

基于有限元分析的特高拱坝实时风险率模型

何梦佳^{1,2,3}, 陈波^{1,2,3}, 刘庭赫⁴, 詹明强⁵, 吴诚姝⁶

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098; 4. 中水东北勘测设计研究有限责任公司,
吉林 长春 130021; 5. 福建水口发电集团有限公司, 福建 福州 350001;
6. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:针对目前特高拱坝实时风险率模型存在过于依赖监测统计、难以联系结构物理特征和临界状态、实测资料与临界状态间映射关系模糊等问题,提出了一种基于有限元正反分析的特高拱坝实时风险率模型。该模型基于麻雀搜索算法(SSA)和多输出支持向量回归(MSVR)反演确定坝体与地基综合物理力学参数,通过塑性应变能判据计算极限状态下的大坝服役超载安全系数,确定临界变形值,并根据工程可靠度理论及拱坝安全规范,得出实时风险率。西南地区某特高拱坝的实例验证结果表明:该模型可有效联结特高拱坝变形监测资料与工程临界状态间的关系,提升坝体弹性模量与坝基变形模量的反演效率,实现特高拱坝的结构安全监控预警,可用于特高拱坝长期工作性态评估和风险率实时管控。

关键词:特高拱坝;有限元正反分析;实时风险率;工程可靠度;监测预警

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)06-0113-10

Real-time risk rate model for extra-high arch dams based on finite element analysis//HE Mengjia^{1,2,3}, CHEN Bo^{1,2,3}, LIU Tinghe⁴, ZHAN Mingqiang⁵, WU Chengshu⁶ (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. China Water Northeastern Investigation Design and Research Corporation Limited, Changchun 130021, China; 5. Fujian Shuikou Power Generation Group Corporation Limited, Fuzhou 350001, China; 6. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the problems of the current real-time risk rate models for extra-high arch dams, such as over-reliance on monitoring statistics, difficulty in linking the physical characteristics of the structure and the critical state, and ambiguous mapping relationship between the measured data and the critical state, a real-time risk rate model for extra-high arch dams based on the finite element forward and inverse analysis is proposed. This model uses the sparrow search algorithm (SSA) and multi-output support vector regression (MSVR) inversion to determine the integrated physical and mechanical parameters of the dam body and foundation. Using the plastic strain energy criterion, it calculates the safety factor against overload of the dam in service under the limit state, identifies the critical deformation values, and derives the real-time risk rate based on the theory of engineering reliability and the safety specification of arch dams. The results of a case study of an extra-high arch dam in Southwest China show that the model can effectively link the relationship between the deformation monitoring data of the extra-high arch dam and the critical state of the project, improve the inversion efficiency of the elastic modulus of the dam body and the deformation modulus of the dam foundation, and realize the structural safety monitoring and early warning of extra-high arch dams. It can be used for long-term performance assessment and real-time risk rate control of extra-high arch dams.

Key words: extra-high arch dam; finite element forward and inverse analysis; real-time risk rate; engineering reliability; monitoring and warning

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52079049);国家自然科学基金重点项目(52239009);全国重点实验室基本科研业务费专项资金资助项目(522012272,5230248A2)

作者简介:何梦佳(2000—),女,硕士研究生,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:982397816@qq.com

通信作者:陈波(1986—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:chenbohhu@126.com

随着全球范围内水电能源的持续开发和利用,我国在特高拱坝建设方面成就斐然。自 20 世纪 90 年代以来,我国成功建设了金沙江上的乌东德、溪洛渡、白鹤滩,澜沧江上的小湾,雅砻江上的锦屏一级,乌江流域的构皮滩,黄河上游的拉西瓦等多座特高拱坝^[1]。相较于一般的大坝,特高拱坝工程复杂程度更高,其结构的力学行为更复杂,因此工程建设和运行安全控制要求也更严格^[2]。SL 282—2018《混凝土拱坝设计规范》明确指出,对于坝高大于 200 m 的特高拱坝的设计,应在执行现有规范的同时,对拱坝结构、拱座稳定、水力设计、坝基处理、温度控制及防裂措施等进行专门研究。目前我国特高拱坝水推力巨大,如锦屏一级拱坝约为 1 280 万 t,溪洛渡拱坝约为 1 300 万 t,小湾拱坝约为 1 700 万 t^[3];特别是我国特高拱坝基本建设于西南地区地质结构复杂的峡谷之中,其基础开裂机理研究与整体稳定性安全评价工作更为复杂。此外,近几年我国西南地区特高拱坝频繁遭遇强降雨、大范围洪水等极端水文事件,使得特高拱坝在巨大水推力作用下的变形安全问题形势更为严峻。因此,巨大水推力作用下特高拱坝的变形破坏分析和变形破坏风险率把控仍是影响特高拱坝设计与安全评估的重要问题。

大坝变形是大坝运行状态的最直观反映,也是评价大坝安全的重要因素^[4]。结构变形监测数据驱动的监测模型在大坝安全监测中应用广泛^[5-6]。这些模型大致可分为 3 类:基于结构健康监测数据的统计模型、确定性有限元模型和混合模型。随着计算机技术的发展,神经网络和深度学习等新算法被引入到大坝变形监测模型的研究中。例如:张建中等^[7]运用优化变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 与门控循环单元 (gated recurrent unit, GRU) 算法构建了坝体变形预测模型;刘伟琪等^[8]结合凝聚层次聚类算法与多输出最小二乘支持向量机构建了反映坝体空间特征的变形预测模型;葛盼猛等^[9]引入核主成分分析算法以识别多测点序列中的异常值,有效提升了变形预测模型的效率与精度;张才溢等^[10]结合自适应粒子群优化算法优化孪生支持向量机模型,深度挖掘了坝体监测信息的复杂非线性关系;王晓玲等^[11]引入自适应聚类结合双向长短期记忆网络构建了变形时空预测模型;王瑞婕等^[12]引入 Stacking 集成学习思想,从算法和因子两个方向进行集成,构建了大坝变形组合预测模型。这些模型在大坝结构健康监测中发挥着关键作用。然而,若观测数据未涵盖负荷的极值(如水位、温度等),或者观测数据序列较短,那么基

