

文章编号:1674-2869(2012)1-0026-05

尾矿库安全评价的灰色关联与集对分析研究

罗勇,周春梅,吴燕玲,李先福*

(武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074)

摘要:从尾矿库安全管理所面临的实际情况出发,建立了尾矿库安全评价指标体系.利用AHP法确定了各指标的权重,根据联系数模型对尾矿库进行评价确定安全等级.应用灰色关联和集对分析的理论进行b、a与b、c两组集对的比较,将计算出的绝对关联度的最大绝对值作为差异度 i 的取值,代入各式中求出各组联系度的值,根据取值所在的安全区间分析分析尾矿库的安全等级的正确性以及发展的趋势,提出需要整改和加强的措施.此方法探索了一条尾矿库安全评价的新途径,为尾矿库的安全管理和运行提供了有效支持.

关键词:灰色关联度;集对分析;尾矿库;安全评价;指标体系

中图分类号:TD77

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2012.1.006

0 引言

尾矿库是一个具有高势能的人造泥石流,由于尾矿库难以避开居民区和人口稠密区,因此是重要的危险源^[1].我国的尾矿库安全现状不容乐观,不能达到安全运行且有一定问题的约占很大比重,并还有大部分病库,超期服役库.截至2009年12月,全国共有非煤矿山86125家,全国尾矿库10519座,其中危库284座、险库348座、病库1466座、正常库8421座,危、险、病库占总库数的19.9%,现已发生的相关事故已经给人们的生命和财产以及生态环境均带来了巨大的损失,如2010年7月河南省栾川县发生的尾矿溃坝事故造成44人死亡,22失踪,经济损失数千万元,并冲垮距现场两小时车程的桥两座.2008年9月8日,山西省襄汾发生的特别重大溃坝事故,造成了重大人员伤亡和经济损失.发生这些严重的尾矿库事故使得对尾矿库的安全状况进行评价研究显得尤为重要^[2].

我国的尾矿库安全评价最初以定性分析为主,其评价方法包括:安全检查表、专家现场询问观察法、因素图分析法、作业条件危险性评价法、故障类型和影响分析、危险可操作性研究等,后来慢慢发展到定量的评价方法,如层次分析法、模糊综合评判法、极限平衡法、人工神经网络法、突变理论法、集对分析法等^[3].尾矿库安全评价研究的

方法和体系目前还没有统一的标准和相关的规范,本文首先运用联系数模型对尾矿库进行评价,确定尾矿库的安全等级,然后应用灰色关联度和集对分析理论预测尾矿库的安全状况与发展趋势,提出整改和加强的措施,为尾矿库的安全评价研究提供了新的思路和方法.

1 尾矿库安全评价

1.1 尾矿库安全评级指标体系的建立

根据尾矿库的安全状况和实际特点,结合灰色系统中关联度的概念和集对分析理论,将尾矿库的安全评价体系划分为5个2级指标和22个3级指标,具体如表1所示.

1.2 确定评价指标的权重

通过采用层次分析法中8级标度法,对选定的因素进行两两比较,确定两者中的较重要值,并构造数值判断矩阵 A ,对矩阵进行计算得到该判断矩阵最大特征根 λ_{\max} 所对应的特征向量 W ,对 W 进行归一化计算以确定指标体系的权重,并对判断矩阵进行一致性检验,符合一致性比例则表示权重合理^[4].研究计算得到的权重如表1所示.

1.3 安全评价总得分计算与等级划分

尾矿库安全综合评价表明系统可以根据评语分值划为5个等级,具体评语分值见表2,请专家评分,将专家评分值整理再分别乘以对应的3级指标权重,得到2级指标模糊矩阵 R ,再根据公式

收稿日期:2011-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(No:50874080,41002112)

作者简介:罗勇(1988-),男,湖北松滋人,硕士研究生.研究方向:防灾减灾及防护工程.

指导老师:李先福,男,教授,博士,硕士生导师.研究方向:地质环境与灾害防治.*通信联系人

$B = A \cdot R$ 可计算出总评价矩阵 B , 最后算出总得分. 系统总得分的安全级别与表 3 对应则得到最终评价结果.

