

基于改进层次分析法的大坝性态安全诊断云模型

黎良辉, 杨斌, 魏博文, 徐兴忠
(南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 针对大坝性态安全诊断中准则层与指标层的不确定性、主观赋权的影响性以及隶属区间的模糊性等问题, 提出一种基于模糊云理论的大坝性态安全综合诊断模型。以现役大坝为诊断对象, 在已构建大坝性态安全诊断指标体系的基础上, 运用改进层次分析法的赋权理论确定权重矩阵, 并通过云模型可量化大坝性态诊断中的随机性与模糊性的原理求解隶属度矩阵; 再将上述矩阵进行模糊数学运算的结果依据最大隶属度原则综合评判。最后将该模型应用到某实际大坝工程中, 得其安全诊断结果与国内学者分析成果基本一致, 且与大坝实际的服役情况相吻合, 从而验证了该模型的有效性与可行性。

关键词: 大坝安全; 云模型; 改进层次分析法; 诊断模型; 现役大坝

中图分类号: TV698.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0209-06

Cloud model of dam behavior safety diagnosis based on improved analytic hierarchy process

LI Lianghui, YANG Bin, WEI Bowen, XU Xingzhong

(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: According to the uncertainty, the influence of subjective weighting and the fuzziness of subordinate interval of criterion layer and index layer in dam safety diagnosis, a dam safety synthesis diagnosis model based on Fuzzy cloud theory is put forward. Taking an operating dam as the object of diagnosis, on the basis of the dam safety assessment index system, the weight matrix was determined by using the weighting theory of the improved analytic hierarchy process, the membership matrix is solved by means of the cloud model to quantify the randomness and fuzziness in dam behavior diagnosis. Then, the results of fuzzy mathematical operation of the above matrix are evaluated according to the principle of maximum membership degree. Finally, the model is applied to an actual dam project, the safety diagnosis results of domestic scholars and analysis results are basically the same, and the results are consistent with the actual service conditions, which verifies the feasibility and effectiveness of this model.

Key words: dam safety; cloud model; improved analytic hierarchy process; diagnostic model; operating dam

1 研究背景

据统计我国已建成的各类大坝约有 8.7×10^4 座, 其中主要集中在 20 世纪 50 年代至 70 年代修建, 由于当时的各种历史原因, 加之时至今日大坝已运行多年, 故导致这些大坝存在不同程度的安全隐患^[1]。由于没有及时处理这些安全隐患, 而导致大坝失事, 如位于河南省的板桥水库因坝顶漫溢而导致垮坝^[2]。鉴于此, 对已建大坝进行安全评价已是

刻不容缓。

目前针对大坝安全评价的主要技术手段有神经网络^[3-5]、层次分析^[6-7]、熵权^[8-9]等方法。但这些方法均未考虑各项指标的模糊性与随机性, 且都具有各自的缺点: 神经网络法难于精确分析各项性能指标, 体系结构的通用性较差; 传统层次分析法的指标赋权太依赖于专家的评判, 使主观因素影响了结果的准确性; 熵权法没有进行各指标之间的横向对比, 并且其权数的确定过分依赖样本。近年来诸多

收稿日期: 2017-08-14; 修回日期: 2017-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51569014、51409139、51669013)

作者简介: 黎良辉(1973-), 男, 江西崇义人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水工结构工程研究。

通讯作者: 魏博文(1981-), 男, 江西彭泽人, 副教授, 主要从事水工结构安全监控研究。

学者对大坝安全评价进行了更深入的研究,张帆等^[10]采用改进的遗传算法,提出了基于遗传神经网络的大坝安全评价方法;冯学慧^[11]将正态云模型理论与熵权法相结合,建立了基于熵权法与正态云模型的大坝安全综合评价模型;何金平等^[12]针对大坝安全监测信息中普遍存在的不确定性,提出了基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法;李影等^[13]引入理想点法的基本原理,建立了基于理想点法的大坝安全评价模型。本文拟采用云模型理论并结合改进层次分析法建立了评价模型,该模型能够充分表征不确定性概念的模糊性与随机性,同时可降低主观性对指标权重的影响。并结合工程实例验证了该模型的有效性与可行性,从而为大坝安全评价提供一条更为有效的新途径。

