

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230312

基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估

邹阳¹, 林锦茹¹, 李安娜², 张云霄¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网福建省电力有限公司厦门供电公司, 福建 厦门 361004)

摘要: 电力变压器复合油纸绝缘状态的准确诊断对电力系统安全稳定运行以及设备自身运维具有重要指导意义。针对油纸绝缘介电响应少数特征量评估和未考虑系统随机性导致评估不准确的问题, 提出基于灰色关联分析(grey relational analysis, GRA)与聚类云模型的评估方法。首先, 基于回复电压法和扩展德拜模型提取5个相关特征量, 建立油纸绝缘状态评估体系。然后, 针对多特征量在反映绝缘状态的敏感性差异, 采用组合赋权法综合 GRA 和改进层次分析法, 避免了数据信息丢失, 使权重分配更加合理。最后, 利用云模型雾化特性反映数据随机性, 全面考虑评估指标等级分类边界的随机性和模糊性后构建了聚类云模型隶属度选择器。通过多台不同糠醛含量变压器实测数据进行验证表明, 该评估方法不仅能够准确反映变压器实际绝缘状态, 而且能体现其劣化趋势, 为检修策略的制定提供参考依据。

关键词: 油纸绝缘; 时域响应; 模糊综合评估; 聚类云模型; 灰色关联分析; 改进层次分析法

Evaluation of transformer oil-paper insulation status based on grey relational analysis and a cluster cloud model

ZOU Yang¹, LIN Jinjia¹, LI Anna², ZHANG Yunxiao¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Xiamen Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Xiamen 361004, China)

Abstract: Accurate diagnosis of the composite oil-paper insulation state of power transformers is of great guiding significance for the safe and stable operation of power systems and the operation and maintenance of equipment itself. In this paper, an evaluation method based on grey relational analysis (GRA) and a clustering cloud model is proposed to solve the problem of inaccurate evaluation caused by few characteristic quantities of the dielectric response of oil-paper insulation and failure to consider the randomness of the system. First, based on the recovery voltage method and the extended Debye model, five relevant features are extracted to establish the oil-paper insulation state evaluation system. Second, in view of the sensitivity differences of multiple feature quantities in the reactive insulation state, a combination weighting method combining GRA and an improved analytic hierarchy process is used to avoid data information loss and make the weight allocation more reasonable. Finally, it uses the atomization characteristics of the cloud model to reflect the randomness of the data, and comprehensively considers the randomness and fuzziness of the classification boundary of the evaluation index grade. After that a clustering cloud model membership selector is constructed. The validation of measured data from multiple transformers with different furfural content shows that the evaluation method can not only accurately reflect the actual insulation status of the transformer, but also reflect its deterioration trend, providing a reference basis for the formulation of maintenance strategies.

This work is supported by the Major Research Program Cultivation Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 92266110).

Key words: oil-paper insulation; time domain response; fuzzy comprehensive evaluation; cluster cloud model; grey correlation analysis; improved analytic hierarchy process

0 引言

回复电压法(return voltage measurement, RVM)

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目资助(92266110); 福建省自然科学基金项目资助(2019J01248)

是一种以时域介电响应理论为基理的油纸绝缘系统测量方法, 简便无损且携带绝缘状态信息丰富, 已被广泛应用到变压器油纸绝缘状态的评估中^[1-3]。扩展德拜模型(extended debye model, EDM)因其绝缘电阻 R_g 、几何电容 C_g 等变化趋势能够有效解释绝缘内部的状态变化, 亦被广泛认可和用于辅助分析

