

引用格式:王晓辉,夏中原,兰光宇,等.变电站静态防汛能力模糊综合评估[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):60-68.

Citation: WANG Xiaohui, XIA Zhongyuan, LAN Guangyu, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of static flood control capability of substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 60-68.

变电站静态防汛能力模糊综合评估

王晓辉¹, 夏中原¹, 兰光宇¹, 王超²

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450003; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 变电站是电网输送电力的重要枢纽, 其防汛能力评估对于完善电网汛情预警系统至关重要。然而, 变电站静态防汛影响因素繁多, 其评估过程存在强烈的主观性和模糊性, 给静态评估带来了困难。为解决这一问题, 本文首先构建了变电站静态防汛能力评估指标体系, 然后提出了一种基于组合赋权的变电站静态防汛能力模糊综合评估算法。该算法采用博弈论融合层次分析法和熵权法对评估指标进行组合赋权, 最终利用模糊综合评价法得出评估结果。实验结果表明, 博弈论组合赋权方法能够很好地平衡层次分析法的主观分析和熵权法的客观分析, 计算结果与洪涝灾害致灾机理一致, 所提模糊综合评估方法合理有效, 结论置信度高, 可为实际变电站汛情预警工作提供参考和决策辅助。

关键词: 变电站防汛; 组合赋权; 层次分析法; 熵权法; 模糊综合评估

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.007 **中图分类号:** TM715 **文章编号:** 1673-9140(2024)06-0060-09

Fuzzy comprehensive evaluation of static flood control capability of substation

WANG Xiaohui¹, XIA Zhongyuan¹, LAN Guangyu¹, WANG Chao²

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450003, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Substations are important hubs for transmitting electricity in power grids, and the assessment of their flood control capabilities is crucial for improving flood warning systems of power grids. However, factors affecting the static flood control of substations are complex, and the assessment process is highly subjective and fuzzy, which poses difficulties for static evaluation. To solve this problem, a static flood control capability evaluation index system of substations is constructed, and then a fuzzy comprehensive evaluation algorithm for the static flood control capability of substations based on combination weighting is proposed. The algorithm uses game theory to combine the analytic hierarchy process and entropy weight method to weigh the evaluation indicators and finally adopts the fuzzy comprehensive evaluation method to obtain the evaluation results. The experimental results show that the game theory-based combination weighting method can balance the subjective analysis of the analytic hierarchy process and the objective analysis of the entropy weight method well, and the calculation results are consistent with the flood disaster causation mechanism. The fuzzy comprehensive evaluation method proposed in this paper is reasonable and effective, with high confidence in the conclusions, and it can provide reference and decision-making assistance for actual flood warnings of substations.

Key words: flood control of substation; combination weighting; analytic hierarchy process; entropy weight method; fuzzy comprehensive evaluation

随着经济和技术的快速发展, 变电站建设日益加快, 夏季极端暴雨天气频发, 变电站的安全运行受到了严峻挑战。目前, 提前做好防汛准备工作以

降低洪涝灾害对变电站运营的影响、保障变电站持续稳定运行、根据其自身防汛信息评估变电站静态防汛能力成为变电站安全稳定运营的主要任务^[1-4]。

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2024-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(52177110); 国网河南省电力公司电力科学研究院科技项目(52170222000G)

通信作者: 王晓辉(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事气象灾害环境下电网防汛风险预测预警技术研究; E-mail: 123875689@qq.com

变电站自身防汛信息包括孕灾环境和承灾体等多维影响因素。变电站的规模、功能和防汛要求不同,再加上防汛评估指标繁杂,人工采集数据的主观性和模糊性强,导致评估难度较大,目前尚无明确的评估方法适用于变电站防汛工作。研究表明,目前主流系统评估方法包括灰色聚类法(grey clustering method, GCM)^[5]、模糊认知图法(fuzzy cognitive map, FCM)^[6]和物元可拓法^[7]等,但针对变电站静态防汛能力评估,以上方法存在不足。GCM涉及大量人工计算,步骤繁琐;FCM主要用于定性分析,无法完成定量评估;物元可拓法会遗漏超出量化界限的评估指标,使得评估结果出现偏差。模糊综合评估法是一种基于模糊统计和模糊数学的综合评估方法,可对模糊不清或者不易度量的指标进行标准化定量处理,并将系统内所有有参考意义的评估指标都纳入考虑范畴,遵循最大隶属度原则,对系统进行科学合理地评估^[8-10]。文献[11]通过层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对地表覆盖成果质量评估指标赋予权重,使用模糊综合评估法对地表覆盖数据质量进行了评估;文献[12]建立了基于AHP的城市暴雨内涝灾害风险模糊综合评估模型,为城市灾害风险评估提供了一定的参考;文献[13]针对水资源开发问题,提出了基于熵权法(entropy weight method, EWM)和模糊综合评估法的水资源承载力评估模型,并取得了不错的评估效果。所以,本文将尝试采用模糊综合评估法对变电站静态防汛能力进行评估。

