

## 容差 AI 技术在土方计算中的应用研究

李 锋<sup>1</sup>, 贾芬芬<sup>2</sup>

(1. 杭州广延建设有限公司, 浙江 杭州 321000; 2. 桐庐鼎力建材有限公司, 浙江 杭州 321000)

**摘要:** 准确高效的土方计算对工程成本、进度控制以及资源调配至关重要。将容差 AI 技术引入土方计算领域, 是传统方法的重要创新。容差 AI 技术凭借其强大的数据处理、智能分析和自动化执行能力, 能够快速、精准地处理海量地形数据, 实现土方计算的自动化与智能化。文章重点探讨容差分析 AI 和容差自动化 AI 技术, 结合四面体化技术建模方法, 验证其在土方计算结果准确性和数据运算效率方面的表现。结果表明: 容差 AI 技术叠加四面体化技术的三维建模方法, 其计算效率相较于传统方法提升 7-8 倍, 计算结果误差率控制在 1% 以内。本文结果可为土方计算提供新的研究思路与解决方案。

**关键词:** 容差 AI 技术; 土方计算; 无人机测绘数据; 土方计算边界; 自动边坡放坡

**中图分类号:** TP151; TP18

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-8993(2026)07-0029-06

**doi:** 10.13402/j.gcjs.2026.07.075

## Research on the application of tolerance AI technology in earthwork calculation

LI Feng<sup>1</sup>, JIA Fenfen<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Guangyan Construction Co., Ltd., Hangzhou 321000, Zhejiang, China;

2. Tonglu Dingli Building Materials Co., Ltd., Hangzhou 321000, Zhejiang, China)

**Abstract:** Accurate and efficient earthwork calculation is crucial for engineering cost control, schedule management, and resource allocation. The introduction of Tolerance AI technology into the field of earthwork calculation represents a significant innovation over traditional methods. Leveraging its powerful capabilities in data processing, intelligent analysis, and automated execution, Tolerance AI technology can rapidly and precisely process massive terrain data, achieving automation and intelligence in earthwork calculation. This research focuses on Tolerance Analysis AI and Tolerance Automation AI technologies, combined with the tetrahedralization modeling method, to validate their performance in terms of calculation accuracy and computational efficiency. Case studies demonstrate that the integration of Tolerance AI technology with tetrahedral 3D modeling increases computational efficiency by 7 to 8 times while controlling the calculation error rate to within 1%, providing new research insights and solutions for earthwork calculation.

**Key words:** tolerance AI technology; earthwork calculation; UAV surveying data; earthwork calculation boundary; automatic slope grading

土方计算作为工程建设的基础性工作, 在工程成本控制、进度规划以及资源调配等方面起着关键作用。在复杂的地形与工程场景中, 传统土

方计算主要依赖 Excel 表格计算和二维计算工具为主, 尚未应用容差 AI 技术, 无法应对输入数据(如点云、影像、图纸)的噪声干扰、精度波动等

**收稿日期:** 2025-09-16

**作者简介:** 李 锋(1978—), 男, 高级工程师, 从事建筑施工技术管理研究工作。

**通信作者:** 贾芬芬(1983—), 女, 高级工程师, 从事建筑结构技术管理研究工作。

不确定性,存在效率低、精度差等问题。合理选取新技术优化土方计算,能够有效节省工程费用,加快施工进度,提高经济效益。

技术革命一直是社会进步的重要驱动力,几次重大的工业革命极大地加速了世界文明的发展。当前,人类正处身于人工智能时代,AI 技术已成为全社会关注的热点。此次研究将容差 AI<sup>[1]</sup>技术与四面体化技术相结合,应用于土方计算、在提高计算精度和效率方面取得的显著成果,具有极为重要的理论和实践意义。在理论方面,容差 AI 技术在土方计算中的应用完善了相关理论和方法,可为后续研究提供参考。在实践方面,容差 AI 技术能够有效处理含噪声干扰的地形数据,提升四面体化技术三维建模的自动化能力,能整体提高土方计算的精度和效率,可为项目成本控制和进度规划提供更准确的数据支持。

## 1 研究现状

目前,土方计算研究集中在计算方法(方格网、三角网、断面)、Delaunay 三角剖分技术、无人机测绘数据采集<sup>[2]</sup>等方面,尚未有容差 AI 技术结合四面体化技术的应用研究,现有方法与技术存在的主要问题表现为土方工程量计算结果误差率达 3%~5% 以上,且存在较多的人工干预建模。

