

层次分析法 (AHP) 在尾矿库安全运行分析中的应用

王 涛¹, 侯克鹏¹, 郭振世², 张成良¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048)

摘 要: 尾矿库是用于堆存金属非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿的场所, 是一种高势能的人造泥石流源, 一旦发生事故将会严重威胁到库区周边环境和下游居民的生命及财产安全。考虑到我国小型尾矿库数量多、安全度水平低以及尾矿库发生事故的复杂性、多样性及不确定性等特点, 根据影响尾矿库安全运行的因素建立层次结构模型, 运用 Delphi 法构造相关因素的各层次判断矩阵, 应用定性与定量相结合的层次分析法进行分析, 最后确定出各影响因素的权重并进行总排序。结果表明, 在尾矿库运行期间排洪系统对其整体安全影响最大, 其次为筑坝堆存系统、尾矿库管理与维护、回水系统和尾矿输送系统。该研究结果可以为相关单位制定合理的安全防范措施提供必要的参考价值, 从而有针对性的消除各种事故隐患, 提高安全管理水平, 确保尾矿库的安全运行。

关 键 词: 尾矿库; Delphi 法; 层次分析法; 安全运行; 影响因素

中图分类号: TD 926.4; TV 6; X 913.4

文献标识码: A

Application of analytic hierarchy process to tailings pond safety operation analysis

WANG Tao¹, HOU Ke-peng¹, GUO Zhen-shi², ZHANG Cheng-liang¹

(1. College of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. School of Water Resources and Hydroelectric Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Tailings pond is a place where is used for depositing tailings of the metal and nonmetal mine after the selecting process. It is one of the high potential energy and human-caused mud-rock flows. It will bring huge harms to the district peripheral environment and downstream inhabitant's life and property when tailings pond's paroxysmal accidents happen. In view of the quantity of small and medium-sized tailings pond, the lower safety management level, furthermore, diversified and uncertain causes during accidents, the paper has made hierarchical structure model according to the influence factors of tailings pond safety operation. Using Delphi method to construct correlation factor's judgment matrix, the combination of qualitative and quantitative analytic hierarchy process (AHP) is applied; and finally can be obtained in the weight of coefficient and arrayed in order. The analysis shows that the biggest influence factor is the expel-flood system. the second is the embankment system, manage or maintenance, back-water and transportation system. Therefore the related unit may depend on the sequences of the facility to have constituted respectively guard measure, which could supply guiding sense and reference value so as to eliminate each kind of accident hidden dangers and enhance the management level and ensure the tailings pond safety operation.

Key words: tailings pond; Delphi method; analytic hierarchy process; influencing factors; safety operation

1 引 言

尾矿库是矿业开发中必不可少的重要生产设施,其所处位置一般难以避开居民区和人口密集区,属重大危险源;一旦发生事故将会引起滑坡、泥石流等重大灾害,对库区下游人民的生命和财产造成巨危害,对环境造成严重污染。美国克拉克大学公

害评定小组的研究表明,尾矿库事故造成的危害,在世界 93 种事故、灾害和辐射隐患中名列第 18 位,它仅次于核武器爆炸、DDT、神经毒气、核辐射以及其它 13 种灾害,而比航空失事、火灾等其它 60 种灾害还要严重^[1]。据国家安监总局统计,截止 2007 年底,全国共有尾矿库 8 540 座;2001~2007 年,全国共发生尾矿库事故 43 起^[2],其中:2001 年 3

起, 2003 年 2 起, 2004 年 3 起, 2005 年 9 起, 2006 年 12 起, 2007 年 14 起。

目前, 国外对尾矿库的研究主要集中在坝体安全和环境两个方面, Kemper T^[3]等对尾矿库的污染和污染对象监测、污水治理方法和理论等方面进行了研究。国内关于尾矿库的理论研究及工程实践都是围绕坝体设计、稳定性、地震液化等展开的(对尾矿库的整体安全运行研究相对较少), 李明^[4]等人利用 ANSYS 对尾矿库进行建模、有限元分析、计算、仿真等, 然后分析尾矿库坝体稳定性; 潘建平、孔宪京、邹德高^[5]对尾矿坝地震液化稳定进行了简化分析, 提出了尾矿坝液化分析方法。

