

考虑渐进灾变特性的高拱坝变形性状诊断方法

杨光^{1,2}, 赵阿辉¹, 吴邦彬^{2,3}, 黄振栋¹, 左良育¹, 陈光煜¹, 李宗儒¹

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要:针对高拱坝变形性状诊断已有方法的局限性,考虑变形失稳过程的渐进灾变特性,结合现代坝工学、力学和数学理论,提出了一种新的诊断方法。该方法在表征水压、温变和时效变形的基础上标定高拱坝的弹性变形状态,借助信息熵理论建立个体诊断指标,依据投影寻踪法优化获取个体贡献度,据此构建群体诊断指标,并基于典型小概率原理拟定诊断控制值,提出了群体正常、群体基本正常、个体异常、群体异常、群体恶化的诊断准则。工程实例检验结果表明,该方法有效地刻画了渐进灾变过程,适用于尚未遭遇最不利荷载的情况。

关键词:高拱坝; 变形性状诊断; 渐进灾变特性; 信息熵; 典型小概率原理

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)02-0066-06

Diagnosis method of deformation behavior of high arch dams considering progressive failure characteristics//
YANG Guang^{1,2}, ZHAO Ahui¹, WU Bangbin^{2,3}, HUANG Zhendong¹, ZUO Liangyu¹, CHEN Guangyu¹, LI Zongru¹
(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Hydraulic and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: To overcome the limitations of existing methods for diagnosing the deformation state of high arch dams, a new diagnosis method was proposed considering the progressive failure characteristics of the deformation instability process. The method combines modern dam engineering, mechanics and mathematical theories. The elastic deformation state of high arch dams was calibrated based on the characterization of water pressure, temperature change, and time-dependent deformation. The individual diagnostic index was established using the information entropy theory. According to the projection pursuit method, the individual contributions were optimally achieved, and then the group diagnostic index was built. The diagnostic control values were constructed based on the typical small probability principle. On this basis, the diagnostic criteria of group normality, group basically normality, individual abnormality, group abnormality, and group deterioration were developed. Engineering example results indicate that the established method can effectively characterize the progressive failure process, and it is applicable to the situation that the most unfavorable load has not been encountered yet.

Key words: high arch dam; deformation behavior diagnosis; progressive failure characteristics; information entropy; typical small probability principle

我国高拱坝建设取得了举世瞩目的成就^[1-2]。这些高坝大库位于高山峡谷地区,服役条件恶劣,工程安全受到诸多因素的影响^[3-4]。由于大坝失事会导致灾难性的后果,高拱坝安全服役被赋予了极高的要求,需确保工程在安全运行的前提下,充分发挥其社会和经济效益。变形行为直观反映了高拱坝结构性态的演变过程,是鉴定大坝安全与否的重要指标。建立科学的高拱坝变形性状诊断理论和方法,对保障工程安全运行的意义重大^[5-6]。

高拱坝属于高次超静定结构,坝体、近坝区和库盘是一个整体受荷体系,受结构形式、地形、地质、荷载、材料物理力学性质等因素的综合影响,结构力学特性十分复杂。数值模拟和地质力学模型试验均表明,高拱坝结构性态演变是一个渐变过程,包括完好工作状态、局部损坏但仍然能够正常工作、严重损坏但可以修复、整体失效(报废或溃坝)4个过程。图1为某高拱坝失稳破坏形态,可以看出由于屈服区贯通坝体,致使结构整体失稳。从变形角度来看,

基金项目:国家自然科学基金项目(52109155);水灾害防御全国重点实验室开放基金项目(2019492211)

