

智能技术在岩土工程勘察中的应用

李凯文

武汉科铁人才发展有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要] 岩土工程勘察作为工程项目的基礎工作, 传统的勘察手段存在着工作效率低下、信息零散、人工因素影响严重等问题, 近年来以物联网、机器学习、深度学习以及 BIM-GIS 融合等为代表的新一代信息技术的应用给岩土工程勘察带来了数字变革新机遇。文章围绕智能技术应用于岩土工程勘察中取得的研究成果和发展趋势, 基于智能感知及采集数据、智能数据分析及处理、智能建模与展示、智能辅助决策及评价四个方面提出了相应技术的应用体系。分析表明, 智能传感器及现场检测技术可以对监测量进行实时、不间断测量, 在岩土参数预报方面机器学习算法有很好的准确性, 深度神经网络可用于区分地层界面以及不良地质体; 基于 BIM-GIS 融合技术可以作为三维地质建模的可视环境。文章意在给岩土工程勘察智能化研究提供理论依据和技术支持。

[关键词] 岩土工程勘察; 智能传感; 机器学习

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19525

中图分类号: TU195.1

文献标识码: A

Application of Intelligent Technology in Geotechnical Engineering Survey

LI Kaiwen

Wuhan Kettie Talent Development Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: Geotechnical engineering survey, as the basic work of engineering projects, traditional survey methods have problems such as low work efficiency, scattered information, and serious human factors. In recent years, the application of new generation information technologies represented by the Internet of Things, machine learning, deep learning, and BIM-GIS integration has brought new opportunities for digital transformation to geotechnical engineering survey. The article focuses on the research achievements and development trends of intelligent technology applied in geotechnical engineering exploration. Based on four aspects: intelligent perception and data collection, intelligent data analysis and processing, intelligent modeling and display, and intelligent assisted decision-making and evaluation, the corresponding technology application system is proposed. Analysis shows that intelligent sensors and on-site detection technology can perform real-time and uninterrupted measurements on monitoring data. Machine learning algorithms have good accuracy in predicting geotechnical parameters, and deep neural networks can be used to distinguish geological interfaces and unfavorable geological bodies; Based on BIM-GIS fusion technology, it can serve as a visual environment for 3D geological modeling. The article aims to provide theoretical basis and technical support for the intelligent research of geotechnical engineering exploration.

Keywords: geotechnical engineering investigation; intelligent sensing; machine learning

引言

岩土工程勘察工作是为了掌握场地的工程地质情况从而为设计施工提供参考。传统的勘探方式主要是通过钻孔、现场检测以及实验室分析, 耗时较长、费用较大并且数据较为分散, 无法满足一些复杂的工程项目对精细化方面的要求。以物联网、大数据、人工智能为代表的新型信息技术为岩土工程勘探单纯机械化转变提供了助力。陈湘生院士所率领的科研队伍提出了智能岩土工程知识图谱

的概念并由三维地质建模、物联网、边-云-网结构、人工智能、数字孪生以及主动控制六个部分组成了一个体系结构。本文基于智能感知及数据采集、智能的数据处理及分析、智能建模及可视化、智能决策及评价四个方面对智能工程技术在岩土工程勘察方面的应用现状进行了系统的介绍并希望可以给后续的研究有所启示。

1 岩土工程勘察传统体系与智能化转型

传统的岩土工程勘察步骤是方案规划→野外地质调

查→原位测试（如静态探地雷达、静力触探、标准贯入试验等）→室内试验→数据分析整理报告撰写。其存在的问题有：勘察点布置分散使得地质认知有死角；个人的操作和辨析带有主观因素；数据获取及整理滞后不能及时做出评判。其勘查数据具有多样性、异构性、空间上的关联性以及不确定性的特点，传统的经验公式及统计的方法很难去提炼出其中隐藏的规则。智能化的发展就是用智能传感器代替人为操作，算法模型代替经验推断，三维可视化代替二维图纸，从而提高勘察质量效率。