由于尾矿库的运行受多方面因素影响, 且各影响因素对尾矿库的运行有着不同的侧重, 同时很多影响因素都无法直接量化。本文旨在应用层次分析法将这些影响因素条理化、层次化, 将半定量半定性问题定量化, 从而准确、直观地反应出各影响因素之间的相互关系, 并确定出各影响因素相对重要性的权值及次序, 为相关部门进行尾矿库管理提供参考。

2 尾矿库概论

尾矿库是指在山谷口部或洼地的周围筑坝, 将金属和非金属矿山企业进行矿石选别后的尾矿或其他工业废渣排入其内进行沉淀的贮存场所, 其运行设施一般由尾矿输送系统、尾矿筑坝堆存系统、尾矿排洪系统、尾矿回水系统等组成。根据地形不同, 常见的有以下三种类型^[6];

(1) 山谷型尾矿库。山谷型尾矿库是在山谷谷口处筑坝形成的尾矿库, 见图 1。它的特点是初期坝相对较短, 坝体工程量较小; 后期管理和维护相对较容易, 当后期筑坝较高时, 可获得较大的库容, 但汇水面积较大, 排水设施工程量较大。我国大多数尾矿库属于该类型。

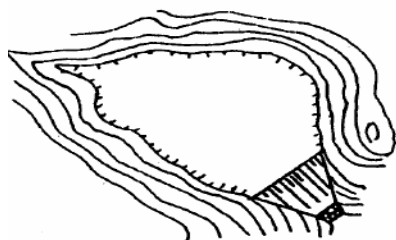


图 1 山谷型尾矿库

Fig.1 Tailing pond in the slope of valley

(2) 平地型尾矿库。平地型尾矿库是在平地四周筑坝围成的尾矿库, 见图 2。其特点是初期坝和后

期尾矿堆筑坝工程量大, 建设费用高, 维护管理较麻烦; 由于四周堆坝, 库区面积越来越小。

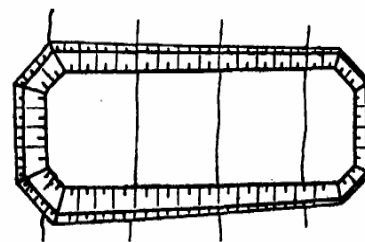


图 2 平地型尾矿库

Fig.2 Planar tailings pond

(3) 傍山型尾矿库。傍山型尾矿库是在山坡脚下依山筑坝所围成的尾矿库, 见图 3。其特点是初期坝相对较长, 初期坝和后期尾矿筑坝工程量较大, 库容较小, 管理维护相对复杂。

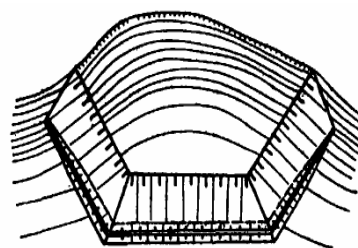


图 3 傍山型尾矿库

Fig.3 Tailing pond in the slope of hillside

3 层次分析法（AHP）及其步骤

3.1 Delphi 专家调查法

Delphi 专家调查法, 亦称德尔菲法, 是 20 世纪 40 年代美国兰德公司提出的征集专家们意见据以判断决策的一种系统分析方法, 其本质上是一种反馈匿名函询法。这种方法简单、节省费用, 能把理论知识和实践经验的各方面专家对同一问题的意见集中起来, 适用于研究资料少、未知因素多、主要靠主观判断和粗略估计来确定的问题, 是较多地用于长期预测和动态预测的一种重要的预测方法^[8]。

经典德尔菲法是对所要预测的问题征得专家的意见后, 进行整理、归纳、统计、再匿名反馈给各专家, 然后再次征求意见, 再次归纳、统计、再反馈给各专家, 直至得到稳定的意见。征求过程一般包含四轮的意见调查, 且在调查过程中包含轮与轮间的反馈, 在第四轮调查结束后, 组织者依然要将回收的调查表进行汇总整理、统计分析与预测, 并寻找出收敛程度较高的专家意见, 最后将最终的调查结果应用层次分析法进行计算。

