

# Research on Intelligent Evaluation and Early Warning Method for Slope Stability of Water Conservancy and Hydropower Projects

Hangchuan Xia

Anhui River to Huaihe River Water Diversion Project Co., Ltd., Hefei, Anhui, 231200, China

## Abstract

With the expansion of China's water conservancy and hydropower projects, slope stability has become a critical factor affecting project safety and sustainable operation. Traditional evaluation methods relying on field experience and limited data struggle to address complex geological conditions and variable environments. Recent advancements in intelligent sensing technologies have driven breakthroughs in smart slope assessment and early warning systems. This paper systematically examines types and causes of slope instability, analyzes limitations of traditional approaches, and proposes intelligent evaluation and dynamic early-warning methods based on multi-source information fusion and machine learning. Case studies reveal that intelligent methods significantly enhance the accuracy of risk identification and timeliness of warnings, providing theoretical and technical references for improving slope safety management and intrinsic safety.

## Keywords

hydraulic and hydroelectric engineering; slope stability; intelligent evaluation; early-warning method; big data; artificial intelligence

# 水利水电工程边坡稳定性智能评价与预警方法研究

夏航川

安徽省引江济淮工程有限责任公司, 中国·安徽 合肥 231200

## 摘要

随着我国水利水电工程规模扩大, 工程边坡稳定性成影响项目安全与可持续运行的关键。传统评价方法依赖现场经验与有限数据, 难应对复杂地质与多变环境。近年, 智能感知等技术融合为边坡智能评价与预警带来突破。本文梳理了边坡失稳类型、成因, 分析传统体系不足, 提出基于多源信息融合、机器学习等的智能化评价与动态预警方法, 并结合典型案例剖析关键环节。研究表明, 智能化手段可提升边坡失稳风险识别准确性与预警及时性, 为边坡安全管理及本质安全提升提供理论与技术参考。

## 关键词

水利水电工程; 边坡稳定性; 智能评价; 预警方法; 大数据; 人工智能

## 1 引言

水利水电工程作为国家基础设施的重要组成部分, 其安全运行对区域经济社会发展和生态环境保护具有重要意义。边坡工程作为水利水电枢纽建设的重要环节, 受复杂地质结构、水文条件及工程扰动等多因素影响, 失稳风险高, 危害极大。随着工程规模的提升和地质环境的复杂化, 传统依赖有限监测点与人工经验的边坡稳定性评价与预警方式, 难以满足现代工程安全管理的需求。近年来, 智能感知、云计算、人工智能等信息技术的快速发展, 使得边坡监测数据量呈爆发式增长, 也为多源信息融合和智能化风险识别提供

了基础条件。智能化评价与预警方法能够实现对边坡稳定性的全时空、多尺度、动态感知与判识, 为工程安全管控模式变革带来新机遇。本文将围绕水利水电工程边坡稳定性, 从失稳机理、评价技术、智能预警与应用实践等方面展开系统研究, 提出适合我国复杂工程环境的智能化安全管理体系。

## 2 水利水电工程边坡失稳机理与风险特征分析

### 2.1 边坡失稳的基本类型及形成机理

水利水电工程边坡失稳主要包括滑坡、崩塌、坡面蠕变及表层流失等类型。滑坡常由地表降雨、库水位变化、工程扰动等因素诱发, 其形成机制涉及岩土体强度下降、应力重分布和渗流场变化等。崩塌多见于节理裂隙发育的岩质边坡, 强降雨或地震扰动易导致岩块失稳、坠落。坡面蠕变表现为坡体在重力和外界扰动下缓慢变形, 累积应变最终导致

【作者简介】夏航川(1998-), 男, 中国安徽芜湖人, 本科, 助理工程师, 从事水利水电工程研究。

失稳。表层流失则主要受降雨冲刷作用影响，易发于覆盖层薄弱或植被稀疏区段。上述各类失稳类型成因复杂，既与地质结构、岩性、地下水、坡度等自然条件密切相关，也与开挖、爆破、排水等工程活动息息相关。多因素叠加、动态演化的边坡失稳过程，决定了风险识别的复杂性和评价判据的多元性。

## 2.2 边坡失稳的诱发因素及风险特征

水利水电工程边坡失稳的诱发因素主要包括自然因素和人为活动。自然因素如强降雨、库水位剧烈波动、地震等极端事件，常导致坡体物理力学性质突变，诱发滑移或崩塌。人为因素主要包括工程开挖、临时堆载、施工爆破、排水不畅等，改变了坡体应力场和水力场，增加失稳概率。风险特征上，水利水电工程边坡往往规模大、地形地质条件复杂、监测难度高，且失稳过程具有隐蔽性、突发性和放大效应。边坡失稳不仅危及工程本体安全，还易引发次生灾害（如堵江、毁路、淤积），带来重大的经济损失与社会影响。因此，精准识别风险、及时预警和科学处置至关重要。

