

混凝土坝服役性态监测效应量 安全监控指标拟定方法

顾昊^{1,2}, 曹文翰², 汪程³, 顾冲时², 黄潇霏⁴

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 4. 河海大学图书馆, 江苏 南京 210098)

摘要:表征混凝土坝服役性态变化的监测效应量,其变化客观反映了大坝的工作性态变化,为确保大坝的安全运行,需对相应的监测效应量拟定安全监控指标,传统的方法在假定一定失效概率的前提下拟定监控指标,人为因素影响较大。经对传统方法不足的分析,基于典型小概率方法和层次分析法的思想,提出了混凝土坝服役性态评价等级属性不等区间的划分方法,在此基础上,综合运用最大熵原理,构建反映混凝土坝服役性态变化的监测效应量概率密度函数,提出拟定对应大坝服役性态评价不同等级属性的监测效应量安全监控指标的方法,并通过工程实例验证了所提出方法的可行性和有效性。

关键词:混凝土坝;服役性态评价;监测效应量;最大熵概率密度;安全监控指标

中图分类号:TV3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)01-0030-05

Safety monitoring index determination for monitoring effect quantity of concrete dams in service//GU Hao^{1,2}, CAO Wenhan², WANG Cheng³, GU Chongshi², HUANG Xiaofei⁴ (1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 4. Hohai University Library, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The variation of the monitoring effect quantity characterized the service behavior change of a concrete dam objectively reflects the working behavior variation of the dam. In order to ensure the safe operation of the dam, it is necessary to draw up the safety monitoring index of the corresponding monitoring effect quantity. Traditional method formulates the safety monitoring index under the assumption of certain failure probability, which is affected by the human factor. Aiming at the shortcomings of traditional approaches, integrated the idea of typical small probability method and analytic hierarchy process, the method of dividing the unequal range of evaluation grade attributes of concrete dam service behavior is proposed. The probability density function of monitoring effect quantity is constructed based on the principle of maximum information entropy, the method for formulating safety monitoring index of monitoring effect quantity corresponding to different grade attributes of dam behavior performance evaluation is put forward. The feasibility and effectiveness of the proposed method is verified by an engineering project.

Key words: concrete dam; dam behavior evaluation in service; monitoring effect quantity; maximum information entropy probability density; safety monitoring index

在对混凝土坝服役性态监测效应量进行安全监控指标拟定过程中,需要解决大坝服役性态评价等级属性问题^[1-2]。传统的混凝土坝服役性态监测效应量安全监控指标拟定方法主要有:置信区间法、极限状态法、小概率法等^[3-4]。吴中如等^[5]综合小概

率法和极限状态法,拟定了混凝土坝变形诊断指标;张琳琳等^[6]研究了指标拟定方法并构建了指标评价体系,以医学上健康标准划分为基础,提出了大坝安全评价等级属性等区间划分法;何金平等^[7]总结了大坝服役性态评价指标拟定规则,由此形成

基金项目:国家自然科学基金(51909173);国家大坝安全工程技术中心开放基金(CX2020B);河海大学自由探索专项(B200201058)

作者简介:顾昊(1990—),男,讲师,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:ghao@hhu.edu.cn

通信作者:顾冲时(1962—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:csgr@hhu.edu.cn

了一套大坝安全评价多层次指标评价体系。近年来,国内外学者除了应用和发展了传统的力学、数值解法等方法之外,将更多的新理论、新技术引入到安全监控指标拟定分析中来。Ansari 等^[8]定义了损伤状态矩阵,据此对混凝土坝地震后安全状态监测损伤指标进行了分类;Alembagheri 等^[9]以非线性增量动力分析为基础拟定了安全监控指标,分析评估了混凝土拱坝的安全状态;Shao^[10]引入 Copula 函数,提出了考虑多测点变形相关性的大坝变形监控指标拟定方法。

上述的研究成果在大坝安全综合评价中起到了一定的作用,尤其是置信区间法及小概率法等应用较为普遍^[11],但这些方法在确定大坝服役性态评价等级属性时存在等区间划分以及监测效应量服从某一分布假定问题,影响了安全监控指标拟定精度^[12]。针对上述问题,本文研究混凝土坝服役性态评价等级属性不等区间划分和评价指标量化等技术,在此基础上,探究拟定混凝土坝服役性态监测效应量安全监控指标方法,以期混凝土坝服役性态客观评价和监测效应量监控指标有效拟定提供参考基础。

