

DOI: 10.11779/CJGE2024S20045

智慧化技术在城市滨海软土工程的应用前景与挑战

侣传琪¹, 王琛^{*1}, 梁家馨², 华建¹, 梁发云¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200000; 2. 太原理工大学土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 在城市建设高质量发展阶段, 滨海地区面临迫切的城市更新需求。这类地区通常环境敏感复杂, 传统的软土工程数据采集与分析手段往往需借助大量的人力、物力, 且难以保证大范围、高效率、不间断地执行, 智慧化技术成为解决这一问题的重要手段。梳理了智慧化技术在数据感知、智能预测和可视化交互 3 方面的现状, 分别对比总结了接触式、非接触式感知技术, 大数据分析参数化建模方法, 数字孪生与交互式平台, 及其在软土工程中的应用与挑战, 为深入理解智慧化技术的内涵及应用前景提供支持, 助力行业新质生产力发展。

关键词: 软土地基; 智能化监测; 数据采集; 模型构建

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0216-05

作者简介: 侣传琪(2004—), 女, 本科生, 主要从事智能建造相关研究。E-mail: 2250745@tongji.edu.cn。

Application prospects and challenges of intelligent technology in urban coastal soft soil engineering

SI Chuanqi¹, WANG Chen¹, LIANG Jiixin², HUA Jian¹, LIANG Fayun¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200000, China; 2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Due to the high-quality urban development, the coastal areas are confronted with demands for urban renewal. These regions typically exhibit environmental sensitivity and complexity, while the conventional approaches often rely on manpower and resources, making it arduous to ensure extensive coverage, high efficiency and uninterrupted implementation. Consequently, the intelligent technology has emerged as a crucial means to tackle this issue. This study provides an overview of the current state of the intelligent technology in three key aspects: data perception, intelligent prediction, and visual interaction. The applications and challenges of contact and non-contact measurements, big data analysis and parametric modeling as well as the digital twin and interactive platform in soft soil engineering are summarized. It aims to facilitate a comprehensive understanding of the essence of the intelligent technology and its prospects while contributing towards fostering new quality productive forces.

Key words: soft soil foundation; intelligent monitoring; data collection; model building

0 引言

随着中国城市发展进入高质量阶段, 推进城市更新进程、加强存量资源利用、提升工程智能水平已成为当前城市建设的重要议题。滨海城市地区通常软土层深厚、分布广泛, 且地区经济发达、城镇化水平高, 环境条件敏感而复杂, 城市更新需求大、难度高。软土因低承载能力、高压缩性和高灵敏度等特点, 给工程建设带来了极大挑战^[1]。此外, 城市区域内的既有建筑、河流水域、文保单位、市政管线等也增大了城市滨海软土工程建设的难度, 处置不当将不仅导致生命财产损失, 还会引发社会广泛关注, 带来极大负面影响。传统的软土工程适用的有关技术往往耗时长、成本高, 且环境影响较大。因此, 更高效、经济、环

保的解决方案成为行业的迫切需求。

近年来, 岩土工程与新技术、新领域的不断融合使其正持续加速面向先进性、自动化、智能化的发展转型^[2]。大量智慧化技术相继涌现并在工程中逐步应用, 主要涵盖了智慧感知、智能分析、可视化呈现 3 个方面。特别是滨海城市复杂的工程条件下, 通过智慧化技术, 对现场演进过程产生的海量数据进行采集分析和预测研判, 有助于掌握项目总体进展、提升工程质量, 推进工程建设领域新质生产力的发展。

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”项目(22692195500); 上海市级大学生创新创业训练项目(S202410247429)

收稿日期: 2024-06-22

*通信作者(E-mail: cwang33@tongji.edu.cn)

1 软土工程数据的智慧化获取

数据获取是开展分析预测的重要环节。通过高效准确的手段实现工程关键过程的数据采集, 对海量数据进行结构化处理, 实现工程数据不间断、大范围、高效率获取。常见技术可分为接触式和非接触式两类, 包括光纤、雷达遥感、卫星遥感等。