油纸绝缘状态^[4-5]。但是存在以下两方面不足：①相关研究都是针对单个或少数特征量与绝缘状态进行相关性分析，未能从多个角度对油纸绝缘状态进行综合性准确评估。如：文献[2]通过加速热老化实验，只揭示少数特征量与绝缘纸聚合度(degree of polymerization, DP)存在线性变化规律；文献[5]基于扩展 Debye 模型，仅发现最小和最大时间常数分支参数可以反映绝缘老化状态；文献[6]通过仿真建立绝缘介质等效电路模型，验证了回复电压初始斜率 S_r 和主时间常数 T_{cdom} 与不同绝缘状态变化规律；②多特征量评估中存在权重分配不合理，未能充分利用变压器作为灰色系统所携带的信息，且无法有效处理评估指标差异大等随机性问题。如：文献[4]引用改进层次分析法(improved analytic hierarchy process, IAHP)和灰色关联分析法(relational grey analysis, GRA)对油纸绝缘状态进行评估，仅考虑主观权重，未考虑实际的客观权重，不同专家对指标权重的判断差异会影响评估时的客观性和准确性；文献[7]利用模糊 C 均值(fuzzy C-means, FCM)聚类法将不同老化程度变压器进行聚类，但聚类的数量较少且对于变压器绝缘状态等级划分不够细致，影响了其评估结果的准确性；文献[8]通过模糊聚类建立绝缘状态的标准状态参量表，但其隶属度函数选择存在极大的人为因素，且忽略了变压器作为灰色系统本身所携带的随机性。

鉴于上述不足，本文利用 10 台变压器现场实测数据，基于 RVM 和 EDM 提取 5 个相关特征量，建立多个表征油纸绝缘状态的数据库，IAHP 和 GRA 实现权重综合考量，有效避免信息丢失，使得权重分配更加合理。利用云模型雾化特性反馈变压器系统的模糊性和随机性，构建聚类云模型对变压器绝缘状态进行模糊综合评判，不仅克服了单一指标评估过于片面的问题，还引入变压器状态的随机特性，使得评估结果更加符合实际情况。

1 油纸绝缘老化特征量提取

1.1 基于 RVM 老化特征量提取

时域介电响应 RVM 是通过外部施加直流高压来研究油纸绝缘慢响应过程的电气诊断方法。该方法得到的时域响应介电谱蕴含丰富的绝缘状态信息，其中具有代表性的是回复电压极化谱，如图 1 所示，图中 t_c 为充电时间。相关研究的理论成果如下：文献[2-4, 9-10]指出极化谱峰值电压 U_{rmax} 和最大初始斜率 S_{rmax} 越大，主时间常数 T_{cdom} 越小，则绝缘系统状态越差。

1.2 基于 EDM 老化特征参量提取

扩展德拜模型是一种有效分析绝缘内部介电响

应的等效电路模型，已被广泛应用于辅助分析油纸绝缘状态，如图 2 所示。学者们通过从等效模型提取特征量来更直观地反映绝缘老化状态。等效模型的绝缘电阻 R_g 表征整个绝缘系统的电导情况，老化越严重，电导率越大，绝缘电阻 R_g 越小。等效模型的几何电容 C_g 表征绝缘材料的储电能力，介质老化越严重，几何电容 C_g 越大^[5,11-12]。

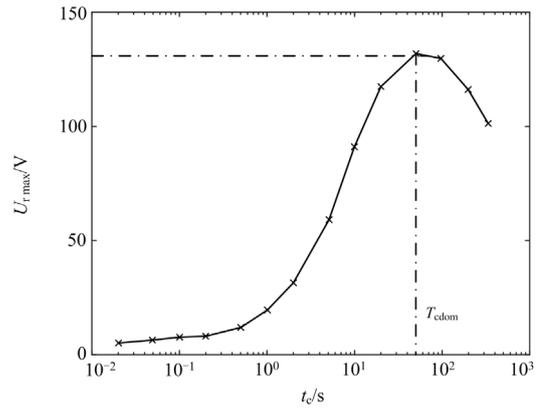


图 1 回复电压极化谱

Fig. 1 Return voltage polarization spectrum

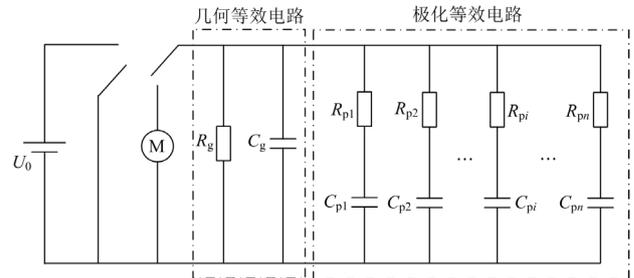


图 2 扩展德拜模型等效电路

Fig. 2 Extended Debye model equivalent circuit

因此，本文提取了回复电压极化谱特征量(极化谱峰值电压 U_{rmax} 、主时间常数 T_{cdom} 、最大初始斜率 S_{rmax})和扩展德拜模型特征量(绝缘电阻 R_g 、几何电容 C_g)作为变压器油纸绝缘状态评估的特征量。

