

混凝土坝长期运行安全的理想点法评价模型

刘 晗,李明超,沈 扬,张 野

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300354)

摘要:为了分析混凝土坝长期运行过程中可能存在的安全问题,基于混凝土坝长期运行监测数据对混凝土坝的安全度进行量化;通过分析影响混凝土坝安全的关键因素,建立混凝土坝安全评价指标体系;结合层次分析法主观赋权与独立信息波动赋权法客观赋权确定各个指标的组合权重,构建了基于理想点法的混凝土坝长期运行安全评价模型。工程实例验证结果表明,建立的模型求得的各指标权重和混凝土坝的安全度与工程实际运行情况相符。

关键词:混凝土坝;长期运行;安全度;理想点法;组合权重;评价指标体系

中图分类号:TV642

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)01-0063-06

Evaluation model based on ideal point method for long-term operation safety of concrete dams//LIU Han, LI Mingchao, SHEN Yang, ZHANG Ye (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: To analyze the potential safety problems in the long-term operation of concrete dams, the degree of safety for concrete dams was quantified based on the long-term monitoring data. A safety evaluation index system was established by analyzing the essential safety factors affecting concrete dams. Then, the subjective weight based on analytic hierarchy process (AHP) and the objective weight based on data independence and data fluctuation (DIDF) theory were used to calculate the combination weight of each index. Finally, a comprehensive evaluation model for the long-term safety of concrete dams was constructed based on the ideal point method. The validated result of an engineering example shows that the weight of each index and the safety degree of the concrete dam calculated by the model are in accordance with the actual operation of the project.

Key words: concrete dam; long-term operation; degree of safety; ideal point method; combination weight; evaluation index system

根据水利部 2016 年发布的统计报告^[1],全国已建成各类水库 97 988 座,其中大型水库 707 座,中型水库 3 844 座。这些水库大多修建在 20 世纪 50—70 年代,由于当时可能存在设计标准偏低、施工质量较差的情况,在大坝建成时就存在诸多隐患;随着大坝运行年限的增加,一些大坝出现了老化病态问题,大坝失事事件也偶有发生。大坝长期运行的安全状况不仅关系到整个工程的安危,而且对经济建设、社会安定与生态安全等具有重大影响,大坝工程的安全问题受到广泛关注^[2]。大坝安全评价是对大坝运行状态及大坝安全程度的整体性评价,它以大坝的各项监测数据为基础,通过利用现代数学和计算机技术挖掘数据中存在的特征来反映大坝的长期运行状态,是保障大坝安全的重要手段。近年来,

随着数字大坝的发展,大坝安全评价数据获取更加方便且全面,评价的方法也变得多元,国内外很多学者都对大坝安全的评价方法进行了研究探讨,灰色关联度理论、模糊综合评价方法^[3]、数据融合理论^[4]、信息熵理论^[5]、层次分析法^[6]及神经网络^[7]等相继被引入到大坝安全评价领域中,对大坝安全评价的研究起到了重要的推动作用。

目前对混凝土坝安全评价方法的研究取得了很多成果,如,李春雷等^[8]将层次分析法和模糊数学理论相结合,建立了大坝安全的多层次模糊综合评价模型,利用该模型能够对大坝实际安全情况进行量化分析;宋恩来^[9]将三维非线性有限元方法应用到混凝土坝整体安全度评价中,并应用到丰满水电站,通过超载安全系数对比证实了可行性;李同春

基金项目:国家自然科学基金(5187090610);国家自然科学基金(51622904);天津市杰出青年科学基金(17JJCJQC44000)