1.1 接触式感知

(1) 光纤布拉格光栅 (FBG) 的分布式光纤

光纤传感器可用于检测温度、应变、压力等, 由于覆盖范围大、准确性好, 可用于软土工程地基沉降监测^[3]。朱海琴等^[4]开发了一种基于 FBG 的全断面沉降传感器, 当软土地层发生沉降变形时, 通过梁的弯曲理论和差分算法, 可推导出每个光纤光栅元件测点应变值与挠度间关系, 进一步可知软土地基沉降值。

(2) 布里渊散射光频域分析 (BOFDA) 的分布式光纤

布里渊频率的变化和温度、应变成线性关系, 通过布里渊频移即可获得整条光纤上的应变分布情况。侯公羽等^[5]依托北京轨道交通新机场线地铁区间监测项目, 通过光纤的应变曲线计算隧道的沉降曲线, 与现场监测结果吻合较好。基于布里渊散射光频域分析技术的分布式光纤传感在环境监测与航空航天等领域也得到了广泛应用。

1.2 非接触式感知

(1) 雷达遥感对地观测技术

合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 监测范围大、空间分辨率高, 通过多次过境 SAR 影像的复共轭相乘, 实现对现场超远距离感知, 可分为沿轨道干涉法、交叉轨道干涉法、重复轨道干涉法^[6]。该方法已应用于沉降监测和基础设施变形监测等^[7-8]。邢学敏等^[9]提出软土地区公路沉降自动化、大范围的监测方法, 构建时序 InSAR 相位与流变参数间关系。赵超英等^[10]以甘肃黑方台黄土台塬为试验区, 对该地区潜在的黄土滑坡开展了多时相编目、形变监测及失稳模式研究, 捕捉滑坡形变加速的时间点, 为滑坡预警提供了可能。

(2) 双目视觉监测系统

双目立体视觉基于视差原理, 获得物体三维空间几何信息 (图 1)。孙懋珩等^[11]基于图像处理技术, 将监测合作靶标设计为特殊棋盘格图像, 降低了图像点与空间点的对应关系以及匹配的难度。李丽萍等^[12]提出了基于双目立体视觉的隧道围岩形变监测系统, 通过设置双目相机对隧道围岩监测点图像进行采集, 利用特征点识别、高斯滤波等图像处理算法获取形变相关数据, 当形变量达到设定值时, 系统将自动发送

预警, 实现隧道围岩形变远距离、非接触、实时监测。此外, 双目视觉系统多用于滑坡位移监测中^[13-14]。

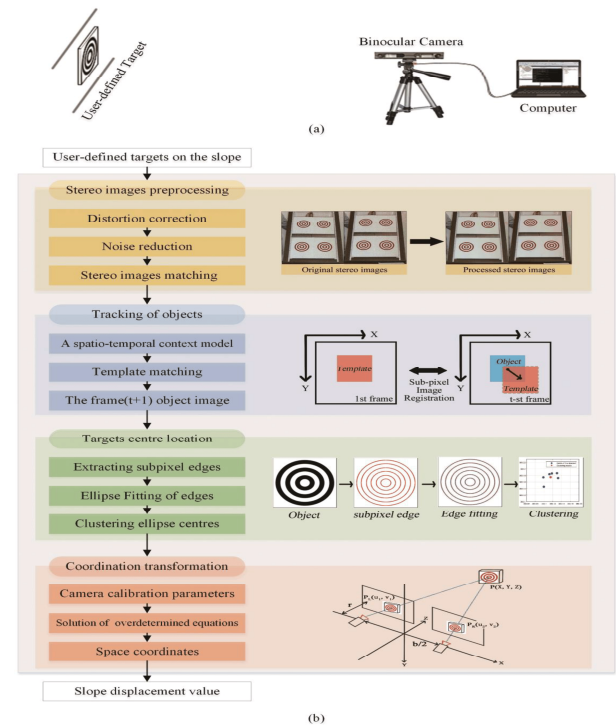


图 1 基于双目视觉技术的位移监测系统^[13]

Fig. 1 Displacement monitoring system via binocular vision method^[13]

