

DOI: 10.11779/CJGE202212001

# 智能岩土工程初探

陈湘生<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 洪成雨<sup>\*1, 2, 3, 4</sup>, 苏栋<sup>1, 2, 3, 4</sup>

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 深圳市地铁地下车站绿色高效智能建造重点实验室(深圳大学), 广东 深圳 518060;  
3. 深圳大学未来地下城市研究院, 广东 深圳 518060; 4. 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室(深圳大学), 广东 深圳 518060)

**摘要:** 以物联网、现代通讯、大数据、人工智能等技术为核心的第四次工业革命成为了众多研究领域智能化升级的平台, 新时代条件下传统岩土工程研究遇到了前所未有的机遇和挑战, 岩土工程与最新的信息技术、计算机科学技术相互融合, 如建筑信息模型、物联网、人工智能、深度学习、增强现实等可实现岩土工程的智能化转型。研究初步构建了“智能岩土工程”的知识图谱, 探索了相应的实现路径, 阐述了基于新技术的三维地质建模-物联网-深度学习-扩展现实的岩土工程智能化转型方法; 介绍了建筑信息模型(BIM)与地理信息系统(GIS)一体化的三维地质建模、“端-边-云-网”的技术架构、以主动伺服加载系统为代表的岩土工程(深基坑工程)风险主动控制系统; 阐明了物联网传感器技术在岩土工程领域的应用情况、虚拟现实与增强现实技术在岩土工程领域的应用现状; 分析了人工智能(深度学习)在岩土工程风险预测预警方面的关键作用; 构建了未来智能岩土工程的知识图谱, 为拟从事智能岩土工程相关的人员提供借鉴。

**关键词:** 智能岩土工程; 三维地质建模; 物联网; 人工智能; 深度学习; 扩展现实

**中图分类号:** TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)12-2151-09

**作者简介:** 陈湘生(1956—), 湖南湘潭人, 博士, 教授, 中国工程院院士, 主要从事隧道与地下工程、城市轨道交通工程、智能岩土工程、特殊岩土工程、人工冻土力学、建井工程等研究工作。E-mail: xschen@szu.edu.cn。

## Intelligent geotechnical engineering

CHEN Xiang-sheng<sup>1, 2, 3, 4</sup>, HONG Cheng-yu<sup>1, 2, 3, 4</sup>, SU Dong<sup>1, 2, 3, 4</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Shenzhen Key Laboratory of Green, Efficient and Intelligent Construction of Underground Metro Station, Shenzhen 518060, China; 3. Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 4. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities (Shenzhen University), MOE, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The fourth industrial revolution based on the core technologies of Internet of Things (IoT), modern communication, big data and artificial intelligence (AI) is an upgrading platform for many different research fields. The traditional geotechnical engineering has great opportunities and grand challenges in this new era. Integration of the geotechnical engineering, innovative information technology and computer science technology such as building information modelling (BIM), IoT, AI, deep learning and argument reality can be used to realize intelligent transformation of the traditional geotechnical engineering. The knowledge mapping of the intelligent geotechnical engineering is preliminarily established, and the relevant realization paths are investigated. The transformation method for the intelligent geotechnical engineering “3D geological modelling-IoT-deep learning-extended reality” based on the innovative technologies is depicted. 3D geological modelling using the fusion of BIM and the geographic information system, the technological frame of “end-edge-cloud-network” and the active risk control for geotechnical engineering (deep excavation engineering) based on the active servo-loading system are introduced. The application status of the IoT sensing technology visual reality and argument reality in the geotechnical engineering is introduced. The key role of AI (deep learning) in the geotechnical engineering for monitoring and early warning is analyzed. The knowledge mapping of future development of the intelligent geotechnical engineering is proposed, providing advice and guidance for the relevant researchers in the geotechnical engineering.

**Key words:** intelligent geotechnical engineering; 3D geological modelling; Internet of Things; artificial intelligence; deep learning; extended reality

## 0 引言

岩土工程的智能化转型涵盖了多个不同的领域,

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(52090084); 国家自然科学基金重点基金项目(51938008)

**收稿日期:** 2021-09-22

**\*通信作者** (E-mail: cyhong@szu.edu.cn)

如规划、设计、施工与运维，每一个领域又可细分为多个研究分支，每一个领域均可与智能新技术相互融合。基于 BIM 的地下空间三维地质信息建模使规划与设计人员详细的了解地质信息，如不良地质情况、土层的三维空间分布特征、不同空间位置的土体力学性能差异等，以方便指导规划、设计与施工工作<sup>[1]</sup>。地下空间的施工装备盾构机与 IoT、人工智能、5G、云计算等技术相互融合，使具备多功能化与智能化特征的隧道掘进机得到发展与推广<sup>[2]</sup>，多种辅助装备与智能技术的结合可实现少人化、无人化施工，如大坝碾压装备的无人化改造并进行了现场应用<sup>[3]</sup>。物联网传感、大数据与人工智能的结合可用于岩土工程的风险感知与预测，使大型岩土工程如隧道、地下枢纽等具有数字化特征，同时兼具透彻感知、全面互联、深度整合、智能服务的优势<sup>[4]</sup>，深度学习与基坑工程、边坡工程等场景融合使工程风险的预测预警更具前瞻性和准确性<sup>[5]</sup>。虚拟现实（visual reality, VR）与增强现实（argument reality, AR）技术也开始在岩土工程领域进行应用推广，如地下空间的场景再现、岩土工程施工人员的技术培训、风险防控教育、地下空间相关设备的控制等<sup>[6-7]</sup>。总之，岩土工程与新技术、新领域的相互融合使得未来的相关研究更具先进性、自动化、智能化的特征，是传统岩土工程智能化转型的关键。

