

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0041

崔威,李晓英,郭宜薇.基于博弈论组合赋权的水电站事故风险评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):408-416.
CUI W,LI X Y,GUO Y W. Risk evaluation of hydropower station accidents based on combination weighting of game theory [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(2):408-416. (in Chinese)

基于博弈论组合赋权的水电站事故风险评价

崔威¹,李晓英¹,郭宜薇²

(1. 河海大学水利水电学院,南京 210098;2. 长江水利委员会长江科学院,武汉 430014)

摘要:针对单一赋权法存在不足和开都河流域上水电站风险等级难以客观确定的问题,采用博弈论方法,对FAHP(fuzzy analytic hierarchy process)法确定的主观权重和CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)法确定的客观权重进行组合优化,构建基于FAHP-CRITIC-博弈论组合赋权的水电站风险模糊综合评价模型。统计分析开都河流域上两座串联水电站的出险事故赔案,从自然环境、电力运行、建筑与设备3个方面建立风险因素指标体系,依据事故损失金额进行风险等级划分,采用隶属度函数计算各风险指标隶属度,利用构建的FAHP-CRITIC-博弈论组合赋权法进行各因素最优组合权重计算,进行多层次模糊综合评价,根据最大隶属度原则确定水电站风险等级。结果表明,该水电站风险等级为低风险,主要风险指标为暴雨洪水和设备故障,与水电站实际情况相符。

关键词:水电站风险;FAHP法;CRITIC法;博弈论;模糊综合评价

中图分类号:TV742 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



随着我国水利设施建设的快速发展,大量的水电站已投入运行,以水电为主的清洁能源逐步成为环境保护和社会发展的的重要因素。

水电站运行的安全性一直是社会及国家关注的重点,也是当前水电站研究的核心问题。长期以来,对于水电站风险的研究大多集中在水电站建设上,而对于水电站的风险评价则较少。面对大多数水电站安全形势问题^[1],准确评价其风险水平成为保障水电站安全运行的首要问题。

我国的风险分析研究起步较晚,对于水电站风险评价的概念和研究还处于初步阶段。针对水电站风险评价开展的研究有:李玉峰等^[2]提出利用风险矩阵对项目风险进行分级评价,以乌东德水电站为例研究水电站建设运行过程各类风险因素;周志炎^[3]采用层次分析法对小水电工程项目管理中的风险因素进行分类评价;李耀昌^[4]将层

次分析法与系统动力学相结合,分析并预测集控式水电站群运行中的各类风险;焦峰^[5]通过构建多层次模糊综合评价模型,对祥和水电站风险进行评价。在以往的研究中,水电站风险评价通常使用单一的赋权法,如:层次分析法^[6-7]、专家打分法、德尔菲法等主观赋权法,其主观随意性较强,工程应用中有一定的局限性;或TOPSIS法^[8]、熵权法^[9]等客观赋权法,其过度依赖客观数据,计算结果往往不令人满意。

针对单一赋权法的缺点,博弈论组合赋权法能够实现主观与客观的统一,在一定程度上提高赋权决策的科学合理性^[10-12]。本文收集整理近10年开都河流域上两座串联水电站各类事故赔案,筛选出风险分析的典型事故资料,分析影响电站安全的主要风险因素,并引入博弈论组合模型将模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process,FAHP)确定

收稿日期:2021-03-15 修回日期:2021-09-05 网络出版时间:2021-09-22

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20210918.1105.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400909)

作者简介:崔威(1997—),男,江苏南京人,主要从事水利水电系统规划研究。E-mail:646782594@qq.com

通信作者:李晓英(1978—),女,江苏徐州人,副教授,博士,主要从事水资源系统规划与动能经济研究。E-mail:lixxy3@hhu.edu.cn

的主观权重和 CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)法确定的客观权重进行组合赋权,分析各风险因子损失金额与风险等级的隶属函数,建立水电站风险模糊综合评价模型,根据评价结果确定水电站风险等级。

1 风险因素分析与风险指标体系建立

我国水电站大多位于偏远地区,影响安全的风险因素较为复杂。在评价其风险等级时,需将其评价主体定性分析,充分考虑随机性和模糊性,动态分析辨识水电站风险^[13]。

水电站风险是风险事故发生概率和风险损失的结合,本文采用事故致因理论^[14]对收集的 50 例电站典型事故资料进行分析,总结各类事故发生的原理,确定水电站主要风险因素为自然环境风险、电力运行风险和建筑与设备风险。