作者简介:刘晗(1993—),男,硕士研究生,主要从事水工结构安全分析研究。E-mail: liuh@tju.edu.cn

通信作者:李明超(1979—),男,教授,博士,主要从事水利工程仿真建模与分析研究。E-mail: LMC@tju.edu.cn

等^[10]提出了基于有限元分析结果的高拱坝安全度评价体系,研究了坝体裂缝对大坝工作性态的影响,给出了坝体容许裂缝长度;苏怀智等^[11]建立了基于二次抛物线形抗剪强度包络线的功能函数,并结合改进的当量正态化法,提出了高坝坝基失稳可靠度的计算方法,计算求出高坝坝基的稳定可靠度,达到了合理评估高坝坝基稳定性的目的;王少伟等^[12]将尖点突变理论引入拱坝-地基的安全度评价中,建立了相应的模型,评判结果与塑性屈服区贯通准则一致;何勇军^[13]应用模糊集理论对大坝的安全状态进行判断,建立了大坝安全综合评价模型,应用实例表明该模型是可行的;高健等^[14]将模糊数学应用到拱坝的安全评判,建立了考虑厚高比、柔度和最大拉应力3个因素的模糊综合评价模型,实例验证结果表明,评判结果切合实际;Feng等^[15]提出了评估坝顶裂缝和高拱坝极限承载能力的一系列安全因素,并对高拱坝进行了较为合理的评估;刘愚^[16]提出基于熵权-理想点法的大坝安全评价模型,制定了相应的评价标准及安全等级,通过某具体工程证明了模型的可行性;李影等^[17]引入理想点法确定大坝评价的标准和评价等级,通过组合赋权的方法确定各指标权重。上述研究在大坝安全评价方面取得了重要的进展和成果,由于实际工程中混凝土坝结构的特殊性、地质条件的复杂性及外部环境的易变性,导致混凝土坝的安全度随时间动态变化,有必要根据实际监测数据对混凝土坝长期运行过程的安全度进行综合评价分析。本文通过分析影响混凝土坝安全的因素,构建混凝土坝安全评价指标体系,建立基于理想点法的混凝土坝安全评价模型,并通过工程实例验证模型的合理性。

1 混凝土坝长期运行安全评价指标体系

1.1 混凝土坝安全因素分析

混凝土坝是一个非常复杂的系统,影响混凝土坝安全的因素来自各个方面,涉及地质条件、水文条件、坝体构造、坝体强度、施工质量、水库运行管理方式、环境因素和人类活动等^[18]。根据文献^[19]统计的74座混凝土坝的溃坝模式,其中31.1%是由漫顶破坏导致的,原因可能是遭遇大洪水、溢洪道泄流能力不足、两岸滑坡等;36.5%是由坝基或坝肩破坏导致的,原因主要有两点,一是坝基存在软弱夹层或断层等地质缺陷,二是大坝防渗体系或排水设备缺陷;9.5%是由坝体结构破坏导致的,主要原因是坝体材料质量恶化、材料强度降低;9.4%是由地震、人为破坏或设计运行维护不当等导致的;另外还有13.5%的混凝土坝溃坝模式原因不详。

基于以上分析,从混凝土坝的外荷载与坝自身的效应两方面综合考虑,建立混凝土坝安全评价指标体系,对混凝土坝的安全度进行计算评价,以便对大坝存在的缺陷或破坏及时发现和制止。

1.2 安全评价指标体系建立

混凝土坝安全评价体系主要包括安全评价指标和评价指标的分级标准,由于混凝土坝在多因素的作用下性能退化机理极为复杂^[20],综合考虑大坝会受到显著的水位及环境温度变化的影响^[21]、混凝土坝长期变形的影响^[22]等,这里选取评价指标时综合考虑了大坝结构、环境因素及监测系统的影响^[23],建立混凝土坝安全综合评价指标体系如图1所示。

