

文章编号: 1673-193X(2008)-06-0057-05

# 基于模糊理论的尾矿库溃坝风险评价模型研究<sup>\*</sup>

李全明<sup>1</sup>, 陈仙<sup>2</sup>, 王云海<sup>1</sup>, 王庆<sup>1</sup>

(1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029)

(2. 首都经济贸易大学, 北京 100026)

**摘要:** 经调查统计, 我国尾矿库存在数量多、规模小、安全度水平低及较多中小尾矿库未经过正规设计等特点, 并且绝大多数尾矿库下游为生活区、工矿企业或重要城镇等, 因此加强尾矿库风险管理, 建立尾矿库溃坝风险评价模型, 对于减少和防止尾矿库溃坝事故的发生, 确保尾矿库的安全运行, 使之更好地为矿山安全生产服务, 为国民经济健康持续快速发展服务等方面都具有重要意义。尾矿库工程的稳定性受到众多因素的影响, 很多因素既难以确定, 又难以定量估计, 既有随机性, 又有模糊性, 具有灰色系统的特性, 因此采用模糊评判方法对尾矿库溃坝风险进行分析具有一定的合理性。本文对多层模糊模式识别评价模型在尾矿库溃坝风险评价中的应用进行了研究, 提出了基于模糊理论的尾矿库溃坝风险评价模型, 开发了尾矿库溃坝风险评价软件。上述工作对于评估尾矿库溃坝风险、减少尾矿库溃坝事故的发生具有重要意义。

**关键词:** 尾矿库; 风险评价; 模糊理论; 溃坝风险评价模型

**中图分类号:** X936      **文献标识码:** A

## Research on the evaluation model of dam failing risk of tailing reservoir based on fuzzy theory

LI Quan-ming<sup>1</sup>, CHEN Xian<sup>2</sup>, WANG Yun-hai<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>

(1. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100029, China)

(2. Capital University of Economics and Business, Beijing 100026, China)

**Abstract:** As a result of investigation and statistics, tailing ponds in China were characterized by large quantity, small capacity, low safety level as well as failure of many tailing ponds to be subject to formal design. To make things worse, domestic areas, industrial and mining enterprises or major cities and towns, etc. Were located downstream most of these tailing ponds. Therefore, it is imperative to strength risk management of the tailing ponds and establish tailing dam failing risk index system and risk evaluation model, which will play a significant role in reducing and preventing the occurrence of tailing dam failing accident, ensuring safe operation of the tailing ponds, making them to better serve safe production of the mines as well as healthy, steady and rapid development of the national economy, etc. Many factors affect the steadiness of tailing reservoir engineering, some of which are not only difficult to confirm, but also difficult to estimate the fixed quantity, at random and dim, so it is reasonable to analyze the risk evaluation of tailing reservoir failing by method fuzzy evaluation. This article made a research on mul-arranging fuzzy model in the risk evaluation of tailing reservoir failing, the model of risk evaluation of tailing reservoir based on fuzzy theory was presented, then the software of the model of risk evaluation of tailing reservoir was developed. These works are great significance to evaluate the risk of tailing dam failing and reduce the accident of tailing dam failing.

**Key words:** tailing reservoir; risk evaluation; fuzzy theory; evaluation model of dam failing risk

## 1 引言

尾矿库是指筑坝拦截谷口或围地构成的用以堆存金属非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿的场所,是维持矿山正常生产的必要设施,但也是金属非金属矿山的重大危险源<sup>[1]</sup>。近年来,因尾矿库垮坝造成人员伤亡和有毒污染物下泄的事故屡屡发生,如 1962 年 9 月 26 日,云南锡业公司火谷都尾矿库发生溃坝事故,死伤 263 人,直接经济损失达 2000 多万元;2000 年 10 月 18 日,广西南丹县大厂镇鸿图选矿厂尾矿库发生重大溃坝事故,共造成 28 人死亡,56 人受伤,直接经济损失 340 万元;特别是今年山西襄汾新塔矿业公司“9·8”特别重大尾矿库溃坝事故,造成 276 人死亡的严重后果。

模糊理论是美国数学家查德提出的,模糊最本质的特征是不能用数量单位精确刻画,刻画客观事物模糊性的数学工具是模糊集合。模糊性,主要是指客观事物之间的差异在中介过渡状态中所呈现的“亦此亦彼”性。模糊理论的突出优点便是与人的思维方式接近,能总结和反映人的经验,从而将定性的规则作定量处理,且十分方便。

