

一种分析大坝安全状况的改进变权层次分析法

王 硕¹, 沈振中^{1,2}, 张文兵^{1,2}, 孙一清^{1,2}, 姬 阳¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:为适应大坝安全评价对复杂指标体系和多元评价主体的要求,降低传统变权层次分析法对均衡系数取值的主观性和盲目性缺陷对评价结果的客观性和真实性的影响,提出了一种改进均衡系数的变权 AHP。以马庙水库工程为实例,比较分析了传统变权 AHP 和改进变权 AHP 求出的二级指标的变权权重以及一级指标和总目标的模糊综合得分。结果表明:改进变权 AHP 可以避免传统变权 AHP 对各项二级指标均衡系数的独立赋值所导致的“状态失衡”问题,并且可适当削弱因赋予各项二级指标相同均衡系数所带来的盲目性,提高了评价结果与水库安全现状的贴合程度;评价结果与专家组所得结论一致,证明了本文方法的可靠性。

关键词:大坝安全评价;层次分析法;变权权重;状态变权向量;均衡系数

中图分类号:TV641.2⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)03-0097-07

An improved variable weight analytic hierarchy process for dam safety analysis//WANG Shuo¹, SHEN Zhenzhong^{1,2}, ZHANG Wenbing^{1,2}, SUN Yiqing^{1,2}, JI Yang¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to meet the requirements of complex index system and multiple evaluation subjects for reservoir safety evaluation, and to reduce the influence of the subjectivity and blindness of traditional variable weight AHP equilibrium coefficient on the objectivity and authenticity of the evaluation results, a variable weight AHP with improved equilibrium coefficient was proposed. Through the application to the Mamiao Reservoir project, the variable weight of secondary indicators and the fuzzy comprehensive score of primary indicators and overall objectives calculated by traditional variable weight AHP and improved variable weight AHP were compared and analyzed. The results show that the improved variable weight AHP can avoid the problem of state imbalance caused by the independent assignment of the equilibrium coefficient of each secondary index by the traditional variable weight AHP, and the blindness caused by giving the same equilibrium coefficient to each secondary index is appropriately weakened. The fit between the evaluation result and the current situation of reservoir safety is improved. The evaluation results are consistent with the conclusions of the expert group, which shows the reliability of the method in this paper.

Key words: dam safety evaluation; analytic hierarchy process; variable weight; state variable weight vectors; equilibrium coefficient

水库事关经济社会发展和民生保障,对防洪、供水、发电和生态等具有重要支撑性作用。我国是水资源开发利用大国,现有水库 9.8 万多座,总库容 8 983 亿 m³,中小型水库占比约 95%,绝大多数水库修建于 20 世纪 50—70 年代,受当时施工技术、人员素质和经济水平等因素制约,经历了 50 多年的运行,部分水库出现了不同程度的病情、险情,面临一定的溃坝风险。而水库溃坝事故,会给河道下游人

民群众的生命财产安全和区域经济的发展带来不利影响。因此,开展老旧和病险水库的定期安全评价和鉴定工作,及时、尽早地发现水库现状存在的安全隐患,对保障水库的安全运行以及维护社会的长治久安具有重要的现实意义。

目前水库大坝的安全评价方法如结构安全系数法^[1-2]、模糊综合评价法^[3-4]、层次分析法^[5-6]等已被众多学者应用到实际工程中,并取得了良好的效果。

相较于传统层次分析法(AHP),变权层次分析法是近些年来发展较为迅速的一种较为新颖的系统安全评价方法,该方法由汪培庄^[7]首次提出,之后以李洪兴教授为代表的一些专家学者给出了处罚型、激励型与混合型的变权公理化体系以及基于状态变权向量和均衡函数等概念的多目标决策方法^[8-12],该方法计算过程简便且工程适用性强,目前已被应用于尾矿库的溃坝风险评价中^[13-14]。

对于基于状态变权向量和均衡函数的传统变权AHP而言,合理确定二级指标的变权权重的关键在于均衡系数的科学选取,然而传统变权AHP是由决策者根据工程经验对二级指标的均衡系数进行赋值,存在一定的主观性和盲目性,并且这种缺陷很难完全避免,因此探究如何降低主观性和盲目性对水库安全评价结果的客观性和真实性的影响是一项值得研究的课题。据此,本文提出一种改进均衡系数取值方法,构造一种分析大坝安全状况的改进变权层次分析法,并通过马庙水库安全评价来验证所提方法的可靠性,以期为大坝安全评价提供参考。

1 改进变权层次分析法

AHP是由美国运筹学家 Saaty 提出的一种针对复杂问题、定性定量相结合的系统分析与决策方法,但因其构建在因素固定权重体系上,可能会导致反映系统要素间相互作用机理的少数特定方案复合排序方法失效^[15]。相较AHP,变权AHP强调因素权重应随状态值变化而变化,可以避免固权AHP模型的失效问题,从而可以更好地反映复杂系统的非线性、涌现性和动态性等本质特征,能够有效提高AHP评价决策方案的科学性^[16],因此更加适应水库安全评价对复杂指标体系和多元评价主体的要求。