2 基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估方法

变压器油纸绝缘状态具有模糊性和随机性^[13]，是一个典型的灰色系统，因此采用灰色关联分析法提取灰度信息作为客观权重，利用聚类云模型反馈状态模糊性和随机性，构建隶属度选择器，结合模糊综合评判思维实现从多特征、多角度对油纸绝缘状态进行精准评估。具体评估步骤如下：首先，基

于不同绝缘状态的油纸绝缘变压器的实测数据结合 EDM 提取有效表征油纸绝缘状态的特征量, 建立变压器多特征量数据库; 其次, 通过改进层次分析法和灰色关联分析法计算综合权重; 最后, 充分考虑变压器绝缘状态等级分类边界的模糊性和随机性构建聚类云模型隶属度选择器, 计算获得综合评分数 r 确认变压器油纸绝缘状态, 方法流程如图 3 所示。

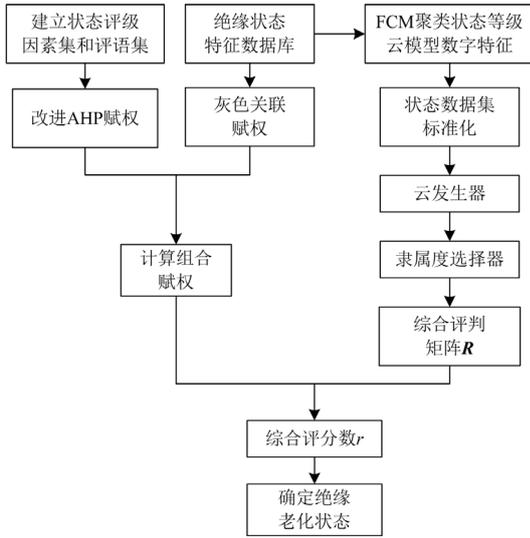


图 3 基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估方法

Fig. 3 Evaluation method of transformer oil-paper insulation state based on grey relational analysis and cluster cloud model

2.1 改进层次分析法确定主观权重

层次分析法在考虑指标重要性时可能存在片面性、随意性, 导致一般需要多次调整判断矩阵才能满足一致性校验^[14-17]。为了避免这个问题, 本文采用文献[4]的改进层次分析法, 并建立图 4 所示的油纸绝缘状态评价指标体系, IAHP 确认指标权重步骤如下。

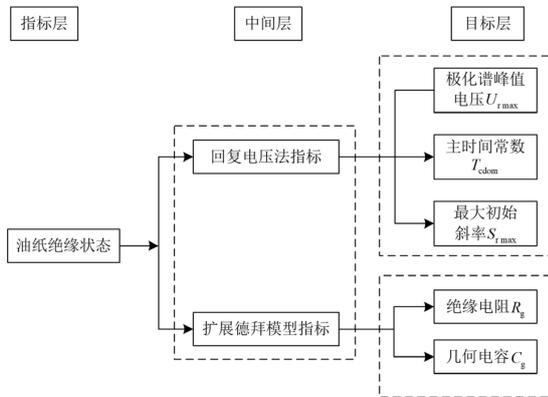


图 4 油纸绝缘状态评价指标体系

Fig. 4 Evaluation index system of oil-paper insulation status

1) 建立专家判断矩阵。设经过分析后的油纸绝缘系统有 N 项老化特征量指标, 根据专家经验采用九级标度法, 对指标层各个特征量进行两两对比打分^[18], 建立对应的比较矩阵 $\mathbf{E} = [e_{ij}]_{N \times N}$, e_{ij} 为 i 项特征指标与 j 项特征指标的重要性比值, 且 $e_{ji} = 1/e_{ij} > 0$ 。

2) 计算最优拟合矩阵 $\mathbf{B}' = [b'_{ij}]_{N \times N}$, 计算方法如式(1)一式(3)所示。

$$b_{ij} = \lg e_{ij} \quad (1)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (b_{ik} - b_{jk}) \quad i, j, k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$b'_{ij} = 10^{d_{ij}} \quad (3)$$

