

基于模糊层次和集对分析的尾矿库安全评价及预测*

尹 君 王玉杰 吕 林 陈先锋
(武汉理工大学)

摘 要 从尾矿库安全管理面临的决策需求出发,通过对尾矿库危险源进行分析,建立了尾矿库安全评价预测指标体系,详细探讨了差异度和集对势在尾矿库安全评价和预测方面的应用。分别应用模糊层次分析法和集对分析理论对尾矿库进行安全评价和预测,确立了尾矿库的安全等级,反映尾矿库安全管理水平,分析尾矿库安全状况发展趋势,探索了一条安全评价与预测相结合的新途径,为尾矿库的安全管理和运行提供有效支持。

关键词 模糊层次分析 集对分析 尾矿库 安全评价 安全预测

Safety Assessment and Prediction of the Tailing Pond Based on Fuzzy Hierarchy Analysis and Set Pair Analysis

Yin Jun Wang Yujie Lu Lin Chen Xianfeng
(Wuhan University of Technology)

Abstract With the decision-making requirements of tailing ponds' security management, the index system on the safety assessment and prediction of the tailing pond was set up based on the analysis of the tailing ponds' danger sources. The application of the diversity factor and the set pair potential in tailing ponds' safety assessment and prediction was introduced in detail. The fuzzy hierarchy analysis method and set pair analysis were applied to evaluate and forecast the safe condition of the tailing pond. Then the safety level of the tailing pond was established to reflect the safety management and analyzed the development tendency of safe condition. A new way of combining safety assessment with safety prediction was explored, which can support safe operation and safety management of the tailing pond effectively.

Keywords Fuzzy hierarchy analysis, Set pair analysis, Tailing pond, Safety assessment, Safety prediction

尾矿库是一种高势能的人造泥石流,其中的尾矿含有多种有毒有害物质。随着工业的迅速发展,尾矿库数量增多,相关事故多次发生,给人们的生命和财产以及生态环境均带来了巨大的损失。2000年10月18日广西南丹县大厂镇的酸水湾鸿图尾矿库发生严重溃坝事故,造成28人死亡,56人受伤,砂坝附近上百座民房尽毁。2008年9月8日,山西襄汾县新塔矿业有限公司尾矿库发生重大溃坝事故,造成277人死亡、4人失踪、33人受伤,直接经济损失9 619万元。这些严重的尾矿库事故给我们敲响了安全警钟,尾矿库的安全问题也受到了国家和企业的高度重视,因此对尾矿库的安全状况进行评价和预测尤为重要^[1-3]。

尾矿库安全评价及预测的方法、体系尚无统一标准和规范,本研究首先运用模糊层次分析方法对尾矿库进行评价,确定尾矿库的安全等级,然后应用集对分析理论预测尾矿库的安全状况发展趋势,为

尾矿库的安全评价和预测提供了新的思路和途径。

1 尾矿库的安全评价及预测

1.1 尾矿库安全评价及预测指标体系的建立

根据尾矿库的特点,结合层次分析法和集对分析理论,将尾矿库安全评价、预测体系划分为五大单元,即尾矿库安全管理单元、尾矿坝坝体和尾矿排放单元、排洪防洪系统单元、水力输送系统单元以及回水系统、水处理系统和环境保护单元^[4]。具体如表1所示。