从图1可以看出,指标评价体系包含了防洪标准复核、结构安全评价、渗流安全评价、抗震安全复核及金属结构安全评价五方面的共20个具体的评价

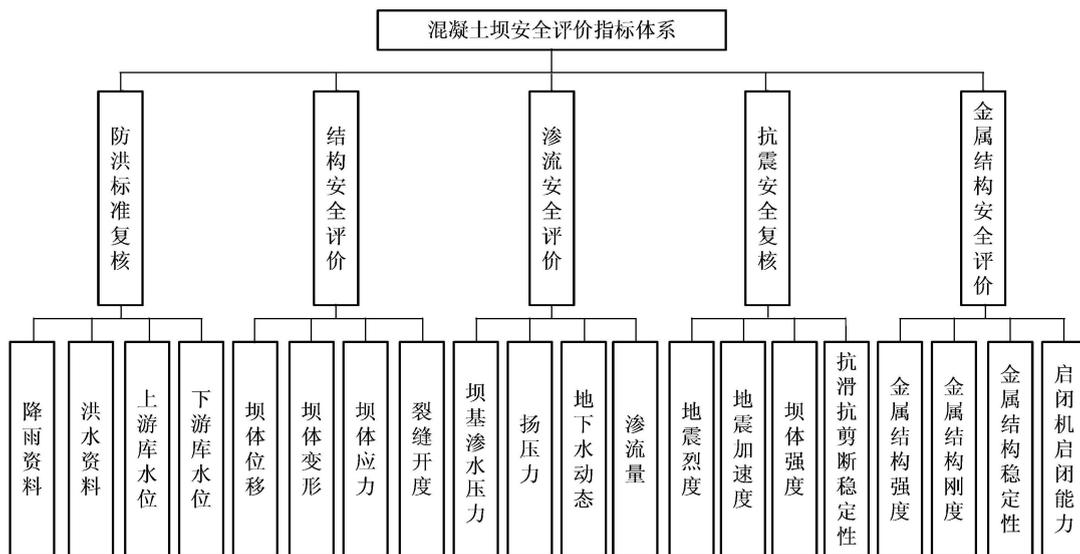


图1 混凝土坝安全评价指标体系

指标,能够较好地反映混凝土坝长期安全运行的综合状况。同时,考虑到混凝土坝长期安全性问题受控于材料及结构性能的劣化,即混凝土坝的材料及结构性能随着时间的推移逐渐变差,在评价过程中通过对监测数据的长期评价间接反映“时效性”这一指标,由于时效数据不能通过仪器检测直接得到,这里并未将其列入该指标体系。

2 基于理想点法的混凝土坝安全评价模型

理想点法是求解多目标规划问题的一种评价函数方法,其原理是使目标值尽可能地逼近理想值。采用理想点法进行混凝土坝安全评价分析^[24-25],是在确定合理的评价指标体系基础上,先通过层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和独立信息波动赋权法(weight giving based on data independence and data fluctuation, DIDF)计算各指标权重,然后定义一种“距离”,即在高维欧式空间中的一个点,在这种“距离”的意义下,找到一个尽可能接近理想点的点,使该点与正理想点评价函数距离最小,与负理想点评价函数距离最大,通过理想点贴适度对混凝土坝安全度进行计算分类,最终给出定量的评价结果。

2.1 混凝土坝安全评价指标矩阵构造

2.1.1 构造初始矩阵

根据混凝土坝的属性和结构特点确定合理的评价指标体系,并根据混凝土坝的各个指标建立相应的矩阵。设待评价的对象为 m 个,评价指标为 n 个,第 i 个评价对象的第 j 个评价指标数据表示为 x_{ij} ,形成初始矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.1.2 原始数据标准化

数据的标准化处理包括评价指标的同趋势化、非量纲化和原始数据归一化。同趋势化使规范后的任一指标属性越优的指标值越大,非量纲化可以排除量纲的选用对评价的影响,原始数据归一化即把数值均变化到 $[0, 1]$ 区间里,具有数据尺度统一、方便后面的数据处理、简化计算等优点。

a. 对混凝土坝的位移、应变及裂缝开度指标进行先求绝对值再归一化:

$$y_{ij} = \frac{|x_{j\max}| - |x_{ij}|}{|x_{j\max}| - |x_{j\min}|} \quad (2)$$

式中: y_{ij} 为 x_{ij} 的归一化值; $x_{j\max}$ 为所有评价对象里第 j 个评价指标数据的最大值; $x_{j\min}$ 为所有评价对象里第 j 个评价指标数据的最小值。

b. 对气温、库水位和应力(由于应力存在拉、压应力之分,所以为区间型指标)3个区间型指标,设定指标的最优区间为 $[x_{j0}, x_j^*]$,无法容忍下限为 x'_j ,无法容忍上限为 x''_j ,则

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{(x_{j0} - x_{ij})}{x_{j0} - x'_j} & x'_j \leq x_{ij} < x_{j0} \\ 1 & x_{j0} \leq x_{ij} < x_j^* \\ 1 - \frac{(x_{ij} - x_j^*)}{x''_j - x_j^*} & x_j^* \leq x_{ij} \leq x''_j \\ 0 & x_{ij} > x''_j \text{ 或 } x_{ij} < x'_j \end{cases} \quad (3)$$