式中, e_{ij} 为比较矩阵 \mathbf{E} 的元素。

3) 计算单层指标权重。对最优拟合矩阵的每一列进行归一化和算术平均法处理后可获得单层特征指标权重, 计算方法如式(4)、式(5)所示。

归一化:

$$b''_{ij} = \frac{b'_{ij}}{\sum_{k=1}^N b'_{kj}} \quad (4)$$

算术平均法:

$$P_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N b''_{ij} \quad (5)$$

结合文献[4, 11-12]的专家经验, 并根据式(1)一式(5)计算得到 5 个特征量评估指标的主观权重为: $\mathbf{P} = [0.0786, 0.4777, 0.1937, 0.1875, 0.0625]$ 。

2.2 灰色关联分析确定客观权重

灰色关联分析可以用于解决灰色多目标决策问题, 其关联度程度越大说明权重就越大^[19-20]。引入灰色关联度分析确认客观权重, 较常见的熵权法、标准离差法在实际应用中更能准确反映变压器灰色系统所蕴含的权重信息。计算步骤如下。

1) 构建数据矩阵, 利用均值化进行数据无量纲化处理, 记处理后参考序列为 \mathbf{X}_0 , 比较序列为 \mathbf{X}_i , \mathbf{X}_i 维度为 $n \times m$ 。

2) 计算关联系数, 分别计算每个比较序列 \mathbf{X}_i 与参考序列 \mathbf{X}_0 对应元素的关联系数矩阵:

$$\xi_i = \frac{\left(\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)| \right)}{\left(|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)| \right)} \quad (6)$$

式中, ρ 为分辨系数, $\rho = [0, 1]$, 本文取 0.5^[21]。

3) 计算灰度关联, 通常采用均值法。

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad k=1,2,\dots,n \quad (7)$$

4) 计算相对权重

$$W_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^m \gamma_i} \quad i=1,2,\dots,m \quad (8)$$

对多特征量数据库进行均值化处理后代入式(6)一式(8), 计算得出 5 个特征量指标的客观权重值为 $W = [0.2020, 0.1892, 0.2128, 0.1902, 0.2058]$ 。

2.3 主客观结合组合赋权法

各特征量指标所反映的变压器绝缘状态存在一定差异^[22-23], 因此, 本文采取组合赋权法来反映不同指标的影响程度。针对改进层次分析法主观性过强和灰色关联分析法可能出现误差的问题, 通过组合赋权法对二者进行有效组合, 不但充分考虑了依据专家经验的主观权重, 而且还依据数据本身的特征对权重进行修正, 使求得的权重更加科学合理。利用归一组合赋权法确定的第 j 个指标的组合权重值为

$$W_j^* = \frac{p_j w_j}{\sum_{j=1}^N p_j w_j} \quad j=1,2,\dots,N \quad (9)$$

式中: p_j 表示第 j 个指标的主观权重值元素; w_j 表示第 j 个指标的客观权重值元素。组合权重向量 $W^* = [0.0810, 0.4611, 0.2103, 0.1820, 0.0656]$ 。

2.4 基于聚类云模型的油纸绝缘状态评估

2.4.1 云模型理论

云模型是在概率论和模糊理论两大理论基础提出的能够有效反馈随机性和模糊性之间关联关系的模型^[24-27]。在云模型理论中, 设 U 是一个精确论域, C 是 U 上的定性概念。选择定量值 $c \in U$, 且 c 是 C 的一次随机实现, 设 $\mu(c) \in [0,1]$ 是 x 对 C 的隶属度, 且满足:

$$\mu: U \rightarrow [0,1], \forall c \in U, c \rightarrow \mu(c)$$

则 c 在论域 U 上的分布称为云, 每一个 c 称为一个云滴, 表示为 $\text{drop}(c, \mu(c))$ 。

云模型使用 $C(E_x, E_n, H_e)$ 作为数字特征量。其中: 云期望 E_x 是属性概念的数学期望值, 反映油纸绝缘状态的数据; 云熵 E_n 是对属性概念不确定性的度量, 它是由该概念的随机性和模糊性共同决定, 反映油纸绝缘状态等级下可被接受的取值范围; 超熵 H_e 是熵的不确定性, 代表雾化程度, 反映油纸绝缘数据的随机性。