本文对传统变权AHP中均衡系数取值方法加以改进,提出的一种改进的变权层次分析法,该方法结合常权权重、状态变权向量和均衡函数求得各项二级指标的变权权重。

1.1 变权综合决策模型

针对多目标决策问题,汪培庄^[17]提出了变权综合决策模型:

$$Z = \sum_{i=1}^m w_i(x_1^0, x_2^0, \cdots, x_m^0) x_i^0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{1}$$

式中: Z 为实际评价值; x_i^0 为因素 x_i 的状态值; $w_i(x_1^0, x_2^0, \cdots, x_m^0)$ 为与 $(x_1^0, x_2^0, \cdots, x_m^0)$ 有关的 x 的变权,满足 $\sum_{i=1}^m w_i(x_1^0, x_2^0, \cdots, x_m^0) = 1$ 。

记 $X = (x_1^0, x_2^0, \cdots, x_m^0)$ 为因素 $(x_1, x_2, \cdots, x_m)$ 的

状态向量, $W' = (w_1, w_2, \cdots, w_m)$ 为因素 $(x_1, x_2, \cdots, x_m)$ 的常权向量, $S(X) = (S_1(X), S_2(X), \cdots, S_m(X))$ 为状态变权向量,则因素 $(x_1, x_2, \cdots, x_m)$ 的变权向量 $W(X) = (w_1(X), w_2(X), \cdots, w_m(X))$ 可表示为 W' 和 $S(X)$ 的归一化的Hadamard乘积,即:

$$W(X) = \frac{W'S(X)}{\sum_{i=1}^m w_i S_i(X)} = \frac{(w_1 S_1(X), \cdots, w_m S_m(X))}{\sum_{i=1}^m w_i S_i(X)} \tag{2}$$

1.2 改进均衡系数取值方法

假设水库安全评价层次结构模型包括总目标层A、准则层B和初始层C,总目标层A即为水库大坝安全状况评价的总目标;准则层B内包含 n 个对总目标层A的评价结果有影响的一级指标 $B_i(i = 1, 2, \cdots, n)$;每个一级指标 B_i 包含 m_i 个二级指标 $C_{ij}(j = 1, 2, \cdots, m_i)$, $\sum_{i=1}^n m_i = m$, m 项二级指标共同组成初始层C。则尾矿库溃坝风险评价中的变权公式^[14]可改进为

$$w_{ij} = \frac{w'_{ij} x_{ij}^{0 \alpha_{ij} - 1}}{\sum_{k=1}^{m_i} w'_{ik} x_{ik}^{0 \alpha_{ik} - 1}} \tag{3}$$

式中: w'_{ij} 、 x_{ij}^0 和 w_{ij} 分别为二级指标 C_{ij} 的常权权重、状态值和变权权重; α_{ij} 为应赋予二级指标 C_{ij} 的均衡系数。

在变权AHP中,对各项二级指标进行变权处理的目的是建立其权重与状态值之间的联系,旨在强调权重应随状态值变化而变化。由式(3)可知,科学给定二级指标的均衡系数是实现二级指标合理变权的关键。为降低传统变权AHP对均衡系数取值的主观性和盲目性,既需要考虑避免因按照各位决策者的主观意愿对各项二级指标赋予独立的均衡系数所可能导致的隶属于同一项一级指标下的各项二级指标间出现的“状态失衡”问题,还需要考虑如何在对各项二级指标进行变权处理时,增大隶属于同一项一级指标下的状态值相对较差的二级指标的权重变化幅度,以使得该项二级指标所对应的水库现状安全隐患可以更明显地体现在水库安全评价结果上。据此本文提出一种改进均衡系数取值方法,步骤如下:①由决策者根据工程经验确定用于对各项二级指标的常权权重进行变权处理的调节系数 β ;②确定判断隶属于同一项一级指标 B_i 下的各项二级指标 C_{ij} 的安全状况优劣即状态值 x_{ij}^0 好坏的“状态标准值 x_i^0 ”;③求出应赋予各项二级指标 C_{ij} 的均衡系数 α_{ij} 。

