

基于改进 Delaunay 三角网的煤堆三维重构算法

金雷¹, 朱元彩^{1,2}, 王莉¹, 吴兆立^{1,2,3}, 宋志军⁴

(1. 江苏建筑职业技术学院 信电工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心, 江苏 徐州 221116;

3. 徐州市智能机器视觉应用技术工程研究中心, 江苏 徐州 221116;

4. 徐州中矿奥特麦科技有限公司, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤堆表面结构复杂且点云数据量大, 传统的 Delaunay 三角网剖分算法无法满足企业实际需求。为了快速、精准地完成煤堆曲面重构, 提出了基于组合三角剖分的改进 Delaunay 三维重构算法, 该算法将剖分过程分为区域分块、单区域剖分及区域连接 3 个步骤。通过对标准煤堆模型测量实验, 10 次测量平均误差为 2.66%, 算法的稳定性和精度都较高。最后以徐州某发电厂的封闭储煤基地为试验场所, 分别通过逐点插入法、三角网生长法与本文提出的改进算法, 对煤堆进行三维重构。对比发现, 改进算法重构曲面更加细腻, 在构网点数、狭长三角形数及时间上表现均为最优, 重构时间 89 s, 测量误差仅为 0.21%, 满足效率与精度要求。

关键词: 煤堆表面; 大数量级; 改进 Delaunay; 高效率; 三维重构

中图分类号: TP 391.41

文献标志码: A

文章编号: 2095-3550(2023)01-0040-05

3D reconstruction algorithm of coal pile based on improved Delaunay triangulation

JIN Lei¹, ZHU Yuancai^{1,2}, WANG Li¹, WU Zhaoli^{1,2,3}, SONG Zhijun⁴

(1. School of Information and Electrical Engineering, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Collaborative Innovation Center for Building Energy Saving and Construct Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Xuzhou Intelligent Machine Vision Engineering and Technology Center, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 4. Xuzhou Zhongkuang Aotemai Technology Company Limited, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The surface structure of coal pile is complex and the amount of point cloud data is large. The traditional Delaunay triangulation algorithm cannot meet the actual needs of enterprises. In order to complete the surface reconstruction of coal pile quickly and accurately, an improved Delaunay 3D reconstruction algorithm based on combined triangulation is proposed. The algorithm divides the triangulation process into three steps: region segmentation, single region segmentation and region connection. Through the measurement experiment of standard coal pile model, the average error of 10 measurements is 2.66%, and the stability and accuracy of the algorithm are high. Finally, taking the closed coal storage base of a power plant in Xuzhou as the test site, the three-dimensional reconstruction of the coal pile is carried out by the point-by-point insertion method, the triangular network growth method and the improved algorithm proposed in this paper. By comparison, it is found that the improved algorithm reconstructs the surface more finely and performs best in the number of mesh points, the number of long and narrow triangles and the time. The reconstruction time is 89 s, and the measurement error is only 0.21%, which meets the requirements of efficiency and accuracy.

Key words: coal pile surface; large order of magnitude; improve Delaunay; high efficiency; 3D reconstruction

收稿日期: 2022-02-10

基金项目: 2021 年度徐州市政策引导类计划 (产学研合作) 高校院所服务地方发展项目 (A 类): 基于大数据的大区域水资源多目标协同均衡配置提升项目 (KC21335); 2022 年度省建设系统科技项目: 绿色宜居村镇建设环境下复杂水资源安全化与均衡配给关键技术应用研究 (2022ZD10003); 2020 年江苏建筑职业技术学院校级科研课题: 封闭煤场轨道盘煤机器人研究 (JYQZ20-15)

作者简介: 金雷, 男, 江苏徐州人, 助教, 工学硕士, 研究方向为人工智能。E-mail: 1937748546@qq.com。

煤堆体积与质量的高效、精准获取是储煤厂、火力发电站等企业制订生产计划、核算经济效益的关键步骤。目前,煤堆体积与质量的获取方法主要是通过三维激光扫描仪获取煤堆表面三维点云数据,利用三维重构算法对点云数据进行三维重构,计算重构后的拟合煤堆三维曲面体积继而得到煤堆质量。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是对三维实物的数字化描述,能够通过有限的数据实现三维重构,主要有规则方格网(Regular Square Grid, RSG)和不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)两种类型^[1-2]。相比规则方格网 RSG,不规则三角网 TIN 采用一系列互不交叉重叠且大小不一的三角形进行三维重构,能更加准确细腻地恢复煤堆表面区域的细节,因此,在煤堆三维重构与三维可视化领域广泛应用。

