

文章编号: 1000-7598-(2006) 12-2115-07

大坝工作性态的模糊可拓评估模型及应用

苏怀智, 顾冲时, 吴中如

(河海大学 水利水电工程学院, 南京 210098)

摘 要: 对大坝工作性态评估的研究主要包括评估指标体系的构建、评估指标度量方法和综合评估工程方法等 3 个方面的内容。依据大坝工作性态评估信息物元系统, 应用可拓理论, 基于多因素优化融合的思想, 通过物元变换建立了大坝工作性态评估的模糊物元模型。该模型综合考虑了地质资料、数值分析计算成果以及监测数据等多源信息, 实现了对大坝工作性态的定性与定量集成描述, 结合其随时间的变化趋势分析, 可以完成三维动态评估大坝工作性态的目标。另外对物元特征权重和特征值权重拟定方法进行了研究。最后对某混凝土重力坝的工作性态进行了评估, 得出该工程整体安全度介于正常与基本正常之间的结论, 该结论较符合实际情况。

关 键 词: 大坝工作性态; 评估模型; 权重; 模糊可拓理论

中图分类号: TV 64

文献标识码: A

Assessment model of dam behavior with fuzzy extension theory and its application

SU Huai-zhi, GU Chong-shi, WU Zhong-ru

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The system of evaluation index, methods normalizing index values and assessment methods are the key problems on dam behavior evaluation. The information matter-element system was built to assess dam behavior. Based on the thought of multi-index fusion, fuzzy matter-element model evaluating dam behavior was constructed by matter-element transform. This model can process comprehensively geological data, results of numerical analysis, measurement data, experiential knowledge, and so on. Dam behavior can be described by the qualitative and quantitative manners. According to the development trend of quantitative results, dam behavior can be expressed dynamically with three dimensional pattern. The combined results of weights of matter-element characteristic and weights of characteristic value can be obtained by use of optimization algorithm. As an example, the proposed method was used to assess a concrete dam. The result shows that the global safety can be ranged between normal and basically normal. The numerical example shows that the proposed method is feasible and effective, and the evaluation results are reasonable.

Key words: dam behavior; evaluation model; weight; fuzzy extension theory

1 引 言

大坝结构的特殊性和工作条件的复杂性, 决定了影响大坝工作性态的指标具有多样、复杂、相关、不确定以及可转化等特点^[1,2], 集中表现在以下几点:

① 各个单项指标之间的关系从表面上看是互为独立的, 而实际上相互有一定的联系, 如: 变形、应力与裂缝开度及其扬压力等之间互有影响。从而, 仅进行单项分析有时难于解释某些异常现象。

② 有些影响大坝性态的指标, 无法定量表示, 如混凝土老化和周围环境变化等。

③ 各指标在大坝性态评估中的地位、作用不等, 并具有转化特征, 原来次要的可能转化为主要影响因素, 若不考虑这些变化, 将得出不符合实际情况的结论。

大坝工作性态影响因素的上述特点, 决定了大坝工作性态评估是一个复杂的矛盾问题^[3~5]。不仅要给出各指标的定性描述, 又要定量地刻画各指标

收稿日期: 2004-12-23

*973 项目“灾害环境下重大工程安全性的基础研究”(No. 2002CB412707), 国家自然科学基金重点项目(No. 50539010)和国家自然科学基金项目(No. 50579010), 水利部“948”项目(No. CT200612)资助。

作者简介: 苏怀智, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事水工结构工程和岩土工程安全监控方面的教学和科研工作。E-mail: suhz@163.com

对大坝性态的影响程度, 最终给出大坝整体工作性态的评估结果。文中借助可拓学^[6~8]的一些理论、方法、思路, 以大坝性态评估物元的概念将大坝(事物)、评估指标(事物的特征)及工作现状(相应的量值)结合为一个整体; 利用大坝性态评估物元的可拓性确定大坝工作性态定性描述的方法; 利用可拓集合论, 通过关联函数给出评估指标对大坝性态影响程度的量化描述, 可以从定性到定量综合集成的角度完成对大坝工作性态的评估。另外文中采用集值统计迭代法和关联函数法分别实现了对物元特

征权重和物元特征值权重的拟定。基于某种最优化准则将物元特征权重、物元特征值权重进行组合, 实现了指标权重既包含指标重要性信息, 又反映指标的转异特征。

2 大坝工作性态评估信息物元系统

大坝工程可以从多个指标和环节描述其工作性态, 依据系统工程^[9]和物元可拓性的观点, 基于大坝原型监测、检测、巡视检查以及试验资料, 构筑如图 1 所示的大坝工作性态评估信息物元系统。