表 1 尾矿库安全评价指标体系

Table 1 The index system of tailings safety evaluation

1 级 指标	2 级 指标	2 级 权重	3 级 指标	3 级 权重
尾 矿 库 安 全 综 合 评 价 指 标	安全 基础 管理	0.30	管理机构设置	0.25
			安全管理档案	0.10
			溃坝应急预案	0.20
			日常维护管理	0.35
			沉积滩安全管理	0.10
	尾矿坝 坝体	0.25	工程地质情况	0.10
			筑坝方式	0.20
			尾矿颗粒组成与力学 性质	0.10
			坝坡比与坝面防护 情况	0.25
			坝内排渗设施效果	0.25
			坝体抗震能力与安检 评价分析	0.10
	排洪 系统	0.25	尾矿库防洪设施完备 程度	0.11
			尾矿库调洪与排洪 能力	0.30
			排洪构筑物好坏程度 及可靠性情况	0.59
	水利 输送 系统	0.10	尾矿管槽输送能力	0.40
			砂泵站运行好坏与 效率	0.35
			浓缩池和浓缩机状况	0.25
	回水系 统水处 理系统 和环境 保护	0.10	回水管道情况	0.30
			回水泵站运行情况	0.30
			截渗设施运行情况	0.15
			尾矿库水质情况	0.15
			环境保护情况	0.10

表 2 评语分值

Table 2 The score of comments

分数	95	80	65	45	30
安全级别	优	良	一般	较差	差

表 3 安全评价等级划分

Table 3 Classification of safety evaluation degree

安全得分	≥90	90 ~ 80	79 ~ 60	59 ~ 40	≤40
安全等级	非常好	较好	中	较差	差

2 基于灰色关联度的集对分析理论

2.1 集对分析基本原理

集对分析是一门不确定性的理论,其核心思想

是将被研究的系统作为一个确定不确定性系统,并主要从同一、差异、对立三个方面来分析研究系统内部之间的联系和变化趋势,通过采用联系度的值定量地描述系统的不确定性,从而将对不确定性的辩证认识转换成具体数学运算^[5].

2.2 联系度

设定两个集合 A 和 B , 将这 2 个集合组成集对 H , 在某个具体的问题背景(设为 W)下, 对集对 H 的特性进行分析, 得到 N 个特性. 其中: 集合 A 和 B 所共同具有的特性为 S 个; 集合 A 和 B 相对立的特性有 P 个, 在其余的 $F = N - S - P$ 个特性上, 集合 A 、 B 既不相互对立, 又不为相互共有, 则称比值: ① S/N 为集合 A 和 B 在问题 W 下的同一度, 简记为 a ; ② F/N 为集合 A 和 B 在问题 W 下的差异度, 简记为 b ; ③ P/N 为集合 A 和 B 在问题 W 下的对立度, 简记为 c . 在不考虑各特性权重的联系度时:

$$\mu(W) = S/N + (F/N)i + (P/N)j = a + bi + cj \quad (1)$$

式(1)中, i 为差异不确定度的系数, 其取值区间在 $[-1, 1]$ 内, 它也可仅起标记的作用; j 是对立度的系数, 对立说明其值为 -1 , 同样也可仅起标记作用, μ 为联系度, 当其量化为某一确定数值时称为联系数. 由此可知, 联系度表达式中 3 个变量的值可以分析出这 3 者之间的联系、影响与转化. 当 i 为 1 时, 差异度转化为同一度; i 为 -1 时, 差异度转化为对立度; 当 i 在 $(-1, 1)$ 区间取值, 则不确定量中同一与对立各占一定比例^[6].

2.3 灰色关联度

灰色系统理论是邓聚龙教授提出的一门新兴学科, 它是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的新方法^[7]. 灰色系统理论以“部分信息已知, 部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象, 通过对“部分”已知信息的生成、开发, 提取有价值的信息, 实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控.

集对分析主要利用联系度来处理不确定性问题, i 值的确定方法成为了问题的关键, 目前主要的方法并没有针对如何从 a 、 b 、 c 的相互关联中确定 i 的值, 因此本文采用绝对关联度的概念将 a 、 b 、 c 分为 b 、 c 和 b 、 a 两组, 求出这两组之间的绝对关联度的量化值, 并将绝对最大的关联度值作为 i 的取值, 此方法与一般的方法相比, 能较好解决因样本容量小且线性关系不明显而难以分析的问题^[8].