1.2 基于模糊层次分析法的尾矿库安全评价

1.2.1 确定评价预测指标的权重

通过采用9级标度法对因素进行两两比较来建

* 国家自然科学基金项目(编号:50804038),教育部博士点专项基金项目(编号:200804971055)。

尹 君(1987—),女,武汉理工大学资源与环境工程学院,硕士研究生,430070 湖北省武汉市武汉理工大学马房山校区西院研569信箱。

表 1 尾矿库安全评价、预测指标体系

1 级 指标	2 级 指标	2 级 权重	3 级 指标	3 级 权重
安全管理	0.30	尾矿库管理机构设置	0.20	
		尾矿库安全管理档案	0.20	
		尾矿库溃坝应急预案	0.20	
		尾矿库维护管理	0.30	
		沉积滩安全管理	0.10	
尾矿库安全评价预测	0.25	尾矿坝工程地质情况	0.10	
		尾矿坝筑坝方式	0.15	
		尾矿颗粒组成分析	0.04	
		尾矿物理学特性分析	0.04	
		尾矿坝体结构、构造的情况	0.06	
		坝体沉陷、裂缝、坍塌及位移情况	0.04	
		坝面管涌、流土等渗流破坏情况	0.04	
		尾矿堆积坝安全超高	0.04	
		沉积滩长度	0.04	
		尾矿堆积坝坝坡比	0.05	
		坝面防护情况	0.08	
		坝内排渗设施效果	0.10	
		坝体浸润线观测情况	0.04	
		坝体抗震能力	0.10	
		尾矿坝各种安全检测设施评价分析	0.04	
尾矿坝静力、动力和渗透稳定分析结果	0.04			
排洪防洪系统	0.25	尾矿库防洪设施	0.15	
		尾矿库调洪与排洪能力情况	0.35	
		排洪构筑物完好程度及可靠性情况	0.50	
水力输送系统	0.10	尾矿管槽输送能力及其环境条件	0.45	
		浓缩池和浓缩机情况	0.25	
		砂泵站运行情况	0.30	
回水系统	0.10	回水管道情况	0.25	
		回水泵站运行情况	0.25	
		回水水量平衡情况	0.10	
		尾矿库水质情况	0.10	
		截渗设施运行情况	0.20	
环境保护		环境保护情况	0.10	

立数值判断矩阵,求出判断矩阵特征向量,对其进行归一化确定指标体系的权重,并计算判断矩阵最大特征根进行一致性检验,符合一致性比例则表示权重合理^[5,6],本研究计算得到的权重如表 1 所示。

1.2.2 建立模糊评价矩阵

采用 5 级评语,其对应的评语分值如表 2 所示。

表 2 评语分值

分 数	95	80	65	45	30
安全级别	优	良	一般	较差	差

请专家评分,将专家评分整理分别与 3 级指标权重对应相乘,得到 2 级指标模糊矩阵 R,并由公式 $B=A \cdot R$ 即可得到总评价矩阵 B,计算出总得分。

1.2.3 安全评价得分的计算及等级的确定

将最终得分的安全级别与表 3 对应,得到评价最终结果。

表 3 安全评价等级划分

安全得分	≥85	75~84	65~74	55~64	40~54	≤40
安全等级	非常好	好	良	一般	较差	差

1.3 基于集对分析理论的尾矿库安全预测

1.3.1 集对分析基本原理

集对分析核心思想是将被研究的系统看成确定不确定性系统,主要从同异反 3 个方面来分析研究系统的联系和转化状况,采用联系度描述系统不确定性,定量地表示系统的不确定性。应用集对分析对尾矿库的安全趋势进行预测,将尾矿库各时期的各定量指标值组成一个集合,将尾矿库的评价标准相关指标值组成另一个集合,2 集合组成 2 个集对。如评价标准改变,则相应指标值构成的结合也不同^[7]。

1.3.2 联系度

联系度是集对分析中的重要概念。设有集合 A 和 B,组成集对 H。对集对 H 进行分析,总共可得到 N 个特性,S 个 2 个集合共有的特性,P 个 2 个集合相对立的特性,还有 F 个既不共有又不对立的特性。这样一个确定不确定性的系统可以称为同异反系统。S/N 表示集合 A 和 B 在具体问题下的同一度,F/N 表示集合 A 和 B 在具体问题下的差异度,则 P/N 表示两集合的对立度。在不考虑各特性权重的情况下,可以用 a 表示 S/N,用 b 表示 F/N,用 c 表示 P/N。那么,不考虑权重时,联系度公式可写为

$$m = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj, \quad (1)$$

式中,a,b,c 应满足条件 $a + b + c = 1$ 。i 表示差异不确定度的系数,j 表示的是对立不确定度的系数。i 和 j 在式子中均有两重含义:第一种是 i 和 j 作为差异不确定性和对立不确定性系数,i 可在区间 $[-1, 1]$ 内根据不同情况取值,j 一般固定取值 -1。第二种含义指不考虑 i 和 j 的取值情况,仅作为标记表示差异度和对立度。在实际情况中 i 和 j 的这 2 种含义都有广泛应用,可根据研究需要自行考虑采用哪种含义解决问题^[8,9]。

1.3.3 集对势

针对某个具体问题,设定集合,展开集对分析,可得到联系度表达式 $m = a + bi + cj$,a,b,c 分别反映了进行集对分析的 2 个集合的同一度、差异度和对立度。通常来说这 3 个数不会相等,其大小上的差别正好在一定程度上能反映这 2 个集合在具体问题上的某种趋势。