改进均衡系数取值方法的计算公式:对于隶属于一级指标 B_i 的某项二级指标 C_{ij} ,若其状态值 x_{ij}^0

小于一级指标 B_i 的状态标准值 x_i^0 ($x_i^0 = \sum_{j=1}^{m_i} w'_{ij} x_{ij}^0$), 则表明二级指标 C_{ij} 的安全现状劣于一级指标 B_i 的综合安全状况, $|x_{ij}^0 - x_i^0|$ 越大, 则二级指标 C_{ij} 对一级指标 B_i 的安全威胁程度越大, 应考虑在调节系数 β 的基础上增大其均衡系数 α_{ij} , 且 $|\alpha_{ij} - \beta|$ 应与 $|x_{ij}^0 - x_i^0|$ 成正相关关系, 变权后权重 w_{ij} 应相较常权重 w'_{ij} 有所增大, 增大幅度 $|w_{ij} - w'_{ij}|$ 也应与 $|x_{ij}^0 - x_i^0|$ 成正相关关系; 若其状态值 x_{ij} 大于一级指标 B_i 的状态标准值 x_i^0 , 则表明二级指标 C_{ij} 的安全现状优于一级指标 B_i 的综合安全状况, $|x_{ij}^0 - x_i^0|$ 越大, 表明该项二级指标 C_{ij} 对一级指标 B_i 的安全威胁程度越小, 同理应考虑在调节系数 β 的基础上减小其均衡系数 α_{ij} , 变权权重 w_{ij} 应相较常权重 w'_{ij} 有所减小, $|\alpha_{ij} - \beta|$ 和 $|w_{ij} - w'_{ij}|$ 同样应与 $|x_{ij}^0 - x_i^0|$ 成正相关关系。据此, 改进均衡系数公式为

$$\alpha_{ij} = \beta - \frac{(x_{ij}^0 - x_i^0)}{x_i^0} \beta = \beta \left(1 - \frac{x_{ij}^0 - x_i^0}{x_i^0} \right) = \beta \left(2 - \frac{x_{ij}^0}{x_i^0} \right) \quad (4)$$

式中 β 为对各项二级指标 C_{ij} 的常权重 w'_{ij} 进行变权处理的调节系数。

通过改进均衡系数取值方法, 可以平衡 C_{ij} 的常权重 w'_{ij} 与其状态值 x_{ij}^0 之间的关系, 避免了因决策者赋予各项 C_{ij} 独立均衡系数所导致的同一项一级指标 B_i 下的各项二级指标间出现的“状态失衡”问题, 并且适当降低了传统变权 AHP 在实际应用中采取赋予各项二级指标 C_{ij} 以相同均衡系数 α 所存在的盲目性可能导致的某一级指标 B_i 下的状态值 x_{ij}^0 相对较差的二级指标变权幅度较小, 从而不足以凸显该项二级指标所对应水库现状安全隐患对安全评价最终结果的影响, 可以更好地暴露水库现状安全隐患。

2 工程验证

河南省马庙水库地处淮河流域, 是支流上的一座均质土坝。工程等别为Ⅲ等, 主要建筑物级别为 3 级。水库正常蓄水位 328.00 m, 相应库容 671.8 万 m^3 ; 设计洪水位 333.87 m, 相应库容 1352.3 万 m^3 ; 校核洪水位 336.53 m, 相应库容 1705.3 万 m^3 ; 死水位 316.60 m, 相应库容 82.8 万 m^3 。枢纽主要水工建筑物包括大坝、溢洪道、输水洞等。

2.1 构建水库安全评价层次结构模型

参考 SL258—2017《水库大坝安全评价导则》, 根据影响马庙水库整体安全运行的因素, 将准则层 B 划分为工程质量 B_1 、运行管理 B_2 、防洪能力 B_3 、结构安全 B_4 、渗流安全 B_5 和金属结构安全 B_6 共 6 项

一级指标; 按照各项一级指标的具体评价内容将初始层 C 划分为共 25 项二级指标, 如图 1 所示。

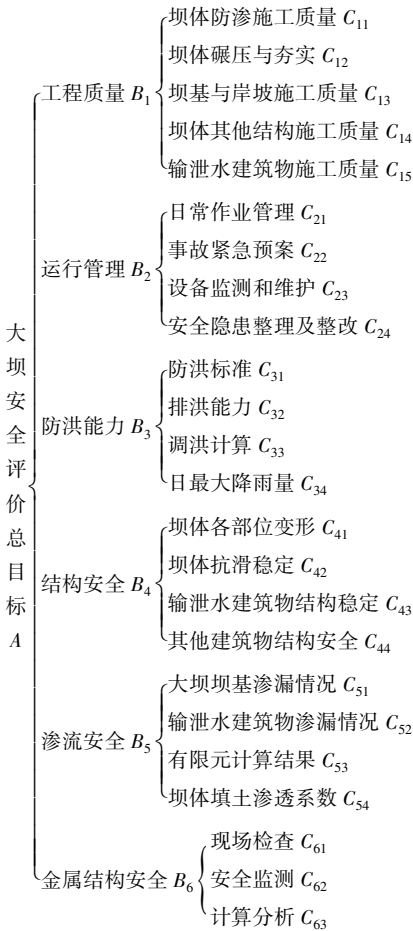


图 1 马庙水库安全评价指标体系

2.2 确定水库安全等级和评价各项二级指标安全状况的评语集

根据 SL258—2017《水库大坝安全评价导则》, 大坝安全类别分为一类坝、二类坝和三类坝。为准确描述目标水库的安全现状, 将待评价水库的安全等级划分为 A~E 共 5 个等级。基于安全鉴定专家组的基本结论, 确定与每个安全等级所对应的评分区间以及水库运行状态和应对措施(表 1)。