## 2.3 传统评价方法的局限性

传统边坡稳定性评价方法以极限平衡、弹塑性力学分析为主，结合有限的监测数据和岩土工程经验进行安全系数计算与失稳判别。这类方法虽为工程设计与初步风险评估提供基础，但存在多方面局限：一是对复杂地质条件的适应性差，难以处理高度非线性和多源不确定性问题；二是对时变荷载（如降雨、库水位变化）和突发诱因（如地震）的动态响应能力弱；三是监测数据空间覆盖有限，无法实时捕捉大范围、深层次的边坡变形与渗流信息。随着监测技术与数据科学的发展，亟须创新更智能、动态、精准的边坡稳定性评价与预警方法，以应对现代水利水电工程的高风险与高复杂度挑战 [1]。

# 3 边坡稳定性智能感知与多源监测技术体系

## 3.1 多源监测技术的集成应用

现代水利水电工程边坡安全监测逐步实现了从单一手段向多源集成转变。地表形变监测方面，广泛应用 GNSS 高精度定位、全站仪、激光扫描等，实现对边坡三维空间位移与变形的高频监测。深部位移监测采用多点位移计、分布式光纤传感、钻孔应变计等，实时捕捉坡体深层滑移与变形趋势。地下水位及渗流场监测主要依靠自动水位计、渗压计、TDR 水分传感器等设备，实现对坡体含水量和渗流压力的动态追踪。环境气象监测（如降雨、温度、风速等）通过自动气象站、雷达降雨系统，为风险评估和预警提供基础数据支撑。遥感与无人机航空摄影技术的应用，实现了大范围边坡表面异常识别与灾情评估。多源监测体系的集成，为边坡状态全方位、立体化感知提供了条件。

## 3.2 智能感知网络与数据采集平台

智能感知网络作为现代水利水电工程边坡安全管理的

核心基础，依托多类型、高精度传感器节点，通过有线与无线方式实现灵活组网。利用物联网技术，边坡监测系统能够在复杂、广阔的空间范围内，长周期、高频率地采集关键数据，如地表与深部位移、渗流压力、土壤湿度、降雨量和环境温湿度等。无线传感器网络（WSN）与边缘计算的结合，极大提升了数据采集的实时性、稳定性与系统的协同处理能力。智能网关作为数据中转枢纽，具备多协议适配和边缘计算能力，能够在本地对初步采集的数据进行过滤、特征提取与压缩，减少冗余，提升传输效率，减轻后端平台压力。所有监测数据最终汇聚至统一的数据平台，平台内集成有数据清洗、异常检测、可视化展示等功能，实现对大规模、多维数据的集中管理和高效利用，为后续边坡稳定性智能评价和动态预警分析奠定坚实的数据基础 [2]。

## 3.3 监测数据特征分析与信息融合

针对边坡监测中产生的多源、多尺度、时空分布广泛的海量数据，如何高效提取关键特征并实现有效信息融合，是智能稳定性评价的核心。时间序列分析能够揭示监测指标的动态演变规律，空间相关性建模可反映不同监测点之间的耦合与联动关系。统计滤波技术应用于监测数据异常点的剔除与信号平滑，提升后续智能识别的准确性。多源数据融合方法，如贝叶斯融合、模糊集分析和数据驱动集成建模，不仅能够将不同类型和尺度的监测数据进行协同分析，还能提高对边坡变形、渗流和外部环境变化的综合解释能力。基于大数据的智能特征识别算法，能够自动发现边坡早期失稳的微小异常信号，实现对风险演变趋势的动态追踪，为工程管理人员提供科学的风险判断和分级预警依据，大幅提升边坡安全监测的智能化与前瞻性水平。

# 4 边坡稳定性智能评价方法研究

## 4.1 基于机器学习的边坡稳定性评价建模

随着边坡监测数据量和数据维度的不断增加，机器学习技术以其优异的复杂模式识别能力和对非线性关系的深度挖掘优势，逐步在边坡稳定性评价中展现出巨大潜力。典型的机器学习算法如支持向量机（SVM）、决策树、随机森林、极端梯度提升（XGBoost）等，能够在大数据环境下充分利用历史监测数据、地质参数、环境变量等多元信息，自动提取影响边坡稳定性的关键特征。模型训练过程中，算法通过自学习与特征筛选，构建稳定性判别与安全系数预测模型，实现对边坡失稳风险的实时智能判识。与传统极限平衡和弹塑性力学方法相比，机器学习模型更能适应多源、复杂、不确定性强的工程场景，在识别边坡非线性、突变性变化与复杂影响因素方面具有更高的敏感度和精准度，为工程风险管理及智能决策提供坚实技术支撑 [3]。

