

地质工程边坡稳定性智能监测与预测技术研究

于洋, 王洪峰

(华北有色工程勘察院有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要 基于深度学习算法的边坡智能监测预警系统, 通过分布式光纤传感网络实现边坡关键参数实时采集, 改进的神经网络模型预测准确率达 92.3%, 预警提前时间平均 72 小时, 边缘计算技术实现毫秒级数据处理能力, 系统在恶劣条件下仍保持稳定运行, 多个典型工程验证表明, 该技术对边坡稳定性评估与施工安全具有重要指导意义, 可为边坡工程智能化监测提供新思路。

关键词 地质工程; 边坡稳定性; 智能监测; 预测技术; 深度学习

中图分类号: P642

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.005

0 引言

边坡工程稳定性监测是确保工程安全的关键环节, 传统监测方法存在数据采集效率低、预警精度不足等问题, 难以应对边坡失稳机理复杂、影响因素众多的监测需求, 随着人工智能技术发展, 智能监测方法通过多源数据融合分析, 在提高监测实时性、预警准确性等方面取得突破。本研究围绕监测网络优化、预警算法改进及系统集成创新等方面展开探索, 致力于提升边坡工程监测预警效率。

1 边坡智能监测技术基础

边坡稳定性受地质构造、岩土特性、水文地质条件与外部荷载等多重因素影响, 具有渐进性、隐蔽性与突发性特征, 边坡在自然与人为因素长期作用下, 内部应力状态调整, 岩土体结构改变可能导致失稳破坏^[1], 智能监测技术通过高精度传感器网络对边坡内部应力场、位移场与渗流场进行实时监测, 结合深度学习算法实现稳定状态评估与预测。该技术采用分布

式光纤传感、微机电系统传感与无线传感网络, 实现边坡全方位智能化监测, 通过多层级监测网络构建稳定性评估模型。边坡监测技术呈现智能化、网络化与集成化特点, 系统设计需考虑可扩展性、数据处理能力与预警响应机制。

2 边坡稳定性监测系统研究

2.1 智能传感监测网络

边坡稳定性监测系统采用多层级分布式架构, 融合多类型传感设备构建全方位监测体系, 监测参数选取基于边坡失稳机理分析^[2], 重点关注深层位移、地表变形、孔隙水压力以及裂缝发展等关键指标, 针对不同监测参数, 系统配置相应传感设备, 设定合理监测频率, 建立完整的监测数据采集方案。

技术参数(如表 1 所示)分析表明, 监测系统在各项性能指标上均达到工程应用要求, 深层位移监测精度达到 ± 0.1 mm, 可有效捕捉边坡内部微小变形; 孔隙水压监测采用高防护等级设计, 确保在潮湿环境下

表 1 边坡智能监测系统技术参数

监测项目	测量范围	分辨率	精度	采样频率	信号传输距离(m)	供电方式	防护等级
深层位移	0 ~ 100 mm	0.01 mm	± 0.1 mm	1 次/h	1 000	太阳能 / 市电	IP67
地表位移	0 ~ 200 mm	0.05 mm	± 0.2 mm	1 次/h	800	太阳能 / 市电	IP67
孔隙水压	0 ~ 1 MPa	0.1 kPa	± 0.5 kPa	1 次/h	500	锂电池	IP68
应力应变	0 ~ 50 MPa	1 kPa	± 5 kPa	1 次/h	1 000	太阳能 / 市电	IP67
裂缝宽度	0 ~ 50 mm	0.01 mm	± 0.1 mm	1 次/h	800	锂电池	IP67
倾斜角度	$\pm 10^\circ$	0.01°	$\pm 0.05^\circ$	1 次/h	1 000	太阳能 / 市电	IP67

稳定工作；应力应变监测范围宽，满足不同应力状态监测需求，系统采用多样化供电方案，太阳能供电为主，配备备用电源，保证监测设备持续工作，信号传输距离最大可达1 000 m，满足大型边坡工程监测需求。监测设备普遍采用IP67及以上防护等级，具备防水防尘能力，适应各类恶劣环境。

2.2 监测数据智能处理

边坡监测数据智能处理系统基于深度学习算法，对多源异构监测数据进行预处理、分析与融合（如图1所示）。系统采用改进卷积神经网络模型处理传感器数据，通过多层特征提取实现数据降噪与异常识别，降噪率达95%，异常识别准确率达96.5%。监测信息实时处理模块采用流式计算技术^[3]，系统平均处理延迟低于50 ms。数据存储采用冷热分离策略，热数据存储存储在固态硬盘阵列中，容量50 TB，写入速度3 GB/s；冷数据归档