可得到初始的标准化矩阵 $Y = (y_{ij})$,将 Y 矩阵进行矩阵归一化处理:

$$v_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

得到标准化矩阵:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ v_{m1} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.1.3 评价指标权重计算

权重是表征指标重要性的权值,表明指标在整体评价中的重要程度。一般确定指标体系权重的方法分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法即根据以往的工程经验、特殊的地理条件、气候条件以及混凝土坝的结构特性综合考虑得出混凝土坝的各个评价指标的权值。客观赋权法即基于各个指标的监测数据通过某些特定的算法计算权重。主观赋权法简单,主要依靠评判人员的经验,人为因素太强;客观赋权法又过于依赖实时监测数据,这两种方法都存在一定的信息量的损失。为了全面地反映评价指标的重要性,使得评价结果更加准确,采用主观赋权与客观赋权相结合的组合赋权方法,最大限度地减小信息量的损失,使所获得的权重更接近各指标的实际情况。

a. 确定主观权重。选用 AHP 法来求取各指标的主观权重。AHP 法使用简便,系统性强,所需数据信息少,是一种常用的主观权重选取方法。AHP 法确定权重的具体步骤可参见文献[26]。

b. 确定客观权重。选取 DIDF 法确定客观权重^[27]。DIDF 法将数据自身信息与信息独立程度进行了组合,有效解决了熵权法、离散系数法等只考虑数据波动信息而未考虑信息间独立程度的问题,能够更真实地反映不同指标间的重要程度。

c. 确定组合权重。假定由主观赋权法确定的第 j 个评价指标的权重为 $\bar{\omega}_j$,结合客观赋权法求得

的第 j 个评价指标的权重 ω_j 通过线性加权的组合方法求解出组合权重,计算公式为

$$w_j = \lambda \tilde{\omega}_j + (1 - \lambda) \omega_j \quad (6)$$

式中: w_j 为第 j 个评价指标的组合权重; λ 为主客观权重的分配系数。

2.1.4 加权评价指标矩阵确定

由组合赋权法确定的组合权重为

$$\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (7)$$

式中: \mathbf{w} 为组合权重向量, $0 \leq w_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。

根据标准化后的矩阵 \mathbf{V} 和组合权重向量,则可构建最终评价指标矩阵为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} v_{11}w_1 & \cdots & v_{1n}w_n \\ \vdots & & \vdots \\ v_{m1}w_1 & \cdots & v_{mn}w_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2 正负理想点确定

在评价指标体系中,评价指标一般划分为效益型指标和成本型指标两大类,效益型指标表示指标值越大则评价结果越优,成本型指标表示指标值越小则评价结果越优。由于本文的数据标准化处理过程将所有指标处理成了效益型指标,则正、负理想点可以定义如下:

$$\begin{cases} f_j^*(+) = \max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) \\ f_j^*(-) = \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) \end{cases} \quad (9)$$

式中 $f_j^*(+)$ 和 $f_j^*(-)$ 分别为第 j 个评价指标的正理想点和负理想点。

2.3 理想点评价函数

采用评价对象到理想点的距离来衡量指标的优劣,评价对象距离正理想点越近,距离负理想点越远,则解越优。评价对象 i 到正、负理想点的距离 L_i^+ 、 L_i^- 分别为

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - f_j^*(+))^2} \quad (10)$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - f_j^*(-))^2} \quad (11)$$

理想点相对接近度 C_i ,即混凝土坝的评价对象 i 的安全度值,可表示为

$$C_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-} \quad (12)$$

C_i 值的区间为 $[0, 1]$, C_i 值越大,则到正理想点距离越小,到负理想点距离越大,混凝土坝安全度越高。

3 实例验证

某水利枢纽主要建筑物包括船闸、电站厂房、泄水闸、冲沙闸及挡水建筑物。坝型为混凝土坝,最大

坝高 47 m,坝面长度 2 606.5 m,坝轴线长 2 595.1 m。设计水位高程 66 m,总库容 15.8 亿 m^3 。坝基岩石由砂岩、粉砂岩、砾岩组成,坝体工程量为 580 万 m^3 ,1988 年 12 月竣工。为了检测大坝的运行状态,在施工的各个阶段同时埋设和安装了很多检测仪器,如钢筋计、应变计、温度计和测缝计等。