Delaunay 三角剖分是典型的 TIN 算法,传统的 Delaunay 三角剖分算法可以分为分治合并法、逐点插入法与三角网生长法三类^[3-6]。分治合并法基于组合三角剖分理念,将点云数据集分割成若干子数据集,分别对子数据集进行单独三角剖分后再进行合并处理。分治合并法适合于点云数据量较大的情形,通过点云数据分块处理缩短三角网生成的时间与降低运算复杂度,提高三角网构建效率;逐点插入法是以插入点为中心,根据领域范围内新插入点的位置生成、优化三角网,并不断扩大三角网规模的过程。当数据量较小时,由于逐点插入法无须分块、合并等处理,其生成三角网的速度较快。然而当数据量较大时,新三角网生成需频繁遍历已生成的三角网,大大降低了算法效率;三角网生长法选择点云数据集中的两点生成初始边,以此为基边搜索第三点形成新三角形。综合而言,分治合并法构建三角网的效率最高。

通常情况下,由于储煤场中的储煤量巨大,三维激光扫描仪获取到的点云数据量可达千万级,采用传统的 Delaunay 三角剖分算法构网时间长,运行效率低,因此,如何改进 Delaunay 三角剖分算法提高三维重构的效率成为热点问题。青文星等^[7]将分治合并法与逐点插入法相结合,提出一种布点数目不对三维重构效率产生较大影响的改进 Delaunay 算法,较传统算法有一定优势;邓曙光等^[8]提出基于扫描线与 Lawson 局部优化算法相结合的改进 Delaunay 算法,在保证三维重构精度的同时提高了三角网构网效率;陈士杰等^[9]在逐点插入法基础上,对插入点的定位方法与空外接圆优化准则进行改进,保证了定位路径的唯一性,从而提高了构网效率;朱若岭等^[10]针对传统 Delaunay 算法存在的约束条件复杂问题,在三维重构时通过剔除不符合条件的三角形简化约束条件,提高了构网

效率;巩垠熙等^[11]基于三角网生长法思想,通过分块筛选机制渐进扩展三角网,根据特征点约束条件去除不规则点云数据,降低了数据冗余度,提高了运算效率,适用于海量点云数据构建三角网的情形。上述改进 Delaunay 算法在提高算法效率上有一定贡献,但也存在以下问题:(1)煤堆表面结构复杂,起伏不均,且点云密度不均匀,对点云数据划分时未考虑点云分布情况,导致三角网构网效率低,且子网合并时约束条件烦琐,额外辅助工作花费一定时间。(2)为了提高算法效率,对点云数据进行抽稀处理,导致三角网构建精度较低,三维重构的真实性有所偏失。体积、质量都较小的事物,小的三维重构真实性偏差不会产生太大影响;但对煤堆而言,其体积与质量量级较大,微小的偏差都将产生较大的经济损失,无法接受。为了实现煤堆高精度三维重构,同时应对千万级别数量级的庞大煤堆点云数据算法效率低下问题,本文提出一种基于组合三角剖分的改进 Delaunay 三角网算法。

1 基于组合三角剖分算法的三维重构

1.1 区域分块

煤堆点云数据在地理位置上彼此相邻,可以根据测量数据时间的先后顺序对点云数据分块处理^[12]。由于煤堆的堆体形状在空间上没有层叠区域,因此煤堆表面的点云数据在 xoy 平面的投影不会产生重叠现象,可以对投影区域进行分块处理。煤堆表面三维点云数据投影如图 1 所示。