同时,在对变电站防汛系统进行评估之前,需要对评估指标进行赋权,常规方法有主观赋权法^[14]和客观赋权法^[15]。AHP是主观赋权法之一,能对非定量事件做定量化分析,可以降低不同因素、不同描述造成的影响,还可以对复杂问题进行层次化分析,构建合理有序的层次结构,并对指标权重决策过程进行数字化处理^[16];EWM是客观赋权法之一,以信息熵为基础来分析数据,综合考虑系统内多个指标因素,根据各指标数据包含的信息量确定每个指标的权重^[17]。主观赋权法根据不同场景合理确定各指标权重,主观性较强;而客观赋权法排除人为主观性的影响,通过计算得到权重,但对数据依赖性较强。

为了有效地对变电站防汛评估指标进行权重分配,本文采用主、客观赋权相结合^[18]的方法,首先使用AHP和EWM分别进行评估指标赋权,然后通过博弈论^[19]融合主、客观方法对变电站防汛指标进

行综合赋权,既考虑变电站防汛历史案例经验,又权衡实际防汛数据,最终建立科学合理的变电站静态防汛能力评估指标体系。本文将综合使用AHP、EWM和模糊综合评估法对变电站静态防汛能力评估进行建模,并通过实际变电站防汛数据进行实例评估验证。

1 变电站静态防汛能力模糊综合评估指标体系

变电站洪涝灾害风险评估是指预判在未来时间里洪涝灾害发生的可能性和灾害程度,而诱导洪涝灾害发生的原因可分为3类:1)孕灾环境——诱发洪涝灾害的地理环境;2)承灾体——承受洪涝灾害的个体对象;3)致灾因子——由孕灾环境孕育,诱发洪涝灾害的自然气象因素。评估指标选择遵循以下4条原则:1)以变电站防汛案例和先验知识作为参考标准,对变电站防汛流程的相互关系做出准确全面的分析,综合考虑变电站地址、设备、物资、人力各方面因素,使选取的指标基于客观事实;2)所选防汛因素指标尽可能具有灾害特征的指向性,以反映洪涝灾害对变电站造成的损失结果;3)避免所选防汛因素指标之间出现冗余信息,使其尽可能相互独立,相关性较低;4)所选防汛因素指标构成的指标体系应是一个拥有完整架构的变电站防汛系统。

本文重点研究变电站自身防汛能力,因此仅需考虑孕灾环境和承灾体对应的静态站点数据,即变电站地理环境数据和设备设施数据。根据上述原则,结合已知的变电站防汛历史案例经验,对变电站地址、设备、物资、人力等各方面因素进行分类、分层梳理和归纳,其中人力因素的影响可归纳为地质、设备和物资等方面,故不单独列出,建立变电站静态防汛等级评估指标体系如表1所示。

表 1 变电站静态防汛等级评估指标体系
Table 1 Evaluation indicator system of static flood control levels in substation

总目标 P ₁	一级因素 P ₂	二级因素 P ₃	
变电站静态防汛等级评估(A)	孕灾环境(B ₁)	地形地貌(C ₁)	
		土壤植被(C ₂)	
		水文情况(C ₃)	
	山洪泥石流隐患(C ₄)	承灾体(B ₂)	电压等级(D ₁)
			站址情况(D ₂)
			防汛物资储备(D ₃)
			站内排水系统(D ₄)

本文选取的孕灾环境指标即变电站地质数据,包括地形地貌、土壤植被、水文情况和山洪泥石流隐患;选取的承灾体指标即设备、物资数据包括变电站电压等级、站址情况以及防汛物资储备和站内排水系统。

2 基于组合赋权的变电站静态防汛能力模糊综合评估模型

2.1 变电站静态防汛能力模糊综合评估流程

基于组合赋权的变电站静态防汛能力模糊综合评估流程如图1所示。首先,建立变电站静态防汛能力评估指标体系,根据变电站防汛历史案例和先验知识,对评估指标数据做量化处理,并对变电站静态防汛能力进行划分;然后,利用AHP和EWM分别对评估指标进行主观赋权和客观赋权,最后,使用博弈论将2种赋权结合,得到综合主、客观的变电站静态防汛能力评估指标权重分配模型;最后,使用模糊综合评估法进行变电站静态防汛能力评估。

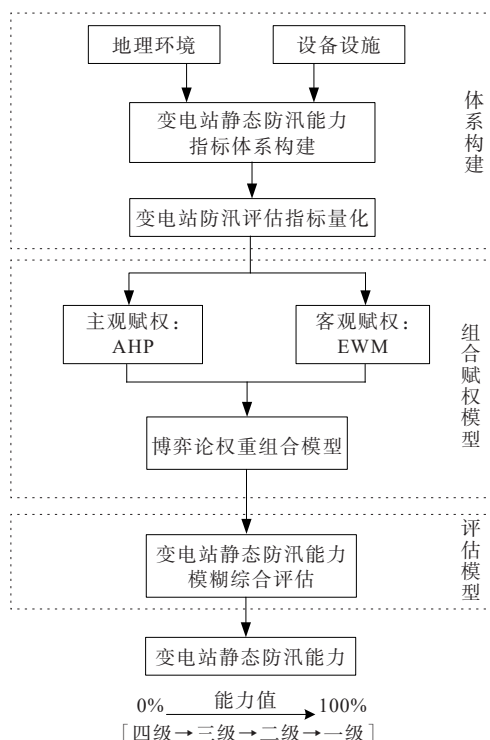


图1 基于组合赋权的变电站静态防汛能力模糊综合评估框架

Figure 1 Fuzzy comprehensive evaluation framework of static flood control capability of substation based on combination weighting