3.1 混凝土坝安全评价指标选取

根据监测仪器布置及监测项目,重点在冲沙闸坝段坝基部位(图 2,其中蓝色点表示应变计、红色点表示钢筋计、绿色点表示测缝计)建立混凝土坝结构安全评价指标体系,再对影响混凝土坝的环境因素建立安全评价指标体系,对混凝土坝的结构因素与环境因素进行相互验证,并且对多个典型控制点分别进行评价,能够有效解决单个测点评价的偶然性与局部最优性问题。

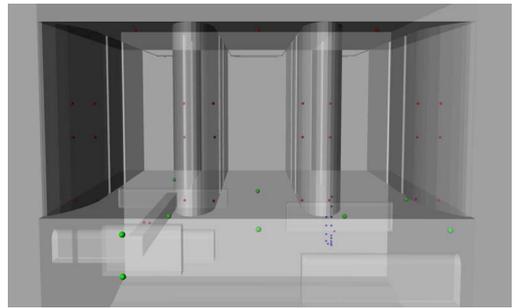


图 2 冲沙闸坝段仪器布置三维模型

大坝结构安全选取了冲沙闸坝段坝基部位高程为 36.6 m 处坝基的应变、冲沙闸闸孔顶部及侧面的 2 个典型测点的应力、测缝计测得的坝基变形和坝面位移 5 个指标。由于影响大坝的荷载主要是气温、库水位和时效,因此选取温度与水位作为环境指标,并进行持续性分析。考虑到气温、库水位对混凝土坝影响的滞后性,因此将上月库水位、上月气温加入到评价指标体系,构建了气温、库水位、上月气温、上月库水位 4 个因素的环境评价指标体系。

3.2 组合权重确定

组合权重是主观权重与客观权重根据线性加权组合计算得来的,主观权重计算采用 AHP 法,客观权重计算采用 DIDF 法。

针对大坝的结构安全评价指标,构造出判断矩阵,采用特征根法求出判断矩阵的最大特征值为 5.01,最大特征值对应的特征向量经过标准化后得到: $\tilde{\omega}_s = (0.124, 0.124, 0.124, 0.234, 0.394)$,即为结构安全评价指标的主观权重向量。

根据下式计算层次分析矩阵的随机一致性比率 C_R :

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)R_1} \quad (13)$$

式中: C_1 为一致性指标; R_1 为平均随机一致性指标; λ_{\max} 为最大特征值。

查平均随机一致性指标 R_1 标准值表得当 $n=5$ 时, $R_1=1.12$, 由式(13)求得 $C_R=0.002 < 0.1$, 所以一致性较好, 求得的权重可以作为结构安全评价指标的主观权重。

同理求得环境评价指标的主观权重向量为 $\tilde{\omega}_h=(0.249, 0.060, 0.595, 0.096)$, 查得当 $n=4$ 时 $R_1=0.9$, 由式(13)求得 $C_R=0.085 < 0.1$, 一致性较好, 即求得的权重可以作为环境评价指标的主观权重。

用 DIDF 法分别计算环境指标与结构安全指标的客观权重。经计算得出结构安全评价指标的客观权重向量 $\omega_s=(0.133, 0.254, 0.088, 0.331, 0.194)$; 同理可求得环境评价指标的客观权重向量 $\omega_h=(0.202, 0.298, 0.202, 0.298)$ 。

将 AHP 求得的主观权重与 DIDF 法求得的客观权重代入式(6), 分配系数取 0.5, 求出结构安全评价指标与环境评价指标的组合权重如表 1 和表 2 所示。从表 1 可以看出, 结构安全评价指标对大坝安全度的影响由大到小依次为坝基变形、坝面位移、孔顶应力、坝基应变、孔侧应力。从表 2 可以看出, 环境评价指标对大坝安全度的影响由大到小依次为上月库水位、库水位、上月气温、气温。

表 1 结构安全评价指标权重

指标	主观权重	客观权重	组合权重	熵权法权重
坝基应变	0.124	0.133	0.129	0.191
孔顶应力	0.124	0.254	0.189	0.204
孔侧应力	0.124	0.088	0.106	0.205
坝面位移	0.234	0.331	0.282	0.202
坝基变形	0.394	0.194	0.294	0.197