作者简介:杨光(1989—),男,讲师,博士,主要从事高混凝土坝安全监控与健康诊断研究。E-mail: yangguanghu@outlook.com

通信作者:吴邦彬(1986—),男,讲师,博士,主要从事水工结构安全监控正反分析理论研究。E-mail: wubangbin1986@126.com

高拱坝失稳破坏过程可概括为线弹性、准线弹性、局部屈服和破坏阶段^[7-8],如图2(图中 P 为荷载, δ 为变形)所示,在线弹性阶段 OA ,高拱坝任意一点的应力均未超过比例极限;在准线弹性阶段 AB ,坝踵局部开裂,应力重新调整,坝趾区压应力达到比例极限,应力与应变基本维持在弹性范围内;在局部屈服阶段 BC ,坝体部分区域进入屈服状态,应力与应变呈非线性关系;而在破坏阶段 CD ,屈服区大面积扩展,大坝变形急剧变化,在运行过程中,破坏阶段 CD 是不允许出现的。由以上分析可知,高拱坝失稳不是瞬间发生的,而是从“量变”向“质变”演化的渐进灾变过程,结构由“未破坏”发展至“局部失效”最终演变为“整体失稳”。因此,在进行高拱坝变形性态诊断时,需充分考虑渐进灾变特性。



图1 坝体破坏形态

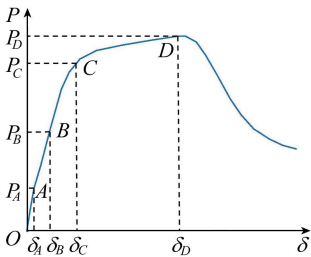


图2 高拱坝变形失稳过程

常规典型小概率法是一种常用的混凝土坝变形性态诊断方法,其将每次变形监测视为独立随机试验,针对不利于强度和稳定的荷载组合,依据统计检验原理,确定危险变形的概率分布类型,并以此为基础,建立变形性态诊断准则。总体来看,相关的理论研究和方法应用已向纵深发展,形成了3种基本的建模方法,即统计模型、混合模型和确定性模型,另外,依托神经网络、深度学习等人工智能算法的诊断模型已成功建立^[9-14],为刻画变形的空间分布和隐含特征又提出了测点群诊断方法^[15-20]。本文将单测点和测点群分别称为个体和群体,从变形原位监测的视角来看,高拱坝变形失稳的渐进灾变过程可描述为:群体正常→群体基本正常→个体异常→群体异常→群体恶化。常规典型小概率法仅针对个体变形或者群体变形建立,未考虑个体诊断和群体诊

断的内在关联关系,当个体诊断为异常时大坝未必处于危险状态,而群体诊断为未异常时结构亦未必绝对安全。因此,对于高拱坝变形性态诊断而言,已有方法存在一定的局限和短板,尚需进行深入研究和探讨。

为解决上述问题,本文综合运用坝工学、力学和数学理论,结合变形原位监测资料,研究并提出一种高拱坝变形性态渐进诊断方法,并依托实际工程,对该方法的有效性进行分析和验证。

1 诊断方法

1.1 变形分析模型

在正常运行情况下,高拱坝变形处于弹性状态^[20-22],为定量描述变形危险程度,首先需要标定出不同荷载组合作用下高拱坝的弹性变形状态。在弹性范畴内,高拱坝变形由3个部分组成,即:水压、温变和时效分量。水压变形和温变变形均属于瞬时弹性变形,而时效变形综合反映了坝体的徐变效应和坝基岩体的蠕变效应等。

依据统计模式,水压变形 δ_H 可表示为

$$\delta_H = \sum_{h=1}^4 a_h H^h \quad (1)$$

式中: H 为相对水位; a_h 为待定参数。

若监测时段较短,尚未遭遇最不利荷载,需结合有限元数值模拟建立水压变形的模型,有限元数值模拟结果与实际值间存在误差,对后续建模有较大影响,针对这一问题的解决方法,文献[20,22]已进行了详细论证。