3.2 层次分析法基本原理及计算步骤

层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, 简称 AHP) 是美国运筹学家、匹兹堡大学 T. L. Saaty 教授于 20 世纪 70 年代提出的一种定性和定量相结合的系统化、层次化分析方法。应用 AHP 解决问题的思路是: 首先, 把要解决的问题分层系列化, 即根据问题的性质和要达到的目标, 将问题分解为不同的组成因素, 按照因素之间的相互影响和隶属关系将其分层类聚组合, 形成一个递阶的、有序的层次结构模型, 然后, 对模型中每一层次因素的相对重要性, 依据人们对客观现实的判断 (通过 Delphi 专家调查法) 给予定量表示, 再利用数学方法确定每一层次全部因素相对重要性次序的权值, 最后, 通过综合计算各层因素相对重要性的权值, 以此作为评价和选择方案的依据。应用层次分析法解决问题一般包括以下 4 个步骤^[9]:

(1) 建立多级递阶层次结构模型。根据对问题的了解和初步分析, 将分析系统涉及的各要素按性质分层排列, 最简单的层次结构可分为 3 级, 第 1 级是目标层 (最高层), 该级是系统要达到的目标, 一般情况下只有一个目标, 如果有多个分目标, 可以在下一级设立一个分目标层。第 2 级是准则层 (中间层), 该级列出衡量达到目标的各项准则, 如果某些准则还需具体化, 即做进一步解释说明, 则可在下一级再设立一个准则层。第 3 级是措施层 (最低层), 该级排列了各种可能采取的方案或措施。不同层次各要素间的关系用连线表示, 如果要素间有连线, 表示二者相关, 否则表示不相关。根据层次分析法中的标度规定, 每一层中的指标数一般不超过 9 个, 元素过多会给两两比较带来困难。

(2) 构造判断矩阵。任何系统分析都是以一定的信息为基础, AHP 的信息基础主要是人们对每一层次各要素的相对重要性给出的数值判断, 所以, 判断矩阵是 AHP 的基本信息, 也是进行相对重要度计算, 进行层次单排序的依据。其方法是以上一级的某一要素 A 作为准则, 对本级的要素进行两两比较来确定判断矩阵元素的, 见表 1。

在该矩阵中, 按照左上角的准则 A , 将左侧列元素中的 B_1 与最上一行的 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_j, \dots, B_n$ 进行比较; 然后再用左侧列元素中的 B_2 与 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_j, \dots, B_n$ 进行比较, 如此类推。在比较时, 具体地使用数字标度来代表一个元素针对准则超越另一个元素的相对重要性, 数字标度定义并解释了递阶层次中每层元素针对上层准则而进行成对比较时, 两个指标哪一个更重要, 重要多少, 并按 “1-9” 标度

对重要性程度赋值, 表 2 中列出了 “1-9” 标度的含义。任何判断矩阵都应满足:

$$b_{ii} = 1; \quad b_{ij} = 1/b_{ji} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

表 1 判断矩阵
Table 1 Judgment matrix

A	B_1	B_2	B_3	$\dots$	B_j	$\dots$	B_n
B_1	1	b_{12}	b_{13}	$\dots$	b_{1j}	$\dots$	b_{1n}
B_2	b_{21}	1	b_{23}	b_{2j}	$\dots$	b_{2n}	$\dots$
B_3	b_{31}	b_{32}	1	$\dots$	b_{3j}	$\dots$	b_{3n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
B_i	b_{i1}	b_{i2}	b_{i3}	$\dots$	b_{ij}	$\dots$	b_{in}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
B_n	b_{n1}	b_{n2}	b_{n3}	$\dots$	b_{nj}	$\dots$	1

