

基于内壁点云切片坐标的高速公路隧道整体变形监测方法^{*}

Monitoring Method of Overall Deformation of Expressway Tunnel based on Slice Coordinates of Inner Wall Point Cloud

张志刚, 贾慧超, 李志达

(河北省高速公路延崇管理中心, 河北 张家口 075000)

摘要: 因高速公路隧道在使用过程中容易产生横向、纵向形变, 易产生高速公路隧道安全问题, 为此, 提出一种基于内壁点云切片坐标的高速公路隧道整体变形监测方法。采用投影平面方式将内壁实现点云信息分层, 令各段点云映射到中心位置的参考平面, 提取内壁点云信息, 运用最小二乘法拟合隧道平面, 使用格网化内插值算出各点云内插值, 通过各时间点网格内插值变化情况, 判断出该隧道变形相关量, 根据网格平面所在位置得出变形位置, 完成隧道整体变形监测。结果表明: 所提方法的监测信息数量和计算时间分别为 9921 个和 6.21s, 能够敏锐感知细微隧道变形, 监测效率最高, 具有较高实用性与有效性, 该方法可有效提高高速公路隧道交通运行的安全性。

关键词: 内壁点云切片坐标; 隧道变形监测; 横断面拟合; 内壁点云降维; 格网化内插值

中图分类号: U456.3+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0146-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.028

ZHANG Zhigang, JIA Huichao, LI Zhida

(Hebei Expressway Yanchong Management Center, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: Because of the complexity of highway tunnel structure, it is easy to produce transverse and longitudinal deformation in the use process, resulting in low safety of highway tunnel. For this reason, a method for monitoring the overall deformation of expressway tunnels based on the slice coordinates of point clouds on the inner wall is proposed. The projection plane method is used to layer the point cloud information on the inner wall, so that each segment of the point cloud is mapped to the reference plane of the center position, and the point cloud information on the inner wall is extracted. The least square method is used to fit the highway tunnel plane, and the grid interpolation is used to calculate the interpolation of each point cloud. Through the change of the grid interpolation at each time point, the deformation related quantity of the tunnel is judged, and the deformation position is obtained according to the location of the grid plane. Complete the overall deformation monitoring of expressway tunnels. The experimental results show that the amount of monitoring information and the calculation time of the proposed method are 9921 and 6.21s respectively, which can sensitively perceive the subtle tunnel deformation. The monitoring efficiency is the highest, and the method has high practicability and effectiveness. The method can effectively improve the safety of highway tunnel traffic operation in various cities.

Keywords: slice coordinates of inner wall point cloud; tunnel deformation monitoring; cross section fitting; dimension reduction of inner wall point cloud; grid interpolation

^{*} 基金项目: 河北省科技成果转化专项 (202053012)。

作者简介: 张志刚 (1973—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向: 道路桥梁工程。

收稿日期: 2023-01-24

0 引言

城市化和工业化进程加快,导致人口和车辆数量增加,节假日、旅游旺季等特定时期,出行人数增多,使得高速公路上的交通流量持续增长。高速公路隧道作为重要的交通通道,其使用频率也会相应增加^[1]。这些因素会对隧道结构产生一定影响,并且随着服务年限的增加,隧道整体容易发生横向、纵向形变,若不及时解决,则会严重影响交通安全^[2]。然而高速公路隧道所在地理位置的多样性,导致其形变因素诸多,且随着施工质量和效率的提高,对变形监测技术提出更高的要求。为保证高速公路隧道建设与安全运行,当其周围环境发生变化时,需对其进行变形监测。

当前高速公路隧道变形监测方法利用 GPS、分布式光纤温度传感等技术,这些方法均以点带面形式获取变形监测信息,监测时间长、工作任务量大,且易受外界因素影响,提取的信息与实际情况相差较大,因此,诸多学者对隧道结构变形监测方法进行大量研究。陆培庆等^[3]通过移动式三维激光扫描得出高速公路隧道的整体结构,并采用自动化处理软件监测其变形;刘博峰^[4]运用 BP 神经网络与指数函数监测高速公路隧道变形。这两种方法取得一定效果,但计算较为复杂,不能保证其变形监测及时性。