1.1 自然环境风险

自然环境因素是指电站本身和周边环境中的自然因素导致的事故,主要包括暴雨洪水、冻胀、雷击、大风、泥石流等。尽管水电站对洪水等风险有相关的防护标准,但自然环境因素对电站安全的影响主要为次生灾害影响,其事故大多是这些因素造成电站运行故障等原因引发的次生损失。

1.2 电力运行风险

电力运行风险因素包括电力设备风险和运行维护作业风险。电力设备风险是指电站厂房内部各类电气设备的安全问题,包括电流冲击、过电压、感应电等。运行维护作业是水电站日常工作形态,电站生产工作中的超负荷运行和人员误操作等因素是导致机器设备损坏造成经济损失的重要风险因素。电力运行风险是影响水电站安全的重要部分,且电力运行风险更多地涉及日常工作,在实际运行中易于管理,分析其风险因素并确定风险等级可为后期采取风控措施提供指导。

1.3 建筑与设备风险

建筑与设备是水电站的重要组成部分,承担着生产发电的任务,任何的建设和设备异常都会影响电站安全。水电站是一个复杂的系统,设备种类繁多,将其进行分类评价,其风险包括设备故障、工艺缺陷和工程质量等问题,集中体现在电站内部设备和大坝的建筑质量安全方面。同时该风险除了对电站本身安全产生直接威胁外,也会间接影响电站的生产运行,造成营业中断损失。因而将其作为风险识别的重要内容,分析其对电站安全的影响程度,能

有效提高风险评价的准确性。根据以上分析,建立水电站风险因素指标体系,见表 1。

表 1 水电站风险因素指标体系
Tab.1 Risk index system of hydropower station

目标层	准则层	指标层
水电站风险 A	自然环境风险 B ₁	暴雨洪水 C ₁₁
		冻胀 C ₁₂
		雷击 C ₁₃
		大风 C ₁₄
		泥石流 C ₁₅
		滑坡 C ₁₆
	电力运行风险 B ₂	电流冲击 C ₂₁
		过电压 C ₂₂
		感应电 C ₂₃
		超负荷 C ₂₄
	建筑与设备风险 B ₃	人员误操作 C ₂₅
		设备故障 C ₃₁
		工艺缺陷 C ₃₂
		工程质量问题 C ₃₃

2 模糊风险评价模型建立

2.1 确定模糊关系矩阵

建立因素集。模糊分析的首要步骤是建立因素集^[15],将评价对象根据风险识别分解成若干个评价要素,建立评价对象的因素集

$$U=(u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (1)$$

式中: $u_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为准则层上第 i 个风险因素,其又分解为对应的指标层因素。

建立评价集。以水利部颁布的导则^[16]为基础,从风险分析的角度出发,根据工程实际情况,确立水电站风险评价等级^[17]。根据模糊评价对水电站风险等级进行分类表述,建立评价集

$$V=(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) \quad (2)$$

式中: v_1 为极低风险; v_2 为低风险; v_3 为一般风险; v_4 为高风险; v_5 为极高风险。

电站事故主要通过损失金额反映其严重程度,因此需要根据各指标造成的事故损失金额划分其风险度区间,即损失金额越大,风险度越大,电站风险等级就越高。

进行单因素评价,建立模糊关系矩阵。运用模糊数学进行单因素评价时,一般采用隶属度函数分析判断因素,隶属度函数在不同程度上受到主观判断和客观数据的影响,其合理与否决定最终评价结果的有效性。常见的隶属度函数有三角形分布、梯

形分布、抛物型分布、正态型分布、Cauchy 型分布和岭型分布等^[18]。前面分析的各风险指标与风险等级基本成正比的关系,以事故损失金额为判断依据,采用梯形分布函数确定隶属度,其表达式如下:

偏小型

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \end{cases} \quad (3)$$

中间型

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ 1 & a_2 < x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} & a_3 < x \leq a_4 \\ 0 & x > a_4 \end{cases} \quad (4)$$

偏大型

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ 1 & x > a_2 \end{cases} \quad (5)$$

则该指标对应的隶属度值 r_i 为

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}) \quad (6)$$

式中: r_{ij} ($j=1\sim 5$)为第 i 个元素对应不同评价等级的隶属度函数,其等级依次为极低风险、低风险、一般风险、高风险和极高风险; a_i ($i=1\sim 4$)分别为对应风险等级的赔偿标准; x 为损失金额,万元。

依据损失金额,将因素集中各指标代入对应的隶属度函数中,计算其隶属度,得到单因素评判矩阵为

$$R_i = \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{n5} \end{bmatrix}$$