许多学者已经对三角剖分算法进行了比较研究。程亮等<sup>[3]</sup>发现,现有土方计算软件(如飞时达、鸿业、HTCAD、CASS)主要采用二维剖分模型,对复杂地形的适应性有限且存在计算误差,建议采用反距离加权插值法或克里金插值法进行三维建模计算;候汉霜<sup>[4]</sup>发现,CASS7.0 生成的

三角网不符合 Delaunay 三角剖分准则;于坤<sup>[5]</sup>发现,先将离散点进行 Delaunay 三角剖分,生成初始三角形网格,再使用约束边嵌入形成约束的三角剖分,这种算法效果更优;李笑<sup>[6]</sup>发现,Delaunay 四面体剖分算法是二维 Delaunay 三角剖分的扩展,由三角形基本单元扩展为四面体,这种技术更有优势。

综上所述,现有研究普遍指出基于二维的 Delaunay 三角网法在应对复杂地形时存在适应性不足与计算误差等问题。而将其扩展至三维的四面体化技术,在理论上具有模型结构更清晰、能更精确地贴合原始数据点等潜在优势,为高精度土方计算提供了新的途径。然而,当前土方计算仍普遍依赖 K-NN 近邻算法(以下简称为“K 近邻算法”)剔除异常高程点,并沿用二维 Delaunay 算法进行体积计算。融合容差 AI 以应对数据噪声、结合四面体剖分三维建模的土方计算方法尚属研究空白。

## 2 架构设计

### 2.1 业务设计

土方计算软件架构主要包含三层三线。三层包括技术层、应用层和展示层,技术层为系统涉及到的技术支撑,应用层为功能实现路径,展示层为用户交互界面效果。三线指业务流程,包含数据获取、数据分析和土方计算。数据获取指制定数据标准来兼容获取数据,数据分析指运用图形识别、容差 AI 技术、K 近邻算法来处理各种复杂数据,土方计算指结合约束三角剖分和四面体化技术来建模算量,具体业务设计如图 1 所示。

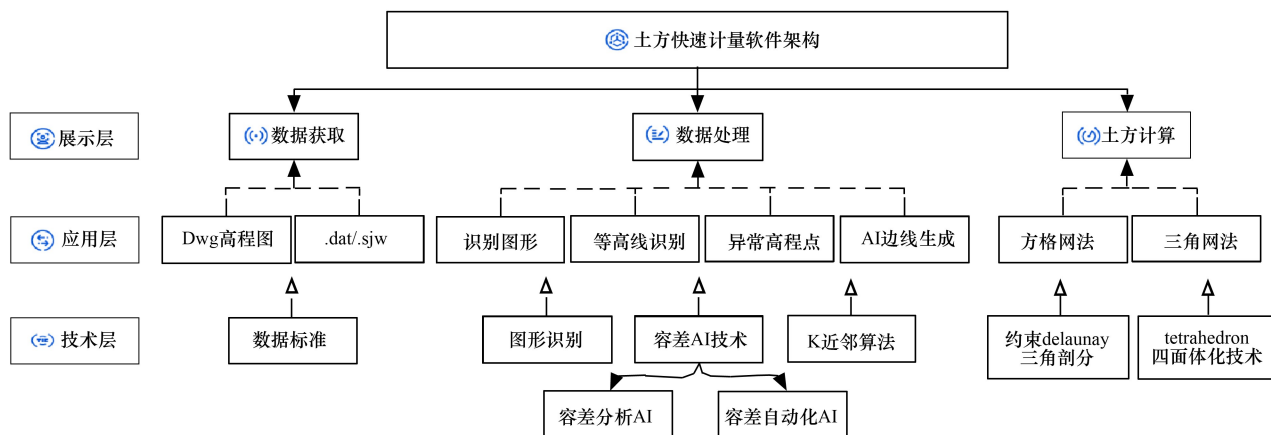


图 1 土方计算软件业务设计

## 2.2 技术设计

### 2.2.1 容差 AI 技术

人工智能(AI)在最广泛的意义上,涵盖机器、特别是计算机系统所表现出的智能。“智能”涵盖辨识、信息筛选、规划、计算、创新、决策等能力,尤其是在执行复杂计算或数据处理任务等方面,机器可能已经超越了正常人类的速度和效率<sup>[1]</sup>。

