

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.007

基于 PSO-LSSVM-BP 模型的高边坡力学 参数反分析及稳定性评价

徐卫亚^{1,2}, 陈世壮^{1,2}, 张贵科³, 胡明涛^{1,2}, 黄威^{1,2}, 许晓逸^{1,2}, 张海龙³, 王如宾^{1,2}

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要: 基于粒子群优化(PSO)算法和最小二乘支持向量机(LSSVM)算法构建非线性映射关系, 结合反向传播(BP)神经网络对非线性映射关系生成的数据库进行机器学习, 构建了 PSO-LSSVM-BP 模型确定最优岩体力学参数。PSO-LSSVM-BP 模型以高边坡监测位移数据作为输入信息, 通过反分析获得高边坡岩体力学参数, 将反分析参数用于 FLAC3D 位移数值计算, 结果表明模拟结果与监测数据吻合较好, 验证了该模型的可行性和有效性。基于 PSO-LSSVM-BP 模型, 对不同蓄水位下两河口水电站进水口高边坡稳定性进行了评价, 发现水位是影响边坡稳定性的主要因素, 随着水位上升, 边坡位移逐渐增大, 其表面和断层处损伤程度加深, 边坡局部点安全系数有所下降, 但整体点安全系数均大于 1.30, 有一定安全裕度。

关键词: 高边坡; 力学参数反分析; 粒子群优化; 最小二乘向量机; 反向传播神经网络; 两河口水电站
中图分类号: TU42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)05-0052-08

Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation

XU Weiya^{1,2}, CHEN Shizhuang^{1,2}, ZHANG Guike³, HU Mingtao^{1,2}, HUANG Wei^{1,2},
XU Xiaoyi^{1,2}, ZHANG Hailong³, WANG Rubin^{1,2}

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Yalong River Hydropower Development Corporation, Limited, Chengdu 610051, China)

Abstract: Based on the Particle Swarm Optimization (PSO) and Least Square Support Vector Machine (LSSVM), a nonlinear mapping relationship is constructed. Combined with the Back Propagation Neural Network (BP) for machine learning on the database generated by the nonlinear mapping relationship, the PSO-LSSVM-BP model is built to determine the optimal mechanical parameters of rock mass. The PSO-LSSVM-BP model takes the monitored displacement data of high slope as input information, obtains the mechanical parameters of high slope rock mass through the inverse analysis, and applies them in the numerical calculations of displacement with FLAC3D. The results show that the simulation results are in good agreement with the monitoring data, which verifies the feasibility and effectiveness of the model. Utilizing the PSO-LSSVM-BP model, a three-dimensional stability evaluation is established on the intake slope of the Lianghekou Hydropower Station at different reservoir water levels. The results indicate that water level is the primary factor affecting the slope stability. As the water level rises, slope displacement gradually increases, with surface and fault damage increasing. While safety coefficients of local point decrease, the overall point safety coefficients remain above 1.30, indicating the intake slope has a certain level of safety margin.

Key words: high slope; inverse analysis of mechanical parameters; particle swarm optimization; least square support vector machine; back propagation neural network; Lianghekou Hydropower Station

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51939004); 雅砻江流域水电开发有限公司科技项目(YLGZ-GZA-ZG2021113)

作者简介: 徐卫亚(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: wyxu@ hhu. edu. cn

通信作者: 陈世壮(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: szchen@ hhu. edu. cn

引用本文: 徐卫亚, 陈世壮, 张贵科, 等. 基于 PSO-LSSVM-BP 模型的高边坡力学参数反分析及稳定性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 52-59.

XU Weiya, CHEN Shizhuang, ZHANG Guike, et al. Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5): 52-59.

边坡稳定性评价一直是工程界广泛关注的问题^[1-3]。总体上可分为定性分析和定量分析两类^[4-5]。定性分析主要是以现场勘测和经验判断为主,同时与相似工程进行类比分析,是一种快捷但相对粗略的评价方法,适用于工程勘察初期阶段。对于可行性分析及设计阶段,更加精确的定量分析方法才是更优选择。定量分析是一种基于岩土力学和计算力学求解边坡稳定系数和应力应变关系的方法,主要分为极限平衡法和数值模拟法。极限平衡法^[6-7]基于摩尔-库仑强度准则,将滑体划分为逐个相对独立且不发生变形的刚体土条,并假设滑体以特定的滑面产生滑动破坏,抗滑力与下滑力的比值为边坡稳定系数。极限平衡分析物理意义明确,原理简单,且精度可满足工程需求。近年来,新方法和理论的应用一定程度上弥补了传统极限平衡法的原有缺陷,使得计算精确度进一步提升;Sun 等^[8]针对边坡土体变异性大的问题,提出虚拟元强度折减法;Renani 等^[9]针对传统极限平衡法收敛性较差的问题,采用摩尔-库仑和霍克-布朗强度准则对传统极限平衡法进行了改进。数值模拟法可考虑滑体内部应力应变特征,模拟其失稳后破裂解体过程,更适用于具有复杂破坏机制的边坡^[10],主要包括连续介质应力应变分析法、非连续介质应力应变分析法、无单元法、流形元法等。连续介质应力应变分析法包括有限元、有限差分、边界元,非连续介质应力应变分析法包括离散元、不连续变形、块体单元法等^[11-12]。此外,为了克服单一数值模拟法的弊端,发挥各自优势,不同方法之间的耦合也是发展趋势。刘蕾等^[13]建立了含有非贯通层面和正交次级节理的逆层岩质边坡 FLAC-PFC2D 耦合计算模型,大幅缩短了模拟时间。王艳昆等^[14]提出了一种 GeoStudio 与 FLAC3D 互馈的库岸滑坡多场信息模拟方法,实现了 GeoStudio 模型和渗流场向 FLAC3D 的快速转换。