表 2 判断矩阵标度与含义
Table 2 Judgment matrix scales and meanings

标度	含义
1	B_i 比 B_j 同样重要
3	B_i 比 B_j 稍重要
5	B_i 比 B_j 重要
7	B_i 比 B_j 重要得多
9	B_i 比 B_j 极为重要
2, 4, 6, 8	B_i 比 B_j 相比, 重要性程度处于上述相应两个数之间
1/3	B_i 比 B_j 稍次要
1/5	B_i 比 B_j 次要
1/7	B_i 比 B_j 次要得多
1/9	B_i 比 B_j 极为次要

(3) 层次单排序及一致性检验。在建立了判断矩阵后, 要根据判断矩阵计算本级要素相对于上一级某一些要素来讲, 本级与之有联系的要素之间相对重要性次序的权值, 即根据判断矩阵求出其最大特征根 $\lambda_{\max}$, 然后再求出所对应的特征向量 W 。方程如下:

$$BW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

式中: W 的分量 ($W_1, W_2, \dots, W_n$) 就是对应于 n 个要素的相对重要度, 即权重系数。权重的计算方法主要有: 和积法、方根法、特征根方法、对数最小二乘法和最小二乘法等。本文采用 “和积法” 进行权重计算, 计算步骤如下^[9]:

① 将判断矩阵每一列正规化。即:

$$\bar{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{k=1}^n b_{kj}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

② 每一列经正规化后的判断矩阵按行相加。即:

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

③ 对向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n]^T$ 正规化。即:

$$W = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

所得到的 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 即为所求特征向量。

④ 计算判断矩阵最大特征根 $\lambda_{\max}$ 。即:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (6)$$

式中: $(AW)_i$ 表示向量 AW 的第 i 个分量。表示向量 AW 的第 i 个分量。

为检验判断矩阵的一致性如何, 需要计算它的一致性指标 CI , 定义

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

显然, 当判断矩阵具有完全一致性时, $CI = 0$ 。为了检验判断矩阵是否具有满足的一致性, 需要将 CI 与平均随机一致性指标 RI (如表 3 所示) 进行比较, 记为 CR 。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

当 $CR < 0.10$ 时, 判断矩阵具有满意的一致性, 否则就需要对判断矩阵进行调整。

表 3 “1-9”阶矩阵 RI 值
Table 3 The values of RI

阶数/ n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(4) 层次总排序及一致性检验。利用同一层次中所有层次单排序的结果, 计算针对上一层次而言, 本层次所有要素重要性的权值。层次总排序需要从上到下逐层顺序进行, 对于最高层下面的第二层, 其层次单排序即为总排序。为评价层次总排序计算结果的一致性, 需要计算与单排序类似的检验量。 CI 为层次总排序一致性指标; RI 为层次总排序平均随机一致性指标; CR 为层次总排序随机一致性比例。各表达式分别为

$$CI = \sum_{i=1}^n B_i CI_i \quad (9)$$

式中: CI_i 为与 B_i 对应的 B 层次中判断矩阵的一致

性指标; B_i 为判断矩阵 $A-B$ (即第一层与第二层目标组成的判断矩阵) 计算所得的向量经正规化后的特征向量 W 的值。

$$RI = \sum_{i=1}^n B_i RI_i \quad (10)$$

式中: RI_i 为与 B_i 对应的 B 层次中判断矩阵的平均随机一致性指标。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

同样, 当 $CR < 0.10$ 时, 认为层次总排序的计算结果具有满意的一致性。

4 层次分析法在尾矿库安全运行分析中的应用

4.1 工程实例

某尾矿库位于秦岭南坡山区, 三面靠山, 一面筑坝, 属山谷型尾矿库, 库区无滑坡、泥石流、管涌等不良地质现象, 岸坡稳定, 水土保持较好。

该尾矿库初期坝为堆石透水坝, 坝高 40.5 m, 坝顶长 115 m, 坝顶宽 4.0 m, 坝底宽 157.50 m, 上游坡比 1:1.7, 下游坡比 1:2.0。后期堆筑坝采用上游法堆筑 (用推土机或人工将滩面尾矿堆筑而成), 设计外坡比 1:5.0, 分期逐级堆筑子坝, 每期高度 3.0 m, 台阶宽度 8.0~11.0 m, 顶宽 3.5 m, 外坡比为 1:1.5, 在子坝顶布设尾矿管道进行分散放矿, 尾矿分级沉积, 形成沉积滩。