基于此,提出一种基于内壁点云切片坐标的高速公路隧道整体变形监测方法。通过平面投影方式得出内壁点云切片坐标,利用最小二乘法得出高速公路隧道平面拟合,该方法可剔除拟合过程中出现的噪声,减少误差;根据格网化内插值判断出该隧道整体变形情况,提升监测数据的精度,且不受点云数量与密度影响。

1 高速公路隧道整体变形监测过程

1.1 内壁点云切片坐标提取

通过隧道内壁各点云切片位置变化情况,提取出隧道变形信息^[5]。通过投影平面方式获取内壁点云切片,使用投影平面实现点云信息分层,将采集到点云信息映射到核心位置参考平面上,构成较为分散的切片式内壁点云,此方法可以利用最少的操作步骤获取最高的监测精度。

通过调节高速公路隧道方向,使隧道中轴线与轴平行,并在该中轴线垂直方向做分段处理,在各段中心位置设定参考平面,将各段点云信息向参考平面投影,得到内壁点云切片信息^[6-7]。

设定 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$ 表示内壁点云信息集, $a_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ 表示点云信息。将内壁点云信息在 x 轴做分段处理,设各段宽度为 d ,则该隧道被平均分成 n 段。设 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为 x 轴上的最大值和最小值,则有:

$$\frac{x_{\max} - x_{\min}}{n} = d \quad (1)$$

设定各段点云中心点平面为参考平面,同时该平面与 yoz 平面平行,得出各段参考平面投影公式:

$$x_i = x_{\min} + \frac{(2n-1)d}{2} \quad n=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

通过式(2)计算各参考平面投影后,得出高速公路隧道内壁点云切片。具体实施过程为:使用 Matlab 软件得出各内壁各点云信息 X 值的大小,若 $x_i - \frac{d}{2} \leq X \leq x_i + \frac{d}{2}$,则 X 变化成 x_i ,同时原点 y 值与 z 值依旧不变,构成崭新空间坐标,完成空间投影,获得高速公路隧道内壁点云切片。

通过降维获得的内壁点云切片为均匀分散点组合,不能直接表现出高速公路隧道整体变形情况,因此需要对其横断面拟合分析。

1.2 横断面拟合方法设计

用平面拟合方式分析高速公路隧道横断面,得出其对应的平面方程相关参数^[8]。根据已提取内壁点云切片可知:切片和地面平面相互垂直,通过地面平面计算公式确定所有垂直于地面的平面,并在这些平面内选取与高速公路隧道垂直的平面,该平面即为高速公路隧道横断面^[9]。

采用最小二乘法完成高速公路隧道平面拟合^[10],该方法可消除拟合过程中出现的噪声,将误差降至最低,找出最佳内壁点云切片的平面。根据点与平面之间垂直距离最短的原理,得出二维高速公路隧道最小二乘法数学表达式:

$$a(x - \bar{x}) + b(y - \bar{y}) = 0 \quad (3)$$

在高速公路隧道内壁点云信息中,设 (x'_i, y'_i, z'_i) 分别表示地平面上任意点坐标,即可构建三维

研究与应用

空间坐标系下高速公路隧道地平面。将得出的地平面的空间坐标信息带入式 (3), 并运用特征值分解得出该平面相关特定参数, 即:

$$\varepsilon(x - \bar{x}) + \sigma(y - \bar{y}) + \varpi(z - \bar{z}) = 0 \quad (4)$$

$$\text{其中, } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i', \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i', \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i'。$$