于结构健康监测数据开发的数学模型将难以用于有效监测。此外,由于统计模型和智能算法模型主要依赖于数学处理,它们与大坝和基础结构的行为之间缺乏紧密联系,因此难以从力学角度对大坝的工作状态进行解释。再者,在不考虑结构力学特性的情况下,仅使用数理统计方法来建立监测指标可能不够严谨^[13]。确定性模型^[14-17]主要依赖有限元计算,能够更准确地计算水压分量,但是需要复杂且耗时的计算工作。相比之下,混合模型^[18]充分利用了统计理论和有限元仿真的优势,有效弥补了统计模型和确定性模型的不足。

混合模型的第一个关键点在于恰当选取结构的材料力学参数。然而,特高拱坝在服役期间,其坝体和周围岩体受到水压、温度和其他环境因素等多方面影响,导致大坝结构性态发生变化^[19]。在考虑温度、水位、流固耦合以及材料老化等多方面影响的情况下,只有通过材料试验或混凝土弹性波试验,才能明确大坝材料性能的演变^[20-21]。因此,有必要基于坝体结构原型监测数据进行反演,以确定坝体和基础的材料力学参数^[22-23]。这种方法的优势在于将实际大坝结构响应与三维数值模拟相结合^[24]。通过对坝体材料力学参数进行逆向分析,可以提取坝体变形信息,总结坝体变形与失稳规律,为计算风险率与警戒值提供较为准确的力学参数。

混合模型的第二个关键点在于判定结构的临界状态。目前对于临界状态的判定方法大致可分为位移突变判据、塑性区贯通判据、塑性应变能判据 3 类。其中,位移突变判据需对坝体整体与局部变形进行详细分析,并确定失稳控制点,对失稳控制点选取的精准度要求较高;塑性区贯通判据对坝基参数取值较为敏感,因此对失稳临界状态的判定有一定困难;而塑性应变能判据通过计算拱坝塑性应变能的总值确定大坝服役状态,是一种相对较为优越的拱坝失稳判据^[25]。当前,中国高拱坝建设已进入数字控制时代^[26]。2008 年,朱伯芳等^[27-28]提出了“大坝数字监控设想”,即将原位监测与数值仿真相融合,以共同构建“数字大坝”,实现对坝体服役状态的预判。

本文基于变形监测数据和三维有限元数值模拟方法,利用麻雀搜捕算法 (sparrow search algorithm, SSA) 优化多输出支持向量机 (multi-output support vector regression, MSVR) 模型的核函数与惩罚因子,利用超载法联合塑性应变能判据以及突变模型,确定拱坝在临界超载强度下的临界水压分量,通过结构分析法和概率可靠度模型,对坝体进行实时风险率计算,并根据工程可靠度设定风险率最大阈值,建

立了特高拱坝实时风险率模型,并用我国西南地区某特高拱坝进行了验证,以期实现对特高拱坝的数字化风险监控。

1 实时风险率计算

1.1 基于概率可靠度理论的风险率

设大坝可靠度受 n 个随机变量的影响,其功能函数可表示为

$$Z = g(x_1, x_2, \cdots, x_n) \tag{1}$$

式中 Z 为功能函数,反映大坝服役状态。若将大坝荷载效应记为 S ,结构抗力记为 R ,则 $Z=R-S$ 。大坝功能函数小于 0 时的概率称为大坝的失效概率,考虑荷载效应和抗力相互独立,概率密度函数分别为 $f_s(s)$ $f_R(r)$,概率分布函数分别为 $F_s(s)$ 、 $F_R(r)$,大坝实时风险率可表示为

$$P_f = P(R \leq S) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_R(r) f_s(s) dr ds = \int_{-\infty}^{+\infty} F_R(r) f_s(s) ds \tag{2}$$

功能函数的均值 $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$, 标准差 $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$,此时大坝运行风险率表达式为

$$P_f = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} \exp\left[-\frac{(z - \mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2}\right] dz \tag{3}$$

令 $y = \frac{z - \mu_Z}{\sigma_Z}$,则大坝运行风险率可表达为

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} \varphi(y) dy = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = 1 - \Phi(\beta) \tag{4}$$

其中

$$\varphi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)$$

式中: β 为可靠度, $\beta=\mu_Z/\sigma_Z$; Φ 为标准正态函数。

1.2 基于结构分析的大坝实时风险率

坝体变形是大坝服役状况最直观且有效的表现,无论是大坝稳定、渗流还是应力状况出现问题,大坝失效模式与失效的路径如何,最终都会在大坝变形上有所反馈^[16]。因此,可以将变形性态视为风险管理体系与结构分析预警体系的交集部分。图 1 为风险管理体系与通过结构分析拟定的变形预警指标体系的交集图。在考虑坝体强度和稳定的基础上,借助有限元模型计算临界变形的约束条件,此时坝体位移为隐函数,需根据大坝性能发生转异的准则,同时以强度和稳定作为控制条件确定大坝变形控制值:

$$x_{lim} = f(\sigma_u, \sigma_d, \sigma_s, [K], c, f', K) \tag{5}$$

式中: x_{lim} 为拟定的变形控制值; f 表示大坝性能发生转异的判定准则; σ_u 、 σ_d 、 σ_s 分别为不同荷载组合下的坝踵应力、坝趾应力和混凝土容许拉应力; $[K]$ 、 K 分别为不同荷载组合下的容许安全系数和稳定安全系数; c 、 f' 分别为黏聚力和摩擦系数的设计值。

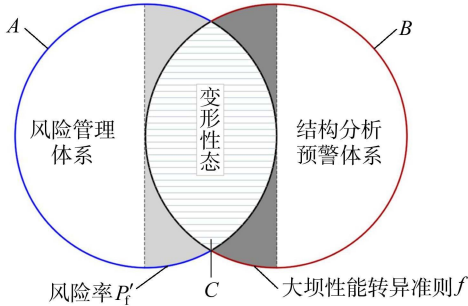


图 1 两种不同体系交集

以 C 表示风险管理体系 A 和结构分析预警体系 B 的交集部分,含义为将测值转换为大坝运行实时风险率。图 1 中仍保留一定的非交集区域,表示混凝土坝可能出现的其他破坏模式。在考虑变形性态的基础上,基于结构分析的实时风险率为

$$P'_f = F(x_i, P_f) \tag{6}$$

式中: P'_f 为测值转换的实时风险率; F 为转换函数; x_i 为 i 时刻的实测变形值。

假设存在大坝长期变形监测序列 $\{x_i | i=1, 2, \cdots, n\}$,以实测变形相对于临界变形的接近程度表示工程历年的实时风险状态,定义转换系数 ζ 为

$$\zeta = 1 - \frac{x_{lim} - x_i}{x_{lim}} = \frac{x_i}{x_{lim}} \tag{7}$$

由于不同年份变形实测值的变化范围不同,进一步修正转换系数得到 ζ' :

$$\zeta' = \frac{x_i - x_{min}}{x_{lim} - x_{min}} \tag{8}$$

式中 x_{min} 为历史实测变形的极小值。

将测值转换为实时风险率 P'_f :

$$P'_f = \zeta' P_{rf} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{lim} - x_{min}} P_{rf} \tag{9}$$

