

考虑规范分级的水闸安全云评价方法

何杨杨^{1,2}, 苏怀智^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为解决当前水闸工程安全评价的部分方法与规范结合不紧密等问题,依据规范的分级标准,将水闸的健康状况划分为4个等级,在主、客观组合赋权的基础上运用云模型,判断各指标所属的安全等级,自下而上实现水闸工程安全评价。通过分析计算某实际水闸工程的安全状况,验证此方法的可行性与有效性。该评价模型从行业规范出发,兼顾了水闸安全评价中的主、客观信息,实现了水闸各项指标和整体工程的定性及定量等级评价,有效减小了不确定因素对整体水闸工程安全评价的影响,为水闸的运行维护及管理工作提供参考。

关键词:水闸工程;安全评价;规范分级;层次分析法;改进离差最大化法;云模型

中图分类号:TV698 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)02-0029-07

Cloud assessment method of sluice safety considering specification classification//HE Yangyang^{1,2}, SU Huaizhi^{1,2}
(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to solve the problem that some safety evaluation methods of sluice projects are not closely combined with the specifications, the health status of a sluice is divided into four grades according to the grading standards of the specifications. Based on subjective and objective combination weighting, a cloud model is used to judge the safety grade of each index, and as a result, the safety evaluation of a sluice project is realized from bottom to top. By analyzing and calculating the safety conditions of a practical sluice project, the feasibility and validity of the proposed method are verified. Starting from the industry standards, the evaluation model integrates the subjective and objective information into the safety evaluation of a sluice. The qualitative and quantitative grade evaluation of each index and the whole project are realized and the influence of uncertainties on the overall safety evaluation is effectively reduced, providing ideas for the operation, maintenance and management of sluices.

Key words: sluice project; safety evaluation; specification classification; analytic hierarchy process; improved deviation maximum method; cloud model

根据《全国水利发展统计公报》,截至2016年全国已建成流量为5 m³/s及以上的水闸105 283座,其中大型水闸892座^[1]。然而,大部分水闸却出现了防洪标准偏低、结构不稳定、防冲设施损坏、渗流破坏、结构损害、金属结构机电设施老旧等病险问题^[2]。水闸安全评价的目的是判定水闸的安全等级,并及时进行相应的补强加固或维修报废。对水闸安全状况的系统研究,主要从构建评价指标体系、计算权重系数和建立数学模型三方面考虑^[2]。国内水闸安全综合评价方法主要有灰色理论、模糊综合评价理论和物元分析法等^[3-5]。但由于影响水闸安全状况的因素众多、指标体系的建立缺乏统一标

准等问题,造成现有的部分水闸安全评价方法脱离水闸规范,且易受主观性影响^[6-10]。

随着组合赋权方法的不断完善与云模型^[11]的提出,本文将二者结合,依据规范分类方法,将水闸工程的健康状况划分为4个等级,兼顾主、客观信息,实现水闸各项指标的分级评价及水闸工程整体的综合评价。该评价模型充分考虑定性与定量信息之间的相互转化,反映了模糊性和随机性之间的关联。

1 水闸安全评价指标组合赋权方法

为实现水闸安全评价中主、客观赋权法的优势

基金项目:国家自然科学基金(51979093);国家重点研发计划(2018YFC0407101,2017YFC0804607)
作者简介:何杨杨(1996—),女,硕士研究生,主要从事水工结构与大坝安全监测研究。E-mail:15150688655@163.com
通信作者:苏怀智(1973—),男,教授,博士,主要从事涉水工程安全防控与提能延寿研究。E-mail:su_huaizhi@hhu.edu.cn