1 传统置信区间估计法拟定安全监控指标的基本原理

传统的混凝土坝服役性态安全监控指标拟定方法中运用最多的是置信区间估计法,其基本原理是基于统计理论的小概率事件,取显著性水平 α ,则 $P_{\alpha}=\alpha$ 为小概率事件,其基本原理是建立大坝服役性态监测效应量与荷载之间的数学模型(如统计模型和混合模型),计算各种荷载作用下监测效应量的拟合值 $\hat{E}$ 与实测值 E 之间的差值 $E-\hat{E}$,并假设服从均值 $\mu(E-\hat{E})=0$ 的正态分布,则 $E-\hat{E}$ 有 $1-\alpha$ 的概率落在置信区间 $[-\Delta,\Delta]$ 内,即:

$$P(-\Delta < E - \hat{E} < \Delta) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(E-\hat{E})^2}{2\sigma^2}} = 1 - \alpha \tag{1}$$

根据正态分布的对称性,式(1)等价于:

$$P(E - \hat{E} < -\Delta) = P(E - \hat{E} > \Delta) = \int_{-\infty}^{-\Delta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(E-\hat{E})^2}{2\sigma^2}} = \int_{\Delta}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(E-\hat{E})^2}{2\sigma^2}} = \frac{\alpha}{2} \tag{2}$$

式中: Δ 为置信区间半带宽; σ 为标准差。
当显著性水平 $\alpha=5\%$ 时, $\Delta=1.960\sigma\approx2\sigma$,则其相应的监测效应量的监控指标 $E_m=\hat{E}\pm2\sigma$ 。

置信区间估计法运用简单,易于掌握,但存在以下不足:①若混凝土坝未遭遇过不利荷载组合或资料系列很短(不包含最不利荷载组合时的监测效应

量),则该方法只能估计混凝土坝遭遇荷载范围内的效应量,其值不一定是安全监控值;②没有联系混凝土坝失事的原因和机理,物理概念不明确;③实测值与拟合值的差值假定服从正态分布,与实际情况存在差异,影响了监控指标拟定的精度;④ α 的取值带有经验性,存在人为因素影响。

针对上述问题,本文综合层次分析法和灰狼智能算法,提出混凝土坝服役性态评价等级属性不等区间划分法,为拟定混凝土坝服役性态监测效应量多级监控指标提供理论基础。

2 混凝土坝服役性态评价等级属性不等区间划分方法

大量的工程实践经验可知,绝大部分混凝土坝的服役性态属于正常,因此本文基于典型小概率法,假定混凝土坝服役状态中的正常状态为大概率事件,其概率区间划分为 $(5\%,100\%]$,剩余的 $[0\%,5\%]$ 为小概率区间,当混凝土坝服役性态落在这小概率区间范围内,则表明该坝存在一定的安全隐患。基于混凝土坝的服役性态,将 $[0\%,5\%]$ 小概率区间重新划分为 4 个区间,依次定义为转异、重度劣化、轻度劣化和基本正常,从而实现对混凝土坝服役性态等级属性不等区间划分。结合层次分析法与灰狼算法,提出了混凝土坝服役状态不等区间划分方法,该方法具体实现步骤如下:

步骤 1 构造混凝土坝服役性态除正常区间外的等级属性评语成对比较判断矩阵。

利用“转异、重度劣化、轻度劣化、基本正常、正常”5 级等级属性评语来评价混凝土坝服役性态,由于等级属性评语区间的概率不确定性,因此以线性方式组成的定性术语构造除正常区间外的评语区间成对比较判断矩阵。利用 $S、W、O、H$ 将 1~9 标度划分为 4 段,并记 $a_1、a_2、a_3$ 为 1~9 标度的截断点,则定性术语的函数关系可表示为 $S:[1,a_1],W:(a_1,a_2],O:(a_2,a_3],H:(a_3,9]$,对应的评语等级属性差异性的具体划分见表 1。

