

基于 FAHP 模糊层次综合评价模型的小型水库安全评价

王天宝¹, 马丽君², 王雪峰²

(1.潍坊市坊子区防汛抗旱中心, 山东 潍坊 261200; 2.潍坊市坊子区水利事业发展中心, 山东 潍坊 261200)

【摘要】通过对传统的模糊综合评价法进行改进,引入层次分析法确定指标权重,定义有效度和隶属等级增加了适用范围,建立了模糊层次评价模型。将该模型应用于潍坊市蒋家水库的安全评价中,评价结论为“病变”,符合水库运行现状。

【关键词】蒋家水库;安全评价;模糊评价;层次分析法

【中图分类号】TV697

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-02-0054-04

Safety Evaluation of Small Reservoirs Based on FAHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation Model

WANG Tianbao¹, MA Lijun², WANG Xuefeng²

(1. Flood Control and Drought Relief Center of Fangzi District, Weifang Municipality, Weifang, Shandong 261200, China;

2. Water Resources Affairs Development Center of Fangzi District, Weifang Municipality, Weifang, Shandong 261200, China)

Abstract: An improved fuzzy comprehensive evaluation method is adopted by introducing the Analytic Hierarchy Process (AHP) to determine index weights, and defining effectiveness and membership grades to expand the application scope, thus establishing a fuzzy hierarchical evaluation model. The model is applied to the safety evaluation of Jiangjia Reservoir in Weifang Municipality, and the evaluation conclusion is "diseased", which is consistent with the actual operation status of the reservoir.

Key words: Jiangjia Reservoir; Safety evaluation; Fuzzy evaluation; Analytic Hierarchy Process

我国传统的水库大坝安全评价主要是以《水库大坝安全评价导则》(SL 258—2017)为依据对水库安全进行定性评价,因其无法定量决策导致在实际运用中存在一定局限性^[1]。多年来,众多学者针对水库安全评价进行了大量研究,层次分析法^[2]、模糊综合评价法^[3]、熵权法、可拓物元法等多种评价方法被先后应用于水库安全评价工作中。

文章基于传统水库安全评价研究的基础上,对传统模糊综合评价法进行改进,通过引入有效度修正最大隶属度^[4],利用层次分析法确定权重系数,建立了 FAHP 模糊层次综合评价模型,实现了小型水库安全评价的准确量化。

1 评价模型构建

1.1 评价指标选取和权重计算

根据水库安全评价的影响因素,结合小型水

库结构简单等特点,选取水库安全评价作为目标层,工程质量、运行管理安全、防洪安全、结构安全、渗流安全等 5 项指标作为一级指标,再对一级指标进行逐项分析,细化要素分类建立二级指标层。工程质量(A1)包括挡水建筑物质量(B1)、泄水建筑物质量(B2)、其他建筑物质量(B3);运行管理(A2)包括水库安全监测设施(B4)、水库维修保养(B5),水库除险加固(B6)、人员配置(B7);防洪安全(A3)包括防洪标准(B8)、泄洪能力(B9),坝顶超高(B10);结构安全(A4)包括大坝结构安全(B11)、溢洪道结构安全(B12)、害堤动物防治(B13);渗流安全(A5)包括变形稳定性(B14)、渗透性(B15)。

在层次递阶结构的基础上,对各层次要素指

收稿日期:2025-09-12

作者简介:王天宝(1995—),男,工程师

标进行专家问卷调查,对同一阶层的要素进行两两比较,引入1~9重要性指标值(表1)进行转化判断,得到准则层判断矩阵 $A=\{a_{ij}\}_{n \times n}$, $(i,j=1 \sim n)$,从目标层 O 分析准则层要素 a_{ij} 在要素 A_j 中的权重位置;同理,建立二级指标层判断矩阵 $B=\{b_{ij}\}_{m \times m}$, $(i,j=1 \sim m)$,从准则层 A 分析措施层要素 b_{ij} 在要素 B_j 中的权重位置,确定各层相关重要程度及各因子权重值。