互补,将层次分析法与改进离差最大化法相结合,以确定水闸的各指标权重^[8]。

1.1 层次分析法

层次分析法通过指标之间的两两比较来体现各指标在水闸体系中的重要性程度,其计算步骤如图 1 所示。

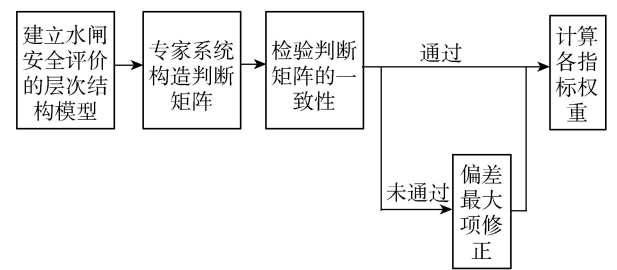


图 1 层次分析法计算步骤

以 SL214—2015《水闸安全评价导则》和水闸评价及安全鉴定的相关规范为主,兼顾后文所选实例中水闸存在的问题,建立水闸安全评价指标体系(表 1)。将整个评价体系分为 3 层^[5]:第 1 层是总目标层,为水闸的安全评价;第 2 层是子目标层,包含安全性、适用性和耐久性 3 个子目标;第 3 层是因素层,包含 19 个相互独立的影响水闸安全的评价指标。

表 1 水闸安全评价指标体系

水闸安全评价 A	安全性 B ₁	防洪能力 C ₁
		抗震能力 C ₂
		抗渗稳定性 C ₃
		抗滑稳定 C ₄
		闸室倾斜度 C ₅
		地基承载力 C ₆
		结构完好性 C ₇
		消能防冲能力 C ₈
	适用性 B ₂	相对过水能力 C ₉
		相对漏水流量 C ₁₀
		闸门及启闭机的控制能力 C ₁₁
		设备老化情况 C ₁₂
	耐久性 B ₂	混凝土强度 C ₁₃
		裂缝密度 C ₁₄
		最大裂缝宽度 C ₁₅
		平均碳化学深度 C ₁₆
		钢筋锈蚀度 C ₁₇
		体积损失率 C ₁₈
		管理维护能力 C ₁₉

1.2 基于改进白化权函数的离差最大化法

水闸相关规范^[12]将其安全状态划分为一类闸、二类闸、三类闸和四类闸 4 个类别,本文对应地把水闸的健康状态划分为正常、基本正常、病变和危险 4 个等级。确定水闸各等级健康状态在[0,1]之间具有传统模糊数学隶属度特性的区间映射关系^[13]为

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{正常, 基本正常, 病变, 危险}\} = \{[1, 0.85], (0.85, 0.60], (0.60, 0.30], (0.30, 0]\}$$

将水闸各等级健康状态隶属度的区间中点值作为该等级白化权函数的三角中心点^[14],则基于中心点的三角白化权函数图见图 2。

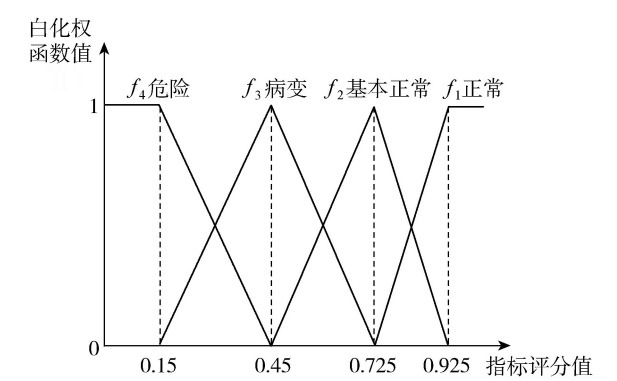


图 2 基于中心点的三角白化权函数

设系统分为 s 个类别,且有 n 个指标,将指标未归一化权重向量设为

$$W = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n) \tag{2}$$

式中: $\omega_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为同层第 i 个指标未归一化的权重值。

令 n 维向量 D 为

$$D = \left(\sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^s |f_{x1} - f_{y1}|, \sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^s |f_{x2} - f_{y2}|, \cdots, \sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^s |f_{xn} - f_{yn}| \right) \tag{3}$$