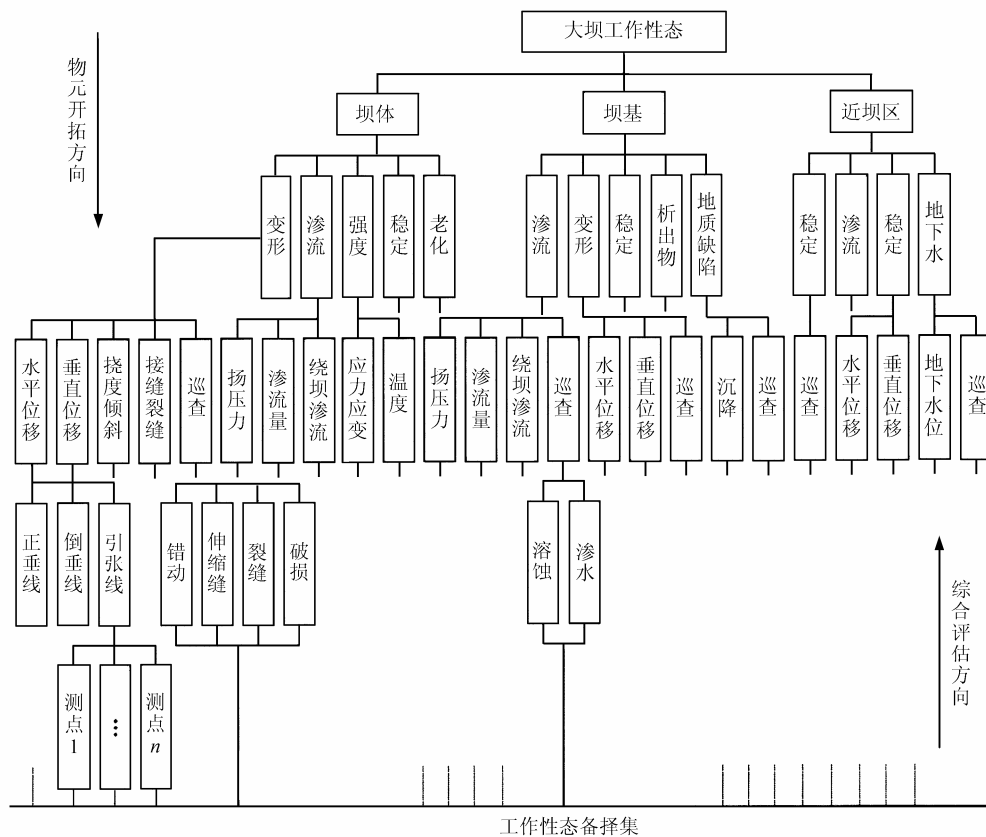


图 1 大坝工作性态评估信息物元系统

Fig.1 System of information matter element on assessment for dam behavior

3 大坝性态评估的模糊物元模型

大坝工作性态评估的依据是大坝性态评估物元的可拓性, 核心是大坝工作性态可拓域的确定, 实现手段是可拓域中元素的物元变换。大坝工作性态评估模糊物元模型的建模机理如下。

3.1 大坝工作性态评估资源

(1) 确定大坝性态评估指标

以图 1 中坝体工作性态的综合评估为例。由图 1 可以看出, 为了评估坝体工作性态, 需考虑变形、渗流、强度、稳定、老化等对坝体性态的综合影响,

即变形、渗流、强度、稳定、老化等作为研究对象(坝体工作性态)的评估指标。

(2) 评估指标的原始数据规格化

应用评估指标度量方法将评估指标的原始数据规格化为 $[0, 1]$ 区间上的模糊隶属度值, 具体规格化方法参见文献[10]。

(3) 划分评估等级标准

根据国内外专家经验和常用分级标准, 依据评估指标规格化值的取值范围和取值原则(数值越小对安全越有利), 设定评估等级 N_p 为 5 级, 即正常 N_{01} , 基本正常 N_{02} , 轻度异常 N_{03} , 异常 N_{04} , 险情