式中 P_{rf} 为结构可靠度规范中拟定的容许风险率指标。

2 弹性模量反演

2.1 反演基本原理

大坝力学参数反演的基本原理是:建立统计模型,得到水压分量 δ_H ;假定坝体和坝基弹性模量 E_c 与 E_s ,利用有限元模型模拟出由相同水位引起的变形 δ'_H 。当 δ'_H 与 δ_H 近似相等时,认为假定弹性模量

与真实弹性模量较接近;反之,当 δ'_H 与 δ_H 相差较大时,认为假定的弹性模量偏离实际值。经过不断迭代与调整,可得到较为客观准确的弹性模量。

在外部荷载作用下,大坝任一点变形统计回归模型表示为

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \tag{10}$$

据此分离水压分量:

$$\delta_H = \delta - \delta_T - \delta_\theta \tag{11}$$

其中
$$\delta_T = \sum_{i=1}^2 \left(b_{1i} \sin \frac{2\pi it}{365} + b_{2i} \cos \frac{2\pi it}{365} \right)$$
$$\delta_\theta = c_1 \theta / (c_2 + \theta)$$

式中: b_{1i} 、 b_{2i} 为温度分量的回归系数; t 为时间; θ 为 t 除以 100; c_1 、 c_2 为时效分量的回归系数。

由上述分析可知,从实测变形资料中可分离出水压分量 δ_H ,有限元模拟变形为 δ'_H ,若假定坝体或坝基的弹性模量为 E_0 ,则可得到较为客观准确的弹性模量 E :

$$E = E_0 \delta'_H / \delta_H \tag{12}$$

2.2 SSA-MSVR 算法

SSA-MSVR 算法是指利用 SSA 对 MSVR 模型中的惩罚因子与核函数进行优化反演的算法。SSA 是一种新型原启发式智能优化算法,其基本思想是在麻雀种群捕食行为中引入预警机制进行寻优。本文设置发现者、加入者、侦查者的比例为 70%、10%、20%。

MSVR 是一种基于多输入与多输出之间非线性关系进行高维空间线性拟合的算法模型,其基本思想是通过构建非线性映射函数,将建立的多输入与多输出之间的非线性关系转化成高维空间的线性拟合关系。建立回归方程,通过对回归函数在拟合时产生的一个微小拟合误差进行优化以解决支持向量回归问题。

SSA-MSVR 可提升模型稳定性与精度,提升模型拟合与泛化优势,进一步提高模型的自适应能力^[29]。

2.3 SSA-MSVR 参数优化反演目标函数

实际应用中,混凝土材料常被视为准线弹性材料,而监测值也会在监测过程中存在一定数据波动,因此需进行优化反演。通过正分析,利用有限元模型计算的位移为

$$\delta = f(E, \mu, P, \Gamma, \Delta) \tag{13}$$

式中: μ 为泊松比; P 为荷载; Γ 为约束条件; Δ 为其他综合影响因素。对于有限元模型设定的计算模型, P 、 Γ 、 Δ 3 项可视作不变量;而由于混凝土材料常被视为准线弹性材料, μ 一般设置为常量。

设定模型的均方根误差为适应度函数 m :

$$m = \frac{1}{ab} \sqrt{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (y_{pij} - y_{ij})^2} \tag{14}$$

式中: a 为测试样本数; b 为测点数; y_{pij} 为第 i 组测试样本第 j 个测点的位移计算值; y_{ij} 为第 i 组测试样本第 j 个测点的位移实测值。

取适应度函数的最小值作为反演问题的目标函数 Q 。

2.4 SSA-MSVR 反演流程

本文基于 SSA-MSVR 算法进行坝体综合弹性模量与基岩变形模量的反演分析。SSA-MSVR 反演流程步骤如下:

步骤 1 拟定数据范围。根据工程相关资料确定坝体弹性模量与坝基变形模量的反演范围,拟定多种参数组合。利用 Abaqus 建立三维有限元模型,计算相应荷载与参数组合下的测点径向位移,并将相应参数组合计算得到的径向位移作为计算样本,其中 80% 作为训练集,20% 作为测试集。

步骤 2 训练模型。将材料参数组合作为模型输入,将有限元计算的径向位移作为模型输出,对其进行 MSVR 模型训练。此外,采用 SSA 对 MSVR 中的核函数与惩罚因子进行优化。如果 MSVR 训练模型精度不满足要求,继续对核函数与惩罚因子参数优化,直至满足精度要求,停止训练。

步骤 3 参数寻优。在搜索材料参数时,采用 SSA 时会随机生成新的参数组合,并将其输入已训练完成的 MSVR 模型中。随后,以实测的径向位移作为目标,计算该参数组合的适应度,从而评估其性能。最终,选取适应度最优的一组参数作为最终的最优参数。

步骤 4 迭代更新。调整参数组合后,对其进行位移和适应度的计算。如果新的适应度优于当前最优适应度,则将该组材料参数视为最优参数并进行更新;反之,则保留当前最优参数。

步骤 5 迭代控制。检查迭代次数是否已经达到设定的最大迭代次数。如果已经达到最大迭代次数,则输出当前的最优参数组合和对应的最优适应度,并终止迭代。反之,如果迭代次数未达到最大限制,则重复执行步骤 4。

步骤 6 评估精度。采用反演得到的最优参数,代入有限元模型进行正向计算,得到各测点的径向位移。随后,将计算结果与实测数据进行比较,评估精度是否符合要求。如果精度满足要求,则将当前结果确认为最终的反演结果;反之,返回到步骤 3,进行迭代更新。