岩土体参数、外部荷载及模型的选取均受到主观和客观因素的影响而存在不确定性,这种不确定性导致传统方法的分析结果与实际情况差别较大^[15-16]。随着边坡稳定性分析精度需求进一步提高,大量不确定性分析方法应运而生,主要包括可靠度分析法、灰色系统评价法、人工神经网络法、遗传算法、概率分析法等^[17-18]。徐飞等^[19]结合投影寻踪算法、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法和逻辑斯谛函数,建立了评价边坡稳定性的粒子群优化投影寻踪模型。聂卫平等^[20]改进了 PSO 算法和支持向量机(support vector machine, SVM)算法,建立了随机权重粒子群(RandWPSO)-最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LSSVM)反演模型。谷淡平等^[21]基于极限平衡法和概率理论,通过反演边坡滑面强度参数确定其近似值。蒋水华等^[22]采用贝叶斯更新方法建立了岩土参数分析模型。不确定性分析方法的发展弥补了传统方法因数据缺失、参数取值不准确而导致计算结果误差较大的缺点,为高精度边坡稳定性预测提供了发展方向。除此之外,基于现场监测数据的稳定性分析方法也逐渐成为评价边坡稳定性的重要手段^[23-24],由于现场监测数据直观可靠,因此该方法在众多重大工程中得以广泛运用。

本文将 PSO 算法、LSSVM 算法和反向传播(back propagation, BP)神经网络相结合,构建高边坡岩体力学参数反分析模型(PSO-LSSVM-BP 模型),通过与监测位移对比验证了模型的合理性,最后用其评价雅砻江两河口水电站进水口边坡的稳定性。

1 基本原理

1.1 PSO 算法

PSO 算法是 Kennedy 等^[25]于 1995 年提出的一种全局寻优算法,收敛速度快,在求解大量非线性、不可微和多峰值复杂优化问题中具有极大优越性。PSO 算法是将问题解空间中的每一个候选解视为一个粒子,每个粒子都有一个个体最优位置和全局最优位置。个体最优位置是粒子自身找到的最优解,全局最优位置是整个群体找到的最优解。通过每一次迭代,粒子都会根据适应度值更新个体最优位置和全局最优位置,并获得自身的速度和位置。

1.2 LSSVM 算法

LSSVM 算法是标准 SVM 算法的一种扩展,其将二次规划问题转化为线性方程组求解问题,进而获得 SVM 模型中惩罚因子 γ 和核函数的宽度参数 σ 。LSSVM 算法可以避免 SVM 算法复杂的计算过程,大大降低了计算难度,提高了求解速度。

1.3 BP 神经网络

人工神经网络具有大规模并行处理、分布式信息存储、良好的自组织自学习能力等特点,是一种解决非线性、非局部性、非稳定性和非凸性等复杂问题的有效工具。BP 神经网络由 Rumelhart 等^[26]于 1986 年提

出,是应用最广泛的神经网络,主要由输入层、隐藏层和输出层组成,网络中的每个神经元为一个节点,连接权重负责连接前层和后层。该算法主要思想是通过隐含层将输出误差依次反向传播至输入层,并将误差分摊给各层节点,从而获得各层节点的误差信号,根据这些信号修正各节点的权重。

2 PSO-LSSVM-BP 模型构建及验证

2.1 模型构建

采用 PSO 算法优化 LSSVM 算法参数,构建非线性映射关系代替数值计算,结合 BP 神经网络对非线性映射关系生成的数据库进行机器学习,从而实现力学参数的反分析,具体流程如下:
①确定反分析参数,设定其取值范围。②采用 Python seed(·)函数生成给定参数范围内随机的岩体力学参数,并将不同参数的随机值代入 FLAC3D 进行数值模拟,获取不同参数条件下监测点对应位置的位移模拟值,这些模拟值与监测值一一对应。③通过LSSVM 算法构建岩体力学参数与边坡监测位移间非线性映射关系,将 LSSVM 算法预测的监测点位移值与数值模拟值误差作为参考标准。利用 PSO 算法对 LSSVM 算法的 γ 、 σ 进行优化,使得 LSSVM 算法预测的监测点位移值与数值模拟值误差达到最小。④使用 BP 神经网络学习 LSSVM 算法预测的监测点位移值与岩体力学参数的对应关系。输入边坡监测位移数据,通过神经网络反分析得到对应的岩体力学参数。⑤将反分析得到的参数代入 FLAC3D 再次进行数值模拟,将模拟结果与监测值对比分析,判定反分析参数的合理性。基于 PSO-LSSVM-BP 模型的岩体力学参数反分析流程如图 1 所示。