式中: f_{xi} 、 f_{yi} 为改进白化权函数值,分别代表第 i 个指标的第 x 、 y 类白化权函数值。

改进的离差最大化法将水闸各指标评分值通过改进白化权函数变换,在满足单位化约束条件下,通过使变换后的白化权函数值的总离差 S 最大来确定权重。其思想为:若某一指标的所属等级与该层其余指标相比有较大差异,则赋予其较大的权系数,认为该指标较大程度影响相邻上一层指标的重要性排序。由此得到基于改进白化权函数的离差最大化法水闸指标权重系数求解模型^[8]:

$$\max S = DW^T \tag{4}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} WW^T = 1 \\ W \geq 0 \end{cases} \tag{5}$$

求解得:

$$W = \left(\frac{\sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^s |f_{x1} - f_{y1}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^s |f_{xi} - f_{yi}| \right)^2}} \right),$$

$$\frac{\sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^s |f_{x2} - f_{y2}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^s |f_{xi} - f_{yi}| \right)^2}}, \dots, \frac{\sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^s |f_{xn} - f_{yn}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^s |f_{xi} - f_{yi}| \right)^2}} \quad (6)$$

归一化处理后得到第 i 个指标的权重系数 ω'_i :

$$\omega'_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (7)$$

1.3 水闸安全评价指标的组合赋权

利用离差最大化法确定水闸组合赋权系数向量,设系统有 n 个指标, l 种赋权方法(包含主、客观赋权)所确定的权重向量组为 $\mathbf{W} = (\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_l)$, 其中 $\mathbf{W}_k = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 为第 k 种赋权方式的权重向量($k=1, 2, \dots, l$), 令向量:

$$\boldsymbol{\Theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_l)^T \quad (8)$$

式中: θ_k ($k=1, 2, \dots, l$) 为第 k 种赋权方式的线性分配系数, 且满足单位化约束条件 $\sum_{k=1}^l \theta_k^2 = 1$ 。

令 n 维向量 $\mathbf{B}$ 为

$$\mathbf{B} = \left(\sum_{i=1}^n |d_i - d_1|, \sum_{i=1}^n |d_i - d_2|, \dots, \sum_{i=1}^n |d_i - d_n| \right) \quad (9)$$

式中: d_i 为同层第 i 个指标的评分值。

与第 1.2 节思想类似, 建立模型后求解得第 k 种赋权方式的权重线性分配系数为

$$\theta_k = \frac{\mathbf{B} \mathbf{W}_k^T}{\sqrt{\sum_{k=1}^l (\mathbf{B} \mathbf{W}_k^T)^2}} \quad (10)$$

同式(7)对 θ_k 进行归一化处理, 得到:

$$\boldsymbol{\Theta}^* = (\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_l^*)^T \quad (11)$$

因此组合权重向量 $\mathbf{W}_e^*$ 为

$$\mathbf{W}_e^* = \mathbf{W}_1 \theta_1^* + \mathbf{W}_2 \theta_2^* + \dots + \mathbf{W}_l \theta_l^* \quad (12)$$

2 水闸安全的云评价模型

在随机数学和模糊数学的基础上, 李德毅等^[11]提出用云模型来统一刻画语言值中大量存在的随机性、模糊性以及两者之间的关联性。

2.1 标准云的确定

标准云是水闸各健康状态等级与云数字特征(期望 E_x , 熵 E_n , 超熵 H_e) 在 $[0, 1]$ 区间的映射关系。对不同等级分别采用半降云、正态云、正态云和半升

云。各等级标准云数字特征值见表 2, 对应的标准云云图见图 3。

表 2 水闸各健康状态等级云数字特征值

等级	E_x	E_n	H_e
正常	1	0.068	0.0068
基本正常	0.725	0.042	0.0042
病变	0.450	0.068	0.0068
危险	0	0.110	0.0110