N_{05} , 分级标准为

$$N_p = \{N_{01}, N_{02}, N_{03}, N_{04}, N_{05}\} = \{<0.0, 0.2>, <0.2, 0.4>, <0.4, 0.6>, <0.6, 0.8>, <0.8, 1.0>\} \quad (1)$$

3.2 大坝工作性态评估模糊物元

以大坝工作性态评估信息物元系统中研究对象为事物, 评估指标为特征, 指标规格化值为特征值, 大坝性态评估模糊物元可用下式来描述:

$$R = (N, C, V) = \begin{bmatrix} \text{对象, 特征 } c_1, \text{ 特征值 } \mu_{11} \\ \text{特征 } c_2, \text{ 特征值 } \mu_{12} \\ \dots \\ \text{特征 } c_n, \text{ 特征值 } \mu_{1n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.3 点评估模型

取大坝工作性态评估信息物元系统中某一研究对象, 仅依据相邻下层对应的评估指标进行评估, 称为点评估。其是大坝整体性态评估的基础。

(1) 经典域、节域、现状物元

① 经典域物元

根据大坝性态评估等级标准, 可得物元系统中研究对象的经典域物元:

$$R_{0j} = \begin{bmatrix} N_{0j}, c_1, \mu_{01j} \\ c_2, \mu_{02j} \\ \dots \\ c_n, \mu_{0nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j}, c_1, <a_{01j}, b_{01j}> \\ c_2, <a_{02j}, b_{02j}> \\ \dots \\ c_n, <a_{0nj}, b_{0nj}> \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 N_{0j} 表示物元系统中某研究对象工作性态第 j 级别 ($j=1, 2, \dots, m$), m 为所划等级数, 文中 $m=5$; c_i 表示研究对象工作性态第 i 个特征 ($i=1, 2, \dots, n$), n 为某研究对象特征数; $\mu_{0ij} = <a_{0ij}, b_{0ij}>$ 表示级别 j 第 i 个特征 c_i 规格化后的量值域, 即各等级关于对象的评估指标所取的经典域。

② 节域物元

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p, c_1, \mu_{p1} \\ c_2, \mu_{p2} \\ \dots \\ c_n, \mu_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p, c_1, <a_{p1}, b_{p1}> \\ c_2, <a_{p2}, b_{p2}> \\ \dots \\ c_n, <a_{pn}, b_{pn}> \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 N_p 表示物元系统中某研究对象级别的全域; $\mu_{pi} = <a_{pi}, b_{pi}>$ 为特征 c_i 的值域, 即 N_p 的节域。由于规格化处理后的各特征值域均为 $<0, 1>$, 于是可得节域 $R_p = [N_p, c_i, <0, 1>]$ 。

③ 现状物元

对大坝工作性态物元系统中待评对象 N , 把某时期 (时刻) t 各评估指标所监测、检测到的数据或分析结果经规格化后用式 (5) 所示物元矩阵表示,

称为研究对象 N 的现状物元 $R_t(N(t), C, \mu(t))$ 。

$$R_t(N(t), C, \mu(t)) = \begin{bmatrix} N(t), c_1, \mu_1(t) \\ c_2, \mu_2(t) \\ \dots \\ c_n, \mu_n(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $N(t)$ 为物元系统中待评对象; $\mu_i(t)$ 为某时期 (或某时刻) t 评估指标 c_i 的规格化取值。

(2) 单指标关联度

将大坝工作性态物元系统中待评对象 N 的第 i 个特征关于第 j 级别的关联函数记为 $K_j(\mu_i(t))$, $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$, 其计算过程如下^[11]:

① 当 $\mu_i(t) \notin \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle$ 时, 则关联函数为

$$K_j(\mu_i(t)) = \frac{\rho(\mu_i(t), \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle)}{\{\rho(\mu_i(t), \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle) - \rho(\mu_i(t), \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle)\}} \quad (6)$$

式中

$$\rho(\mu_i(t), \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle) = \left| \mu_i(t) - \frac{a_{0ij} + b_{0ij}}{2} \right| - \frac{b_{0ij} - a_{0ij}}{2} \quad (7)$$

$$\rho(\mu_i(t), \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle) = \left| \mu_i(t) - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2} \quad (8)$$

由式 (6) 可知, 关联函数 $K_j(\mu_i(t)) \in \langle -1, 0 \rangle$ 。

② 当 $\mu_i(t) \in \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle$ 时, 则关联函数为

$$K_j(\mu_i(t)) = \frac{2\rho(\mu_i(t), \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle)}{b_{0ij} - a_{0ij}} \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 关联函数 $K_j(\mu_i(t)) \in \langle 0, 1 \rangle$, 当 $\mu_i(t)$ 位于区间 $\langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle$ 中点时, 关联函数取最大值 1, 位于区间端点时取 0。