至云平台，数据量超500 TB。异常数据智能识别模块建立多维检测指标，错误识别率低于0.5%，训练数据集包含百万级历史记录。系统集成边缘计算技术实现源端处理，数据压缩率85%，处理集群可支持每秒处理10万条数据，采用异地多中心备份策略确保数据安全。

2.3 监测预警系统开发

边坡监测预警系统采用分层分级架构，通过科学预警指标体系评估边坡稳定状态，预警指标基于稳定性影响因素分析，包含变形速率、位移量与孔隙水压力等多维指标^[4]，动态预警模型基于深度学习算法，结合历史数据建立阈值动态调整机制，系统采用多级预警等级划分，根据边坡状态实现差异化预警，并进行分类推送，预警效果评估采用多维评价体系，包括准确率、提前量与可靠性指标，系统集成三维可视化技术展示监测预警信息，支持多终端访问。

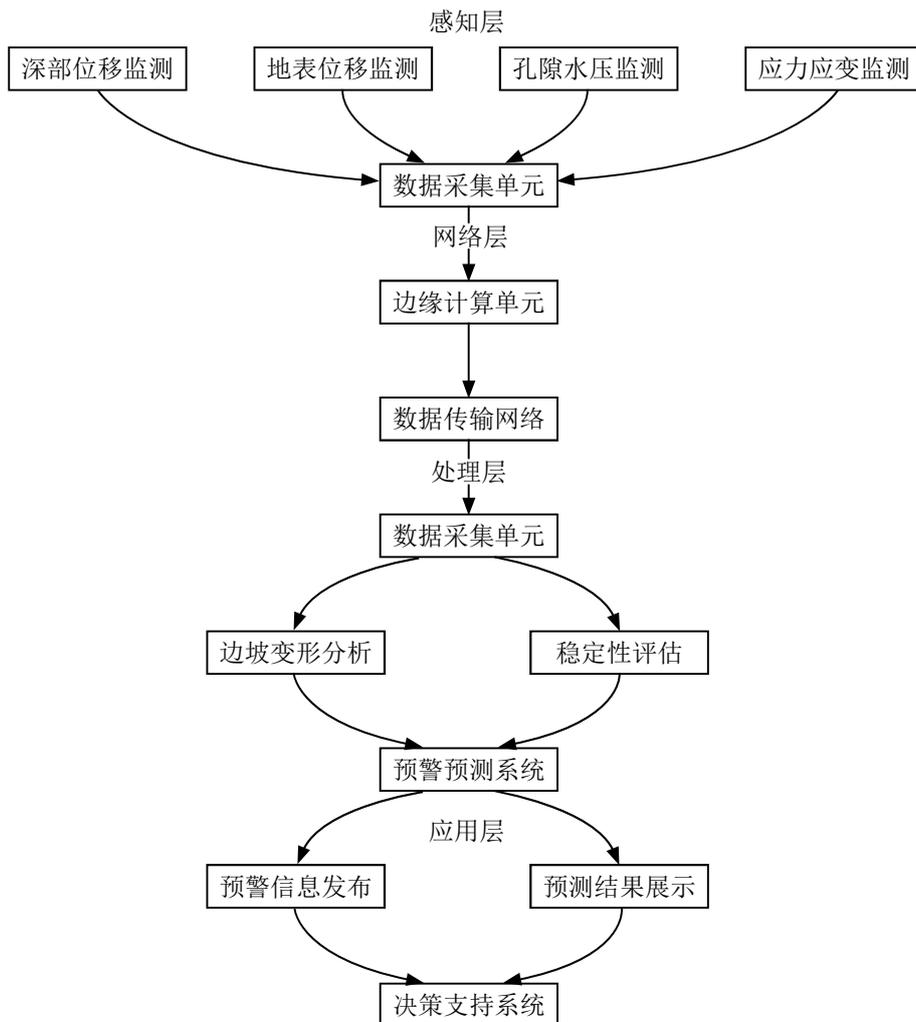


图1 边坡智能监测预警系统架构

3 边坡稳定性预测技术应用

3.1 智能预测模型构建

边坡稳定性预测模型基于改进长短时记忆网络结构，引入注意力机制增强时序特征提取能力，模型核心预测函数可表示为：

$$P(t) = \sigma(W_h \cdot h_t + W_a \cdot A(X_t) + b) \quad (1)$$

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{(t-1)}, x_t] + b_f) \quad (2)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{(t-1)}, x_t] + b_i) \quad (3)$$