式中: ε 、 σ 、 ϖ 分别为地平面 3 个参数。

将地平面设定为参考平面, 找到最佳内壁点云切片的平面, 结合点与平面之间距离最近原则, 运算得出点云切片中心与平面之间距离。

若基准面经过该空间坐标系原点, 则该基准面数学公式描述为:

$$\varepsilon'x + \sigma'y + \varpi z = 0 \quad (5)$$

由于高速公路隧道地平面与基准面为相互垂直关系, 将式 (4) - 式 (5) 联立得:

$$\varepsilon' = -\frac{\sigma}{\varepsilon}\sigma' - \frac{\varpi}{\varepsilon}\varpi' = \frac{1}{\varepsilon}(\sigma\sigma' - \varpi\varpi') \quad (6)$$

式中: ε' 与 σ' 、 ϖ' 为基准面不同的未知参数。通过式 (6) 得出该基准面不同的未知参数与已知参数之间联系, 从而完成高速公路隧道内壁点云切片横断面的拟合。

1.3 高速公路隧道整体变形判定

若内壁点云扫描未出错, 且高速公路隧道未发生变形时, 任意监测时间的全部点云与基准面之间距离均等同; 若高速公路隧道发生形变时, 各点云与基准面之间距离均发生改变^[11-12]。存在问题, 当高速公路隧道整体发生变形时, 不同时间监测该隧道获得的点云分布密度与数量均不等, 例如第 1 次监测获得 8 万个点云, 而第 2 次监测可能获得 6 万个点云, 致使距离运算存在较大误差, 不能精准得出其整体变形信息。

基于此, 使用格网化内插法^[13], 将不同时间点、信息量与密度程度的内壁点云做格网化内插值, 1 个网格只有 1 个内插值。根据同一个网格不同时间网格内插值大小变化, 进而分析出各点云与基准面之间的变化情况, 判断出高速公路隧道整体变形相关量, 并通过网格平面所在位置得出该隧道变形位置。在内壁点云格网化内插值时, 需要先将内壁点云做降维处理, 降维后平面与基准面距离的整体做格网化内插值处理。

1.3.1 内壁点云降维

将三维空间 (x, y, z) 点云变换到二维空间 (x, y) 中, x 与 y 、 z 存在一定关联, 可根据 x 得出 y , 或者根据 x 得出 z , 也就是根据 (x, y) 或者 (x, z) 即可确定一个点云。将三维点云集合 $\{x, y, z\}$ 投影至二维平面内, 得出二维点云的坐标 $\{x', y'\}$, 完成点云的降维。

为解决投影过程中会发生投影点重合问题, 将高速公路隧道内壁点云随着隧道轴线方向分割成上部分与下部分分别投影^[14], 具体过程如下。

设定 d' (d' , n , m) 与 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 分别表示圆柱体中心轴线上的矢量与其上任意一点, $c(x_c, y_c, z_c)$ 表示该条中心轴上的其他一点, 这 3 个点即可确定一个二维空间平面, 由此得出该平面的法向量 $\vec{n} = (x_s, y_s, z_s)$, 投影过程如图 1 所示。

随机选一点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 在平面 S 投影得出 $P'(x_{p'}, y_{p'}, z_{p'})$ 。由已知点 $g(x_g, y_g, z_g)$ 与法向量 $\vec{n}(x_s, y_s, z_s)$, 则该平面法式函数公式为:

$$x_s(x - x_g) + y_s(y - y_g) + z_s(z - z_g) = 0 \quad (7)$$

因为点 P' 过该平面, 则:

$$x_s(x_{p'} - x_g) + y_s(y_{p'} - y_g) + z_s(z_{p'} - z_g) = 0 \quad (8)$$

又因为 PP' 与法向量 $\vec{n}$ 平行, 则:

$$\frac{x_{p'} - x_p}{x_s} = \frac{y_{p'} - y_p}{y_s} = \frac{z_{p'} - z_p}{z_s} = \lambda \quad (9)$$

