

水利水电工程施工期高边坡稳定性智能预测与安全控制研究

骆春杨

四川金康电力发展有限公司，四川省甘孜藏族自治州康定市，626004；

摘要：水利水电工程在施工期间面临的高边坡稳定性问题，是影响工程安全与进度的关键因素之一。本文针对这一挑战，提出了一种基于人工智能技术的高边坡稳定性智能预测与安全控制方法。首先，通过对高边坡稳定性的主要影响因素和破坏机理进行深入分析，确定了数据采集、特征提取及模型构建的基础。在此基础上，构建了多种基于机器学习和深度学习算法的智能预测模型，并通过历史监测数据进行了训练与验证，以实现对高边坡位移、应力等关键参数的精准预测。同时，结合实时监测系统，开发了一套高边坡安全预警机制，实现了对潜在风险的及时发现与快速响应。此外，研究还探讨了基于智能预测结果的动态支护策略，提出了优化支护时机与方式的方法。本研究不仅为水利水电工程施工期高边坡的安全管理提供了新的思路和技术手段，同时也为其他类似岩土工程的安全评估与控制提供了参考。

关键词：水利水电工程；高边坡稳定性；智能预测；安全控制

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.041

引言

随着我国基础设施建设的不断推进，水利水电工程在能源开发、防洪减灾、水资源优化配置等方面发挥着日益重要的作用。在大型水利水电工程的建设过程中，高边坡工程作为关键施工环节之一，其稳定性直接关系到整个工程的安全性、施工进度以及后期运行的可靠性。由于高边坡通常处于复杂地质条件和多重外部荷载作用下，加之施工过程中的开挖、爆破、支护等人为扰动因素，极易引发滑坡、崩塌、倾倒等失稳破坏现象，给工程带来严重安全隐患。因此，如何科学评估施工期高边坡的稳定性，并实现对其变形发展趋势的准确预测与有效控制，已成为当前岩土工程与水利工程领域亟需解决的重要课题。

1 高边坡稳定性影响因素与破坏机理分析

1.1 高边坡工程地质特征

高边坡通常指高度超过30米的自然或人工边坡，广泛存在于水利水电、交通、矿山等大型基础设施建设中。其稳定性受多种地质因素制约，其中地形地貌、岩土体性质和地质构造是决定边坡稳定性的基础条件。地形地貌决定了边坡的空间形态与受力状态，陡峭地形容易造成应力集中，增加滑动风险。岩土体的类型、强度和风化程度则直接影响边坡的承载能力与变形特性，软弱夹层、破碎带等地质缺陷更是潜在滑动面形成的关键因素。地质构造如断层、节理和褶皱等，会削弱岩体的整体性，形成潜在的滑移路径。此外，地下水的存在与活动对边坡稳定性也有显著影响，水压力会降低岩土体

的有效应力，从而降低抗剪强度。

1.2 施工期主要扰动因素

在水利水电工程施工过程中，高边坡所处的自然平衡状态会受到多种人为扰动的影响。开挖作业是主要的扰动来源之一，边坡开挖会改变原有应力分布，导致局部应力集中，引发岩体松弛甚至滑动。支护结构的设置虽然有助于增强边坡稳定性，但支护时机不当或支护强度不足，也可能造成反效果。施工过程中爆破震动、重型机械作业等外部荷载同样会对边坡产生动态扰动，尤其是在地质条件较差的区域，这些扰动可能诱发裂缝扩展或滑动面形成。降雨是另一个不可忽视的自然扰动因素，雨水渗入岩土体后会增加自重、降低抗剪强度，并在裂隙中形成孔隙水压力，进一步削弱边坡稳定性。

1.3 高边坡失稳破坏模式与机理

高边坡失稳破坏的形式多样，常见的包括滑动型失稳、倾倒型失稳和崩塌破坏。滑动型失稳主要表现为沿软弱结构面或岩土体内部滑动面的整体滑移，通常发生在岩层倾向与坡向一致的情况下，或存在软弱夹层的边坡中。倾倒型失稳多见于陡倾岩层组成的边坡，当岩块因重力作用绕底部转动时，容易形成倾倒破坏。崩塌破坏则多发生在节理发育、风化严重的岩体中，由于局部岩块失去支撑或受到震动影响而突然脱落，造成落石或局部塌方。此外，局部破坏也可能由施工扰动或地下水侵蚀引起，虽不致整体失稳，但仍可能对工程安全造成威胁。失稳破坏的机理涉及岩体强度、结构面特征、应力状态和外部荷载等多个因素，只有深入理解不同破坏