表 1 混凝土坝服役性态等级属性评语差异性划分	
比例标度	差异性
S	成对评语对比,前者比后者一样差
W	成对评语对比,前者比后者略微差
O	成对评语对比,前者比后者明显差
H	成对评语对比,前者比后者极度差

在对混凝土坝服役性态除正常区间外的等级评语进行两两对比时,本文假定转异区间比重度劣化区间略微差;转异区间比轻度劣化区间明显差;转异区间比基本正常区间极度差;重度劣化区间比轻度

劣化区间略微差;重度劣化区间比基本正常区间明显差;轻度劣化区间比基本正常区间略微差。依据上述假定,由此构造混凝土坝服役性态除正常区间外的等级属性评语成对比较判断矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & W & O & H \\ \frac{1}{W} & 1 & W & O \\ \frac{1}{O} & \frac{1}{W} & 1 & W \\ \frac{1}{H} & \frac{1}{O} & \frac{1}{W} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

步骤2 混凝土坝服役性态除正常区间外的等级属性评语成对比较判断矩阵的一致性检验及截点确定。

在混凝土坝服役性态除正常区间外的等级属性评语划分中,需对式(3)进行一致性检验,由此确定1~9标度中截点 a_1 、 a_2 、 a_3 的位置,即确定 a_1 、 a_2 、 a_3 的数值大小。本文采用一致性指标 C_1 来对式(3)进行一致性检验:

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

式中: n 是判断矩阵的阶数; $\lambda_{\max}$ 是判断矩阵 R 的最大特征值。

为了得到式(4)判断矩阵满意的一致性,基于灰狼算法调整1~9标度中截点 a_1 、 a_2 、 a_3 的位置,并对式(3)进行一致性检验,从而获取截断点 a_1 、 a_2 、 a_3 的最优值。

灰狼优化算法(GWO)模拟狼群狩猎时接近、包围、攻击的步骤,建立一新型仿生智能算法模型^[13-15]。狼群中任意一个个体都是一潜在的解,位于狼群顶层的3个层级的灰狼(ε 、 β 、 δ),是3个位置最好的解,并通过这3个解判定猎物的位置,剩余的灰狼 ω 基于自身位置计算与猎物之间的距离,实现对猎物的狩猎。其中灰狼个体与猎物的距离为

$$D = |C X_p(t) - X(t)| \quad (5)$$

其中 $C = 2r_1$

灰狼位置更新为

$$X(t+1) = X_p(t) - AD \quad (6)$$

其中 $A = 2ar_2 - a$

$$a = 2 - 2(t/\max_it) \quad (a \in [0, 2])$$

式中: t 为迭代的次数; $X_p(t)$ 为第 t 代猎物的位置; $X(t)$ 为第 t 代灰狼个体的位置; C 为系数变量; A 为收敛因子,当 $|A| > 1$ 时实行全局搜索,当 $|A| < 1$ 时实行局部搜索; a 的取值为 $[0, 2]$; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 内的随机数; $\max_it$ 为最大迭代次数。

狼群跟踪猎物的数学模型表示为

$$D_\varepsilon = |C_1 X_\varepsilon(t) - X(t)| \quad (7)$$

$$D_\beta = |C_1 X_\beta(t) - X(t)| \quad (8)$$

$$D_\delta = |C_1 X_\delta(t) - X(t)| \quad (9)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\varepsilon - A_1 D_\varepsilon \\ X_2 = X_\beta - A_2 D_\beta \\ X_3 = X_\delta - A_3 D_\delta \end{cases} \quad (10)$$

式(7)~(9)和式(10)为狼群内个体 ω 与 ε 、 β 、 δ 的距离关系,即:

$$X_p(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (11)$$

式(11)基于 ε 、 β 、 δ 的位置即可判断灰狼个体 ω 与猎物的位置关系,如此循环更新智能个体的位置,达到预定的精度停止搜索,获得最优解。综上所述,通过灰狼智能算法确定1~9标度中截点 a_1 、 a_2 、 a_3 的位置。