集对势是指联系度中 $c \neq 0$ 时,同一度 a 和对立度 c 的比值。集对势用 shi 表示,记为

$$shi(H) = \frac{a}{c}. \quad (2)$$

集对势可由被研究集合的同异反联系度求得。集对势的等级次序关系具体见表 4。

表 4 集对势等级次序

a, b, c 大小	等级	集对势	含 义
$a > c, b = 0$	同 势	准同势	系统有确定的同一趋势
$a > c, c > b$		强同势	系统以同一趋势为主
$a > c, a > b > c$		弱同势	系统同一趋势比较弱
$a > c, b > a$	均 势	微同势	系统同一趋势很弱
$a = c, b = 0$		准均势	系统同一与对立趋势相当
$a = c, a > b > 0$		强均势	系统同一与对立趋势明显相当
$a = c, b = a$	弱均势	弱均势	系统同一和对立趋势相等,但不确定
$a = c, b > a$			系统同一和对立趋势虽相等,但不确定性的作用导致很微弱
$a < c, b = 0$	反 势	准反势	系统有确定的对立趋势
$a < c, 0 < b < a$		强反势	系统以对立趋势为主
$a < c, a < b < c$		弱反势	系统对立趋势较弱
$a < c, b > c$	微反势	系统对立趋势很微弱	

集对分析中的同势意味着集对中 2 个集合存在着同一趋势,反势则意味着这 2 个集合存在着对立趋势,均势表示这 2 个集合势均力敌比较平均。通过对集对势的计算,可通过次序关系明显地表示系统的不确定性。

1.3.4 基于集对分析的排序法安全预测模型

采用集对分析方法进行安全状况预测,可采用多元联系数模型,这里先引进多元联系数的概念。多元联系数主要是根据同异反联系数 $m = a + bi + cj$ 在 bi 项展开式 $m = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \dots + cj$ 引申的具有层次的函数。为应用方便,可将多元联系数归一化。

在多元联系数中, $a, b, c, d, e, f, \dots, x$ 为联系分量,对应的 i, j, k, l, m, \dots, y 称为联系分量系数。一般多元联系数的第一项没有系数,也就是系数为 1,最后一项系数为 -1,其余的各项在不同的情况下在区间 $[-1, 1]$ 取值。取值的原則有按比例取值、均分取值、邻近取值等。一般地,多元联系数的第一项到最后一项,系数由 1 到 -1 保持着递减关系。

多元联系数模型 μ 可以表示为

$$\mu = W \cdot R \cdot E = (W_1, W_2, \dots, W_n) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & \dots & x_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & x_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & \dots & x_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n & \dots & x_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ j \\ \vdots \\ y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ 为权重系数, R 为同异反多元评价矩阵, E 为联系矩阵。

欲进行尾矿库的安全状况发展趋势预测,先采用公式计算出多元联系度,简化结果后,可分析其集对势,则能评价系统的安全发展趋势,预测效果比较准确可靠。

2 应用实例

2.1 基于模糊层次分析法的尾矿库安全评价模型应用

2.1.1 专家评分

以某尾矿库为例,建立评价语集,分别由 10 位专家对尾矿库各项指标按照优、良、一般、较差、差进行打分。

2.1.2 安全评价

整理专家评分结果,可得到尾矿库安全体系各 2 级指标子系统的评价矩阵,则

$$B = A \cdot R = A \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{bmatrix} = [0.30 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.10 \quad 0.10] \cdot \begin{bmatrix} 74.60 \\ 62.40 \\ 75.50 \\ 70.15 \\ 66.85 \end{bmatrix} = 70.555. \quad (4)$$

2.1.2 确定安全等级

由计算可得,该尾矿库的安全等级情况为“良”。

2.2 基于集对分析理论的尾矿库安全预测模型应用

由 10 位专家依据表 1 评价指标体系对尾矿库各车间进行评价,评价等级有优、良、中、较差、差。10 位评价人的权重系数分别为 0.1, 0.15, 0.05, 0.1, 0.05, 0.05, 0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 评价结果如下: (下转第 188 页)

[7] 李章大,周秋兰. 我国尾矿利用现状及 21 世纪展望[J]. 地质与勘探,1997(3):21-28.

[8] 刘三军,王玉婷,阮伟. 从铜尾矿中回收重晶石的试验研究[J]. 矿冶工程,2008(6):44-47.