当前,我国在尾矿库溃坝风险管理领域开展了大量的研究工作。例如,袁兵等人提出了尾矿库溃坝的数学模型<sup>[2]</sup>;陈青生,孙建华提出了矿山尾矿库溃坝的砂流的计算模拟方法<sup>[3]</sup>;陈国芳提出了尾矿库溃坝风险分析与对策<sup>[4]</sup>;李全明提出了尾矿库溃坝风险指标体系<sup>[5]</sup>,但这些研究都没有对尾矿库溃坝风险进行系统的评价。

目前加强尾矿库风险管理理论的研究,建立尾矿库溃坝风险评价指标体系和风险评判模型,对于减少和防止尾矿库溃坝事故的发生,服务国民经济

的快速健康发展尤为重要。

本文在总结国内外尾矿库事故特点,建立尾矿库溃坝风险指标体系的基础上,提出了基于模糊理论的尾矿库溃坝风险评价模型,该模型的建立可为尾矿库运行的安全监管提供依据。

## 2 尾矿坝等级相对隶属度及级别特征值定义方法

### 2.1 尾矿坝等级相对隶属度

模糊集合论中用隶属程度来描述中介过渡,是以精确的数学语言对模糊概念的一种科学表述。但札德创立的模糊关于隶属度、隶属函数的概念与定义在理论上存在着唯一化与绝对化的缺点<sup>[6]</sup>。此外,定义是从普通集合论的特征函数定义推广而来,简单地以影射形式表示,难以完整地反应模糊概念处于中介过渡段的本质特征。为了研究某一尾矿坝运行期安全状况对于尾矿坝溃坝风险等级的隶属度,本文在给出绝对隶属度、绝对隶属函数的定义后,给出相对隶属度、相对隶属函数的定义。

设论域  $U$  上的一个模糊概念  $A$ , 分别赋给  $A$  处于共维差异的中介过渡段的左、右端点 (称极点) 以 0 与 1 的数。在 0 到 1 的数轴上构成一个  $[0, 1]$  闭区间的连续统。对于  $U$  中的任意元素  $\mu \in U$ , 都在该连续统上指定了一个  $\mu_A^0(\mu)$ , 称为  $\mu$  对  $A$  的绝对隶属度, 简称隶属度。映射:

$$\mu_A^0: [0, 1] \quad (1)$$

$$\mu \mapsto \mu_A^0(\mu) \quad (2)$$

称为  $A$  的绝对隶属函数, 简称隶属函数。

在绝对隶属度的连续统  $[0, 1]$  数轴上建立参考系, 使其中的任意两个点定为参考坐标系上的两极, 赋予参考系的左、右两极以 0 与 1 的数, 并构成参考系  $[0, 1]$  数轴上的参考连续统。对任意的元素  $\mu \in U$ , 都在参考连续统上指定一个数  $\mu_A(\mu)$ , 称为  $\mu$  对  $A$  的相对隶属度。映射

$$\mu_A: U \rightarrow [0, 1] \quad (3)$$

$$\mu \mapsto \mu_A(\mu) \quad (4)$$

称为  $A$  的相对隶属函数。

将上述相对隶属度和相对隶属函数的定义用于

收稿日期: 2008-10-28

作者简介: 李全明, 男, 博士。

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题 (编号: 2006BAK04B01-1、2006BAK04A09-01); 国家自然科学基金项目 (编号: 50709031); 中国安科院基本科研业务费专项资金项目 (编号: 2007JBKY02); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金项目 (编号: SKLHSE-2007-C-01)

描述尾矿坝溃坝风险,可以更为科学和合理的研究和评判尾矿坝运行期的安全现状。

## 2.2 尾矿坝级别特征值

最大隶属度原则是模糊集合论中的一个重要判断与识别准则,被广泛地用于模糊模式识别、模糊综合评判等许多方面,但该原则未对适用范围加以限定。当采用连续多级进行评判时,如果各级隶属度为均匀分布或中间小两边大的对称分布,则最大隶属度原则不适用<sup>[7]</sup>。因此,如某级最大隶属度小于其它各级隶属度之和,最大隶属度原则有时也不适用。因此,如不加限制地应用,会导致不合理的判断、识别和预测的结果。