2.2 变电站静态防汛能力评估指标组合赋权模型

本文提出基于AHP和EWM的变电站静态防

汛能力评估组合赋权模型,对评估指标进行赋权。首先,采用AHP对防汛评估指标进行主观赋权。依据1-9比例标度法^[20],建立防汛评估指标判断矩阵 $I=(a_{ij})_{n \times n}$, n 为指标个数,计算防汛评估指标权重向量 $W_1=(w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n)$, $j=1, 2, \dots, n$,各防汛评估指标的权重可以通过计算每个防汛评估指标判断矩阵的特征向量得出,即

$$Iw = \lambda_{\max} w \quad (1)$$

式中, I 为变电站防汛评估指标判断矩阵; λ_{\max} 为 I 的最大特征值; w 为 λ_{\max} 对应的特征向量,将 w 进行归一化处理得到 \bar{w} ,即 \bar{w} 为当前层次的各个防汛评估指标对于上一层某个防汛评估指标的权重向量^[22]。接着进行一致性检验,计算一致性指标 P_{CI} 如下:

$$P_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

平均随机一致性指标 P_{RI} 取值如表2所示。

表2 随机一致性指标 P_{RI} 取值

Table 2 Values of random consistency indicator P_{RI}

阶数 n	P_{RI}	阶数 n	P_{RI}
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49

计算一致性比率 P_{CR} 如下:

$$P_{CR} = P_{CI}/P_{RI} \quad (3)$$

式中,当 $0 < P_{RI} < 0.10$ 时,表示判断矩阵 I 的一致性偏离程度相对较小,每个指标的权重值分配合理^[21]。

然后,采用EWM对防汛评估指标进行客观赋权。构造防汛评估指标判断矩阵 $H=(a_{ij})_{m \times n}$, m 为评估对象的个数; n 为评估对象的评估指标个数;结合定性描述型数据的标准化处理方式,计算信息熵值 $E=(e_1, e_2, \dots, e_j, \dots, e_n)$, $j=1, 2, \dots, n$,其定义为

$$e_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

式中, $p_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij}$,且当 $p_{ij} = 0$ 时,令 $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$;

得到指标的信息熵值,计算各指标对应权重 $W_2=(w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2j}, \dots, w_{2n})$, $j=1, 2, \dots, n$,其中 w_{2j} 为

$$w_{2j} = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (5)$$

最后,采用博弈论对防汛评估指标进行组合赋权。将 AHP 和 EWM 得到的防汛评估指标权重向量看作博弈双方,即 $\varphi = [W_1 W_2]$;将权重占比 ζ_1, ζ_2 作为收益集,得到:

$$\zeta = \{\zeta_1, \zeta_2\} \quad (6)$$

式中, $0 \leq \zeta_1, \zeta_2 \leq 1, \zeta_1 + \zeta_2 = 1$ 。接着构造拉格朗日函数^[22]:

$$F(\zeta_1, \zeta_2) = \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^n (\zeta_1 W_{1j} + \zeta_2 W_{2j}) a_{ij} \right] \quad (7)$$

在满足 $\zeta_1^2 + \zeta_2^2 = 1$ 的条件下,使 $F(\zeta_1, \zeta_2)$ 最大,可求出收益集 $\zeta = \{\zeta_1, \zeta_2\}$,再进行归一化处理,得到最终的变电站静态防汛能力评估指标权重向量 W ,即

$$W = \frac{\zeta_1}{\zeta_1 + \zeta_2} W_1 + \frac{\zeta_2}{\zeta_1 + \zeta_2} W_2 \quad (8)$$

2.3 变电站静态防汛能力模糊综合评估

依据上述变电站静态防汛能力评估指标赋权模型,可以采用模糊综合评估法,实现变电站的静态防汛能力评估。本文构建变电站静态防汛能力评估指标集合,即建立一级指标 P_1 、二级指标 P_2 ;接着构建变电站静态防汛能力评估集合 Q ;对变电站静态防汛能力评估指标体系中各二级指标 P_2 做出综合评估,评价集 Q 对 P_2 中各评估标准均相同,其中 P_2 的权重向量为

$$W_{P_2} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (9)$$

式中, n 为二级指标个数,且 $w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$,该权重向量由文 2.2 组合赋权模型获取。