该尾矿库堆存的尾矿是经五级泵站扬送至坝顶进行分散放矿, 沿途泵站建有尾矿事故池及事故返砂泵、尾矿输送自流管桥、靠近尾矿库建有新、老放矿流槽, 流槽接坝顶的放矿主管; 回水系统原采用浮船泵站进行扬水, 现采用隧洞自流回水, 自流回水系统由进水塔、斜槽、输水隧洞和输水管组成; 尾矿库的老排洪系统设于库的左岸, 由两座排洪井及排洪斜槽、排洪涵管、排洪隧洞组成; 随着库内水位的逐渐升高, 新修建的排洪系统由竖井和排洪隧洞组成。

4.1 建立递阶层次模型

根据尾矿库的实际工况, 首先将尾矿库安全运行作为第 1 级层次 (即最高层), 然后将所涉及的相关影响因素进行分层, 第 1 级层次包括 5 个因素, 即 $A = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5\}$; 第 2 级层次包括 16 个因素, 即 $B_1 = \{b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}\}$, $B_2 = \{b_{21}, b_{22}, b_{23}\}$, $B_3 = \{b_{31}, b_{32}, b_{33}\}$, $B_4 = \{b_{41}, b_{42}\}$, $B_5 = \{b_{51}, b_{52}, b_{53}\}$, 如图 4 所示。

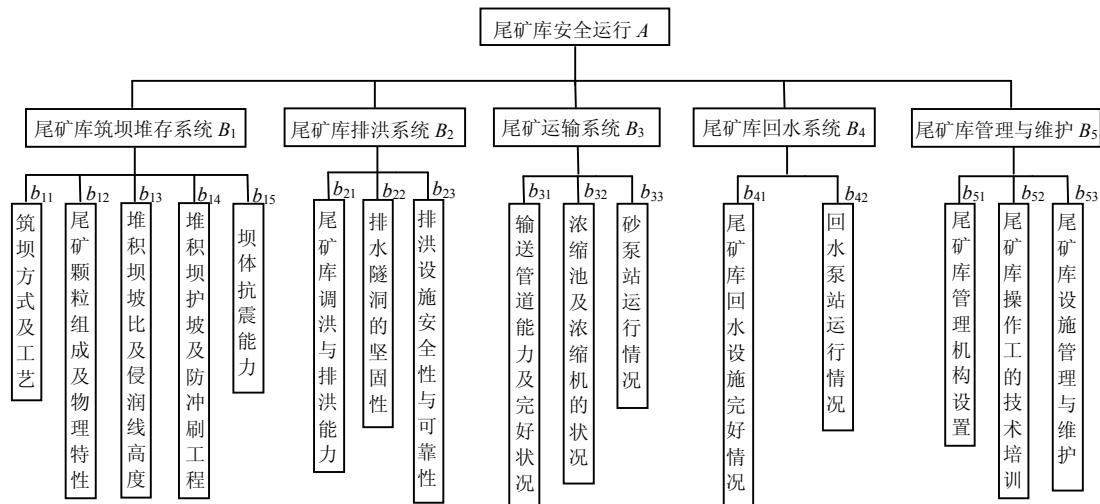


Fig.4 Hierarchical structure model for the tailings pond safety operation

4.3 构造判断矩阵、计算各指标值

按照图4表示的层次结构模型，通过两两比较下一层次诸因素对上一层次某元素的相对重要性，并赋予一定的分值（采用1-9阶标度法赋值），建立上下层次之间的隶属关系构造判断矩阵（见表4~9），并用“和积法”计算相应的权重，然后做一致性检验。

表4 判断矩阵A-B数值表
Table 4 Judgment matrix for A-B

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	W	指标
B ₁	1	1/2	3	3	2	0.25	$\lambda_{\max} = 5.13$
B ₂	2	1	6	3	2	0.33	
B ₃	1/3	1/6	1	1	1	0.08	CI = 0.033
B ₄	1/3	1/3	1	1	1	0.24	RI = 1.12
B ₅	1/2	1/2	1	1	1	0.10	CR = 0.029 < 0.10