表1 水库安全评价重要性标度量化值

i 较 j 相对重要性	得分
同等重要	1
较为重要	3
非常重要	5
极端重要	7
绝对重要	9
介于两标度之间的中间值	2,4,6,8

注:若*i*较*j*的相对重要性与表1相反,则得分为倒数。

为避免出现逻辑性错误,引入一致性比率 CR ,当 $CR < 0.1$ 时,通过一致性校验。

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

式中: CI 为一致性指标; RI 为平均一致性指标; λ_{max} 为最大特征值; n 为矩阵阶数。

1.2 模糊评价模型构建

建立集合 U 为水库安全评价的指标集, $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, $u_i(i=1, 2, \dots, n)$ 为水库安全评价指标因子,建立集合 V 为水库安全评价的评语集, $V=\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, $V_i(i=1, 2, \dots, n)$ 为水库安全评价的评价等级。定义 r_{ij} 表示第*i*种评价指标可以被评价为第*j*等级的可能性,建立*i*对*j*的隶属度评价矩阵 $R(r_{ij})$ 。

$$R(r_{ij}) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{m2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

水库安全评价主要是定性描述,缺乏隶属度计算方法,本文对隶属度精度要求为高于极端性 $\{0, 1\}$ 即可,故采取专家经验法^[9]确定隶属度。由于指标集 U 中各评价指标对水库安全评价中的作用、地位均不一样,依据确定的各评价指标权重建立权重集 W ,通过复合运算将权重集与总体评价矩阵结合,得到模糊综合评价结果矩阵 O :

$$O = W \odot R = \{O_1, O_2, \dots, O_m\} \quad (3)$$

式中: $W=(W_1, W_2, \dots, W_n)$, $\sum_{i=1}^n W_i=1$;" \odot "表示模糊合成算子。

根据最大隶属度原则, α 取 $\max \{O_j\}(j=1, 2, \dots, n)$ 即为水库安全评价等级。当综合评价矩阵 O 中有两个及以上隶属度非常接近时,会导致最大隶属度原则不能准确反映实际情况,导致评价结论出现偏差,为解决该问题,引入最大隶属度原则的有效度 aw 。

$$aw = \frac{n\alpha - 1}{2\beta(n-1)} \quad (4)$$

式中: n 表示综合评价矩阵 O 中元素的数量; α 表示最大隶属度; β 表示次隶属度。

当 $aw \geq 0.5$ 时,认为最大隶属度有效,可直接应用最大隶属度原则判断水库安全等级;当 $aw < 0.5$ 时,最大隶属度原则低效,采用加权平均原则计算隶属等级 s ,以隶属等级判断水库安全等级。

$$s = \frac{\sum_{j=1}^m a_j^k j}{\sum_{j=1}^m a_j} \quad (5)$$

式中: s 表示隶属等级; a_j^k 表示评价对象在第*j*等级下的隶属度; k 为常数,取1.5。

2 评价应用实例

2.1 研究对象概况

蒋家水库位于潍坊市坊子区坊城街道,是以防洪和灌溉功能为主的小(1)型水库,总库容105.7万 m^3 ,保护下游2000人口及133.33 hm^2 耕地,主要包括大坝和溢洪道两部分,大坝为均质土坝,最大坝高7.8m,坝长80m,兴利水位59.30m,上游边坡坡比1:2.0。溢洪道为敞开式,总长395m,堰顶高程56.59m,溢洪道内设立24m,高3m的橡胶坝一座,橡胶坝前后设计水位差3m。

2.2 评价因素指标权重确定

采取专家评分的方式分层确定评价指标权重,组织5名专家分别对准则层(A)各因素进行重要性两两比较,建立判断矩阵,见表2。

对表2进行归一化处理计算可得一级指标层的权重矩阵: $W_o=(0.06, 0.13, 0.23, 0.40, 0.18)$,根据式(1)计算得到 λ_{max} 值为5.22, CR 值为 $0.048 < 0.1$,通过一致性检验。同理,对二级指标层