2 建立大坝安全评价模型

2.1 指标权重的确定

为了在运算时能省略一致性检验的步骤,提高评价的效率,并且降低主观性对指标权重的影响,从而更加准确地得到大坝安全评价指标体系中的各项指标权重。本文运用改进层次分析法^[14-15](下文简称 IAHP)对评价指标赋权。具体步骤如下:

(1) 构建层次递阶结构模型。将 IAHP 运用到工程实例时,为了减少指标权重中主观因素的影响,应先把各评价因子根据不同性能划分成 3 个单向依赖的层次,分别为:目标层、准则层、指标层。

(2) 构建比较标度矩阵。对模型中同一层次元素进行重要程度比较,采用 0~2 标度,其取值分变为 0(不重要)、1(一样重要)、2(重要),从而得出比较矩阵为:

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为第 i 种评价指标 i 第 j 种评价指标的比较结果,且 $a_{ii} = 1$ 。

(3) 计算各指标的排序指数。求出第 i 种评价指标与同层所有评价指标的对比结果并分别求和,得排序指数为:

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

(4) 构造判断矩阵。根据求得的排序指数 r_i 构造判断矩阵 B_{ij} ,其各元素 b_{ij} ,如下式所示:

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(k_m - 1) + 1, & r_i \geq r_j \\ \left[\frac{r_j - r_i}{r_{\max} - r_{\min}}(k_m - 1) + 1 \right]^{-1}, & r_i < r_j \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k_m = \frac{r_{\max}}{r_{\min}}$ 。

(5) 构造判断矩阵 B_{ij} 的拟优一致矩阵 B'_{ij} ,其中各元素 b'_{ij} ,如下式所示:

$$b'_{ij} = 10^{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (c_{ik} - c_{jk})} \quad (4)$$

式中: $c_{ij} = \lg b_{ij}$ 。

(6) 求 B'_{ij} 的特征值 w ,具体步骤如下:

首先求出 B'_{ij} 每一行元素的乘积 M_i (i 为评价指标的个数),然后计算方根得矩阵 T_i ,如公式(5)所示:

$$T_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (5)$$

再求出各评价指标的权重值 w_i ,如公式(6)所示:

$$w_i = \frac{T_i}{\sum_{j=1}^n T_j} \quad (6)$$

重复上述步骤即可求得准则层相对于目标层与指标层相对于准则层的各指标权重值,综合二者,可得指标层的各评价指标相对于目标层的权重系数 w_n 。

2.2 云模型理论

云模型是我国李德毅院士率先提出的,它是一种在处理模糊性与不确定性等问题上具有很好适用性的模型。假设集合 U 为定量论域, C 为该定量论域内的定性概念。存在具有稳定倾向性的随机数 x (记为 $x \in U$),且 x 为 C 上的一次随机的实现,称作 x 对 C 的确定度。若 U 中的元素都是简单有序排列的,则将 U 视作基础变量,确定度 ($\mu(x) \in [0,1]$)。所谓的云就是 x 在 U 上的随机分布,云滴表示为 $(x, \mu(x))$ 。如图 1 所示。

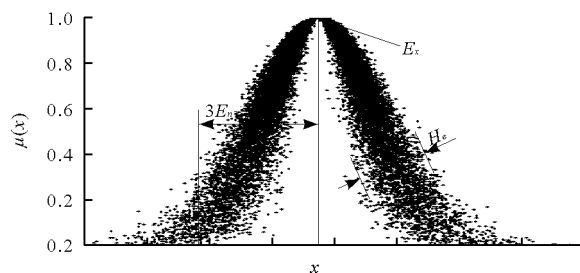


图 1 云模型及其数字特征

据图 1 可知,云模型是通过 3 个特征参数(期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e) 刻画的,其中, E_x 是论域空间 U 的中心值,且是最能代表定性概念的数值。 E_n 主要是用来度量定性概念的随机性和不确定性。 E_n 不仅