2 智能感知与数据采集技术

2.1 智能传感与原位测试技术

智能化传感技术为进行勘察数据自动化采集提供了前提条件，在做静力触探实验及标准贯入实验时，旧式的仪器只能存储贯入阻力、击数等很少的一些指标，而新的智能化的传感装置可以连续获取更多的物理信息。有学者把扭矩传感器、轴向力传感器以及转速传感器嵌入到普通的钻孔设备里面，创建了随钻测控系统，通过对钻进过程中所获得的扭矩、推力、转速等信息进行监控来对土质强度做出判断。本文所采用的研究理论基础为：十字板剪切实验已经证实了扭矩和黏性土抗剪强度之间存在着清楚的力学联系，螺杆钻具的结构设计与传统的十字板剪切仪相比也大致相同——螺旋叶片的高度是 200mm，直径为 76mm，与传统的十字板剪切仪的叶片大小也是差不多的。所以此结果可以作为钻进参数对地基土体力学性质进行实时预测的一个依据。

表 1 常用机器学习模型在岩土参数预测中的对比

模型类型	典型应用参数	主要优点	主要局限	数据量要求
多元线性回归	承载力、压缩模量	可解释性强、计算简单	难以捕捉非线性关系	低
随机森林	抗剪强度、含水量	抗过拟合、处理高维数据	可解释性较差	中
XGBoost	不排水抗剪强度	精度高、处理缺失值	参数调优复杂	中
梯度提升	无侧限抗压强度	预测精度最优	训练时间较长	中高
AdaBoost	无侧限抗压强度	集成学习、稳定性好	对异常值敏感	中高
人工神经网络	多参数综合预测	拟合非线性关系强	需大量数据、黑箱	高

由表 1 可知，不同的机器学习算法应用到对岩土参数的预测上，其结果有着较大的区别，其中梯度提升机模型在对地质聚合物稳定黏性土的无侧限抗压强度进行预测上，其训练集的 R 为 0.999，测试集的 R 是 0.980，而

AdaBoost 模型的训练集为 0.999，测试集为 0.975，相比之下，多元线性回归模型的准确率就较低了，测试集只达到了 0.803，也就是说线性模型很难去表示岩石参数以及有关因子间的复杂非线性联系。

2.2 多源数据融合与实时传输机制

多元数据集成是对地质调查数据异质性问题的有效突破。岩土工程地质勘探包含钻孔数据、现场测试数据、室内实验数据、地球物理测量、遥感图像等多种来源类型，其大小、精度、形式均有所区别，在数据集成层面提出了多元数据集成技术和基于坐标系统的统一、尺度转换以及插值算法等对各类型的数据进行了集成处理，使其形成完整的数据集。在数据传送过程中，物联网技术形成了端-边-云三位一体的传送体系。前端智能感知设备采集的数据经无线通信传送到边缘计算单元做预运算后再上传给中央服务器保存并分析。实时传送方式克服了以前调查数据滞后的问题，使在调查过程中可以做出即时的判断。对于深基坑工程而言，通过物联网进行的数据实时传送可以与数字双胞胎相连达到物质层面和虚拟空间的数据同步。

3 智能数据处理与分析方法

3.1 数据清洗、标准化与特征工程

初始采集的数据往往伴随一些异常值以及空值、噪声等影响后期建模的准确性，在进行数据预处理的过程中就需要找出并剔除异常值，常用手段有箱型图法、方差法、聚类等方法。针对空缺数据则可以根据空缺比例选择删除、用均值填充或者通过建立模型进行预测填充等方式。归一化主要是使具有不同度量单位的不同指标在同一水平下比较，常用的有 0-1 归一化、均值-标准差归一化。特征选择是对原始输入特征进行加工得到更好地描述输入特征的特征，可以从钻进参数中得出钻机扭矩的变化趋势，可以从钻孔记录中得出地层序列变化情况的一些统计指标等等。优秀的特征加工可以极大地提高机器学习算法的有效性。

3.2 机器学习在岩土参数预测中的应用

机器学习技术给岩土参数预测提供了一条新思路。传统的参数求解需要进行室内实验或者利用经验公式等手段，耗时耗力耗钱而且不够全面；而机器学习的方法则是通过对已有的数据的学习得到输入变量与预测的目标之间的一种关系来达到对新数据的预测的目的，在土体承载能力预测上就有关于钻进参数建立多元线性回归模型及响应曲面模型两个预测模型的研究。发现响应曲面模型可