由于云模型的特定结构, 与模糊隶属度函数相比, 具有更好的模糊性。同时, 云模型考虑了指标随机性的问题, 这是普通的模糊隶属度函数所不具备的, 因此引入云模型对油纸绝缘绝缘进行状态评估, 以求更接近实际的评判矩阵。

2.4.2 正向云发生器

云发生器(cloud generator, CG)也叫云的计算算法, 正向云发生器的作用是利用云的 3 个数字特征产生的云滴, 实现语言值表达的定性信息和定量数据分布规律的相互转换, 正向云发生器如图 5 所示。

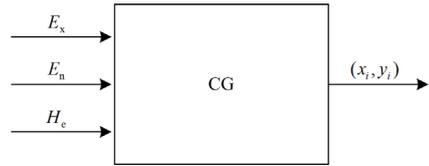


图 5 一维正向云发生器

Fig. 5 One-dimensional forward cloud generator

正态云模型生成步骤如下:

1) 生成以 E_n 为期望、 H_e 为标准差的正态随机数 $E'_n = \text{NORM}(E_n, H_e)$;

2) 生成以 E_x 为期望, E'_n 为标准差的正态随机数 $x_i = \text{NORM}(E_x, E'_n)$;

3) 计算 $\mu_i = e^{-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_n^2}}$, 令 (x_i, μ_i) 为云滴;

4) 不断计算步骤 1)一步骤 3), 直到可以得到 N 个云滴生成的云图。已知正态云 (E_x, E_n, H_e) , 云发生器可以生成一个正态云模型, 图 6 是一个由 $E_x = 0$ 、 $E_n = 1$ 、 $H_e = 0.2$ 以及 3000 个云滴组成的正态云实例模型。

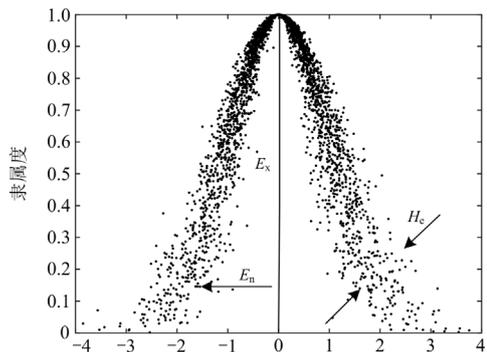


图 6 云模型云滴分布图

Fig. 6 Cloud model cloud droplet distribution map

2.4.3 构建聚类云模型隶属度选择器

利用模糊 C 均值聚类原理, 通过自动寻优算法, 将多特征量数据库聚成 4 个灰类(限于篇幅, 本文列出其中 10 台变压器的指标数据样本, 见表 1), 得

到不同油纸绝缘状态的最优4个聚类中心,见表2,结合收集好的糠醛含量的测试数据,依据《电力设备预防性试验规程》的要求,证明了其合理性^[28]。

表1 变压器现场实测数据

Table 1 Field measured data of transformer

变压器	$U_{r\max}/V$	T_{cdom}/s	$S_{r\max}/(V/s)$	$R_g/G\Omega$	C_g/nF	绝缘状态
T1	184.23	2516.97	29.31	12.45	91.84	良好
T2	357.66	545.92	256.67	2.03	187.07	严重
T3	186.87	789.74	79.6	2.53	92.57	较差
T4	312.06	190.72	55.68	1.53	190.41	严重
T5	174.93	2416.01	31.74	11.59	68.03	良好
T6	414.34	792.61	206.95	2.08	271.23	严重
T7	319.97	1050.01	129.18	3.25	125.98	较差
T8	190.44	1664.64	77.88	11.61	93.57	一般
T9	168.97	2482.95	28.36	13.14	70.77	良好
T10	304.79	982.3	150.39	6.32	167.92	较差

表2 变压器油纸绝缘状态分级聚类中心
Table 2 Transformer oil-paper insulation state classification clustering center

FCM	$U_{r\max}/V$	T_{cdom}/s	$S_{r\max}/(V/s)$	$R_g/G\Omega$	C_g/nF	绝缘状态
I	172.05	2410.65	31.02	12.36	70.42	良好
II	228.23	1764.97	72.68	7.82	89.91	一般
III	301.21	1193.4	113.85	4.63	115.46	较差
IV	362.10	768.44	178.96	2.42	160.21	严重

