

# 浅析人工智能在边坡稳定性分析中的应用

潘立鹏<sup>1</sup> 徐甫<sup>1</sup> 林海华<sup>2</sup> 黄俊辉<sup>2</sup>

1. 广西建大勘测设计有限公司 广西 玉林 537000

2. 中国建筑材料工业地质勘查中心广西总队 广西 桂林 541002

**摘要:** 传统边坡稳定性评估办法以难以满足在复杂地质条件下争取评估边坡稳定性的需要, 以数值模拟技术为代表的计算机技术, 通过正确的模型和边界条件设定可定量分析边坡形态, 但其高度依赖所建模型的精度和模型参数的准确性, 且大模型、高精度和复杂性的模拟需要大量计算时间和内存。BP神经网络算法经过简单训练可使仿真边坡稳定性结果与实际结果接近, 以GA遗传算法优化BP神经网络算法可实现自主寻求最优仿真解, 随机森林算法评判边坡稳定性精度更高。对于稳定性不能满足要求的边坡, 应采取合理措施保证其安全性。

**关键词:** 边坡稳定性; 人工智能; 数值模拟

以强度平衡法、切线法、解析法和经验公式等为主的传统边坡稳定性分析方法无法充分考虑土体的力学特征和工程荷载存在很强的局限性, 在复杂地质条件下往往难以准确计算边坡稳定性。人工智能技术的兴起为准确计算边坡稳定性带来了新的方法, 以机器学习和深度学习算法为代表的人工智能技术具有大规模提取数据、分析数据的能力, 可以更加全面的模拟分析计算边坡行为。

传统的边坡稳定性分析方法通常需要对土体参数进行合理的假设, 所输出结果仅是对边坡行为的粗略认识。强度平衡法需先获取边坡土体内摩擦角、抗剪强度等力学参数后才能判断边坡是否稳定, 但未能考虑边坡土体的不均匀性计算结果不能精确反应边坡行为, 切线法是边坡稳定性分析最直感简便的方法, 假设滑坡发生于一条切线上往往与实际滑坡线不符。解析法中如Bishop法和Janbu法, 需要对土体参数进行合理的假设难以适应复杂地质情况。这些传统方法无法充分考虑边坡土体的不均匀性和工程荷载的不确定性等现实问题。随着数值模拟技术的发展, 边坡稳定性计算开始引入有限元分析和有限差分法等更为先进的方法, 全面地模拟边坡行为。然而数值模拟方法难以建立精确边坡模型, 处理大量数据和高度复杂系统需消耗大量计算资源。

基于人工智能预测边坡稳定性在国内外已有众多研究, 戴妙林<sup>[1]</sup>等学者利用人工智能GA-BP深度学习算法, 建立的边坡预测模型, 同时考虑了边坡潜在滑块高度、上下滑动面倾角、坡面倾角、滑块面积, 以及上下滑动面的黏聚力和摩擦系数等众多影响因素, 相较于传统的边坡稳定性计算极大的提高了边坡预测模型的精度。郭钟群<sup>[2]</sup>等学者利用机器学习算法建立边坡稳定性分析BP网络模型, 提供大量学习样本进行归一化和训练并将其应用于某露天矿边坡稳定性计算, 研究结果显示基于机器学习的边坡稳定性分析模型具有较好的准确性。胡少伟<sup>[3]</sup>等学者利用粒子群优化算法提出边坡稳定性预测模型可对百余条数据进行处理, 在考虑容重、内聚力、内摩擦角、边坡角、高度、孔隙压力比等影响因素的同时极大提高了模型计算速度。在边坡稳定性研究中, 人工智能算法已有能力取代传统边坡稳定性评价方法。