本文基于大量的文献检索，构建了“透明地质-物联网-人工智能-数字孪生-主动控制”的智能岩土工程知识图谱，进行了智能岩土工程实践路径的探索，具体路径包括基于岩土工程勘察、BIM+GIS 一体化的透明三维地质、物联网传感器技术、以“端-边-云-网”为核心的信息传输架构、人工智能深度学习的预测预警、融合扩展现实技术的岩土工程数字孪生。

## 1 岩土工程的智能化转型

岩土工程的主要研究对象包括地基与基础、边坡和地下工程等问题，涉及的相关学科包括工程地质学、土力学、岩石力学等，相关的工作内容涵盖了岩土工程勘察、设计、监测、检测等方面。本部分研究以岩土工程测试技术为主，探索了实现智能化岩土工程涉及到的先进原位试验、现场监测、物联网、大数据、人工智能、数字孪生等技术。本研究检索了近五年 155 篇岩土工程相关的文献，选取的关键词包括岩土工程、BIM (building information modeling)、AI (artificial intelligence)、云计算、物联网等先进技术和方法，使用 VOSviewer 获得了文献关键词关系的知识图谱，如图 1 所示。根据关键词共同出现的情况，该网络由 5 个主要的簇（彩色区域）、42 个项目（关键词）和 89

个链接组成。连接两个项目的曲线宽度与两个项目之间的接近程度成正比<sup>[8]</sup>。5 个簇集群分别以“监测”、“物联网”“地质”“人工智能”“BIM”为核心关键词。“岩土工程”“人工智能”“3D 建模”是出现频率最高的关键词。岩土工程相关的关键词如“土体”“地质”“岩石力学”等与“神经网络”“深度学习”“预测”等联系非常紧密，主要由于深度学习算法是岩土工程风险预测的重要手段之一。“AI 人工智能”是出现频率较高的关键词之一，与“神经网络”“预测”“土体”、“岩土工程”相关性最高。“监测”与“物联网”“可视化”等关联性最高，物联网传感技术与人工智能常用于岩土工程的风险监测与预警<sup>[9]</sup>。综上所述，新型的智能技术如物联网、人工智能、BIM、VR、AR 等与岩土工程的融合利于实现智能化转型。

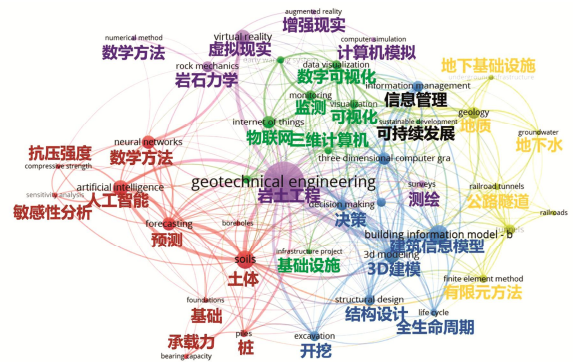


图 1 智能岩土工程关键词关联性分析

Fig. 1 Mapping analysis of co-occurrence of keywords related to intelligent geotechnical engineering

## 2 基于岩土勘察+BIM+GIS 一体化的透明三维地质

根据建设工程项目的要求，岩土工程勘察（可行性勘察、初勘、详勘）可查明、分析、评价项目场地的工程地质、环境特征、岩土工程条件等情况。依据现场原位测试技术（如十字板剪切、静力触探试验、动力触探试验、静载试验、旁压试验、波速测试及其他现场试验等）可相对准确的获取现场土体的力学性能参数，获得的如土体分层、地下水位、不良地质体、土体力学性质等参数可作为数据基础，结合 BIM 用于构建的三维地质模型与 GIS 相互结合，可以大大促进地质数据呈现、分析和维护，目前已经广泛用于项目的规划、设计、施工与运维等阶段。现场工程勘察阶段的大量的钻孔获取地质信息导入到 BIM 软件，创建土层及界面的三维几何结构，可以较高的精度进行土层信息的检索与管理<sup>[10]</sup>。BIM 作为关键的数字化技术也常用于岩土工程的安全风险分析与管理<sup>[11]</sup>，如基于

4D-BIM 进行地下隧道线路的设计, 利用 BIM 对三维地质信息与隧道结构进行建模, 将隧道施工的时间维度进行模拟(如开挖、支撑等), 并与有限元分析同步分析隧道工程的安全风险<sup>[12]</sup>。

### 3 岩土工程智能感知技术

岩土工程监测传感器涵盖多种不同类型, 涉及土体与结构的监测、检测参数, 如位移、压力、液位、振动、温度等。按照传感器的原理可分为电阻、电感、电容、磁电感应、压力、加速度、超声波、微波等。岩土工程监测日趋智能化、自动化, 物联网是实现岩土工程智能化监测的关键技术之一, 主要包括感知层、应用层、平台层, 其中感知层包括各种类型的传感传统, 如以电信号的常规传感器(电阻应变片、应力计、位移计等), 或以采集频率为主的应力计、应变计、压力计、位移计等传感器, 在恶劣的工程环境条件下(如温度急剧变化、潮湿、腐蚀), 常规传感器往往由于材料、原理、封装的技术缺陷导致耐久性相对较差。近些年, 新型传感技术得到蓬勃的发展, 本部分阐述了以光纤传感、微机电系统、计算机视觉、激光雷达等技术岩土工程监测领域的应用进展。