通过式 (7) ~ 式 (9) 得出 P' 的空间坐标, 因 x 与 y , x 与 z , 或者 y 与 z 具有关联性, 只需要 2 个参数即可得出该点所在位置, 进而完成点云空间降维。

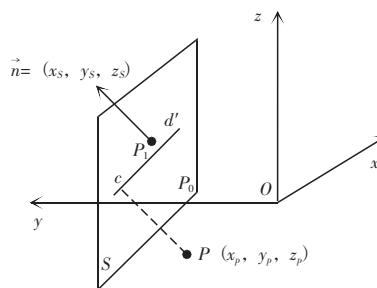


图 1 点到平面投影过程

Fig. 1 Point-to-plane projection process

1.3.2 格网化内插

采用插值手段将分布不均信息变换为具有规则的分布信息。格网化方式诸多, 采用三维立体化方

法，主要过程如下：

(1) 设定网格尺寸经过降维处理，将三维点云投影至二维平面上，需事先确定 $x_{\min}$ 与 $x_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 与 $y_{\max}$ 的范围。设 x 轴上间距为 e 、在 y 轴上间距为 f ，将整个平面划分成 $e \times f$ 个网格单元。网格单元尺寸通过扫描区域范围获得的，其尺寸越小，表明得出高速公路隧道变形信息越精准。通过内壁点云信息总数量与信息间隔合理分割网格尺寸，网格单元尺寸 j_x 与 j_y 的计算公式为：

$$\begin{cases} j_x = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{a} \\ j_y = \frac{(y_{\max} - y_{\min})}{b} \end{cases} \quad (10)$$

(2) 网格化内插值。网格内插值手段诸多，各插值手段使用数学模型均不同，得出插值精度程度也会不同。根据实际需求选取恰当的插值手段。将内壁点云空间坐标与基准距离网格化内插处理，各网格内各插值只有一个均值，该值根据网格尺寸与位置所决定的，不受点云多少、密度等因素的影响，由此得出高速公路隧道整体变化情况。

1.3.3 整体变形确定

在整个监测过程中，内壁点云以相同平面为基准平面，且网格尺寸及处理格网的插值方式相同。此外， $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 、 $y_{\max}$ 的区间一致。若高速公路隧道整体产生变形，此时变形值只有一个，且保持不变。当首次扫描点云完成格网化后，第9网格点内插值表示为 Q_{p1} ，则第二次格网化后，第9网格内插值表示为 Q_{p2} 。以此，其插值变化量计算公式如下：

$$F = Q_{p2} - Q_{p1} \quad (11)$$

式中： F 为第9网格范围相应的高速公路隧道区域变化量。根据式（11）求解全部网格内插值变化量，即高速公路隧道整体变化量，能确定其整体变形情况，进而完成高速公路隧道整体变形监测。

2 实验过程与结果分析

2.1 实验环境

为了测试基于内壁点云切片坐标的高速公路隧道整体变形监测方法的效果，以移动式三维激光扫描（文献 [3]）和 BP 神经网络（文献 [4]）作为

对比方法，采用 Leica Scan Station P30 激光扫描设备采集某高速公路隧道数据，该扫描设备的参数设置见表 1。

表 1 扫描设备参数设置

Table 1 Scan equipment parameter settings	
参数	取值
测距精度/mm	1.2
扫描距离/m	270
反射率/%	34
扫描速率/(点/s)	1×10^6
水平视场角/°	0 ~ 360

测试隧道全长为 900 m，起点里程为 K30 + 110，在信息采集与运营阶段，采用 Faro Scene 软件完成信息处理，并得出激光扫描间距为 1 cm 的高速公路隧道内壁点云信息。实验选用圆柱体作为参考基准面，半径为 R 。经过信息处理和 VC++6.0 编程，获得该隧道整体变形信息和变形区域。