参考 SL274—2020《碾压式土石坝设计规范》和 SL258—2017《水库大坝安全评价导则》等相关规范, 并结合表 1 可以确定各项二级指标的安全程度的评语集 $\varphi = \{ \text{安全, 较安全, 一般安全, 较危险, 危险} \}$, 每个评语所对应的评分区间与表 1 中评价目标水库安全状况的各项安全等级所对应的评分区间相匹配。

2.3 一级和二级指标的常权重

通过实地勘察获取目标水库大坝的工程概况等基础资料, 分别获取二级指标 C_{ij} 相关的较长区间内的水库运行监测资料、历次大坝安全鉴定成果以及现状运行安全状况。结合九标度法对各项一级指标 B_i 、二级指标 C_{ij} 进行重要度评价, 构造“准则层 B -总

表 1 水库大坝安全状况评价等级划分

安全类别	安全等级	评分区间	状态及措施
一类坝	A 等级 (安全)	[90,100]	水库运行状态良好,应解决水库现状存在的轻微病患并加强水库日常管理及安全监测,保持良好运行状态。
	B 等级 (较安全)	[70,90)	水库运行状态较好,虽内部可能存在安全隐患,但水库正常运行不受影响,需要采取适当的加固措施。
二类坝	C 等级 (一般安全)	[50,70)	水库运行状态一般,表明水库可能存在较严重安全隐患,应派专家组再次到现场进行安全检查,查明隐患并尽快采取除险加固措施,防止隐患进一步恶化。
	D 等级 (较危险)	[30,50)	水库处于较危险状态,表明水库存在严重安全隐患,溃坝风险较高,不具备安全运行的基本条件,应组织有关部门进行除险加固工程设计,尽快排除险情。
三类坝	E 等级 (危险)	[0,30)	水库面临溃坝风险,表明水库安全保障严重不足,完全不具备安全运行条件,应尽快上报有关部门,不能采取除险加固措施排除险情的应尽快作降等或报废处理。

目标层 A”判断矩阵 M_{B-A} 和 6 个“初始层 C-准则层 B”判断矩阵 M_{C-B_i} ,然后通过检验系数^[5]对判断矩阵的一致性进行检验。待构造的所有判断矩阵均通过一致性检验后,通过方根法计算一级指标 B_i 的常权权重 w'_i 和各项二级指标 C_{ij} 的常权权重 w'_{ij} ,见表 2。

2.4 二级指标的状态值和模糊隶属度矩阵

2.4.1 二级指标的状态值

基于马庙水库安全评价层次结构模型,制作 η 份调查问卷,分发给水库管理人员、现场技术勘察人员和安全鉴定专家,邀请其对二级指标的当前运行安全状况评分。为使各项二级指标的状态值尽可能贴近安全现状,要求决策者对二级指标的安全现状评分前应先根据其现状安全状况及其对所属一级指标的安全评价结果的影响程度评估其风险等级,待该项一级指标下的所有二级指标的风险等级确定完毕后,再采取相互对照评分的形式对各项二级指标的安全状况评分。评分过程中应尽可能考虑各项二级指标状态值间的相互影响,评分值越高表明该项二级指标的安全状况越优,对其所属的一级指标的安全威胁程度越低;评分值越低则表明该项二级指标的安全状况越差,对其所属的一级指标的安全威胁程度越高。将上述步骤所获得的 η 位专家对同一项二级指标 C_{ij} 安全现状的评分取算术平均值即可求得其状态值 x^0_{ij} (表 2)。

2.4.2 二级指标的模糊隶属度矩阵

将 η 位决策者对 C_{ij} 安全状况的评分值按照第 2.2 节中所确定的二级指标安全现状的评语集和每个评语所对应的评分区间进行整理和归纳,再通过三角型隶属度函数确定各项二级指标的模糊隶属度矩阵,结果见表 2 中的第 5~9 列。

2.5 二级指标的变权权重

在实际的安全评价中,决策者为避免对 C_{ij} 的 w'_{ij} 进行变权处理过程中可能导致的隶属于同一项一级指标下的各项二级指标间出“状态失衡”问题,通常赋予各项二级指标 C_{ij} 以相同的均衡系数 α ,根据

