

DOI: 10.7667/PSPC180450

基于最优权重和区间灰数动态灰靶的变压器状态评估

杨欢红¹, 丁宇涛¹, 周敬嵩², 俞京锋², 朱斌泉², 王洁¹

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网浙江省德清供电公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 目前变压器状态评估未考虑多阶段指标信息的变化趋势, 且评估指标的权重确定相对简单, 造成整体评估的偏差。针对此现状, 提出一种基于最优权重和区间灰数动态灰靶的变压器状态评估方法。选取状态评估指标, 将指标数据分为效益型和成本型两类, 并进行规范化处理。采用层次分析法赋予指标的主观权重; 引入方差和均差来衡量指标数据的波动性, 赋予指标的客观权重, 依据相对熵原理建立优化模型确定指标的最优权重。考虑变压器多阶段状态信息集结和指标的变化趋势, 提出基于区间灰数动态灰靶评估方法, 以综合靶心度来评估变压器的状态。利用某变电站多台变压器多阶段的历史数据进行算例分析, 验证了该状态评估方法的有效性和准确性。

关键词: 变压器; 状态评估; 最优权重; 区间灰数; 动态灰靶

A condition assessment method of transformers based on optimal weight and dynamic grey target with interval grey number

YANG Huanhong¹, DING Yutao¹, ZHOU Jingsong², YU Jingfeng², ZHU Binquan², WANG Jie¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Zhejiang Deqing Power Supply Company, Huzhou 313000, China)

Abstract: For the time being, the condition assessment of transformer doesn't take the variation of multi-stage information into consideration and the weight determination of assessment index is relatively simple, causing the overall assessment bias. Against that, this paper proposes a transformer condition assessment model based on optimal weight and dynamic grey target with interval grey number. First of all, it selects the status assessment indicator and classifies the index data into efficiency index and cost index and then makes normalized treatment. Secondly, AHP is used to assign the subjective weights of the indicators; the variance difference and the mean difference are introduced to measure the volatility of the interval index data and the objective weight is given. The optimal weight of the index is determined by establishing the optimal model based on relative entropy principle. Next, an assessment method based on dynamic grey target evaluation model of interval grey number is proposed considering the accumulation of transformer phase information and the dynamic change of index, which seeks approaching degree to evaluate the state of transformers. Finally, the multi-stage historical data of multiple transformers in a substation is analyzed, and the objectivity and validity of the method are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777119).

Key words: transformer; condition assessment; optimal weight; interval grey number; dynamic grey target

0 引言

电力变压器是变电站最关键的设备之一, 运行状态受多种因素的影响, 选取合适的评估指标和方法对变压器进行准确的状态评估具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777119); 浙江省电力科技项目(2017-HZJTKJ-03)

变压器的内部结构复杂, 状态信息多且具有不确定性和模糊性, 国内外研究者先后引入了多种智能算法对变压器状态进行评估。文献[1]考虑变压器的模糊性和灰色性, 提出灰色聚类与变权重相结合的变压器状态评估方法; 文献[2]对马尔可夫状态评估模型进行了修正, 提出全态状态评估模型; 文献[3]引入专家评估信任因子改进集值统计专家估价法, 融合多阶段信息对定性指标进行评估; 文献[4]

提出了合作博弈法和云模型的变压器状态评估体系, 通过云模型标定变压器各状态等级的隶属度进行评估。还有一些文献通过 D-S 证据理论^[5-7]、可拓分析法^[8-9]、序关系-熵权法^[10]、雷达图法^[11]、TOPSIS 法^[12-13]、电介质法^[14-15]等算法对变压器状态进行评估。变压器运行是一个动态过程, 表征其运行状态的信息是时刻变化的, 以上的研究文献都只是将动态变化的信息静态化处理, 主要存在以下缺陷: 1) 研究并未将某个时间范围内变压器评估指标的变化趋势考虑进来, 没有充分挖掘多阶段信息中蕴含的变压器运行状态的动态变化趋势; 2) 确定权重时, 一般采用单一层次分析法或熵权法确定权重或简单线性加权确定组合权重, 存在评估的片面性。

鉴于以上分析, 提出基于最优权重和区间灰数动态灰靶的变压器状态评估方法。采用层次分析法确定评估指标的主客观权重, 引入方差和均差来确定客观权重, 依据相对熵原理将主、客观权重结合确定最优权重。考虑变压器多阶段信息集结和指标变化趋势, 利用区间灰数动态灰靶评估方法求取综合靶心度。以综合靶心度作为评估变压器状态的“健康指数”, 为检修人员快速识别故障、优先安排检修提供理论支持。通过实际变电站内变压器的历史数据分析, 证明该评估方法的可行性。

变压器状态评估的流程如图1所示。

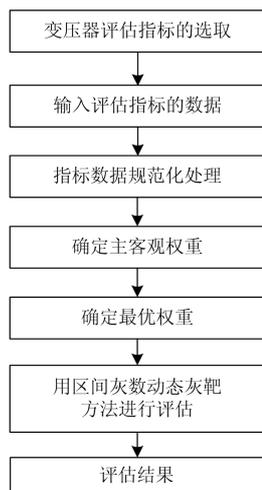


图 1 变压器状态评估流程图

Fig. 1 Flow chart of transformer state assessment

1 变压器状态评估指标选取

电力变压器的状态监测量众多, 要对变压器的状态进行全面、可靠、有效的评估, 就需要选取合理的评估指标, 从而构建科学的指标评估体系。电力变压器故障机理复杂, 发生故障通常会伴随有多个状态量的变化, 评估指标的选取原则多种多样。

文献[7]和文献[11]选取油色谱分析, 以油中的溶解特征气体浓度和产气速率作为评估指标; 文献[1-3]从定量和定性两个角度考虑, 从油化试验、油色谱分析、电气试验、附件运行情况、检修记录等多个方面选取特征指标。