2 软土工程的智能分析与预测

基于现场感知的海量数据, 利用网络算法与模型搭建, 构建预测模型对工程对象及各类外部条件的反应, 通过大数据分析与预测, 针对软土工程施工的现场问题提供建议, 如地表沉降^[15]、施工优化^[16], 为现场作业情况提供客观评价。

2.1 神经网络法

人工神经网络 (ANN) 是对人脑神经网络结构和功能进行理论抽象、简化和模拟的信息系统。典型的 ANN 模型是卷积神经网络 (CNN) 见图 2, 通常用于分析视觉图像^[17]。物理信息神经网络 (PINN) 将物理控制方程嵌入深度神经网络中, 使其遵守物理定律。循环神经网络 (RNN) 可记忆前一时刻信息并应用于当前输出向量, 但其可存储信息有限; 长短期记忆递归神经网络 (LSTM) 可解决 RNN 长期依赖性问题^[18]。潘秋景等^[19]通过嵌入盾构施工诱发地层位移的物理机制, 降低了算法对数据样本的需求。周中等^[20]构建 GA-Bi-LSTM 模型, 采用既有隧道沉降监测值以及对应的输入参数数据, 对模型进行了训练和测试。

常见的机器学习模型优化包括贝叶斯优化和差分进化遗传算法。贝叶斯优化方法已应用于桩承载力分析、

软黏土固结的反向分析等。林东等^[21]采用 GA-BP 神经网络提出了土体参数贝叶斯反分析模型;王长虹等^[22]采用随机力学-贝叶斯方法校准深层软土参数,利用贝叶斯理论减少岩土参数不确定性。差分进化遗传算法 (DEGA) 结合差分进化和遗传算法处理非二元值非线性函数的优化,可用于隧道响应反向分析。DEGA 还可与异构监测数据结合,处理非线性目标函数^[23]。

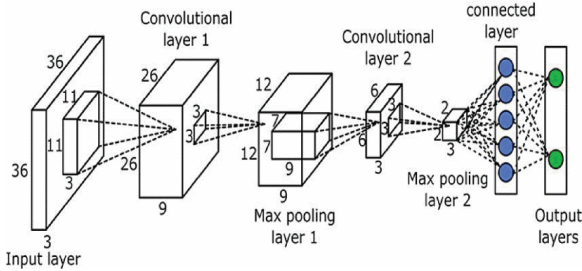


图 2 CNN 架构^[17]

Fig. 2 Architecture of CNN^[17]

2.2 参数化建模分析

基于参数化模型的有限元分析计算更加高效,还可精确保留结构变形特征。戴斌等^[24]采用基于 PLAXIS 和 HS 土体本构模型的数值方法,研究了不同条件下相邻基坑围护结构土压力的分布规律。唐洪祥等^[25]引入了粒子有限元法 (PFEM),每一增量分析计算都通过标准有限元求解器进行,在自由面的刻画和复杂边界问题时具备类似无网格方法的优势。王辉等^[26]运用 ABAQUS 的 python 编程,建立了反映拟建工程现场地质状况的参数化模型,实现了隧道扁平率及其间距的自动优化。

3 数字孪生与可视化交互

3.1 数字孪生技术与应用

数字孪生以数字化方式建立物理实体多维、多时空尺度、多物理量的动态虚拟模型,以描述物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等^[27]。Grievess 创建了表示数字孪生信息的概念模型,包含其多维组成和相互关系^[28],Cheng 等^[29]针对地下基础设施运维的数字孪生技术进行了研究,并提出了工程尺度中实现数字孪生的关键步骤。

目前,岩土工程数字孪生模型尚处于探索阶段,从岩土工程视角来看,针对地质体建模的不稳定性,可引入土性随机场理论,客观模拟地层边界和土性参数的空间变异性,建立准确反映自然规律的三维地质模型^[30]。

3.2 可视化交互与管控平台

现场数据的处置通常有两种方式,一种是将采集到的数据送至远程计算机处理;另一种通过现场各站

点内部网络处理。交互与管控系统通常包括现场智能设备层、SCADA 层、远程监控层,在采矿工程等领域取得较多应用。采矿工程中,可通过感知现场锚索等数据,结合智能分析系统,形成动态监测与预警曲线,判断监控对象的稳定状态。已在露天矿开采工程、地震灾区的滑坡灾害等监测中应用^[31]。