2.2 计算组合权重

2.2.1 模糊层次分析法确定主观权重

为反映不同因素对于评价目标的重要程度,需对各因素赋予相应的权数建立因素权重集。传统的层次分析法依靠专家在一定准则下根据主观经验通过两两比较的方式确定各指标的相对重要性形成判断矩阵,主观随意性较强,且难以保证判断矩阵的一致性^[19]。引入模糊层次分析法将模糊一致矩阵与层次分析法相结合,在保留传统 AHP 法的优点时,保证了判断矩阵的一致性,使其更符合决策判断^[20],其计算过程如下:

构建风险指标模糊互补矩阵。参考相关规范^[21]和已有研究^[22-23],结合工程实际情况,将水电站风险的发生概率进行分级,见表 2。将选取的 n 个水电站风险评价指标进行风险概率等级评分,将指标评分结果两两比较,以 0.1~0.9 标度的模糊关系隶属度将模糊关系定量化,见表 3,得到模糊判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

式中:矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,由表 3 中模糊关系隶属度可知 a_{ij} 满足 $0 \leq a_{ij} \leq 1$ 且 $a_{ij} + a_{ji} = 1$,由文献[21]可知矩阵 A 为模糊互补矩阵。

表 2 风险概率等级标准

Tab. 2 Risk probability evaluation criteria

风险可能性	评分	水电站风险概率	说明
极低	0~0.2	(0, 10 ⁻²]	几乎不可能,但仍有发生的可能性
低	0.2~0.4	(10 ⁻² , 10 ⁻¹]	不可能,但仍有理由会发生
中	0.4~0.6	(10 ⁻¹ , 0.2]	偶尔发生
高	0.6~0.8	(0.2, 0.5]	多次发生
极高	0.8~1.0	(0.5, 1.0]	接二连三地发生

表 3 风险指标模糊关系标度值

Tab. 3 Fuzzy relationship scale value of risk index

标度值 a_{ij}	判断	说明
0.5	同等重要	两指标比较,同等重要
0.6	稍微重要	两指标比较, a_i 比 a_j 稍微重要
0.7	明显重要	两指标比较, a_i 比 a_j 明显重要
0.8	非常重要	两指标比较, a_i 比 a_j 非常重要
0.9	极端重要	两指标比较, a_i 比 a_j 极端重要
0.1, 0.2, 0.3, 0.4		反比较,即 $a_{ji} = 1 - a_{ij}$

模糊互补矩阵转化为模糊一致矩阵。将模糊互补矩阵 A 按行求和得 $b_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}$,并作数学变换,即

$$b_{ij} = \frac{(b_i - b_j)}{2n} + 0.5 \quad (9)$$

得到矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$,其中各元素满足 $b_{ij} = b_k - b_{jk} + 0.5$,根据文献[21]可知矩阵 B 为模糊一致矩阵,无须进行一致性检验。

计算风险指标主观权重。将风险指标模糊一致判断矩阵 B 代入传统 AHP 法,计算模糊层次分析法的主观权重 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$,即

$$\alpha_i = \frac{2 \sum_{j=1}^n b_{ij} - 1}{n(n-1)}, i=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

2.2.2 CRITIC 法确定客观权重

CRITIC 法是通过计算指标的变异性和冲突性来综合衡量指标权重的客观赋权法^[24]。指标的变异性和冲突性通过标准差的大小来反应,标准差越大,样本指标的取值差异越大,其权重越高;指标间的冲突性通过指标之间的相关性来表示,指标之间的相关系数越大,其冲突性越小,说明指标所提供的重复信息多,相应的权重就越小。其主要步骤^[25]如下:

建立原始样本数据矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{m \times n}$,其中 x_{ij} 为第 i 个对象的第 j 个指标取值,并将其按下式变换得到标准化矩阵 \mathbf{X}^*

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}, j=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

式中: \bar{x}_j 为第 j 个指标的均值, $\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}$; s_j 为

第 j 个指标的标准差, $s_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}$ 。

计算各指标的变异系数

$$\nu_j = \frac{s_j}{\bar{x}_j}, j=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

计算指标的独立性系数

$$\eta_j = \sum_{k=1}^n (1 - r_{kj}), j=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: r_{kj} 为第 k 个和第 j 个指标之间的相关性系数。

计算指标的综合性系数

$$C_j = \nu_j \eta_j, j=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

计算指标权重 β_j , 并得到客观权重 $\beta=(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ 。

$$\beta_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}, j=1, 2, \dots, n \quad (15)$$