本文根据我国 GB/T7252-2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》和 DL/596-1996《电力设备预防性试验规程》, 从油中溶解气体、电气试验、绝缘油试验三个方面选取 10 个状态参量作为变压器状态评估指标^[16], 如表 1 所示。

表 1 变压器状态评估指标

		c_1 油中微水/(mg/L)
绝缘油试验		c_2 油介损/%
		c_3 油击穿电压/kV
	电气试验	c_4 绝缘电阻吸收比/%
c_5 极化系数		
c_6 绕组介损损耗因素/%		
油中溶解气体	c_7 H_2 含量/(μ L/L)	
	c_8 C_2H_2 含量/(μ L/L)	
	c_9 总烃含量/(μ L/L)	
	c_{10} 总烃相对产气速率/%	

2 评估指标值规范化处理

设某动态多属性评估问题, 由 m 个拟定的评估对象组成的评估对象集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, 每个对象评估 n 个指标组成的指标集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 相应的属性权重 $\omega_j (j=1, 2, \dots, n)$, 阶段样本点为 $t (t=1, 2, \dots, T)$, 相应的权重为 $\tau(t) (t=1, 2, \dots, T)$ 。变压器的状态信息是时刻动态变化的, 在阶段 t 指标 c_j 下的指标样本值用区间灰数 $a'_{ij}(\otimes)$ 表示^[17-18]。

对于以区间灰数 $a'_{ij}(\otimes) = [a_{ij}^{Lt}, a_{ij}^{Ut}]$ 表示的状态信息, 可以构成区间矩阵 $A'(\otimes) = [a'_{ij}(\otimes)]_{m \times n}$ 。其中, a_{ij}^{Lt} 为区间指标数据的下界, a_{ij}^{Ut} 为区间指标数据的上界。

2.1 变压器指标值的规范化

变压器的评估指标可以分为效益型指标和成本型指标, 数值越大越优的指标称为效益型指标, 数值越小越优的指标称为成本型指标。变压器指标数据的量纲不一致, 因此需要对数据进行规范化处理。

效益型指标规范化

$$b'_{ij}(\otimes) = [b_{ij}^{Lt}, b_{ij}^{Ut}] = \left[\frac{a_{ij}^{Lt}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^{Ut}}, \frac{a_{ij}^{Ut}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^{Lt}} \right] \quad (1)$$

成本型指标规范化

$$b'_{ij}(\otimes) = [b_{ij}^{Lt}, b_{ij}^{Ut}] = \left[\frac{y_{ij}^{Lt}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}^{Ut}}, \frac{y_{ij}^{Ut}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}^{Lt}} \right] \quad (2)$$

式中: $y_{ij}^{Lt} = \max_{1 \leq i \leq m} a_{ij}^{Lt} - a_{ij}^{Lt} + \min_{1 \leq i \leq m} a_{ij}^{Lt}$; $y_{ij}^{Ut} = \max_{1 \leq i \leq m} a_{ij}^{Ut} - a_{ij}^{Ut} + \min_{1 \leq i \leq m} a_{ij}^{Ut}$ 。

式中: b_{ij}^{Lt} 为规范化处理后区间指标数据的下界; b_{ij}^{Ut} 为规范化处理后区间指标数据的上界。

2.2 变压器指标变化差值的规范化

指标变化差值的规范化与指标值规范化处理稍有不同,若采用式(1)和式(2)规范化处理步骤,规范化的指标在阶段间的波动性和变化趋势未被挖掘,不能以统一的形式反映变化趋势的“好”与“差”,且与原始信息不符。因此,对变压器指标变化差值进行如下规范化处理。

效益型指标规范化

$$e'_{ij}(\otimes) = [e_{ij}^{Lt}, e_{ij}^{Ut}] = \left[\frac{a_{ij}^{Lt}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^{Ut}}, \frac{a_{ij}^{Ut}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^{Lt}} \right] \quad (3)$$

成本型指标规范化

$$e'_{ij}(\otimes) = [e_{ij}^{Lt}, e_{ij}^{Ut}] = \left[\frac{y_{ij}^{Lt}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}^{Ut}}, \frac{y_{ij}^{Ut}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}^{Lt}} \right] \quad (4)$$

式中: $y_{ij}^{Lt} = \max_{1 \leq i \leq l} a_{ij}^{Lt} - a_{ij}^{Lt} + \min_{1 \leq i \leq l} a_{ij}^{Lt}$; $y_{ij}^{Ut} = \max_{1 \leq i \leq l} a_{ij}^{Ut} - a_{ij}^{Ut} + \min_{1 \leq i \leq l} a_{ij}^{Ut}$ 。

指标变化差值的规范化

$$\Delta_{ij}^{t,t+1}(\otimes) = e_{ij}^{t+1}(\otimes) - e_{ij}^t(\otimes) \quad (5)$$

3 最优权重

为了更贴近地反映变压器的状态,评估过程中权重的确定至关重要。依据相对熵原理将主、客观权重相结合求取指标的最优权重,既避免专家主观权重的随意性,又避免客观权重过于挖掘数据信息的缺陷。

3.1 主观权重

主观权重是依据专家意见或决策者态度赋予评估指标的相对重要程度,常用的方法如层次分析法^[19]、相对比较赋权法等。本文采用的层次分析法,主要步骤如下:

1) 构造成对比较矩阵 A 。根据 Satty 标度对指标重要性进行两两比较, a_{ij} 表示第 i 个评价指标相对第 j 个指标的比较结果, $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 。

2) 求解成对比较矩阵 A 的最大特征根 λ_{\max} 对应的归一化特征向量即所要求的权向量

$$W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}。$$

3) 检验一致性。求解一致性比率 $CR = CI / RI$, 其中 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ 为一致性指标, RI 为随机一致性指标。如果一致性比率 $CR < 0.1$, 则认为不一致程度满足要求,反之则需要重新调整成对比较矩阵 A 。

