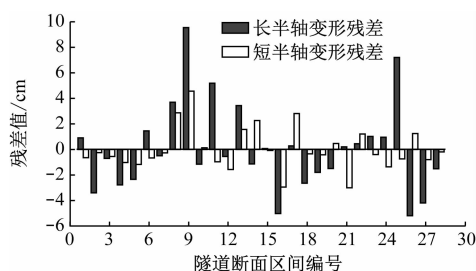


图7 隧道整体长短半轴变形统计

Fig. 7 Statistics of long and short half axle of overall tunnel

3.2.3 误差分析

误差产生的具体原因分析如下:

1) 本文选用的 HDL-64E 型车载式激光雷达与静态式三维激光扫描仪相比精度较低, 同时本次试验使用的视角更新率为 10 Hz, 故采集隧道点云密度较低, 产生测量误差较大。

2) 传感器安装支架与载具车并非刚性连接, 数据采集时易受到车体振动、传感器抖动等影响, 致使数据准确性下降。

3) 点云数据处理方法对检测结果也有一定影响, 如隧道断面配准、点云去噪程度、点云拟合方式等均会产生一定误差。

4 结语

本文提出基于车载式激光雷达的隧道变形监控量测方法, 应用车载式激光雷达传感器对隧道全断面进行快速扫描监测, 通过整体二乘法拟合得出隧道断面椭圆参数进而分析断面变形情况。试验结果表明, 本方法能够有效获取隧道变形信息和对变形发生位置进行定位, 同时在监测期间无需封锁

隧道, 是一种可以适用于隧道日常巡检的隧道变形监测方法。

虽然目前车载式激光雷达应用于隧道变形监测相较于静态站点式三维激光扫描仪可能在精度上略有欠缺, 但其具有检测速度快、可在不进行交通管制时对隧道进行一站式变形监测等优点, 极大地提升了隧道变形监测的便利性, 能够实现低成本、快速准确的隧道变形动态巡检。

参考文献

- [1] 王定军, 王尉行, 刘俊景, 等. 基坑开挖对下卧隧道变形影响分析及合理加固范围研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 43.
WANG Dingjun, WANG Weixing, LIU Junjing, et al. Influence of foundation pit excavation on the deformation of underlying tunnel and the reasonable reinforcement range [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(4): 43.
- [2] 王涛, 田林亚, 王文峰, 等. 地铁隧道结构变形监测中的奇异谱分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(11): 95.
WANG Tao, TIAN Linya, WANG Wenfeng, et al. On singular spectrum analysis in metro tunnel structural deformation monitoring[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(11): 95.
- [3] 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.
XIA Jinzhou. Application research of mobile 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnels[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [4] 毕俊, 冯琰, 顾星晔, 等. 三维激光扫描技术在地铁隧道收敛变形监测中的应用研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(增刊2): 14.
BI Jun, FENG Yan, GU Xingye, et al. Application of three-dimensional laser scanning technology in subway tunnel convergence deformation monitoring [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(S2): 14.
- [5] 李理, 卢小平, 朱宁宁, 等. 基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(9): 1056.
LI Cheng, LU Xiaoping, ZHU Ningning, et al. Continuously extracting section and deformation analysis for subway tunnel based on LiDAR points[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(9): 1056.
- [6] 李勇兵, 高成明, 马盈盈, 等. 三维激光扫描技术在隧道变形监测及检测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 5111.
LI Yongbing, GAO Chengming, MA Yingying, et al. Application of 3D laser scanning technology in deformation monitoring and detection of tunnel [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(12): 5111.