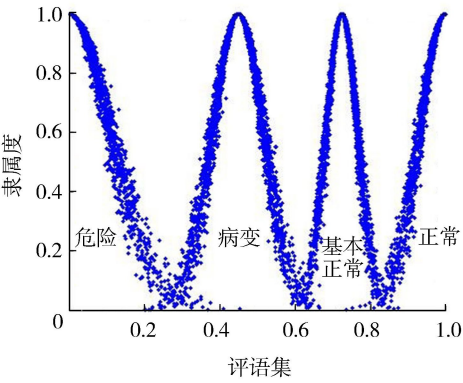


图 3 水闸各健康状态等级对应的标准云云图

a. 标准云的期望 E_x : 等级 V_1 和等级 V_4 半云期望分别取为 1 和 0; 两个处于中间等级的正态云, 按照式(1)取相应等级隶属度区间中点值作为该等级的期望。

b. 标准云的熵 E_n : 对于全国大多数水闸来说, “基本正常” (V_2) 状态最为普遍, 因此可取其为代表值。将 V_2 隶属度区间长度的 1/6 作为该等级标准云的熵, 然后采用黄金分割率生成方法确定其他等级标准云的熵^[13]。

c. 标准云的超熵 H_e : 取为相应等级熵值的 1/10。

2.2 云滴的生成

设水闸某指标 D_i 经量化后的实际值为 h_i , 根据文献[15]计算该指标的评分值为 s_i , 并将此作为诊断云随机云滴的初始中心值。初始熵值取为初始中心值所在标准云的熵值, 初始超熵取为初始熵值的 1/10。根据中心极值定理利用正向云发生器生成 n 个云滴。

2.3 诊断云的合成

获得 n 个随机云滴后, 利用逆向云发生器, 将上述 n 个定量的随机云滴转化为一个由云数字特征定性表征的各评价指标的诊断云, 自因素层由下而上逐步合成为水闸工程的安全状况诊断云。

在水闸安全综合评价中, 因素层各指标可视为相互独立^[16], 结合因素层各指标权重, 利用式(13)计算子目标层云数字特征值:

$$\left\{ \begin{aligned} E_x &= \frac{\sum_{i=1}^n (E_{xi} \omega_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \\ E_n &= \frac{\sum_{i=1}^n (E_{ni} \omega_i^2)}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2} \\ H_e &= \frac{\sum_{i=1}^n (H_{ei} \omega_i^2)}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_{ji} &= \exp \left[\frac{-(x_i - E_{sj})^2}{2E'_{nji}} \right] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ S_j &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{ji} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \right. \quad (15)$$

式中： μ_{ji} 为某指标诊断云第*i*个云滴与第*j*个标准云相似程度； x_i 为该指标诊断云云滴； E_{sj} 为第*j*个标准云的期望； E'_{nji} 为以第*j*个标准云的熵为期望，超熵为方差所生成的正态随机数；*n*为生成的云滴个数； S_j 为该指标诊断云与第*j*个标准云的相似度。

3 水闸安全综合评价实现过程

第1步：构建水闸安全评价指标体系，见表1。

第2步：水闸的各指标权重系数计算。综合主客观信息（现场检查、专家评分加权、安全监测资料分析等途径获取），利用层次分析法和改进离差最大化法进行主客观组合赋权，得到水闸体系各指标权重值。

第3步：从因素层各指标出发，根据初始特征值利用正向云发生器生成云滴后，再利用逆向云发生器得到水闸因素层各诊断指标诊断云云图及诊断云特征值。

第4步：根据水闸安全评价指标体系，采用权重合并法，将诊断云特征值与组合赋权法所得权重相结合，由因素层诊断云逐层向上，得到最终诊断结果，鉴定水闸安全等级。

水闸安全综合评价的实现过程如图4所示。

而子目标层各指标之间相互有一定影响和关联性，利用式(14)计算总目标层云数字特征：

$$\left\{ \begin{aligned} E_x &= \frac{\sum_{i=1}^n (E_{xi} E_{ni} \omega_i)}{\sum_{i=1}^n (E_{ni} \omega_i)} \\ E_n &= \sum_{i=1}^n (E_{ni} \omega_i) \\ H_e &= \frac{\sum_{i=1}^n (H_{ei} E_{ni} \omega_i)}{\sum_{i=1}^n (E_{ni} \omega_i)} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