表 2 环境评价指标权重

指标	主观权重	客观权重	组合权重	熵权法权重
库水位	0.249	0.202	0.225	0.257
气温	0.06	0.298	0.179	0.243
上月库水位	0.595	0.202	0.399	0.257
上月气温	0.096	0.298	0.197	0.243

为了进一步验证本文建立模型的合理性, 采用文献[16]的熵权理想点法对监测数据进行了计算, 求得各评价指标的权重结果一并列于表 1 和表 2 中, 可以看出使用文献[16]中的方法求得的结构安全指标权重与环境指标权重都出现了平均化的趋势, 与工程实际不相符, 原因是熵权法只考虑了数据的波动性, 并未考虑各监测指标间的独立程度, 本文采用的 DIDF 法则综合考虑了以上两点, 且在此基础上耦合 AHP 法, 有效解决了客观赋权法过于依赖监测数据的局限性。

3.3 混凝土坝安全度评价分析

基于理想点法对混凝土坝多个测点长期运行监测数据进行了计算, 通过式(8)~(10)计算得到了混凝土坝结构安全指标体系的实时安全度值, 图 3 为两个典型控制点的结构安全指标安全度。对影响混凝土坝的环境因素进行了实时的安全评价, 得出了混凝土坝环境指标的实时安全度如图 4 所示。

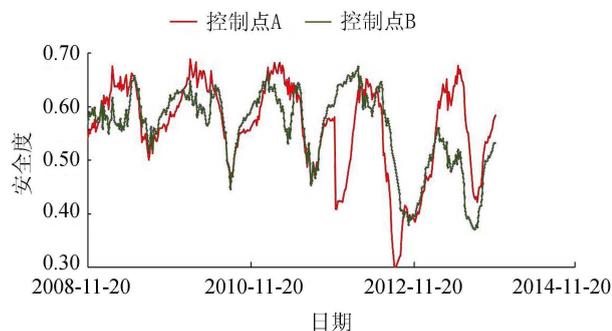


图 3 混凝土坝结构安全指标安全度

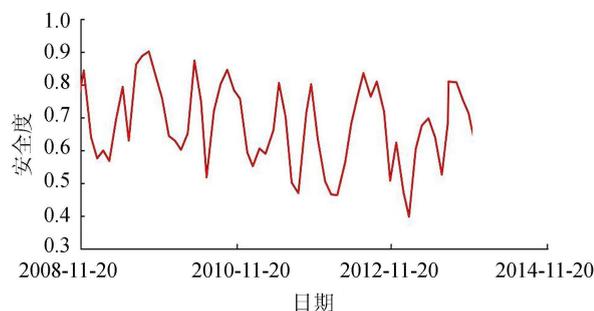


图 4 混凝土坝环境指标安全度

从图 3 可以看出, 两个控制点有着相同的变化规律, 其安全度均出现了明显的以年为周期的变化, 控制点 A 的安全度波动幅度略大于控制点 B。安全度在每年的 8、9 月出现最低值, 这是由于结构安全评价指标主要是坝基内的应力、应变、变形与坝面位移, 在 8、9 月气温高, 混凝土受热膨胀导致温度应力大, 会出现安全度偏低的情况, 符合工程实际。

从图 4 可以看出, 环境指标也出现了周期性变化趋势, 安全度最低值分布在每年的 1、2 月。由于环境指标主要是气温与库水位, 在每年冬天低温产生的冻胀效应会对坝体产生不利的影响, 所以会呈现出 1、2 月安全度值偏低的情况, 环境指标的安全度在 7、8 月也呈现出较低的情况, 这是由于夏季气温高, 混凝土温度应力提高, 并且坝址所在地夏季多雨, 库水位上涨, 评价结果与实际情况相符。