## 1 数值模拟的应用

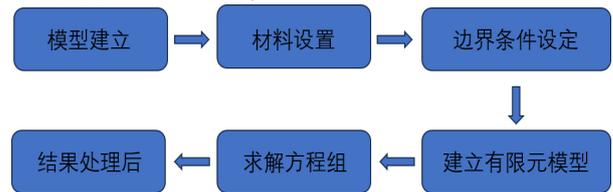
### 1.1 传统边坡稳定性分析法

传统的边坡稳定性分析方法包括定性评价分析法、定量评价分析法和不确定性分析评价法<sup>[4]</sup>。定性分析评价法也称非数量分析法, 通过工程地质勘察报告结合自身实践经验, 分析边坡稳定性及可能的破坏模式和失稳机理, 可迅速判定边坡稳定性, 但受到分析者各人主观因素的影响。定量评价分析法也称数学模型法, 其以地质分析资料为对象带入简化后的边坡计算模型进行定量计算, 得到边坡稳定性评判结果, 此计算方法所选模型直接影响计算准确性, 过于简化的计算分析模型难以客观反应边坡形态, 而过于复杂的模型由于考虑参数过多可信度难以保证。不确定性分析方法包括可靠度分析方法、灰色理论法、模糊综合评价法, 充分考虑影响边坡稳定性的大量因素,

但由于边坡岩体土体的多样性和地质环境的复杂性使得该方法具有很强的不确定性

### 1.2 数值模拟分析

目前常见边坡稳定性分析中使用的数值模拟方法包括有限元分析法(Finite Element Analysis, FEA)和有限差分法(Finite Difference Method, FDM)。有限元分析的主要步骤包括模型建立、材料设置、边界条件设定、数学模型建立、解方程组和结果后处理等步骤。



在模型建立初期需收集实际工程数据如边坡几何形状、尺寸等建立精确的边坡几何模型, 根据勘测数据定义边坡材料的弹性模量、泊松比等可以更为准确的计算边坡形态。设定正确的边界条件是有限元分析结果正确的先决条件, 在实际模型建立中要准确设定边坡位移边界条件和力边界条件, 通过边界条件的设置可模拟各种荷载情况, 包括静态和动态荷载。有限元分析通过合理的模型建立、精细的网格划分和准确的边界条件设定能够更全面、准确地评估边坡的稳定性, 在处理非均匀土体、多物理场耦合和不同荷载情况下具有突出优越性。

### 1.3 数值模拟存在问题

数值模拟在边坡稳定性分析中被广泛应用, 在实践过程中一些问题对边坡稳定性分析结果的可靠性和准确性有着重要影响。

数值模型的准确性高度依赖于对边坡系统的准确建模, 土体的本构关系、边坡几何形状以及边界条件等因素的误差都可能在模拟结果中引入不确定性。在实际工程中土体参数如摩擦角、内摩擦角等准确性通常难以确保可能导致对边坡稳定性的不准确预测。边界条件受到多种复杂因素的影响, 如支撑结构、变形边界等, 建模人员缺乏对这些条件的准确描述。大模型、高精度和复杂性的模拟需要大量计算时间和内存, 在大规模项目或需要实时分析的情况下数值模拟消耗资源过多。

### 1.4 数值模拟的优化

对于数据采集的不正确问题, 对边坡稳定性分析影响较大的土体参数可结合室内试验和经验公式提高采集土体参数的准确性。对于边界条件的准确设定应尽可能结合工程实际经验准确描述, 数值模拟需要占用大规模的计算资源的缺点, 可利用并行计算提高有限差分法的计算效率。在计算时将计算任务分配给多个处理器可以显著减少求解时间, 提高边坡稳定性分析的效率, 同时利用高性能计算平台可以处理更大规模的问题, 提供更详细的边坡稳定性计算模拟结果。

作者简介: 潘立鹏(1989-), 男, 壮族, 广西壮族自治区南宁市人, 广西建大勘测设计有限公司, 本科, 工程师, 研究方向: 地质与岩土工程勘察、设计。

## 2 基于人工智能的边坡稳定性分析

### 2.1 BP神经网络

以基于BP神经网络的边坡稳定性分析为例，BP神经网络的主要流程包括正向传播输入信号和反向传播训练误差。正向传播输入信号过程为将学习数据传输给神经网络，由传入神经输出至各中间层神经，再由各中间层神经处理后传输到各输出层神经更新，若神经网络输出结果与期待结果一致，则结束该样本学习对下一样本进行学习。若输出结果与期待值不一致则转入反向传播训练误差阶段，神经网络反向传播由输出神经开始以减少期待输出与实际输出误差的方式，将误差修正到每一神经元，最后回到输入神经。经过该神经网络可不断调节各神经元阈值以此满足期待输出结果。