③ 当 $\mu_i(t) \in \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle$ 且 $\mu_i(t) > (a_{0ij} + b_{0ij})/2$ 时则关联函数为

$$K_j(\mu_i(t)) = 1 \quad (10)$$

由式 (10) 可知, 当 $\mu_i(t)$ 大于最小级别 (级别 1) 量值域均值时, 由于没有比级别 1 更小的级别, 故此时待评对象与级别 1 关联程度最高; 同理, 当 $\mu_i(t)$ 小于最高级别 (级别 m) 量值域均值时, 由于没有比级别 m 更高的级别, 故此时待评对象与级别 m 关联程度最高。

(3) 多指标综合关联度

待评对象 N 关于等级 j 的关联度为

$$K_{jt} = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_j(\mu_i(t)) \quad (11)$$

式中 α_i 为第 i 个评估指标的权重分配系数, 满足

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (12)$$

(4) 综合评判

因 $K_{jt} \in \langle -1, 1 \rangle$, 故令 $d_{jt} = (1 - K_{jt})/2$, 则 $d_{jt} \in \langle 0, 1 \rangle$, 将 d_{jt} 视作为待评对象各特征量组成的空间点列与 j 级别各特征量组成的空间点列的广义距离, $d_{jt} = 0$ 表示待评对象与 j 级别关联程度最大, 距离为 0; $d_{jt} = 1$ 表示关联程度最小, 距离为 1。以待评对象相对隶属于 j 级别的程度 W_{jt} 为权, 则 W_{jt} 的最优值应满足所有待评对象与安全性级别间的权广义距离平方和最小, 即使 $\sum_{j=1}^m (W_{jt} d_{jt})^2$ 取最小值, 通过构造拉格朗日函数, 可求出 W_{jt} 满足归一化条件 ($\sum_{j=1}^m W_{jt} = 1$) 的最优解为

$$W_{jt}^* = 1 / \sqrt{\sum_{k=1}^m (d_{jt} / d_{kt})^2} \quad (13)$$

由上式得综合评判指标

$$J^*(t) = \sum_{j=1}^m j W_{jt}^* \quad (14)$$

当 $J^*(t)$ 值为整数时, 其值即为待评对象所属的级别 $J(t)$; 当 $J^*(t)$ 值为非整数时, 与 $J^*(t)$ 值相差最小的整数即为评估级别 $J(t)$ 。严格来说, 待评对象所属的级别应为 $J^*(t)$ 级, 如 $J^*(t)$ 为 1.23, 则待评对象的工作性态应为 1.23 级, 介于“正常”与“基本正常”之间, 偏向于“正常”。

3.4 整体评估模型

依据大坝性态评估信息物元系统, 按照上述评估步骤对物元系统中低层各对象逐个评估后, 进行上层评估, 最后收敛至顶层, 从而实现大坝整体工作性态的综合评估。

3.5 整体性态动态评估模型

按上述评估步骤, 对大坝工程在 T 个不同时期 (或时刻) 的工作状况进行分析, 得出 T 个不同时期 (或时刻) 的工作性态等级和综合评判指标, 分别记为 $J(t)$, $J^*(t)$ ($t=1, 2, \dots, T$), 则可分析 $J(t) \sim t$, $J^*(t) \sim t$ 的变化情况。当 $J(t)$ 的等级很高, 说明该工程的安全性差, 应引起高度重视, 建议及时采取相关加固措施。当 $J(t)$ 等级较高, 且 $J^*(t)$ 随着时间 t 的推移而逐渐增大 (趋坏型), 说明该工程的安全

性在变坏, 应加强监测, 提高警戒水平; 若 $J^*(t)$ 随着时间 t 的推移基本持平 (稳定型) 或逐渐减小 (趋好型), 说明该工程基本安全或向好的方向发展。当 $J(t)$ 等级较低, $J^*(t)$ 也未随着时间 t 的推移而逐渐增大, 说明该工程安全状况良好。