表2 一级指标判断矩阵

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
A ₁	1	1/3	1/4	1/4	1/4
A ₂	3	1	1/3	1/4	1
A ₃	4	3	1	1/2	4
A ₄	4	4	2	1	3
A ₅	4	1	1	1/3	1

各要素建立各自判断矩阵,校验一致性通过后得到各评价指标权重,见表3。

2.3 水库安全评价

结合《导则》将小型水库安全评价结论定义为水库健康程度^[3],以水库健康程度表征水库安全情况,分为I~V级,描述为非常健康、较为健康、基本健康、病变、严重病变,以病变(IV级)及

表3 各评价指标权重

决策层	一级指标层	权重	CR	二级指标层	分层权重	总权重	CR
O 水库安全评价	A1 工程质量	0.06	0.048	B1 挡水建筑物质量	0.52	0.20	0.026
				B2 泄水建筑物质量	0.39	0.15	
				B3 其他建筑质量	0.09	0.04	
	A2 运行管理安全	0.13		B4 安全监测设施	0.09	0.02	
				B5 水库维修养护	0.28	0.07	
				B6 水库除险加固	0.54	0.13	
				B7 人员配置	0.09	0.02	
	A3 防洪安全	0.23		B8 防洪标准	0.49	0.10	
				B9 泄洪能力	0.31	0.06	
				B10 坝顶超高	0.20	0.04	
	A4 结构安全	0.40		B11 大坝结构	0.43	0.05	
				B12 溢洪道结构	0.43	0.05	
				B13 害堤动物防治	0.14	0.02	
	A5 渗流安全	0.18		B14 变形稳定性	0.67	0.04	
				B15 渗透性	0.33	0.02	

以下评级对应水库安全鉴定的“三类坝”结论,建立评价指标标准,见表4。

采取专家打分法,选取5名专家对二级指标层15个指标进行逐项打分,分别建立5项一级指标的评价矩阵。

$$R(A_1) = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R(A_2) = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0 & 0.2 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R(A_3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R(A_4) = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R(A_5) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据公式(3),计算得一级判断矩阵(式11)和水库安全评价矩阵(式12),为充分发挥各要素控制作用,本次计算算子“⊙”作为矩阵乘法进行运算。

$$R(O) = O(A) = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.18 & 0.42 & 0.30 & 0 \\ 0.33 & 0.51 & 0.04 & 0.07 & 0.06 \\ 0.20 & 0 & 0.68 & 0.12 & 0 \\ 0.08 & 0.23 & 0.26 & 0.43 & 0 \\ 0.75 & 0.22 & 0.17 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$O = \{0.26 \ 0.21 \ 0.32 \ 0.23 \ 0.01\} \quad (12)$$

根据最大隶属度原则,α即max{O_j}为0.32,按照传统模糊综合评价法,蒋家水库安全评价等级为Ⅲ级,处于基本健康的安全状态。次要隶属度β为0.26,有效度aw为0.28<0.5,直接按照最大隶属度原则将蒋家水库安全情况评价为Ⅲ级是不准确的。根据公式(5),计算得隶属等级s值为3.87,介于[3,4]之间更接近4,故蒋家水库安全评价结论为IV级,处于不安全病变状态,与规范法鉴定的“三类坝”(病变)的结论吻合;工程质量