(下转第 285 页)

操作系统、中间件和关键应用程序的版本进行集中管理和分析,对已发生的安全事件和可能存在的风险漏洞进行分析、识别、报警。

4 结语

本文主要从技术层面对车辆智能运维系统的信息安全防护方案进行研究,构筑具备系统性、统一性、全面性的信息安全防护技术体系,在多设备主机和多应用层面,实现身份认证、访问控制、数据安全、传输安全、安全审计、入侵防范、分权管理、集中管控等信息安全防护功能,确保全系统安全、可靠、高效地运行。

参考文献

- [1] 张彦. 智能铁路时代网络安全问题探讨[J]. 铁路计算机应用, 2019, 28(3): 51.
ZHANG Yan. Discussion on cybersecurity security of intelligent railway[J]. Railway Computer Application, 2019, 28(3): 51.
 - [2] 刘志宏. 城市轨道交通综合监控系统的信息安全防护研究[J]. 现代信息科技, 2018, 2(8): 149.
LIU Zhihong. Research on information security protection of urban
-
- (上接第 280 页)
- [7] 赵强, 王涛. 一种三维激光扫描技术隧道整体变形分析方法[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 99.
ZHAO Qiang, WANG Tao. A method for analysis of overall deformation of tunnel based on 3D laser scanning technology[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(2): 99.
 - [8] ZHANG H, XIA J. Research on convergence analysis method of metro tunnel section; based on mobile 3D laser scanning technology[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 669(1): 012008.
 - [9] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
Wuhan University Survey Adjustment Discipline Group of the School of Surveying and Mapping. Error theory and basis of survey adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
 - [10] 郭金运, 徐晓飞, 沈毅. 整体最小二乘算法及测量应用研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 1.
GUO Jinyun, XU Xiaofei, SHEN Yi. Review on total least squares methods and applications in surveying[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(4): 1.
 - [11] 黄晓杰, 陈宇磊, 邵跃堂, 等. 基于激光雷达的地铁隧道形变检测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(11): 47.
HUANG Xiaojie, CHEN Yulei, SHAO Yuetang, et al. Research on metro tunnel deformation detection based on laser radar[J].

rail transit integrated monitoring system[J]. Modern Information Technology, 2018, 2(8): 149.

- [3] 党晓勇. 城市轨道交通综合监控系统信息安全防护方案研究[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊1): 133.
DANG Xiaoyong. Research on information security protection scheme in integrated supervisory control system[J]. Electric Railway, 2020, 31(S1): 133.
- [4] 陶伟. 城市轨道交通信号系统信息安全问题研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(增刊1): 20.
TAO Wei. Research on information security of urban rail transit signal system[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(S1): 20.
- [5] 王志, 李波. 中国机车远程监测与诊断系统(CMD系统)数据安全研究[J]. 中国铁路, 2017(4): 8.
WANG Zhi, LI Bo. On data safety of China locomotive remote monitoring and diagnosis system(CMD system)[J]. China Railway, 2017(4): 8.

· 收稿日期:2021-12-13 修回日期:2022-08-18 出版日期:2024-06-10
Received:2021-12-13 Revised:2022-08-18 Published:2024-06-10
· 作者:皮魏,工程师, pipi_wei2005@hotmail.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

- Urban Mass Transit, 2019, 22(11): 47.
- [12] 董智博. 基于改进欧氏距离的三维点云分割算法分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
DONG Zhibo. Analysis and research on 3D point cloud segmentation algorithm based on improved euclidean distance [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [13] 成枢, 查天宇, 黄小斌, 等. 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]. 测绘地理信息, 2021, 46(5): 13.
CHENG Shu, ZHA Tianyu, HUANG Xiaobin, et al. Application of mobile 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnels[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(5): 13.
- [14] 陈薪文. 基于地铁隧道点云数据的断面提取及变形分析的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
CHEN Xinwen. Research on section extraction and deformation analysis based on point cloud data of subway tunnel [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.

· 收稿日期:2021-12-20 修回日期:2024-01-23 出版日期:2024-06-10
Received:2021-12-20 Revised:2024-01-23 Published:2024-06-10
· 第一作者:谭远鑫,硕士研究生, Tan291217@163.com
通信作者:芮润华,副教授, guorh@tsinghua.edu.cn
· ©《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