4 评估指标组合赋权技术

权重是反映各评估指标对研究对象工作性态影响程度的量。

4.1 物元特征权重

物元特征权重是指根据特征在大坝性态评估中重要性的不同, 赋与特征一定的量值。通常所指的权重即为物元特征权重。确定特征权重常用的方法有统计分析法和专家打分法。本文采用集值统计迭代法来确定物元特征权重^[12]。设 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 为有限论域, α_1 为物元各特征的权向量。 $P^* = \{p_1^*, p_2^*, \dots, p_l^*\}$ 为参与确定权向量的人员集合。求取 $\alpha_1(c_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ 的方法为

① 对任一 p_k^* , 首先选定一个初始值 q , $1 \leq q \leq n$;

② 在 C 中选定 p_k^* 认为优先属于 α_1 的 $r_1 = q$ 个元素, 得到 C 的子集 $C_1^{(k)} \subset C$;

③ 在 C 中选取 p_k^* 认为优先属于 α_1 的 $r_2 = 2q$ 个元素, 得到 C 的子集 $C_2^{(k)} \supset C_1^{(k)}$ 。

④ 依此类推, 在 C 中选取 p_k^* 认为优先属于 α_1 的 $r_s = sq$ 个元素, 得到 C 的子集 $C_s^{(k)} \supset C_{s-1}^{(k)}$ 。若自然数 t 满足 $k = tq + v$, $1 \leq v \leq q$, 则迭代过程终止于第 $t+1$ 步。

⑤ 取 $C_{t+1}^{(k)} = C$ 。计算 c_i 的覆盖频率:

$$m(c_i) \triangleq \frac{1}{l(t+1)} \sum_{s=1}^{t+1} \sum_{k=1}^l x C_s^{(k)}(u_i), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (15)$$

其中, $x C_s^{(k)}$ 为集合 $C_s^{(k)}$ 的特征函数。

⑥ 将诸 $m(c_i)$ 归一化便得到物元各特征的权重分配 $\alpha_1(c_i)$:

$$\alpha_1(c_i) = m(c_i) / \sum_{i=1}^n m(c_i), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (16)$$

4.2 物元特征值权重

大坝性态评估物元特征值权重源自各指标的相对重要性, 是随着评估过程的进行而不断变化的。从大坝安全的角度考虑, 指标的实际性态值越恶化 (如垂线测值超出正常标准越多), 即规格化后的特征值落入的级别越高, 则该特征值对大坝安全的影响越是不利。据此将特征值赋予一定的权重即为特征值权重。

可拓理论中的关联函数是用来计算点和一个区间的关联程度的定量工具。通过将大坝性态评估物元特征值的分级, 运用关联函数, 可以定量地描述物元特征值对大坝安全各等级的隶属程度, 从而动态地确定各指标随着实际情况的变化而对大坝安全影响程度的变化。利用可拓理论中的关联函数确定物元特征值权重 α_{2i} 的具体过程如下^[10]:

(1) 大坝性态评估指标简单关联度

根据某研究对象的经典域、节域和现状物元, 用式 (17) 计算研究对象各评估指标关于各等级的简单关联度。设 $\mu_i \in \mu_{p_i}$ (节域) ($i=1, 2, \dots, n$), 则

$$K_{ij}(\mu_i, \mu_{0ij}) = \begin{cases} \frac{2(\mu_i - a_{0ij})}{b_{0ij} - a_{0ij}} & \mu_i \leq \frac{a_{0ij} + b_{0ij}}{2} \\ \frac{2(b_{0ij} - \mu_i)}{b_{0ij} - a_{0ij}} & \mu_i \geq \frac{a_{0ij} + b_{0ij}}{2} \end{cases} \quad \begin{matrix} (i=1, 2, \dots, n) \\ (j=1, 2, \dots, m) \end{matrix} \quad (17)$$

(2) 大坝性态各评估指标的最大关联度

根据式 (18) 确定研究对象各评估指标的最大关联度 $K_{ij_{\max}}$ 和相应级别 $j_{\max}$:

$$K_{ij_{\max}}(\mu_i, \mu_{0ij_{\max}}) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} (K_{ij}(\mu_i, \mu_{0ij})) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

(3) 确定大坝性态各评估指标的相对权重 α_i''

如果评估指标 i 的特征值落入的级别越大, 该指标应赋以越大的权重, 则 α_i'' 取

$$\alpha_i'' = \begin{cases} j_{\max} \times (1 + K_{ij_{\max}}(\mu_i, \mu_{0ij_{\max}})) & \text{若 } K_{ij_{\max}}(\mu_i, \mu_{0ij_{\max}}) \geq -0.5 \\ j_{\max} \times 0.5 & \text{若 } K_{ij_{\max}}(\mu_i, \mu_{0ij_{\max}}) < -0.5 \end{cases} \quad (19)$$