容差 AI 技术是指面向工程应用、具备不确定性容忍与误差传播机制的智能算法框架,其核心在于融合先验知识约束与数据驱动学习,以有效处理工程环境中不完整、有噪声、多尺度的原始数据(如地形点云、无人机测量数据、图纸等),在满足几何与物理容差的前提下输出稳定可靠的结果。此次研究聚焦于该框架下两类互补性子技术:容差分析 AI 与容差自动化 AI。前者专注于数据预处理与质量提升,通过智能清洗、异常值剔除与高程信息补全,输出可靠的高程点集;后者致力于建模流程的自动化执行,通过算法驱动四面体化技术构建三维模型,显著降低人工干预并提升运算效率。

### 2.2.2 四面体化技术

四面体化技术基于 Delaunay 准则,确保每个四面体的外接球内不含其他输入点,从而最大化最小二面角,避免生成低质量单元。移除无效单元、优化网格质量(如边交换、节点移动),使网格符合数值计算要求,生成的四面体网格可用于地质建模、有限元分析、地震模拟等领域。高质量的四面体网格能够提供更精确的数值计算结果,

有助于准确描述复杂地质结构。四面体模型的优势在于网格结构清晰、严格通过所有数据点,可建立精确模型<sup>[6]</sup>。此次研究重点应用四面体技术建立高精度三维模型,如图 2 所示。

## 3 土方计算软件场景构建与成果转化验证

### 3.1 场景构建

土方计算是工程测量的基础性工作。在工程造价构成中,土方成本占比达 30% ~ 60%,在百万立方米级别的大型土方工程中,1% 的计算误差即可引发数百万元的损失。为此,此次研究聚焦计算结果准确性和效率的核心需求,构建容差 AI 技术与四面体化技术融合的智能化场景,通过容差 AI 技术处理输入数据噪声,四面体化技术实现三维自动化建模来提高准确性和效率。

#### 3.1.1 准确性

(1) 通过容差分析 AI 驱动等高线高程数据补全与提取:针对测量原始数据中出现的断裂现象,该技术基于注意力机制的改进 U-Net 语义分割模型,构建容差型等高线解析框架,预训练学习地形等高线的连续性特征、高程渐变规律及曲率分布特性,自动识别断开等高线的位置与范围,采用三次样条插值算法补全断裂部位,生成连续完整的等高线网络,最后以等距采样法从补全后的等高线上提取生成计算高程点,确保高程点在地形复杂区域(如边坡、洼地)密集分布、在平坦区域均匀分布(图 3)。