2.2 模型验证

2.2.1 工程概况

两河口水电站位于四川省甘孜州雅江县境内,距离雅砻江干流与支流鲜水河的汇合口约 2 km。挡水建筑物为黏土心墙堆石坝,最大坝高 295 m,水库正常蓄水位为 2865 m。如图 2 所示,进水口高边坡位于两河口水电站右岸,最大高度达 290 m。坡面走向 S10°W,平均坡度为 45°。该区域岩性以粉砂岩和变质粉砂岩为主,地质条件复杂,断层较发育,主要分布 f3、f8、f9、f10、f11 等,其中 f9 与 f10 贯穿整个进水口边坡(图 3)。为全面监控进水口边坡的稳定性,对其开展系统的安全监测。布置 Z2—Z2'、J3—J3'和 J5—J5'共 3 个

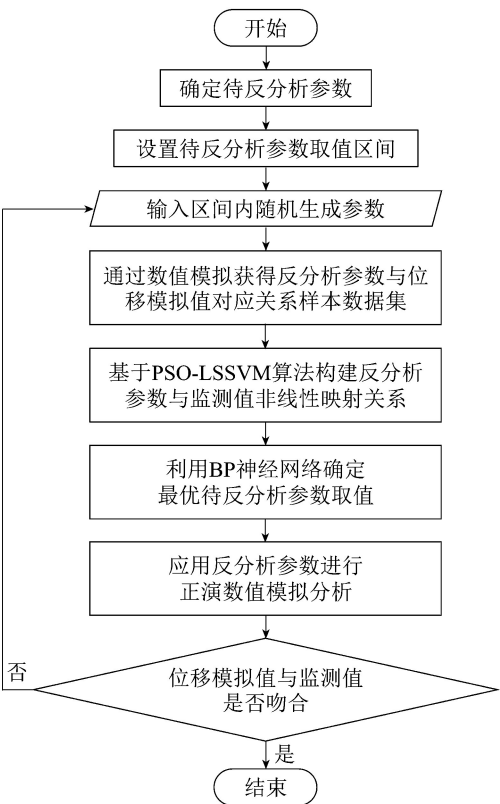


图 1 PSO-LSSVM-BP 模型岩体力学参数反分析流程

Fig.1 Flow chart of inverse analysis of rock mass mechanical parameters using PSO-LSSVM-BP model

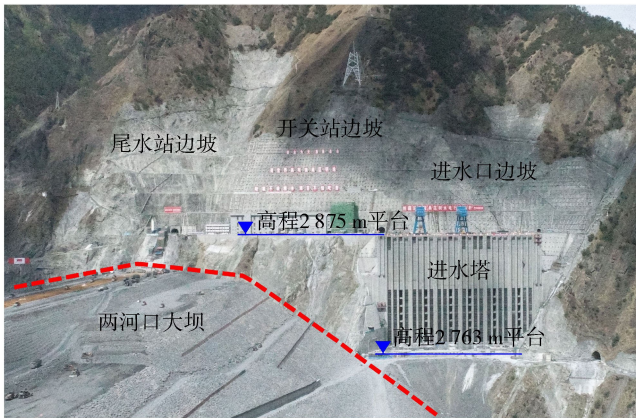


图 2 两河口水电站及进水口边坡
Fig.2 Lianghekou Hydropower Station and its intake slope

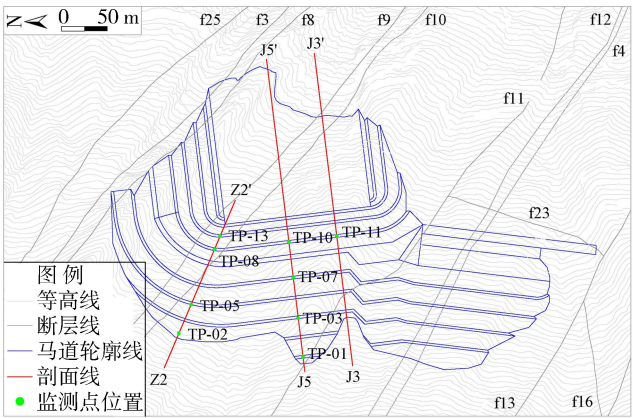


图 3 进水口边坡监测平面布置
Fig.3 Monitoring plane layout of the intake slope

监测断面,布置9个表面位移监测点(图3)。水库蓄水前水位为2608 m,蓄水大致分为3个阶段:第一阶段蓄水至2681 m,第二阶段蓄水至2785 m,第三阶段先蓄水至2845 m,后继续蓄水至2865 m。各阶段进水口边坡表面位移监测数据见表1。

表1 进水口边坡表面位移监测数据

Table 1 Summary of surface displacement monitoring of the intake slope

单位:mm
unit: mm

监测点 编号	蓄水前		蓄水第一阶段		蓄水第二阶段		蓄水第三阶段(蓄水至2845 m)	
	临空向位移	合位移	临空向位移	合位移	临空向位移	合位移	临空向位移	合位移
TP-01	16.00	25.14	3.40	4.82	3.20	27.47	4.30	16.60
TP-02	9.60	24.81	4.10	5.51	6.80	22.79	2.60	10.43
TP-03	28.30	40.54	4.50	8.32	5.40	26.70	0.50	4.68
TP-05	22.20	35.91	2.10	7.25	9.40	28.10	3.20	9.82
TP-07	20.50	22.77						
TP-08	7.70	14.28						
TP-10	23.70	19.91						
TP-11	21.60	22.47						
TP-13	13.20	13.24						