度量了定性概念所存在的模糊性和不确定性,还能表示模糊性与不确定性之间的关联性。 H_e 即熵的熵,用来反映对熵的不确定性,表示在定性概念中所有云滴不确定度的凝聚性。因此, H_e 的大小决定了云的厚度和离散度。

云发生器分为两类:一是将概念从定性到定量转换的正向云发生器,即通过云的 3 个特征参数(E_x 、 E_n 、 H_e) 形成云滴,从而使语言表达的定性信息中确定量的范围以及分布规律得以实现。二是将概念从定量到定性转换的逆向云发生器,即将已确定的数据转换成云的 3 个特征参数来说明定性概念。云发生器转换原理如图 2 所示。

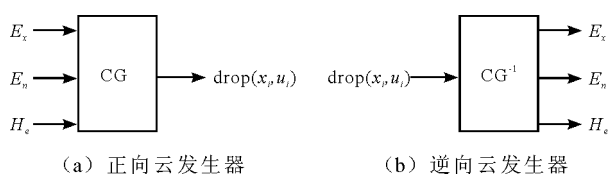


图 2 云发生器

通过云模型正向发生器完成大坝安全评价指标的定性定量的相互转换,具体步骤如下:

(1) 根据所得的期望 E_x 和超熵 H_e , 运用 Matlab 软件求得正态随机数 E'_n 。

(2) 根据步骤 1 所得的 E'_n 的绝对值和期望 E_x , 运用 Matlab 软件求得另一个正态随机数 x 。

(3) 根据步骤 1、2 所求得两个正态随机数来计算确定度 μ , 如下式所示:

$$\mu = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2(E'_n)^2}} \quad (7)$$

(4) 重复 n 次步骤 1 ~ 3, 直至获得满足要求的云滴数量为止。

2.3 综合评价

借鉴同领域其他学者对大坝安全评价指标的分类标准,建立大坝安全评价指标体系;再通过 IAHP 求得各评价指标权重系数构建权重矩阵,记做 W ;然后利用云模型理论确定的各评价指标隶属度构建隶属度矩阵,记作 B ;最后采用模糊综合评价理论计算求得综合评价矩阵 Z ,并根据最大隶属度识别原则,确定大坝安全等级。具体步骤如下:

(1) 建立大坝安全评价指标体系和评价指标分级标准及赋值。

(2) 通过改进层次分析法求得大坝安全评价指标的权重矩阵 $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ 。

(3) 计算正态云模型的特征值 $E_{x_{ij}}$ 、 $E_{n_{ij}}$ 、 $H_{e_{ij}}$ (根据经验取值), 其中 $E_{x_{ij}}$ 可通过评价指标标准的区间

(x_{ij}^1, x_{ij}^2) 求得, 如公式 (8) 所示:

$$E_{x_{ij}} = \frac{(x_{ij}^1 + x_{ij}^2)}{2} \quad (8)$$

根据每个区间的界限值都具有一定的模糊性,可以同时隶属于相邻的两个等级,此时满足相邻等级的隶属度相等,即:

$$\exp\left\{-\frac{(x_{ij}^1 - x_{ij}^2)^2}{8(E_{n_{ij}})^2}\right\} = 0.5 \quad (9)$$

$$\text{故可得 } E_{n_{ij}} = \frac{x_{ij}^1 - x_{ij}^2}{2.355}。$$

(4) 生成云图。根据已确定的 E_x 、 E_n 、 H_e , 生成与 n 个评价指标相对应的 n 个隶属度云图。对于所评价的对象只要能获得其 n 个评价指标的相关资料,即可生成 n 个相应的隶属度云图。

(5) 建立隶属度矩阵: 根据大坝安全评价指标所对应的隶属度云图,可以清楚地确定某一评价指标在相应安全等级下的隶属度,从而可得该评价指标隶属于各安全等级的隶属度矩阵: $C_p = [c_{p1}, c_{p2}, \dots, c_{pn}]$, 同理,可求得各评价指标在各安全等级下的隶属度。