否则, 如果评估指标 i 的特征值落入的级别越大, 该指标应赋以越小的权重, 则 α_i'' 取

$$\alpha_i'' = \begin{cases} (m - j_{\max} + 1) \times (1 + K_{ij_{\max}}(\mu_i, \mu_{0ij_{\max}})) & \text{若 } K_{ij_{\max}}(\mu_i, \mu_{0ij_{\max}}) \geq -0.5 \\ (m - j_{\max} + 1) \times 0.5 & \text{若 } K_{ij_{\max}}(\mu_i, \mu_{0ij_{\max}}) < -0.5 \end{cases} \quad (20)$$

式 (17) ~ 式 (20) 中各符号的含义同式 (2) ~ 式 (11)。

从大坝安全的角度考虑, 因为评估指标 i 的特征值落入的等级越大, 该指标对大坝安全的影响越是不利, 应赋以越大的权重, 所以通常用式 (19) 来计算权重。

(4) 各特征值权重归一化

根据式 (21) 对各特征值权重 α_i'' 归一化, 得大坝性态各特征值的权重 α_{2i} 。

$$\alpha_{2i} = \alpha_i'' / \sum_{i=1}^n \alpha_i'' \quad (21)$$

5 实例分析

以某重力坝工作性态的分析评估为例, 验证文中所述方法的合理性和有效性。为及时、准确地掌握大坝的工作状况, 分别设置了变形、渗流、应力等监测类别, 并进行了巡查。每个监测类别又分别在不同断面安装了一定数量的不同类型的监测仪器。根据该坝的特点和监测情况, 基于该坝 2000 年~2004 年间安全原型观测资料、检测资料和巡查资料, 建立如图 1 所示的大坝工作性态评估信息物元系统。

5.1 点评估

下面以图 1 中坝体渗流性态评估为例, 应用 2004 年大坝安全相关资料说明点评估过程。

(1) 大坝性态评估模糊物元

以坝体渗流性态为事物, 坝基扬压力 c_1 、渗流量 c_2 、绕坝渗流 c_3 为特征, 指标规格化值为特征值, 坝体渗流性态评估模糊物元可用下式来描述。

$$R = \begin{bmatrix} \text{渗流性态 } N, & \text{坝基扬压力 } c_1, & \text{规格化值 } \mu_{l_1} \\ & \text{渗流量 } c_2, & \text{规格化值 } \mu_{l_2} \\ & \text{绕坝渗流 } c_3, & \text{规格化值 } \mu_{l_n} \end{bmatrix} \quad (22)$$

(2) 确定各对象经典域、节域物元

依据式 (1) 给出的分级标准, 可确定出坝体渗流性态评估经典域物元矩阵、节域物元矩阵。

坝体渗流性态评估经典域物元矩阵为

$$R_0 = \begin{bmatrix} N_{01} & N_{02} & N_{03} & N_{04} & N_{05} \\ c_1, & <0.0, 0.2> & <0.2, 0.4> & <0.4, 0.6> & <0.6, 0.8> & <0.8, 1.0> \\ c_2, & <0.0, 0.2> & <0.2, 0.4> & <0.4, 0.6> & <0.6, 0.8> & <0.8, 1.0> \\ c_3, & <0.0, 0.2> & <0.2, 0.4> & <0.4, 0.6> & <0.6, 0.8> & <0.8, 1.0> \end{bmatrix} \quad (23)$$

坝体渗流性态评估节域物元矩阵为

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p, & c_1, & <0.0, 1.0> \\ & c_2, & <0.0, 1.0> \\ & c_3, & <0.0, 1.0> \end{bmatrix} \quad (24)$$

(3) 确定现状物元

根据该坝详细的观测资料分析, 依据式(1)给出的分级标准, 对评估指标原始数据规格化, 得坝体渗流性态的现状物元为

$$R_t = \begin{bmatrix} N(t), & c_1, & \mu_1(t) \\ & c_2, & \mu_2(t) \\ & c_3, & \mu_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N(t), & c_1, & 0.10 \\ & c_2, & 0.28 \\ & c_3, & 0.21 \end{bmatrix} \quad (25)$$