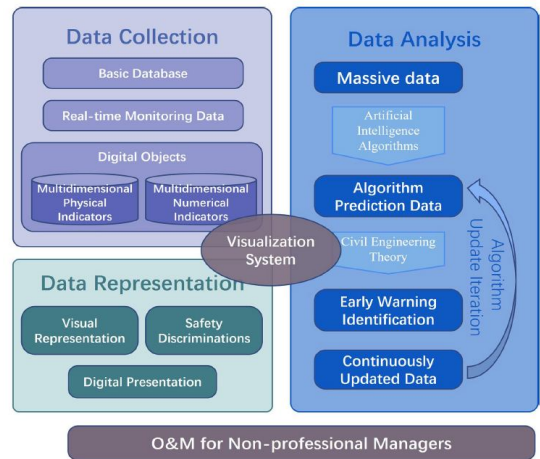


图 3 实现数字孪生系统的不同步骤及其交互^[29]

Fig. 3 Different steps of a digital twin and their interactions^[29]

针对软土工程的远程监控与交互平台,张斌等^[32]研发了路基沉降全方位远程自动监测系统,可对路基表面沉降等实现远程自动化长期监测。邬凯等^[33]开发了地质灾害远程监测预报系统,实现了监测数据的远程实时接收和可视化管理。

4 结 论

围绕智慧感知、智能预测、数字孪生相关技术,结合软土工程特点,针对其技术内涵及发展现状,分析了在城市滨海软土工程中的应用前景及挑战,助力行业新质生产力发展,提升软土工程智慧化水平。主要得到以下 3 点结论。

(1) 数据的获取与分析是智慧化技术在行业应用的基础环节,借助新型智慧感知手段,在获取海量数据的同时采用智能分析方法对其高效利用。

(2) 数字孪生与交互有助于非专业领域人员对工程问题的理解。受限于技术原理、通讯交互、感知建模等,彻底实现数字孪生在软土工程中的应用存在挑战,需要具有扎实专业基础的从业人员参与其中。

(3) 智慧化技术发展十分迅速,将有更多新方法相继涌现,如 ChatGPT、Sora 等。工程设计与建设人员需要不断学习并应用新的技术手段,以便完成传统行业生产力向新质生产力的进阶升级。

参考文献:

[1] 丁智,张霄,梁发云,等. 软土基坑开挖对邻近既有隧

- 道影响研究及展望[J]. 中国公路学报, 2021, **34**(3): 50-70. (DING Zhi, ZHANG Xiao, LIANG Fayun, et al. Research and prospects regarding the effect of foundation pit excavation on an adjacent existing tunnel in soft soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, **34**(3): 50-70. (in Chinese))
- [2] 陈湘生, 洪成雨, 苏 栋. 智能岩土工程初探[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(12): 2151-2159. (CHEN Xiangsheng, HONG Chengyu, SU Dong. Intelligent geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(12): 2151-2159. (in Chinese))
- [3] 黎剑华, 张 鸿, 刘优平, 等. 光纤 Bragg 光栅在公路软基沉降监测中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(5): 1442-1446. (LI Jianhua, ZHANG Hong, LIU Youping, et al. Fiber Bragg grating monitoring technology applied in soft ground settlement of highway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, **42**(5): 1442-1446. (in Chinese))
- [4] 朱海琴, 胡玉婷, 毛学军, 等. 基于 FBG 传感技术的软基全断面沉降传感器研发[J]. 南昌工程学院学报, 2016, **35**(4): 79-84. (ZHU Haiqin, HU Yuting, MAO Xuejun, et al. Development of whole cross section settlement sensor for soft soil foundation based on FBG sensing technology[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2016, **35**(4): 79-84. (in Chinese))
- [5] 侯公羽, 李子祥, 胡 涛, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的隧道沉降监测研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(9): 3148-3158. (HOU Gongyu, LI Zixiang, HU Tao, et al. Study of tunnel settlement monitoring based on distributed optic fiber strain sensing technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(9): 3148-3158. (in Chinese))
- [6] 朱建军, 李志伟, 胡 俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, **46**(10): 1717-1733. (ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, **46**(10): 1717-1733. (in Chinese))
- [7] WU Y, LIU C, ZHANG Q, et al. Bibliometric analysis of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) application in land subsidence from 2000 to 2021[J]. Journal of Sensors, 2022, **2022**: 1-15.
- [8] WU S, ZHANG B, DING X, et al. Radar interferometry for urban infrastructure stability monitoring: from techniques to applications[J]. Sustainability, 2023, **15**(19): 14654.
- [9] 邢学敏, 杨 东, 张 锐, 等. 基于雷达遥感对地观测技术的软土地区公路沉降监测方法[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(10): 2172-2179. (XING Xuemin, YANG Dong, ZHANG Rui, et al. Monitoring method for subsidence of highways in soft soil areas based on radar remote sensing earth observation technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(10): 2172-2179. (in Chinese))
- [10] 赵超英, 刘晓杰, 张 勤, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测与失稳模式研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, **44**(7): 996-1007. (ZHAO Chaoying, LIU Xiaojie, ZHANG Qin, et al. Study on InSAR recognition, monitoring and instability model of Heifangtai loess landslide in Gansu Province[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, **44**(7): 996-1007. (in Chinese))
- [11] 孙懋珩, 王 欣. 基于双目视觉的基坑位移监测方案[J]. 计算机工程与设计, 2015, **36**(1): 273-276. (SUN Maoheng, WANG Xin. Excavation displacement monitoring scheme based on binocular vision[J]. Computer Engineering and Design, 2015, **36**(1): 273-276. (in Chinese))
- [12] 李丽萍, 郑 晖. 基于双目立体视觉的隧道围岩形变监测系统[J]. 物联网技术, 2021, **11**(3): 22-23. (LI Liping, ZHENG Xuan. Tunnel surrounding rock deformation monitoring system based on binocular stereo vision[J]. Internet of Things Technologies, 2021, **11**(3): 22-23. (in Chinese))
- [13] HE L, TAN J, HU Q, et al. Non-contact measurement of the surface displacement of a slope based on a smart binocular vision system[J]. Sensors (Basel), 2018, **18**(9): E2890.
- [14] HU Q, FENG Z, HE L, et al. Accuracy improvement of binocular vision measurement system for slope deformation monitoring[J]. Sensors, 2020, **20**(7): 1994.
- [15] 郑健龙, 周驰晴, 张军辉. 双层地基一维固结特性研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2012, **9**(1): 1-11. (ZHENG Jianlong, ZHOU Chiqing, ZHANG Junhui. Summary of 1-D consolidation characteristics of double-layered ground[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2012, **9**(1): 1-11. (in Chinese))
- [16] 张 冲, 刘 钢, 赵明志, 等. 成宜高速某浅层软土上路堤填筑的稳定性分析[J]. 中外公路, 2021, **41**(2): 19-25. (ZHANG Chong, LIU Gang, ZHAO Mingzhi, et al. Stability analysis of embankment filling on a shallow soft soil of Chengyi Expressway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, **41**(2): 19-25. (in Chinese))
- [17] ABIODUN O I, JANTAN A, OMOLARA A E, et al. Comprehensive review of artificial neural network applications to pattern recognition[J]. IEEE ACCESS, 2019, **7**: 158820-158846.
- [18] ZHANG Q, ZHU Y, MA R, et al. Prediction method of TBM