2.2 实验结果分析

2.2.1 拟合横断面与精度

将隧道中轴线与 x 轴平行，使用投影平面方式获取该隧道内壁点云信息，如图 2 所示。

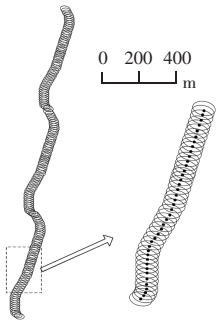


图 2 高速公路隧道中轴线获取示意图
Fig. 2 Diagram of the central axis of highway tunnel

为体现所提方法的点云提取精度，选取距离为 4 m 的横断面的拱顶、拱腰以及拱脚的切片坐标数据，如图 3 所示。通过切片坐标，统计横断面上所有点到对应拟合中心距离和拟合圆柱体半径的径向差，如图 4 所示。由图 4 可知，内壁点云的偏移量主要集中在 $[-0.01, 0.02]$ m 区间内，计算其平均误差值约为 0.06 m，表明拟合横断面效果良好，证实所提方法的点云提取精度较为理想。

2.2.2 监测效果分析

为了测试基于内壁点云切片坐标的高速公路隧道整体变形监测方法的监测效果，利用 Leica Scan Station P30 激光扫描设备采集两组数据信息，第一组

研究与应用

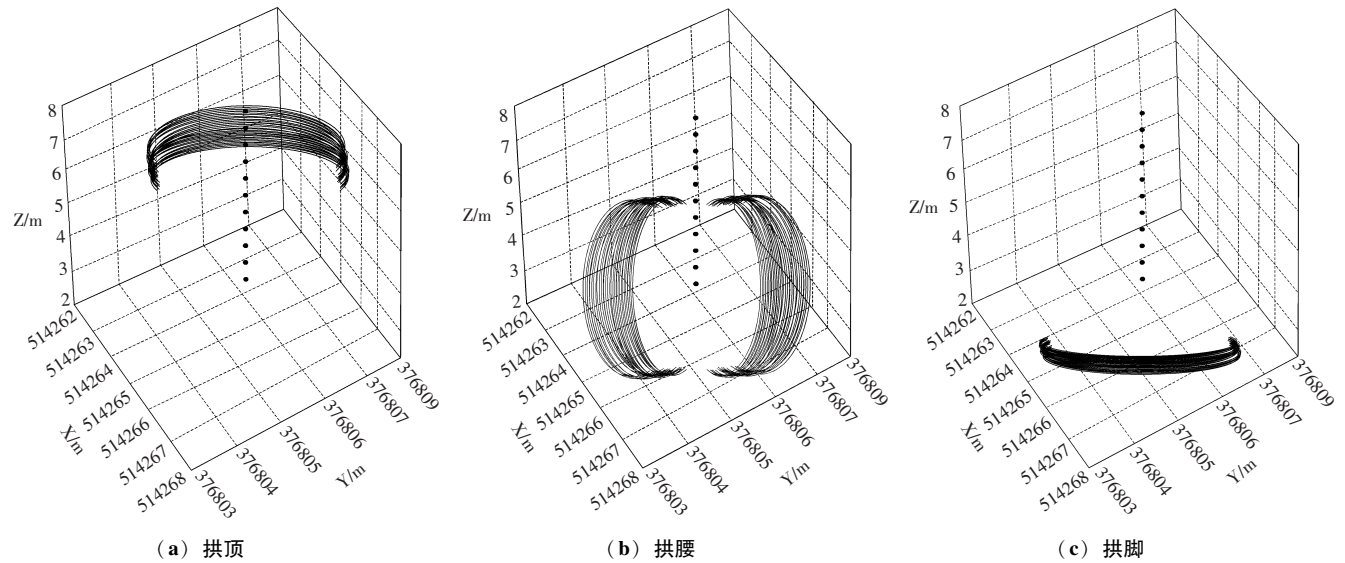


图3 4 m 部分高速公路隧道的切片坐标
Fig. 3 Slice coordinates of 4m section highway tunnel

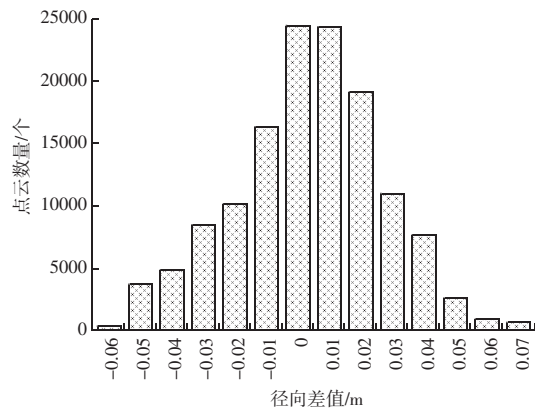


图4 点云提取误差分析
Fig. 4 For point cloud extraction error analysis

数据信息中包含1万个数据,第二组数据信息中包含2万个数据,分别采用移动式三维激光扫描、BP神经网络和内壁点云切片坐标方法监测高速公路隧道整体特征,见表2。

由表2可知,移动式三维激光扫描与BP神经网络监测第一组数据信息时,监测到的信息数量分别为9762个和9811个,计算时长为9.37 s和8.24 s;而内壁点云切片坐标方法监测第一组数据信息时,监测到的信息数量和计算时间分别为9921个和6.21 s,得到的信息数量始终多于对比方法,且使用时长最短。因为所提方法使用格网化内插方式,可以使密度分布不均信息转变成具有规则分布信息,极大程度上缩短监测时长,获得更多监测信息,监测效果最好。

表2 各方法下高速公路隧道整体变形监测对比情况
Table 2 Comparison of the overall deformation monitoring of expressway tunnels under each method

数据信息 组别/组	使用方法	监测信息 数量/个	计算时长 /s
第一组	移动式三维激光扫描	9 762	9. 37
	BP 神经网络	9 811	8. 24