(4) 单指标关联度计算

用式(6)~式(10)计算待评对象 N 的第 i 个特征关于第 j 级别的关联函数, 如坝体渗流性态的对应结果如下:

$$\begin{aligned} [K_j(\mu_i(t))] = & \begin{bmatrix} K_1(\mu_1) & K_2(\mu_1) & K_3(\mu_1) & K_4(\mu_1) & K_5(\mu_1) \\ K_1(\mu_2) & K_2(\mu_2) & K_3(\mu_2) & K_4(\mu_2) & K_5(\mu_2) \\ K_1(\mu_3) & K_2(\mu_3) & K_3(\mu_3) & K_4(\mu_3) & K_5(\mu_3) \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} -0.910 & -0.550 & -0.775 & -0.850 & -0.888 \\ -0.237 & 0.450 & -0.275 & -0.517 & -0.638 \\ -0.083 & 0.100 & -0.450 & -0.633 & -0.725 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

(5) 多指标综合关联度计算和综合评估

应用文中所给的特征权重和特征值权重计算方法, 确定出评估指标的权重分配系数后, 用式(11)分别计算待评对象关于各等级的多指标综合关联度, 然后根据式(14)得到坝体渗流性态的综合评估指标为 2.126。

5.2 大坝整体性态评估

从图 1 看出, 大坝整体性态综合评估需运用坝体、坝基、近坝区等评估指标。按照上述步骤, 分别从底层开始, 逐项逐层对各待评对象进行递推评估, 得出各待评对象的综合评估指标值和工作性态等级, 如坝体变形、渗流、强度、稳定工作性态和坝体、坝基、近坝区整体工作性态评估结果, 见图 2 所示。最终根据坝体、坝基、近坝区整体工作性态评估结果综合得到大坝整体性态的综合评判指标值为 1.712, 因此等级为 2 级, 实际上应介于“正常”与“基本正常”之间。

5.3 动态评估

按照上述方法, 分别计算出 2000 年~2004 年各年的大坝工作性态综合评估指标值和等级, 如图 3 所示。从图中可以看出, 2000 年~2004 年间, 大

坝工作性态等级较低, 综合评估指标值基本稳定, 无明显变化, 因此可基本判定该大坝的工作性态是正常的。

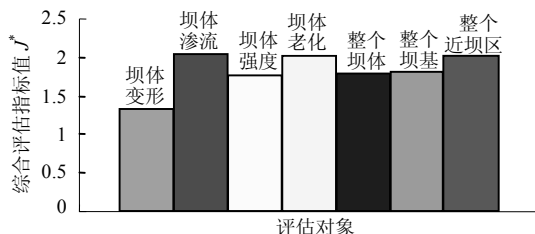


图2 大坝性态评估中间成果 (2004 年)

Fig.2 Results during assessment for dam behavior in 2004

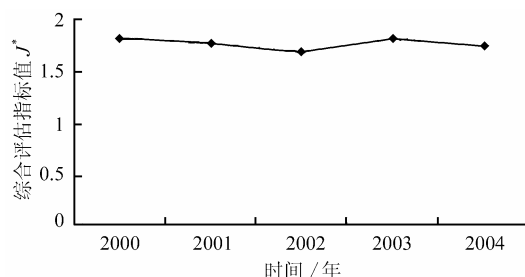


图3 大坝工作性态整体评估结果 (2000 年~2004 年)

Fig.3 Results of dam behavior from 2000 to 2004

6 结 语

大坝工作性态评估需要统筹考虑多指标的属性, 针对其因素的不确定性及信息的有限性, 在评估模型的研究上应注重实效性和理论性。文中将模糊可拓理论应用于大坝工作性态评估中, 建立了基于特征和特征值组合权重的模糊物元评估模型, 能得出大坝系统各组成部分和整体的安全程度和类别, 丰富和改进了大坝工作性态评估方法, 且计算简单、方便, 结果合理。

(1) 在大坝工作性态的可拓评估中, 以物元表述的物元关系式建立大坝工作性态评估的物元模型, 该模型利用物元的可拓性对大坝工作性态进行定性描述, 利用可拓集合论, 可以通过关联函数进行定量计算。

(2) 可拓评估方法与其它评估方法相比, 具有统一的评估模型, 特别是引入了点与区间、区间套距离的概念, 使得关联函数值域范围得到了拓展, 使评估方法能更全面地分析对象属于集合的程度。