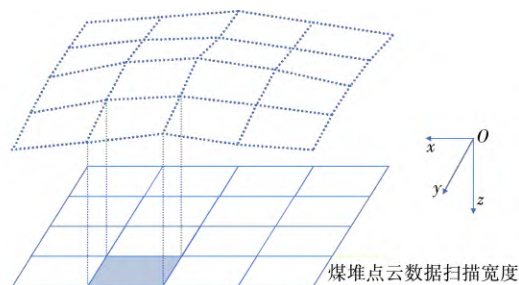


图1 煤堆表面三维点云数据投影

将煤堆表面的三维点云数据投影到 xoy 平面,然后将投影区域分割成若干大小相同的矩形块,矩形块的大小根据数据扫描仪的扫描周期以及扫描夹角确定,从而完成区域分块。

1.2 单区域剖分

经过区域分块后,可以获得许多分布着散点的分块区域,对每一个分块区域内的散点进行三角剖分,在剖分过程中要让每一个三角形尽可能是等边三角形,各三角形之间互不重叠,形态饱满,曲面光滑且连续,避免出现边长过长的三角形^[13]。由于经过了区域分块处理,单区域内的散点位置较为集中,可以

提高三角剖分的效率与效果,具体实现步骤如下:

1)在区域中心位置选择两个点云数据,连接后生成初始边长。

2)以初始边长的中点为圆心,搜索半径 r 范围内区域内散点作为初始边长的第三点构造初始三角形。初始三角形在形态上接近等边三角形。搜索半径 r 根据散点间的距离以及密集程度确定,若散点稀疏,则搜索半径 r 加速增加,提高搜索效率。

3)以初始三角形的边长为待扩展边,以搜索半径 r 在待扩展三角形,即遵循初始三角形的异侧寻找散点,要求散点的位置与待扩展三角形的第三点位置位于待扩展边的两侧。

4)计算待扩展三角形与扩展后三角形的法向量夹角,选择法向量夹角最大的三角形为扩展后三角形,保持曲面光滑。

5)如果存在满足上述条件的多个三角形,则在所有满足条件的三角形中比较它们的最小角度,选择最小角度最大的三角形作为扩展三角形,即最小内角最大准则。单区域三角剖分过程如图 2 所示。

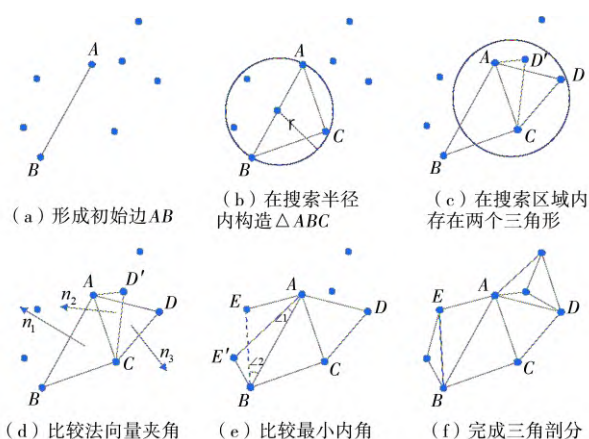


图 2 单区域三角剖分过程

1.3 区域连接

经过单区域剖分后,煤堆表面的三维点云数据被剖分成若干互不连接的区域,为了完成三维重构,需要将这些独立区域连通,从而获得完整的剖分曲面。

在进行单区域剖分时,所有的点云数据都来自本区域。这对中心区域的三角剖分影响不大,但对于边界区域,由于缺少相邻区域的点云数据,边界附近的三角面片不连续。因此,在区域连接时需要基于外接球准则采用三维 Delaunay 剖分方法对连接区域进行细节优化,保证每个三角面片至少有一个外接球不含其他曲面顶点,避免区域边界出现曲面断层,从而提高三维曲面的光滑程度^[14-15]。区域连接实现算法如下:

1)建立三角面片的外接球,查看在外接球内是否存在其他曲面的顶点。

2)如果外接球内存在其他曲面的顶点,则将外接球球心作为新的点云数据插入散点集中。

3)对新加入的点云数据重新进行三角剖分。

三维 Delaunay 剖分优化处理如图 3 所示。

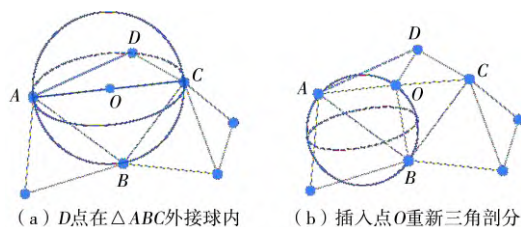


图 3 三维 Delaunay 剖分优化处理

2 试验与分析

2.1 标准煤堆模型体积测量

根据煤堆的形状特点,堆建了标准的四棱台煤堆模型。利用本文提出的基于组合三角剖分的改进 Delaunay 三维重构算法对煤堆进行测量,获得的标准煤堆模型的立体图及其散点图如图 4 所示。

