

GA-BP 神经网络在滑坡距离预测中的应用研究

缪 伟

江苏金智科技股份有限公司 上海 宝山 201900

【摘 要】 滑坡运动距离是评估滑坡致灾范围与风险等级的核心参数，精准预测对防灾减灾至关重要。为解决传统预测方法精度低、非线性拟合能力弱及 BP 神经网络易陷入局部最优的问题，本文引入遗传算法（GA）优化 BP 神经网络，构建 GA-BP 滑坡距离预测模型。选取滑坡体积、滑源区高差、滑坡坡度、堆积区坡度、滑坡面积 5 个关键影响因素作为输入，滑坡水平运动距离为输出，基于西南山区 120 组实测滑坡数据训练与验证模型。结果表明：GA-BP 模型平均相对误差(MRE)为 3.28%、均方根误差(RMSE)为 4.15m、决定系数 $R^2=0.987$ ，较传统 BP 模型(MRE=8.76%、RMSE=11.32m、 $R^2=0.942$) 预测精度显著提升，有效克服了 BP 网络局部最优缺陷。该模型兼具全局寻优与非线性拟合优势，为滑坡距离精准预测提供了新方法，具有重要工程应用价值。

【关键词】 滑坡距离预测；GA-BP 神经网络；遗传算法；BP 神经网络；影响因素

1 引言

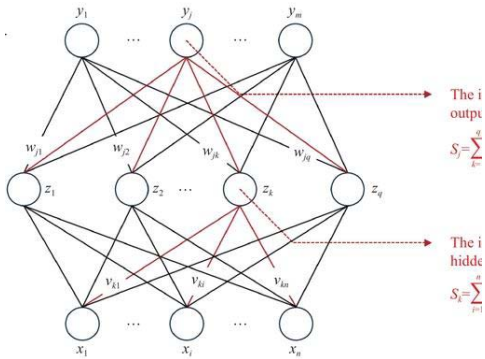
我国西南山区地形复杂、地质灾害频发，滑坡灾害占比超 60%，严重威胁居民生命财产与基础设施安全。滑坡运动距离直接决定灾害影响范围，是风险评估与防治工程设计的关键依据。传统滑坡距离预测方法（经验公式、多元回归、数值模拟）存在局限性：经验公式依赖区域经验、普适性差；多元回归难以刻画多因素非线性关联；数值模拟计算复杂、参数敏感性高。

BP 神经网络因强非线性拟合能力广泛应用于地质灾害预测，但存在初始权值随机、易陷入局部最优、收敛速度慢等问题。遗传算法（GA）基于生物进化理论，具有全局并行搜索、自适应寻优优势，可优化 BP 网络初始权值与阈值，提升模型稳定性与精度。本文构建 GA-BP 神经网络模型，用于滑坡距离预测，通过实测数据验证模型性能，为滑坡灾害精准预警提供技术支撑。

2 GA-BP 神经网络基本原理

2.1 BP 神经网络原理

BP 神经网络是多层前馈网络，由输入层、隐含层、输出层组成，通过前向传播与误差反向传播迭代调整参数。



(1) 前向传播：输入数据经输入层到隐含层加权求和，通过激活函数(Sigmoid)非线性变换，传递至输出层得到预测值。

(2) 反向传播：计算预测值与实测值误差，按误差梯度下

降方向反向调整各层权值与阈值，最小化误差函数。

(3) 缺陷：初始权值随机选取，易陷入局部最优，导致模型收敛慢、预测精度低。

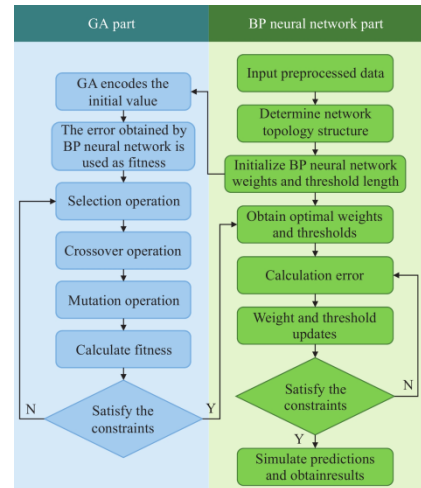
2.2 遗传算法（GA）原理

遗传算法模拟生物进化，通过选择、交叉、变异操作全局寻优，步骤如下：

- (1) 种群初始化：将 BP 网络权值与阈值编码为“染色体”，生成初始种群；
- (2) 适应度计算：以预测误差倒数为适应度函数，评估个体优劣；
- (3) 选择操作：保留高适应度个体，淘汰劣质个体；
- (4) 交叉操作：随机配对个体，交换部分基因，生成新个体；
- (5) 变异操作：随机改变个体基因，维持种群多样性，避免早熟收敛。