3 坝体-坝基系统临界失稳状态判定

3.1 塑性应变能

大坝在新建成状态或健康服役状态下,整体结构保有弹塑性材料的基本功能,系统塑性应变能几乎为零,而当荷载逐步增加以致超出坝体或地基荷载承受能力时,局部材料发生屈服,将会发生地基或坝体局部失稳,系统塑性应变能会逐渐增大直至突变,引发大坝以及地基系统失稳风险。因此,可将坝体与地基工程影响区域视为一个系统,将坝体与地基单元的应变能作为坝体失稳状态的判定依据^[30],该系统的塑性应变能为

$$W = \sum_{l=1}^n \int_{V_{pl}} \sigma_{plj} \varepsilon_{plj} dV_{pl} \tag{15}$$

式中: n 为发生屈服的单元数; σ_{plj} 为屈服单元的应力张量; ε_{plj} 为屈服单元的塑性应变张量; V_{pl} 为屈服单元的体积。

3.2 失稳突变模型

对于拱坝失稳问题,尖点突变模型应用最为广泛。在有限元模拟中,随着超载系数 K 的不断加可得到不同强度下的失稳考察量 W 的变化,因此,可将系统塑性应变能视为连续的变化量,对 K 与 W 的关系进行四阶泰勒级数展开:

$$W = f^4(K) = g_0 + g_1K + g_2K^2 + g_3K^3 + g_4K^4 \tag{16}$$

式中 g_0, g_1, g_2, g_3, g_4 为系数。

对式(16)作 Tschirnhaus 变换^[31]化为标准形式,令 $K=p-q, q=\frac{g_3}{4g_4}$,代入式(16)得:

$$W = d_4p^4 + d_2q^2 + d_1p_1 + d_0 \tag{17}$$

其中 $d_0 = g_4q^4 - g_3q^3 + g_2q^2 - g_1q + g_0$

$$d_1 = -4g_4q^3 + 3g_3q^2 - 2g_2q + g_1$$

$$d_2 = 6g_4q^2 - 3g_3q + g_2 \quad d_4 = g_4$$

令 $p=\sqrt[4]{h/(4d_4)} \ (d_4>0)$,代入式(17)得:

$$W = \frac{1}{4}h^4 + \frac{1}{2}gh^2 + dh + c \tag{18}$$

其中 $c = d_0 \quad g = d_2/\sqrt[4]{d_4} \quad d = d_1/\sqrt[4]{4d_4}$

式中: h 为状态变量; g, d 为控制变量。式(18)构成考察量 W 的尖点特征突变模型。对式(18)进行对 h 的求导,令其导数为零,得到平衡曲面方程:

$$h^3 + gh + d = 0 \tag{19}$$

继续求导可得分叉集方程:

$$4g^3 + 27d^2 = 0 \tag{20}$$

临界失稳状态判定式为

$$l = 4g^3 + 27d^2 \tag{21}$$

$l=0$ 代表拱坝处于失稳状态临界点;而 $l>0$ 与 $l<0$ 分别代表拱坝稳定与不稳定状态。

4 实时动态预警

4.1 预警指标的选定

本文所研究的特高坝结构,在服役过程中发生的破坏一般是非突发性的,失事后果很严重,依据 GB 50199—2013《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》和文献[32],该工程的安全级别应归属于一级,破坏类型属于一类破坏,由此选定目标可靠度指标 β_l 为 3.7,对应容许风险率 P_{rf} 为 1.0×10^{-4} 。

4.2 实时预警流程

基于结构分析的实时风险率,构建预警流程如下:

步骤 1 由有限元正反分析确定大坝服役性能发生转异时的临界变形值 x_{lim} ,并以历年实测变形的极小值 x_{min} 作为基准,生成测值的可靠区间 (x_{min}, x_{lim}) 和风险区间 $(x_{lim}, +\infty)$ 。

步骤 2 参考结构可靠度统一标准确定容许风险率指标 P_{rf} ,结合临界变形值 x_{lim} 以及实测值 x_i 计算各时刻的实时风险率 P'_i 。

步骤 3 由于历年的变形极大值与警戒值最为接近,故将历年的变形极大值作为典型测值,输出对应的历年实时风险率极值 P'_{fmax} 。

步骤 4 对比目前的实时风险率极值 P_{fmax} 与设定的容许风险率指标 P_{rf} ,当 $P_{fmax} > P_{rf}$ 表征工程出现风险。

5 实例验证

5.1 有限元结构分析

我国西南地区某特高拱坝为混凝土双曲薄拱坝,坝高 305 m,根据工程设计和地质勘查资料,建立三维有限元模型如图 2 所示。模型计算范围考虑以拱坝中心线向左右岸方向各延伸 4 倍坝高(约 1200 m),坝顶原点向上下游方向各延伸 2.5 倍坝高(约 750 m),建基面以下延伸 2.5 倍坝高(约 700 m)。此外,根据地质勘查资料,结合基岩断层与软弱地带的分布划分网格,使单元尽量反映实际坝体与坝基状态,包括主要软弱结构面: $F_2, F_5, F_{42-9}, F_{13}, F_{14}, F_{18}, F_8$ 以及煌斑岩脉,并对左岸垫座以及混凝土固结灌浆做了相应模拟。岩体分区见图 3。模型采用六面体八节点等参单元,部分区域考虑地形地质影响,采用五面体六节点等参单元。模型共划分 919 148 个单元,950 944 个节点,其中坝体单元共 29 840 个,节点 36 079 个。

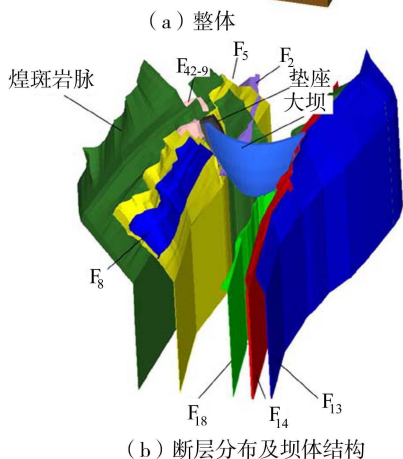
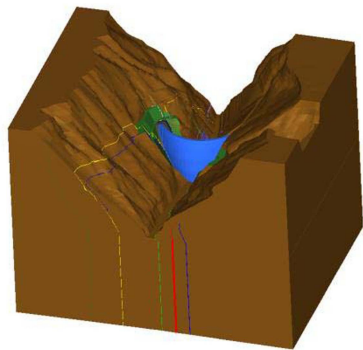