将绝缘状态分级聚类中心值作为云模型的期望值,即 $E_x = C_x$ ^[29]。对不同绝缘状态云模型期望值进行极差归一化至[0,1]后,根据表3确定云模型的3个数字特征值^[30],表中 (E_{xi}, E_{ni}, H_e) 表示不同绝缘状态的聚类云模型特征值, $i=1,2,3,4$, 超熵 $H_e = 0.005$, 生成聚类云模型隶属度选择器,如图7—图11所示。

表3 特征值计算

Table 3 Eigenvalue calculation

	I级良好	II级一般	III级较差	IV级严重
E_x	$E_{x1} = C_{x1}$	$E_{x2} = C_{x2}$	$E_{x3} = C_{x3}$	$E_{x4} = C_{x4}$
	$E_{n1} =$	$E_{n2} =$	$E_{n3} =$	$E_{n4} =$
E_n	$\frac{E_{x2} - E_{x1}}{6}$	$\frac{E_{x3} - E_{x1}}{6}$	$\frac{E_{x4} - E_{x2}}{6}$	$\frac{E_{x4} - E_{x3}}{6}$
H_e	0.05	0.05	0.05	0.05

2.4.4 聚类云模型的模糊综合评判流程

1) 计算特征量权重。多特征量数据库结合 IAHP 和 GRA, 运用综合赋权法得到每个特征指标综合权重向量。

2) 构建聚类云隶属度选择器。利用模糊 C 均值聚类原理, 将多特征量数据库聚成4个灰类, 得到不同油纸绝缘状态的最优4个聚类中心, 极差归一

化后构建聚类云模型隶属度选择器。

3) 待评估特征指标数据归一化。在进行油纸绝缘状态评估时, 由于各个特征量指标间的量纲不同、数量级差异大, 因此为便于比较各指标, 本文对待评估特征指标数据采取相对劣化度归一化, 以此消除指标中量纲、数量级的影响。