综上所述,可根据各评价指标在各安全等级下的隶属度综合确定隶属度矩阵 B , 如下式所示:

$$B = [C_1, C_2, \dots, C_n] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{p1} & c_{p2} & \cdots & c_{pn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

(6) 将求得的权重矩阵 W 与隶属度矩阵 B 通过模糊综合评价理论进行数学运算,从而建立综合评价矩阵 Z 。综合评价矩阵具体表达式为:

$$Z = WB = [w_1, w_2, \dots, w_m][C_1, C_2, \dots, C_m]^T \quad (11)$$

(7) 最终通过最大隶属度识别原则确定大坝安全等级,得到评价结果。

3 实例分析

位于四川省的某水电站,大坝设计坝高为 305 m,主要任务是发电。水库正常蓄水位 1 880 m (库容 $V = 77.65 \times 10^8 \text{ m}^3$),死水位 1 800 m,调节库容 $49.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,属于年调节水库。电站装机 6 台,单机容量 600 MW,总装机容量 3 600 MW。工程等级为 I 等工程,主要水工建筑物为 1 级。为了能实时获得大坝在运行期的各项安全数据,在工程建设期

针对上游水位、坝体位移、绕坝渗流等布设了众多的监测仪器,本文通过查询各监测数据来获取所需评价指标($I_1 \sim I_9$)的取值。

3.1 确定大坝安全评价指标体系及标准

建立评价模型之前,先根据影响大坝安全的各种因素构建大坝安全评价指标体系,并将安全评价按照一定的次序分为安全、基本安全、不安全、较不安全和极不安全 5 个等级。本文参考同领域其他学者对大坝安全评价指标的分类标准,并结合收集到的观测资料,从环境、渗流、变形等方面建立大坝安全评价指标体系。建立的大坝安全评价指标体系如图 3 所示。

大坝安全评价指标分级标准^[11]如表 1 所示,其中 I_1 在一定的范围内会有波动,因此采用实际水位

与正常蓄水位的差值, I_2 采用观测日前期降雨量均值, I_3 采用实际气温与年平均气温差值的绝对值, I_7 采用帷幕折减系数。上述评价指标界限值的确定并不是固定的,本文主要是通过长期的实测资料和咨询专家以及工程类比等方法综合确定。

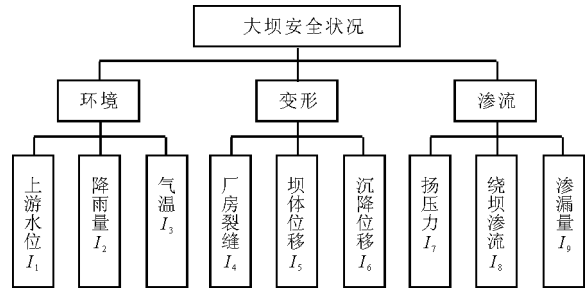


图 3 大坝安全评价指标体系

表 1 评价指标分级标准及赋值

指标	安全(Ⅰ)	基本安全(Ⅱ)	不安全(Ⅲ)	较不安全(Ⅳ)	极不安全(Ⅴ)
I_1/m	-20 ~ -10	-10 ~ 1	1 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5
$I_2/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	0 ~ 2	2 ~ 4	4 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 50
$I_3/^{\circ}\text{C}$	0 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 50
I_4/mm	0 ~ 0.4	0.4 ~ 0.8	0.8 ~ 1.2	1.2 ~ 4.0	4.0 ~ 10
I_5/mm	0 ~ 20	20 ~ 60	60 ~ 100	100 ~ 140	140 ~ 200
I_6/m	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 5	5 ~ 10
I_7	0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0
$I_8/(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	0 ~ -0.05	-0.05 ~ -0.2	-0.2 ~ -0.4	-0.4 ~ -2	-2 ~ -10
$I_9/(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	0 ~ 3	3 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 50	50 ~ 100