注:TP-07、TP-08、TP10、TP11、TP-13 测点在水库蓄水后失效。

2.2.2 验证结果与分析

岩土体力学参数的确定是边坡稳定性分析判断的先决条件,但由于边坡结构的复杂性,导致力学参数具有非均质、非线性、不连续等特征,通过现场或室内试验直接获得存在极大的离散性和偶然性。同时,试验获得参数通常为岩石或岩块的力学参数,无法反映整个岩体的力学性质,可能会与实际情况相差甚远。因此,能够综合反映岩体力学性质的反分析法不失为一种好的方法。本文选取岩体变形模量 E 、泊松比 μ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 作为待反分析参数,其他参数通过地质调查获取。岩体类别共分为Ⅲ1、Ⅲ2、Ⅳ1、Ⅳ2、Ⅴ1共5类,其力学参数反分析取值区间见表2。

表2 岩体力学参数反分析取值区间

Table 2 Value range of rock mass mechanical parameters in inverse analysis

材料分组		E /GPa	μ	c /MPa	φ /(°)
类	亚类				
Ⅲ	Ⅲ1	11.0~13.0	0.22~0.28	1.4~1.6	48.2~52.2
	Ⅲ2	6.3~9.8	0.26~0.32	1.1~1.3	40.4~45.4
Ⅳ	Ⅳ1	4.5~7.5	0.28~0.34	0.8~1.0	38.4~42.4
	Ⅳ2	4.1~5.9	0.30~0.36	0.4~0.8	32.9~40.9
Ⅴ	Ⅴ1	1.6~3.4	0.29~0.39	0.1~0.7	23.0~39.0

以第一阶段蓄水为例,使用 PSO 算法对 LSSVM 算法的 γ 、 σ 进行优化分析。设置 γ 的种群初始位置为1,历史最优位置为100; σ 的种群初始位置为0.001,历史最优位置为1。重度因子为0.5, γ 的自我认知学习因子 c_1 为1,社会认知学习因子 c_2 为1; σ 的 c_1 为0.1, c_2 为0.1。粒子种群数为20,迭代次数为5。最终得到 LSSVM 算法的 $\gamma = 9697$, $\sigma = 0.1465$ 。

选取 J5—J5'、Z2—Z2'剖面建立数值模型(图4),J5—J5'剖面选择 TP-01 测点作为反分析监测点,Z2—Z2'剖面选择 TP-02 测点作为反分析监测点。将岩体力学参数代入 FLAC3D 进行数值模拟,将数值模拟结果与 PSO-LSSVM 模型预测位移结果对比,如图5所示。由图5可知,PSO-LSSVM 模型预测位移与数值模拟位移误差较小,均在0.7%以下,因此 PSO-LSSVM 模型可有效替代数值正演计算,极大提高了反分析的效率。将监测点位移作为输入值,岩体力学参数为输出值代入 BP 神经网络。训练次数取300次,学习率为0.00035,样本数为1000,输入神经网络的数据维度为3,输出神经网络的数据维度为20,隐藏层的节点数为80。根据水位调度方案,使用不同蓄水阶段监测位移作