[9] 杜计划. 从尾矿中综合回收铜、铁资源的技术与实践[J]. 金属矿山,1997(6):18-20.

[10] 张先禹. 高硅铜矿尾饰面玻璃的熔制[J]. 上海建材,2000(4):19-21.

[11] 刘维平. 利用铜尾矿制备彩色石英砂的研究[J]. 有色金属:选矿部分,2004(1):44-46.

[12] 唐达高. 铜尾矿在水泥生产中的应用研究[J]. 中国资源综合利用,2005(10):17-20.

[13] 张文彬. 氧化铜矿浮选研究与实践[M]. 长沙:中南大学出版社,1992.

[14] 李文龙,罗琳,吴霞,等. 硫化浮选从某铜矿尾矿中富集铜的研究[J]. 有色金属:选矿部分,2009(3):14-17.

[15] 董英,王吉坤,冯桂林. 有色金属资源开发与加工[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.

[16] Antonijevi M M, Dimitrijevi M D, Stevanovi Z O, et al. Investigation of the possibility of copper recovery from the flotation tailings by acid leaching[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,158:23-34.

[17] 孙淑媛,孙龄高,殷齐西,等. 矿石及有色金属分析手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1990.

[18] 张运奇,方正,陈阳国. 铜矿尾砂及低品位铜矿的电化学浸出[J]. 化学工程与装备,2009(5):10-12.

(收稿日期 2010-08-12)

(上接第 161 页)

$$\mu = W \cdot R \cdot E = (W_1, W_2, \dots, W_n) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & \dots & x_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & x_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & \dots & x_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n & \dots & x_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ j \\ \vdots \\ y \end{bmatrix} =$$

$$0.2305 + 0.2812i + 0.3617j + 0.0844k + 0.0422l. \quad (5)$$

可知 $a = 0.2305, b = 0.2812, c = 0.3617$ 。对照表 4 可得,此尾矿库的安全状况发展趋势为弱反势,系统以对立趋势为主,但对立的程度比较弱。尽管目前该尾矿库的安全等级为良,但是该尾矿库的安全状况有着较弱的向不好方向发展的趋势。此状况应引起尾矿库负责人和管理者的关注和重视,应增加投入,整改存在的不安全因素,加强安全管理,力求改善系统的安全状态,避免趋势的恶化和事故的发生。

3 结 论

(1)通过对尾矿库的危险源进行分析,建立了尾矿库安全评价指标体系,采用层次分析法确定了各项评价指标的权重,运用模糊数学方法对尾矿库进行安全评价,得到的评价结果和实际安全状况一致。

(2)将尾矿库看成一个集对系统,运用集对分析理论求出联系度,而差异度 i 的取值可清晰体现系统同一项、对立项以及不确定项之间的转化程度,

对该尾矿库的安全状况发展趋势进行了有效的预测,为尾矿库的安全评价预测提供了新的方法和途径。

(3)通过模糊层次分析法和集对分析理论相结合,对尾矿库进行了安全评价,同时又进行了安全预测,可为尾矿库管理者提供有价值的管理方向。两种方法相结合为矿山进行安全评价预测提供了一条新思路。

参 考 文 献

[1] 傅联海,张阳. 尾矿库危险有害因素及安全管理对策和措施[J]. 黄金,2008,29(5):49-52.

[2] 徐宏达. 尾矿库的安全评价和风险管理[J]. 金属矿山,2009(8):135-139.

[3] 魏勇,许开立,郑欣. 浅析国内外尾矿坝事故及原因[J]. 金属矿山,2009(7):139-142.

[4] 丁军明. 尾矿库危险源分析及安全评价导则建议方案研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2007.

[5] 蒋卫东,李夕兵,赵国彦,等. 模糊灰色综合评价方法及在尾矿库安全管理中的应用[J]. 湘潭矿业学院学报,2002,17(2):16-20.

[6] 陈彦龙,才庆祥,周伟,等. 基于层次分析法的露天矿采区转向方式研究[J]. 金属矿山,2010(1):51-53.

[7] 郑欣,许开立,周家红. 基于集对分析的尾矿库安全评价研究[J]. 安全与环境学报,2008,8(1):160-162.

[8] 张薇薇. 基于集对分析和模糊层次分析法的城市系统评价方法[D]. 合肥:合肥工业大学,2007.

[9] 李铭洋. 基于集对分析理论的评标模型及算法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2008.

(收稿日期 2010-08-17)