为了克服最大隶属度原则的这个缺点,本文吸取了模糊理论中提出的级别(或类别)特征值概念与定义作为判断与识别的新指标。

设参考连续的右极点表示模糊概念  $A$  级别 1,自右向左的中介级别依次用 2、3、...、 $c$  的相对隶属度分别为  $\mu_{1j}$ ,  $\mu_{2j}$ , ...,  $\mu_{cj}$ , 满足归一化条件

$$\sum_{h=1}^c \mu_{hj} = 1 \quad (5)$$

则

$$H = \sum_{h=1}^c \mu_{hj} h \quad (6)$$

称为级别(或类别)变量的特征值,简称为级别特征值。

当相对隶属度集中于一个级别点  $h$  时,有:

$$H = h \quad (7)$$

根据级别特征值,判断元素  $j$  隶属于级别  $h_0$ 。显然,这完全符合相对隶属度集中一个级别点  $h$  的情况,且与最大隶属度原则的判断相同。

当相对隶属度在各个级别点为均匀分布或对称分布时,有:

$$H = \frac{c+1}{2} \quad (8)$$

根据级别特征值判断元素  $j$  隶属于对称中心  $(c+1)/2$ 。显然,这种判断完全合乎逻辑思维。由于对称中心的相对隶属度不一定是最大值,如按最大隶属度原则进行判断,可能出现误判。

## 2.3 尾矿坝样本与风险等级距离分析

为了描述尾矿坝样本与溃坝风险等级的亲疏关系,引入尾矿坝样本与溃坝风险等级的“距离”的

概念。

每个事物可用若干种指标来表征。设有 1、2、3、...、 $n$  个样本,每个样本有 1、2、3、...、 $m$  个指标,则用  $x_{ij}$  来代表第  $i$  个样本的第  $j$  个指标。

本文采用的尾矿坝溃坝风险指标体系包含较多的指标,属于多指标的事物,可分别将事物视为多维坐标系统上的一点,用点与点之间的距离来描述尾矿坝样本与风险等级的亲疏关系。

所以,如果每个样本有  $m$  个指标,可以把每个样品看成  $m$  维空间中的一个点,在点与点之间定义距离。

通常要求尾矿坝样本与风险等级之间的距离满足以下条件:

- (1)  $d_{ij} = 0$  (表示  $x_i$  与  $x_j$  相等);
- (2)  $d_{ij} \geq 0$  ( $\forall i, j$ );
- (3)  $d_{ij} = d_{ji}$  ( $\forall i, j$ );
- (4)  $d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}$  ( $\forall i, j, k$ ).

式中,  $d_{ij}$  为第  $i$  个样本与第  $j$  个样本之间的距离,当第  $j$  个样本为尾矿坝风险等级特征值时,则为第  $i$  个样本与风险等级的距离;  $\forall i, j$  为对于一切  $i, j$  样本;  $\forall i, j, k$  为对于一切  $i, j, k$  样本。

在尾矿库溃坝风险评判过程中,参考数学中定义多维空间点距离的定义方法,例如欧氏距离,可写成:

$$d_{ij}(2) = \left[ \sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

## 3 基于聚类理论的尾矿库溃坝风险评价模型

### 3.1 基于聚类理论的溃坝风险评定分级方法

聚类分析动态分级法的实质是先给出一个粗糙的初始分级,然后按某种原则进行反复修改,直到分级合理为止。

将用尾矿坝溃坝风险指标体系描述的尾矿坝溃坝风险定义为全域,用  $X$  表示,将  $X$  中一部分称为集合。则尾矿坝溃坝风险相近的集合可以定义为尾矿坝溃坝风险的类,类应当是一种最佳集合,这种最佳集合对于每个抽样总体应是客观存在的。