再对各二级指标 P_2 做综合评估,设 R_{P_2} 为 P_2 评级矩阵,可得二级指标综合评估向量为

$$K_{P_2} = W_{P_2} R_{P_2} \quad (10)$$

在此基础上,对各一级指标 P_1 做综合评估,设 R_{P_1} 为 P_1 评级矩阵,即

$$R_{P_1} = K_{P_2} \quad (11)$$

取 P_1 的权重向量为 W_{P_1} ,最后得到变电站静态防汛能力评估向量 K 为

$$K = W_{P_1} \cdot R_{P_1} = (k_1, k_2, k_3, \dots, k_m) \quad (12)$$

3 实例评估

3.1 评估指标权重量化

本文所采用的变电站静态防汛能力评估数据由国网河南省电力公司提供,其中包括 25 座变电站

的地理环境数据和设备设施数据。为等级化变电站静态特征属性,本文参照变电站汛情历史案例与实际工程背景,进行统计学分析并结合专家经验,分别根据孕灾环境和承灾体数据等静态相关评估指标对状态风险评估值进行量化评分,表 3、4 分别展示了地理环境因素和设备设施数据量化结果。

表 3 地理环境因素量化

Table 3 Quantification on geographical environmental factors

一级因素	状态评估风险值	二级因素	描述	状态评估风险值
地理环境 (B ₁)	(0, 1)	地形地貌 (C ₁)	站点高于周围地面公路,且有排水沟	0.1
			站点高于周围地面公路,且无排水沟	0.3
			站点低于周围地面公路,且有排水沟	0.4
			站点低于周围地面公路,且无排水沟	0.8
	(0, 1)	(C ₂)	附近有大量植被	0.1
			附近有适量植被	0.3
			附近有少量植被	0.6
			附近无植被	0.8
		(C ₃)	附近无河流	0.2
			附近有河流	0.5
			附近有运河	0.6
			附近有湖泊、水库	0.8
(C ₄)	附近有湖泊、水库	0.7		
	曾经发生过泥石流	0.3		
		山洪泥石流隐患	0.1	

表 4 设备设施数据量化

Table 4 Quantification on facility and equipment data

一级因素	状态评估风险值	二级因素	描述	状态评估风险值
设备设施 (B ₂)	(0, 1)	电压等级 (D ₁)	≤220 kV	0.1
			220 kV	0.5
			500 kV	0.7
			1 000 kV	0.9
	(0, 1)	(D ₂)	电压等级高于等于 220 kV	0.2
			低于频率为 1% 的洪水及历史最高内涝水位	0.7
			高于频率为 1% 的洪水及历史最高内涝水位	0.1
		(D ₂)	电压等级低于 220 kV	0.1
			低于频率为 2% 的洪水及历史最高内涝水位	0.7
			高于频率为 2% 的洪水及历史最高内涝水位	0.7

续表4

一级因素	状态评估风险值	二级因素	描述	状态评估风险值
			物资储备齐全	0.1
		防汛物资储备(D ₃)	物资储备轻度缺失	0.3
			物资储备中度缺失	0.5
			物资储备重度缺失	0.7
			物资储备极度缺失	0.9
		站内排水系统(D ₄)	排水系统完善	0.2
			排水系统轻度损坏	0.4
			排水系统中度损坏	0.7
			排水系统重度损坏	0.9

本文选用嵩山地区衡山变电站进行算例展示,依据表3、4做量化处理,结果如表5所示。

表5 衡山变电站数据量化

Table 5 Quantification on Hengshan substation data

评估指标	描述	量化结果
B ₁		0.7
C ₁	站点高于周围地面公路,且无排水沟	0.3
C ₂	附近有适量植被	0.3
C ₃	附近有河流	0.5
C ₄	无泥石流隐患	0.1
B ₂		0.8
D ₁	110 kV	0.1
D ₂	高于频率为1%的洪水及历史最高内涝水位	0.7
D ₃	物资储备轻度缺失	0.3
D ₄	排水系统完善	0.2

3.2 评估指标赋权

本文根据变电站静态防汛能力评估指标集合,在量化评分基础上,分别基于AHP和EWM对评估指标进行主观赋权和客观赋权,最后使用博弈论将2种赋权结合。首先采用AHP计算指标主观权重。使用1-9比例标度法建立判断矩阵 I_B 、 I_C 、 I_D :

$$I_B = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_C = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/3 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 3 & 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_D = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/2 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/5 \\ 2 & 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 5 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