2.3 GA-BP 模型融合机制

GA-BP 模型核心是 GA 全局优化 + BP 局部精细训练，流程如下：



- (1) 确定 BP 网络结构, 初始化权值与阈值并编码为 GA 染色体;
- (2) GA 迭代优化染色体, 输出最优权值与阈值;
- (3) 将最优参数赋给 BP 网络, 训练并输出预测结果。

3 滑坡距离预测模型构建

3.1 影响因素选取与数据预处理

- (1) 影响因素选取

基于滑坡运动机理与文献研究, 选取 5 个核心影响因素:

- ① (X_1) : 滑坡体积 (10^4m^3) , 反映滑坡规模;
- ② (X_2) : 滑源区高差 (m), 决定滑坡势能;
- ③ (X_3) : 滑坡坡度 $(^\circ)$, 影响启动与运动速度;
- ④ (X_4) : 堆积区坡度 $(^\circ)$, 制约运动距离;
- ⑤ (X_5) : 滑坡面积 (10^4m^2) , 反映滑体分布范围。

输出变量 Y: 滑坡水平运动距离 (m)。

- (2) 数据来源与预处理

收集西南山区 120 组实测滑坡数据, 随机划分: 训练集 96 组、验证集 24 组。为消除量纲影响, 采用归一化处理:
$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$
式中: (x') 为归一化值; x 为原始值; $(x_{\max})$ 、 $(x_{\min})$ 为序列最大、最小值。

3.2 GA-BP 模型参数设置

- (1) BP 网络结构

- ①输入层节点数: 5 (对应 5 个影响因素);
- ②隐含层节点数: 11 (经验公式 $(h = \sqrt{m+n} + a)$ 试算确定);
- ③输出层节点数: 1 (滑坡水平运动距离);
- ④激活函数: 隐含层 Sigmoid, 输出层线性函数。

- (2) GA 参数设置

- ①种群规模: 50;
- ②迭代次数: 100;
- ③交叉概率: 0.8;
- ④变异概率: 0.01。

3.3 模型评价指标

采用 4 个指标评价模型性能:

- (1) 平均相对误差 (MRE):
$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\%$$
- (2) 均方根误差 (RMSE):
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$
- (3) 决定系数 (R^2) :
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$
- (4) 收敛速度: 模型达到稳定误差的迭代次数。

4 实验结果与分析

4.1 GA 优化效果分析

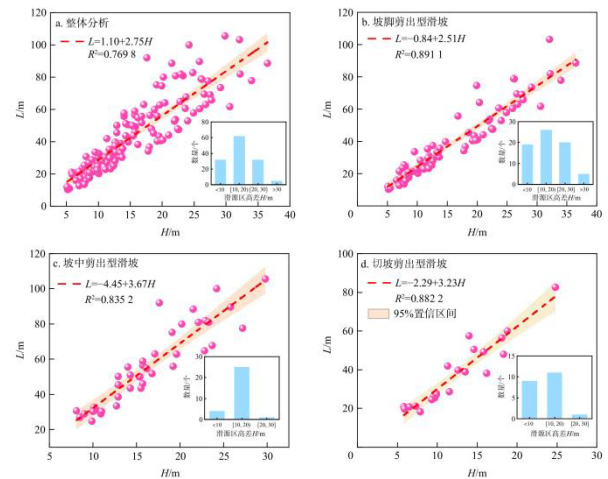
GA 迭代过程中适应度变化曲线显示: 迭代至 30 次时适应度趋于稳定, 收敛速度快, 表明 GA 有效搜索到最优初始权值与阈值, 避免 BP 网络随机初值缺陷。