模式的成因机制，才能制定针对性的防治措施。

2 高边坡智能预测模型的构建基础

2.1 数据采集与预处理

高边坡稳定性预测依赖于高质量的数据支撑，数据采集是构建智能预测模型的第一步。数据来源主要包括地质勘探资料、施工过程记录以及现场监测数据。地质勘探提供边坡岩土体的物理力学参数，如密度、抗剪强度、孔隙率等；施工过程数据包括开挖顺序、支护方式、爆破参数等；现场监测则通过位移计、应力传感器、渗压计等设备获取边坡变形、应力变化及地下水动态等实时信息。这些数据在采集后往往存在缺失、异常或格式不统一的问题，因此需要进行预处理。预处理过程包括数据清洗、归一化处理、异常值剔除和特征提取等步骤。清洗过程剔除无效或错误数据，归一化使不同量纲的数据具有可比性，特征提取则通过统计分析或降维技术筛选出对预测有重要意义的变量。经过处理的数据将作为模型训练和预测的基础，为后续模型构建提供可靠输入。

2.2 人工智能与机器学习基础

人工智能技术，尤其是机器学习方法，在工程预测领域展现出良好应用前景。机器学习是一种让计算机通过已有数据“学习”规律，并用于预测或决策的技术，主要分为监督学习和非监督学习两大类。监督学习通过输入变量与输出变量之间的映射关系进行训练，适用于高边坡位移预测等任务，常用算法包括支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、人工神经网络（ANN）和梯度提升树（XGBoost）等。非监督学习用于发现数据中的潜在结构或分组，常用于数据聚类 and 异常检测。在实际应用中，深度学习方法如长短期记忆网络（LSTM）也被用于处理时间序列数据，能有效捕捉边坡变形的时序变化特征。选择合适的算法需综合考虑数据特性、预测目标和计算资源。通过合理应用这些智能算法，可以实现对高边坡变形趋势的自动识别与预测，为工程安全提供技术支持。

2.3 智能预测模型的构建流程

智能预测模型的构建是一个系统化过程，通常包括数据准备、特征工程、模型训练、参数优化和性能评估等阶段。在数据准备阶段，将预处理后的数据划分为训练集、验证集和测试集，用于模型训练与评估。特征工程是模型构建的关键环节，通过对输入变量进行筛选、组合和变换，提高模型的预测能力。模型训练阶段采用选定的机器学习算法，利用训练集数据拟合输入与输出之间的关系。训练完成后，通过验证集调整模型参数，

防止过拟合或欠拟合现象的发生。最后，使用测试集评估模型的预测性能，常用指标包括均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）和决定系数（ R^2 ）等。

3 高边坡稳定性智能预测模型研究

3.1 基于多源数据的预测模型设计

在高边坡稳定性预测中，数据来源的多样性和信息的完整性对模型性能具有重要影响。为提升预测精度，研究采用多源数据融合策略，将地质勘察数据、施工过程参数与现场监测信息进行整合，形成统一的数据输入体系。输入变量包括边坡岩土物理力学参数、施工阶段的开挖深度与支护强度、实时位移变化、应力变化以及地下水位波动等。为提升模型对复杂边坡行为的适应能力，设计了基于监督学习的多变量预测框架，采用结构化建模方式，使模型能够识别不同变量之间的相互作用关系。在模型架构方面，尝试了包括支持向量机、随机森林、人工神经网络和长短期记忆网络等多种算法，根据不同数据特征选择合适的模型结构。整个模型设计过程注重输入变量的标准化与归一化处理，确保不同来源数据在模型中具有良好的兼容性和预测有效性。

3.2 模型训练与优化

在模型训练阶段，采用交叉验证方法对数据集进行多次划分，以提升模型的泛化能力。训练过程中引入网格搜索与贝叶斯优化技术，对关键超参数进行调优，避免模型陷入局部最优或出现过拟合现象。为提高模型的训练效率，对数据进行批量归一化处理，并引入早停机制，在验证集误差不再下降时自动终止训练，防止资源浪费。同时，通过可视化训练过程中的损失曲线和精度变化，动态调整学习率与迭代次数，使模型在有限的训练时间内达到最佳性能。在训练完成后，对模型进行过拟合与欠拟合诊断，分析训练集与测试集之间的性能差异，进一步优化模型结构与参数配置，以确保其在实际工程场景中的稳定表现。

3.3 模型性能对比与选择

为筛选出最适合高边坡稳定性预测的智能模型，研究对多种算法进行了系统对比。通过计算不同模型在相同测试集上的均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）和决定系数（ R^2 ）等指标，评估其预测精度与稳定性。结果显示，人工神经网络和长短期记忆网络在处理时序数据方面表现出较强优势，能够准确捕捉边坡变形的动态变化趋势；而随机森林和支持向量机在小样本数据集上表现出较好的鲁棒性，适合用于数据量有限的工程场景。综合考虑模型的预测性能、训练效率和可解释