通过式(1)计算一级指标权重向量 w_{1B} ,二级指标权重向量 w_{1C} 、 w_{1D} ,并进行归一化,得到:

$$\bar{w}_{1B} = (0.667, 0.333)$$

$$\bar{w}_{1C} = (0.152, 0.117, 0.290, 0.441)$$

$$\bar{w}_{1D} = (0.161, 0.100, 0.252, 0.487)$$

由此得到各权重向量之后进行一致性检验,计算结果如表6所示。

由表6可知,判断矩阵 I_B 、 I_C 和 I_D 符合一致性检验,所以权重向量 w_{1B} 、 w_{1C} 、 w_{1D} 都具有合理性。

表6 判断矩阵一致性检验

Table 6 Consistency test of judgment matrix

判断矩阵	权重向量	λ_{max}	n	P_{CI}	P_{RI}	P_{CR}	一致性检验
I_B	(0.667, 0.333)	2.000	2	0	0	0	通过
I_C	(0.152, 0.117, 0.290, 0.441)	4.142	4	0.047	0.9	0.052	通过
I_D	(0.161, 0.100, 0.252, 0.487)	4.041	4	0.014	0.9	0.016	通过

采用EWM计算客观权重方法如下。构建影响因素判断矩阵 H ,此时需要多个评估对象,故添加嵩山地区其他3座变电站即前程变电站、米河变电站和航海变电站的相关信息。本文用这4座变电站的静态站点数据建立判断矩阵 H_B 、 H_C 和 H_D ,其中 H_B 表示一级指标地理环境 B_1 和设备设施 B_2 的判断矩阵; H_C 表示二级指标地形地貌 C_1 、土壤植被 C_2 、水文情况 C_3 和山洪泥石流隐患 C_4 的判断矩阵; H_D 表示二级指标电压等级 D_1 、站址情况

D_2 、防汛物资储备 D_3 和站内排水系统 D_4 的判断矩阵。本文对这3个判断矩阵进行标准化,并通过式(4)计算得到各因素的信息熵 $E_B = (0.765, 0.729)$, $E_C = (0.694, 0.718, 0.786, 1)$ 和 $E_D = (1, 0.793, 0.718, 0.729)$,再通过式(5)计算变电站一级和二级指标的权重向量 $\bar{w}_{2B} = (0.464, 0.536)$ 、 $\bar{w}_{2C} = (0.382, 0.352, 0.266, 0)$ 、 $\bar{w}_{2D} = (0, 0.272, 0.371, 0.357)$ 。采用博弈论组合AHP权重 ζ_1 和EWM权重 ζ_2 ,各因素组合权重结果如表7所示。

由表 7 分析可知,对于衡山变电站而言,AHP 显示孕灾环境变电站地址数据中,山洪泥石流隐患相较于其他二级指标被赋权重较高,在承灾体变电站设备、物资数据中,站内排水系统权重显著高于其他设备物资因素,权重分布相较而言较为集中,能体现专家的先验主观性,但主观性过强易造成客观科学性的缺失;从 EWM 的计算过程和结果看,所有的地址、设备和物质等孕灾环境和承灾体指标权重较 AHP 更离散客观,但这种完全从数据角度获取的权重系数往往忽略了历史先验知识,而且从洪涝灾害研究角度而言,防灾能力关键指标可通过较高的权重系数表征来体现,其结果显示单一 EWM 显然难以体现这种差异性;博弈论的计算结果较好地平衡了主观和客观计算方法,其计算结果与洪涝灾害致灾规律基本一致,较好地体现了防汛指标赋权的科学性和合理性。

表 7 衡山变电站 3 种权重计算结果

Table 7 Calculation results of three weights for Hengshan Substation

因素	AHP 权重	EWM 权重	组合权重
孕灾环境(B ₁)	0.667	0.464	0.551
承灾体(B ₂)	0.333	0.536	0.449
地形地貌(C ₁)	0.152	0.382	0.283
土壤植被(C ₂)	0.117	0.352	0.251
水文情况(C ₃)	0.290	0.266	0.276
山洪泥石流隐患(C ₄)	0.441	0	0.189
电压等级(D ₁)	0.161	0	0.069
站址情况(D ₂)	0.100	0.272	0.198
防汛物资储备(D ₃)	0.252	0.371	0.320
站内排水系统(D ₄)	0.487	0.357	0.413

3.3 模糊综合评估

本文对变电站防汛经典历史案例进行统计学分析,结合专家经验对变电站静态防汛能力进行等级划分,具体如表 8 所示,并构建变电站静态防汛能力评估集合 $Q = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\} = \{\text{“四级”}, \text{“三级”}, \text{“二级”}, \text{“一级”}\}$,分别对应无风险、轻风险、一般风险和重大风险。

表 8 变电站静态防汛等级划分

Table 8 Classification of static flood control levels in substation

等级	风险值区间
一级	[0,0.3)
二级	[0.3,0.6)
三级	[0.6,0.9)
四级	[0.9,1.0]

本文为了消除定性描述数据对评估结果带来的误差,通过变电站防汛历史案例分析,结合嵩山地区衡山变电站实际工程背景,利用二级指标集合对一级指标中各个因素进行评估,整理结果如表 9 所示。