3.2 客观权重

客观权重是根据指标值的大小,运用一定的数学方法计算,反映指标间的区分程度。变压器运行数据具有模糊性、灰色性的特点,引入方差 T 和均差 V 来衡量指标数据波动性的大小。定义方差 T 和均差 V 分别为

$$T_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\omega_j b'_{ij}(\otimes) - \omega_j \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b'_{kj}(\otimes)]^2 = \omega_j \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d^2(b'_{ij}(\otimes), b'_j(\otimes)) \quad (6)$$

$$V_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\omega_j b'_{ij}(\otimes) - \omega_j \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b'_{kj}(\otimes)] = \omega_j \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d(b'_{ij}(\otimes), b'_j(\otimes)) \quad (7)$$

式中: $b'_j(\otimes) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b'_{kj}(\otimes)$, $d(b'_{ij}(\otimes), b'_j(\otimes))$ 表示阶段 t 各指标平均值与各区间指标值的距离。记 $\sigma_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d^2(b'_{ij}(\otimes), b'_j(\otimes))$, $\delta_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d(b'_{ij}(\otimes), b'_j(\otimes))$ 。

在阶段 t , 设 n 个指标的总方差、总均差之和为 $F(\omega)$, 为求各指标的权重 ω_j , 应满足 $F(\omega)$ 最大。构造目标函数, 如式(8)。

$$\max F(\omega) = \omega_j \sum_{j=1}^n (\alpha \sigma_j + \beta \delta_j) \quad (8)$$

式中: $\alpha + \beta = 1$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$ 。求解目标函数, 得到指标 c_j 的权重 ω_j 为

$$\omega_j = (\alpha \sigma_j + \beta \delta_j) / \sum_{j=1}^n (\alpha \sigma_j + \beta \delta_j) \quad (9)$$

调整 α 和 β 的数值, 求得指标的客观权重。

3.3 相对熵原理确定最优权重

相对熵也称为叉熵,在信息论或者概率论中,相对熵用来描述两个概率分布之间的差异。设 $W_0 = \{\omega_{01}, \omega_{02}, \dots, \omega_{0n}\}$ 和 $W_k = \{\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}\}$ 为同一事件集上的两个概率分布,相对熵反映两个概率分布之间的“距离”^[20-21]。

相对熵原理的思想就是使综合权重与各单一权重之间的相对熵总和最小^[22]。为了综合主、客观权重,根据相对熵原理建立如下优化模型。设最优权

重合成结果为 $W_0 = \{\omega_{01}, \omega_{02}, \dots, \omega_{0n}\}$, 则有

$$\min \sum_{k=1}^l D_k(W_0 : W_k), \quad \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n \omega_{0j} = 1 \\ \omega_{0j} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $D_k(W_0 : W_k) = \sum_{j=1}^n \omega_{0j} \ln \frac{\omega_{0j}}{\omega_{kj}}$ 为第 k 个概率分布与 W_0 的相对熵; l 为概率分布的个数。

利用 Lagrange 函数, 求解上述最优权重模型可以得到

$$\omega_{0j} = \frac{\prod_{k=1}^l (\omega_{kj})^{1/l}}{\sum_{j=1}^n \prod_{k=1}^l (\omega_{kj})^{1/l}} \quad (11)$$

4 区间灰数动态灰靶状态评估

4.1 多阶段信息集结的状态评估

在变压器运行阶段 t , 确定最佳指标值序列 $b^+ = (b_1^+, b_2^+, \dots, b_n^+)$ 为期望靶心, $b_j^+ = \max_{i=1,2,\dots,m} b_{ij}^+$; 确定最劣指标值序列 $b^- = (b_1^-, b_2^-, \dots, b_n^-)$ 为边缘靶心, $b_j^- = \min_{i=1,2,\dots,m} b_{ij}^-$ 。其中, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

阶段 t 变压器运行状态关于指标 c_j 处的期望靶心系数为

$$\gamma(b_{ij}^+, b_j^+) = \frac{\min_i \min_j d(b_{ij}^+, b_j^+) + 0.5 \max_i \max_j d(b_{ij}^+, b_j^+)}{d(b_{ij}^+, b_j^+) + 0.5 \max_i \max_j d(b_{ij}^+, b_j^+)} \quad (12)$$

变压器 s_i 在阶段 t 的期望靶心度为

$$\gamma(b_i^t, b^{t+}) = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot \gamma(b_{ij}^t, b_j^+) \quad (13)$$

根据各阶段 t 的权重值 $\tau(t)$, 得到变压器 s_i 的期望靶心度为

$$\gamma(b_{i+}) = \sum_{t=1}^T \tau(t) \cdot \gamma(b_i^t, b^{t+}) \quad (14)$$

阶段 t 变压器运行状态关于指标 c_j 处的边缘靶心系数为

$$\gamma(b_{ij}^-, b_j^-) = \frac{\min_i \min_j d(b_{ij}^-, b_j^-) + 0.5 \max_i \max_j d(b_{ij}^-, b_j^-)}{d(b_{ij}^-, b_j^-) + 0.5 \max_i \max_j d(b_{ij}^-, b_j^-)} \quad (15)$$

变压器 s_i 在阶段 t 的边缘靶心度为

$$\gamma(b_i^t, b^{t-}) = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot \gamma(b_{ij}^t, b_j^-) \quad (16)$$

根据各阶段 t 的权重值 $\tau(t)$, 得到变压器 s_i 的边缘靶心度为

$$\gamma(b_{i-}) = \sum_{t=1}^T \tau(t) \cdot \gamma(b_i^t, b^{t-}) \quad (17)$$

变压器 s_i 的相对靶心度为

$$f_i = \frac{\gamma(b_{i+})}{\gamma(b_{i-}) + \gamma(b_{i+})} \quad (18)$$

多阶段信息集结的状态评估, 是考虑各阶段变压器的现状信息, 得到的相对靶心度 f_i 反映了变压器在整个被评估阶段的状态表现。以 f_i 的大小对变压器状态的优劣进行排序, 合理安排检修进度。