	内壁点云切片坐标	9 921	6. 21
第二组	移动式三维激光扫描	19 769	18. 63
	BP 神经网络	18 914	16. 84
	内壁点云切片坐标	19 837	8. 31

3 结论

对高速公路隧道进行变形监测是保障隧道建设与运营安全的主要手段。因此,采用内壁点云切片坐标方式监测高速公路隧道整体变形情况,利用空间投影,获取高速公路隧道内壁点云切片,并根据最小二乘法拟合隧道平面,通过格网化内插完成高速公路隧道整体变形监测。实验结果表明,所提方法拟合横断面精度高,同时监测到的数据最多,且使用时长最少,证实内壁点云切片坐标方法的监测效果最好。

参 考 文 献

[1] 侯公羽,李子祥,胡涛,等. 用于隧道变形监测的分布式光纤定点式布设监测误差测定研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41 (10): 3481-3490.
[2] 张乾翼,赖国泉. 某高速公路隧道洞口错落 (下转第 168 页)

研究与应用

- 测 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (1): 347-355.
- [8] 周中, 闫龙宾, 张俊杰, 等. 基于 YOLOX-G 算法的隧道裂缝实时检测 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (7): 2751-2762.
- [9] 李英. 连续 Sylvester 矩阵方程求解的分裂迭代算法 [J]. 应用数学和力学, 2020, 41 (1): 115-124.
- [10] 张瑞燕. 结合多尺度特征和注意力机制的公路裂缝检测 [J]. 现代电子技术, 2023, 46 (3): 100-104.
- [11] 陈红, 王俊杰. 基于改进 YOLO v5 的红外沥青路面裂缝检测方法 [J]. 电视技术, 2023, 47 (4): 43-50.
- [12] 陈宇平, 范高. 基于改进 DeepLab V3+ 在复杂环境下的道路裂缝检测 [J]. 广州大学学报 (自然科学版), 2023, 22 (2): 43-51.
- [13] 邱昕捷, 韩凤磊, 赵望源. 水下机器人实时智能裂缝检测算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44 (5): 774-782.
- [14] 杜敏, 杨国庆, 张慧. 基于 YOLO v4-EfficientNet B7 的桥梁裂缝检测方法研究 [J]. 天津城建大学学报, 2023, 29 (1): 55-61.
- [15] 潘勇. 基于图像处理的路面裂缝检测研究 [J]. 科学技术创新, 2023 (6): 137-140.