在坝体弹性模量和坝基变形模量实际值未知的情况下,利用坝体弹性模量和坝基变形模量的设计值进行有限元数值计算, δ_H 可表示为

$$\delta_H = X \sum_{h=1}^4 a_{1h} H^h + Y \sum_{h=1}^4 a_{2h} H^h + Z \sum_{h=1}^4 a_{3h} H^h \quad (2)$$

式中: X 、 Y 、 Z 为调整系数; a_{1h} 、 a_{2h} 、 a_{3h} 为待定参数。

若弹性模量和变形模量的实际值已知,则式(2)可简化为

$$\delta_H = X \sum_{h=1}^4 a_h H^h \quad (3)$$

值得指出的是,在应用式(3)时需满足 $0.95 \leq X \leq 1.05$,若不满足这一条件,则表明弹性模量和变形模量的实际值不准确,仅能应用式(2)。

温变分量 δ_T 可表示为

$$\delta_T = \sum_{h=1}^l \left(b_{1h} \sin \frac{2\pi h j}{365} + b_{2h} \cos \frac{2\pi h j}{365} \right) \quad (4)$$

式中: j 为累计监测时间;当气温呈年周期变化时, $l=1$,若呈半年周期变化,则 $l=2$; b_{1h} 、 b_{2h} 为待定

参数。

时效变形 δ_θ 可表示为

$$\delta_\theta = c_1 \theta + c_2 \ln \theta \quad (5)$$

其中

$$\theta = j/100$$

式中: θ 为时效因子; c_1 、 c_2 为待定参数。

利用广义最小二乘法优化获取待定参数,依据复相关系数 (R^2) 和剩余标准差 (MSE) 评定参数的估计精度。

1.2 渐进诊断指标

残差 $\varepsilon_{ij} = \delta_{ij} - \hat{\delta}_{ij}$ 定量表征了变形监测值 δ_{ij} 偏离弹性状态 $\hat{\delta}_{ij}$ 的程度,若模型具有良好的解释精度,则 ε_{ij} 服从均值为 0 的正态分布,记 $f(\varepsilon)$ 为 ε_{ij} 的概率密度函数,定义

$$\mu_{ij} = \int_{-\infty}^{|\varepsilon_{ij}|} f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (6)$$

由 μ_{ij} 的含义 (图 3) 可知, $0.5 \leq \mu_{ij} < 1$, μ_{ij} 表征了出现 $\varepsilon \leq |\varepsilon_{ij}|$ 的累积概率,量值越大,则 δ_{ij} 偏离 $\hat{\delta}_{ij}$ 的程度越大。下面借助信息熵理论,建立渐进诊断指标。

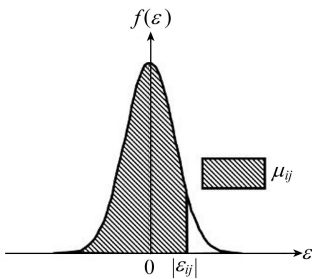


图 3 μ_{ij} 的含义

信息熵是系统无序程度的一个度量,量值越小,有序程度越大,状态则越危险,已被应用于判别大坝整体变形的安全状态^[23-24]。结合信息熵的定义^[25-27],个体诊断指标 S_{ij} 可表示为

$$S_{ij} = - [\mu_{ij} \ln \mu_{ij} + (1 - \mu_{ij}) \ln (1 - \mu_{ij})] = - \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \ln \mu_{ijk} \quad (7)$$

其中

$$\mu_{ij1} = \mu_{ij} \quad \mu_{ij2} = 1 - \mu_{ij}$$

记测点群的个体数为 n ,测点 i 的个体贡献度为 ω_i ,满足 $\omega_i \geq 0$ 且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$,群体诊断指标 S_j 构建方法如图 4 所示,表示为

$$S_j = - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^2 \omega_i \mu_{ijk} \ln (\omega_i \mu_{ijk}) = - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i \ln \omega_i + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i S_{ij} \quad (8)$$