2.2.3 基于博弈论的组合赋权法

基于博弈论的组合赋权法以纳什均衡为目标,协调主、客观权重之间冲突,寻找权重间的一致和妥协,其过程是一个相互比较、相互协调的集成。水电站风险主要体现在风险发生概率和损失金额方面,两者权重分别由 FAHP 法和 CRITIC 法计算,博弈论组合赋权法可以综合考虑各指标之间的固有信息,减少单一赋权法的片面性从而提高指标赋权的合理性。其赋权步骤^[20]如下。

使用 FAHP 法和 CRITIC 法两种方法分别计算风险指标权重,基本权重集 $\mathbf{W}_k = \{\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}\} (k=1, 2, \dots, L)$,其中 n 为风险指标数量, L 为确定权重方法个数,本文取值为 2。设 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L\}$ 为线性组合系数,则组合权重为

$$\mathbf{W}_i = \sum_{k=1}^L \lambda_k \mathbf{W}_k^T, \lambda_k > 0, k=1, 2, \dots, L \quad (16)$$

根据博弈论思想,以 \mathbf{W}_i 与 \mathbf{W}_k 的离差最小为目标,对线性组合系数进行优化,其对策模型为

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \lambda_k \mathbf{W}_k^T - \mathbf{W}_k \right\|_2, k=1, 2, \dots, L \quad (17)$$

根据矩阵微分性质,确定上式最优化的一阶导数条件的线性微分方程组为

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T & \dots & \omega_1 \omega_L^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T & \dots & \omega_2 \omega_L^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_L \omega_1^T & \omega_L \omega_2^T & \dots & \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \\ \vdots \\ \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \quad (18)$$

将计算所得的组合系数 λ_k 进行归一化得到 λ_k^* ,按下式计算得到博弈论组合赋权 \mathbf{W}_i^* ,即

$$\mathbf{W}_i^* = \sum_{k=1}^L \lambda_k^* \omega_k^T, k=1, 2, \dots, L \quad (19)$$

2.3 建立博弈论组合赋权的风险评价模型

根据计算的组合权向量 \mathbf{W}_i^* 和模糊评价矩阵 \mathbf{R}_i 进行合成运算,得到关于指标层的综合评价结果 \mathbf{D}_i 。在此基础上与准则层权重进行模糊运算,可得关于准则层的模糊评价模型和评价结果向量 \mathbf{D} 。

$$\mathbf{D}_i = \mathbf{W}_i^* \mathbf{R}_i =$$

$$(\omega_{i1}^*, \omega_{i2}^*, \dots, \omega_{in}^*) \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{n5} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{W}^* \mathbf{R} =$$

$$(\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_m^*) \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_m \end{bmatrix} = \{d_1, d_2, \dots, d_m\} \quad (21)$$

式中: ω_{ij}^* 为博弈论组合赋权的第 i 个准则层下第 j 个指标的权重值; ω_i^* 为准则层的权重值; d_i 为按模糊综合评价法求得的第 i 个准则层下第 j 个指标对应等级的隶属度值。将 \mathbf{D} 归一化,即 $\bar{d}_i = d_i / \sum_{i=1}^n d_i$, 可得

$$\bar{\mathbf{D}} = (\bar{d}_1, \bar{d}_2, \dots, \bar{d}_n)$$

根据最大隶属度原则,以计算结果判断水电站风险等级。

3 案例分析

3.1 工程概况

本文研究的两座串联水电站位于开都河流域,电站类型为坝后式,所在区域的水文、气候和地质等

条件相近。电站自 2010 年以来实行了运营项目保险统一安排,对各类风险事故进行保险理赔,降低了一定的损失。然而由于电站出险数和赔偿金额长期处于高位导致保险费率逐年提高,水电站经济负担增加,同时也对电站安全运行带来极大挑战。本研究旨在通过分析水电站事故赔案资料,探索水电站出险的深层次原因,评价电站风险等级,进而指导电站提高风险管理水平。整理得到 2010—2019 年的水电站 50 例典型事故资料见表 4。

表 4 2010—2019 年水电站典型事故资料
Tab. 4 Accident data of hydropower station

风险指标	发生次数	金额范围/万元	平均损失金额/万元
暴雨洪水	11	50.00~1 000.00	337.56
冻胀	2	50.00~59.37	54.69
雷击	2	5.05~18.65	11.85
大风	1	5.00	5.00
泥石流	2	300.00~600.00	450.00
电流冲击	6	2.99~7.80	4.94
过电压	4	4.12~23.43	8.94
感应电	1	5.91	5.91
超负荷	3	15.50~29.76	23.71
人员误操作	2	9.65~17.00	13.32
设备故障	12	8.70~102.39	32.42
工艺缺陷	2	70.00~100.00	85.00
工程质量问题	2	50.00~1 500.00	775.00