灰色绝对关联度的计算:

设参考数列为 $X_0(t_k)$, 比较数列为 $X_i(t_k)$, 记参考数列与比较数列的关联系数为 $\xi_{0i}(t_k)$, 其计算

公式为:

$$\xi_{0i}(t_k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(t_k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (2)$$

式(2)中, ξ 为分辨系数, $\xi = 0.5$; Δ_{\min} 为 X_0 与 X_i 的最小绝对差值, 即

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_k |X_0(t_k) - X_i(t_k)| \quad (3)$$

Δ_{\max} 为 X_0 与 X_i 的最大绝对差值, 即

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_k |X_0(t_k) - X_i(t_k)| \quad (4)$$

$\Delta_{0i}(t_k)$ 为 X_0 与 X_i 的绝对差值, 即

$$\Delta_{0i}(t_k) = |X_0(t_k) - X_i(t_k)| \quad (2)$$

绝对关联度的值按式(6)计算:

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{0i}(t_k) \quad (6)$$

如果各指标在综合评价中所起的作用不同, 可对绝对关联系数求加权平均值即

$$r_{0i} = \frac{1}{n} W_k \sum_{k=1}^n \xi_{0i}(t_k) \quad (7)$$

式(6)、(7)中 r_{0i} 为比较数列与参考数列的关联度, 是各关联系数的平均值。

将 N 个比较数列对同一参考数列的关联度按由大到小顺序进行排列, 关联度大则表明该因子的影响力大^[9]。

2.4 基于灰色关联度的集对分析模型建模步骤

步骤 1: 选择一个集对, 分析集对的特性, 按照集对中同一度、差异度和对立度的定义求出同一组的 a 、 b 、 c 量化值。

步骤 2: 根据绝对关联度的计算步骤, 将同一组

的 a 、 b 、 c 分为 b 与 c 和 b 与 a 两组, 计算出的绝对关联度表示为差异度与对立度、差异度与同一度的联系程度。

步骤 3: 将绝对关联度较大者作为 i 的取值, 即

$$i = \begin{cases} r_{ba} (r_{ba} > r_{bc}) \\ -r_{bc} (r_{bc} > r_{ba}) \end{cases}$$

步骤 4: 将 i 的取值分别带入各联系式中得到各个 μ 的值, μ 的值越大, 说明两个集对之间的联系越密切。

3 工程应用

3.1 基于灰色关联度的集对分析尾矿库安全评价模型应用

3.1.1 尾矿库安全等级评定

以某尾矿库为例, 建立评价语集, 邀请 5 位专家对尾矿库 22 个三级指标按照表 2 评语分值进行评分, 5 位专家的权重系数分别为 0.2、0.25、0.2、0.25、0.1。根据国家尾矿库安全标准化评定标准将三级指标转换为二级指标的得分, 列出评价矩阵, 计算出该尾矿库安全评价的总得分 $B = A \cdot R = 73.55$, 由表 3 可知该尾矿库的安全评价等级为中等。

3.1.2 尾矿库安全灰色关联度计算

整理后的该尾矿库 5 位专家对二级指标的评分值如表 4 所示。

表 4 原始二级指标安全评分值

Table 4 Original secondary indexes of evaluation

专家编号	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
安全基础管理	81	83	80	81	80
尾矿坝坝体	79	78	80	79	78
排洪系统	77	80	82	81	84
水利输送系统	81	74	79	77	82
回水与水处理系统及环境保护	80	78	77	82	80

在参照国家尾矿库安全标准化评定标准的基础上, 分析该尾矿库的实际特点, 结合以前安全评

价资料, 运用经验法, 确定各二级指标所对应的分级标准, 具体的标准如表 5 所示。

表 5 评价指标等级体系

Table 5 Gradation system of evaluation indexes

安全等级	非常好	较好	中等	较差	差
安全基础管理	>95	95 ~ 85	85 ~ 60	60 ~ 45	<45
尾矿坝坝体	>90	90 ~ 80	80 ~ 60	60 ~ 38	<38
排洪系统	>92	92 ~ 84	84 ~ 60	60 ~ 40	<40
水利输送系统	>88	88 ~ 78	78 ~ 60	60 ~ 36	<36
回水与水处理系统及环境保护	>72	72 ~ 70	70 ~ 60	60 ~ 35	<35

将个体样本数据与等级建立集对,通过式(1) ~ (6)进行. 计算得到的结果见表6.