当 $n=1$ 时,式 (8) 退化为式 (7)。对于式 (8),利用投影寻踪法^[28-30] 优化获取 ω_i ,算法步骤见文献^[31]。

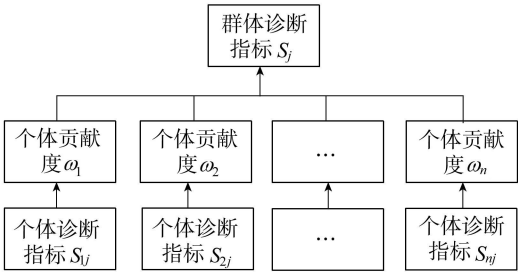


图 4 群体诊断指标构建方法

1.3 渐进诊断准则

高拱坝运行工况十分复杂,临界变形状态不易找到,针对这一问题,将变形监测视为独立随机试验,依据常规典型小概率原理可知,监测值出现的概率越小,大坝变形状态越危险。引入置信水平 α 和 β ($\alpha > \beta$),记 S_α 为个体正常和个体基本正常的诊断控制值, S_β 为个体基本正常和个体异常的诊断控制值, S'_α 为群体未异常和群体异常的诊断控制值, S'_β 为群体异常和群体恶化的诊断控制值。将 $1-\alpha$ 和 $1-\beta$ 代入式 (7) 和 (8) 中,则 S_α 、 S_β 、 S'_α 、 S'_β 分别表示为

$$S_\alpha = - [\alpha \ln \alpha + (1 - \alpha) \ln (1 - \alpha)] \quad (9)$$

$$S_\beta = - [\beta \ln \beta + (1 - \beta) \ln (1 - \beta)] \quad (10)$$

$$S'_\alpha = (- \sum_{i=1}^n \omega_i \ln \omega_i + S_\alpha) / n \quad (11)$$

$$S'_\beta = (- \sum_{i=1}^n \omega_i \ln \omega_i + S_\beta) / n \quad (12)$$

S_α 和 S_β 刻画了单测点小概率变形的危险程度, S'_α 和 S'_β 则表征了测点群同时发生小概率变形的危险程度。由上述分析可以看出,群体诊断控制值的危险层级高于个体,另外,由信息熵理论可知,信息熵的量值越小,则系统有序程度越大,大坝变形状态越危险,所以 S_α 、 S_β 、 S'_α 和 S'_β 均为最小允许值。

基于上述分析,高拱坝变形性态渐进诊断准则构建为:①对于所有个体 i ($i=1, 2, \dots, n$),均满足 $S_{ij} > S_\alpha$,则群体正常;②存在个体 i ,满足 $S_\beta < S_{ij} \leq S_\alpha$,其余个体均满足 $S_{ij} > S_\alpha$,则群体基本正常;③存在个体 i ,满足 $S_{ij} \leq S_\beta$,且满足 $S_j > S'_\alpha$,则个体异常;④存在个体 i ,满足 $S_{ij} \leq S_\beta$,且满足 $S'_\beta < S_j \leq S'_\alpha$,则群体异常;⑤存在个体 i ,满足 $S_{ij} \leq S_\beta$,且满足 $S_j \leq S'_\beta$,则群体恶化。

2 工程实例

某高拱坝是雅砻江干流下游河段的控制性工程,坝顶高程 1885.0 m,最大坝高 305.0 m,坝顶宽度 16.0 m,坝底厚度 63.0 m,厚高比 0.207,最大跨度 480.0 m,正常蓄水位 1880.0 m,死水位 1800.0 m,在 5 号、9 号、11 号、13 号、16 号、19 号坝段布置了正、倒垂测点进行坝体水平变形监测,如

图5所示,PL代表正垂线测点,IP代表倒垂线测点。以坝顶拱圈测点 PL5-1、PL9-1、PL11-1、PL13-1、PL16-1、PL19-1 为分析对象,建模时段选取 2014 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日,径向变形和上游水位的过程线如图 6 所示,数据每日监测 1 次,共计 1096 个监测日,在监测时段内,上游水位介于 1 800.41 m和1 879.92 m之间,尚未遭遇到不利荷载的作用,常规典型小概率法不再适用。