步骤3 混凝土坝服役性态除正常区间外的不等区间划分方法。

在求得混凝土坝服役性态除正常区间外的等级属性评语划分最优截点后,则可确定判断矩阵 R ,该矩阵在最优截点下一致性比例 C_1 为最小值。对应 $\lambda_{\max}$ 的特征向量为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$,即:

$$R\omega = \lambda_{\max} \omega \quad (12)$$

根据式(12)即可求出该矩阵最大特征值对应的特征向量 ω ,将 ω 进行归一化处理,即可得到评语集中各评语的权重值。在 $[0\%, 5\%]$ 区间上重新划分评语集,可得到混凝土坝服役性态等级属性评价分区 $b_i(i=1, 2, 3)$ 为

$$\begin{aligned} V &= \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \\ &\{\text{转异, 重度劣化, 轻度劣化, 基本正常, 正常}\} = \\ &\{[0\%, b_1], (b_1, b_2], (b_2, b_3], (b_3, 5\%], \\ &(5\%, 100\%]\} = \{[0\%, 0.56\%], (0.56\%, 1.61\%], \\ &(1.61\%, 3.59\%], (3.59\%, 5\%], (5\%, 100\%]\} \end{aligned} \quad (13)$$

b_i 具体求解过程见下文。

3 表征混凝土坝服役性态变化的监测效应量安全监控指标拟定

通过上述方法对混凝土坝服役性态等级属性区间进行不等划分,据此拟定表征混凝土坝服役性态变化的监测效应量安全监控指标,本文基于最大熵理论来构建监测效应量概率密度函数。

最大熵理论不须提前假定监测效应量的分布模型,只要根据较少的监测效应量统计信息得到的数字特征值进行估计,就能获得精度较高的概率密度函数^[16-17],适合混凝土坝服役性态安全监控指标的

拟定,下面研究反映混凝土坝服役性态监测效应量安全监控指标具体确定方法。

对于表征混凝土坝服役性态变化的监测效应量 ξ 的信息熵定义为

$$H(\xi)=-\int_R f(\xi)\ln f(\xi)\,d\xi \tag{14}$$

式中: $f(\xi)$ 为 ξ 的分布密度函数。

根据最大熵原理可知,最客观的概率密度分布是在满足根据已知样本统计信息所获得的一些约束条件下使熵 $H(\xi)$ 达到最大值的分布,即:

$$\max H(\xi)=-\int_R f(\xi)\ln f(\xi)\,d\xi \tag{15}$$

式(15)的约束条件为

$$\int_R f(\xi)\,d\xi=1 \tag{16}$$

$$\int_R \xi^i f(\xi)\,d\xi=\mu_i \quad i=1,2,\cdots,s \tag{17}$$

式中: R 为积分空间, μ_i 为第 i 阶原点矩; s 为原点矩阶数。

通过伴随变分法进行求解式(17),首先建立相应的拉格朗日方程:

$$L=H(\xi)+\lambda_0[\int_R f(\xi)\,d\xi-1]+\sum_{i=1}^s \lambda_i[\int_R \xi^i f(\xi)\,d\xi-\mu_i] \tag{18}$$

令 $\frac{\partial L}{\partial f(\xi)}=0$,则能够得到最大熵密度函数的解析形式为

$$f(\xi)=\exp(\lambda_0+\sum_{i=1}^s \lambda_i \xi^i) \tag{19}$$

其中最重要的就是伴随算子 λ_i 的确定。将式(19)代入式(16)(17)可得:

$$\int_R \exp(\lambda_0+\sum_{i=1}^s \lambda_i \xi^i)\,d\xi=1 \tag{20}$$

$$\int_R \xi^i \exp(\lambda_0+\sum_{j=1}^s \lambda_j \xi^j)\,d\xi=\mu_i \tag{21}$$

将表征混凝土坝服役性态变化的监测效应量样本数据代入式(20)(21),求解伴随算子 λ_i ,并基于式(19),构建最大熵概率密度函数 $f(\xi)$,代入混凝土坝服役性态评价等级属性分区 b_i ,则有:

$$P(\xi\geqslant \xi_i)=\int_R f(\xi)\,d\xi=b_i \tag{22}$$

由最大熵概率密度函数以及计算出的等级属性分区 b_i ,确定相应的监测效应量安全监控指标 $\xi_i(i=1,2,3)$, ξ_i 值根据 b_i 基于式(13)确定, ξ_4 由 $b_i=5\%$ 确定。若 y 为混凝土坝服役性态监测效应量的实测值, $\hat{y}$ 为混凝土坝服役性态监测效应量的理论计算值,则混凝土坝服役性态监测效应量安全监控指标及变化区间的具体表达式为