图2 某特高拱坝三维有限元模型

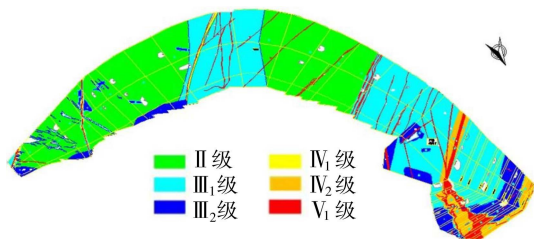


图3 坝基岩体分区

考虑拱坝坝体内部结构复杂,分区固然可以提升精度,但同时会影响反演效率,而用综合弹性模量完全可以满足坝体位移计算的精度要求,因此对坝体混凝土弹性模量不进行分区讨论,选用综合弹性模量 E_0 。由图3可知,拱坝基岩中Ⅱ级岩体与Ⅲ₁级岩体分布较广,在参数选取时应考虑两类岩体参

表1 参数设计组合及径向位移有限元模型计算值

编号	水位/m	E_0 /GPa	E_{II} /GPa	E_{III_1} /GPa	径向位移/mm					
					PL13-1	PL13-2	PL13-3	PL13-4	PL13-5	IP13-1
1	1833	33	28	10	26.55	26.32	29.56	26.59	23.41	15.23
2	1833	29	29	11	27.21	27.56	29.52	27.20	23.62	15.26
3	1833	30	30	12	27.06	28.20	28.77	28.91	23.53	15.74
4	1833	31	31	13	26.49	27.84	28.63	27.42	23.85	15.28
5	1833	32	32	15	26.89	26.54	28.42	26.92	23.51	15.79
6	1833	31	30	13	26.42	26.43	29.21	26.41	23.65	15.20
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
122	1876	31	32	14	27.89	28.11	29.53	27.95	23.52	15.99
123	1876	29	31	15	27.85	28.13	29.68	27.96	23.88	16.20
124	1876	30	30	13	27.62	27.96	28.13	27.74	23.44	15.84
125	1876	32	29	12	26.51	27.21	29.17	27.13	23.51	16.33

数变化,其余分区采用设计值。因此选取 E_0 (坝体)、 E_{II} (Ⅱ级岩体)以及 E_{III_1} (Ⅲ₁级岩体)为待反演参数,3个分区参数变化范围参考工程地质资料, $E_0=29\sim 33$ GPa, $E_{II}=28\sim 32$ GPa, $E_{III_1}=10\sim 15$ GPa。

该工程拱坝监测垂线采用正、倒垂线相结合的方法布置。垂线监测点布置如图4所示,本文选取该拱坝中间垂线上的PL13-1、PL13-2、PL13-3、PL13-4、PL13-5、IP13-1作为测点分别进行坝基Ⅱ级岩体变形模量、坝基Ⅲ₁级岩体变形模量和坝体综合弹性模量的反演,其中IP13-1测点与建基面接近,可较为可靠的反映坝基岩体弹模的变化,其余5个测点均匀分布在坝体不同高程,可以较好地反映坝体位移变化规律。

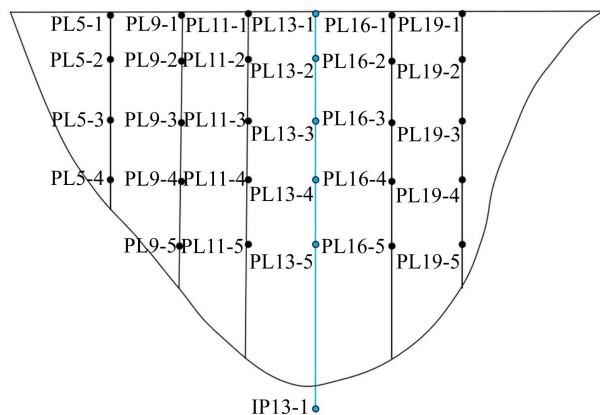


图4 垂线监测点布置

实测资料表明,该特高拱坝正常运行期间上游水位在1800~1880 m范围内变动。本次反演选择短期内水位变化较快的时段,即2020年7月水位上升阶段,以水位1833、1844、1853、1865、1876 m作为特征水位进行反演。该时段水位变化范围较大,位移变化方向更明确,能更准确反映拱坝荷载与位移变化规律。在5个特征水位工况下,对 E_0 、 E_{II} 以及 E_{III_1} 运用拉丁超立方方法均匀生成25组参数设计组合,共有125组参数组合。表1为不同参数组合下有限元模型的径向位移值。

在 MSVR 模型参数优化中,前 100 组数据作为训练样本集,后 25 组作为测试样本集,进行适应度计算。利用 SSA 对模型的核函数和惩罚因子进行参数寻优,其中核函数范围为 0~500,惩罚因子范围为 0~3 000,麻雀数量为 30,最大迭代次数为 1 000 次,得到的核函数与惩罚因子最优值分别为 3.25 和 2 100,MSVR 模型拟合位移与 Abaqus 测试样本计算位移误差范围为-2.94~2.43 mm,最大位移偏差率仅为 5.8%,拟合效果良好。

选取 2020 年 7 月 1 日与 2020 年 8 月 31 日的实测位移差值作为目标位移值进行反演。将 4 个观测点的位移差值代入模型中,反演得到 $E_0 = 32.09 \text{ GPa}$, $E_{\parallel} = 29.92 \text{ GPa}$, $E_{\perp} = 12.85 \text{ GPa}$ 。将反演得到的参数与工程实际资料相比,坝体弹性模量基本一致,坝基岩体变形模量较大,反演规律与文献[33]一致。

5.2 塑性应变能突变判据

按照上述反演结果更新有限元模型中的坝体与坝基的材料参数设定值,并采用水容重超载法进行正演分析。以正常蓄水位 1 880 m 为例进行说明,设超载系数 K 取值范围为 1~8,分析坝体-坝基系统在不同荷载强度下的总塑性应变能,并结合尖点突变理论判据确定大坝服役性态发生转异时的超载系数,进而拟定该超载系数下的最大坝体变形值为特高拱坝发生变形破坏时的临界变形值。模型坝体和坝基均采用 Drucker-Prager 弹塑性本构模型,荷载主要考虑拱坝坝基自重、上下游水压力、扬压力以及淤沙压力。当超载系数为 K_i 时,取前 i 个超载系数与系统总塑性应变能进行四次多项式拟合,通过突变特征方程求得超载系数 K_i 相应的突变特征值 Δ_i 。随着 K_i 的增大, Δ_i 将从稳定状态的大于零阶段逐渐减小,当 $\Delta_i = 0$ 时,系统处于稳定与失稳状态的临界状态,此时 K_i 为临界超载系数,而相应的有限元正演得出的坝体水压分量作为临界水压分量,结合此时统计模型温度分量与时效分量,计算临界变形值。