表 2 常权权重及状态值计算结果

B_i	w'_i	C_{ij}	w'_{ij}	安全等级评分值					x^0_{ij}
				安全	较安全	一般安全	较危险	危险	
B_1	0.1031	C_{11}	0.2457	0.5	0.3	0.1	0.1	0	82
		C_{12}	0.4037	0	0.4	0.2	0.4	0	69
		C_{13}	0.2199	0	0.6	0.2	0.2	0	75
		C_{14}	0.0520	0.5	0.4	0.1	0	0	80
		C_{15}	0.0788	0.5	0.3	0.2	0	0	85
B_2	0.0673	C_{21}	0.5216	0.2	0.5	0.3	0	0	61
		C_{22}	0.2320	0.2	0.6	0.2	0	0	62
		C_{23}	0.1186	0.1	0.3	0.5	0.1	0	59
		C_{24}	0.1278	0.5	0.1	0.2	0.2	0	70
B_3	0.1613	C_{31}	0.4314	0.5	0.4	0.1	0	0	90
		C_{32}	0.1349	0.4	0.4	0.2	0	0	85
		C_{33}	0.3326	0.4	0.3	0.3	0	0	87
		C_{34}	0.1012	0.3	0.2	0.5	0	0	82
B_4	0.3826	C_{41}	0.2321	0.3	0.3	0.3	0.1	0	73
		C_{42}	0.4890	0.6	0.3	0.1	0	0	91
		C_{43}	0.1896	0.7	0.2	0.1	0	0	87
		C_{44}	0.0893	0.8	0.2	0	0	0	88
B_5	0.2514	C_{51}	0.5380	0.3	0.5	0.2	0	0	86
		C_{52}	0.0595	0.5	0.3	0.2	0	0	85
		C_{53}	0.1285	0.6	0.4	0	0	0	95
		C_{54}	0.2740	0.2	0.2	0.2	0.4	0	53
B_6	0.0343	C_{61}	0.3333	0.2	0.1	0.3	0.4	0	60
		C_{62}	0.3333	0.2	0.2	0.3	0.1	0	61
		C_{63}	0.3333	0.5	0.2	0.2	0.1	0	90

工程经验, α 取值一般为 0.2~0.3^[13-14],因此调节系数 β 的取值范围也宜为 0.2~0.3。当调节系数 $\beta=0.2$ 和 $\beta=0.3$ 时,式(4)求出的 α_{ij} 随 $|x^0_{ij}-x^0_i|$ 的变化趋势见表 3。

由表 3 可见,采用改进均衡系数取值方法计算得到的 α_{ij} 围绕调节系数 β 上下波动:当 $x^0_{ij} \geq x^0_i$ 时, $\alpha_{ij} \leq \beta$;当 $x^0_{ij} \leq x^0_i$ 时, $\alpha_{ij} \geq \beta$ 。此外, α_{ij} 相对调节系数 β 的变化幅度 $|\alpha_{ij}-\beta|$ 与 $|x^0_{ij}-x^0_i|$ 成正相关关系,即式(4)经过变换后可得

$$|\alpha_{ij}-\beta|=\frac{\beta}{x^0_i}|x^0_i-x^0_{ij}| \tag{5}$$

由式(5)可知,对于隶属于同一 B_i 下的各项 C_{ij} ,当 β 和 B_i 的状态标准值 x^0_i 均已确定时, $|x^0_{ij}-x^0_i|$ 和 $|\alpha_{ij}-\beta|$ 成线性正比关系,比例系数为 $\frac{\beta}{x^0_i}$;

表 3 调节系数为 0.2 和 0.3 时的均衡系数计算结果					
C_{ij}	α_{ij}		C_{ij}	α_{ij}	
	$\beta=0.2$	$\beta=0.3$		$\beta=0.2$	$\beta=0.3$
C_{11}	0.182 36	0.273 54	C_{34}	0.212 63	0.318 94
C_{12}	0.216 86	0.325 29	C_{41}	0.229 83	0.344 74
C_{13}	0.200 94	0.301 41	C_{42}	0.187 87	0.281 80
C_{14}	0.187 67	0.281 50	C_{43}	0.197 19	0.295 79
C_{15}	0.174 40	0.261 59	C_{44}	0.194 86	0.292 29
C_{21}	0.203 68	0.305 53	C_{51}	0.179 64	0.269 46
C_{22}	0.200 47	0.300 70	C_{52}	0.182 20	0.273 31
C_{23}	0.210 12	0.315 18	C_{53}	0.156 58	0.234 87
C_{24}	0.174 72	0.262 08	C_{54}	0.264 20	0.396 30
C_{31}	0.194 35	0.291 52	C_{61}	0.229 38	0.344 08
C_{32}	0.205 77	0.308 66	C_{62}	0.226 54	0.339 81
C_{33}	0.201 20	0.301 81	C_{63}	0.144 08	0.216 11

对于同一项 C_{ij} 而言,当其状态值 x_{ij}^0 和所属 B_i 的状态标准值 x_i^0 均已确定时, $|\alpha_{ij}-\beta|$ 与 β 成线性正比关系,比例系数为 $\frac{|x_i^0-x_{ij}^0|}{x_i^0}$ 。

为说明改进均衡系数取值方法可以有效降低盲目性缺陷所导致的水库现状安全隐患无法体现在评价结果上的可能性,选取 2 种方案并分别根据式(3)计算各项二级指标 C_{ij} 的变权权重 w_{ij} (表 4)。由表 4 可见,与方案一相同,采用方案二对隶属于同一项一级指标 B_i 下的各项二级指标 C_{ij} 的常权权重