4.2 指标变化趋势的状态评估

设变压器评估指标 c_j 关于 s_i 在 $t \sim t+1$ 相邻阶段的规范化差值为 $\Delta_{ij}^{t,t+1}(\otimes)$ 。若 $\Delta_{ij}^{t,t+1}(\otimes) < 0$, 表示指标 c_j 关于变压器 s_i 在 $t \sim t+1$ 相邻阶段的变化趋势是期望发生的; 若 $\Delta_{ij}^{t,t+1}(\otimes) > 0$, 则表示指标 c_j 关于变压器 s_i 在 $t \sim t+1$ 相邻阶段的变化趋势是不希望发生的。变压器状态指标变化差值越小, 表明运行状态越平稳; 反之, 变压器指标变化幅度大, 表明出现了某些异常。

变压器 s_i 关于指标 c_j 在所有相邻阶段的差值序列记为 $\Delta_{ij} = (\Delta_{ij}^{1,2}, \Delta_{ij}^{2,3}, \dots, \Delta_{ij}^{T-1,T})$ 。确定 c_j 在各阶段的变化趋势最好的序列 $\Delta_{j+} = (\Delta_{j+}^{1,2}, \Delta_{j+}^{2,3}, \dots, \Delta_{j+}^{T-1,T})$ 为指标 c_j 变化趋势期望靶心, $\Delta_{j+}^{t,t+1} = \max_{i=1,2,\dots,m} \Delta_{ij}^{t,t+1}$; 确定 c_j 在各阶段的变化趋势最差的序列 $\Delta_{j-} = (\Delta_{j-}^{1,2}, \Delta_{j-}^{2,3}, \dots, \Delta_{j-}^{T-1,T})$ 为指标 c_j 变化趋势边缘靶心, $\Delta_{j-}^{t,t+1} = \min_{i=1,2,\dots,m} \Delta_{ij}^{t,t+1}$ 。其中, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

变压器 s_i 关于指标 c_j 的变化差值序列在阶段 $t \sim t+1$ 间的期望靶心系数为

$$\gamma(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1}) = \frac{\min_i \min_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1}) + 0.5 \max_i \max_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1})}{d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1}) + 0.5 \max_i \max_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1})} \quad (19)$$

假设不考虑阶段权重的影响, 令各阶段权重相等, 得到变压器 s_i 关于指标 c_j 的期望靶心度为

$$\gamma(\Delta_{j+}) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} \gamma(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1}) \quad (20)$$

根据各指标 c_j 的权重值 ω_j , 得到变压器 s_i 的期望靶心度为

$$\gamma(\Delta_{i+}) = \sum_{j=1}^n \omega_j \gamma(\Delta_{j+}) \quad (21)$$

变压器 s_i 关于指标 c_j 的变化差值序列在阶段 $t \sim t+1$ 间的边缘靶心系数为

$$\gamma(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1}) = \frac{\min_i \min_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1}) + 0.5 \max_i \max_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1})}{d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1}) + 0.5 \max_i \max_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1})} \quad (22)$$

指标 c_j 下变压器 s_i 的边缘靶心度为

$$\gamma(\Delta_{i-}) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} \gamma(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1}) \quad (23)$$

根据各指标 c_j 的权重值 ω_j , 得到变压器 s_i 的边缘靶心度为

$$\gamma(\Delta_{i-}) = \sum_{j=1}^n \omega_j \gamma(\Delta_{ij-}) \quad (24)$$

变压器 s_i 的差值相对靶心度为

$$f_{\Delta_i} = \frac{\gamma(\Delta_{i-})}{\gamma(\Delta_{i-}) + \gamma(\Delta_{i+})} \quad (25)$$

基于指标变化趋势的状态评估, 考虑各变压器相邻阶段间的差值表现, 反映了变压器各指标的变化趋势, 得到的差值相对靶心度 f_{Δ_i} 反映了变压器在被评估阶段的状态变化趋势。

4.3 综合状态评估

单一考虑变压器多阶段信息或指标的变化趋势, 不能很好地体现变压器的真实状态。本文将基于多阶段现状信息的状态评估和指标变化趋势的状态评估两者相结合, 以综合靶心度作为衡量变压器综合状态的参数。变压器 s_i 的综合靶心度值为

$$z_i = \mu f_i + (1-\mu) f_{\Delta_i} \quad (26)$$

式中: $0 < \mu < 1$ 为优选因子, 若评估者注重变压器各阶段信息现状, 令 $0.5 < \mu < 1$; 若评估者更加注重变压器状态的变化趋势, 则令 $0 < \mu < 0.5$; 若同时注重两方面的重要性, 令 $\mu = 0.5$ 。

4.4 状态等级划分

将靶心度作为评估变压器状态的“健康指数”, 按照有关标准和规定, 将变压器状态分为“正常”、“良好”、“一般”、“异常”和“严重”五个层次。同时, 对实际采集的大量样本数据和结果进行了分析和计算, 结合专家的诊断结果, 表征变压器健康状态的靶心度与检修建议的对应关系如表 2 所示。

表 2 变压器状态等级划分

状态等级	靶心度范围	状态描述及检修建议
1	[0.80,1.00)	正常状态, 安全稳定, 延期检修
2	[0.60,0.80)	良好状态, 计划安排检修
3	[0.50,0.60)	一般状态, 优先安排检修
4	[0.40,0.50]	异常状态, 尽快安排检修
5	[0.33,0.40]	严重状态, 立即停电检修

5 算例分析

为验证状态评估方法的可行性和有效性, 取某变电站 4 台变压器 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 的 4 个阶段、每阶段相隔 3 天的指标数据进行算例分析, 历史运行数据如表 3 所示。