聚类分析动态分级法可用图 1 表述如下。

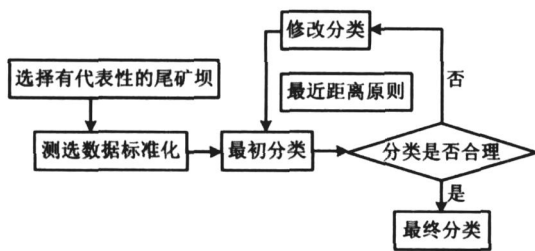


图 1 聚类分析动态分级法的基本原理图

### (1) 聚类分析动态分级法的实施步骤

选择有代表型的矿山和尾矿库工程作为抽样总体；确定代表性尾矿库工程的尾矿坝溃坝风险指标；做出原始数据表格；对原始数据作标准化处理；确定分级数目的上、下限，以便通过计算机计算寻找最佳分级数目；确定初始分级；计算每类的重心（该类样品的均值），并将求得的重心作为初始的分级标准；计算每个样品到各类重心的距离，并按最近距离的原则，将该样品划入最近的一个类别中；重新计算各类重心作为新的分级标准；仿照迭代法的思路，反复调整每个样品的所属类别，计算新重心，并检查前后二次求得的重心是否相同，如完全相同，则输出最终分级结果。

为分类合理，常用分类函数值来衡量分类的合理性。因此在每次修改分级时，都要同时计算分类函数  $DS$ 。分类函数实质上是一种误差函数，本次尾矿坝溃坝风险分级采用的分类函数为：

$$DS = \sum_{i=1}^n (D_{B(k)})^2 \quad (10)$$

式中： $i$  为样本编号； $B(k)$  为各类的中心； $D_{B(k)}$  为各个样本到其所属类别重心  $B(k)$  的欧式距离； $DS$  为全部样品到其所属类别重心欧式距离的综合，也即分类函数值。修改分级的原则就是使这一函数值  $DS$  不断缩小，直到不能减少为止。

### (2) 尾矿坝溃坝风险评定分级计算

对随机抽取的样本进行分析处理，从各级计算得到的分类函数数值看，尾矿坝溃坝风险分级应在 4、5、6 三个档次中选择，参考《尾矿库安全技术规程》(AQ2006-2005) 中危、险、病和正常库的划分方法，本文将尾矿库溃坝风险分级数定为 4 级。

### 3.2 基于模糊理论的尾矿库溃坝风险评价模型

模糊识别问题是在已知各种类型的情况下，识别给定的对象属于哪个类型。应用模糊模式识别理论模型求解模糊模式识别问题的内容是：已知若干

个模式或标准样本，识别与计算研究对象属于各个模式的相对隶属度，计算相对状态（或级别）特征值，识别判断研究对象属于哪一个模式或标准样本。

设对一个模糊概念  $A$ （如尾矿库溃坝风险）进行识别的  $n$  个样本组成的集合，有  $m$  个指标特征值表示样本的整体特征，则样本集可用  $m \times n$  阶指标特征值矩阵表示。

$$X = (x_{ij}) \quad (11)$$

式中， $x_{ij}$  为样本  $j$  指标  $i$  的特征值； $i = 1, 2, \dots, m$ ， $j = 1, 2, \dots, n$ 。

若样本集依据  $m$  个指标按  $c$  个状态或级别的已知指标标准特征值进行识别，则有  $m \times c$  阶指标标准特征值矩阵。

$$Y = (y_{ih}) \quad (12)$$

式中， $y_{ih}$  为状态或级别  $h$  指标  $i$  的标准特征值； $i = 1, 2, \dots, m$ ， $h = 1, 2, \dots, c$ 。

通常按 1 ~  $c$  级指标标准特征值的增减将指标分为递减型（从 1 级至  $c$  级指标标准特征值减小）与递增型（从 1 级至  $c$  级指标标准特征值增加）两类，其中：

递减型指标的相对隶属函数为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} = y_{ic}) \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & (y_{i1} > x_{ij} > y_{ic}) \\ 1 & (x_{ij} = y_{i1}) \end{cases} \quad (13)$$

$h$  级指标标准特征值的相对隶属函数为

$$s_{ij} = \begin{cases} 0 & (y_{ih} = y_{ic}) \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & (y_{i1} > y_{ih} > y_{ic}) \\ 1 & (y_{ih} = y_{i1}) \end{cases} \quad (14)$$

利用相对隶属函数可以把指标与标准特征值矩阵分别变换为所选指标与标准特征值的相对隶属度矩阵

$$R = (r_{ij}) \quad (15)$$

$$S = (s_{ih}) \quad (16)$$

将样本  $j$  的  $m$  个指标相对隶属度  $r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj}$  分别与矩阵  $S$  的第 1、第 2 直至第  $m$  行的行向量  $(s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1c}), (s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2c}), \dots, (s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mc})$  逐一地进行比较，可得到样本  $j$  的级别上限值  $b_j$  和级别下限值  $a_j$ 。