3.2 因素集建立及模糊关系矩阵确定

根据收集的 50 例水电站事故资料,结合水电站运行的实际情况,按照表 1 所示的风险指标进行评价。根据确定的隶属度函数可得自然环境风险、电力运行风险和建筑与设备风险的单因素评判矩阵 $R_1 \sim R_3$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.024 & 0.123 & 0.493 & 0.235 & 0.125 \\ 0.087 & 0.594 & 0.319 & 0 & 0 \\ 0.397 & 0.603 & 0 & 0 & 0 \\ 0.425 & 0.575 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.200 & 0.056 & 0.704 & 0.040 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.424 & 0.436 & 0.140 & 0 & 0 \\ 0.343 & 0.443 & 0.186 & 0.028 & 0 \\ 0.659 & 0.191 & 0.075 & 0.075 & 0 \\ 0.319 & 0.506 & 0.104 & 0.071 & 0 \\ 0.357 & 0.643 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.270 & 0.493 & 0.236 & 0.001 & 0 \\ 0.033 & 0.358 & 0.606 & 0.003 & 0 \\ 0 & 0.325 & 0.300 & 0.125 & 0.250 \end{bmatrix}$$

3.3 风险因素组合权重计算

由于水电站风险发生的概率受诸多因素影响,利用统计分析的年数和各风险因素事故发生次数,计算各风险因素的年发生概率,再由评估专家和电站人员依照风险概率等级标准对各因素指标进行评分。将各指标的评分结果两两进行对比,判断指标间的相对重要性,得到模糊判断矩阵。准则层因素和自然环境风险指标、电力运行风险指标、建筑与设备风险指标对应的模糊判断矩阵 $A_0 \sim A_3$ 依次为

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.8 & 0.9 & 0.8 \\ 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.5 \\ 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.5 \\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.4 \\ 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.9 & 0.7 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.6 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.5 \\ 0.3 & 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.5 \\ 0.2 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.8 \\ 0.2 & 0.5 & 0.5 \\ 0.2 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

将模糊判断矩阵代入式(11)、(12)计算得到水电站风险指标主观权重 α ,同时根据事故数据利用 CRITIC 法计算得到客观权重 β ,将主观权重 α 和客观权重 β 依次代入式(18)~(21),计算得到各组的 λ_i^* 值和组合权重 W_i^* ,其计算结果见表 5。

结合事故资料和指标层权重计算结果分析:在自然环境风险中,暴雨洪水和泥石流的权重相对较高,而不同点在于暴雨洪水的发生概率高,使得其主观权重较大;泥石流则因为平均损失金额高,其客观权重明显较大。对于电力运行风险,电流冲击与过电压的权重较高,特别是组合系数更大的主观权重中,从表 4 的数据可知原因是在各指标损失金额普遍较低的情况下,事故发生概率越大的风险越严重。在建筑与设备风险中,尽管工程质量问题的平均事故经济损失超过设备故障事故经济损失,但由于其发生频次仅有 2 次,且单次损失金额差距较大,其在组合权重计算中权重值小于设备故障。通过对该电站详细事故资料的分析,工程质量问题主要发生于运行期初,后期工程质量问题鲜有发生,但设备故障引起的事故却每年都会出现。

表 5 水电站风险因素权重值

Tab. 5 Weight value of risk factors of hydropower station

准则层	主观权重 α	客观权重 β	组合系数 λ_k^*	组合权重 W_i^*	指标名称	主观权重 α	客观权重 β	组合系数 λ_k^*	组合权重 W_i^*	综合权重
自然环境 风险 B_1	0.40	0.36	0.39	0.39	暴雨洪水 C_{11}	0.33	0.20	$\lambda_1^* = 0.948\ 3$ $\lambda_2^* = 0.057\ 1$	0.32	0.13
					冻胀 C_{12}	0.15	0.18		0.15	0.06
					雷击 C_{13}	0.15	0.20		0.15	0.06
					大风 C_{14}	0.13	0.16		0.14	0.05
					泥石流 C_{15}	0.24	0.26		0.24	0.09
电力运行 风险 B_2	0.30	0.36	$\lambda_1^* = 0.712\ 9$ $\lambda_2^* = 0.287\ 1$	0.32	电流冲击 C_{21}	0.30	0.20	$\lambda_1^* = 0.865\ 6$ $\lambda_2^* = 0.134\ 4$	0.29	0.09
					过电压 C_{22}	0.23	0.21		0.23	0.07
					感应电 C_{23}	0.13	0.20		0.14	0.05
					超负荷 C_{24}	0.18	0.20		0.18	0.06
					人员误操作 C_{25}	0.16	0.19		0.16	0.05
建筑与设备 风险 B_3	0.30	0.28	0.29	0.29	设备故障 C_{31}	0.53	0.33	$\lambda_1^* = 0.734\ 1$ $\lambda_2^* = 0.265\ 9$	0.48	0.14
					工艺缺陷 C_{32}	0.23	0.25		0.24	0.07
					工程质量问题 C_{33}	0.24	0.42		0.28	0.08