表 3 变压器运行数据

t	s_i	$c_1/(mg/L)$	$c_2/\%$	c_3/kV	$c_4/\%$	c_5	$c_6/\%$	$c_7/(\mu L/L)$	$c_8/(\mu L/L)$	$c_9/(\mu L/L)$	$c_{10}/\%$
1	s_1	[12.02,13.57]	[1.72,2.77]	[48.52,55.03]	[1.28,1.61]	[1.72,1.96]	[0.26,0.28]	[158.98,200.64]	[0.18,0.21]	[105.42,113.90]	[7.56,9.32]
	s_2	[10.79,17.50]	[2.20,2.50]	[50.11,50.17]	[1.41,1.50]	[2.32,2.47]	[0.32,0.39]	[178.30,181.30]	[0.27,0.29]	[120.68,123.34]	[6.74,8.19]
	s_3	[12.10,15.84]	[2.41,2.72]	[45.50,57.19]	[1.68,1.75]	[1.91,2.34]	[0.21,0.34]	[170.82,180.33]	[0.18,0.23]	[106.37,122.54]	[8.23,10.22]
	s_4	[11.34,16.70]	[1.53,2.11]	[52.04,53.53]	[1.45,1.48]	[1.78,1.91]	[0.27,0.35]	[168.88,172.60]	[0.20,0.26]	[105.80,113.90]	[10.64,10.79]
2	s_1	[16.03,21.95]	[1.78,2.30]	[48.78,51.77]	[1.46,1.50]	[1.88,1.97]	[0.37,0.39]	[172.10,197.56]	[0.18,0.32]	[110.63,114.58]	[8.51,9.77]
	s_2	[21.20,25.10]	[1.67,1.76]	[45.88,50.50]	[1.20,1.40]	[1.81,2.45]	[0.18,0.25]	[170.81,186.30]	[0.24,0.26]	[110.41,113.80]	[7.56,7.74]
	s_3	[17.02,21.27]	[1.52,2.41]	[50.22,55.28]	[1.46,1.64]	[1.72,2.01]	[0.35,0.44]	[168.78,180.33]	[0.18,0.20]	[108.91,110.42]	[7.19,8.23]
	s_4	[13.59,14.50]	[1.57,2.45]	[49.83,52.17]	[1.44,1.49]	[1.74,2.03]	[0.24,0.28]	[172.06,173.61]	[0.21,0.28]	[110.63,112.68]	[9.32,10.61]
3	s_1	[16.32,21.38]	[2.17,2.55]	[48.45,52.29]	[1.51,1.55]	[1.72,2.31]	[0.29,0.43]	[170.67,201.36]	[0.23,0.27]	[106.37,123.08]	[6.94,7.56]
	s_2	[16.79,17.54]	[1.73,2.42]	[48.22,48.30]	[1.44,1.72]	[2.30,2.44]	[0.28,0.36]	[169.69,182.33]	[0.19,0.26]	[112.25,114.58]	[7.19,8.13]
	s_3	[14.52,15.17]	[1.75,1.87]	[49.51,55.78]	[1.28,1.61]	[1.78,1.91]	[0.26,0.29]	[168.98,201.64]	[0.18,0.21]	[109.42,117.23]	[7.26,9.21]
	s_4	[16.42,17.20]	[2.12,2.33]	[50.64,51.23]	[1.47,1.52]	[2.34,2.42]	[0.34,0.39]	[175.31,178.39]	[0.23,0.28]	[123.62,129.31]	[8.39,8.71]
4	s_1	[15.27,18.35]	[2.32,2.64]	[47.37,51.69]	[1.62,1.70]	[1.98,2.21]	[0.20,0.35]	[172.84,181.23]	[0.19,0.28]	[116.37,129.24]	[8.93,10.52]
	s_2	[16.65,16.98]	[1.96,2.08]	[51.72,52.29]	[1.54,1.67]	[1.70,1.81]	[0.27,0.35]	[171.87,179.69]	[0.21,0.27]	[115.21,119.91]	[10.09,11.34]
	s_3	[18.52,20.94]	[1.78,2.19]	[49.22,54.13]	[1.49,1.62]	[1.80,1.98]	[0.37,0.39]	[174.16,190.61]	[0.19,0.22]	[111.28,114.23]	[8.71,9.11]
	s_4	[20.19,24.41]	[1.82,1.93]	[49.11,53.63]	[1.48,1.51]	[1.71,2.11]	[0.18,0.27]	[177.82,187.38]	[0.25,0.27]	[120.51,123.83]	[7.76,8.14]

5.1 最优权重计算

5.1.1 主观权重

以绝缘油试验为例说明, 用层次分析法确定各项指标的权重, 利用九标度法形成对比较矩阵 A 。

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

利用 Matlab2014a 求出 λ_{\max} 为 3.068 7, 最大特征值对应的特征向量 $W = \{0.938 5, 0.263 9, 0.222 6\}$, 一致性比率检验 $CR = 0.025 1 < 0.1$, 满足要求。因此, 对特征向量进行归一化处理, 即为绝缘油试验油各指标的权重: 0.658 6、0.185 2、0.156 2。同理得到, 电气试验各指标的权重: 0.746 8、0.133 8、0.119 4; 油中溶解气体各指标的权重: 0.565 9、0.040 0、0.126 7、0.267 4; 绝缘油试验油、电气试验、油中