3.2 构建权重矩阵

依据已建立的大坝安全指标体系,采用改进层次分析法按上述步骤依次求得各指标权重系数 w_n ,结果如表 2 所示。并由各指标权重系数构建权重矩阵 W 。

3.3 构建隶属度矩阵

根据上述确定的大坝安全评价指标体系和评价指标标准,再通过公式(8)、(9)求得各评价指标在对应等级下的特征参数($E_{x_{ij}}$ 、 $E_{n_{ij}}$ 、 $H_{e_{ij}}$),结果如表 3 所示。

根据表 3 数据,在 Matlab 软件平台上生成各评价指标在不同等级下的正态云图,从而确定相应的隶属度。结果如图 4 所示。

考虑到云模型具有一定的随机性,故为提高结果的可靠度,在通过云模型正向发生器计算隶属度

向量矩阵 B 时,本文通过重复计算 500 次加权平均的方法求得最终的综合隶属度。结果如表 4 所示。

表 2 各指标权重计算结果

评价指标	指标取值	指标权重
I_1	-13	0.121
I_2	3	0.104
I_3	4	0.086
I_4	0.3	0.118
I_5	18	0.127
I_6	1.2	0.149
I_7	0.17	0.082
I_8	-0.1	0.098
I_9	5	0.115

表 3 大坝安全评价指标正态云标准

指标	安全 (I)	基本安全 (II)	不安全 (III)	较不安全 (IV)	极不安全 (V)
I_1	(- 15, 4. 246, 0. 5)	(- 4. 5, 4. 671, 0. 5)	(2, 0. 849, 0. 5)	(3. 5, 0. 425, 0. 5)	(4. 5, 0. 425, 0. 5)
I_2	(1, 0. 849, 0. 1)	(3, 0. 849, 0. 1)	(7, 2. 548, 0. 1)	(15, 4. 246, 0. 5)	(35, 12. 739, 1)
I_3	(2. 5, 2. 123, 0. 1)	(7. 5, 2. 123, 0. 1)	(15, 4. 246, 0. 5)	(25, 4. 246, 0. 5)	(40, 8. 493, 0. 5)
I_4	(0. 2, 0. 17, 0. 1)	(0. 6, 0. 17, 0. 1)	(1, 0. 17, 0. 1)	(2. 6, 1. 189, 0. 1)	(7, 2. 548, 0. 1)
I_5	(10, 8. 493, 1)	(40, 16. 985, 1)	(80, 16. 985, 1)	(120, 16. 985, 1)	(170, 25. 478, 1)
I_6	(0. 5, 0. 425, 0. 1)	(1. 5, 0. 425, 0. 1)	(2. 5, 0. 425, 0. 1)	(4, 0. 849, 0. 1)	(7. 5, 2. 123, 0. 1)
I_7	(0. 1, 0. 085, 0. 01)	(0. 3, 0. 085, 0. 01)	(0. 5, 0. 085, 0. 01)	(0. 7, 0. 085, 0. 01)	(0. 9, 0. 085, 0. 01)
I_8	(- 0. 025, 0. 021, 0. 1)	(- 0. 125, 0. 064, 0. 1)	(- 0. 3, 0. 085, 0. 1)	(- 1. 2, 0. 679, 0. 1)	(- 6, 3. 397, 0. 1)
I_9	(1. 5, 1. 274, 0. 5)	(6. 5, 2. 972, 0. 5)	(15, 4. 246, 0. 5)	(35, 12. 739, 0. 5)	(75, 21. 231, 0. 5)