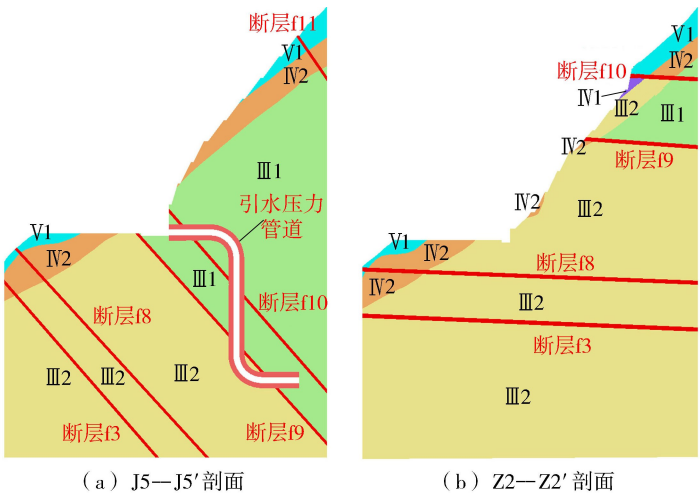


图4 二维验证模型

Fig. 4 Two-dimensional verification model

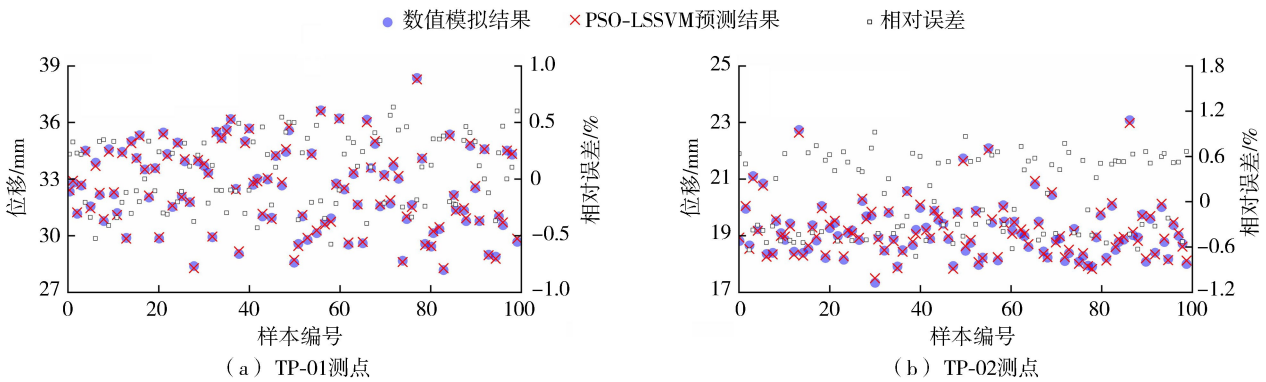


图5 PSO-LSSVM模型预测位移与数值模拟位移对比

Fig.5 Comparison between predicted displacement values based on PSO-LSSVM model and displacement values from numerical simulations

为输入值反分析得到对应岩体力学参数(表3)。对比3个阶段力学参数的反分析结果,第三阶段的反分析结果小于第二阶段小于第一阶段,说明水库水位升高会导致边坡岩体力学参数降低,这可能是由于水进入边坡内部使岩体力学参数劣化所致,这也促使了边坡进一步变形。

表3 不同蓄水阶段岩体力学参数反分析结果

材料分组		E/GPa			μ			c/MPa			$\varphi/(^{\circ})$		
类	亚类	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第一阶段	第二阶段	第三阶段
Ⅲ	Ⅲ1	11.84	11.84	11.84	0.25	0.25	0.25	1.58	1.51	1.51	49.40	49.40	49.40
	Ⅲ2	6.90	6.90	6.90	0.27	0.27	0.27	0.81	0.81	0.80	45.10	45.10	45.08
Ⅳ	Ⅳ1	4.53	4.53	4.53	0.29	0.30	0.30	0.59	0.59	0.59	43.10	36.60	35.88
	Ⅳ2	2.25	2.22	2.22	0.30	0.33	0.33	0.52	0.47	0.46	28.50	28.40	28.22
Ⅴ	Ⅴ1	1.97	1.81	1.80	0.40	0.40	0.40	0.25	0.19	0.18	24.70	23.70	23.42

较于传统遗传算法(GA)-LSSVM-BP模型(GA-LSSVM-BP模型), PSO-LSSVM-BP模型计算精度与之相当,但计算时间明显缩短,计算效率大幅提高^[27-28]。为了验证 PSO-LSSVM-BP模型的有效性,将表3中的参数再次代入FLAC3D进行正演数值模拟。数值模拟结果与监测位移对比见表4,发现最大相对误差在-16.6%~16.9%范围内,属于可接受范围,说明将 PSO-LSSVM-BP模型应用于边坡稳定性评价中是准确可行的。

表4 FLAC3D数值模拟位移与误差结果

监测点 编号	蓄水第一阶段蓄水			蓄水第二阶段			蓄水第三阶段		
	合位移 模拟值/mm	绝对 误差/mm	相对 误差/%	合位移 模拟值/mm	绝对 误差/mm	相对 误差/%	合位移 模拟值/mm	绝对 误差/mm	相对 误差/%
TP-01	4.85	0.03	0.6	35.25	-0.53	-16.6	18.99	2.39	14.4
TP-02	5.36	-0.15	-2.7	25.85	1.15	16.9	8.71	-1.72	-16.5
TP-03	8.30	-0.02	-0.2	29.58	-0.04	-0.7	4.87	0.19	4.1
TP-05	7.99	0.74	10.2	33.57	0.77	8.2	11.42	1.6	16.3

3 两河口水电站进水口边坡稳定性评价

建立两河口水电站进水口边坡稳定性计算三维数值模型如图6(a)所示,重点模拟进水塔平台、引水压力管道以及开挖后进水口高边坡马道。取整个模型左下角在水平面上的投影点为坐标原点,取顺河向为x轴方向,垂直于河道方向(即边坡临空方向)为y轴方向,竖直方向为z轴方向。模型底部高程为2500m,向上一直模拟到高程3100m;整个模型尺寸为400m×380m×600m。模型主要考虑了地层界限、卸荷风化界限以及断层。模型全部采用四面体实体单元,包含4486699个单元和792137个节点。模型底面为三向固定约束,上、下游边界顺河向约束,两岸边界垂直河向约束。此外,为了还原开挖后边坡真实锚固状态,布设加固锚杆,具体分布如图6(b)所示。由于两河口水电站右岸岩体地应力大,分布复杂,且坡体内卸荷裂隙

发育,故初始地应力采用自重应力场。计算参数采用表 3 中岩体力学参数反分析值。计算强度准则选取弹塑性损伤准则^[29],该准则是基于 FLAC3D 内置的传统摩尔-库伦屈服准则、抗拉屈服准则与损伤准则相结合的复合屈服准则。