(3) 基于可拓学和模糊数学的大坝工作性态评估方法, 是利用物元的可拓性和初始模糊隶属函数, 将可拓理论与模糊数学结合起来。对大坝性态评估这样的复杂系统问题, 进行多层次多指标的发散, 然后从底层开始, 依据底层指标初始模糊隶属函数

值, 运用可拓评估方法对大坝工作性态物元系统进行逐层递归运算, 最后收敛得到大坝整体性态的等级和综合指标值。通过对不同时期大坝工作性态的评估, 从而动态地对大坝工作状况进行综合分析。

(4) 在可拓方法基础上吸收了模糊模式识别的部分思想, 对可拓识别方法作了改进: 根据大坝工作性态级别的不同, 进一步完善了关联函数公式; 结合模糊模式识别中指标权重的定义及算法, 给出了物元特征权重和特征值权重的概念, 运用集值统计迭代法和简单关联函数法来分别确定物元特征权重和特征值权重, 并在某种最优化准则下, 给出各指标的组合权重, 使得评估指标的权值更加合理; 由于仅根据最大关联度值确定级别, 尤其在关联度值相差不大时, 会丢失过多信息, 为此, 通过引入权广义距离对关联度进行非线性处理, 以得到的最优权重对工作性态级别作加权平均, 将其值作为综合评判指标, 从而使评判结果更符合实际情况。

(5) 实例表明, 利用可拓理论对大坝工作性态进行模糊综合评估是合理的、可行的, 且该方法具有一定的普适性, 可应用于高边坡稳定性评判、大坝老化评估、大坝补强加固方案优选、大坝风险识别等领域, 具有广泛的推广前景。

参 考 文 献

- [1] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [2] ZHANG Chu-han. Numerical modeling of concrete dam-foundation-reservoir system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [3] 杨捷, 何金平, 李珍照. 大坝结构实测性态综合评估中定量评估指标度量方法的基本思路[J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(4): 25—28.
YANG Jie, HE Jin-ping, LI Zhen-zhao. Basic thought of analyzing quantitative indices of comprehensive assessment for dam structure monitoring behaviour[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2001, 34(4): 25—28.
- [4] 贾厚华, 贺怀建. 边坡稳定模糊随机可靠度分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 657—660.
JIA Hou-hua, HE Huai-jian. Analysis of fuzzy-random reliability of slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 657—660.
- [5] Dodagoudar G R, Venkatachalam G. Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory[J]. **Computer and Geotechnics**, 2000, (27): 101—115.
- [6] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程研究[J]. 中国工程科学, 2000, 2(12): 90—96.
YANG Chun-yan, CAI Wen. Study on extension engineering[J]. **Engineering Science**, 2000, 2(12): 90—96.
- [7] 胡宝清. 区域水环境质量的区间可拓评估方法及应用[J]. 中国工程科学, 2001, 3(6): 53—56.
HI Bao-qing. The interval extension assessment method of water environmental quality and its application[J]. **Engineering Science**, 2001, 3(6): 53—56.
- [8] 胡宝清. 可拓评估方法在围岩稳定性分类中的应用[J]. 水利学报, 2000, (2): 66—70.
HU Bao-qing. Application of extension assessment method to stability classification of surrounding rocks[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2000, (2): 66—70.
- [9] 姚兆明. 岩石工程系统理论在边坡稳定性评估中的应用[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2003, 23(4): 23—27.
YAO Zhao-ming. Application of rock engineering system theory in the slope stability estimate[J]. **Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)**, 2003, 23(4): 23—27.
- [10] 吴中如, 顾冲时. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [11] 李朝晖, 张承荣, 赵奎, 等. 基于可拓方法的围岩稳定性综合评判方法[J]. 中国矿山工程, 2004, 33(6): 25—27.
LI Zhao-hui, ZHANG Chen-rong, ZHAO Kui, et al. Extension method for analysis of surrounding rock stability[J]. **China Mine Engineering**, 2004, 33(6): 25—27.
- [12] 国蓉, 程光旭, 国亮, 等. 信息熵模糊物元模型的德士古煤气化系统运行状态识别[J]. 西安工业学院学报, 2005, 25(6): 511—515.
GUO Rong, CHENG Guang-xu, GUO Liang, et al. Evaluation of working-state for texacoal gasification system based on information entropy fuzzy matter-element model[J]. **Journal of Xi'an Institute of Technology**, 2005, 25(6): 511—515.