综合以上模型求得各评价指标权重值与混凝土坝安全度值, 本文模型计算结果与工程实际安全状态相符, 计算简便, 能够较好满足工程安全评价的需要。

4 结 语

本文将理想点法应用于混凝土坝长期运行安全评价中,通过分析混凝土坝的安全因素构建了混凝土坝安全评价指标体系,评价指标综合考虑了影响混凝土坝安全的内、外因素,能够较充分地反映混凝土坝结构运行的安全状态。利用 AHP 法与 DIDF 法综合确定各指标的权值,建立了混凝土坝长期运行安全的理想点模型,将模型应用于某实际混凝土坝工程安全度评价,环境指标与结构安全指标评价结果互相吻合,并且与工程实际运行状态相符,表明该评价模型能够客观反映混凝土坝的安全度。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2016 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2016.
- [2] 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. Current status and prospects of long-term service and risk assessment of concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5):1-12. (in Chinese))
- [3] 刘强, 沈振中, 聂琴, 等. 基于灰色模糊理论的多层次大坝安全综合评价[J]. 水电能源科学, 2008, 26(6): 76-78. (LIU Qiang, SHEN Zhenzhong, NIE Qin, et al. Research on battery charging control strategy in stand-alone wind/photovoltaic hybrid street lamp lighting system [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(6): 76-78. (in Chinese))
- [4] 康耀红. 数据融合理论与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2006.
- [5] 何金平. 信息熵理论与大坝健康诊断[J]. 大坝与安全, 2015(4): 1-5. (HE Jinping. The relation between information entropy theory and dam health diagnosis[J]. Dam and Safety, 2015(4): 1-5. (in Chinese))
- [6] 季根蔡. 基于层次分析法的水库大坝安全鉴定的综合评价[J]. 红水河, 2007, 26(1): 133-136. (JI Gencai. Overall evaluation of dam safety based on the analytic hierarchy process [J]. Hongshui River, 2007, 26(1): 133-136. (in Chinese))
- [7] 吴云芳, 李珍照, 徐帆. BP 神经网络在大坝安全综合评价中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 25-29. (WU Yunfang, LI Zhenzhao, XU Fan. Application of BP artificial neural network to comprehensive evaluation of dam safety [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(1): 25-29. (in Chinese))
- [8] 李春雷, 李晓璐. 混凝土安全的多层次模糊综合评价研究[J]. 水力发电, 2010, 36(10): 93-95. (LI Chunlei, LI Xiaolu. Study on comprehensive assessment of dam safety based on AHP and fuzzy math[J]. Water Power, 2010, 36(10): 93-95. (in Chinese))
- [9] 宋恩来. 混凝土坝老化与安全评价[J]. 大坝与安全, 2008(4): 4-8. (SONG Enlai. Aging and safety evaluation of concrete dam [J]. Dam and Safety, 2008(4): 4-8. (in Chinese))
- [10] 李同春, 王仁坤, 游启升, 等. 高拱坝安全度评价方法研究[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊1): 83-88. (LI Tongchun, WANG Renkun, YOU Qisheng, et al. Study on safety evaluation methods for high arch dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Sup1): 83-88. (in Chinese))
- [11] 苏怀智, 刘红萍. 高重力坝抗滑稳定安全度分析[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 20-23. (SU Huaizhi, LIU Hongping. Stability safety degree against sliding in high gravity dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 20-23. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 何勇军. 模糊测度理论在大坝安全智能决策支持系统中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 605-609. (HE Yongjun. Application of fuzzy measure theory in DSIDSS [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(5): 605-609. (in Chinese))
- [14] 高健, 黄海, 周登峰. 拱坝安全度模糊综合评判模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 164-167. (GAO Jian, HUANG Hai, ZHOU Dengfeng. Fuzzy comprehensive evaluation model for arch dam safety [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(2): 164-167. (in Chinese))
- [15] FENG J, WEI H, PAN J, et al. Comparative study procedure for the safety evaluation of high arch dams[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(3): 306-317.
- [16] 刘愚. 基于熵权-理想点法的大坝安全评价模型及应用[J]. 水电能源科学, 2016, 34(5): 73-76. (LIU Yu. Dam safety evaluation model and based in entropy weight and idea point method [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(5): 73-76. (in Chinese))
- [17] 李影, 刘治愚. 基于组合赋权-理想点法的大坝安全评价模型[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(1): 60-66. (LI Ying, LIU Zhiyu. Evaluation of dam safety based on combination weight-idea point method [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14(1): 60-66. (in Chinese))

(下转第 81 页)