为探究水位变化对边坡稳定性的影响,分别对水位 2 681、2 785、2 845、2 865 m 工况进行数值计算。在正式计算开始前,需将模型在天然水位工况(2 600 m)计算至稳定,然后清除各物理量,由此作为初始状态继续计算不同水位工况下边坡稳定性。由图 7 可知,天然水位工况下,边坡最大合位移为 37 mm,临空向最大位移为 30 mm。这是由于开挖卸荷导致边坡整体向临空向移动,呈现中上部大、下部小的分布趋势。水位上升初期,边坡前缘断层劣化明显,进水塔口位移显著增加,最大位移超过 40 mm。由于支护锚杆等加固措施的施加,边坡位移随水位持续上升有所增长,但幅度逐渐放缓。岩体的损伤效应具有一定滞后性,在水位升至 2 845 m 后开始凸显,尤其集中于断层及进水塔口附近,这可能是水岩长期作用的

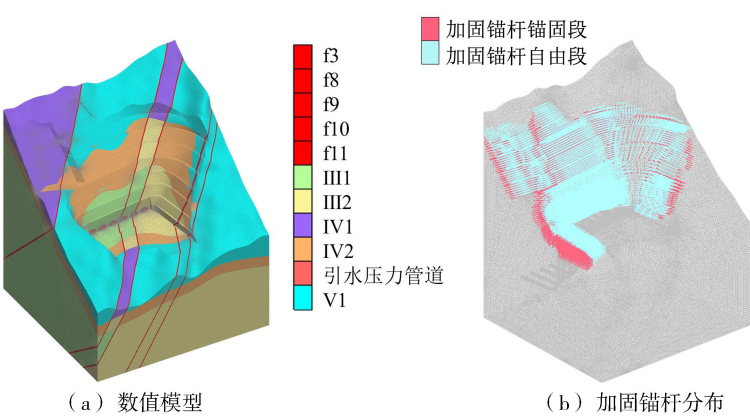


图 6 数值模型及加固锚杆分布
Fig. 6 Numerical model and distribution of reinforced anchors

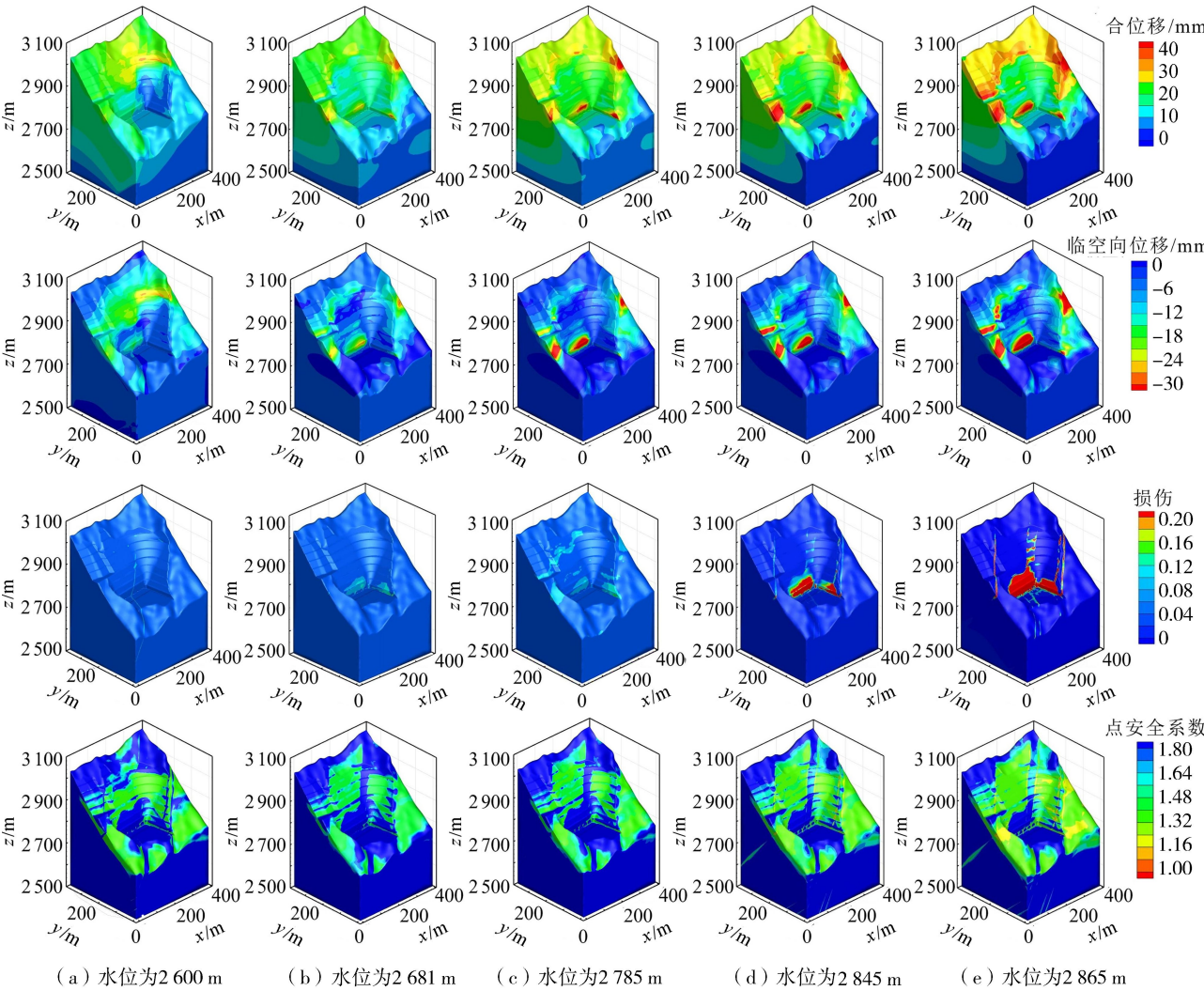


图 7 进水口边坡稳定性评价三维数值模拟结果

Fig. 7 3D numerical simulation results for the stability evaluation of the intake slope