设样本  $j$  隶属于级别  $h$  的相对隶属度为  $u_{hj}$ ，指标权向量为  $=(\quad)_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。则样本  $j$  与级别  $h$  之间的差异可用加权广义欧式权距离表示：

$$D_{hj} = u_{hj} d_{hj} = u_{hj} \sqrt{\sum_{i=1}^m [i(r_{ij} - s_{ih})^2]} \quad (17)$$

式中,  $d_{hj}$  为欧氏权距离。

为求解样本  $j$  级别  $h$  对于  $A$  的最优相对隶属度, 建立目标函数

$$\min \{ F(u_{hj}) = \sum_{h=a_j}^{b_j} D_{hj}^2 \} \quad (18)$$

满足约束条件:  $\sum_{h=a_j}^{b_j} u_{hj} = 1, 0 \leq u_{hj} \leq 1, \sum_{i=1}^m i = 1, i > 0。$

通过求解目标函数, 得到模糊模式识别模型:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & (h < a_j \text{ 或 } h > b_j) \\ \frac{1}{\left( \frac{\sum_{i=1}^m [i(r_{ij} - s_{ih})^P]}{m} \right)^{\frac{2}{P}}} & (a_j \leq h \leq b_j, d_{hj} > 0) \\ 1 & (d_{hj} = 0) \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $P$  为距离参数,  $P=1$  为海明距离,  $P=2$  为欧式距离。

当  $P=2$  时, 模型为:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & (h < a_j \text{ 或 } h > b_j) \\ \frac{1}{\left( \frac{\sum_{i=1}^m [i(r_{ij} - s_{ih})^2]}{m} \right)} & (a_j \leq h \leq b_j, d_{hj} > 0) \\ 1 & (d_{hj} = 0) \end{cases} \quad (20)$$

特殊地, 当  $c=2$  时, 变为两级模糊模式识别模型:

$$u_{ij} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^m [i(r_{ij} - 1)]^2}{m}}, u_{2j} = 1 - u_{ij} \quad (21)$$

#### 4 尾矿库溃坝风险评价软件开发

根据前面介绍的风险评价方法, 本文编制了尾矿库溃坝风险评价系统 (见图 2), 该系统包括的功能模块有: 溃坝风险指标相关性分析、尾矿库溃坝风险评价等, 可用于尾矿库溃坝风险的评判。



图2 尾矿库风险评价系统

#### 5 总结

加强尾矿库安全管理, 建立尾矿库溃坝风险评判模型, 对于减少和防止尾矿库溃坝事故的发生, 确保尾矿库的安全运行, 使之更好地为矿山安全生产服务, 为国民经济健康持续快速发展服务等方面都具有重要意义。

本文在总结国内外尾矿库事故特点、建立尾矿库溃坝风险指标体系的已有工作基础上, 对多层模糊模式识别评价模型在尾矿库溃坝风险评价中的应用进行了研究, 提出了基于模糊理论的尾矿库风险评价模型, 开发了尾矿库溃坝风险评价软件, 可为尾矿库运行期的安全监管提供依据。

#### 参考文献

- [1] 彭承英. 尾矿库事故及预防措施 [J]. 有色矿山, 1996, (5): 38 ~ 40
- [2] 袁兵, 王飞跃, 金永健, 赵望达. 尾矿库溃坝模型研究及应用 [J]. 中国安全科学学报, 2008, (4): 167 ~ 172
- [3] 陈青生, 孙建华. 矿山尾矿库溃坝砂流的计算模型 [J]. 河海大学学报, 1995, (5): 99 ~ 105
- [4] 陈国芳, 胡波. 尾矿库溃坝风险分析与对策 [J]. 科技情报开发与经济, 2007, (3): 226 ~ 228
- [5] 李全明, 王云海, 张兴凯, 赵军. 尾矿库溃坝灾害因素分析及风险指标体系研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2008, (3): 50 ~ 53
- [6] 李葆文. 札德、古朴塔教授谈模糊数学 [J]. 广州大学学报 (社会科学版), 1987, (2)
- [7] 陈耀辉, 孙春燕. 模糊综合评判法中的最大隶属原则有效度 [J]. 重庆师范学院学报 (自然科学版), 2001, (2)