超载过程中系统塑性应变能的变化曲线如图 5 所示。

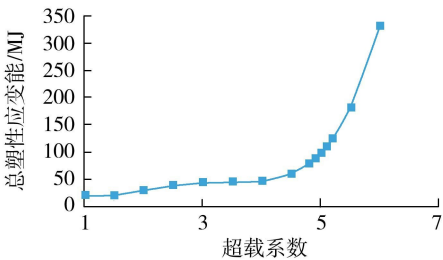


图 5 典型工况下总塑性应变能随超载系数的变化曲线

由式(16)~(18)可计算出不同超载系数下相

应总塑性应变能,当超载系数为 5.12 时,对 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、4.8、4.9、5.0、5.12、5.2、5.5、5.6、6.0 共 15 个超载系数集进行四次多项式拟合,得到超载系数与塑性应变能的多项式:

$$W = 105.418 - 182.261K + 127.559K^2 - 33.971K^3 + 3.136K^4 \quad (22)$$

然后根据拟合系数,建立突变模型标准形式:

$$W = r^4/4 - 5.891r^2/2 + 5.503r + 41.314 \quad (23)$$

由式(22)计算得 $K = 5.12$ 时的特征值为 0.001,图 6 为突变特征值随超载系数的变化曲线,其中 $K = 5.12$ 时可视为拱坝接近稳定与失稳的临界状态。

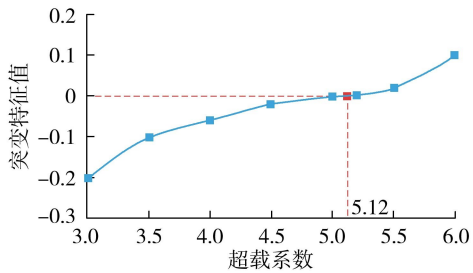


图 6 典型工况下突变特征值随超载系数的变化曲线

图 7 为坝基面和坝体径向位移随超载系数变化曲线。随着超载系数的增大,特高拱坝的径向位移经历了明显的演化过程。从拱坝坝顶径向位移可知,当超载系数 $K = 5.12$ 时左坝肩 4 号坝段坝顶径向位移产生突变;当超载系数分别为 5.10 和 5.11 时左岸 1/4 拱圈和 3/4 拱圈坝顶径向位移分别产生突变;当超载系数为 5.14 时,右坝肩 19 号坝段坝顶径向位移产生突变。从拱坝左右两岸坝肩建基面径向位移可知,当超载系数分别为 5.11 和 5.12 时,左坝肩 4 号坝段建基面岩体和右坝肩 29 号坝段建基面岩体径向位移产生突变。

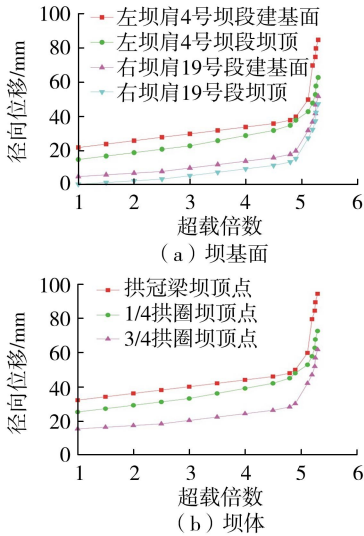


图 7 坝基面和坝体径向位移随超载系数变化曲线

图 8 给出了超载系数为 1.5~6.5 时的上游面屈服区。超载系数为 1.5 时,大坝处于弹性变形状态,无屈服区出现;当超载系数为 3.5 时,坝基和坝体局部开裂,此时可认为大坝由完全弹性进入弹塑性阶段,局部出现屈服;进一步增加水容重,当超载系数为 5.1 时,屈服区开始发展,总塑性应变能发生明显突变,可视为失稳临界状态;当超载系数为 5.1~6.5 时,部分塑性区发生渐进式的、逐步扩展的贯通,模型计算结果不再表现出收敛性,此时可认为大坝完全失去了承载能力。

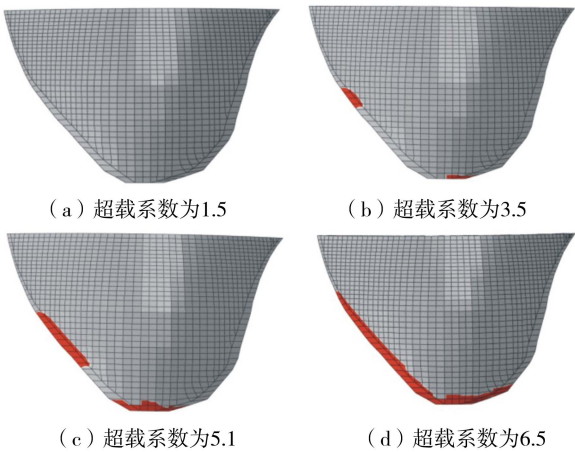


图 8 超载系数为 1.5~6.5 时的上游面屈服区

综上分析,以坝体-地基系统塑性应变能发生突变时的超载系数作为大坝服役性能发生转异时的超载系数,则该特高拱坝的超载安全系数取为 5.12。由此得到该特高拱坝服役性能转异时水压引起的各测点临界变形,其中位于坝顶 PL11-1 测点的径向变形最大,为 300.6 mm。

根据多年监测资料分析,该特高拱坝目前仍处于水化热散热期,有形成稳定温度场的趋势,但相对于封拱温度而言仍处于小范围的升温状态。对于温度分量,以封拱温度为基准,将 2020 年 7 月实测温度与封拱温度差值作为温度荷载,如表 2 所示。如坝顶拱冠部位变形控制测点 PL11-1,计算温度分量为 -2.64 mm,结合有限元模拟的临界水压分量,根据式 (10)~(12),该测点的临界变形值可表示为与时间相关的动态函数:

$$x_{lim} = \delta - \delta_T - \delta_\theta = 297.96 - 4.97\theta / (\theta + 1) \quad (24)$$