2.4 相似度计算

计算相似度来定量描述诊断云与各标准云的相似程度^[16]：

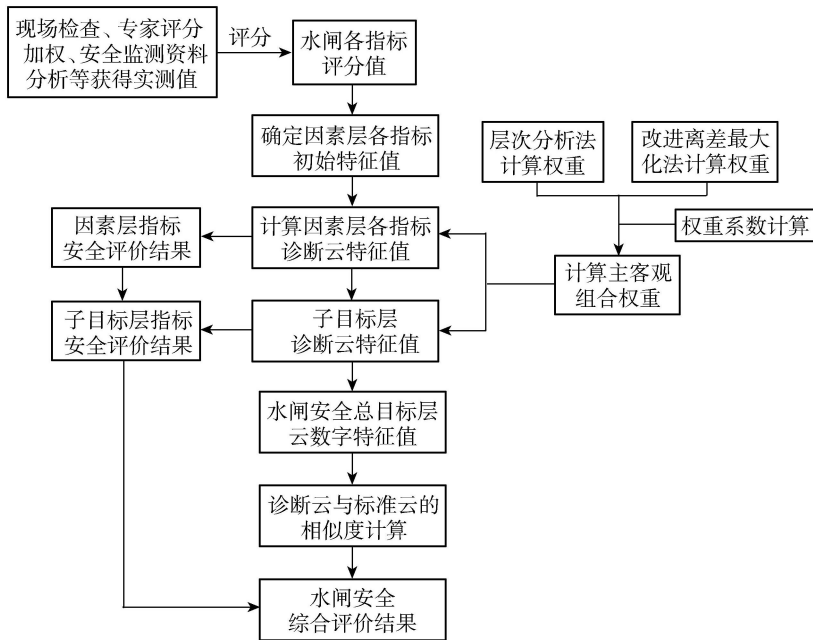


图4 基于云模型的水闸安全综合评价实现过程

4 工程应用实例

某枢纽工程为Ⅱ等大(2)型工程,进洪闸、节制闸等主要建筑物为2级,次要建筑物为3级^[17]。对该水闸工程进行安全综合评价以了解该水闸目前的运行状态,建立该水闸的评价指标体系如图2。

4.1 评价指标权重计算

a. 以子目标层为例,利用层次分析法对其进行权重计算,判断矩阵R为

R = [[1, 3, 5], [1/3, 1, 1], [1/5, 1, 1]] (16)

计算可知一致性检验通过,则子目标层各指标主观权重为

W* = (0.659, 0.185, 0.156) (17)

b. 离差最大化法权重计算,建立水闸的改进白化权函数f1、f2、f3、f4,分别表示正常、基本正常、病变和危险,函数形式如图3。以子目标层为例,将由因素层推导而出的子目标层各指标评分值代入4个函数中得白化权函数值矩阵X为

X = [[f1(d1), f2(d1), f3(d1), f4(d1)], [f1(d2), f2(d2), f3(d2), f4(d2)], [f1(d3), f2(d2), f3(d3), f4(d3)]] = [[0, 0.779, 0.221, 0], [0, 0.624, 0.376, 0], [0, 0.730, 0.270, 0]] (18)

计算得子目标层客观权重结果为

W' = (0.352, 0.309, 0.339) (19)