以解析出 99.7%的承载力变化情况,并且其均方绝对误差也只有 0.72%,远远超过了多元线性回归模型的 95.6%和 7.87%。扭矩被证明是影响承载能力最大的指标,它和十字板剪切试验扭矩和抗剪强度的力学联系相符,在地质聚合法稳定土无侧限抗压强度预测方面,梯度提升机算法表现最佳,测试集 R 为 0.980,均方根误差为 0.969MPa。输入特征有液限、塑性指数、砂含量、粉煤灰含量、碱激发剂比例等等,可以很好地挖掘出这些变量之间相互作用的关系。

3.3 深度学习用于地层自动划分与识别

深度学习技术的发展使在图象领域中的突破给地层分层带来了新思路。传统的地层分层依靠人工钻孔取芯编录的方法耗时还容易受到人为因素的影响。有学者提出了运用改进的目标检测网络和语义分割网络进行的地层剖面图像识别技术,可以在二维地层剖面图上实现自动检测地层边界。该方法利用了跨阶段局部模块来增强目标检测算法的主要网络,构建了地层边界目标检测模型并且能够达到 0.94 以上的检测结果准确率。然后又在此基础上改进了语义分割网络来获取连续的剖面图像各层之间的像素特征变化流,并预测出未知位置处地层边界的位置。把预测层位图像依次叠加起来便可以建立起三维地质体模型,在模型层面倾角与实测值相差不超过 9%左右,大大减少了一定量的钻孔要求,对于少钻孔条件下建立三维地质模型具有参考意义。

3.4 数据挖掘辅助不佳地质体判别

不良地质体(例如:断裂、破碎带、溶洞等)精确识别对于岩土工程勘测来讲是一项重要的工作。传统的识别方式都是依靠物探结果的目视解析,具有一定的不确定性以及人为性。而利用数据挖掘可以从以前的勘探资料里面挖掘出不良地质体的特点特性,构建自动识别模型。有研究人员基于 TRT 地震波反射层析扫描图像是目标检测的网络训练的方法,根据 TRT 图象中不同波阻抗区的面积大小、占比面积比值、波速升降等参数来进行分析,配合分类器来对不良地质的类型进行自动区分。这种方法把原先需要通过人工经验去解析的图像识别转变为由这些定量标准驱动的自动判别过程,大大提升了识别速度及准确性。

4 智能建模与可视化技术

4.1 基于钻孔数据的自动三维地质建模

三维地质建模是岩土工程勘察成果表示的主要方式。传统的建模方式依靠专业的软件人工进行交互式建模,耗时较长并且无法及时更新模型。基于钻孔信息的自动建模

技术采用插值算法(克里金法、径向基函数法)进行地层界面的构造,然后利用曲面缝合技术形成三维实体模型,来提升复杂地质情况下的建模精确程度一些文献提出了一种结合改进马尔可夫链以及蒙特卡洛随机法的三维工程地质建模框架。此算法结合无人机影像语义分割信息同三维点云数据构建仿真钻孔网格体,在此基础上加入层理走向各向异性距离权重以及倾斜钻孔等效调整措施,在空间上使得沿着层面信息得到强化、跨越层面信息受到抑制,从而达到一种信息约束效应。工程实际应用说明了本文构建的模型与常规工程地质解析结果大体吻合度为 80%左右。

4.2 多源数据融合与模型动态更新

地质模型应当根据勘探工作的进展不断调整^[1]。多源数据融合技术把钻孔、物探、遥感等各种数据综合起来建立同一模型,从而使模型可以包含各种信息之间的相互制约关系。动态更新机制可以让新获取的勘探数据随时加入到模型当中去对原模型中的不确定性进行修正。在深基坑工程数字孪生的研究中,有学者提出了一种考虑不确定性的数字孪生框架,利用物理驱动下的贝叶斯学习方法把现场观察结果同化到三维数值模型里,使模型参数以及预测响应可以即时更新,在短短 6 分 03 秒内就能实现对一共有 108 个观测点的同化运算处理,得到 1000 次不同沉降场的结果,大大加快了模型更新的速度。