表 2 实测温度荷载

高程/m	实测平均温度/℃	封拱温度/℃	高程/m	实测平均温度/℃	封拱温度/℃
1885	17.2	15.0	1710	14.2	13.0
1870	16.2	15.0	1670	14.1	13.0
1830	14.4	14.0	1630	13.3	13.0
1790	14.1	14.0	1600	13.3	13.0
1750	14.0	13.0	1580	13.2	13.0

5.3 实时风险率转换及预警结果

在监控预警中,历年实测变形的极大值与临界值最为接近,因此以历年实测变形极大值作为典型测值开展动态预警。特高拱坝的坝顶拱冠部位属于坝体薄弱部位,处于大跨度拱圈与高悬臂梁的交接部位,对外界荷载的作用更加敏感,效应量更加明显,所以针对坝顶部位测点开展动态预警。

2016—2021 年的预警结果如图 9 所示。从各测点变形历年极大值来看,坝顶部位测点历年的最大径向位移为 28~38 mm,其中坝顶拱冠部位附近的 PL11-1、PL11-2、PL13-1 和 PL13-2 测点历年径向位移极值整体最大,但与结构分析的临界变形值仍有较大差距,从转化的实时风险率来看,目前该区各测点的实时风险率均小于容许风险率,从变形破坏角度说明该区域处于安全运行状态。

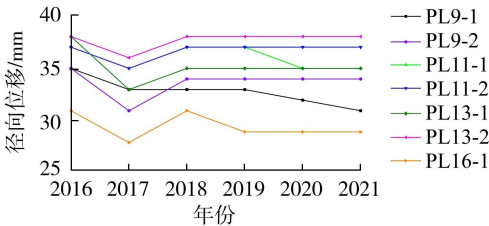


图 9 基于结构分析的测点历年变形极大值

为了进一步评定该特高拱坝目前的风险状态,统计了各测点到目前为止的实时风险率,结果见图 10。由图 10 可知,测点最大实时风险率均小于容许风险率,表明该区域目前处于安全稳定运行状态,整体上存在较低风险,但坝顶拱冠薄弱部位相比之下风险率较大。将模型结果与实际定检报告进行对比,验证了大坝的服役状态,表明该模型具有较高的可信度,能够为大坝运行管理提供有效指导。

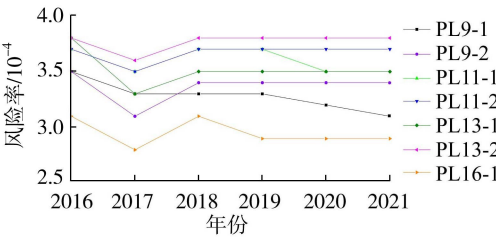


图 10 基于结构分析的测点实时风险率

6 结 语

本文在风险理论与结构分析拟定变形指标的基础上,挖掘了两种体系的内在联系,建立了特高拱坝的实时风险率模型。该模型首先利用 SSA 优化 MSVR 算法进行力学参数反演,之后运用塑性应变能与尖点突变模型对坝基坝体临界失稳状态作出判定,得到拱坝临界变形值,利用当前变形值与临界变

形值间的接近程度转化大坝运行的实时风险率,然后结合工程概率可靠度指标,建立风险率阈值作为警戒线,实现数字化监控。实例验证结果表明,本文提出的特高拱坝变形破坏的实时风险率模型可有效转化实测资料,进行安全监控预警。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 中国是世界拱坝大国也是世界拱坝强国:在《特高拱坝建设总结及安全运行管理研究》会议上的发言[J]. 水利水电技术, 2017, 48 (2): 1-3. (ZHU Bofang. China is the largest and strongest country of concrete arch dams in the world[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (2): 1-3. (in Chinese))

[2] 胡江,马福恒,王春红. 特高拱坝变形监测的分区及其模型构建方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(2):148-154. (HU Jiang, MA Fuheng, WANG Chunhong. Zoned deformation monitoring and its model building method for super high arch dams[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (2): 148-154. (in Chinese))

[3] 胡森映. 特高拱坝三维非线性整体安全度评价标准研究 [D]. 北京:清华大学,2016.

[4] ZHAO Erfeng, LI Xin, GU Chongshi. Health diagnosis of ultrahigh arch dam performance using heterogeneous spatial panel vector model [J]. Water Science and Engineering, 2024, 17 (2): 177-186.

[5] DAI Bo, GU Chongshi, ZHAO Erfeng, et al. Statistical model optimized random forest regression model for concrete dam deformation monitoring [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25 (6): e2170.

[6] SALAZAR F, MORÁN R, TOLEDO M Á, et al. Data-based models for the prediction of dam behaviour: a review and some methodological considerations [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2017, 24 (1): 1-21.

[7] 张建中,顾冲时,袁冬阳,等. 基于优化 VMD 与 GRU 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (5): 38-44. (ZHANG Jianzhong, GU Chongshi, YUAN Dongyang, et al. Deformation prediction model of concrete dams based on optimized VMD and GRU[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (5): 38-44. (in Chinese))

[8] 刘伟琪,陈波,葛盼猛,等. 基于聚类分区和 MO-LSSVR 的高拱坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (2): 102-108. (LIU Weiqi, CHEN Bo, GE Panmeng, et al. Deformation prediction model of a high arch dam based on clustering and MO-LSSVR [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (2): 102-108. (in Chinese))

[9] 葛盼猛,陈波,刘庭赫,等. 基于 KPCA-ICFSFDP-MOGP

的拱坝多测点变形数据预处理及预测方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (4): 92-97. (GE Panmeng, CHEN Bo, LIU Tinghe, et al. Preprocessing and prediction method for multi-point deformation data of arch dams based on KPCA-ICFSFDP-MOGP [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (4): 92-97. (in Chinese))

[10] 张才溢,傅蜀燕,欧斌,等. 基于 APSO 和 TWSVM 的特高拱坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (4): 46-51. (ZHANG Caiyi, FU Shuyan, OU Bin, et al. Deformation prediction model of ultra-high arch dams based on APSO and TWSVM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (4): 46-51. (in Chinese))

[11] 王晓玲,梁羽翎,王佳俊,等. 耦合注意力机制大坝变形改进 LSTM 序列到序列预测模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56 (7): 702-712. (WANG Xiaoling, LIANG Yuling, WANG Jiajun, et al. Improved LSTM sequence-to-sequence prediction model for dam deformation coupled with attention mechanism [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56 (7): 702-712. (in Chinese))

[12] 王瑞婕,包腾飞,李扬涛,等. 基于多因子融合和 Stacking 集成学习的大坝变形组合预测模型[J]. 水利学报, 2023, 54 (4): 497-506. (WANG Ruijie, BAO Tengfei, LI Yangtao, et al. Combined prediction model of dam deformation based on multi-factor fusion and Stacking ensemble learning [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (4): 497-506. (in Chinese))

[13] ZHANG Kang, GU Chongshi, ZHU Yantao, et al. A mathematical-mechanical hybrid driven approach for determining the deformation monitoring indexes of concrete dam [J]. Engineering Structures, 2023, 277: 115353.