表6 绝对关联度计算结果

Table 6 Calculation results of absolute correlation degree

专家评分与安全等级	联系式	x_b	x_a	x_c	Δ_{ba}	Δ_{bc}	ξ_{ba}	ξ_{bc}
Z1 与非常好	$0.441 + 0.333i + 0.221j$	0.333	0.441	0.221	0.108	0.112	0.740	0.740
Z1 与较好	$0.111 + 0.111i + 0.778j$	0.111	0.111	0.778	0	0.667	0.500	1.000
Z1 与中等	$0.443 + 0 \times i + 0.536j$	0	0.443	0.536	0.443	0.536	0.419	0.365
Z1 与较差	$0 + 0.333i + 0.667j$	0.333	0	0.667	0.333	0.334	0.333	0.500
Z1 与差	$0.220 + 0.355i + 0.766j$	0.355	0.220	0.766	0.135	0.411	0.500	0.500
Z2 与非常好	$0.331 + 0.212i + 0.444j$	0.212	0.331	0.444	0.119	0.232	0.761	0.710
Z2 与较好	$0.222 + 0.222i + 0.556j$	0.222	0.222	0.556	0	0.334	0.499	0.890
Z2 与中等	$0.221 + 0.112i + 0.661j$	0.112	0.221	0.661	0.109	0.549	0.431	0.354
Z2 与较差	$0 + 0.444i + 0.556j$	0.444	0	0.556	0.444	0.112	0.322	0.488
Z2 与差	$0 + 0.298i + 0.658j$	0.298	0	0.658	0.298	0.360	0.511	0.498
Z3 与非常好	$0.434 + 0.258i + 0.416j$	0.258	0.434	0.416	0.176	0.158	0.751	0.720
Z3 与较好	$0.110 + 0.442i + 0.442j$	0.442	0.110	0.442	0.342	0	0.481	0.510
Z3 与中等	$0 + 0.222i + 0.778j$	0.222	0	0.778	0.222	0.556	0.430	0.340
Z3 与较差	$0.111 + 0.444i + 0.445j$	0.444	0.111	0.445	0.333	0.001	0.334	0.499
Z3 与差	$0.129 + 0.310i + 0.788j$	0.310	0.129	0.788	0.181	0.478	0.488	0.458
Z4 与非常好	$0.445 + 0.222i + 0.333j$	0.222	0.445	0.333	0.223	0.111	0.748	0.569
Z4 与较好	$0 + 0.667i + 0.333j$	0.667	0	0.333	0.667	0.334	0.430	0.500
Z4 与中等	$0.101 + 0.101i + 0.778j$	0.101	0.101	0.778	0	0.677	0.491	0.330
Z4 与较差	$0.221 + 0.516i + 0.221j$	0.516	0.221	0.221	0.295	0.295	0.344	0.500
Z4 与差	$0.102 + 0.300i + 0.769j$	0.300	0.102	0.769	0.198	0.469	0.477	0.420
Z5 与非常好	$0.556 + 0.222i + 0.222j$	0.222	0.556	0.222	0.334	0	0.730	0.744
Z5 与较好	$0.113 + 0.288i + 0.577j$	0.288	0.113	0.577	0.175	0.289	0.420	0.410
Z5 与中等	$0.101 + 0.211i + 0.753j$	0.211	0.100	0.753	0.110	0.542	0.420	0.330
Z5 与较差	$0.112 + 0.520i + 0.211j$	0.520	0.112	0.211	0.408	0.309	0.332	0.450
Z5 与差	$0 + 0.210i + 0.720j$	0.210	0	0.720	0.210	0.510	0.332	0.450

根据式(7)计算加权后的绝对关联度 $r_{ba} = 0.489$, $r_{bc} = 0.531$, r_{bc} 大于 r_{ba} 说明 x_b 与 x_a 的关联程度比 x_c 低,即差异度变化与对立度变化的关联度比其与同一度变化的关联度高,表明系统有向不好的方法发展的趋势.

3.2 尾矿库安全发展趋势预测

根据 i 取值的原则将 $r_{bc} = 0.531$ 作为差异度系数 i 的量化值代入到各联系式中,得到各专家评分与最终安全等级的联系度,具体结果如表7所示.