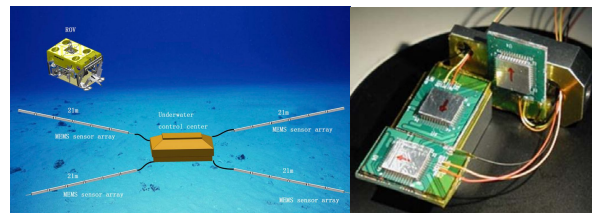
#### 3.1 光纤传感器

随着光电技术的发展, 光学传感器因其独有的优势越来越被广大科研与工程企业认可, 光纤传感器作为重要的监测元件大量应用于岩土工程监测。光纤传感器根据其元件的测量特征可分为准分布式光纤传感器、全分布式光纤传感器。准分布式传感器(点式传感器)主要以布拉格光纤光栅传感器<sup>[13]</sup>、法布里-珀罗传感器等为主, 主要用于监测每一个局部点位的力学参数变化, 而全分布式光纤传感器主要以布里渊反射技术为核心, 涉及的光纤传感器包括光频域反射计、布里渊光时域反射、布里渊光时域分析、布里渊光频域分析等<sup>[14]</sup>。全分布式光纤传感器主要用于监测岩土体散点或连续空间的力学性能参数, 如土体位移、边坡、土工格栅、桩体、地连墙、地下温度场等。光纤传感器的主要优势包括高精度、多路复用、连续空间的测量、尺寸小、重量轻、耐久性好、抗电磁干扰、耐高温、耐腐蚀环境、传输距离远。缺点包括传感器相对脆弱、对工作环境的清洁度要求较高等<sup>[15-16]</sup>。

#### 3.2 微机电系统传感技术

微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术由微电子技术发展而来, 是由尺寸达到几毫米的微小传感装置组成的一个独立智能传感系统, 可用于测量倾角、压力、加速度、温湿度等参数

变化。MEMS 传感器的主要优势包括无线传输、远程采集、低成本、低功耗、可实时等优点<sup>[17]</sup>。该类型传感器主要用于测量边坡深部位移(如倾斜仪、引伸仪)、土体沉降变化、隧道变形等, 由不同的 MEMS 传感器节点组成的早期预警系统可对潜在的岩土稳定性风险如边坡滑坡、基坑失稳破坏等进行监测预警<sup>[18]</sup>, 典型的传感系统如图 2 所示的岩土监测 MEMS 传感器, 传感器件均具有无线、微型化的特征, 方便岩土工程现场的埋设, 在室内试验的应用可大大减小尺寸效应问题, 利于获得精准的监测结果。



(a) 监测土体内部倾斜

(b) 监测土体沉降

图 2 岩土监测 MEMS 传感器<sup>[19-20]</sup>

Fig. 2 MEMS sensors for geotechnical monitoring

#### 3.3 计算机视觉技术

计算机视觉技术是跨学科领域的技术, 主要利用提取的图片和视频等信息, 进行关键监测参数的分析。计算机视觉技术的核心是指利用计算机模拟人类的视觉功能, 可以感受视觉环境的能力, 相关技术主要包括图像处理、人工智能和模式识别<sup>[12]</sup>。



图 3 隧道图像测量设备<sup>[21]</sup>

Fig. 3 Measurement devices for tunnel topography

研究发现利用计算机视觉传感器记录和捕捉混凝土结构的信息(如管片等), 分析结构的变形, 最高精度可达 0.04~0.06 mm。需要注意的是, 基于机器视觉进行结构的三维测量需要对二维的图形信息进行校准、校正和三维重投影<sup>[22]</sup>。同时, 计算机视觉也可用于一些特殊岩土工程的试验, 如计算机视觉技术用于离心试验中岩土体的位移、旋转、应变场分析<sup>[23]</sup>。如图 3 所示的典型隧道图像监测系统<sup>[21]</sup>, 基于三维数字

图像技术进行隧道结构的变形监测,研究发现,对于14 m内直径的隧道变形测量精度可达10 mm,且扫描时间控制在30 s以内,成为高效的监测装备,这些图像设备的成本相对可控,利于在不同应用场景的推广。

### 3.4 激光雷达技术

激光雷达技术是遥感技术的一种,主要用于地面测绘领域,具有精度高、覆盖广、效率高的优点。地面三维激光扫描系统(terrestrial laser scanning, TSL)也被称为LiDAR,文献检索发现LiDAR广泛的应用于不同场景的岩土工程监测,如用于评估土体表面的粗糙程度、位移变化、施工、扰动情况<sup>[24]</sup>,滑坡或崩塌位移的预测预警分析研究<sup>[25]</sup>、融合计算机建模与地面三维激光扫描系统的土石坝变形监测<sup>[26]</sup>、高速公路挡土墙的位移监测分析<sup>[27]</sup>等。如图4所示的沿激光扫描仪视线拍摄的地面混合像素横截面,用于分析地表的粗糙度情况,该种技术具有信息丰富、相对精度较高的特征。