表3 因素层诊断云计算结果

因素层指标	实际值	评分值	权重	初始特征值	诊断云特征值	安全等级
防洪能力 C1	0.960	0.683	0.110	(0.683, 0.042, 0.0042)	(0.682, 0.041, 0.0086)	基本正常
抗震能力 C2	0.900	0.450	0.097	(0.450, 0.068, 0.0068)	(0.068, 0.454, 0.0118)	病变
抗渗稳定性 C3	1.030	0.767	0.134	(0.767, 0.042, 0.0042)	(0.767, 0.041, 0)	基本正常
抗滑稳定 C4	0.980	0.750	0.132	(0.750, 0.042, 0.0042)	(0.751, 0.040, 0)	基本正常
闸室倾斜度 C5	1.100	0.450	0.124	(0.450, 0.068, 0.0068)	(0.450, 0.067, 0)	病变
地基承载力 C6	1.040	0.683	0.167	(0.683, 0.042, 0.0042)	(0.683, 0.041, 0.0009)	基本正常
结构完好性 C7	0.900	0.900	0.135	(0.900, 0.068, 0.0068)	(0.899, 0.067, 0.0098)	正常
消能防冲能力 C8	1.080	0.510	0.099	(0.510, 0.068, 0.0068)	(0.513, 0.071, 0.0074)	病变
相对过水能力 C9	0.900	0.450	0.294	(0.450, 0.068, 0.0068)	(0.449, 0.068, 0)	病变
相对漏水流量 C10	1.040	0.683	0.234	(0.683, 0.042, 0.0042)	(0.683, 0.041, 0)	基本正常
闸门及启闭机的控制能力 C11	0.820	0.820	0.293	(0.820, 0.042, 0.0042)	(0.820, 0.044, 0)	基本正常
设备老化情况 C12	0.500	0.500	0.179	(0.500, 0.068, 0.0068)	(0.500, 0.068, 0.0111)	病变
混凝土强度 C13	0.900	0.450	0.207	(0.450, 0.068, 0.0068)	(0.449, 0.067, 0)	病变
裂缝密度 C14	1.000	0.808	0.142	(0.808, 0.042, 0.0042)	(0.807, 0.040, 0)	基本正常
最大裂缝宽度 C15	1.100	0.330	0.143	(0.330, 0.110, 0.011)	(0.333, 0.112, 0.0129)	危险
平均碳化深度 C16	9.000	1.000	0.173	(1.000, 0.068, 0.0068)	(1.002, 0.066, 0.0093)	正常
钢筋锈蚀度 C17	0.550	0.550	0.127	(0.550, 0.068, 0.0068)	(0.550, 0.067, 0)	病变
体积损失率 C18	0.003	0.683	0.119	(0.683, 0.042, 0.0042)	(0.682, 0.039, 0.0054)	基本正常
管理维护能力 C19	0.800	0.800	0.090	(0.800, 0.042, 0.0042)	(0.801, 0.039, 0.0063)	基本正常

c. 计算该水闸组合权重分配系数并归一化,得:

Θ* = (0.502, 0.498) (20)

d. 组合权重计算,计算得子目标层的主、客观组合权重为

Wc* = (0.506, 0.247, 0.247) (21)

同理可求得因素层各指标组合权重,计算结果见表3。

4.2 诊断云的建立

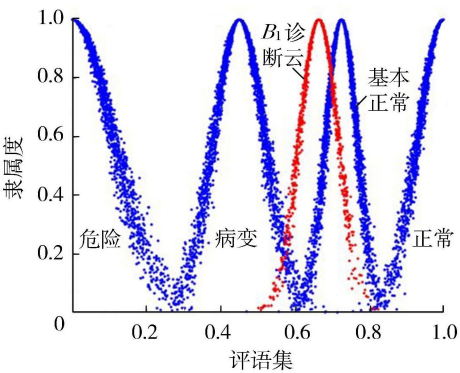
因素层诊断指标生成云滴的各初始特征值见表3。根据初始特征值生成的云滴,利用逆向云发生器,得到因素层各诊断指标的诊断云特征值如表3所示。利用权重合并法,根据式(13)(14),由下至上合成为子目标层和总目标层实测性态的诊断云,合成结果见表4。子目标层和总目标层各指标诊断云云图如图5和图6所示。

表4 子目标和总目标层诊断云计算结果

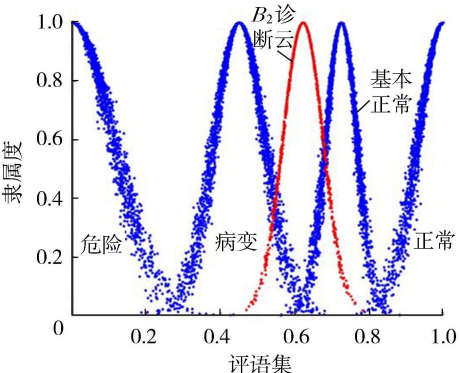
总目标层		子目标层		
指标	诊断云特征值	子指标	权重	诊断云特征值
水闸安全评价 A	(0.650, 0.056, 0.0034)	安全性 B1	0.506	(0.664, 0.052, 0.0038)
		适用性 B2	0.247	(0.622, 0.054, 0.0014)
		耐久性 B3	0.247	(0.651, 0.065, 0.0044)