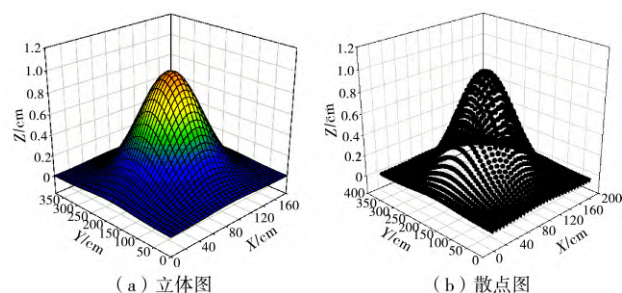


图 4 标准煤堆模型的立体图与散点

通过连续 10 次测量,测得的标准煤堆模型体积及相对误差分别如图 5 和图 6 所示。从图中可以看出,本算法连续多次测得的体积值在标准之上下小幅度波动,10 次测量平均误差为 2.66%,最大误差为 3.9%,系统的稳定性及精度都较高。

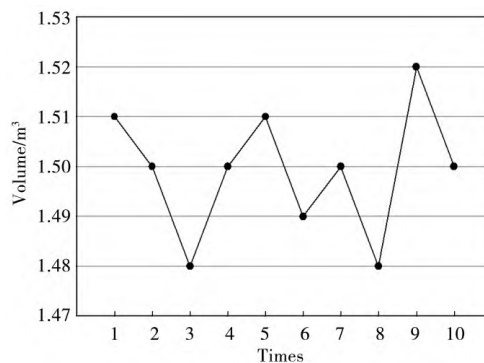


图 5 标准煤堆 10 次体积测量结果

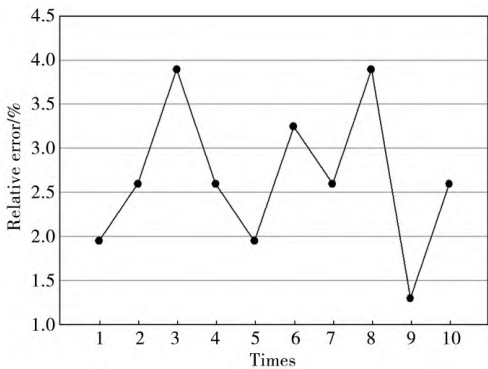


图 6 10 次体积测量的相对误差

2.2 煤堆实物体积测量

以徐州某发电厂的封闭储煤基地为试验场所，该场所利用封闭煤场顶棚的马道为载体，在马道下方布置一条贯穿整个煤堆的环形行走轨道。轨道

下挂盘煤机器人绕煤堆运动，通过其上搭载的三维激光扫描仪获取煤堆表面点云数据。试验封闭储煤基地示意图如图 7 所示。

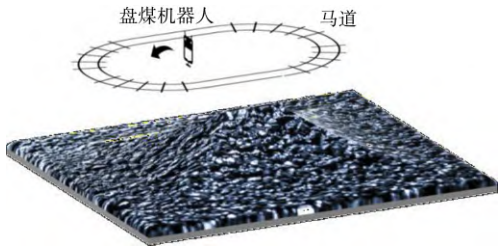


图 7 试验封闭储煤基地示意图

为了比较本文提出的算法，选用改进的逐点插入法^[16]与三角网生长法^[17]进行比较，三种算法对三维激光扫描仪获取的煤堆表面点云数据重构曲面如图 8 所示。

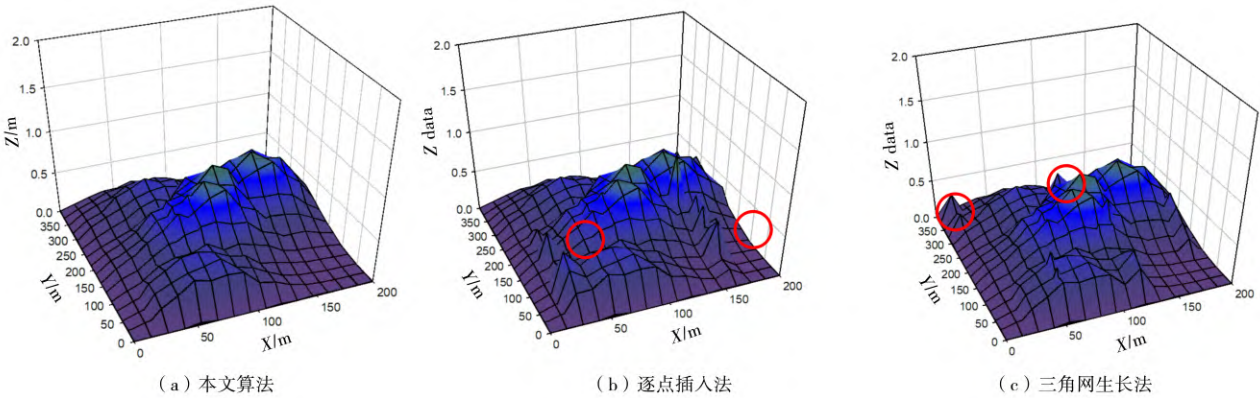


图 8 三种算法的重构曲面

从图 8 可以看出，利用本文提出的算法实现的三维重构曲面更加细腻平滑，逐点插入法与三角网生长法均存在不同程度上的狭长三角形，与真实情况存在一定偏差。三种算法煤堆重构测量参数对比见表 1。

表 1 三种算法煤堆重构测量参数对比

算法	构网 点数	狭长三 角形数	时间/ s	测量体积/ m ³	测量 误差/%
逐点插入法	3 547 163	86	155	13 837	0.63
三角网生长法	5 335 942	113	206	13 884	0.97
本文算法	3 276 255	25	89	13 721	-0.21

从表 1 中可看出，在三种算法中，三角网生长法在构网点数、狭长三角形数及时间上表现最差，这主要是因为随着煤堆表面点云数量增加，其需要遍历的三角形数也会越来越多，导致其在数量级较大情形下表现不佳。其次是逐点插入法，本文算法表现最优。对于体积约为 13 750 m³ 的煤堆，利用本文提出的算法测量的误差仅为 0.21%，远优于另

外两种算法，可见改进后的算法重构效果更好。

3 结论