表中各指标值计算过程如下（以下各表中的指标值方法类同）：

① 按照公式（3）计算，得到按列正规化后的判断矩阵：

$$\begin{bmatrix} 0.24 & 0.20 & 0.25 & 0.33 & 0.29 \\ 0.48 & 0.40 & 0.50 & 0.33 & 0.29 \\ 0.08 & 0.07 & 0.08 & 0.11 & 0.14 \\ 0.08 & 0.13 & 0.08 & 0.11 & 0.14 \\ 0.12 & 0.20 & 0.08 & 0.11 & 0.14 \end{bmatrix} \quad (12)$$

② 按照公式（4）。将各行相加，得：

$$\left. \begin{aligned} \bar{W}_1 &= \sum_{j=1}^n \bar{b}_{1j} = 0.24 + 0.20 + 0.25 + 0.33 + 0.29 = 1.31 \\ \bar{W}_2 &= 0.48 + 0.40 + 0.50 + 0.33 + 0.29 = 2.00 \\ \bar{W}_3 &= 0.08 + 0.07 + 0.08 + 0.11 + 0.14 = 0.48 \\ \bar{W}_4 &= 0.08 + 0.13 + 0.08 + 0.11 + 0.14 = 0.54 \\ \bar{W}_5 &= 0.12 + 0.20 + 0.08 + 0.11 + 0.14 = 0.65 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

③ 按公式（5）将向量 $\bar{W} = [1.31 \ 2.00 \ 0.48 \ 0.54 \ 0.65]^T$ 正规化，得：

$$\sum_{j=1}^n \bar{W}_j = 1.31 + 2.00 + 0.48 + 0.54 + 0.65 = 4.98 \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \frac{\bar{W}_1}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} = \frac{1.31}{4.98} = 0.26 \\ W_2 &= 0.40 \quad W_3 = 0.10 \\ W_3 &= 0.11 \quad W_5 = 0.13 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

则所求特征向量

$$W = [0.26 \ 0.40 \ 0.10 \ 0.11 \ 0.13]^T \quad (16)$$

④ 按照公式（6）计算判断矩阵的最大特征根

$\lambda_{\max}$ ：

$$AW = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 3 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 6 & 3 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.26 \\ 0.40 \\ 0.10 \\ 0.11 \\ 0.13 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} (AW)_1 &= 1 \times 0.26 + \frac{1}{2} \times 0.40 + 3 \times 0.10 + 3 \times 0.11 + 2 \times 0.13 = 1.35 \\ (AW)_2 &= 2.11 \quad (AW)_3 = 0.49 \\ (AW)_4 &= 0.56 \quad (AW)_5 = 0.67 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} = \frac{(AW)_1}{5W_1} + \frac{(AW)_2}{5W_2} + \frac{(AW)_3}{5W_3} + \frac{(AW)_4}{5W_4} + \frac{(AW)_5}{5W_5} =$$

$$\begin{aligned} & \frac{1.35}{5 \times 0.26} + \frac{2.11}{5 \times 0.40} + \frac{0.49}{5 \times 0.10} + \\ & \frac{0.56}{5 \times 0.11} + \frac{0.67}{5 \times 0.13} = 5.13 \end{aligned} \quad (19)$$

⑤ 按照公式（7）、（8）进行一致性检验：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5.13 - 5}{5 - 1} = 0.033 \quad (20)$$

$$RI = 1.12$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.033}{1.12} = 0.029 < 0.10 \quad (21)$$

可见判断矩阵具有满意的一致性。

表 5 判断矩阵 B_1-b 数值表
Table 5 Judgment matrix for B_1-b

B_1	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{44}	b_{55}	W	指标
b_{11}	1	2	1/2	3	1/2	0.25	$\lambda_{\max} = 5.13$
b_{22}	1/2	1	1/3	1	1/3	0.33	$CI = 0.028$
b_{33}	2	3	1	3	1	0.08	$RI = 1.12$
b_{44}	1/3	1	1/3	1	1/2	0.24	$CR = 0.025 < 0.10$
b_{55}	2	3	1	2	1	0.10	