表7 评分值与安全等级的联系度

Table 7 The connection degree of grades and safety class

安全等级	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
非常好	0.400	0.006	0.155	0.229	0.452
较好	-0.008	-0.216	-0.093	0.021	-0.110
中等	-0.112	-0.086	-0.060	-0.108	-0.140
较差	-0.490	-0.120	-0.098	0.295	0.177
差	-0.357	-0.500	-0.490	-0.507	-0.610

由于归一化联系度 μ 的取值为 $[1, -1]$, 根据“均分”原则,将联系度取值范围均分为5个子区间 $[0.600, 1.000]$ 、 $[0.200, 0.600]$ 、 $[-0.200, 0.200]$ 、 $[-0.600, -0.200]$ 和 $[-1.000, -0.600]$, 分别对应“非常好”、“较好”、“中等”、“较差”、“差”5个等级. 由表8可知联系度 μ 的取

值比重多介于区间 $[-0.200, 0.200]$ 内,说明该尾矿库的安全等级为中等,验证了 AHP 法所计算安全等级的正确性,同时介于 $[-0.600, -0.200]$ 区间的 μ 值所占比重稍微偏大,说明该尾矿库的安全状况有着向不好方向发展的趋势,证实了绝对关联度计算中差异度向对立度变化的趋势. 此状

况应引起尾矿库管理者的重视,如排水构筑物需按设计施工,以充分满足排洪能力要求,检查确认排水井无剥蚀、剥落、渗漏、裂缝,井口水面无漂浮物,对浓缩池的来矿流槽进口、溢流出口处的隔栅与挡板装置及排矿管易发生尾矿沉积的部位定期冲理,且检修部位设有照明设施等,同时需要增加安全经费的投入,加强安全管理,从根本上改变系统的安全状态,避免趋势的恶化和事故的发生。

4 结 语

a. 结合尾矿库的安全评价状况和实际特点,建立了尾矿库的安全评价指标体系,采用层次分析法确定了各项评价指标的权重,运用联系数对尾矿库进行安全评价,确定了安全等级。

b. 将基于灰色关联度的集对分析模型应用到某尾矿库的安全评价中,通过灰色理论中绝对关联度的方法,进行绝对关联度计算以分析差异度、同一度、对立度的变化趋势,取绝对关联度中绝对值较大者作为最终差异度系数 i 的量化值并带入联系式得到相关的联系度 μ ,最终得出尾矿库的安全现状,证明了此方法的适用性与可行性,为尾矿库安全评价提供了一种新的思路和方法。

c. 通过集对分析对尾矿库的安全状况发展趋势进行了预测。由于现阶段尾矿库的安全等级为中等,安全状况有由差异度向对立度转化的趋势,故需要引起相关负责人的足够重视,做好尾矿库的安全整改和日常监测工作。

d. 尾矿库安全指标的可变性表明一般安全项

可转化为安全项也可转换为不安全项,这说明了安全管理工作的的重要性,做好尾矿库的安全管理工作,不仅能保证尾矿库正常的运行,保障下游居民的生命财产安全,还可以为有关部门进行安全管理、制定相关标准提供依据。

参考文献:

- [1] 田文旗,薛剑光. 尾矿库安全技术与管理[M]. 北京:煤炭工业出版社,2006.
- [2] 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.
- [3] 王焯. 基于模糊理论的尾矿坝安全现状综合评价[D]. 济南:山东科技大学, 2010.
- [4] SAATY T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process[J]. Interfaces, 1994, 24(6): 19-43.
- [5] 尹君,王玉杰. 基于模糊层次和集对分析的尾矿库安全评价及预测[J]. 金属矿山, 2010, 412(10): 159-161.
- [6] 郑欣,许开立,李春晨. 集对分析方法在尾矿坝稳定性评价中的应用[J]. 工业安全与环保, 2008, 35(4): 72-76.
- [7] 刘思峰,党耀国,方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 3版. 北京:科学出版社,2004.
- [8] 李陶. 集对分析理论及其在水土资源系统分析中的应用[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2010.
- [9] 魏海宁. 灰色关联度方法在灾害性天气评估中的应用研究[D]. 南京信息工程大学,2011.

Safety evaluation of tailing pond based on gray relation and set pair analysis

LUO Yong, ZHOU Chun-mei, WU Yan-ling, LI Xian-fu

(School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the actual situation of safety management in tailings pond, the index system of safety evaluation was set up. With the use of AHP method to determine the value of each indicator, the safety level of tailing pond was determined by the evaluation of correlation model. The gray relation model and set pair theory were applied to compare the set pair group of b, a factor with the group of b, c factor, then the calculated absolute maximum value of quantitative correlation was qualified as the value of i . By substituting the i value in each formula, the safety class and development trend of tailing pond were established which depended on the values of each group's correlations, and the measures of rectification and strengthening were put forward according to the correlations. A new way of safety evaluation was explored in tailing pond to support safety of operation and management of tailing pond effectively.

Key words: gray relation; set pair analysis; tailing pond; safety evaluation; index system

本文编辑:龚晓宁