表 4 变权权重计算结果

C_{ij}	w'_{ij}	x_{ij}^0	x_i^0	w_{ij}		X_{ij}		趋势
				方案一	方案二	方案一	方案二	
C_{11}	0.245 7	82	75.353 2	0.230 7	0.203 4	-6.105 0	-17.216 1	减小
C_{12}	0.403 7	69		0.427 7	0.471 0	5.945 0	16.670 8	增大
C_{13}	0.219 9	75		0.220	0.220 0	0.045 5	0.045 5	增大
C_{14}	0.052 0	80		0.049 7	0.045 4	-4.423 1	-12.692 3	减小
C_{15}	0.078 8	85		0.072 1	0.060 3	-8.502 5	-23.477 2	减小
C_{21}	0.521 6	61	62.145 0	0.527 7	0.538 1	1.169 5	3.163 3	增大
C_{22}	0.232 0	62		0.232 1	0.232 2	0.043 1	0.086 2	增大
C_{23}	0.118 6	59		0.122 8	0.130 3	3.541 3	9.865 1	增大
C_{24}	0.127 8	70		0.117 4	0.099 6	-8.137 7	-22.065 7	减小
C_{31}	0.431 4	90	87.527 1	0.422 8	0.406 3	-1.993 5	-5.818 3	减小
C_{32}	0.134 9	85		0.137 6	0.142 8	2.001 5	5.856 2	增大
C_{33}	0.332 6	87		0.333 8	0.336 0	0.360 8	1.022 2	增大
C_{34}	0.101 2	82		0.105 9	0.114 9	4.644 3	13.537 5	增大
C_{41}	0.232 1	73	85.795 9	0.258 7	0.309 9	11.460 6	33.520 0	增大
C_{42}	0.489 0	91		0.467 1	0.425 4	-4.478 5	-13.006 1	减小
C_{43}	0.189 6	87		0.186 9	0.181 3	-1.424 1	-4.377 6	减小
C_{44}	0.089 3	88		0.087 3	0.083 4	-2.239 6	-6.606 9	减小
C_{51}	0.538 0	86	78.055 0	0.488 0	0.399 5	-9.293 7	-25.743 5	减小
C_{52}	0.059 5	85		0.054 4	0.045 3	-8.571 4	-23.865 5	减小
C_{53}	0.128 5	95		0.108 7	0.075 8	-15.408 6	-41.011 7	减小
C_{54}	0.274 0	53		0.348 8	0.479 4	27.299 3	74.963 5	增大
C_{61}	0.333 3	60	70.333 3	0.364 8	0.416 2	9.450 9	24.872 5	增大
C_{62}	0.333 3	61		0.360 6	0.404 5	8.190 8	21.362 1	增大
C_{63}	0.333 3	90		0.274 6	0.179 3	-17.611 8	-46.204 6	减小

注:方案一为赋予各项 C_{ij} 相同的均衡系数 $\alpha, \alpha=0.3$;方案二为当调节系数 $\beta=0.3$ 时,根据式(4)计算所得的应赋予各项二级指标 C_{ij} 的均衡系数 $\alpha_{ij}; X_{ij} = \left(\frac{w_{ij}-w'_{ij}}{w'_{ij}}\right) \times 100\%$,为 2 种变权方案下的权重变化率。

w'_{ij} 进行变权处理后,当 $x_{ij}^0 < x_i^0$ 时, $w_{ij} > w'_{ij}$;当 $x_{ij}^0 > x_i^0$ 时, $w_{ij} < w'_{ij}$,并未出现因决策者对各项二级指标的均衡系数进行独立赋值所导致的“状态失衡”问题。且权重变化幅度与 $|x_{ij}^0-x_i^0|$ 的大小成正相关关系。方案二计算得到的权重变化幅度均大于方案一,表明本文提出的改进均衡系数取值方法在调节系数 β 的基础上,根据 $|x_{ij}^0-x_i^0|$ 的大小对隶属于同一项一级指标下的各项二级指标的均衡系数进行赋值,可以有效调节各项二级指标的常权权重,从而降低方案一中对均衡系数取值方式存在的盲目性缺陷所导致无法凸显二级指标对应水库安全隐患对其所属一级指标和总目标的安全评价结果的影响。

2.6 模糊综合得分计算及结果分析

首先通过多级指标模糊综合运算,分别获取准则层 B 内的各项一级指标 B_i 和总目标层 A 的模糊综合评价矩阵,其次根据第 2.2 节所确定的水库安全等级和每个等级所对应的评分区间选取相应的等级参数向量 V ,最后分别将求出的 n 个一级指标 B_i 的模糊综合评价矩阵 W_{B_i} 和总目标层 A 的模糊综合评价矩阵 W_A 与 V 作矩阵乘法运算即可得到 n 个一级指标 B_i 的模糊综合得分 F_{B_i} 和总目标 A 的模糊综合得分 F_A 。