由各指标的组合权重 W_i^* 与对应准则层权重 W^* 的乘积计算得到各指标的综合权重,通过综合权重判断影响水电站风险的指标重要程度,从表 5 的计算结果可知,暴雨洪水和设备故障是影响电站安全的主要风险指标。

3.4 基于组合赋权的风险评价

利用确定的模糊关系矩阵 R_i 和组合权重 W_i^* 计算,依次求得准则层自然环境风险、电力运行风险、建筑与设备风险综合评价结果 D_i ,在此基础上进行风险模糊综合评价得 D ,并将结果进行归一化处理,得到水电站风险的评价结果见表 6。

表 6 水电站风险评价结果

Tab. 6 Risk evaluation results of hydropower station

评价结果	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
D_1	0.297 9	0.313 5	0.199 8	0.222 5	0.045 1
D_2	0.408 9	0.449 9	0.111 7	0	0
D_3	0.137 2	0.236 1	0.257 6	0.035 4	0.070 7
D_4	0.285 8	0.334 0	0.188 9	0.096 8	0.038 4
\bar{D}	0.302 8	0.353 8	0.200 1	0.102 6	0.040 6

根据最大隶属度原则,可得该梯级水电站的风险级别为低风险。

3.5 评价结果分析

按最大隶属度原则分析评价结果,可知该梯级水电站风险等级整体为低风险,对比历史事故赔案,其在运行期内事故发生的概率和损失处于低位,因此评价结果与实际情况一致。从准则层模糊评价结果来看:自然环境风险对低风险的隶属度较高,实际

上该类风险的发生概率高且事故损失金额分布较广,导致其对于各风险等级的隶属度相对平均,而损失较小的事故占比大,因此该风险指标为低风险;电力运行风险发生概率不高且损失金额相对较少,整体处于低风险;对于建筑与设备风险,尽管其个别事故损失金额很高,但事故发生频率较低,因此对一般风险的隶属度较高。

对目标层的评价结果显示,一般风险隶属度值仅次于极低风险和低风险值,表明水电站在一定程度上具有风险增高的趋势。如果不采取有针对性的风控措施,该梯级水电站的风险等级将会进一步提高。

4 结 论

通过分析收集的水电站 50 例典型事故资料,根据事故致因理论确定影响水电站安全的风险因素,选取自然环境、电力运行和建筑与设备 3 个主要风险因素及对应的 13 个评价指标,建立了水电站风险因素指标体系。

依托模糊矩阵,采用 FAHP 法计算主观权重;以损失金额为基础,利用 CRITIC 法计算客观权重。采用博弈论组合赋权得到组合权重用于水电站风险评价。权重分析结果显示,暴雨洪水和设备故障两个风险指标最为重要,是影响水电站安全的主要风险。

根据统计数据 and 模糊语言进行风险等级划分,基于事故赔偿金额建立隶属度函数,结合权重结果对水电站进行模糊综合评价,结果显示水电站风险整体处于低风险状态,与事故赔案实际情况相符,表

明模型的可靠性和实用性。

参考文献(References):