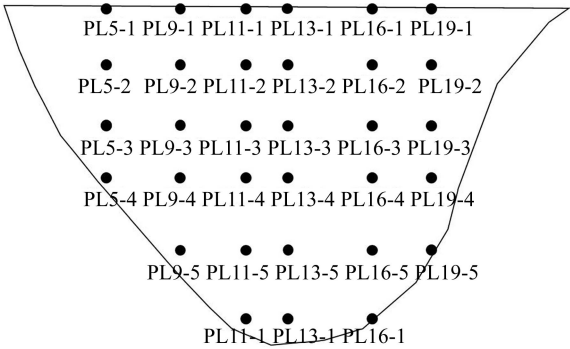


图5 垂线监测点

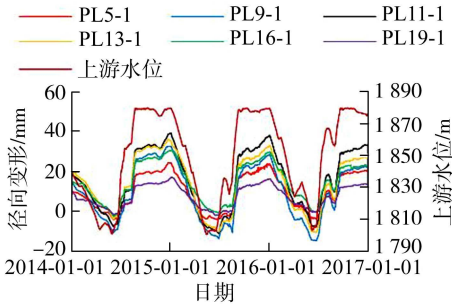


图6 径向变形及上游水位过程线

采用有限元法标定弹性变形状态,三维有限元模型和坝体混凝土材料分区如图 7、图 8 所示。文献[21]反演了坝体弹性模量和坝基变形模量的真实值,本文采用其结果进行有限元数值计算。上游

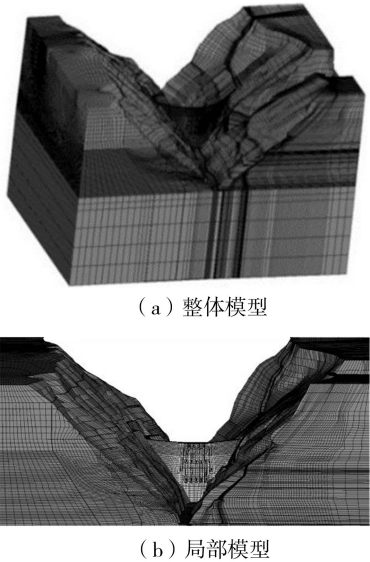


图7 有限元模型

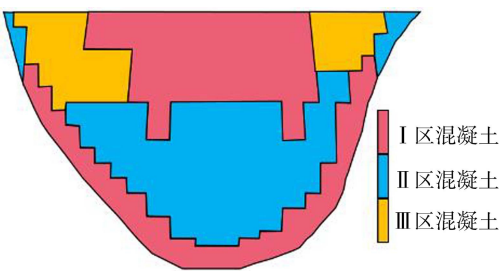


图8 坝体混凝土材料分区

边界水位取 1 800、1 810、1 820、1 830、1 840、1 850、1 860、1 870、1 880、1 885 m(水位与坝顶齐平)。借助 MSC. Marc 平台进行有限元数值模拟,测点 PL5-1、PL9-1、PL11-1、PL13-1、PL16-1、PL19-1 分别对应 $i=1\sim6$,分别对上述 6 个测点变形建立分析模型。限于篇幅,本文仅给出 PL13-1($i=4$)的建模结果,相对水位和相对变形的关系如图 9 所示,表 1 给出了模型参数估计值,监测值、拟合值和残差如图 10 所示, R^2 和 MSE 分别为 0.998 6 和 0.134 3, X 的值为 0.983 6,满足其约束条件。