本文针对煤堆表面结构复杂且点云数据量大导致的传统 Delaunay 三角剖分算法测量精度不高、运行效率较低的问题，提出了一种基于组合三角剖分的改进 Delaunay 算法。该算法将煤堆表面百万数量级的点云数据，根据地理位置与测量时间分割成若干均匀大小的矩形块。为了提高单个矩形块三角剖分的效率，搜索半径根据点云数据之间的距离与密集程度动态改变。在进行区域连接时，区域边界三角网不连续，导致可能出现狭长三角形，因此采用外接球准则予以优化。为了验证算法效果，分别用改进算法、逐点插入法、三角网生长法对徐州某发电厂的封闭煤堆测量试验。对比结果表明，本文提出的算法三维重构曲面更加细腻逼真，构网点数、狭长三角形数最少，测量时间和测量误差表现最优，更能满足煤堆体积质量高效、快速测量的要求。

参考文献:

- [1] Liu S H, Dong-Sheng W U, Luo X L, et al. Research on Algorithm of Delaunay Triangulation Net Interpolating Polygon[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2007.
- [2] 徐道柱, 刘海斌. Delaunay 三角网建立的改进算法[J]. 测绘与空间地理信息, 2007, 30(1): 38-41.
- [3] Su T Y, Wang W, Lyu Z H, et al. Rapid Delaunay triangulation for randomly distributed point cloud data using adaptive Hilbert curve[J]. Computers & Graphics, 2016, 54: 65-74.
- [4] 王磊, 聂玉峰, 李义强. Delaunay 四面体网格并行生成算法研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011(6): 923-932.
- [5] 武晓波, 王世新, 肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 28-35.
- [6] 尤磊, 唐守正, 宋新宇. 以优先点为中心的 Delaunay 三角网生长算法[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(1): 60-68.
- [7] 青文星, 陈伟. Delaunay 三角网生成的改进算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(S1): 226-229.
- [8] 邓曙光, 郑智华, 敖四芽, 等. 上下扫描线的 Delaunay 三角剖分算法[J]. 测绘科学, 2019, 44(2): 122-127.
- [9] 陈士杰, 张森林, 刘妹琴, 等. 基于改进 Delaunay 三角剖分的水下地形三维重建算法[J]. 计算机科学, 2020, 47(11): 137-141.