$$\begin{cases} 0\leqslant |y-\hat{y}|<\xi_4 & \text{正常} \\ \xi_4\leqslant |y-\hat{y}|<\xi_3 & \text{基本正常} \\ \xi_3\leqslant |y-\hat{y}|<\xi_2 & \text{轻度劣化} \\ \xi_2\leqslant |y-\hat{y}|<\xi_1 & \text{重度劣化} \\ \xi_1\leqslant |y-\hat{y}| & \text{转异} \end{cases} \tag{23}$$

4 工程实例

某水电站是金沙江下游河段规划的最末1个梯级电站,坝址位于四川省宜宾县和云南省水富县交界处。工程以发电为主,同时改善航运条件,兼顾防洪、灌溉,并具有拦沙和对临近水电站进行反调节等作用。该工程枢纽主要由挡水建筑物、泄洪消能建筑物、冲排沙建筑物、左岸坝后引水发电系统、右岸地下引水发电系统、通航建筑物及灌溉取水口等组成,其中拦河大坝为混凝土重力坝,拦河大坝最大坝高162.0 m,坝顶长度896.26 m,该水电站正常蓄水位380.0 m,死水位370.0 m,水库总库容51.63 亿 m³,调节库容9.03 亿 m³,为不完全季调节水库。电站装机容量6400 MW,保证出力2009 MW,多年平均发电量307.47 亿 kW·h。为分析该水电站混凝土重力坝的服役性态,首先需对其服役性态评价等级属性进行划分,在此基础上,拟定该坝变形安全监控指标。

4.1 该坝服役性态评价等级属性不等区间划分

该混凝土坝服役性态评价等级属性划分为

$$V=\{V_1,V_2,V_3,V_4,V_5\}=\{\text{转异,重度劣化,轻度劣化,基本正常,正常}\} \tag{24}$$

利用第3节中提出的方法,基于灰狼算法对截点 a_1,a_2,a_3 进行调整,满足式(4)的比较判断矩阵的一致性判别,在灰狼个体位置下,随机生成600个判断矩阵 R ,利用这600个判断矩阵的一致性比例 C_1 的均值作为适应度函数指标,整个迭代过程见图1。

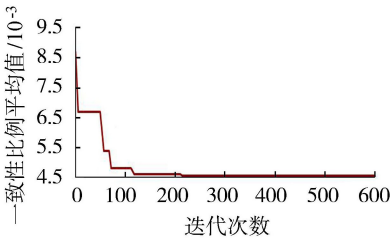


图1 适应度函数迭代过程

通过迭代求解,当截断点 a_1,a_2,a_3 为1.89、3.57、6.75时,式(4)的判断矩阵的一致性比例 C_1 值最小,其对应的一致性指标分布见图2。接下来计算在该最优截断点情况下判断矩阵的特征向量 ω ,并利用 ω 确定混凝土坝服役性态评价等级属性

分界点的概率 $b_i (i = 1, 2, 3)$, 其对应概率值分别为 0.56%、1.61%、3.59%, 则得到五级混凝土坝服役性态评价等级属性划分区间为

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{转异, 重度劣化, 轻度劣化, 基本正常, 正常}\} = \{[0\%, b_1], (b_1, b_2], (b_2, b_3], (b_3, 5\%], (5\%, 100\%]\} = \{[0\%, 0.56\%], (0.56\%, 1.61\%], (1.61\%, 3.59\%], (3.59\%, 5\%], (5\%, 100\%]\}$$

(25)

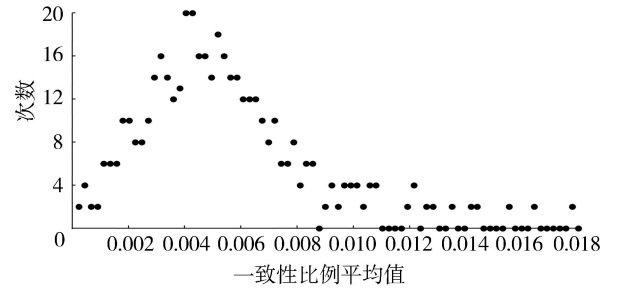


图2 一致性比例平均值分布

4.2 该混凝土坝服役性态变形安全监控指标拟定

上述已计算得到了该坝服役性态评价等级属性划分区间, 结合最大熵理论, 基于式(23)确定该混凝土坝变形安全监控指标, 针对该坝的具体情况, 利用本文提出的方法分别建立了泄水坝段、厂房坝段、非溢流坝段1和通航坝段1坝顶水平位移安全监控指标, 其代表性测点的结果见表2。