- [1] 夏凡. 水电站风险控制和安全管理对策[J]. 通讯世界, 2018,5(6):178-179. (XIA F. Risk control and safety management countermeasures for hydropower stations [J]. Telecom World, 2018, 5 (6): 178-179. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1006-4222.2018.06.113.
- [2] 李玉峰,刘袁春,胡大山,等. 基于风险矩阵的水电站项目风险分级评估方法研究:以乌东德水电站为例[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(1):130-134. (LI Y F,LIU Y C,HU D S,et al. Study on risk classification assessment method of hydropower station project based on risk matrix; Taking Wudongde hydropower station as example[J]. Journal of Safety Science and Technology,2020,16(1):130-134. (in Chinese)) DOI:10.11731/j.issn.1673-193x.2020.01.021.
- [3] 周志炎. 小水电工程项目风险管理方法及应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2008. (ZHOU Z Y, Research on method and application of risk management in the small hydropower project[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese))
- [4] 李耀昌. 集控式水电站群运行维护安全风险分析及评估研究[D]. 重庆:重庆大学,2016. (LI Y C. Research on safety risk analysis and safety evaluation of operation and maintenance in centralized control hydropower station group [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016(in Chinese))
- [5] 焦峰. 祥和水电站项目经济评价与风险评价研究[D]. 长沙:中南大学,2009. (JIAO F. Study on economic evaluation of Xianghe hydropower station project[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese))
- [6] LIU Y,ECKERT C M,EARL C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements [J]. Expert Systems with Applications. 2020, 161. DOI:10.1016/j.eswa.2020.113738.
- [7] 欧春. 基于层次分析法的水电站工程的风险评价与风险管理研究[J]. 价值工程,2015,34(8):138-139. (OU C, Risk assessment and risk management of hydro-power project based on analytic hierarchy process[J]. Value Engineering, 2015, 34 (8): 138-139. (in Chinese)) DOI:10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2015.08.079.
- [8] 蒋浩鹏,孙建诚,杨文伟,等. 基于 AHP 与改进 TOPSIS 权值算法的高速公路施工方案风险评价[J]. 武汉大学学报(工学版),2020,53(8):698-703. (JIANG H P,SUN J C,YANG W W,et al. Risk evaluation of highway construction plan based on AHP and improved TOPSIS weight algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53 (8): 698-703. (in Chinese)) DOI:10.14188/j.1671-8844.2020-08-007.
- [9] 吴胜文,秦鹏,高健,等. 熵权-集对分析方法在大坝运行风险评价中的应用[J]. 长江科学院院报,2016,33(6):36-40. (WU S W,QIN P,GAO J,et al. Application of entropy weight and set pair analysis theory to risk assessment of dam operation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(6): 36-40. (in Chinese)) DOI:10.11988/ckyyb.20151101.
- [10] 贾鸿益,聂鹏,岑黛蓉,等. 基于博弈组合赋权法的南欧江七级电站初期导流方案决策[J]. 水电与新能源,2020,34(4):1-5. (JIA H Y,NIE P,CEN D R,et al. Decision making of the construction diversion scheme for Nam Ou 7 hydropower station with game theory based combination weighting method[J]. Hydropower and New Energy, 2020, 34 (4): 1-5. (in Chinese)) DOI:10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.04.001.
- [11] 陈婧,赵敏,周华,等. 基于博弈论组合赋权的姜堰区模糊综合水质评价法及应用[J]. 水电能源科学,2019,37(9):32-35,91. (CHEN J,ZHAO M,ZHOU H,et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in evaluation of water quality based game theory[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(9): 32-35,91. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SDNY.0.2019-09-009.
- [12] 潘汀超,戚蓝,田福昌,等. 组合赋权-模糊聚类算法的改进及其在洪灾风险评价的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文). 2020,18(5):38-56. (PAN T C,QI L TIAN F C, et al. Improvement of combination weighting-fuzzy clustering algorithm and its application in flood risk assessment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020,18(5):38-56. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0091.
- [13] 江新,徐平,吴园莉,等. 跨区域水电工程项目群风险多级模糊综合云评价[J]. 人民长江,2015,46(17):108-112. (JIANG X,XU P,WU Y L,et al. Risk evaluation of inter-regional hydropower projects by multi-level fuzzy comprehensive model and cloud model[J]. Yangtze River,2015,46(17):108-112. (in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.17.026.
- [14] 黄浪,吴超. 事故致因模型体系及建模一般方法与发展趋势[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(2):10-16. (HUANG L,WU C. Study on system of accident-causing model and its general modeling methods and