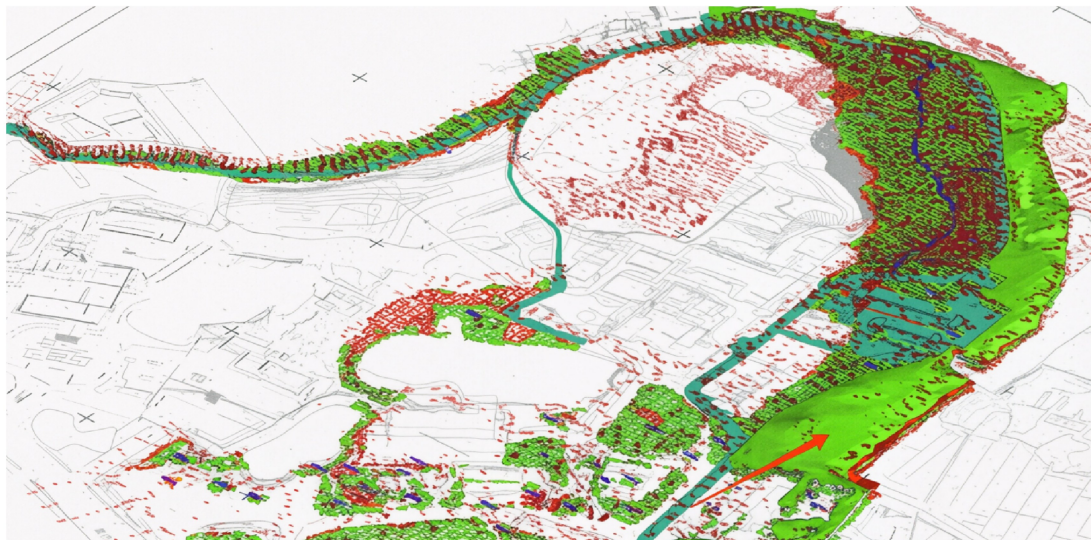


图 2 四面体技术建立的三维模型

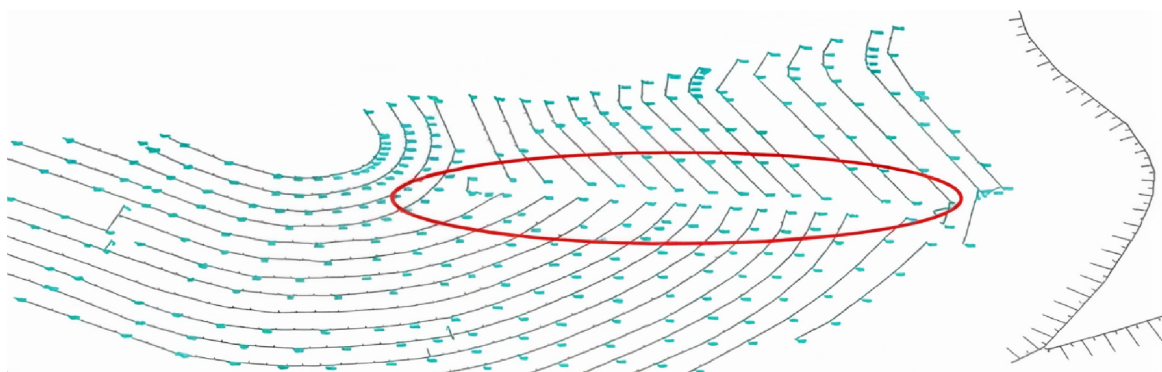


图3 容差分析 AI 提取生成计算高程点

(2) 通过容差分析 AI 实现异常高程点智能检测与过滤: 在全站仪测量、无人机航测等数据采集过程中, 数据易受植被遮挡、环境干扰等因素影响, 产生超出地形自然趋势的异常高程点(如孤立高点、凹陷低点), 若直接应用于建模会导致地形拟合失真。该技术构建“统计检测—语义验证”双级容差过滤机制, 对确认为测量异常的点予以自动剔除, 确保三维高程点集的可靠性。

### 3.1.2 效率

(1) 利用容差自动化 AI 结合四面体化技术自动生成土方计算边界: 传统土方计算通常采用布置或模拟推算边界高程点, 绘制土方计算边界的方式, 不仅效率较低, 且计算结果精度不高。该技术基于四面体化技术构建的三维模型, 由容差自动化 AI 提取边界拓扑高程点, 自动绘制闭合计算域边界(图4), 有效提高了土方边界生成效率。

(2) 利用容差自动化 AI 驱动四面体化技术, 构建三维土方模型: 基于容差分析 AI 处理后的三维高程点集与土方计算边界, 通过四面体化技术进行自适应网格剖分简化网格, 生成与实际地形 1:1 匹配的三维实体模型。该流程实现了自动化,

从而显著提升了建模与计算效率。

(3) 利用容差自动化 AI 生成土方边坡: 传统土方计算需要手动绘制边坡轮廓, 效率低且易出现参数不一致问题。此次研究基于实体模型的边界语义与坡度约束, 由容差自动化 AI 自动解析拓扑关系, 完成边坡分级衔接与形态优化, 生成符合设计规范的三维边坡模型(图5), 有效提高了土方边坡的生成效率。

### 3.2 成果转化与应用验证

此次容差 AI 结合四面体化技术的研究, 已成功转化为本研究开发的软件 V8.0(已获得国家版权局计算机软件著作权登记证书, 登记号: 2025SR0195471)。软件深度融合了容差 AI 技术和四面体化技术, 突破了传统土方量算的精度与效率瓶颈。

为验证其应用价值, 以某地块项目(占地面积为  $5\,086.36\text{ m}^2$ , 自然最低高程为  $398.69\text{ m}$ , 最高为  $438.03\text{ m}$ , 设计高程统一为  $418\text{ m}$ )为例进行计算, 结果如表1所示。本研究开发的软件 V8.0 计算效率远高于采用传统技术的土方计算软件, 计算结果相互之间误差范围非常小, 均在允许误差范围内。