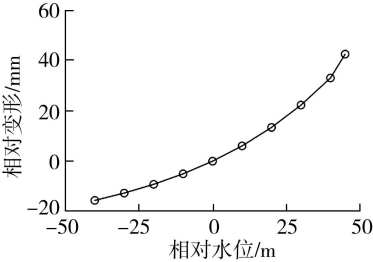


图9 相对水位和相对变形的关系

表1 PL13-1 的模型参数估计值

模型参数	估计值	模型参数	估计值
a_0	-0.458 0	b_{12}	1.305 2
a_1	0.604 9	b_{21}	-0.172 3
a_2	0.005 6	b_{22}	-0.267 7
a_3	3.75×10^{-5}	c_1	-1.633 4
a_4	1.79×10^{-7}	c_2	-2.909 4
b_{11}	5.27	X	0.983 6

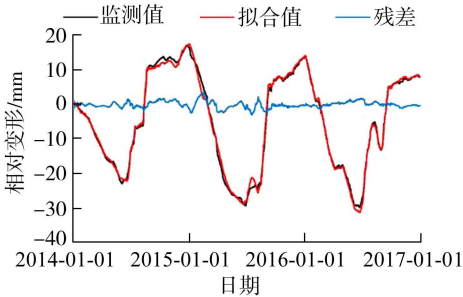


图10 PL13-1 的监测值、拟合值和残差

残差序列 ε_{4j} 的均值和方差分别为 3.29×10^{-14} 和 1.939 7,依据式(6)可得到 μ_{4j} ,如图 11 所示,利用式(7)可计算出 S_{4j} ,如图 12 所示, α 和 β 分别取 0.05 和 0.01,利用式(9)和(10)可计算得到 S_α 和 S_β 。在任意时刻 j ,PL13-1 均满足 $S_{4j}>S_\alpha$,对于测点

PL5-1、PL9-1、PL11-1、PL16-1、PL19-1,在任意监测日期 j ,亦满足 $S_{ij}>S_{\alpha}$ 。依据投影寻踪法,可计算出6个测点的个体贡献度,分别为0.07、0.24、0.23、0.25、0.12和0.09,经计算,对于任意时刻,均满足 $S_j>S'_{\alpha}$ 。由上述分析可知,顶拱的径向变形形态被判定为群体正常。

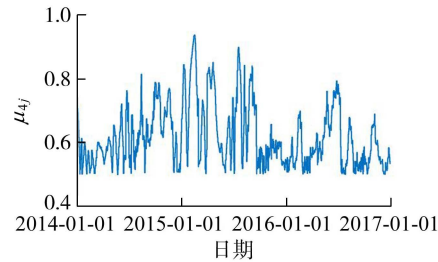


图 11 μ_{ij} 的变化规律

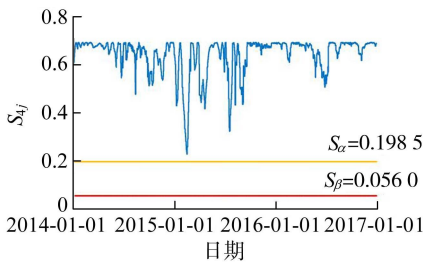


图 12 S_{ij} 的变化规律

3 结 论

- a. 渐进诊断指标综合考虑了个体和群体两个层次,为无量纲的标量,量值越小,变形状态越危险。由于以弹性变形状态为分析基准,并以概率统计为依托,渐进诊断指标有效地表征了变形监测值偏离弹性状态的程度,物理意义明确,概率含义严谨。
- b. 对于渐进诊断准则,群体正常和群体基本正常依据个体诊断判定,个体异常综合考虑了个体诊断和群体诊断,而群体异常和群体恶化则基于群体诊断进行评判,因此,其有效地刻画了“未破坏→局部失效→整体失稳”的渐进灾变过程。
- c. 常规典型小概率法仅针对不利于强度和稳定的荷载组合所对应的变形监测值进行统计检验,若尚未遭遇最不利荷载,其不可适用。对于本文方法而言,通过有限元数值分析,可搭建渐进诊断指标与荷载状况的联系,一定程度上克服了上述不足。
- d. 在应用本文方法时,需要注意以下两点:
①有效地标定高拱坝的弹性变形状态是确保诊断结论客观性的前提,应建立科学的解释模型,并合理地估计模型参数;
②置信水平对诊断亦有一定影响,但参数选取目前尚无规范和标准可依,需综合考虑工程的实际情况,如工程等别、建筑物级别,并结合已有经验,科学合理地设定置信水平。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2020 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2021.

