

人工智能在水利水电工程边坡变形预测中的应用研究

朱桂林

宿迁环境保护投资有限公司 江苏 宿迁 223800

摘要: 水利水电工程中, 边坡变形受地形地貌、地质条件、水文及施工等多因素影响。本文阐述人工智能在水利水电工程边坡变形预测中的应用, 包括机器学习、深度学习及其他相关技术原理, 介绍从数据采集筛选、预处理与特征提取, 到模型构建训练、优化调整的应用流程。简要探讨了技术层面模型融合、多模态数据融合等发展方向, 以及工程应用层面智能化监测、个性化预测等趋势, 为边坡灾害防控提供技术支撑。

关键词: 水利水电工程; 边坡变形预测; 人工智能; 机器学习; 深度学习

引言: 水利水电工程建设中, 边坡稳定性至关重要, 其变形受多种因素影响, 准确预测变形是保障工程安全的关键。传统预测方法存在局限性, 难以应对复杂多变的边坡状况。人工智能凭借强大的数据处理与分析能力, 为边坡变形预测带来新契机。通过机器学习、深度学习等技术, 可挖掘数据与变形的内在联系, 提升预测精准度。研究人工智能在边坡变形预测中的应用, 对保障水利水电工程安全建设与运行意义重大。

1 水利水电工程边坡变形的影响因素

1.1 地形地貌因素

在水利水电工程建设区域, 地形地貌对边坡变形有着不可忽视的影响。地势起伏较大的区域, 边坡的坡度通常较陡, 坡面所承受的重力作用更为显著。陡峭的坡面使得岩土体在重力影响下, 更容易产生沿坡面向下的滑动趋势^[1]。而且, 地形的高低起伏会导致地表水流的方向和速度发生变化, 在坡脚处形成水流冲刷, 长期作用会削弱坡脚的支撑能力, 进而引发边坡失稳变形。此外, 山体的走向也会对边坡稳定性产生影响, 当山体走向与边坡走向一致时, 边坡可能受到山体整体应力状态的影响, 变形风险增加; 而当两者走向不一致时, 边坡可能因应力集中或分散而产生不同的变形特征。

1.2 地质条件因素

地质条件是决定边坡稳定性的内在关键因素。岩土体的类型直接决定了边坡的物理力学性质, 例如, 坚硬完整的岩石边坡通常具有较高的强度和稳定性, 而松散的土体边坡则相对容易发生变形。不同岩土体的抗剪强度指标差异较大, 如花岗岩的抗剪强度指标内摩擦角 φ 一般在 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间; 而砂土的内摩擦角 φ 多在 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间, 黏聚力 c 相对较小, 通常在 $0 \sim 0.05\text{MPa}$ 。岩体中的结构面, 如节理、裂隙、断层等, 会破坏岩体的完整性, 降低岩体的强度。这些结构面为水流的渗透和岩土体的

滑动提供了通道, 当结构面的倾向与边坡坡向一致时, 边坡发生滑动的可能性大大增加。此外, 地质构造运动, 如地壳的升降、褶皱等, 会改变边坡的应力状态, 使边坡产生变形和破坏。

1.3 水文因素

水是影响边坡变形的重要因素之一。降雨会增加边坡岩土体的重量, 增大下滑力, 同时雨水渗入岩土体内部, 会降低岩土体的抗剪强度, 使边坡更容易发生变形。库水位的变化对库岸边坡的影响尤为显著, 库水位上升时, 水对边坡的浮托力增大, 降低了边坡的有效应力; 库水位下降时, 坡体内地下水排出不畅, 形成渗流力, 对边坡产生拖拽作用, 这两种情况都可能导致边坡失稳。地下水在边坡中的渗流也会带走岩土体中的细小颗粒, 导致边坡内部空隙增大, 强度降低, 进而引发变形。

1.4 工程施工因素

水利水电工程建设过程中的施工活动会对边坡的原始应力状态和稳定性造成干扰。开挖边坡会破坏边坡原有的平衡状态, 使边坡岩土体失去部分支撑, 导致应力重新分布, 可能引发边坡的变形和滑动。爆破作业产生的震动波会对边坡岩土体造成损伤, 使岩土体的结构变得松散, 降低其强度和稳定性。填筑工程会增加边坡的荷载, 当填筑高度过大或填筑速度过快时, 边坡可能因无法承受新增荷载而发生变形。此外, 施工过程中的排水措施不当, 导致边坡内部积水, 也会影响边坡的稳定性。