性,最终选择基于LSTM的神经网络模型作为主要预测工具,并结合随机森林进行辅助预测与结果验证。

4 高边坡安全控制与预警机制研究

4.1 安全控制指标与阈值设定

高边坡施工期的安全控制依赖于科学合理的指标体系和阈值设定。在实际工程中,位移变化速率、应力分布状态以及渗压变化趋势是反映边坡稳定性的关键参数。通过长期监测与数据分析,研究明确了边坡变形的临界值,例如日位移速率超过某一数值时,可能预示边坡进入加速变形阶段,需引起高度警惕。同时,结合地质条件与支护结构特性,设定了不同区域的应力控制标准,避免局部应力集中导致岩体破坏。渗压变化作为影响边坡抗滑能力的重要因素,其突变往往预示地下水活动增强,因此也纳入预警体系。

4.2 实时监测与反馈控制体系

为实现对高边坡稳定性状态的动态掌握,构建了基于物联网的实时监测与反馈控制系统。该系统集成了多种传感器设备,包括GNSS位移监测仪、应力计、渗压计、雨量计等,实现对边坡变形、内部应力、地下水位及环境因素的全天候连续监测。数据通过无线传输技术实时上传至监测平台,并结合时间序列分析方法进行趋势识别。一旦监测值超过预设阈值,系统自动触发预警机制,向相关管理人员推送警报信息。同时,系统支持多级响应机制,根据预警等级启动相应的应急措施,如加强巡查、调整施工节奏或启动支护工程。反馈控制体系强调数据驱动与自动化响应,提高了工程安全管理的及时性与准确性。

4.3 基于智能预测的动态支护策略

在传统支护方案基础上,引入智能预测结果作为支护决策的辅助依据,形成动态支护策略。通过将预测模型输出的位移趋势、应力变化等信息与当前支护状态进行比对,判断是否需要调整支护参数或提前介入支护作业。例如,在预测到某区域即将出现位移加速时,可在变形发生前主动增加锚杆密度或提升喷射混凝土强度,从而有效抑制潜在滑动。支护策略的动态调整不仅提升了工程安全性,还避免了盲目支护造成的资源浪费。此外,支护效果也通过后续监测数据进行反馈评估,形成“预测—支护—验证”的闭环管理流程,确保支护措施的科学性与适应性。

4.4 工程风险评估与决策支持系统

为提高高边坡安全管理的系统性与智能化水平,研

究构建了基于多源信息融合的工程风险评估与决策支持系统。该系统综合地质条件、施工进度、监测数据与预测结果,对边坡整体稳定性进行动态评估,并划分风险等级。低风险区域可维持常规管理,中高风险区域则需启动专项控制措施。系统支持多维度数据可视化,提供边坡变形趋势图、风险分布图、支护建议方案等信息,辅助管理人员做出科学决策。同时,系统内置知识库与历史案例库,能够根据当前边坡状态推荐类似工程的成功处置经验,增强决策的可靠性。通过该系统,实现了从被动预警向主动防控的转变,为水利水电工程施工期高边坡安全管理提供了强有力的技术支撑。

5 结论

本研究围绕水利水电工程施工期高边坡稳定性问题,结合人工智能技术,构建了高边坡变形预测模型,并在此基础上提出了相应的安全控制与预警机制。通过多源数据的采集与预处理,建立了适用于边坡变形预测的特征体系,采用多种机器学习与深度学习算法进行建模分析,筛选出预测性能最优的模型结构。研究结果表明,基于LSTM与随机森林的组合预测方法在处理高边坡时序变形数据方面具有较高精度和稳定性。同时,结合实时监测系统与动态阈值设定,实现了对边坡稳定状态的智能预警。在安全控制方面,提出了基于预测结果的动态支护策略,并构建了工程风险评估与决策支持系统,提升了工程管理的科学性与响应效率。研究成果为高边坡工程的安全施工提供了技术支撑,具有良好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 罗贵,巫德武. 锚索施工在水利水电建筑边坡稳定性提升中的作用[C]//《中国建筑金属结构》杂志社有限公司. 2024 新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(五). 中国水利水电第十工程局有限公司;, 2024: 25-26.
- [2] 后志坤. 水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的应用研究[J]. 水上安全, 2024, (22): 193-195.
- [3] 林惠颜. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术运用策略研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(21): 97-99.
- [4] 赵国栋. 水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的运用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (15): 215-217.
- [5] 张名龙. 水利水电施工过程中的边坡防护与水土保持技术分析[C]//江西省工程师联合会. 2024 年智能工程与经济建设学术会议论文集(工程管理与经济建设专题). 江西阳臻建设工程有限公司;, 2024: 833-837.