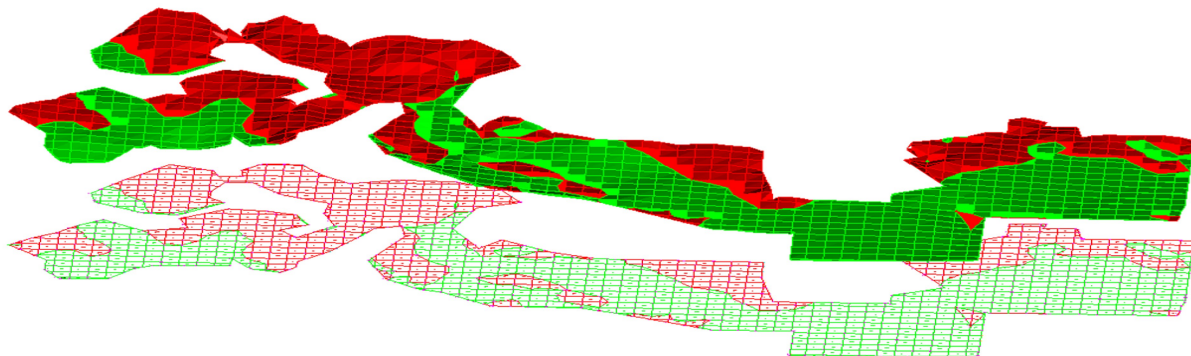


图4 容差自动化 AI 生成土方计算边界

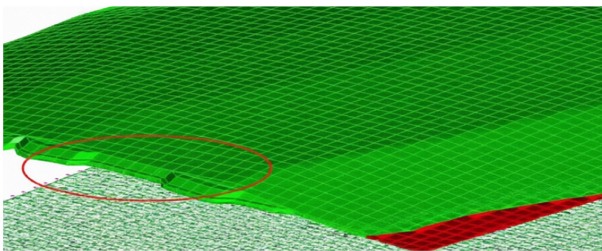


图 5 容差自动化 AI 生成土方边坡

4 项目实践案例

4.1 项目概况与难点

余杭鸬鸟温泉度假综合体一期项目地块位于杭州市余杭区,东至后枯线,南至鸬鸟溪沿溪道路,北、西至骑马岗山丘,用地面积约为 84 235 m<sup>2</sup>。总建筑面积为 91 964.50 m<sup>2</sup>。其中:地上建筑 5 层,建筑面积为 58 964.50 m<sup>2</sup>;地下建筑 2 层,建筑面积为 33 000 m<sup>2</sup>。

前期地形图采用全站仪、GPS 测量等对场地进行了测量,场地原始地形最高点高程为 154.63 m,最低点高程为 92.42 m,最大高差达到 62.21 m。首先,项目难点在于地形数据量庞大,原始地形中存在大量高程点与等高线,需要对等高线和异常高程点数据进行处理。其次,设计高程采用特殊标记方式,且土方边界线是由不闭合线段组成,给识别带来了挑战。另外,为避免增加项目造价,项目要求对土方进行优化,尽量保持场内土方平

衡,不发生外运费用。

4.2 容差 AI 技术应用过程

项目采用本研究开发的软件 V8.0,使用方格网法计算土方工程量。首先,利用容差 AI 技术对原始地形数据进行识别与标记,剔除异常数据。特殊的设计高程标记则利用图形识别技术处理。对于边界线不闭合的情况,利用容差 AI 边界自动容差搜寻功能,自动生成土方计算边界。利用该土方计算软件的三维建模与快速计算能力,对土方平衡结果进行动态优化。

根据原始高程和设计高程,计算每个方格的挖填土方量,然后汇总得到整个场地的总挖方量和总填方量,最后根据土方场内平衡、不外运的原则,对土方进行平衡优化,计算结果数据如表 2 所示。

针对性提出了土方优化后建议,首先建议临时道路的设置,应在考虑周边建筑物布局和运输路径的同时,尽量靠近土方零线设置。其次建议土方场内挖填调配原则,遵循就近调配、经济合理、避免二次倒运,减少土方运输成本和对周边环境的影响。最后建议调配过程中,合理安排运输车辆和施工机械,确保土方调配工作高效有序进行。