[14] 刘欣航,娄一青,郑东健. 基于多目标优化的 WOA-BPNN 高拱坝变形模量反演分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41 (10): 96-99. (LIU Xinhang, LOU Yiqing, ZHENG Dongjian. Inversion analysis of high arch dam mechanical parameters based on multi-objective optimization strategy and WOA-BPNN [J]. Water Resources and Power, 2023, 41 (10): 96-99. (in Chinese))

[15] 庄文宇,张如九,徐建军,等. 基于 IAGA-BP 算法的高拱坝-坝基力学参数反演分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62 (8): 1302-1313. (ZHUANG Wenyu, ZHANG Rujiu, XU Jianjun, et al. Inversion analysis to determine the mechanical parameters of a high arch dam and its foundation based on an IAGA-BP algorithm [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2022, 62 (8): 1302-1313. (in Chinese))

[16] 杨杰,刘智,宋锦焘,等. 基于 SSA-MSVR 的混凝土拱坝材料参数反演模型[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (5): 53-57. (YANG Jie, LIU Zhi, SONG Jintao, et al.

- Inversion model of material parameters for concrete arch dams based on SSA-MSVR[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 53-57. (in Chinese))
- [17] 何晓莹,林潮宁,杜效鹄,等. 考虑渗流场作用的重力坝坝基物理力学参数有限元智能反演分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(3): 8-13. (HE Xiaoying, LIN Chaoning, DU Xiaohu, et al. Finite element intelligent inversion of physical and mechanical parameters of gravity dam foundation considering seepage field[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2023, 45(3): 8-13. (in Chinese))
- [18] 陈旭东,侯阵阵,郭进军. 基于长期气温模拟的混凝土坝变形预测混合模型[J]. 人民黄河, 2023, 45(9): 141-146. (CHEN Xudong, HOU Zhenzhen, GUO Jinjun. Hybrid model for deformation prediction of concrete dams based on long-term temperature simulation[J]. Yellow River, 2023, 45(9): 141-146. (in Chinese))
- [19] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [20] GU Chongshi, FU Xiao, SHAO Chenfei, et al. Application of spatiotemporal hybrid model of deformation in safety monitoring of high arch dams: a case study [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(1): 319.
- [21] WU Bangbin, NIU Jingtai, SU Huaizhi, et al. An approach for deformation modulus mechanism of super-high arch dams[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2019, 69(5): 557-566.
- [22] DOU Siqi, LI Junjie, KANG Fei. Health diagnosis of concrete dams using hybrid FWA with RBF-based surrogate model [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(3): 188-195.
- [23] ZHOU Wei, LI Shaolin, MA Gang, et al. Parameters inversion of high central core rockfill dams based on a novel genetic algorithm[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(5): 783-794.
- [24] SEVIM B, ALTUNISIK A C, BAYRAKTAR A, et al. Estimation of elasticity modulus of a prototype arch dam using experimental methods [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(4): 321-329.
- [25] 郑东健,雷霆. 基于突变理论的高拱坝失稳判据研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 23-27. (ZHENG Dongjian, LEI Ting. Instability criteria for high arch dams using catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 23-27. (in Chinese))
- [26] 冯帆,邱信蛟,张国新,等. 基于施工期变形监测的特高拱坝力学参数反演研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 237-246. (FENG Fan, QIU Xinjiao, ZHANG Guoxin, et al. Inversion of mechanical parameters of super-high arch dam based on deformation monitoring during construction period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 237-246. (in Chinese))
- [27] 朱伯芳. 混凝土坝的数字监控[J]. 水利水电技术, 2008, 39(2): 15-18. (ZHU Bofang. Numerical monitoring of concrete dams [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(2): 15-18. (in Chinese))
- [28] 朱伯芳,张国新,许平,等. 混凝土高坝施工期温度与应力控制决策支持系统[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 1-6. (ZHU Bofang, ZHANG Guoxin, XU Ping, et al. Decision making support system for temperature and stress control of high concrete dams in construction period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 1-6. (in Chinese))
- [29] 马建婷,康飞,姜成磊,等. 高拱坝参数反演的 Jaya-高斯过程回归模型[J]. 水利水电科技进步, 2022, 42(4): 74-79. (MA Jianting, KANG Fei, JIANG Chenglei, et al. Jaya-Gaussian process regression model for parameter inversion of high arch dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 74-79. (in Chinese))
- [30] 李志平,彭振斌,何忠明,等. 一种基于塑性功和突变理论的边坡临界状态确定方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3193-3200. (LI Zhiping, PENG Zhenbin, HE Zhongming, et al. An approach for determination of slope failure criterion based on plastic energy and mutation theory [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(9): 3193-3200. (in Chinese))
- [31] 王少伟,夏辉,崔英杰,等. 基于突变理论的拱坝整体安全度分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 544-548. (WANG Shaowei, XIA Hui, CUI Yingjie, et al. Analysis of global safety degree of arch dam based on catastrophe theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(5): 544-548. (in Chinese))
- [32] 陈波,刘庭赫,黄梓莘,等. 库岸边坡运行的实时风险率量化模型和预警方法[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 333-347. (CHEN Bo, LIU Tinghe, HUANG Zishen, et al. Real-time risk rate quantitative model and early warning method for bank slope operation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 333-347. (in Chinese))
- [33] 刘健,练继建. 李家峡拱坝坝体弹性模量及基岩变形模量的反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4466-4471. (LIU Jian, LIAN Jijian. Back analysis of elastic modulus of Lijiaxia Arch concrete dam and deformation modulus of its foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4466-4471. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-10 编辑:俞云利)