2.6.1 二级指标模糊综合运算

B_i 的模糊综合评价矩阵 W_{B_i} 为

$$W_{B_i} = W_i R_i \tag{6}$$

式中: W_i 为隶属于一级指标 B_i 下的各项二级指标 C_{ij} 相对 B_i 的变权权重矩阵; R_i 为由二级指标 $C_{i1} \sim C_{imi}$ 的模糊隶属度矩阵所共同组成的矩阵。

2.6.2 一级指标模糊综合运算

总目标层 A 的模糊综合评价矩阵 W_A 为

$$W_A = W R \tag{7}$$

式中: W 为准则层 B 相对总目标层 A 的常权权重矩阵; R 为由二级指标模糊综合运算得到的准则层 B 内的所有一级指标 B_i 的模糊综合评价矩阵 $W_{B_1} \sim W_{B_n}$ 共同组成的矩阵。

2.6.3 模糊综合得分

选取相应的等级参数向量 $V = (v_1, v_2, \cdots, v_{\xi})^T = (95, 80, 60, 40, 15)^T$,准则层 B 内的各项一级指标 B_i 的模糊综合得分:

$$F_{B_i} = W_{B_i} \cdot V = \sum_{j=1}^{j=\xi} b_{ij} v_j \tag{8}$$

同理可得总目标层 A 的模糊综合得分:

$$F_A = W_A \cdot V = \sum_{j=1}^{j=\xi} a_j v_j \tag{9}$$

将由式(6)和式(7)求得的各项一级指标和总

目标层的模糊综合评价矩阵分别代入式(8)和式(9),分别计算得到方案一和方案二情况下的准则层 B 内的各项一级指标 $B_i(i=1,2,\cdots,6)$ 和总目标层 A 的模糊综合得分,并同理计算出当式(6)中的 W_i 为隶属于一级指标 B_i 下的各项二级指标 C_{ij} 相对 B_i 的常权权重矩阵时的各项一级指标和总目标的模糊综合得分(表4)。

由表5可知,将方案二计算得到的各项二级指标的变权权重代入多级指标模糊综合运算,最后结合所选取的等级参数向量计算得到的马庙水库的模糊综合得分为77.9547,因此根据表1判定马庙水库大坝当前的安全等级为B等级,为“较安全”状态,大坝安全类别为“二类坝”,与此次水库大坝安全鉴定专家组所得鉴定结论一致,表明本文提出的改进变权层次分析法具有一定的可靠性。

表5 得分及得分变化率计算结果

常权模糊综合得分	变权模糊综合得分		得分变化率/%	
	方案一	方案二	方案一	方案二
79.7005	79.053	77.9547	-0.81	-2.19

注:得分变化率=(变权模糊得分-常权模糊综合得分)/常权模糊综合得分×100%。

从各项一级指标的模糊综合得分来看,常权情况下除一级指标 B_6 (金属结构安全)为“一般安全”状态以外,其余各项一级指标均为“较安全”状态;对于2种变权情况(方案一和方案二),除一级指标 B_6 (金属结构安全)为“一般安全”状态外,一级指标 B_1 (大坝工程质量)也被列为“一般安全”状态,表明二级指标的状态值对其权重具有一定影响。对于水库整体得分变化率而言,方案一情况下的得分变化率仅为-0.81%,方案二情况下的得分变化率为-2.19%;对于各项一级指标的得分变化率而言,方案二情况下计算得到的各项一级指标的得分变化率绝对值均大于方案一,这主要是因为改进均衡系数取值方法考虑了隶属于同一项一级指标的各项二级指标的常权权重和状态值的相互影响作用。综上,改进均衡系数取值方法可有效降低均衡系数取值的盲目性,可使得状态值相对较差的二级指标对应的水库现状安全隐患在其所属一级指标及水库整体安全得分上有所体现,可为后续除险加固工程重点的确定指明方向。

3 结 论

a. 相较于 AHP,变权 AHP 考虑了二级指标的状态值对其权重变化的影响,避免了 AHP 因建构在因素固权体系上所导致的反映系统要素间相互作用机理的少数几种特定方案复合排序方法失效,从而

无法反映水库安全评价等复杂系统的非线性和涌现性等本质特征的缺陷对水库大坝安全状况评价结果的客观性和真实性所造成的影响。

b. 本文提出的改进均衡系数取值方法可以避免传统变权 AHP 对各项二级指标均衡系数的独立赋值所可能导致的隶属于同一项一级指标下的各项二级指标间出现的“状态失衡”问题;同时该法在对各项二级指标的常权权重进行变权处理过程中考虑了隶属于同一项一级指标的各项二级指标的常权权重间和状态值间的相互影响,有效降低了传统变权 AHP 在实际工程应用中对各项二级指标赋予相同的均衡系数所带来的盲目性,可以更加有效地凸显水库现状安全隐患对评价结果的影响,适当提高了评价结果与水库实际运行安全状况的贴合程度。

c. 本文方法在马庙水库安全评价中的应用可知,马庙水库整体模糊综合得分属于“较安全”状态,大坝安全类别为“二类坝”,与专家组所得结论一致,表明该法具有一定的工程适用性和可靠性;一级指标“工程质量”和“金属结构安全”均属“一般安全”状态,所得结论可为后续马庙水库除险加固工程施工重点的确定指明方向。