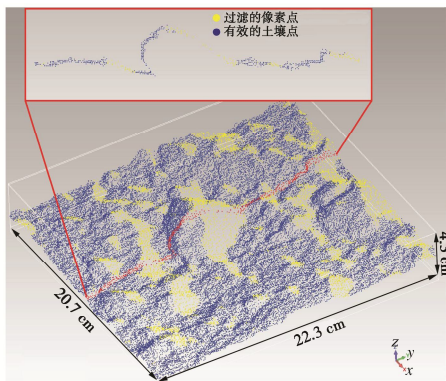


图4 沿激光扫描仪视线拍摄的地面混合像素横截面<sup>[24]</sup>

Fig. 4 Example of automatically-detected mixed pixels in a single scan station

LiDAR最广泛的应用场景之一是隧道的结构监测,通常的方法是获取隧道的点云图像,计算隧道结构的相对变形,如隧道的沉降、管片错动、横截面收敛等。如图5所示为针对上海长江西路隧道获取的点云图用于三维建模,以反映隧道结构的长期变形情况。地面三维激光扫描系统也可用于隧道管片的检测研究,基于自主研发的算法进行点云的预处理,通过隧道轴向、横向的坐标变换,进行隧道管片的变形监测与结构检测(如裂缝发生与伸展情况)研究<sup>[28]</sup>。然而,三维激光扫描设备昂贵的价格也限制了在工程上的推广使用。

### 3.5 其他感知技术

对特殊条件下的岩土工程安全监测与检测需求(如深部土体的探测,大坝、矿井、边坡等大型岩土

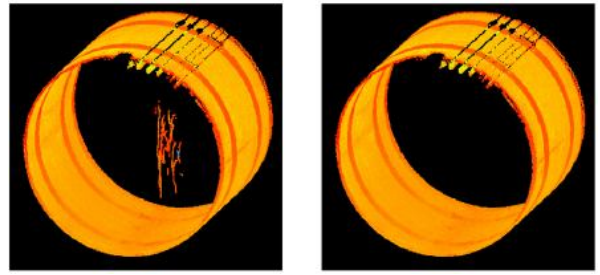


图5 激光扫描仪获取的隧道点云图与处理方法<sup>[28]</sup>

Fig. 5 Obtained point cloud of a tunnel

结构的大尺度监测),研究人员研发了一系列特殊的感知系统,如融合5G、GIS、北斗卫星技术等的大型岩土体或结构表面监测<sup>[29]</sup>,分布式光纤振动探测系统的感知地下深部空间微振动信息<sup>[30]</sup>,针对矿井的复杂无线传感网络监测系统<sup>[31]</sup>等。这些监测技术的进步,使复杂的岩土工程问题可以得到更加深入的感知与了解。未来的物联网传感器应具备优良的耐久性、微型化、无线、低功耗、易组网、泛在感知、自动化、智能识别等特征,当前石墨烯技术不乏为具有发展潜力的传感器,石墨烯传感器作为碳基传感器是能够感知物理力学信息、化学信息、生物信息的综合性泛在感知传感器,近年来随着石墨烯产业化的不断发展,其作为岩土工程安全监测的传感技术具有良好的发展前景<sup>[32]</sup>。

## 4 “端-边-云-网”技术架构

下一代地下建筑技术的特点是基于物联网(IoT)的传感器和终端(end)、边缘计算(edge)、云计算(cloud)和4G、5G等无线传输网络(network)的融合技术<sup>[33]</sup>,简称“端-边-云-网”技术架构。未来的岩土工程大型工程装备如隧道掘进机(TBM)等典型地下施工机械将更加自动化和智能化,基于TBM监测信息可以使用端-边-云-网技术快速收集信息和有效的信息融合<sup>[34]</sup>。使用高效可靠的物联网传感器(如微机电系统)监测多参数信息,包括施工活动、地下扰动、地面运动、水位变化和潜在的多源工程灾害,这些物联网传感器具有低功耗、低成本、无线、自供电。物联网传感器采集的大量监测信息揭示了施工过程中对周围土体和支撑系统的影响<sup>[35]</sup>。未来的信息传输以无线通讯为主,然而大量监测数据、照片和视频给容量有限的互联网和中央云计算平台带来了巨大的传输和计算负担,第五代(5G)无线通讯技术(及未来的6G通讯)是海量信息传输的有效解决方案,可大大提高数据传输效率<sup>[36]</sup>。未来云计算平台将被分散,以分布式边缘计算取而代之,减少计算信息的延迟问题<sup>[37]</sup>。

## 5 数值模拟与人工智能预测预警

融合计算机与有限元软件可开展岩土工程数值模拟分析研究,如荷兰 PLAXIS B.V.公司推出的 PLAXIS 2D/3D 适用于二维与三维岩土工程数值分析、美国 Itasca 公司开发的 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 软件、美国达索公司开发的 ABAQUS 软件均可广泛的用于分析复杂岩土体问题等,这些具有不同特点的有限元软件为岩土工程深入与系统性的数值分析提供了丰富的研究手段<sup>[38]</sup>。人工智能包括机器学习、计算机视觉、机器人等可模仿人类的智慧思维,主要用于解决岩土工程领域的复杂科学问题。岩土工程领域大量采用机器学习算法进行关键岩土参数的预测预警、安全分析研究。深度学习框架通常以人工神经网络(ANN, artificial neural network)为基础,用于模式识别、图像处理和信息压缩(如裂缝识别)<sup>[39]</sup>。ANN 主要包括输入层、中间层、目标层,特别适用于当输入层与目标层为非线性条件下的数据预测。ANN 最常用的领域为隧道开挖(或注浆)引起的沉降问题,如预测土体沉降变化趋势及风险<sup>[40-42]</sup>。由于岩土失稳破坏事故常具有突然性,当前的研究越来越重视预测的实时性并兼顾岩土体与周围建筑结构的安全,如图 6 所示的软件应用程序 SMART 屏幕截图,用于在隧道施工期间通过选择不同的掘进参数进行建筑物损坏的实时评估<sup>[43]</sup>,可广泛用于岩土工程的安全分析。