[2] 杨光,顾昊,刘尚蔚,等. 基于分数阶模式的高拱坝变形安全监控研究构想[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):85-93. (YANG Guang, GU Hao, LIU Shangwei, et al. Research proposal for deformation safety monitoring of high arch dams based on fractional-order modeling theory [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):85-93. (in Chinese))

[3] 赵二峰,顾冲时. 碾压混凝土坝安全服役关键技术研究进展[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):11-20. (ZHAO Erfeng, GU Chongshi. Review on key technologies for safe operation of roller compacted concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(1):11-20. (in Chinese))

[4] LI Yanlong, YIN Qiaogang, ZHANG Ye, et al. Deformation prediction model of concrete face rockfill dams based on an improved random forest model [J]. Water Science and Engineering,2023,16(4):390-398.

[5] SU Huaizhi, YAN Xiaoqun, LIU Hongping, et al. Integrated multi-level control value and variation trend early-warning approach for deformation safety of arch dam [J]. Water Resources Management,2017,31(6):2025-2045.

[6] 练继建,杨阳,胡少伟,等. 特大水利水电枢纽调控与安全运行研究进展与前沿[J]. 工程科学与技术,2017,49(1):27-32. (LIAN Jijian, YANG Yang, HU Shaowei, et al. Research progresses and frontiers on control and safety operation of super-large hydraulic complex [J]. Advanced Engineering Sciences,2017,49(1):27-32. (in Chinese))

[7] FU Xiao, GU Chongshi, QIN Dong. Deformation features of a super-high arch dam structural system[J]. Optik,2017,130:681-695.

[8] WANG Xingwang, LIU Yaoru, TAO Zhuofu, et al. Study on the failure process and nonlinear safety of high arch dam and foundation based on geomechanical model test [J]. Engineering Failure Analysis,2020,116:104704.

[9] 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.

[10] 李明超,任秋兵,孔锐,等. 多维复杂关联因素下的大坝变形动态建模与预测分析[J]. 水利学报,2019,50(6):687-698. (LI Mingchao, REN Qiubing, KONG Rui, et al. Dynamic modeling and prediction analysis of dam deformation under multidimensional complex relevance [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(6):687-698. (in Chinese))

[11] LI Bin, YANG Jie, HU Dexiu. Dam monitoring data analysis methods: a literature review [J]. Structural Control and Health Monitoring,2020,27(3):e2501.