采用BP神经网络预测某边坡稳定性，以收集到的边坡实例为分析样本，对学习样本进行归化处理提高网络训练速度和网络精度，选取：岩土体容重、粘聚力、内摩擦角、边坡角和坡高以及孔隙压力比等对边坡稳定性影响较大的因素作为输入值，以边坡稳定性系数为期待输出值进行神经网络的训练，并用检测样本对训练好的模型进行检测。其中训练结果表明：选用11个中间神经元训练效果最好，经过一万余步训练该神经网络以满足设置输出误差要求，经检测样本检验后发现仿真边坡稳定性结果与实际结果接近。

### 2.2 GA-BP神经网络

针对岩质边坡稳定性分析可利用GA-BP算法预测其加固效应，戴妙林学者利用人工智能遗传算法优化BP神经网络，采用过程中常见二折线滑动面边坡模型，以滑坡高度、上下滑动面倾角、坡面倾角和滑坡面积为主要影响因素计算岩质边坡的稳定性系数。采取的遗传算法以生物进化论自然选择和遗传因子原理为基础随机寻求最优解的计算模型，以遗传算法优化BP神经网络通过随机产生数据作为初始输入值，以自适应函数作为中间神经元对输入值进行逐层更新选择高适应数据进入下一层神经元，不断重复进化达到预期输出值。在模型构建过程中采取二折线滑动面模型建立潜在滑坡体安全系数与各主要影响因素的模型，选择主要参数为潜在滑坡体高度、边坡角度以及滑块面积，对学习样本数据采用正交设计，共9个输入参数50种组合。以9个参数为输入值，边坡稳定性系数为输出值建立两者的映射关系，对其模型网络进行训练。根据研究结果发现GA-BP网络模型较BP网络模型更为精确。在实际工程中可利用GA-BP算法对边坡稳定性加固方案进行优化，若采取混凝土注浆加固潜在滑坡体抗剪强度可使用放大系数增加上下滑动面黏聚力的影响因数。若采取锚索加固方案可将影响锚索加固效果的因素（预应力、横竖向间距俯角等）作为输入值建立锚索加固边坡稳定性分析模型。

### 2.3 随机森林算法

随机森林算法由多颗决策树组成，可对训练样本数据进行有效抽样训练，根据每个样本的部分特征，以决策树的输出结果为分析对象，随机森林算法会选取输出次数最多结果为最终决策。

张孟涵等学者<sup>[5]</sup>选取我国618个边坡数据，训练边坡稳定性分析机器学习模型，该模型数据选取坡脚、坡高、孔隙水压力、土体重度、黏聚力和内摩擦角为输出参数，对测试数据库进行归一化处理以消除数据量纲不统一问题，边坡失稳输出结果为0，边坡稳定结果表示为1，利用测试数据对训练好的数据模型进行测试，测试其准确性得到最优模型。对比梯度提升机、支持向量机以及人工神经网络，随机森林算法精度更高，更加适合评价边坡稳定性。

### 2.4 自动机器学习

自动机器学习主流的框架有H2O、TPOT、ML-Box、AutoKeras、Auto-ml等五种<sup>[6]</sup>，以上五种框架不需额外编译代码，利用其自带的算法即可完成输入数据的模型训练。H2O平台基于Java开发以训练速度快、可线性扩展著称，可实现随机森林算法和深度学习模型；TPOT也称树形传递优化技术，采取遗传算法原理可提高机器学习模型的预测精度；ML-Box框架基于Python研制，其运行速度快稳定性高但存在移除可用变量的风险；Auto-ml框架基于树形模型可用于数据分析深度学习，适用于实施预测的使用环境。

### 2.5 案例分析

以某一泄洪沟边坡为例，对其两岸天然边坡和人工开挖边坡稳定性进行判断，该地形坡体陡峭凌乱，有潜在滑坡体A

与B，其中A滑坡体下滑面倾角较大。采用简化二折线模型，分析混凝土加固边坡方案，利用GA遗传算法放大上下活动面黏聚力，计算结果发现同时加固上下滑动面总加固力最大；但由于A滑坡体下滑面倾角较大存在加固后分离风险，因此采用仅加固下滑面方案。