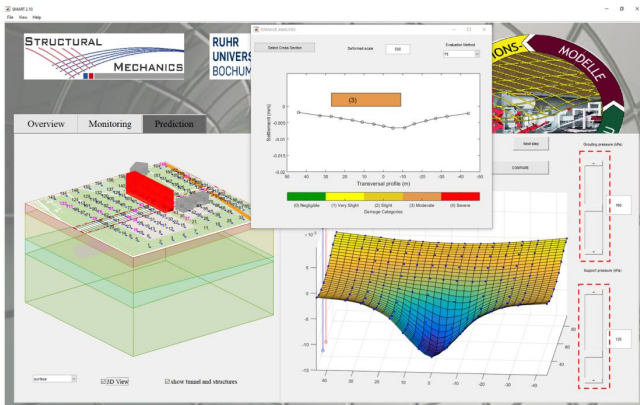


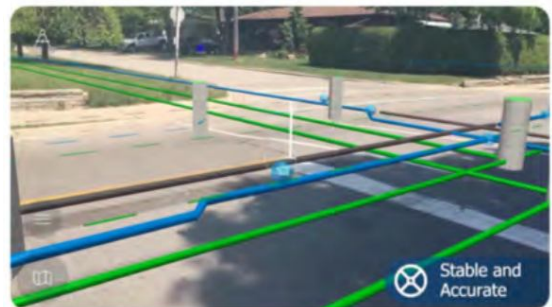
图 6 沉降预测与建筑物损坏评估的软件 SMART<sup>[43]</sup>

Fig. 6 Settlement prediction and building damage assessment-based software SMART<sup>[43]</sup>

## 6 融合扩展现实技术的数字孪生

扩展现实(extended reality, 简称 XR)是利用计算机技术与可穿戴型设备,充分的将实境、虚拟环境、人机互动设备相互融合,构建完全真实到完全虚拟的现实-虚拟互动系统<sup>[6]</sup>。地下空间基础设施的虚实融合有利于工程师进行高效的工程规划、设计、施工与未

来的运维管理,基于 BIM、GIS、虚拟现实(VR, visual reality)和增强现实(AR, argument reality)的融合技术可用于辅助地下工程的施工与运维管理。VR 是基于计算机建模和仿真技术通过虚拟现实、耳机、多投影等创建虚拟的基础设施世界,在岩土工程基础设施应用中,虚拟现实将地下空间信息呈现在统一的视觉环境中供人们体验<sup>[44]</sup>。VR 技术也常用于施工人员的安全培训和教育,以提升他们对危险情况的应对能力<sup>[45-46]</sup>。AR 技术可将 BIM、数字元素与智能手机等设备终端的实时视图相互融合,供规划、设计、施工、管理人员使用<sup>[47]</sup>,如图 7 所示的微软 vGIS 产品和 Trimble Site Vision 产品在现场的应用截图,有效的对地下线路进行了精准定位<sup>[48]</sup>。目前,融合大规模的三维地质信息、地下基础设施、系统的可视化和集成仍然有限。BIM、物联网、传感器、VR 和 AR 等技术与岩土工程开发相互融合是未来的发展大趋势,通过提供创新的体验技术使研究人员能够感受到岩土工程现场丰富信息,如材料、结构、色彩、采光、压力、温度、湿度等等,以达到身临其境的效果。



(a) 微软 vGIS



(b) Trimble Site Vision

图 7 微软 vGIS 与 Trimble Site Vision 屏幕截图<sup>[48]</sup>

Fig. 7 Screens of vGIS from Microsoft company (upper figure) and Trimble Site Vision (lower figure)<sup>[48]</sup>

## 7 岩土工程风险的主动控制

岩土工程失稳事故往往导致巨大的经济损失与人员伤亡,对潜在风险的预测预警与安全控制十分重要。典型的岩土工程围护(支护)结构(如深基坑地下连续墙、内支撑、土钉或锚杆等)是确保岩土工程在施工与运维阶段安全的重要结构体系。大多数传统的岩

土工程围护结构都是被动结构，当土体发生变形时，围护或支护结构受到土体的作用力以反作用力的形式施加在土体上，阻止土体变形的进一步发展以防止事故发生<sup>[49]</sup>。

随着 IoT、人工智能等先进技术与传统岩土工程的融合，研究人员已研发了一些主动的深基坑支护结构体系，如图 8 所示的深基坑主动伺服加载系统，主要包括钢支撑体系、液压加载系统、控制中心、长度可调的连接体系等，使诸如深基坑支护结构系统可以进行主动的防护<sup>[50-51]</sup>。研究人员研发了主动伺服支撑系统与智能算法进行基坑周围土体变形的控制，实现了基坑风险的主动控制<sup>[52]</sup>。在融合了 BIM、IoT、大数据和 AI 等先进技术与算法后，未来深基坑的围护结构将能够自主监测，与深度学习算法的融合使深基坑能够进行安全风险的预测预警，结合主动伺服支撑体系进行主动加载控制潜在的变形，防止较大的风险发生。因此，岩土工程的风险控制将从被动变为主动，兼具智能化的特征。