溶解气体这 3 大项的权重: 0.259 9、0.327 6、0.412 5。最终得到各指标的主观权重为

$$W_1 = \{0.171 2, 0.048 1, 0.040 6, 0.244 7, 0.043 8, 0.039 2, 0.233 4, 0.016 5, 0.052 2, 0.110 3\}$$

5.1.2 客观权重

取阶段 1 的 4 台变压器的历史运行数据, 首先按式(1)和式(2)进行指标值规范化; 其次计算各指标平均值与各区间指标值的距离, 进一步求得 σ_j 和 δ_j ; 最后, 为使 $F(\omega)$ 最大, 设置合理的 α 和 β , 最终得到各指标的客观权重:

$$W_2 = \{0.076 0, 0.251 5, 0.041 3, 0.122 6, 0.095 7, 0.111 8, 0.041 2, 0.111 3, 0.040 7, 0.107 9\}$$

此时, 目标函数 $F(\omega) = 0.051 7$ 。权重计算的详细数据如表 4 所示。

表 4 客观权重计算的相关数据
Table 4 Related data of weight calculation

相关数据	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
$d(b_{j_1}(\otimes), b_j(\otimes))$	0.052 0	0.063 1	0.005 9	0.054 6	0.034 6	0.056 7	0.028 6	0.047 3	0.013 0	0.021 4
$d(b_{j_2}(\otimes), b_j(\otimes))$	0.037 5	0.095 0	0.020 0	0.029 1	0.056 5	0.062 9	0.012 5	0.075 8	0.025 7	0.057 4
$d(b_{j_3}(\otimes), b_j(\otimes))$	0.009 0	0.079 3	0.023 2	0.079 5	0.020 3	0.041 7	0.005 5	0.032 7	0.011 1	0.016 3
$d(b_{j_4}(\otimes), b_j(\otimes))$	0.018 0	0.148 3	0.014 1	0.024 8	0.035 3	0.010 2	0.016 5	0.014 9	0.012 5	0.070 4
$d^2(b_{j_1}(\otimes), b_j(\otimes))$	0.002 7	0.004 0	0.000 0	0.003 0	0.001 2	0.003 2	0.000 8	0.002 2	0.000 2	0.000 5
$d^2(b_{j_2}(\otimes), b_j(\otimes))$	0.001 4	0.009 0	0.000 4	0.000 8	0.003 2	0.004 0	0.000 2	0.005 7	0.000 7	0.003 3
$d^2(b_{j_3}(\otimes), b_j(\otimes))$	0.000 1	0.006 3	0.000 5	0.006 3	0.000 4	0.001 7	0.000 0	0.001 1	0.000 1	0.000 3
$d^2(b_{j_4}(\otimes), b_j(\otimes))$	0.000 3	0.022 0	0.000 2	0.000 6	0.001 2	0.000 1	0.000 3	0.000 2	0.000 2	0.005 0
δ_j	0.029 1	0.096 4	0.015 8	0.047 0	0.036 7	0.042 9	0.015 8	0.042 7	0.015 6	0.041 4
σ_j	0.001 1	0.010 3	0.000 3	0.002 7	0.001 5	0.002 3	0.000 3	0.002 3	0.000 3	0.002 2
ω_j	0.076 0	0.251 5	0.041 3	0.122 6	0.095 7	0.111 8	0.041 2	0.111 3	0.040 7	0.107 9

5.1.3 最优权重

基于相对熵原理建立的优化模型, 利用式(11)求取各指标的最优权重, 此时 $l = 2, n = 10$ 。

$$W_0 = \{0.131 8, 0.127 1, 0.047 3, 0.200 2, 0.074 8, 0.076 5, 0.113 3, 0.049 6, 0.053 3, 0.126 1\}$$

5.2 变压器的综合状态评估

以阶段 1 变压器 s_1 举例说明, 取该阶段指标数据, 确定最佳指标值序列 $b^+ = ([0.199 4, 0.386 2], [0.255 8, 0.350 6], [0.241 0, 0.291 5], [0.265 0, 0.300 7], [0.262 4, 0.293 0], [0.242 4, 0.367 9], [0.235 2, 0.298 5], [0.267 3, 0.299 0], [0.253 9, 0.264 6], [0.284 5, 0.296 8])$, 变压器 s_1 关于指标 c_j 的靶心系数分别为 0.766 5、0.436 4、0.771 8、0.496 4、

0.918 2、0.637 3、0.614 7、1、1、0.636 3; 依据式(13)指标权重分别乘各指标的期望靶心系数得到变压器 s_1 在阶段 1 的期望靶心度 0.655 8。对于求解边缘靶心度, 先确定最差指标值序列 $b^- = ([0.177 8, 0.299 5], [0.162 4, 0.267 1], [0.210 7, 0.255 7], [0.201 9, 0.254 3], [0.194 6, 0.226 6], [0.159 1, 0.264 2], [0.209 7, 0.256 8], [0.178 2, 0.216 5], [0.221 8, 0.244 4], [0.180 2, 0.225 3])$, 计算变压器 s_1 与边缘靶心关于指标 c_j 的靶心系数分别为 0.421 6、0.463 3、0.689 7、0.738 9、0.410 2、0.358 2、0.712 7、0.342 4、0.624 8、0.408 0; 根据式(16), 指标权重分别乘各指标的边缘靶心系数得到变压器 s_1 在阶段 1 的边缘靶心度 0.483 9。同样地, 变压器 s_2 、 s_3 、 s_4 在阶段 1 的期望靶心度分

别为 0.511 8、0.596 3、0.696 2，边缘靶心度分别为 0.756 4、0.604 9、0.562 2。各阶段变压器的相对靶心度如表 5 所示。基于指标变化趋势的靶心度计算步骤按式(19)一式(25)进行，这里不再赘述。变压器在指标 c_j 下的差值相对靶心度如表 6 所示。

表 5 不同阶段变压器的相对靶心度

Table 5 Transformer relative approaching degree in different stages

阶段 t	变压器			
	s_1	s_2	s_3	s_4
1	0.553 2	0.465 0	0.443 2	0.498 3
2	0.432 5	0.481 1	0.515 6	0.529 4
3	0.531 7	0.535 3	0.577 7	0.505 1
4	0.508 2	0.519 0	0.434 4	0.503 0