- tunneling parameters based on PSO-BI-LSTM model[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, **10**: 854807.
- [19] 潘秋景, 吴洪涛, 张子龙, 等. 基于多域物理信息神经网络的复合地层隧道掘进地表沉降预测[J]. *岩土力学*, 2024, **45**(2): 539-551. (PAN Qiujing, WU Hongtao, ZHANG Zilong, et al. Prediction of tunneling-induced ground surface settlement within composite strata using multi-physics-informed neural network[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, **45**(2): 539-551. (in Chinese))
- [20] 周中, 张俊杰, 丁昊晖, 等. 基于 GA-Bi-LSTM 的盾构隧道下穿既有隧道沉降预测模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, **42**(1): 224-234. (ZHOU Zhong, ZHANG Junjie, DING Haohui, et al. Settlement prediction model of shield tunnel under-crossing existing tunnel based on GA-Bi-LSTM[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, **42**(1): 224-234. (in Chinese))
- [21] 林东, 郑俊杰, 薛鹏鹏, 等. 基于贝叶斯方法的软土深基坑不确定性位移反演分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, **46**(3): 52-60. (LIN Dong, ZHENG Junjie, XUE Pengpeng, et al. Probabilistic method for displacement back analysis of deep excavations in soft soil based on Bayesian method[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, **46**(3): 52-60. (in Chinese))
- [22] 王长虹, 吴昭欣, 王昆, 等. CPTU 数据校准上海深层软土参数的随机力学-贝叶斯方法[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(1): 75-84. (WANG Changhong, WU Zhaoxin, WANG Kun, et al. Stochastic mechanics-based Bayesian method for calibrating geotechnical parameters of Shanghai deep soft clay using CPTU data[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(1): 75-84. (in Chinese))
- [23] VARDAKOS S, GUTIERREZ M, XIA C C. Parameter identification in numerical modeling of tunneling using the differential evolution genetic algorithm (DEGA)[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, **28**: 109-123.
- [24] 戴斌, 胡耘, 王惠生. 上海地区相邻基坑同步开挖影响分析与实践[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(增刊 2): 129-132. (DAI Bin, HU Yun, WANG Huisheng. Analysis and practice of influence of synchronous excavation of adjacent foundation pits in Shanghai Area[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(S2): 129-132. (in Chinese))
- [25] 唐洪祥, 崔家铭, 张雪, 等. 岩土体大变形分析的 Cosserat-粒子有限元法[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(3): 495-502. (TANG Hongxiang, CUI Jiaming, ZHANG Xue, et al. Cosserat-particle finite element method for large deformation analysis of rock and soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(3): 495-502. (in Chinese))
- [26] 王辉, 陈卫忠, 陈培帅, 等. 浅埋大跨小净距隧道断面形态及合理间距的优化研究[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(增刊 2): 641-646. (WANG Hui, CHEN Weizhong, CHEN Peishuai, et al. Study of section morphology and reasonable distance optimization of large-span twin tunnels with small clear spacing in shallow rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(S2): 641-646. (in Chinese))
- [27] TAO F, MA X, HU T, et al. Research on digital twin standard system[J]. *Computer Intergraded Manufacturing Systems*, 2019, **25**(10), 2405-2418.
- [28] GRIEVES M, VICKERS J. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [29] CHENG X, WANG C, LIANG F Y, et al. A preliminary investigation on enabling digital twin technology for operations and maintenance of urban underground infrastructure[J]. *AI in Civil Engineering*, 2024, **3**(1): 4.
- [30] 陈健, 盛谦, 陈国良, 等. 岩土工程数字孪生技术研究进展[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, **50**(8): 79-88. (CHEN Jian, SHENG Qian, CHEN Guoliang, et al. Research progress in digital twin technology for geotechnical engineering[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, **50**(8): 79-88. (in Chinese))
- [31] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(6): 1081-1090. (HE Manchao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(6): 1081-1090. (in Chinese))
- [32] 张斌, 冯其波, 杨婧, 等. 路基沉降远程自动监测系统的研发[J]. *中国铁道科学*, 2012, **33**(1): 139-144. (ZHANG Bin, FENG Qibo, YANG Jing, et al. Development of remote automatic monitoring system for subgrade settlement[J]. *China Railway Science*, 2012, **33**(1): 139-144. (in Chinese))
- [33] 邬凯, 盛谦, 张勇慧, 等. 山区公路路基边坡地质灾害远程监测预报系统开发及应用[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(11): 3683-3687. (WU Kai, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Development of real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters at subgrade slopes of mountainous highways and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(11): 3683-3687. (in Chinese))