2 用于边坡变形预测的人工智能技术类型及应用原理

2.1 机器学习算法及其应用原理

机器学习算法是边坡变形预测领域应用最为成熟的人工智能技术分支, 以数据驱动为核心导向, 摆脱传统预测方法对复杂数学模型的依赖, 通过对边坡监测历史数据的系统学习, 挖掘数据与边坡变形之间的内在关联的演化规律。支持向量机、随机森林、BP神经网络等均

为该领域常用算法,其应用原理围绕统计学习理论与迭代优化思想展开,通过对输入的边坡监测数据进行特征映射、非线性拟合与参数优化,构建监测指标与变形量之间的量化关系^[2]。算法运行过程中,通过梯度下降算法不断优化模型误差,结合边坡变形的非线性、随机性特征,动态调整模型参数,适配不同地质条件、水文环境下的边坡变形特性,无需预设复杂的物理模型,能够高效处理常规监测数据,为边坡变形预测提供稳定可靠的技术支撑。

2.2 深度学习算法及其应用原理

深度学习算法依托多层神经网络结构,具备更强的深层特征提取与海量数据处理能力,精准适配边坡变形多因素耦合、时序性强、非线性显著的特点,其应用原理聚焦深层特征挖掘与时序规律捕捉,弥补传统机器学习算法在高维数据处理中的不足。卷积神经网络、循环神经网络、长短期记忆网络等是该领域主流算法,依托深度学习框架实现多层神经元的协同运算,通过逐层提取边坡监测数据中的深层特征,捕捉边坡变形的时序演化规律与多因素耦合效应,破解高维监测数据难以建模的技术难题。算法运行时,通过反向传播算法持续修正网络参数,优化模型拟合精度,能够有效处理海量、多维度的边坡监测数据,充分挖掘边坡变形的潜在演化规律,进一步提升预测的精准度与可靠性,适配复杂地质条件下的边坡变形预测需求。

2.3 其他相关人工智能技术及其应用原理

除机器学习与深度学习算法外,多种辅助性人工智能技术逐步融入边坡变形预测体系,依托自身核心优势形成互补效应,完善预测技术体系的全面性与适用性。强化学习技术以试错学习机制为核心,通过与边坡监测环境的动态交互,持续优化预测策略,适配边坡变形过程中的动态变化特性,能够根据监测数据的实时反馈调整预测模型,提升模型的动态适配能力。模糊逻辑技术基于模糊集合理论,专门处理边坡监测数据中的模糊性与不确定性信息,有效规避监测数据误差带来的影响,提升预测模型的鲁棒性。知识图谱技术整合边坡工程地质、监测数据、工程施工等多源信息,构建系统化的信息关联网络,为变形预测提供全面的知识支撑,实现多源信息的深度融合与高效利用。这些技术均基于成熟的人工智能理论与岩土工程实践成果,与核心算法融合应用,进一步拓展边坡变形预测的应用场景,提升预测技术的综合性能。

3 人工智能在边坡变形预测中的应用流程

3.1 数据采集与筛选

数据采集是边坡变形预测的基础环节,直接决定后续预测精度与可靠性。采集工作需基于边坡失稳机理分析,选取能够反映边坡变形状态的关键监测指标,构建全方位、多层级的监测体系。采集过程采用分布式光纤传感(DOFS)、微机电系统(MEMS)传感与无线传感网络(WSN)等成熟技术,搭配无人机航测、近景摄影测量等视觉图像类技术,全面获取边坡深层位移、地表变形、孔隙水压力、裂缝发展及周边环境等多项参数,结合设备合理布设与规范化监测频次,制定完善且标准化的野外采集方案^[3]。筛选工作重点剔除传感器漂移、雷击干扰、通信丢包等因素引发的异常数据,同时对图像数据开展畸变校正与特征匹配校验,排除光照、遮挡等外界干扰产生的无效信息,严格留存符合精度标准、可客观体现边坡实际形变特征的有效数据。同步完成数据完整性核验,清理重复冗余与失效样本,为后续数据预处理、特征挖掘及模型搭建筑牢基础。

3.2 数据预处理与特征提取

采集筛选后的原始数据往往存在噪声、缺失值等问题,无法直接用于模型构建,数据预处理成为衔接数据采集与模型构建的关键环节。预处理工作采用3 σ 准则识别异常值,通过卡尔曼滤波算法进行修正,采用线性或滑动平均插值方法补全缺失数据,运用流式计算技术实现数据快速处理,采用冷热分离策略完成数据存储,全方位提升数据质量。特征提取则结合边坡变形影响因素与人工智能算法特性,从预处理后的数据中挖掘能够表征边坡变形规律的核心特征,包括变形速率、位移变化量、孔隙水压力变化趋势等。通过多层特征提取实现数据降噪与有效信息挖掘,强化特征与边坡变形之间的关联性,为模型构建提供高质量的输入参数,保障后续模型训练的有效性。