4.3 该水闸安全评价

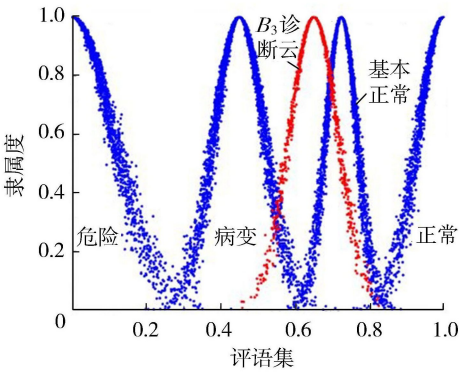
观察表4和图5中子目标层各指标的诊断云特征值及云图,安全性、适用性和耐久性指标诊断云云图均位于“基本正常”和“病变”状态之间,而适用性



(a) B_1



(b) B_2



(c) B_3

图5 子目标层各指标诊断云云图

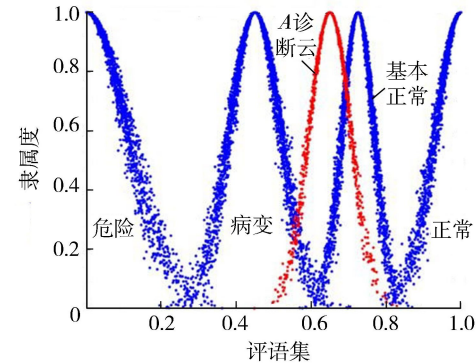


图6 总目标层诊断云云图

指标相较于另两者略偏向“病变”状态,因此应加强对该水闸工程适用性及其对应因素层指标的关注。由图6可见,水闸安全评价诊断云云图位于“基本

正常”与“病变”状态之间,且偏于“基本正常”。总目标层诊断云期望值 $E_s = 0.650$,与“基本正常”状态标准云期望值相差较小;熵 $E_n = 0.056$,数值较小,说明诊断结果可信度较高;超熵 $H_e = 0.0034$,数值较小,表明本次诊断结果稳定性较高。为定量描述,计算该水闸子目标层和总目标层的诊断云与各等级标准云之间的相似度,计算结果见表5。发现4个指标与“基本正常”状态相似度均最高,判断该水闸处于“基本正常”状态,认为其属于二类水闸,与文献[17]结论相符。

表5 子目标层和总目标层诊断云与标准云相似度计算

指标	相似度				安全等级
	正常	基本正常	病变	危险	
安全性 B_1	5.92×10^{-4}	0.4188	0.0382	1.48×10^{-6}	基本正常
子目标层 适用性 B_2	1.72×10^{-4}	0.2044	0.1108	9.42×10^{-6}	基本正常
耐久性 B_3	1.10×10^{-3}	0.3416	0.0748	8.40×10^{-6}	基本正常
总目标层 水闸安全评价 A	3.51×10^{-4}	0.3415	0.0618	3.30×10^{-6}	基本正常

5 结 语

水闸工程的安全评价是模糊性与随机性并存的复杂系统。本文考虑规范中的水闸分级要求,将层次分析法与改进离差最大化法相结合,构建了基于云模型的水闸安全综合评价模型。从云数字特征值和诊断云云图判断水闸各指标所属的安全等级,由下至上综合指标权重实现水闸各项指标的分级评价及水闸工程整体的综合评价。

a. 采用组合赋权方式,将主、客观赋权方法相结合。基于改进三角白化权函数的离差最大化法对差异较大的指标赋予较大的权重值,充分考虑指标之间的等级差别,可有效减小不确定因素对整体水闸工程安全评价的影响。

b. 传统的云模型为方便操作常采用3级或5级的标准云,本文从规范出发,将水闸健康状态划分为4级,使诊断结果能更合理地反映水闸的健康状态。

c. 若想要了解水闸工程某一具体指标的所属等级及现状,可将此指标的诊断云图单独取出,分析其破坏程度,及时采取相应的补救措施,以减少该指标对水闸整体安全的影响。

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,2017.
[2] 闫滨,孙友良,高真伟. 水闸安全综合评价研究综述