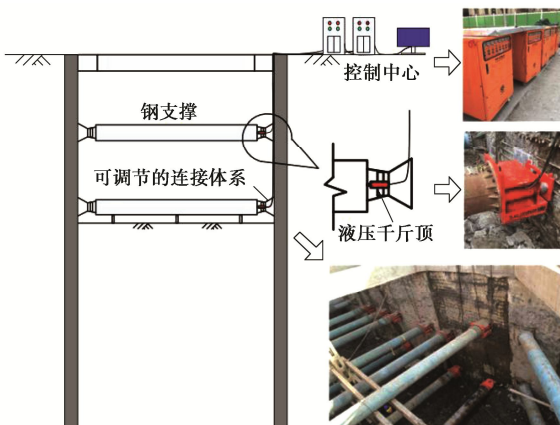


图 8 深基坑主动伺服加载系统工作原理<sup>[50]</sup>

Fig. 8 Operating principle of servo-struts in a deep excavation<sup>[50]</sup>

## 8 智能岩土工程知识图谱

根据以上的研究分析可构建如图 9 所示的智能岩土工程知识图谱，主要涵盖六大领域包括三维地质信息建模（透明地质）、物联网传感器、边-云-网技术架构、人工智能、数字孪生、主动控制。每一个领域涵盖了不同的技术，如原位测试主要包括岩土工程现场原位测试技术方法，十字板剪切（vane shear test, VST）、静力触探试验（cone penetration test, CPT）、动力触探试验（dynamic penetration test, DPT）、静载试验（static loading test, SLT）、旁压试验（pressuremeter test, PMT）等。IoT 传感器除了本研究中介绍的典型传感器外也包括传统传感器等其他的传感技术。信息传输在考虑成本和不同技术优势的基础上可以融合 4G/5G、Zigbee、北斗卫星通讯等作为感知信息的通讯

方法，未来的边缘计算技术极可能以分布式计算云平台代替中心云计算平台。岩土工程与大数据、人工智能的结合主要是以代表性的深度学习算法为主进行岩土参数的预测预警与工程的安全评估。岩土工程安全的主动控制主要体现在以主动伺服加载系统为主的变形控制系统，代表性的研究集中在基坑的变形控制，未来可结合数值模拟、IoT、大数据、人工智能等实现工程的智能化控制。岩土工程的数字孪生主要以 BIM、虚拟现实、增强现实等为关键技术，但也需结合其他技术（如 IoT 传感器、人工智能、GIS 等）进行不同领域的数字乱世研究。综上所述，本研究提出的智能岩土工程的知识图谱以核心的关键技术为主，其中亦不乏技术的交叉融合与互联互通。

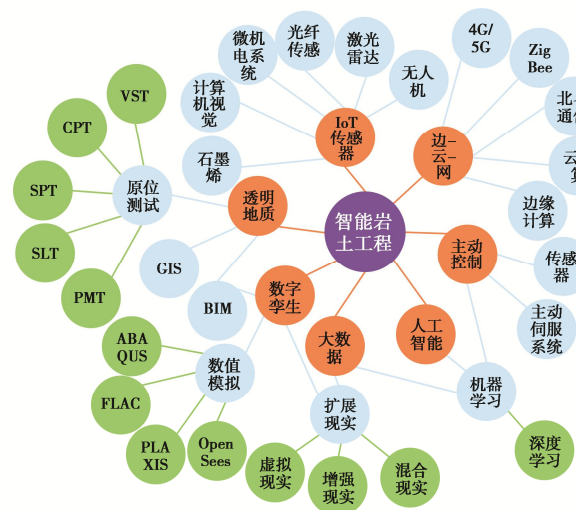


图 9 智能岩土工程框架知识图谱

Fig. 9 Knowledge mapping of intelligent geotechnical engineering

## 9 结 论

本研究提出了“智能岩土工程”的基本框架和实践路径，岩土工程的规划—设计—施工—运维全过程可与第四次工业革命的先进技术相互融合，包括 BIM、GIS、物联网、信息传输（5G）、数值模拟、大数据与深度学习、混合现实技术等，实现岩土工程的智能化转型，得到 5 点结论。

(1) 以 IoT 物联网传感器技术与“端-边-云-网”的岩土工程的智能感知-信息传输技术架构，可服务于智能岩土工程的感知与信息获取。

(2) 以数值模拟、大数据与人工智能（尤其是深度学习方法）为代表的算法是岩土工程风险预测预警的关键方法之一，主要可用于岩土工程施工与运维过程的风险防控。

(3) 融合 VR 与 AR 技术的岩土工程数字孪生可服务于岩土工程的规划、设计、施工、运维全过程，

利用虚拟环境与现实情况的互动可实现现实岩土工程的智能控制。

(4) 以主动伺服加载系统为代表的变形控制系统可以实现岩土工程 (尤其是深基坑控制) 的主动变形控制, 未来与 IoT 传感、深度学习等的融合可以实现深基坑风险控制的主动化和智能化。

(5) 提出了基于“透明地质-物联网-人工智能-数字孪生-主动控制”为技术核心的智能岩土工程知识图谱, 基于该知识图谱利于实现岩土工程的智能化转型。

本研究提出智能岩土工程的理论框架与实践路径是建立在总结 400 余篇中英文相关参考文献得出的基本架构, 因涉及的每一个研究领域的参考文献数量庞大, 研究中只考虑了每一个研究方面的部分典型研究成果, 且只覆盖了相对较新与比较核心的技术, 并未针对所有岩土工程对象详细阐述, 未来每一个岩土工程研究对象均可开展详细的文献检索与关键词分析, 以深入的探索智能岩土工程的理论框架与实践路径。