3.3 人工智能模型的构建与训练

模型构建需结合边坡变形预测的实际需求,选取适配的人工智能技术类型,包括机器学习与深度学习算法,构建贴合水利水电工程边坡变形特点的预测模型。构建过程中合理设置模型结构参数,引入注意力机制增强模型对时序特征的提取能力,明确模型输入输出参数,确保模型结构与边坡变形数据特征高度匹配。模型训练以预处理后提取的特征数据为基础,选取适量历史监测数据作为训练数据集,采用适应性学习率和正则化技术开展训练,通过反复迭代调整模型参数,让模型充分学习边坡变形的内在规律,逐步提升模型对边坡变形趋势的捕捉能力,确保模型训练过程科学、高效,符合学术研究规范与工程实际需求。

3.4 模型的优化与调整

模型训练完成后需进行针对性优化与调整,弥补训练过程中可能出现的参数偏差与结构不合理等问题,提升模型在边坡变形预测中的适配性与可靠性。优化工作可采用边缘计算技术提升数据处理效率,降低模型运行延迟,通过调整模型正则化参数、学习率等关键指标,减少模型过拟合现象,增强模型泛化能力^[4]。调整工作结合边坡工程实际监测需求,根据不同工况下的监测数据反馈,动态调整模型结构与参数,让模型能够适应不同地质条件、水文环境下的边坡变形预测需求。通过持续优化与调整,确保模型输出的稳定性与精准性,为水利水电工程边坡变形预测提供可靠的技术支撑,助力边坡灾害防控工作有序开展。

4 人工智能在边坡变形预测中的应用发展方向

4.1 技术层面的发展方向

在技术维度,人工智能于边坡变形预测领域有着多元且极具潜力的发展路径。模型融合将成为重要趋势,不同类型人工智能模型各有所长,将机器学习模型与深度学习模型有机结合,能充分发挥各自优势。机器学习模型在处理小规模数据、挖掘简单规律方面表现高效,深度学习模型则擅长处理大规模复杂数据、捕捉深层次特征。二者融合可提升预测模型对不同数据类型和复杂边坡状况的适应性,增强预测准确性与稳定性。多模态数据融合技术也将取得进展。边坡变形受多种因素影响,单一数据源难以全面反映其真实状态。整合地质勘探数据、气象数据、监测传感器数据等多模态信息,借助人工智能强大的数据处理能力,挖掘不同模态数据间的关联与互补性,为边坡变形预测提供更丰富、准确的依据。

4.2 工程应用层面的发展方向

工程应用层面,人工智能在边坡变形预测的应用将更广泛深入。人工智能算法嵌入监测系统,可对海量监

测数据进行实时分析处理,及时发现边坡变形异常并发出预警,提高监测的时效性与精准性。个性化预测方案制定成为可能。不同边坡工程在地质条件、规模、使用功能等方面存在差异,对变形预测的需求也不尽相同^[5]。利用人工智能技术,结合具体工程特点,为每个边坡量身定制预测方案,满足多样化工程需求,提升预测的针对性与实用性。同时,人工智能将与边坡治理工程深度融合。根据预测结果,借助人工智能优化治理方案设计与施工过程,实现边坡治理的智能化、精准化,降低治理成本,提高治理效果,保障边坡长期稳定安全。

结束语

人工智能在水利水电工程边坡变形预测领域已展现出巨大潜力。从技术原理到应用流程,再到未来发展方向,各方面研究不断深入。模型融合、多模态数据融合等技术突破,以及智能化监测、个性化预测等工程应用拓展,将进一步提升边坡变形预测的精准性与可靠性。持续推动人工智能与边坡变形预测的深度融合,能为水利水电工程安全提供更有力的保障,助力行业稳定发展。

参考文献

- [1]高玉峰,王玉杰,张飞,等.边坡工程与堤坝工程研究进展[J].土木工程学报,2024,57(8):97-118.
- [2]杨丕铎.无人机遥感技术在水电工程边坡监测中的应用[J].科海故事博览,2026(2):19-21.
- [3]卢树盛,向能武,孙云志.高边坡勘察新技术在水利工程中的应用现状、挑战与展望[J].中国水利,2024(14):44-50.
- [4]罗布次仁.高边坡勘察新技术在水利工程中的应用现状、挑战与展望[J].建筑工程与设计,2025,4(2):161-163.
- [5]王凤英.高边坡水利工程施工安全风险识别与智能防控技术[J].电脑采购,2025(38):113-115.