- development trend[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(2): 10-16. (in Chinese)) DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.02.002.
- [15] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. (QIN S K. Principle and application of comprehensive evaluation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国水利部. 水库大坝安全评价导则: SL 258—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017 (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Guidelines on dam safety evaluation; SL 258-2017[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2017. (in Chinese))
- [17] 彭雪辉, 蔡跃波, 盛金宝, 等. 中国水库大坝风险标准研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015. (PENG X H, CAI Y B, SHEGN J B, et al. Research on risk standard of reservoir dam in China[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015. (in Chinese))
- [18] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 3版. 武汉: 华中理工大学出版社, 2006. (XIE J J, LIU C P. Fuzzy mathematical method and its application[M]. 3rd ed. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2006. (in Chinese))
- [19] 张德彬, 刘国东, 王亮, 等. 基于博弈论组合赋权的TOPSIS模型在地下水水质评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 46-50, 62. (ZHANG D B, LIU G D, WANG L, et al. Application of TOPSIS model based on game theory to groundwater quality evaluation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(7): 46-50, 62. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20161231.
- [20] 苑希民, 桑林浩, 沈福新, 等. 基于模糊层次分析法的京津冀洪灾风险评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(10): 37-45. (YUAN X M, SANG L H, SHEN F X, et al. FAHP-based flood risk assessment on Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(10): 37-45. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.10.006.
- [21] 国家能源局. 水电站大坝运行安全评价导则: DL/T 5313—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014. (National Energy Administration. Guide for safety assessment of large dams for hydropower station in operation: DL/T 5313-2014 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese))
- [22] 孙博, 肖汝诚. 基于层次分析-模糊综合评价法的桥梁火灾风险评估体系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1619-1625. (SUN B, XIAO R C. Bridge fire risk assessment system based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11): 1619-1625. (in Chinese)) DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2015.11.002.
- [23] 陈悦, 顾冲时. 基于风险矩阵和Borda序值法的溃坝后果评估模型[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 1-5. (CHEN Y, GU C S. Dam break consequences assessment model based on risk matrix and Borda ordinal value method [J]. Journal of China Three Gorges Univ. (Natural Sciences), 2019, 41(5): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2019.05.001.
- [24] 谢学斌, 李德玄, 孔令燕, 等. 基于CRITIC-XGB算法的岩爆倾向等级预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 1975-1982. (XIE X B, LI D X, KONG L Y, et al. Rockburst propensity prediction model based on CRITIC-XGB algorithm [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 1975-1982. (in Chinese)) DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1049.
- [25] 王加闯, 黄明健, 过江. 基于CRITIC-有限区间云模型的边坡稳定性评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(6): 113-9. (WANG J C, HUANG M J, GUO J. Evaluation of slope stability based on CRITIC-finite interval cloud model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(6): 113-9. (in Chinese)) DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2019.06.018.

Risk evaluation of hydropower station accidents based on combination weighting of game theory

CUI Wei¹, LI Xiaoying¹, GUO Yiwei²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yangtze River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430014, China)

Abstract: The research on the risk of hydropower station mainly focuses on the construction of hydropower station, while there are few studies on the risk assessment of the hydropower plant operation. The accidents in the operation of hydropower station show a trend of diversification and complexity. It is particularly difficult to evaluate hydropower station risk level from the perspective of single risk mechanism. Therefore, based on the accident data during the operation period of the hydropower station, the risk level of the hydropower station can be analyzed effectively by the comprehensive evaluation based on the index system of risk factors.

The single weighting method in traditional risk assessment has certain limitations and the risk level of hydropower station is difficult to be objectively determined. A fuzzy comprehensive evaluation model for hydropower station risk has been established based on the FAHP-CRITIC-game theory method. The risk factors are determined by accident causation theory and the index system of risk factors has been established. The membership degree function is used to calculate the membership degree of each risk index based on the accident loss amount and the fuzzy relation matrix has been obtained. The subjective weight and objective weight of the factors are calculated by the fuzzy analytic hierarchy process and the CRITIC method respectively, and the combinatorial optimization is carried out by the game theory method to make the weighting more reasonable. The fuzzy relation matrix and combination weight are used to have the multi-level fuzzy evaluation. The risk assessment of a cascade hydropower station is carried out and the risk grade of hydropower station is determined according to the principle of maximum membership degree.

Among the natural environmental risks, the weights of torrential rains and flood and debris flow are relatively high. In the risk of power operation, the weights of current shock and overvoltage are higher. In the risk of construction and equipment, equipment failure is the main index of risk, and its importance is relatively higher than engineering quality problems. Natural environment risk and power operation risk have higher subordination degree to the low risk level, while construction and equipment risk has a high degree of subordination to the general risk level because of the relatively high probability of occurrence and loss. The results show that the risk level of the hydropower station is low risk, and the main risk indicators are torrential rains and floods and equipment failures.

According to the risk factors that affect the safety of hydropower station, the index system of risk factors is established from three aspects: natural environment, electric operation, construction and equipment, which includes 13 corresponding evaluation factors. FAHP and CRITIC methods are used to calculate the subjective and objective weight respectively and the combined weight is given by game theory, which improves the rationality of weight calculation. The membership function has been established based on the amount of accident compensation and the multi-level fuzzy comprehensive evaluation is conducted. The risk assessment of hydropower station is carried out. The risk assessment result of hydropower station is low risk and the main risk indicators are storm flood and equipment failure. The result is consistent with the practical situation of the cascade hydropower plant, which verifies the reliability and practicability of the evaluation model.

Key words: risk of hydropower station; FAHP method; CRITIC method; game theory; fuzzy comprehensive evaluation



2022年3月22日,河北省水利科学研究院“乐水溯源行”节水护水志愿服务项目启动