表 6 判断矩阵 B_2-b 数值表
Table 6 Judgment matrix for B_2-b

B_2	b_{21}	b_{22}	b_{33}	W	指标
b_{21}	1	7	4	0.70	$\lambda_{\max} = 5.11$
b_{22}	1/7	1	1/3	0.10	$CI = 0.028$ $RI = 1.12$
b_{33}	1/1	3	1	0.21	$CR = 0.025 < 0.10$

表 7 判断矩阵 B_3-b 数值表
Table 7 Judgment matrix for B_3-b

B_3	b_{31}	b_{32}	b_{33}	W	指标
b_{31}	1	2	1/2	0.31	$\lambda_{\max} = 3.06$
B_{32}	1/2	1	1/2	0.20	$CI = 0.030$ $RI = 0.58$
b_{33}	2	2	1	0.49	$CR = 0.025 < 0.10$

表 8 判断矩阵 B_4-b 数值表
Table 8 Judgment matrix for B_4-b

B_4	b_{41}	b_{42}	W	指标
b_{41}	1	2	0.50	$\lambda_{\max} = 2.00$
b_{42}	1	1	0.50	$CI = 0.030$ $RI = 0.00$
				$CR = 0 < 0.10$

表 9 判断矩阵 B_5-b 数值表
Table 9 Judgment matrix for B_5-b

B_5	b_{51}	b_{52}	b_{53}	W	指标
b_{51}	1	2	1/2	0.30	$\lambda_{\max} = 3.02$
b_{52}	1/2	1	1/3	0.16	$CI = 0.01$ $RI = 0.58$
b_{53}	2	3	1	0.54	$CR = 0.017 < 0.10$

4.4 层次总排序及一致性检验

按照公式（9）、（10）分别计算 CI 和 RI ，并按照公式（11）进行总排序的一致性检验：

$$\begin{aligned} CI &= \sum_{i=1}^5 B_i CI_i = 0.26 \times 0.028 + 0.40 \times 0.025 + \\ & 0.10 \times 0.030 + 0.11 \times 0 + 0.13 \times 0.010 = 0.0073 + \\ & 0.010 + 0.0033 + 0 + 0.0013 = 0.0219 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} RI &= \sum_{i=1}^5 B_i RI_i = 0.26 \times 1.12 + 0.40 \times 0.58 + \\ & 0.10 \times 0.58 + 0.11 \times 0 + 0.13 \times 0.58 = 0.2912 + \\ & 0.2320 + 0.0580 + 0 + 0.0754 = 0.6566 \end{aligned} \quad (23)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0219}{0.6566} = 0.033 < 0.10 \quad (24)$$

可见层次总排序结果同样具有满意的一致性。

表 10 各层元素对目标层的权重
Table 10 The weight of each element for target stratum

层次 b	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	权值	排序
	0.26	0.40	0.10	0.11	0.13		
b_{11}	0.20	/	/	/	/	0.052	7
b_{12}	0.10	/	/	/	/	0.026	13
b_{13}	0.31	/	/	/	/	0.081	3
b_{14}	0.11	/	/	/	/	0.029	12
b_{15}	0.29	/	/	/	/	0.075	4
b_{21}	/	0.70	/	/	/	0.280	1
b_{22}	/	0.10	/	/	/	0.040	9
b_{23}	/	0.21	/	/	/	0.084	2
b_{31}	/	/	0.31	/	/	0.031	11
b_{32}	/	/	0.20	/	/	0.020	15
b_{33}	/	/	0.49	/	/	0.049	8
b_{41}	/	/	/	0.50	/	0.055	6
b_{42}	/	/	/	0.50	/	0.055	6
b_{51}	/	/	/	/	0.30	0.039	10
b_{52}	/	/	/	/	0.16	0.021	14
b_{53}	/	/	/	/	0.54	0.070	5