(上接第 139 页)

补了过去由于经济发展水平等原因留下的遗憾, 切实符合人民日益增长的美好生活需求。本文通过实地以及资料调研, 结合建筑需求以及周边环境因素等, 总结了各种电梯加装方位类型, 并对其优劣做出分析。此外, 对于增设电梯对日照影响程度以及增设电梯与机动车道及绿化空间关系, 均给出了详细的评价标准和等级分类, 为既有建筑加装电梯布置方案前期调研及可行性研究提供了参考依据。

参 考 文 献

- [1] 杨智凯. 老旧住宅增设电梯及其关联环境空间设计策略 [D].

绵阳: 西南交通大学, 2021.

- [2] 岳晓. 西安市单位型住区多层住宅公共空间适老化改造设计研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [3] 李昊宇. 既有多层居住建筑增设电梯空间设计研究 [D]. 长春: 长春工程学院, 2019.
- [4] 张仕诚. 2017 既有多层住宅加装电梯工程实例调研报告 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [5] 宁晋萱. 北方高层住宅景观设计中优化日照分布的方法研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [6] 刘思远. 既有老旧小区加装电梯工程改造对原建筑物的综合影响研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2021.
- [7] 林晨. 基于日照因素影响下的高密度住区设计研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.

(上接第 150 页)

体变形原因与治理措施分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31 (1): 25-29.

- [3] 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.
- [4] 刘博峰. 基于 BP 神经网络算法的大变形隧道位移监测数据分析与应用 [J]. 铁道建筑, 2022, 62 (7): 106-109.
- [5] CHEN R P, CHEN S, WU H N, et al. Investigation on deformation behavior and failure mechanism of a segmental ring in shield tunnels based on elaborate numerical simulation [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 117: 104960.
- [6] 刘家振, 李斌, 杨成生. 切距与切片外轮廓自适应不规则点云对象切片法 [J]. 激光杂志, 2022, 43 (6): 65-69.
- [7] 屈乾龙, 朱庆伟, 艾卫涛, 等. 塔形建筑物轮廓点云倾斜监测方法 [J]. 西安科技大学学报, 2021, 41 (4): 715-723.
- [8] 徐飞, 田茂义, 俞家勇, 等. 基于隧道水平中线的全局断面提取及形变分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (11): 2296-2307.
- [9] 张立伟. 特大断面公路隧道力学响应数值仿真 [J]. 计算机仿
- 真, 2021, 38 (2): 101-105.
- [10] KERMARREC G, LÖSLER M. How to account for temporal correlations with a diagonal correlation model in a nonlinear functional model: a plane fitting with simulated and real TLS measurements [J]. Journal of Geodesy, 2021, 95 (1): 1-21.
- [11] 倪向龙, 龙建辉, 张玲玲. 黄土地区高速公路隧道洞口滑坡变形机理分析 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49 (5): 234-241.
- [12] FRANZA A, RITTER S, DEJONG M J. Continuum solutions for tunnel - building interaction and a modified framework for deformation prediction [J]. Géotechnique, 2020, 70 (2): 108-122.
- [13] JEONG B, KERSEY S N, YOON J. Approximation of multivariate functions on sparse grids by Kernel - based Quasi - interpolation [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2021, 43 (2): A953-A979.
- [14] 陈秋南, 曾奥, 罗鹏, 等. 圆宝山隧道炭质板岩大变形段初期支护结构受力特性研究 [J]. 应用力学学报, 2020, 37 (2): 810-817, 944-945.