表 6 不同指标下变压器的差值相对靶心度

Table 6 Transformer difference relative approaching degree under different indicators

指标	变压器			
	s_1	s_2	s_3	s_4
c_1	0.482 9	0.436 0	0.535 1	0.570 1
c_2	0.553 2	0.461 5	0.440 2	0.499 7
c_3	0.623 7	0.494 1	0.575 7	0.603 8
c_4	0.444 8	0.515 2	0.648 7	0.560 9
c_5	0.621 8	0.404 9	0.500 7	0.606 1
c_6	0.547 7	0.502 7	0.578 1	0.472 9
c_7	0.441 8	0.432 0	0.550 0	0.596 4
c_8	0.483 4	0.427 3	0.556 2	0.642 3
c_9	0.634 4	0.399 3	0.414 0	0.560 8
c_{10}	0.558 5	0.659 4	0.500 2	0.365 8

综合靶心度计算时，假设各阶段信息和变化趋势两者同等重要，因此 μ 取 0.5。各变压器基于多阶段现状信息、发展趋势、综合两方面因素的相对靶心度、综合靶心度见图 2 所示。

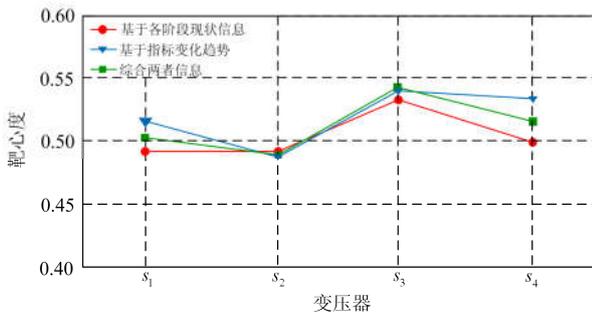


图 2 各变压器的评估结果

Fig. 2 Evaluation result of each transformer

从表 5 可以看出：变压器的相对靶心度在 4 个

阶段都有不同程度的变化，体现了变压器状态时刻动态变化的特点。而在每个阶段，4 台变压器状态的优劣顺序也各不相同，检修人员可以根据状态的优劣合理地安排检修的进度。

从表 6 可以看出：变压器 s_1 的指标 c_4 和 c_7 差值相对靶心度较小，说明绝缘电阻吸收比下降幅度大、 H_2 的含量增长快。变压器 s_2 的指标 c_5 和 c_9 差值相对靶心度较小，说明极化系数、总烃含量增长快。变压器 s_3 的指标 c_2 和 c_9 差值相对靶心度较小，说明油介损、总烃含量增长快。变压器 s_4 的指标 c_{10} 差值相对靶心度较小，说明总烃相对产气速率增加快。通过数据的横向分析，可以清晰地展现变压器关于各指标的变化趋势，指标波动幅度大，说明变压器运行状态不稳定，存在发生故障的潜在可能，需要引起检修运维人员的关注。

从图 2 可以看出：单纯考虑多阶段信息的集结， s_1 、 s_2 均处于异常状态；综合考虑现状信息和指标的变化趋势，变压器 s_2 处于异常状态。从表 6 的差值相对靶心度可以看出，变压器 s_2 的指标 c_5 、 c_7 、 c_8 、 c_9 增加迅速，相对应的故障类型为变压器绝缘受潮或局部过热故障。现场实际停电检修的情况为：变压器 s_1 正常，但变压器 s_2 绝缘油分解出水分，钟罩内磁屏蔽处的固定螺丝屏蔽帽有镀层脱落现象，导致极化系数、总烃含量等超标。

5.3 不同评估方法对比

为进一步验证所提评估方法的准确性，从某变电站获取了不同变压器 120 组测试数据，其中 35 组故障数据来自绝缘受潮、绕组故障、绝缘老化、局部放电等 9 种故障类型，85 组为正常数据。评估时把等级为一般和良好的都归结为正常状态，利用 120 组测试数据做了两种对比测试：

(1) 将测试数据代入不同的评估方法进行分析计算，识别率对比如表 7 所示。

(2) 评估时都考虑各阶段信息和指标变化趋势，但在权重选择时分别采用主观权重、客观权重和最优权重进行分析计算，识别率对比如表 8 所示。

表 7 不同评估方法的识别率对比

Table 7 Comparison of recognition rates of different assessment methods

评估方法	识别率	
	正常数据识别率/%	故障数据识别率/%
基于各阶段信息	89.4	88.6
基于指标变化趋势	90.6	91.4
本文方法	95.3	94.3

表 8 采用不同权重的识别率对比

Table 8 Comparison of recognition rates using different weights

权重类别	识别率	
	正常数据识别率/%	故障数据识别率/%
主观权重	87.1	82.9
客观权重	89.4	85.7
最优权重	95.3	94.3

6 结论

(1) 对于变压器状态数据具有模糊性、动态性的特点, 提出基于区间灰数动态灰靶的变压器状态评估方法。该方法从纵向、横向两方面充分挖掘评估矩阵所蕴含的信息, 同时反映了各变压器在各阶段的现状表现和关于各指标的变化趋势。