4.5 结果分析与讨论

由于在影响因素两两比较时，存在一定的主观性，权重系数可能随着专家的侧重点不同而发生变化，根据上述计算结果可知，按照尾矿库设施构成将影响尾矿库安全运行的因素排序为：排洪系统（权重为 0.40）>尾矿堆存系统（权重为 0.26）>尾矿管理与维护（权重为 0.13）>回水系统（权重为 0.11）>尾矿输送系统（权重为 0.10）；按照各构成设施系统包括的子系统影响作用排序为：尾矿库排洪和调洪能力（权重为 0.028）>排洪设施的安全性和可靠性（权重为 0.084）>尾矿坝内坡排渗及浸润线高度（权重为 0.081）>坝体抗震能力（权重为 0.075）>尾矿库设施管理与维护（权重为 0.070）>回水设施完好情况及回水泵站运行情况（权重同为 0.55）>筑坝方式及工艺（权重为 0.52）>砂泵站运行情况（权重为 0.049）>排水隧洞的坚固性（权重为 0.40）

>尾矿库管理机构设置(权重为 0.039)>输送管道能力及完好情况(权重为 0.031)>堆积坝坡比及防冲刷(权重为 0.029)>尾矿颗粒组成及物理特性(权重为 0.026)>尾矿操作工的技术培训(权重为 0.021)>浓缩池及浓缩机的状况(权重为 0.020)。

综上所述,在尾矿库的生产运行期间,首先要保障的是排洪系统的安全运行,其中排洪和调洪能力是主要因素,因为尾矿库调洪能力或排洪能力不足时,安全超高和库内干滩长度将不能满足要求,容易造成溃坝事故;其次是尾矿筑坝堆存系统,其中坝体内坡排渗及浸润线高度是主要因素,因为尾矿库坝体浸润线过高,坝体抗滑稳定性不足,导致坝体失稳;然后是尾矿库的管理与维护,在我国一些小型尾矿库存在不根据正规设计施工,不按照规程操作管理,基本没有防洪、排渗等安全设施等违规现象,为杜绝尾矿库安全事故的发生,尾矿设施的管理与维护显得极其重要,“三分设计,七分管理”充分说明这一点。

5 结 论

尾矿库是一个多系统的复杂工程,而系统中又包含众多子系统,且各子系统之间相互作用、相互影响,使得各变量之间的关系相对复杂。因此,根据科学性、系统性和实用性的原则,结合尾矿库安全运行受多因素影响的实际特点,运用不确定层次分析法对尾矿库的安全运行进行分析研究,确定各影响因素的权重,其分析结果与尾矿库的实际运行情况基本相符。因此,在应用层次分析法对尾矿库的安全运行状况分析时,将各影响因素进行排序并

确定各因素所起作用的比重,可以提高尾矿库安全管理的针对性和有效性,同时也促使企业相关部门在尾矿库日常管理和定期安全巡视、检查工作中有侧重点地进行,防患于未然,真正做到“安全第一,预防为主,综合治理”,确保尾矿库的安全运行。

参 考 文 献

- [1] 王凤江. 国外尾矿坝事故调查分析[J]. 金属矿山, 2004, 8(增刊): 49—52.
- [2] 国家安全生产监督管理总局. 2007 年年全国非煤矿山事故分析[EB/OL]. [http:// www. Chinasafety. gov. cn](http://www.Chinasafety.gov.cn)
- [3] KEMPER T, SOMMER S. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(12): 2 742—7 471.
- [4] 李明, 胡乃联, 于芳, 等. ANSYS 软件在尾矿坝稳定性分析中的应用研究[J]. 金属矿山, 2005, (8): 56—59.
- [5] 潘建平, 孔宪京, 邹德高. 尾矿坝地震液化稳定的简化分析[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1 224—1 229.
- [6] 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.
- [7] 王涛, 郭振世. 尾矿库的危险有害因素辨识及安全管理措施[J]. 黄金, 2008, 29(4): 51—55.
- [8] 田军, 张朋柱, 王刊良, 等. 基于德尔菲法的专家意见集成模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2004, (1): 57—62, 69.
- [9] 胡保生, 彭勤科. 系统工程原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.