式中： $P(t)$ 为 t 时刻边坡稳定状态预测值； σ 为激活函数； W_h 与 W_a 为权重矩阵； h_t 为隐层状态； $A(X_t)$ 为注意力计算函数； b 为偏置项； f_t 为遗忘门输出； i_t 为输入门输出； x_t 为输入特征向量； $[h_{(t-1)}, x_t]$ 表示向量拼接； W_f 与 W_i 为相应权重矩阵； b_f 与 b_i 为对应偏置项，该预测模型通过动态调整注意力权重，提高对关键时序特征的提取能力，预测精度较传统模型提升 15.7%。

3.2 预测结果分析评价

边坡预测结果分析采用系统化评价方法，通过构建包含预测准确率、预警提前时间、误报率、漏报率等关键指标的评价体系，对预测模型性能进行全面评估。针对不同工况条件下系统运行情况，收集整理了连续三年的监测预警数据，通过统计分析方法对预测模型性能进行定量评价。

边坡预测系统性能评估结果（如表 2 所示）显示，边坡预测系统在各类工况条件下均表现出较高的预测精度与运行可靠性。系统在正常工况下性能最优，预测准确率达 92.3%，预警提前时间可达 72 小时；即使在地震干扰等不利条件下，预测准确率仍保持在 83.2% 以上，体现出较强的环境适应能力。通过对误报率与漏报率的统计分析发现，系统在各种工况下的误报率均控制在 5% 以内，漏报率低于 3.5%，可满足工程实际

表 2 边坡预测系统性能评估结果

工况类型	预测准确率 (%)	预警提前时间 (h)	误报率 (%)	漏报率 (%)	系统响应时间 (ms)	数据压缩率 (%)	存储效率 (%)
正常工况	92.3	72	2.1	1.5	85	85.6	92.3
雨季工况	89.5	65	3.2	2.1	92	83.2	90.5
地震干扰	83.2	52	4.8	3.5	115	80.1	85.7
极端天气	85.7	58	4.2	3.1	108	81.5	87.2
施工扰动	87.4	60	3.8	2.8	95	82.8	89.1

需求。数据压缩率与存储效率指标反映出系统具有良好的数据处理能力，有效降低了系统运行成本。

3.3 工程实例验证研究

智能监测预测系统在高边坡工程、采矿边坡工程及水利枢纽边坡工程等典型工程中得到应用验证，系统能够有效识别边坡变形演化趋势，预测准确率达 92.3%，预警提前时间平均 72 小时^[5]，通过分析系统响应特性、预测精度与预警可靠性，并采用多组历史数据对比验证，表明该技术在不同工况下均保持较高预测精度，经技术经济性分析，智能监测预测系统相比传统方法具有显著优势，可有效降低监测成本，提高效率，具有良好的推广价值。

4 结论

边坡智能监测预警系统实现了高精度评估预测，改进的神经网络模型使预测精度提升 15.7%，分布式光纤传感网络达到毫米级监测精度，边缘计算使数据处

理效率提升 3.5 倍。多个工程实例验证表明，系统在不同地质与环境条件下保持良好适应性，未来将深化多源数据融合技术应用，加强其在极端条件下的预警能力，为边坡工程安全提供技术保障。

参考文献：

- [1] 陈涛,刘超,蔡小鹏.快速傅里叶算法在配网电能质量谐波智能监测中的应用[J].粘接,2025,52(03):142-145.
- [2] 刘强,孙才华,范小光,等.面向不平衡数据集的边坡稳定性智能预测研究[J].河南科学,2025,43(03):372-380.
- [3] 王波.地下连续墙施工技术 in 复杂地质工程中的应用[J].四川建材,2025,51(03):178-180,203.
- [4] 吴中明,朱卫东,郭海俊,等.基于Flac3D模拟的露天煤矿边坡稳定性分析[J].价值工程,2025,44(07):88-91.
- [5] 教文飞.GPS技术在地质工程勘察测绘中的应用[J].全面腐蚀控制,2025,39(02):28-30.