4.3 BIM-GIS 集成技术在地质表达中的应用

建筑信息模型与地理信息系统相结合是岩土工程勘查信息化的重要手段。BIM 善于表示建筑物结构的三维几何数据及特征信息;GIS 善于表示广域地理信息及其进行空间分析。两者结合,便能对建筑物结构及所在地质环境进行统一描述^[2]。矿山地质保障系统实例证明了 BIM-GIS 集成可以建立包括地层、断层、勘探钻孔、井下钻孔、工作面、巷道在内的三维一体化的立体模型,有地层分层爆破,场景剖视以及井上井下的对比等可视化效果。输电工程勘查方面,AI 勘测设计系统结合了 GIS 及过往项目的设计资料等相关信息,通过运用强化学习算法对成本、环保等因素进行智能调节得到最优线路走向设计方案。整个勘测设计的过程都实现了自动化,节省了传统设计 70%的时间。

5 智能决策与评价技术

5.1 勘察方案的智能化设计与布点

勘探方案规划设计的关键问题是钻孔个数及钻孔布置位置的选择布置。传统的做法通常是按规程规定或者结合工程建设经验来定,缺少对钻孔个数进行量化计算的依

据,智能化方法是以地质模型不确定度最小或是信息熵最大为目标,通过优化算法求解出最优布点方案^[3]。常用的有克里金方差序贯采样法、基于信息熵的贝叶斯优化法等,这种方法可以在保证钻孔一定数量的基础上尽可能地提高获取的勘察信息量或者是达到一定的信息精度要求的情况下尽量减少钻孔的数量。

5.2 基于专家系统的岩土风险预评估

岩土工程项目的风险受工程地质条件、工程范围大小以及施工方式、周围环境等诸多方面的制约,存在着较大的不确定性。专家系统式风险评价方法就是把领域专家的经验知识以及经验转化为一定形式的规则库和推理机,来辅助工程师的风险辨识及风险级别判断。某研究提出了将专家咨询结合模糊集合的风险管理方法,在此基础上提出了一种可解释的风险管理方案,用模糊分布来描述专家对风险的影响大小及发生的可能性而不是一个固定等级,可以更好地表示出不确定性的不确定性大小。比较单一风险源和多个风险源同时作用下的不同场景下,多个风险源同时出现的概率明显高于单个风险源独立作用的情况,传统的评价方式对各个风险源分别进行评价并使用逻辑“或者”的方式进行组合就容易产生低估或者高估的问题。这种方法的新意是把专家的信心分为几个级别来确定影响、概率以及风险的概率分布图,给风险管理提供更多的信息。

6 结语

智能化技术在岩土工程勘察上的运用也由理论研究

进入了实际应用领域,在感知方面,智能化仪器以及现场测量设备可以进行参量动态监测,在分析方面,通过机器学习与深度学习算法大大提高了对参量预报及地层解析的能力,在表示方面,BIM-GIS 融合技术和三维地质建模使勘测结果有了形象化的载体,而在判断方面,智能化优化及专家系统帮助制定勘探计划并进行风险分析。但是智能技术应用于实际工程项目还存在着标准不一致、模型迁移性能不足、难以融入现有的工作模式等问题。今后的研究应注重如下方面:制定统一的勘探数据标准及共享策略、研发更加强健可靠并且能够被理解和接受的 AI 模型算法、让人工智能更好地渗透到整个勘察-设计-施工-运维过程之中、形成涵盖勘探-设计-施工-运维全周期的智能化岩土工程技术体系。

[参考文献]

- [1]谢飞,梁振宁.岩土工程勘察自动智能化技术研究现状[J].工程建设与设计,2023(17):160-163.
- [2]苏泽坤.基于知识图谱的勘察报告智能辅助系统研究[J].智能城市,2025,11(1):96-99.
- [3]杜亚军,王鹏.人工智能在岩土工程勘察领域的应用[J].中国科技信息,2025(15):38-40.

作者简介:李凯文(1989.03—),男,汉族,湖北天门籍贯,工程师,2011年6月毕业于中国地质大学(武汉),环境工程(地学基础)专业,最高本科,现主要工作方向为地质灾害、路基勘察设计。