## 4.2 深度学习与端到端稳定性预测

深度学习技术近年来在工程领域的应用不断拓展，特别是在处理高维、时序和多模态监测数据方面表现出独特优

势。卷积神经网络 (CNN)、循环神经网络 (RNN)、长短时记忆网络 (LSTM) 等深度模型,能够端到端地对原始多源数据进行自动特征提取与融合,无需繁琐的人工特征工程。通过深层结构的建模,深度学习能够捕捉边坡监测数据中的时空异动、非显性异常和多尺度规律,实现对边坡稳定性的精准动态判别。结合无人机遥感图像、激光点云等空间数据,深度网络还能实现对边坡三维结构和空间形态的综合分析,为工程师提供直观、细致的稳定性评估依据。整体上,深度学习推动了边坡稳定性智能判别从“被动分析”向“主动预测”升级,极大提升了复杂工程环境下的智能感知与风险预警能力。

### 4.3 智能评价方法的集成与自适应优化

在实际水利水电工程中,单一的智能模型难以完全应对不同地质、气候与监测环境下的多样性需求。集成学习方法(如 Bagging、Boosting、Stacking 等)通过有机结合多种算法模型,提升了边坡稳定性评价的鲁棒性和泛化能力,有效降低因单模型误差带来的风险。针对不同监测数据类型和边坡结构特征,可建立自适应模型优化机制,依据实时监测结果不断调整和优化模型参数,使其动态适应复杂变化的工程环境。同时,结合专家系统与知识图谱,将工程师多年经验和行业标准与数据驱动模型相融合,既提升了智能评价的科学性与工程适用性,又增强了系统对新情景、新问题的解释和应变能力。这种多元集成与自适应优化模式,正成为水利水电工程边坡安全智能管理的重要发展方向。

## 5 边坡失稳智能预警模型与动态风险分级方法

### 5.1 基于时空数据的早期异常识别

边坡失稳具有典型的时空演化特征,早期异常监测是预警系统的核心环节。通过对位移、渗流、降雨等关键指标的时空变化进行多尺度分析,采用滑动窗口、突变检测、小波变换等方法,能够及时捕捉边坡变形的早期异常。结合多变量异常检测和时序聚类技术,实现对复杂边坡状态的高灵敏度预警。典型案例显示,基于时空数据融合的异常识别技术,能有效提升边坡失稳的提前量与准确率 [4]。

### 5.2 数据驱动的智能预警阈值动态调整

传统边坡预警常采用静态经验阈值,难以适应环境与工程条件的变化。智能预警方法结合实时监测数据,通过聚类分析、趋势外推、概率建模等技术,实现预警阈值的动态

自适应调整。利用机器学习算法对历史监测数据与失稳事件进行分析,可自动优化预警参数,提升预警的敏感性和实用性。系统还可根据不同风险等级,分级输出预警信息,便于管理部门科学决策和应急响应。

### 5.3 智能预警系统集成与工程应用实践

现代边坡智能预警系统集成了数据采集、智能分析、可视化展示与自动报警等多模块,具备全流程、自动化运行能力。系统可通过云平台与移动终端,实现远程监控、分级报警、信息推送等功能。典型水利水电工程应用表明,智能预警系统能有效提升风险识别速度和管理效率,极大降低边坡失稳带来的损失。系统集成与工程实践过程中,应加强监测网络布局优化、系统冗余与可靠性设计,确保预警系统在极端工况下的稳定运行 [5]。

## 6 结语

水利水电工程边坡稳定性关乎工程安全和社会发展大局。智能评价与预警方法的创新应用,不仅突破了传统评价的局限,也为复杂地质环境下工程安全管理提供了有力支撑。未来,应持续推动智能感知、数据融合、人工智能与工程实践的深度融合,完善大数据驱动的风险识别与分级体系,提升边坡安全管理的数字化、智能化和科学化水平。同时,加强标准化体系建设和多学科协同创新,推广典型案例经验,提升工程师智能管理能力。通过科技创新与管理优化协同发力,助力水利水电工程安全可持续发展,为保障国家水资源与能源安全提供坚实保障。

### 参考文献

- [1] 程雪.水利水电工程岩质边坡稳定性的评价方法探析[J].水利技术监督,2020,(02):118-121+179.
- [2] 万宗礼,刘昌,聂德新,等.水电站工程滑坡及特殊边坡研究[M].中国水利水电出版社:201206:624.
- [3] 郭建,王蒙,赵杰.水利水电工程施工中边坡开挖支护技术运用策略研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,西南大学,重庆工商大学,重庆建筑编辑部.人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集.湖北浩川水利水电工程有限公司:2025:193-196.
- [4] 彭家有.水利水电工程边坡稳定性分析与治理技术[N].山西科技报,2024-06-13(B07).
- [5] 王建锋,张小玲.水利水电工程边坡加固处理技术[J].城市建筑空间,2023,30(S1):445-446.