4.3 应用价值与意义

在计算精度方面,容差 AI 技术的应用使得土

表 1 土方计算软件比较

| 软件                | 5 m×5 m 方格网法<br>土方净开挖量/m <sup>3</sup>        | 计算<br>时间/s | 导出 Excel<br>用时/s | 净开挖量均<br>值误差/% | 采用技术                           | 操作<br>便捷性 |
|-------------------|----------------------------------------------|------------|------------------|----------------|--------------------------------|-----------|
| 鸿业土方计算<br>V8      | 填 27 456.616<br>挖 -6 447.643<br>净 21 008.973 | 8          | —                | 0.07           | 标准 Delaunay 剖分<br>二维图形         | 低         |
| 飞时达土方计<br>算软件 V14 | 填 27 437.44<br>挖 -6 447.21<br>净 20 990.23    | 9          | 30               | -0.02          | 标准 Delaunay 剖分<br>二维图形         | 低         |
| 本研究开发的<br>软件 V8.0 | 填 27 381.752<br>挖 -6 398.367<br>净 20 983.385 | 1          | 1                | -0.05          | 容差 AI 技术数据处理<br>四面体化技术<br>三维图形 | 高         |

注:“填”为填方量;“挖”为挖方量;“净”为填方量减去挖方量后的土方平衡量(净余土量)。

表 2 土方计算结果

| 项目名称 | 挖方量/m <sup>3</sup> | 填方量/m <sup>3</sup> | 表面积/m <sup>2</sup> | 设计面标高/m | 原地面标高/m |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|
| 余杭鸬鸟 | 83 094.379         | 82 561.263         | 84 236.519         | 111.58  | 111.695 |

方计算的精度得到了大幅提升,误差控制在 1% 以内,有效避免了因土方量计算误差导致的工程成本增加和工期延误。通过精确的土方计算,施工单位能够更加合理地安排施工资源,减少了资源的浪费和闲置。

在计算效率方面,容差 AI 技术实现了土方计算的秒级响应,计算效率是传统方法的数倍,大幅提高了工作效率,为加快项目进度提供了有力支持。施工单位能够及时获取土方计算结果,快速调整施工方案,确保了项目的进度。

此外,在项目的成本控制方面,通过精确的土方计算,施工单位能够更加准确地估算工程成本,合理控制土方调配和运输费用,降低了工程成本。

## 5 结 语

本文通过将容差 AI 技术与四面体化技术相结合,应用于土方计算领域,系统阐述了其应用方法与原理。研究采用四面体化技术构建三维土方计算模型,利用容差 AI 处理含噪声的地形数据,实现计算效率较传统方法提升 7~8 倍、计算精度控制在 1% 以内的显著成果。通过余杭鸬鸟温泉度假综合体一期地块项目的实际应用验证,该技术

方案在计算性能上达到秒级响应,精度与效率均取得突破。此外,本研究成功实现了软件科技成果转化,为土方计算提供了兼具高效率与高精度的先进工具,促进了计算机科学与土木工程学科的交叉融合。上述成果不仅打破了传统计算方法的局限,也为复杂地形条件下的土方工程量精确测算提供了新的理论依据与实践路径。

## 参考文献:

- [1] 张茂聪,李琰. 人工智能的演进逻辑与教育造化:兼论“人工智能者”的概念及特征[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版),2025,64(1):147-159.
- [2] 吴小应. 无人机倾斜摄影测量技术在土方计算中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(9):215-217;224.
- [3] 程亮,钟岩,刘继龙,等. 不规则场地土方量计算的对比研究[J]. 城市地质,2021,16(3):325-331.
- [4] 侯汉霜. 基于 Delaunay 三角网法的土石方量计算精度探讨[J]. 城市勘测,2022(2):159-163.
- [5] 于坤. 基于物探数据的采煤工作面三维地质建模与可视化系统研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2024.
- [6] 李笑. 基于三角网格的复杂地区构造制图方法的研究与实践[D]. 武汉:长江大学,2024.
- [7] 赵建国,师伟雄. 多级滑面条件下堆积体滑坡稳定性分析[J]. 路基工程,2021(1):210-216.
- [8] 杜显祥,房浩,曹佳文. 建房切坡条件下边坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(5):40-47.
- [9] 赵永清,张洁. 谈强风化岩质高边坡勘察中的边坡稳定性问题[J]. 山西建筑,2020,46(6):58-59.