表 9 衡山变电站防汛风险评估

Table 9 Flood control risk evaluation in Hengshan Substation

一级指标	二级指标	风险概率			
		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
孕灾环境(B ₁)	地形地貌(C ₁)	0.3	0.3	0.2	0.2
	土壤植被(C ₂)	0.2	0.2	0.5	0.1
	水文情况(C ₃)	0.3	0.4	0.1	0.2
	山洪泥石流隐患(C ₄)	0.3	0.2	0.3	0.2
承灾体(B ₂)	电压等级(D ₁)	0.1	0.1	0.4	0.4
	站址情况(D ₂)	0.2	0.1	0.5	0.2
	防汛物资储备(D ₃)	0.1	0.2	0.5	0.2
	站内排水系统(D ₄)	0.3	0.3	0.2	0.2

根据评估结果得到的 P₂ 评级矩阵如下:

$$R_C = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.1 & 0.2 \\ 0.3 & 0.2 & 0.3 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$R_D = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4 \\ 0.2 & 0.1 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}$$

二级指标组合权重向量 W_{BC} 、 W_{BD} 与评级矩阵 R_C 、 R_D 相乘,得出各个指标因素对防汛风险等级的模糊子集的隶属程度,并通过式(10)得到二级指标综合评估向量为

$$K_{BC} = (0.275, 0.284, 0.266, 0.175)$$

$$K_{BD} = (0.202, 0.215, 0.369, 0.214)$$

由此可以看出,对于该变电站静态防汛能力指标体系,地理环境因素的防汛能力为“三级”,其隶属度为 28.4%;设备设施因素的防汛能力为“二级”,其隶属度为 36.9%。再根据式(11)得到 P₁ 评级矩阵 R_B ,结合一级指标组合权重向量 W_{AB} ,得到的变电站防汛风险等级评估向量如下:

$$K = W_{AB} \cdot R_B = (0.242, 0.253, 0.312, 0.193)$$

隶属度统计结果如图 2 所示。依据以上计算结果,该变电站静态防汛能力评估集合 $Q = \{\text{“四级”}, \text{“三级”}, \text{“二级”}, \text{“一级”}\}$ 各隶属度分别为 24.2%、25.3%、31.2% 和 19.3%,根据最大隶属度原则,最终确定该变电站静态防汛能力为“二级”。

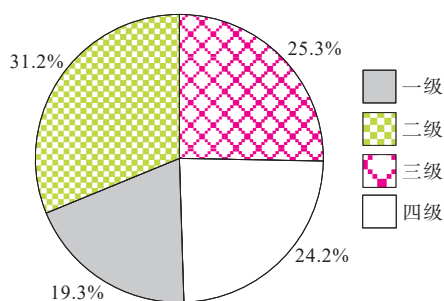


图2 衡山变电站静态防汛能力模糊集合隶属度

Figure 2 Fuzzy set membership of static flood control capability of Hengshan Substation

为开展本次研究,河南省电力科学研究院对辖区嵩山、安阳、平顶山、焦作和新乡共25座变电站进行了调研,对变电站设备设施数据和地理环境数据进行量化评分,采用本文提出的变电站静态防汛能力模糊综合评估方法得出的评估结果如表10所示。

表10 变电站风险评估

Table 10 Risk evaluation of substation

序号	变电站名称	风险概率				评估结果
		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	
1	嵩山变电站	0.359	0.267	0.111	0.263	四级
2	前程变电站	0.239	0.138	0.196	0.427	一级
3	米河变电站	0.194	0.177	0.219	0.410	一级
4	衡山变电站	0.242	0.253	0.312	0.193	二级
5	航海变电站	0.190	0.209	0.180	0.421	一级
6	花园口变电站	0.264	0.268	0.211	0.257	三级
7	刘申庄变电站	0.249	0.169	0.227	0.355	一级
8	农科变电站	0.269	0.230	0.122	0.379	一级
9	同苑变电站	0.111	0.263	0.266	0.360	一级
10	紫辰变电站	0.247	0.293	0.206	0.254	三级
11	扁鹊变电站	0.118	0.301	0.351	0.230	二级
12	商城变电站	0.113	0.298	0.351	0.238	二级
13	易都变电站	0.085	0.319	0.418	0.178	二级
14	熊背变电站	0.286	0.333	0.245	0.136	三级
15	潭王变电站	0.078	0.312	0.410	0.200	二级
16	百泉变电站	0.306	0.281	0.157	0.257	四级
17	顿坊店变电站	0.308	0.302	0.163	0.227	四级
18	凤泉变电站	0.146	0.251	0.205	0.398	一级
19	共城变电站	0.161	0.295	0.230	0.314	一级
20	卫辉变电站	0.314	0.329	0.148	0.209	三级
21	李固变电站	0.143	0.294	0.202	0.361	一级
22	牧野变电站	0.318	0.239	0.114	0.329	一级
23	上乐变电站	0.280	0.267	0.125	0.328	一级
24	王村变电站	0.184	0.207	0.304	0.305	一级
25	协和变电站	0.268	0.260	0.134	0.338	一级