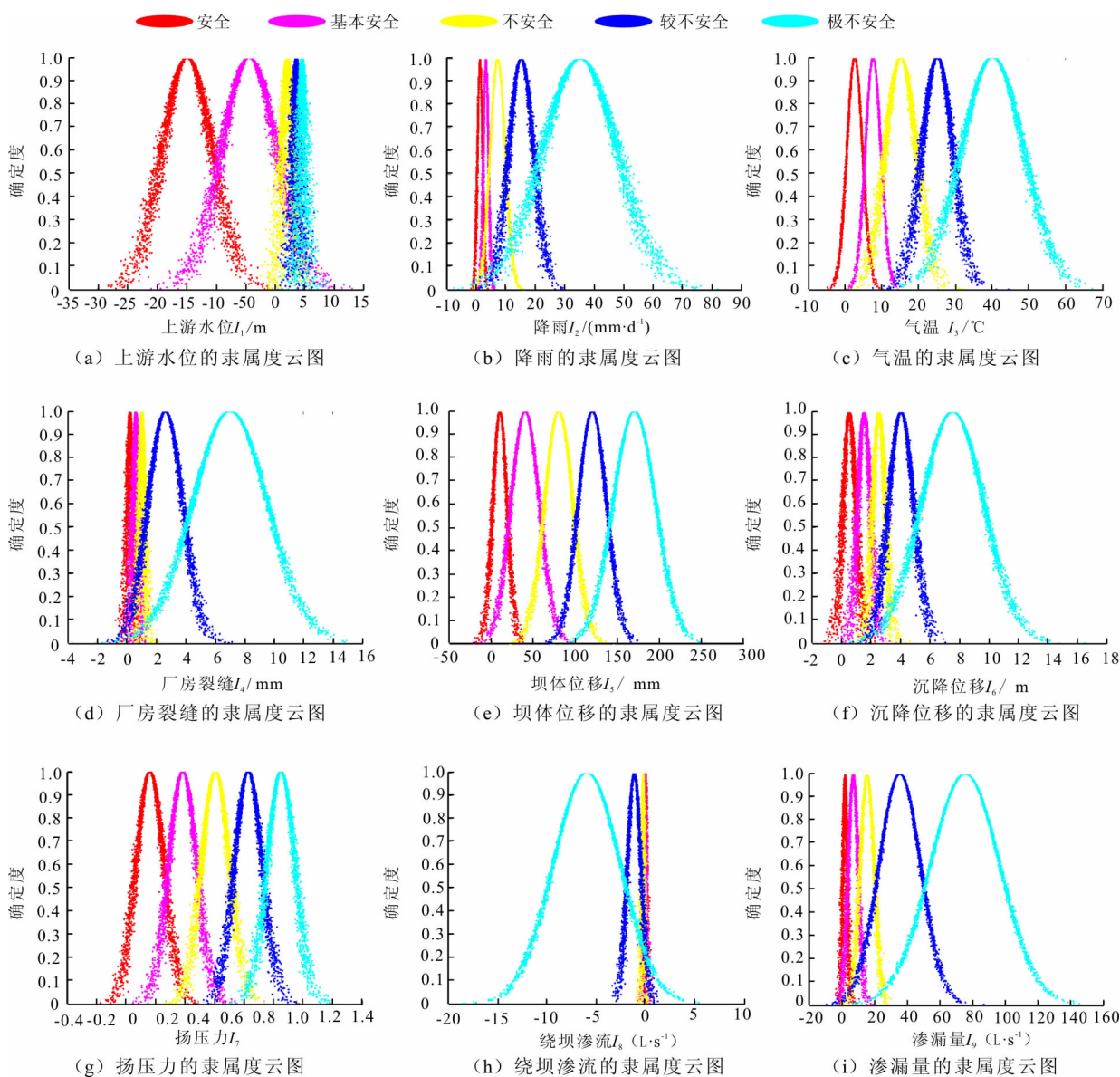


图 4 各评价指标隶属于大坝安全等级的云图

表 4 各评价指标在相应等级下的确定度

指标	安全 (I)	基本安 全(II)	不安全 (III)	较不 安全(IV)	极不安 全(V)
I_1	0.902	0.077	0	0	0
I_2	0.873	0.254	0	0	0
I_3	0.861	0.255	0	0	0
I_4	0.811	0.286	0	0	0
I_5	0.801	0.322	0.004	0	0
I_6	0.345	0.723	0.201	0.001	0
I_7	0.869	0.222	0	0	0
I_8	0.791	0.301	0	0	0
I_9	0.797	0.268	0	0	0