参考文献:

[1] 焦延涛,沈振中,周国栋. 青天河浆砌石重力坝溢流坝段抗震安全评价[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(3):487-492. (JIAO Yantao, SHEN Zhenzhong, ZHOU Guodong. Earthquake-resistance safety evaluation of overflow section of Qingtianhe Masonry Gravity Dam [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 487-492. (in Chinese))

[2] 沈振中,马明,涂晓霞. 基于非连续变形分析的重力坝变形预警指标[J]. 水利学报,2007(增刊1):94-99. (SHEN Zhenzhong, MA Ming, TU Xiaoxia. Early warning index of deformation for gravity dam based on discontinuous deformation analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007 (Supl): 94-99. (in Chinese))

[3] 叶亚三,陈国兴. 水库大坝抗震性能的模糊综合评价[J]. 水力发电学报,2013,32(3):198-206. (YE Yasan, CHEN Guoxing. Fuzzy comprehensive evaluation on aseismic behavior of reservoir dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3): 198-206. (in Chinese))

[4] 何金平,高全,施玉群. 基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法[J]. 系统工程理论与实践,2016,36(11):2977-2983. (HE Jinping, GAO Quan, SHI Yuqun. A multi-hierarchical comprehensive evaluation method of dam safety based on cloud model [J]. Systems

- Engineering-Theory & Practice, 2016, 36 (11): 2977-2983. (in Chinese))
- [5] 任青文,杨印,田英. 基于层次分析法的梯级库群失效概率研究[J]. 水利学报,2014,45(3):296-303. (REN Qingwen, YANG Yin, TIAN Ying. Research on the overall failure probability based on the analytic hierarchy process in cascade reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(3): 296-303. (in Chinese))
- [6] 吕鹏,王晓玲,余红玲,等. 基于FDA的大坝渗流安全动态可拓评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(5):433-439. (LYU Peng, WANG Xiaoling, YU Hongling, et al. Dynamical and scalable evaluation model for dam seepage safety based on FDA [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 433-439. (in Chinese))
- [7] 汪培庄,张南纶. 落影空间:模糊集合的概率描述[J]. 数学研究与评论, 1983 (1): 163-178. (WANG Peizhuang, ZHANG Nanlun. Falling space: the probabilistic description of fuzzy subsets [J]. Journal of Mathematical Research with Applications, 1983(1): 163-178. (in Chinese))
- [8] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(I): 因素空间的公理化定义与描述架[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1996, 32 (4): 470-475. (LI Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (I): axiomatic definition of factor spaces and description frames [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 1996, 32 (4): 470-475. (in Chinese))
- [9] 刘文奇. 一般变权原理与多目标决策[J]. 系统工程理论与实践,2000(3):1-11. (LIU Wenqi. The ordinary variable weight principle and multiobjective decision making [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000(3): 1-11. (in Chinese))
- [10] 李德清,李洪兴. 状态变权向量的性质与构造[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2002,38(4):455-461. (LI Deqing, LI Hongxing. The properties and construction of state variable weight vectors [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2002, 38(4): 455-461. (in Chinese))
- [11] 李德清,崔红梅,李洪兴. 基于层次变权的多因素决策[J]. 系统工程学报,2004(3):258-263. (LI Deqing, CUI Hongmei, LI Hongxing. Multifactor decision making based on hierarchical variable weights [J]. Journal of Systems Engineering, 2004 (3): 258-263. (in Chinese))
- [12] 李德清,李洪兴. 变权决策中变权效果分析与状态变权向量的确定[J]. 控制与决策,2004(11):1241-1245. (LI Deqing, LI Hongxing. Analysis of variable weights effect and selection of appropriate state variable weights vector in decision making [J]. Control and Decision, 2004(11): 1241-1245. (in Chinese))
- [13] 梁力,刘奇,李明. 基于变权综合层次分析法的尾矿库溃坝风险模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017,38(12):1790-1794. (LIANG Li, LIU Qi, LI Ming. Dam-break risk assessment model of tailings reservoir based on variable weight synthesis and analytic hierarchy process [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38 (12): 1790-1794. (in Chinese))
- [14] 李凤娟. 变权 AHP-模糊综合评估某尾矿库安全现状及分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.
- [15] SAATY T L. Decision making with dependence and feedback: the Analytic Network Process[M]. Pittsburgh: RWS Publications, 2001.
- [16] 李春好,孙永河,贾艳辉,等. 变权层次分析法[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(4):723-731. (LI Chunhao, SUN Yonghe, JIA Yanhui, et al. Analytic hierarchy process based on variable weights [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(4): 723-731. (in Chinese))
- [17] 汪培庄. 模糊集与随机集落影[M]. 北京:北京师范大学出版社,1985.

(收稿日期:2021-04-16 编辑:刘晓艳)