#### 参考文献:

- [1] 赵艳莉. 基于计算机三维地质模型的岩土工程设计与可视分析——评《岩土工程勘察与设计》[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1381. (ZHAO Yan-li. Based on the design and visual analysis of geotechnical engineering based on computer three-dimensional geological model[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1381. (in Chinese))
- [2] 谭顺辉. 隧道掘进机多功能化及智能化的发展与推广[J]. 隧道建设, 2020, 40(9): 1243 - 1250. (TAN Shun-hui. Development and application of multi-functional and intelligent tunnel boring machine[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(9): 1243 - 1250. (in Chinese))
- [3] 陈祖煜, 赵宇飞, 邹斌, 等. 填筑碾压施工无人驾驶技术的研究与应用[J]. 水利水电技术, 2019, 50(8): 1 - 7. (CHEN Zu-yu, ZHAO Yu-fei, ZOU Bin, et al. Research and application of drive technology of dam filling rolling construction[J]. Water Resources & Hydropower Technology, 2019, 50(8): 1 - 7. (in Chinese))
- [4] 熊自明, 卢浩, 王明洋, 等. 我国大型岩土工程施工安全风险研究进展[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3703 - 3716. (XIONG Zi-ming, LU Hao, WANG Ming-yang, et al. Research progress on safety risk management for large scale geotechnical engineering construction in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3703 - 3716. (in Chinese))
- [5] 戴妙林, 屈佳乐, 刘晓青, 等. 基于 GA-BP 算法的岩质边坡稳定性和加固效应预测模型及其应用研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5): 165 - 171. (DAI Miao-lin, QU Jia-le, LIU Xiao-qing, et al. Study on GA-BP hybrid algorithm-based prediction model and its application to rock slope stability and reinforcement effect[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(5): 165 - 171. (in Chinese))
- [6] ONSEL I E, CHANG O, MYSIORREK J, et al. Applications of mixed and virtual reality techniques in site characterization[C]// 26th Vancouver Geotechnical Society Symp. Vancouver, 2019.
- [7] WANG R X, WANG R, FU P C, et al. Portable interactive visualization of large-scale simulations in geotechnical engineering using Unity3D[J]. Advances in Engineering Software, 2020, 148: 102838.
- [8] VAN ECK N J, WALTMAN L, VOSviewer Manual[M]. Leiden: Univeriteit Leiden, 2011.
- [9] 韩同春, 林博文, 何露, 等. 基于 GIS 与数值模拟软件耦合的三维边坡建模方法及其稳定性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2855 - 2865. (HAN Tong-chun, LIN Bo-wen, HE Lu, et al. Three-dimensional slope modelling method and its stability based on coupled GIS and numerical simulation software[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2855 - 2865. (in Chinese))
- [10] VALERIA N, ROBERTA V, VITTORIA C A. A new frontier of BIM process: geotechnical BIM[C]// Proceedings of the XII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Icelandic Geotechnical Society. Reykjavik, 2019.
- [11] ZOU Y, KIVINIEMI A, JONES S W. A review of risk management through BIM and BIM-related technologies[J]. Safety Science, 2017, 97: 88 - 98.
- [12] FABOZZI S, BIANCARDO S A, VEROPALUMBO R, et al. I-BIM based approach for geotechnical and numerical modelling of a conventional tunnel excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103723.
- [13] HONG C Y, ZHANG Y F, ZHANG M X, et al. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 244: 184 - 197.
- [14] ZHANG C C, SHI B, ZHU H H, et al. Toward distributed fiber-optic sensing of subsurface deformation: a theoretical quantification of ground-borehole-cable interaction[J].

- Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, **125**(3): e2019JB018878.
- [15] ZHANG C C, ZHU H H, CHEN D D, et al. Feasibility study of anchored fiber-optic strain-sensing arrays for monitoring soil deformation beneath model foundation[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, **42**(4): 20170321.
- [16] SHI B, ZHANG D, HONGHU Z, et al. DFOS Applications to Geo-Engineering Monitoring[J]. Photonic Sensors, 2021, **11**(2): 158 - 186.
- [17] CMIELEWSKI B. Use of low-cost MEMS technology in early warning system against landslide threats[J]. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2013: 485 - 490.
- [18] BENNETT V, ABDOUN T, O'MEARA K, et al. Wireless MEMS-based in-place inclinometer-accelerometer array for real-time geotechnical instrumentation[C]//Engineering Geology and Geological Engineering for Sustainable Use of the Earth's Resources, Urbanization and Infrastructure Protection from Geohazards. Springer, 2018.
- [19] KIM J, KWON S, PARK S, et al. A MEMS-based commutation module with vibration sensor for wireless sensor network-based tunnel-blasting monitoring[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, **17**(7): 1644 - 1653.
- [20] XU C Y, CHEN J W, ZHU H C, et al. Design and laboratory testing of a MEMS accelerometer array for subsidence monitoring[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, **89**(8): 085103.
- [21] GAO Z R, LI F J, LIU Y, et al. Tunnel contour detection during construction based on digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, **126**: 105879.
- [22] SALOMA UY E E. Image processing for geotechnical laboratory measurements[J]. International Journal of Geomate, 2016, **10**(22): 1964 - 1970.
- [23] STANIER S A, BLABER J, TAKE W A, et al. Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(5): 727 - 739.
- [24] MILENKOVIĆ M, PFEIFER N, GLIRA P. Applying terrestrial laser scanning for soil surface roughness assessment[J]. Remote Sensing, 2015, **7**(2): 2007 - 2045.
- [25] MAZZANTI P. Displacement monitoring by terrestrial SAR interferometry for geotechnical purposes[J]. Geotechnical News, 2011, **29**(2): 25.
- [26] XU H, LI H B, YANG X G, et al. Integration of terrestrial laser scanning and NURBS modeling for the deformation monitoring of an earth-rock dam[J]. Sensors, 2018, **19**(1): 22.
- [27] OSKOUIE P, BECERIK-GERBER B, SOIBELMAN L. Automated measurement of highway retaining wall displacements using terrestrial laser scanners[J]. Automation in Construction, 2016, **65**: 86 - 101.
- [28] XIE X Y, LU X Z. Development of a 3D modeling algorithm for tunnel deformation monitoring based on terrestrial laser scanning[J]. Underground Space, 2017, **2**(1): 16 - 29.
- [29] LI Z H, FANG L Q, SUN X K, et al. 5G IoT-based geohazard monitoring and early warning system and its application[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2021: 160.
- [30] HUDSON T S, BAIRD A F, KENDALL J M, et al. Distributed Acoustic Sensing (DAS) for natural microseismicity studies: a case study from Antarctica[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, **126**(7): e2020JB021493.
- [31] 江月新, 黄云龙, 余建军. 基于WiFi通信的矿井监测无线传感器网络研究[J]. 煤炭技术, 2017, **36**(6): 278 - 280. (JIANG Yue-xin, HUANG Yun-long, YU Jian-jun. Research on mine monitoring wireless sensor network based on WiFi communication[J]. Coal Technology, 2017, **36**(6): 278 - 280. (in Chinese))
- [32] DONG W K, LI W G, SUN Z H, et al. Intrinsic graphene/cement-based sensors with piezoresistivity and superhydrophobicity capacities for smart concrete infrastructure[J]. Automation in Construction, 2022, **133**: 103983.
- [33] DAI Y Y, ZHANG K, MAHARJAN S, et al. Edge intelligence for energy-efficient computation offloading and resource allocation in 5G beyond[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, **69**(10): 12175 - 12186.
- [34] ARMAGHANI D J, AZIZI A. Empirical, statistical, and intelligent techniques for TBM performance predictionp[J]. Applications of Artificial Intelligence in Tunnelling and Underground Space Technology, Springer, 2021: 17 - 32.
- [35] DING Z, JIN J K, HAN T C. Analysis of the zoning excavation monitoring data of a narrow and deep foundation pit in a soft soil area[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, **15**(4): 1231 - 1241.
- [36] EID A, HESTER J G D, TENTZERIS M M. 5G as a wireless power grid[J]. Scientific Reports, 2021, **11**: 636.
- [37] REN J, ZHANG D Y, HE S W, et al. A survey on end-edge-cloud orchestrated network computing paradigms:



- transparent computing, mobile edge computing, fog computing, and cloudlet[J]. *ACM Computing Surveys*, 2020, **52**(6): 125.
- [38] RAWLINGS C. Geotechnical finite element analysis-a practical guide[C]// *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 2017.
- [39] ZHANG W G, ZHANG R H, WU C Z, et al. State-of-the-art review of soft computing applications in underground excavations[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, **11**(4): 1095 - 1106.
- [40] JAFARI M. System identification of a soil tunnel based on a hybrid artificial neural network-numerical model approach[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2020, **44**(3): 889 - 899.
- [41] HASANPOUR R, ROSTAMI J, SCHMITT J, et al. Prediction of TBM jamming risk in squeezing grounds using Bayesian and artificial neural networks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, **12**(1): 21 - 31.
- [42] CHEN R P, ZHANG P, KANG X, et al. Prediction of maximum surface settlement caused by earth pressure balance (EPB) shield tunneling with ANN methods[J]. *Soils and Foundations*, 2019, **59**(2): 284 - 295.
- [43] CAO B T, OBEL M, FREITAG S, et al. Artificial neural network surrogate modelling for real-time predictions and control of building damage during mechanised tunnelling[J]. *Advances in Engineering Software*, 2020, **149**: 102869.
- [44] QIU H, FANG W, BAO H, et al. A feasibility study of virtual reality technology in guidance design of underground space[C]// *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, 2021.
- [45] CHI H L, KANG S C, WANG X Y. Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction[J]. *Automation in Construction*, 2013, **33**: 116 - 122.
- [46] BERTAM J, MOSKALIAK J. Virtual reality training: making construction work safer[J]. *Computers in Human Behavior*, 2015, **43**: 284 - 292.
- [47] XU J Q, MOREU F. A review of augmented reality applications in civil infrastructure during the 4th industrial revolution[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2021, **7**: 640732.
- [48] HANSEN L H, FLECK P, STRANNER M, et al. Augmented reality for subsurface utility engineering, revisited[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2021, **27**(11): 4119 - 4128.
- [49] 唐德琪, 俞峰, 黄祥国, 等. 开挖诱发坑内既有基桩附加内力的模型试验[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, **53**(8): 1457 - 1466. (TANG De-qi, YU Feng, HUANG Xiang-guo, et al. Chamber tests for investigating additional internal forces in existing foundation piles induced by excavation[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, **53**(8): 1457 - 1466. (in Chinese))
- [50] LI M G, DEMEIJER O, CHEN J J. Effectiveness of servo struts in controlling excavation-induced wall deflection and ground settlement[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(9): 2575 - 2590.
- [51] 赵自强. 深基坑自动伺服系统应用的变形控制分析[C]// 第十五届全国工程物探与岩土工程测试学术大会. 厦门, 2017. (ZHAO Zi-qiang. Deformation control analysis of automatic servo system application in deep foundation pit[C]// *The 15th National Engineering Property Exploration and Geotechnical Engineering Test Academic Conference*. Xiamen, 2017. (in Chinese))
- [52] CHEN B G, YAN T F, SONG D B, et al. Experimental investigations on a deep excavation support system with adjustable strut length[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, **115**: 104046.