- [10] 朱若岭, 张昊. 基于 Delaunay 三角网的高效车载雷达点云表面重建算法[J]. 理论与方法, 2021, 40(12): 44-48.
- [11] 巩根熙, 何诚, 冯仲科, 等. 基于改进 Delaunay 算法的树冠三维重构单木因子提取[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 192-199.
- [12] 蔡文霞. 基于无人机的封闭煤场体积测量系统设计[J]. 石家庄学院学报, 2019, 21(6): 117-122.
- [13] Ahn J K, Lee K Y, Sim J Y, et al. Large-scale 3D point cloud compression using adaptive radial distance prediction in hybrid coordinate domains[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 9(3): 422-434.
- [14] 宋大虎, 李忠科, 孙玉春. 三维散乱点云快速曲面重建算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(8): 2527-2529.
- [15] Xie W C, Zou X F, Yang J D, et al. Iteration and optimization scheme for the reconstruction of 3D surfaces based on non-uniform rational B-splines[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(11): 1127-1140.
- [16] Zou Y G, Zhang T. Improved Delaunay triangulation algorithm in plane domain[J]. Computer Engineering and Application, 2013, 49(20): 171-174.
- [17] 尤磊, 唐守正, 宋新宇. 以优先点为中心的 Delaunay 三角网生长算法[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(1): 60-68.

(责任编辑: 司元雷)

(上接第 17 页)

2) 近距离上部基坑施工对在建地铁隧道的竖向影响大于水平影响, 竖向变形最大值是横向变形最大值的 5.6 倍, 并且这种变形程度随着开挖深度的增加而增加, 因此, 在施工支护方案的选取中应该优先考虑减小土层扰动对隧道产生的竖向影响。

3) 岩层较大的弹性模量会导致基坑开挖到岩层时产生大于土层开挖时的变形量。取竖向变形位移最大断面处 4 种不同工况的位移差值为研究对象, 由图 5 可知, 在工况 4 开挖中风化灰岩时竖向变形增加了 4.31 mm, 相较于工况 1 中的 2.37 mm, 工况 2 与工况 1 中的竖向变形差值 2.38 mm 和工况 3 与工况 2 中的竖向变形差值 2.61 mm 是一个较大的变形数值。由图 6 可知, 横向变形前 3 个工况增值为 0.16 mm, 0.22 mm, 0.31 mm, 到工况 4 越至 1.42 mm, 虽然整体的数据值不大, 但是数值的变化幅度过大, 工程人员需足够的重视。因此, 工程施工中要结合实际的情况选取合适的施工方案减小这一变化趋势。

参考文献:

- [1] 代杰, 杜晓峰, 邹道磊, 等. 基坑上跨施工对既有地铁结

构影响监测分析[J]. 科学技术创新, 2022(10): 106-109.

- [2] 赵宇鹏, 陈道政. 盾构隧道上跨施工对既有隧道变形的影响研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(11): 1525-1530.
- [3] 郑刚强, 殷洪波, 郭永发, 等. 基坑上跨既有地铁隧道施工扰动效应研究[J]. 工程建设与设计, 2022(1): 114-117.
- [4] 王雄, 潘伟强, 李明广, 等. 上跨基坑开挖对既有隧道变形的影响及其控制研究[J]. 四川建筑科学研究, 2020, 46(S1): 18-23.
- [5] 何小龙, 董浩伟, 陈燕青, 等. 上跨地铁基坑开挖对区间隧道变形影响的监测与数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 39-44.
- [6] 吴剑秋, 孙旻, 蔡庆军, 等. 上跨地铁区间基坑开挖对地铁保护措施研究[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(12): 49-52.
- [7] 施成华, 李翔, 雷明锋, 等. 基坑上跨既有盾构隧道坑底土体加固方式探究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(5): 1147-1155.
- [8] 段超. 上跨地铁运营线基坑施工对隧道变形控制研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(3): 155-159.
- [9] 张治国, 费思异, 邢李. 双基坑开挖对邻近隧道结构变形影响分析[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(2): 176-181.

(责任编辑: 梁赛平)