结果。受库水位上升影响,边坡局部点安全系数有所下降,但整体点安全系数均大于 1.30。根据 NB/T 10512—2021《水电工程边坡设计规范》,进水口边坡为 A 类 I 级边坡,持久工况下的安全系数介于 1.25 ~ 1.30 之间,因此该边坡整体安全性较高,有一定安全裕度。但考虑到水对岩体长期及反复作用的影响,仍需加强边坡安全监测预警,注意安全防范。

4 结 论

- a. PSO-LSSVM-BP 模型虽牺牲了部分计算精度,但显著减少了正演数值模拟所需的巨大计算量和时间,大幅提高了计算效率。
- b. 将 PSO-LSSVM-BP 模型反分析得到的力学参数导入数值模型进行正演反馈计算,计算结果与实际安全监测位移数据吻合较好,验证了反演参数的合理性,亦说明本文所建立的 PSO-LSSVM-BP 模型可行有效。
- c. 对不同蓄水位工况下两河口水电站进水口边坡稳定性进行系统评价,发现水位是影响边坡稳定性的主要因素。随着水位上升,边坡各区域累计位移逐渐增大,其表面和断层区域的损伤程度也随之增大。边坡局部点安全系数有所下降,但整体点安全系数均大于 1.30,有一定安全裕度。

参考文献:

[1] 张家明. 含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报,2020,28(3):626-638. (ZHANG Jiaming. State of art and trends of rock slope stability with soft interlayer[J]. Journal of Engineering Geology,2020,28(3):626-638. (in Chinese))

[2] 高玉峰,王迪,张飞. 三维土质边坡稳定性分析方法研究现状与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):456-464. (GAO Yufeng, WANG Di, ZHANG Fei. Current research and prospects of 3D earth slope stability analysis methods[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(5):456-464. (in Chinese))

[3] 谢永利,刘新荣,晏长根,等. 特殊岩土体工程边坡研究进展[J]. 土木工程学报,2020,53(9):93-105. (XIE Yongli, LIU Xinrong, YAN Changgen, et al. Research progress of special soil and rock engineering slopes[J]. China Civil Engineering Journal,2020,53(9):93-105. (in Chinese))

[4] 周家文,陈明亮,瞿靖昆,等. 水库滑坡灾害致灾机理及防控技术研究及展望[J]. 工程科学与技术,2023,55(1):110-128. (ZHOU Jiawen, CHEN Mingliang, QU Jingkun, et al. Research and prospect on disaster-causing mechanism and prevention-control technology of reservoir landslides[J]. Advanced Engineering Sciences,2023,55(1):110-128. (in Chinese))

[5] 陈世壮,徐卫亚,石安池,等. 高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):83-93. (CHEN Shizhuang, XU Weiya, SHI Anchi, et al. Review of hazard chain of landslide surge for high dams and large reservoirs[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(3):83-93. (in Chinese))

[6] 周凤玺,朱顺望,梁玉旺,等. 变分极限平衡法对土质边坡稳定性的精确分析[J]. 岩土工程学报,2023,45(7):1341-1346. (ZHOU Fengxi, ZHU Shunwang, LIANG Yuwang, et al. Exact analysis of soil slope stability by using variational limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(7):1341-1346. (in Chinese))

[7] 洪勇,邵珠山,石广斌,等. 基于三维极限分析法的 GIM 和 SRM 边坡安全系数计算结果对比[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):112-120. (HONG Yong, SHAO Zhushan, SHI Guangbin, et al. Comparison of GIM and SRM calculated slope safety factor based on three-dimensional limit analysis method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):112-120. (in Chinese))

[8] SUN Guanhua, JIANG Wei, CHENG Shengguo, et al. Optimization model for determining safety factor and thrust line in landslide assessments[J]. International Journal of Geomechanics,2017,17(4):04016091.

[9] RENANI H R, MARTIN C D. Slope stability analysis using equivalent Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2020,53(1):13-21.

[10] XU Xiaoyi, ZHANG Guike, HUANG Wei, et al. Engineering safety evaluation of the high rock slope of a hydropower project: a case study of 684 m-high slope related to Lianghekou hydropower project at Yalong River[J]. Applied Sciences,2023,13(3):1729.