表2 典型坝段代表性测点位移安全监控指标

测点	测点位置	位移/mm			
		基本正常	轻度劣化	重度劣化	转异
pl2-3	非溢流坝段1	8.812	11.765	14.665	17.561
pl3-5	通航坝段1左	9.749	11.735	13.703	16.669
pl4-4	通航坝段1右	9.885	12.807	14.047	17.183
pl6-4	泄水坝段4	29.246	31.217	32.445	34.992
pl7-2	泄水坝段10	32.366	33.319	34.221	35.617
pl8-4	泄水坝段13	45.357	46.729	48.779	50.336

表2结果可知, 利用本文所提出的方法确定典型位移测点的安全监控指标对应于该混凝土坝服役性态变化的不同阶段, 该方法克服了置信区间法的缺陷, 其监控指标拟定结果与综合反映强度和稳定不利工况组合的结构分析方法^[18]拟定的结果吻合, 从而验证了本文提出的方法的可行性和有效性。

5 结论

a. 通过对传统的置信区间法拟定混凝土坝服役性态安全监控指标不足的分析, 基于小概率理论, 提出了混凝土坝服役性态评价等级属性不等区间划分方法, 该方法以线性方式组织的定性术语, 构建了

混凝土坝服役性态等级属性评语间成对比较判断矩阵, 以矩阵一致性比例的平均值作为适应度函数, 并基于灰狼算法进行权值寻优, 由此获得各评语的相对重要度, 从而有效解决了混凝土坝服役性态评价等级属性不等区间划分问题。

b. 基于混凝土坝服役性态评价等级属性不等区间的划分成果, 将不等区间概率值作为最大熵理论输入条件, 研究了混凝土坝服役性态监测效应量概率密度函数的构建方法, 据此提出了拟定对应混凝土坝服役性态不同评价等级属性的监测效应量安全监控指标, 并通过工程实例验证了本文所提出的方法可行性和有效性。

参考文献:

[1] 顾冲时, 苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 1-12. (GU Chongshi, SU Huaizhi. Evaluation on long-term service and risk assessment of concrete dam engineering [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 1-12. (in Chinese))

[2] 刘晗, 李明超, 沈扬, 等. 混凝土坝长期运行安全的理想点法评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(1): 70-75. (LIU Han, LI Mingchao, SHEN Yang, et al. Evaluation model of ideal point method for long-term operation safety of concrete dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1): 70-75. (in Chinese))

[3] 徐波, 包腾飞. 大坝安全监控中定性指标的定量综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 59-63. (XU Bo, BAO Tengfei. Quantitative comprehensive evaluation of qualitative indicators in dam safety monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 59-63. (in Chinese))

[4] 胡德秀, 屈旭东, 杨杰, 等. 基于 M-ELM 的大坝变形安全监控模型[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 75-80. (HU Dexiu, QU Xudong, YANG Jie, et al. Dam deformation safety monitoring model based on M-ELM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 75-80. (in Chinese))

[5] 吴中如, 沈长松, 阮焕祥. 论混凝土坝变形统计模型的因子选择[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1988, 16(6): 1-9. (WU Zhongru, SHEN Changshong, RUAN Huanxiang. Factor selection of concrete dam deformation statistical model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1988, 16(6): 1-9. (in Chinese))

[6] 张琳琳, 顾冲时, 王嘉琪. 重大水工混凝土结构健康综合诊断结构体系研究[J]. 红水河, 2003(4): 81-85. (ZHANG Linlin, GU Chongshi, WANG Jiaqi. Research on health comprehensive diagnostic structure system of major hydraulic concrete structures [J]. Hongshui River, 2003(4): 81-85. (in Chinese)) (下转第 48 页)