(2) 依据相对熵原理建立优化模型求取评估指标的最优权重, 减小了主、客观单一赋权造成的评估偏差。算例分析表明, 采用最优权重进行评估准确率更高。

(3) 提出的评估方法不仅能够客观、合理地评估变压器的状态, 而且能够通过指标变化判断故障类型, 为检修人员寻找故障原因、制定检修策略提供有益参考。

参考文献

- [1] 宋人杰, 刘瑞英, 王林. 灰色定权聚类 and 变权模式在变压器状态评估中的应用研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(3): 75-80.
SONG Renjie, LIU Ruiying, WANG Lin. Application of grey fixed weight clustering and variable weight model in transformer condition evaluation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(3): 75-80.
- [2] 张桦, 魏本刚, 李可军, 等. 基于变压器马尔可夫状态评估模型和熵权模糊评价方法的风险评估技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 134-140.
ZHANG Hua, WEI Bengang, LI Kejun, et al. Research on risk assessment technology based on Markov state evaluation model for power transformer and entropy weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 134-140.
- [3] 孙莹, 高贺, 李可军, 等. 基于多时段信息融合的配电变压器运行状态评估模型[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2054-2062.
SUN Ying, GAO He, LI Kejun, et al. Condition assessment model of distribution transformer based on multi-period information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2054-2062.
- [4] 徐岩, 陈昕. 基于合作博弈和云模型的变压器状态评估方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 88-93.
XU Yan, CHEN Xin. Transformer status assessment based on cooperative game and cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 88-93.
- [5] 曾丹乐, 杜修明, 盛戈皞, 等. 基于因子分析法与 D-S 证据理论的变压器关键参量提取和状态评估[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 7-14.
ZENG Danle, DU Xiuming, SHENG Gehao, et al. Key parameters extraction and condition evaluation of transformer based on factor analysis and D-S evidence theory[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 7-14.
- [6] 廖瑞金, 孟繁津, 周年荣, 等. 基于集对分析和证据理论融合的变压器内绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 474-481.
LIAO Ruijin, MENG Fanjin, ZHOU Nianrong, et al. Assessment strategy for inner insulation condition of power transformer based on set-pair analysis and evidential reasoning decision-making[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 474-481.
- [7] 赵云峰, 张永强, 聂德鑫, 等. 基于模糊和证据理论的变压器本体绝缘状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 57-62.
ZHAO Yunfeng, ZHANG Yongqiang, NIE Dexin, et al. Application of fuzzy and evidence theory in power transformers condition assessment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 57-62.
- [8] 廖瑞金, 张懿议, 黄飞龙, 等. 基于可拓分析法的电力变压器本体绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 521-526.
LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, HUANG Feilong, et al. Power transformer condition assessment strategy using matter element analysis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 521-526.
- [9] 王涛云, 马宏忠, 崔杨柳, 等. 基于可拓分析和熵值法的 GIS 状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 115-120.
WANG Taoyun, MA Hongzhong, CUI Yangliu, et al. Condition evaluation of gas insulated switchgear based on extension analysis and entropy method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 115-120.
- [10] 马纪, 刘希喆. 基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 87-93.
MA Ji, LIU Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method[J]. Power System Protection and

- Control, 2017, 45(6): 87-93.
- [11] 吴翔, 何怡刚, 张大波, 等. 基于最优权重与雷达图的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 55-60.
WU Xiang, HE Yigang, ZHANG Dabo, et al. Transformer condition assessment based on optimal weight and radar map[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 55-60.
- [12] 卜宪存, 张海英. 基于区间数 TOPSIS 法的电力变压器状态评估[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 205-209.
BU Xiancun, ZHANG Haiying. Power transformer based on intervals TOPSIS[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 205-209.
- [13] LIU Zifa, ZHANG Jiechao, LI Cong. Spatial electric load forecasting based on AHP and TOPSIS method[C]// International Conference on Advances in Power System Control, July 29, 2010, Hong Kong, China: 8-11.
- [14] 王岭, 蔡金锭. 基于剩余电压时域特征的变压器绝缘状态评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 130-137.
WANG Ling, CAI Jinding. Assessment strategy on transformer insulation condition based on residual voltage time domain characteristics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 130-137.
- [15] 谢松, 蔡金锭, 林韩. 变压器油纸绝缘状态评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 123-129.
XIE Song, CAI Jinding, LIN Han. Assessment method for transformer oil-paper insulation condition[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 123-129.
- [16] 杨杰明, 董玉坤, 曲朝阳, 等. 基于区间权重和改进云模型的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 102-109.
YANG Jieming, DONG Yukun, QU Chaoyang, et al. Condition assessment for transformer based on interval weight and improved cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 102-109.
- [17] 闫书丽. 灰靶决策方法及应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
YAN Shuli. Research on grey target decision method and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [18] 王俊杰, 党耀国, 李雪梅, 等. 基于区间灰数的灰色定权聚类[J]. 中国管理科学, 2015, 23(10): 139-146.
WANG Junjie, DANG Yaoguo, LI Xuemei, et al. Grey clusters method with fixed weights based on the interval grey number[J]. China Management Science, 2015, 23(10): 139-146.
- [19] 杨德新. 基于模糊层次分析法的高校教师绩效评价模型的构建[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 31-35.
YANG Dexin. The construction of university teachers' performance evaluation model based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2015, 43(4): 31-35.
- [20] 王如伟, 孔剑虹, 吴港, 等. 一种基于相对熵组合赋权法的区间联络线选取方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 65-72.
WANG Ruwei, KONG Jianhong, WU Gang, et al. Study on selection of interval tie line based on combinatorial weighting method of relative entropy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 65-72.
- [21] 何大义, 陈小玲, 许加强. 多属性群决策问题中基于最小叉熵的权重集成方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(2): 378-384.
HE Dayi, CHEN Xiaoling, XU Jiaqiang. Weight aggregation method based on principle of minimum cross-entropy in multi attribute group decision-making[J]. Control and Decision, 2017, 32(2): 378-384.
- [22] FAUSTO C, GIOVANNA T M, ANDREA Z. Contaminant release history identification in 2-D heterogeneous aquifers through a minimum relative entropy approach[J]. Springer Plus, 2015, 4(1): 656-674.

收稿日期: 2018-04-19; 修回日期: 2018-06-11

作者简介:

杨欢红(1965—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事智能电网、数据挖掘等研究; E-mail: yanghuanhong0907@163.com

丁宇涛(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为变压器故障诊断、数据挖掘等; E-mail: 18722237985@163.com

周敬嵩(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网自动化研究. E-mail: 1609462292@qq.com

(编辑 魏小丽)