由表10可知,嵩山变电站、新乡市顿坊店变电站和百泉变电站防汛风险等级为四级,嵩山变电站风险概率最高。嵩山地区花园口变电站、紫辰变电站、平顶山市熊背变电站和卫辉变电站为三级。通过河南地区高程图、水系图和森林分布图分析这些地区的地理环境后发现:安阳、平顶山、焦作和新乡地势较低,嵩山略高;新乡、焦作、平顶山水系发达,嵩山存在少量水域,安阳水域非常少;这些地区森林覆盖率较低。河南省地质灾害统计数据表明:滑坡、崩塌和泥石流等灾害分布以新乡、嵩山和平顶山最为集中,焦作比较分散,安阳地质灾害情况最轻。静态防汛能力风险评估结果与实际情况基本一致,既反映了地形地貌、土壤植被、水文情况和山洪泥石流隐患等孕灾环境的影响,也计及了变电站电压等级、站址情况、防汛物资储备和站内排水系统等防汛设施配置因素,所以本文提出的变电站静态防汛能力模糊综合评估方法合理有效。根据风险评估结果建议,嵩山变电站、顿坊店变电站和百泉变电站应加强站内防汛设施建设,加大防汛物资配给;花园口变电站、紫辰变电站、熊背变电站和卫辉变电站应适当增加防汛物资的供给。

4 结语

本文研究了变电站自身洪涝灾害防御能力问题,选取了孕灾环境和孕灾体等若干因素作为评估指标,采用AHP和EWM对评估指标进行组合赋权,构建了变电站静态防汛能力等级模糊综合评估模型,通过实例展示了完整的计算过程,对25座变电站进行了静态防汛风险评估。单站实例结果表明,在AHP的主观定性分析过程中,同一级要素下二级要素间的排序高度符合孕灾承灾机理,但不同级要素下的二级要素排序则存在一定偏差,例如土壤植被比站址情况权重大,一级要素权重进一步加大了这个差异,但从洪涝灾害形成机理和现场调研来看,站址情况比土壤植被更重要。熵权定量分析通过数值客观地确定要素之间的权重,较好地处理了二级指标间的关系,但在一级指标权重与真实值之间还存在一定差距,而这一特性与定性评估相反。博弈论较好地平衡了主观和客观分析,计算结果与洪涝灾害致灾机理大多一致,但也存在个别要素如站内排水系统权重偏高的问题。多站静态防汛风险评估实验表明,评估结果与实际变电站地理环境因素和站内防汛相关情况相符,不仅反映了地

形地貌、土壤植被、水文情况和山洪泥石流隐患的影响,也计及了变电站电压等级、站址情况、防汛物资储备和站内排水系统等因素,本文提出的变电站静态防汛能力评估指标体系较为客观,防汛能力模糊综合评估方法合理有效,结论置信度高。

本文为及时运维变电站、加强站内防汛设施建设提供了依据,结合变电站微气象预报,可提前调度防汛物资,以降低洪涝灾害对变电站运营的影响。未来研究将考虑实时的动态气象数据,例如降雨量、温湿度和最大风速等,结合地理环境和设备设施,对变电站的动态防汛风险进行实时评估,也为输配电设备洪涝灾害防控及其资源配置提供依据。

参考文献:

- [1] 王津宇,兰光宇,卢明,等.面向变电站防汛的熵权分配混杂风险评估[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(7):74-82.
WANG Jinyu, LAN Guangyu, LU Ming, et al. Hybrid risk assessment of entropy weight allocation for substation flood control[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2023, 35(7):74-82.
- [2] 陈浩,王健.基于差分粒子群算法的变电站选址定容规划[J].电力工程技术,2018,37(3):118-122.
CHEN Hao, WANG Jian. The optimization of substation locating and sizing based on DEPSO algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3):118-122.
- [3] 龙鑫玉,石英,林朝俊.基于改进 Transformer 的电网防汛风险概率预测[J].武汉理工大学学报,2022,44(9):79-88.
LONG Xinyu, SHI Ying, LIN Chaojun. Flood risk probability prediction for power grid based on improved transformer[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(9):79-88.
- [4] 张伟骏,李智诚,陈大玮,等.配网侧分布式储能系统的随机优化配置和选址方法[J].高压电器,2023,59(7):125-135.
ZHANG Weijun, LI Zhicheng, CHEN Dawei, et al. Stochastic optimal configuration and site selection method of grid-side distributed energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7):125-135.
- [5] 朱文君,陈金涛,赵航,等.基于改进灰色聚类法的配电台区电能表质量评价方法[J].电测与仪表,2022,59(12):189-195.
ZHU Wenjun, CHEN Jintao, ZHAO Fang, et al. Quality evaluation method of electricity meter of distribution station area based on improved grey clustering method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12):189-195.
- [6] AL-MANJI S, LOVETT J, MITCHELL G. Factors affecting disaster resilience in Oman: integrating stakeholder analysis and fuzzy cognitive mapping[J]. Risk, Hazards & Crisis in Public Policy, 2021, 12(1):29-50.
- [7] WANG X D, ZHENG W D, TIAN W, et al. Groundwater hydrogeochemical characterization and quality assessment based on integrated weight matter-element extension analysis in Ningxia, upper Yellow River, Northwest China[J]. Ecological Indicators, 2022, 135: 108525.
- [8] 刘亚鑫,蒯红.计及碳交易与条件风险值的虚拟电厂竞价策略[J].电力工程技术,2023,42(6):179-188.
LIU Yaxin, LIAN Hong. Bidding strategy of virtual power plant considering carbon trading and conditional value at risk[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6):179-188.
- [9] 孙辉,张国庆,高博,等.采用组合赋权法的智能变电站继电保护设备状态模糊综合评估[J].电测与仪表,2020,57(7):23-28+34.
SUN Hui, ZHANG Guoqing, GAO Bo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of relay protection equipment status in intelligent substations based on combination weighting method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7):23-28+34.
- [10] 徐文宝,周建华.基于改进模糊层次综合评判法的输电线路舞动预警[J].电力工程技术,2021,40(5):107-113.
XU Wenbao, ZHOU Jianhua. Early warning model of transmission line galloping based on improved fuzzy hierarchical comprehensive evaluation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5):107-113.
- [11] 吕霖冰,陈海鹏,陈宇恒.地表覆盖成果质量的模糊综合评价模型与方法[J].测绘通报,2021(11):136-139+160.
LYU Linbing, CHEN Haipeng, CHEN Yuheng. Quality assessment for land cover classification products based on fuzzy-AHP synthesis model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(11):136-139+160.
- [12] 张玉华,蔡甜.城市暴雨内涝灾害风险模糊综合评价体系构建研究[J].水利规划与设计,2019(11):103-107.
ZHANG Yuhua, CAI Tian. Construction of fuzzy comprehensive evaluation system for urban rainstorm and waterlogging disaster risk[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(11):103-107.
- [13] 陈海涛,徐嘉豪.基于熵权模糊综合评价模型的河南省水资源承载力评价[J].人民珠江,2020,41(1):48-53+116.
CHEN Haitao, XU Jiahao. Evaluation of water resources carrying capacity in Henan Province based on entropy-weight fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Pearl River, 2020, 41(1):48-53+116.
- [14] 施莹轩,孟军,梁浩,等.配电网故障抢修质量与效率评

- 价体系研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 143-147+154.
- SHI Xuanxuan, MENG Jun, LIANG Hao, et al. Quality and efficiency evaluation system of distribution network fault repair[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(5): 143-147+154.
- [15] 谢捷, 刘玮, 徐月顺, 等. 基于AHP-熵权法的西宁地区汛期暴雨灾害风险评估[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(3): 60-74.
- XIE Jie, LIU Wei, XU Yueshun, et al. Rainstorm disaster risk assessment in Xining area in rainy season based on the AHP weight method and entropy weight method[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 60-74.
- [16] 向思阳, 蔡泽祥, 刘平, 等. 基于AHP-反熵权法的配电网低碳运行模糊综合评价[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(4): 69-76.
- XIANG Siyang, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the low-carbon operation of distribution network based on AHP-anti-entropy method[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(4): 69-76.
- [17] 郝如海, 智勇, 祁莹, 等. 基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(1): 73-78.
- HAO Ruhai, ZHI Yong, QI Ying, et al. Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable energy penetration power grid at sending end[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1): 73-78.
- [18] 戴国华, 戴睿, 张琪瑞, 等. 基于主客观赋权相结合的省级电网发展诊断分析方法与实证研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(2): 110-118.
- DAI Guohua, DAI Rui, ZHANG Qirui, et al. Empirical study and analysis of provincial power grid development diagnosis based on the combination of a subjective and objective weighting method[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(2): 110-118.
- [19] 贺春光, 檀晓林, 周兴华, 等. 基于博弈论组合赋权的智能配电网项目投资效益评价[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(1): 161-167.
- HE Chunguang, TAN Xiaolin, ZHOU Xinghua, et al. Investment benefit evaluation of intelligent distribution network project based on game theory combination weighting[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(1): 161-167.
- [20] 胡述筌, 李海锋, 刘婉怡. 基于层次分析法-熵值法的轨道交通土建系统风险评价体系研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(7): 74-79.
- HU Shuquan, LI Haifeng, LIU Wanyi. Study on risk assessment system of rail transit civil infrastructure based on AHP-entropy method[J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(7): 74-79.
- [21] 刘明吉, 王秀峰, 黄亚楼. 数据挖掘中的数据预处理[J]. *计算机科学*, 2000, 27(4): 54-57.
- LIU Mingji, WANG Xiufeng, HUANG Yalou. Data preprocessing in data mining[J]. *Computer Science*, 2000, 27(4): 54-57.
- [22] 闫威, 陈长怀, 陈燕. 层次分析法一致性指标的临界值研究[J]. *数理统计与管理*, 2011, 30(3): 414-423.
- YAN Wei, CHEN Changhuai, CHEN Yan. The threshold value of consistency index for analytic hierarchy process[J]. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2011, 30(3): 414-423.