- [12] LI Zhanchao. Global sensitivity analysis of the static performance of concrete gravity dam from the viewpoint of structural health monitoring[J]. Archives of Computational Methods in Engineering,2021,28(3):1611-1646.
- [13] KANG Fei, LIU Jia, LI Junjie, et al. Concrete dam deformation prediction model for health monitoring based on extreme learning machine[J]. Structural Control and Health Monitoring,2017,24(10):e1997.
- [14] LIN Chaoning, LI Tongchun, CHEN Siyu, et al. Gaussian process regression-based forecasting model of dam deformation[J]. Neural Computing and Applications, 2019,31(12):8503-8518.
- [15] SHI Zhongwen, GU Chongshi, QIN Dong. Variable-intercept panel model for deformation zoning of a super-high arch dam[J]. SpringerPlus,2016,5(1):898.
- [16] HU Yating, SHAO Chenfei, GU Chongshi, et al. Concrete dam displacement prediction based on an ISODATA-GMM clustering and random coefficient model[J]. Water,2019,11(4):714.
- [17] SHAO Chenfei, GU Chongshi, YANG Meng, et al. A novel model of dam displacement based on panel data[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(1): e2037.
- [18] 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))
- [19] 牛景太,周华,吴邦彬,等. 考虑多重共线性影响的特高拱坝时空监控模型[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1):29-35. (NIU Jingtai, ZHOU Hua, WU Bangbin, et al. Spatio-temporal monitoring model for super-high arch dams considering multicollinearity effects[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1):29-35. (in Chinese))
- [20] YANG Guang. Deformation similarity characteristics-considered hybrid panel model for multi-point deformation monitoring of super-high arch dams in operating conditions [J]. Measurement,2022,192:110908.
- [21] LIU Chungao, GU Chongshi, CHEN Bo. Zoned elasticity modulus inversion analysis method of a high arch dam based on unconstrained Lagrange support vector regression (support vector regression arch dam) [J]. Engineering with Computers,2017,33(3):443-456.
- [22] YANG Guang, GU Hao, CHEN Xudong, et al. Hybrid hydraulic-seasonal-time model for predicting the deformation behaviour of high concrete dams during the operational period [J]. Structural Control and Health Monitoring,2021,28(3):e2685.
- [23] 赵二峰,李章寅,袁冬阳. 基于双阶段注意力机制的大坝变形深度学习预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 44-52. (ZHAO Erfeng, LI Zhangyin, YUAN Dongyang. Deep learning model for deformation prediction of dam based on dual-stage attention mechanism [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):44-52. (in Chinese))
- [24] YANG Guang, GU Chongshi, ZHAO Yihan, et al. Research on an abnormality diagnosis method of the structural behavior of spatial crack systems in concrete dams [J]. Optik,2016,127(24):11758-11774.
- [25] 陈法法,杨蕴鹏,汤宝平,等. 组合核 RVM 与 EEMD 信息熵的机械设备可靠度评估与预测[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 149-156. (CHEN Fafa, YANG Yunpeng, TANG Baoping, et al. Assessment and prediction of mechanical equipment reliability based on combined kernel relevance vector machine and EEMD information entropy [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5):149-156. (in Chinese))
- [26] WANG Tao, CHEN Jiansheng. Entropy analysis of temperature characteristics for leakage investigation[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020,24(1):110-122.
- [27] 李亚兰,金炜东. 全矢 IMF 信息熵用于高速列车转向架故障诊断[J]. 振动、测试与诊断,2021,41(5):874-879. (LI Yalan, JIN Weidong. Application of full vector IMF entropy in fault diagnosis of high speed train [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(5):874-879. (in Chinese))
- [28] 邴其春,龚勃文,林赐云,等. 基于粒子群优化投影寻踪回归模型的短时交通流预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(12): 4277-4282. (BING Qichun, GONG Bowen, LIN Ciyun, et al. Short-term traffic flow prediction method based on particle swarm optimization projection pursuit regression model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(12):4277-4282. (in Chinese))
- [29] 杨志豪,何建新,李志华,等. 基于 PPR-TOPSIS 分析法的沥青混凝土配合比方案优选[J]. 水利水电科技进展,2023,43(2):82-88. (YANG Zhihao, HE Jianxin, LI Zhihua, et al. Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(2):82-88. (in Chinese))
- [30] AN Hui, YANG Wenjing, HUANG Jin, et al. Identify and assess hydropower project's multidimensional social impacts with rough set and projection pursuit model [J]. Complexity,2020,2020:9394639.
- [31] YANG Guang, SUN Jin, ZHANG Jianwei, et al. Research on temperature control index for high concrete dams based on information entropy and cloud model from the view of spatial field [J]. Water,2023,15(22):4023.

(收稿日期:2023-03-26 编辑:俞云利)