[11] 彭岩岩,刘宇航,王天佐,等. 数值模拟实验在岩土工程中的应用与展望[J]. 绍兴文理学院学报,2018,38(8):39-44. (PENG Yanyan, LIU Yuhang, WANG Tianzuo, et al. Application and prospect of numerical simulation experiment in geotechnical engineering[J]. Journal of Shaoxing University,2018,38(8):39-44. (in Chinese))

[12] 张伯艳,王璨,李德玉,等. 地震作用下水利水电工程边坡稳定分析研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(3):168-178. (ZHANG Boyan, WANG Can, LI Deyu, et al. The research progress on seismic stability analysis of slopes in water

conservancy and hydropower projects[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2018,16(3): 168-178. (in Chinese))

[13] 刘蕾,陈亮,崔振华,等. 逆层岩质边坡地震动力破坏过程 FLAC/PFC^{2D}耦合数值模拟分析[J]. 工程地质学报,2014,22(6):1257-1262. (LIU Lei, CHEN Liang, CUI Zhenhua, et al. FLAC/PFC^{2D} hybrid simulation for seismically induced failure process of toppling rock slope[J]. Journal of Engineering Geology,2014,22(6):1257-1262. (in Chinese))

[14] 王艳昆,温韬,王鲁琦,等. GeoStudio 与 FLAC3D 互馈的库岸滑坡多场信息模拟方法[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文),1-9[2024-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20240110.0912.002.html>.

[15] 陈光明,陈世壮,迟福东,等. 水库近坝高位滑坡滑带抗剪强度参数综合确定研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2024,46(2):8-14. (CHEN Guangming, CHEN Shizhuang, CHI Fudong, et al. Comprehensive study on shear strength parameters of high position landslide sliding zone near reservoir dam area[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2024,46(2):8-14. (in Chinese))

[16] 赵留园,黄雨. 地震作用下边坡随机动力分析方法的若干进展[J]. 工程地质学报,2020,28(3):584-596. (ZHAO Liuyuan, HUANG Yu. Advances in stochastic dynamic analysis of slopes under earthquakes[J]. Journal of Engineering Geology,2020,28(3):584-596. (in Chinese))

[17] 李向群,李宇熙,李苗. 岩土工程稳定性分析的不确定方法综述[J]. 吉林建筑大学学报,2017,34(2):25-28. (LI Xiangqun, LI Yuxi, LI Miao. The stability analysis method of fuzzy factors in geotechnical engineering[J]. Journal of Jilin Jianzhu University,2017,34(2):25-28. (in Chinese))

[18] 谢梦龙,叶新宇,张升,等. LASSO 算法及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程学报,2021,43(9):1724-1729. (XIE Menglong, YE Xinyu, ZHANG Sheng, et al. LASSO algorithm and its application in slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(9):1724-1729. (in Chinese))

[19] 徐飞,徐卫亚,刘造保,等. 基于 PSO-PP 的边坡稳定性评价[J]. 岩土工程学报,2011,33(11):1708-1713. (XU Fei, XU Weiya, LIU Zaobao, et al. Slope stability evaluation based on PSO-PP[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(11):1708-1713. (in Chinese))

[20] 聂卫平,徐卫亚,王伟. RandWPSO-LSSVM 反演方法及其在大型地下工程中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(4):1626-1633. (NIE Weiping, XU Weiya, WANG Wei. RandWPSO-LSSVM inversion method and its application in large-scale underground engineering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2013,44(4):1626-1633. (in Chinese))

[21] 谷淡平,凌同华,黄阜. 考虑参数不确定性的台阶式边坡滑面强度参数反演分析[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(5):1186-1193. (GU Danping, LING Tonghua, HUANG Fu. Back analysis of strength parameters for the slip surface of stepped slope considering parametric uncertainties[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2019,16(5):1186-1193. (in Chinese))

[22] 蒋水华,朱明明,曾绍慧,等. 基于贝叶斯更新方法的尾矿坝材料参数随机反演[J]. 岩土工程学报,2020,42(增刊2):77-82. (JIANG Shuihua, ZHU Mingming, ZENG Shaohui, et al. Stochastic back analysis of material parameters of tailings dams using Bayesian updating approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(Sup2):77-82. (in Chinese))

[23] 张帅,贺拿,钟卫,等. 滑坡灾害监测与预测预报研究现状及展望[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2021,43(5):39-48. (ZHANG Shuai, HE Na, ZHONG Wei, et al. Review and prospect on landslide disaster monitoring and prediction[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),2021,43(5):39-48. (in Chinese))

[24] 凌建明,张玉,满立,等. 公路边坡智能化监测体系研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2118-2136. (LING Jianming, ZHANG Yu, MAN Li, et al. Research progress of intelligent monitoring system for highway slope[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(7):2118-2136. (in Chinese))

[25] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] //Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. Perth;IEEE,1995:1942-1948.

[26] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. Nature,1986,323(6088):533-536.

[27] 许晓逸,张贵科,陈世壮,等. 基于优化支持向量回归的磨古倾倒变形体参数反分析研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2024,46(3):15-22. (XU Xiaoyi, ZHANG Guike, CHEN Shizhuang, et al. Inverse analysis of mechanical parameters of Mogu toppling deformed slope based on improved SVR model[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2024,46(3):15-22. (in Chinese))

[28] 李红亚,彭昱忠,邓楚燕,等. GA 与 PSO 的混合研究综述[J]. 计算机工程与应用,2018,54(2):20-28. (LI Hongya, PENG Yuzhong, DENG Chuyan, et al. Review of hybrids of GA and PSO[J]. Computer Engineering and Applications,2018,54(2):20-28. (in Chinese))

[29] 许晓逸. 岩石高边坡安全监测数据分析及稳定性研究[D]. 南京:河海大学,2023.