表4 小型水库安全评价指标标准

目标	一级指标	二级指标	评价标准				
			V ₁ 非常健康	V ₂ 较为健康	V ₃ 基本健康	V ₄ 病变	V ₅ 严重病变
O 小型 水库安 全评价	A1	B1	质量良好	质量合格	质量基本合格	存在质量问题	存在严重质量问题
		B2	质量良好	质量合格	质量基本合格	存在质量问题	存在严重质量问题
		B3	质量良好	质量合格	质量基本合格	存在一质量问题	存在严重质量问题
	A2	B4	设施完善	设施较为完善	设施基本完善	能满足部分要求	无检测设施
		B5	定期维修养护, 成效好	定期维修养护, 成效较好	出现隐患能 及时维修养护	能开展维修养 护消除部分隐患	未开展维修养护
		B6	消除全部隐患	基本消除隐患	消除部分隐患	基本未消除隐患	存在病险,未除险加固
		B7	齐备专业人 员规范管理	齐备较专业人员, 管理较规范	人员齐备,基 本按规范管理	人员齐备, 管理不规范	人员不齐全, 管理不规范
	A3	B8	p=0.01	p=0.02	p=0.033	p=0.05	p=0.01
		B9	正常泄洪,无隐患	正常泄洪, 无明显隐患	正常泄洪, 无严重隐患	存在严重隐患	泄洪设施基 本无法运行
		B10	满足校核工况	满足设计工况	满足正常工况	基本满足 正常工况	不满足正常工况
	A4	B11	结构完好,非常安全	结构完好,基本安全	结构无异常, 基本满足要求	部分结构异常	严重结构异常,不安全
		B12	结构完好,非常安全	结构较完好, 基本安全	结构基本完好, 能满足要求	结构异常,存在 部分行洪阻碍	结构严重异常, 基本无法行洪
	A5	B13	系统开展, 无隐患风险	较系统开展, 基本无风险	未开展防治, 基本无风险	未开展防治, 存在一定风险	未开展防治, 存在严重风险
		B14	≥1.35	≥1.3	≥1.25	≥1.2	<1.2
		B15	无渗流	轻微渗流	正常渗流	存在漏水点	严重渗漏

评价和结构安全评价为Ⅳ级,处于病变状态。水库现状为溢洪道橡胶坝及坝基存在严重漏水,无法满足控制运用要求;溢洪道出水渠弯道段存在水毁,大坝校核水位高程以上部分坝坡未护砌,分

级评价结论完全符合水库运行实际情况,见表5。

4 结语

对蒋家水库安全评价中应用了改进后的模

表5 蒋家水库安全评价结论对照表

	水库安全鉴定评级	传统模糊评价评级	改进的模糊层次 综合评价评级	最大隶属度	有效度	隶属等级
总体评价	C(三类坝)	Ⅲ	Ⅳ	0.34	0.28	3.87
工程质量评价	基本合格	Ⅳ	Ⅳ	0.42	0.46	4.36
运行安全评价	较规范	Ⅱ	Ⅱ	0.51	0.59	/
防洪安全评价	B	Ⅲ	Ⅲ	0.68	1.49	/
结构安全评价	C	Ⅳ	Ⅳ	0.43	0.56	/
渗流安全评价	A	Ⅰ	Ⅰ	0.75	1.57	/

糊层次评价模型,结果表明蒋家水库评价等级为Ⅳ级,处于不安全的病变状态,在工程质量和结构安全两个方面存在风险隐患,需尽快采取工程措施实施除险加固,对溢洪道橡胶坝进行修复,完善大坝迎水坡和溢洪道岸坡护砌,提升建筑物质量,更好地发挥水库防汛兴利作用。

参考文献

[1] 郭维维. 改进层次模糊分析法在水库大坝安全评价中的应

用[J].水利水电快报,2020,41(8):63-67.

[2] 王硕,沈振中,张文兵,等.一种分析大坝安全状况的改进变权层次分析法[J].水利水电科技进展,2022,42(3):97-103.

[3] 徐青青.基于GAHP-模糊综合评价法的长沙市开福区小型水库安全评价[D].长沙:长沙理工大学,2022.

[4] 尹会永,赵涵,徐琳,等.岩体质量分级的改进模糊综合评价法[J].金属矿山,2020(7):53-58.

(责任编辑 崔春梅)