- [J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 171-173. (YAN Bin, SUN Youliang, GAO Zhenwei. Review of study on sluice safety comprehensive evaluation[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2): 171-173. (in Chinese))
- [3] 曹邱林, 苏怀智, 倪言波. 基于灰色理论的水闸工程健康诊断方法[J]. 水电能源科学, 2008, 26(3): 107-109. (CAO Qiulin, SU Huaizhi, NI Yanbo. Method of sluice engineering healthy diagnosis based on theory of grey system[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(3): 107-109. (in Chinese))
- [4] 赵然杭, 陆小蕾. 基于模糊理论的水闸安全评价方法及其应用[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2): 114-118. (ZHAO Ranhang, LU Xiaolei. Safety evaluation method of sluice based on fuzzy theory and its application[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(2): 114-118. (in Chinese))
- [5] 李佳田, 苏怀智. 基于联系数的水闸安全综合评价物元模型与实现方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(10): 88-91. (LI Jiatian, SU Huaizhi. Matter-element model of sluice safety assessment based on connection number[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(10): 88-91. (in Chinese))
- [6] 戚国强, 李凯. 基于改进层次模糊综合评价的水闸工程安全评价[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5): 111-114. (QI Guoqiang, LI Kai. Safety evaluation on sluice gate based on modified fuzzy comprehensive evaluation theory[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(5): 111-114. (in Chinese))
- [7] 季永兴, 黄庐进, 唐国利, 等. 层次分析法在苏州河口水闸底板助浮方案选择中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(增刊1): 36-39. (JI Yongxing, HUANG Lujin, TANG Guoli, et al. Application of analytic hierarchy process in floating aid scheme selection of sluice floor in suzhou river estuary[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(Sup1): 36-39. (in Chinese))
- [8] 闫滨, 孙友良, 闫胜利, 等. 一种新型的组赋权方法及其在水闸安全评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 108-113. (YAN Bin, SUN Youliang, YAN Shengli, et al. A novel combination weighing method and its application in sluice safety evaluation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(10): 108-113. (in Chinese))
- [9] SU Huaizhi, WEN Zhiping, SUN Xiaoran, et al. Multisource information fusion-based approach diagnosing structural behavior of dam engineering[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(2): e207.
- [10] 曹邱林, 吴中如. 水闸健康综合诊断的权重系数确定方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 646-649. (CAO Qiulin, WU Zhongru. Method for determining weight coefficients of sluice health comprehensive diagnosis[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(5): 646-649. (in Chinese))
- [11] 李德毅, 刘常昱, 刘鹞. 不确定性人工智能[J]. 软件学报, 2004, 15(11): 1583-1594. (LI Deyi, LIU Changyu, LIU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[J]. Journal of Software. 2004, 15(11): 1583-1594. (in Chinese))
- [12] 中华人民共和国水利部. 水闸安全评价导则: SL214—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [13] 何金平, 赖昀, 葛世民, 等. 基于云模型的水闸健康状态诊断方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(11): 950-956. (HE Jinping, LAI Yun, GE Shimin, et al. Health diagnosis method for sluice based on cloud model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(11): 950-956. (in Chinese))
- [14] 刘思峰, 谢乃明. 基于改进三角白化权函数的灰评估新方法[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 244-250. (LIU Sifeng, XIE Naiming. New grey evaluation method based on reformative triangular whitenization weight function[J]. Journal of Systems Engineering, 2011, 26(2): 244-250. (in Chinese))
- [15] 田丰. 基于层次熵变权法的水闸模糊综合评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [16] 王洁. 沿海地区水闸工程服役性能分析研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [17] 赵海超, 苏怀智, 李佳田, 等. 基于多元联系数的水闸运行安全态势综合评判[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 39-45. (ZHAO Haichao, SU Huaizhi, LI Jiatian, et al. Comprehensive evaluation of safety situation of sluice operation based on multiple connection number[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(2): 39-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-03-25 编辑: 郑孝宇)