4.2 预测结果对比

将 GA-BP 与传统 BP 模型预测结果对比, 见表 1、图 1。

表 1 模型预测性能对比

模型	MRE (%)	RMSE (m)	(R^2)	收敛迭代次数
GA-BP	3.28	4.15	0.987	35
传统 BP	8.76	11.32	0.942	82



分析可知:

- (1) 精度提升: GA-BP 模型 MRE 降低 62.5%、RMSE 降低 63.3%、 (R^2) 提升 4.8%, 预测值与实测值高度吻合;
- (2) 收敛加快: GA-BP 收敛迭代次数减少 57.3%, 训练效率显著提升;
- (3) 稳定性强: GA 全局寻优克服 BP 局部最优缺陷, 模型泛化能力更强。

4.3 单因素敏感性分析

控制其他因素不变, 分析单因素对滑坡距离影响:

- (1) 滑坡体积: 体积增大, 距离显著增加, 影响权重最大 (0.32);
- (2) 滑源区高差: 高差越大, 势能越高, 距离越远 (权重 0.25);
- (3) 滑坡坡度: 坡度增大, 启动阻力减小, 距离增加 (权重 0.18);
- (4) 堆积区坡度: 坡度越小, 阻力越小, 距离越远 (权重 0.15);
- (5) 滑坡面积: 面积越大, 滑体范围越广, 距离略有增加 (权重 0.10)。

4.4 误差分析

GA-BP 模型误差主要源于：

- (1) 滑坡运动受降雨、地震等突发因素影响，数据难以全面覆盖；
- (2) 部分实测数据存在测量误差；
- (3) 模型未考虑滑坡物质组成、植被覆盖等次要因素。

5 结论与展望

5.1 结论

- (1) 构建的 GA-BP 神经网络模型融合 GA 全局寻优与 BP 非线性拟合优势，有效克服传统 BP 网络局部最优、收敛慢缺陷；
- (2) 以滑坡体积、滑源区高差等 5 个因素为输入，滑坡

水平运动距离为输出，模型预测精度高（ $MRE=3.28\%$ 、 $\sqrt{R^2}=0.987$ ），较传统 BP 模型性能显著提升；

- (3) 滑坡体积、滑源区高差是影响滑坡距离的主导因素，可为滑坡风险评估提供关键参考。

5.2 展望

- (1) 后续可增加降雨、地震烈度等动态影响因素，提升模型对极端条件下滑坡距离的预测能力；
- (2) 结合物联网监测技术，开发实时动态预测系统，实现滑坡距离精准预警；
- (3) 扩充不同区域滑坡样本库，提升模型普适性，为全国山区滑坡灾害防治提供技术支撑。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 中国地质灾害防治公报 [R]. 北京: 自然资源部, 2024.
- [2] 曾渤皓, 王帮圆, 谷丽莹, 等. 基于 QR-BP-SVR 的坡脚型滑坡运动距离预测 [J]. 地质通报, 2025, 44 (4): 589-596.
- [3] 刘天霸, 黄鑫, 梁涛, 等. 一种基于 GA 算法和 BP 神经网络的滑坡变形预测方法 [P]. 中国专利: CN111105027A, 2020-05-05.
- [4] 王艳, 李娟, 张磊. 二苯碳酰二肼分光光度法测定生活饮用水中六价铬的方法优化 [J]. 中国卫生检验杂志, 2023, 33 (5): 652-654.
- [5] 刘敏, 赵阳, 陈静. 高原低压环境对水质检测的影响及对策 [J]. 环境工程, 2022, 40 (8): 189-193.
- [6] 汪标, 易庆林, 邓茂林, 等. 基于累积位移特征与时间序列组合模型的滑坡位移预测 [J]. 工程地质学报, 2024, 32 (5): 1629-1639.
- [7] 刘振中. 基于 GA-BP 神经网络的配电网供电可靠性分析与预测研究 [J]. 电工技术, 2024 (12): 64-67.
- [8] 张雪, 王涛. 青藏高原村镇生活饮用水水质现状及检测方法适用性评价 [J]. 中国给水排水, 2024, 40 (11): 102-106.
- [9] 李娜, 刘军. 分光光度法测定水中六价铬的干扰因素及消除方法 [J]. 化工环保, 2021, 41 (2): 210-214.