3.4 大坝安全评价结果

根据模糊综合评价理论将得到的权重矩阵 W 与隶属度矩阵 B 进行数学运算,即可得到评价集上的模糊子集 Z ,满足 $Z = WB = [z_1, z_2, \dots, z_m]$,结果如表 5 所示。

表 5 大坝安全评价结果

安全 等级	安全 (I)	基本 安全(II)	不安全 (III)	较不 安全(IV)	极不 安全(V)
隶属度	0.763	0.319	0.030	0	0

由表 5 可知,该大坝处于安全等级(I)的隶属度为 0.763,处于基本安全(II)等级的隶属度为 0.319,处于基本安全(III)等级的隶属度为 0.030,处于基本安全(IV)等级的隶属度为 0,处于基本安全(V)等级的隶属度为 0,再根据最大隶属度识别原则,最终确定该大坝的等级为安全。本文评价结果与文献[11]的评价结果一致,证明了该评价方法的可行性,并且本文所采用的方法在运算时能够省略一致性检验步骤,相对文献[11]不仅提高了评价效率,还降低了主观性对指标权重的影响。

4 结 论

(1)针对大坝安全评价过程中的模糊性与不确定性等特征,本文提出了基于改进层次分析法与云模型的大坝安全模糊评价模型。该模型所采用的改进层次分析法能够较好地减少指标权重中主观因素的影响,且通过云模型理论解决了安全评价中存在的概念不确定性问题;因此评价结果更具说服力。

(2)将本文工程实例的计算结果与国内学者所做研究进行比对,评价结果基本一致,与实际工程的服役情况相吻合。从而验证了本文所建模型的有效性与可行性,并为分析大坝安全评价提供了一条行之有效的新途径。

(3)除评价方法的选取外,评价指标划分的标准是否合理亦会对大坝安全评价结果产生较大的影响;因此在后续的工作中,亟需对安全评价指标的划分标准问题进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 吴中如. 老坝病变和机理探讨[J]. 中国水利, 2000(9): 55-57.
- [2] 佟瑞鹏,陈大为. 流域梯级水库事故风险分析与防洪联合调度实现[J]. 中国安全科学学报, 2009,19(3):119-124.
- [3] 苏怀智,吴中如,温志萍,等. 遗传算法在大坝安全监控神经网络预报模型建立中的应用[J]. 水利学报,2001,31(8):44-48.
- [4] 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):25-28.
- [5] 闫滨,高真伟,李东艳. RBF 神经网络在大坝安全综合评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3991-3997.
- [6] 田林钢,靳聪聪,巴超. 改进的模糊层次分析法在海堤工程安全评价中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2013,46(3):317-320+327.
- [7] 张帅,苏怀智,崔书生. 基于 AHP-信息熵的大坝安全性态模糊综合评价[J]. 水电能源科学,2012,30(2):69-72.
- [8] 吴胜文,秦鹏,高健,等. 熵权-集对分析方法在大坝运行风险评价中的应用[J]. 长江科学院院报,2016,33(6):36-40.
- [9] 张瀚,陈建康,高策,等. 基于熵权集的大坝分部位动态健康评价方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2014,46(6):56-62.
- [10] 张帆,胡伍生. 遗传神经网络在大坝安全评价中的应用[J]. 测绘工程,2014,23(7):41-45.
- [11] 冯学慧. 基于熵权法与正态云模型的大坝安全综合评价[J]. 水电能源科学,2015,33(11):57-60.
- [12] 何金平,高全,施玉群. 基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法[J]. 系统工程理论与实践,2016,36(11):2977-2983.
- [13] 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.
- [14] 田水承,王曦,王莉,等. 改进层次分析法的瓦斯涌出量组合预测方法研究[J]. 西安科技大学学报,2012,32(1):25-28.
- [15] 金菊良,魏一鸣,丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报,2004,35(3):65-70.