以GA-PB算法建立的简化二折线滑坡模型可直接预测边坡稳定性，并应用于边坡稳定加固方案优化，既节约了大量计算资源又可定量分析各方案的加固效应选取最优加固方案。

## 3 人工智能优势

传统方法基于强度平衡法和有限元分析，考虑土体参数和边坡几何形状。而机器学习应用支持向量机(SVM)和随机森林等算法结合大量地质数据建立边坡稳定性预测模型，在准确性上较传统方法有显著提升，在处理非线性和不确定性方面表现更为优越。传统方法基于定期巡视和传感器数据，使用经验规则判断边坡稳定性。机器学习可应用利用监督学习模型，结合实时传感器数据，实现对边坡的自动监测与预警，提高了对异常变化的敏感性，实现了更早期的边坡稳定性问题识别和及时的应对措施。传统方法依赖实验室测试和经验参数，存在参数固定性的问题。机器学习应用利用卷积神经网络(CNN)学习土体参数与边坡稳定性之间的复杂关系，优化土体参数，能够更好地捕捉土体参数的非线性关系，提高参数优化的精度。传统方法依赖专家对各种地质信息进行手动整合和判断。机器学习应用使用聚类算法和深度学习模型，对地质信息进行自动整合和分析。帮助工程师更全面地理解地质信息之间的关系，提高对地质条件的整体把握。

## 4 边坡安全防护

边坡稳定性影响因素众多，对其影响效应最大的因素为边坡土体重度和内摩擦角、坡度、坡脚，在制定边坡加固方案时应将其重点考虑，保证边坡形变可控稳定。降水时影响边坡稳定性的重要因素，其不仅使边坡土体重度增大还提高了土体内摩擦角，极大程度影响力边坡稳定性。采取合理的排水措施减小地表水及地下水的渗流可有效避免因降水造成的边坡失稳。坡脚的大小也对边坡稳定性有着影响，坡脚越小边坡稳定性越差，对于坡度较大的边坡可采取人工削坡的方式，减小坡脚保证边坡稳定性满足要求。采用注浆加固、锚杆等方式可有效加固边坡的整体稳定性，但要根据坡体的几何尺寸和地质情况正确处理。

## 结束语

本文详细分析了传统边坡稳定性评估方法，发现各边坡稳定性评估方法均存在着局限性且缺乏对边坡失稳机理的准确阐述，已不能应对实际工程中在复杂的地质下的边坡稳定性评估。将数值模拟技术应用于边坡稳定性分析可定量分析边坡行为，在复杂地质情况下通过建立精确的边坡模型和正确的边界条件设定同样可得到准确的边坡稳定性系数。以机器学习算法和深度学习算法为主的人工智能可极大降低数值模拟技术建模及计算成本，BP神经网络算法模型经万余次训练即可使仿真边坡稳定性结果与实际结果接近，基于遗传算法优化的BP神经网络更具备自主寻求最优仿真解的能力，而随机森林算法评判边坡稳定性精度更高。对与稳定性系数不能满足要求的边坡应采取合理措施，保证边坡稳定安全。

## 参考文献

- [1] 戴妙林, 屈佳乐, 刘晓青, 等. 基于GA-BP算法的岩质边坡稳定性和加固效应预测模型及其应用研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5): 165-171.
- [2] 郭钟群, 余金勇, 彭道强, 等. 基于BP神经网络的边坡稳定性分析[J]. 铜业工程, 2013, (6): 30-33.
- [3] 胡少伟, 李原昊, 单常喜, 等. 基于改进的PSO-BP神经网络的边坡稳定性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 第43卷(4): 854-861.
- [4] 麻官亮, 邵玉刚. 基于径向基神经网络的边坡稳定性评估方法[J]. 建筑技术, 2012, 43(2): 175-176.
- [5] 张梦涵, 魏进, 下海丁. 基于机器学习的边坡稳定性分析方法——以国内618个边坡为例[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 1083-1095.
- [6] 张化进, 吴顺川, 张中信, 等. 边坡稳定性自动机器学习预测方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(1): 35-40.