(1) 对于指标越大越优数值型指标, 如主时间常数 T_{cdom} 、绝缘电阻 R_g , 采用式(10)进行归一化处理。

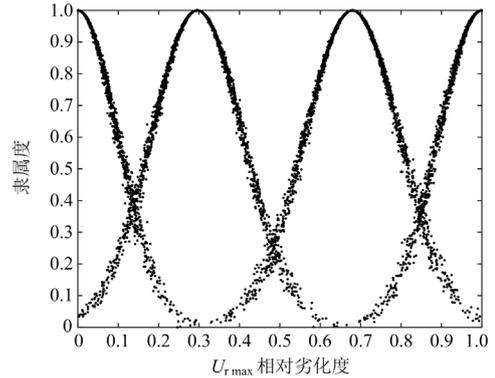


图7 $U_{r\max}$ 聚类云模型

Fig. 7 $U_{r\max}$ clustering cloud model

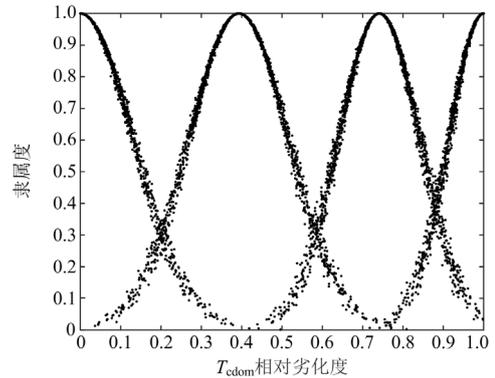


图8 T_{cdom} 聚类云模型

Fig. 8 T_{cdom} clustering cloud model

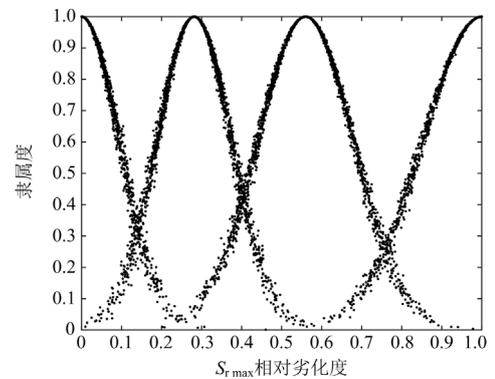


图9 $S_{r\max}$ 聚类云模型

Fig. 9 $S_{r\max}$ clustering cloud model

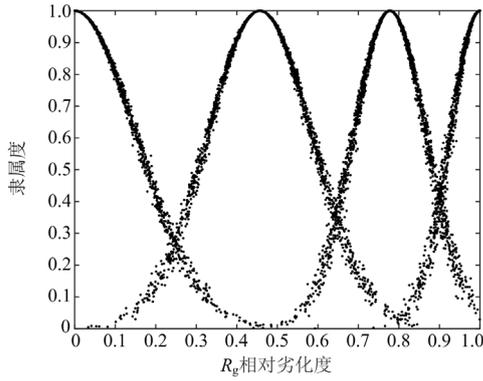


图 10 R_g 聚类云模型

Fig. 10 R_g clustering cloud model

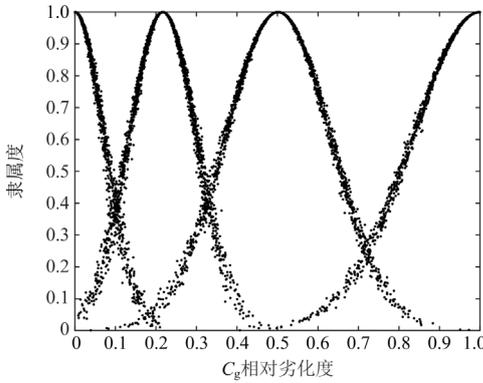


图 11 C_g 聚类云模型

Fig. 11 C_g clustering cloud model

$$x' = \begin{cases} 0 & x \geq x_{\max} \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 1 & x \leq x_{\min} \end{cases} \quad (10)$$

式中： x_{\max} 、 x_{\min} 分别表示老化特征量指标 FCM 聚类中心最大值与最小值； x 表示老化特征量指标值； x' 表示老化特征量指标相对劣化度值。

(2) 对于指标越小越优数值型指标，如峰值电压 $U_{r \max}$ 、最大初始斜率 $S_{r \max}$ 、几何电容 C_g ，采用式 (11) 进行归一化处理。

$$x' = \begin{cases} 0 & x \leq x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 1 & x \geq x_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

(3) 计算综合评判矩阵 R 。运用式(12)多次计算取均作为特征量与各聚类云模型的隶属度，汇总获得综合评判矩阵 R 。

$$\mu_i = e^{-\frac{(x' - E_x)^2}{2E_n'^2}} \quad (12)$$

式中： E_x 为各聚类云期望值； E_n' 为由期望为 E_n 、方差为 H_e 生成的正态随机数。

(4) 将组合权重向量 W^* 与评判矩阵 R 相乘得到综合评估结果向量 B ，利用加权平均法求得变压器的综合评估分数 r 为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^4 b_i f_i}{\sum_{i=1}^4 b_i} \quad (13)$$

式中： b_i 为结果向量 B 的元素； f_i 为各绝缘状态等级 i 的对应分数，设等级 I 至等级 IV 对应的分数为 1 至 4，根据 r 的数值以及表 4 评估分数的分级区间可以确认绝缘状态。

表 4 评估分数的分级区间

Table 4 Evaluate the grading range of the score	
综合评估	绝缘状态等级
分数	I 级 II 级 III 级 IV 级
r	[1,1.5) [1.5,2.5) [2.5,3.5) [3.5,4]

3 实例分析

现有 10 台油纸绝缘结构相同的待评估油浸式变压器，根据现场回复电压极化谱测试数据进行上述特征量的提取，其绝缘老化特征数据见表 5。

为了验证单一特征量诊断和综合诊断的准确性差异，以变压器 T1 为例。由表 6 可知， $U_{r \max}$ 、 T_{edom} 的诊断结果为“绝缘状态较差”； $S_{r \max}$ 、 C_g 的诊断结果为“绝缘状态严重”； R_g 的诊断结果为“绝缘状态一般”，基于该评估结果无法确认变压器油纸绝缘状态。

现采用文中方法对以上 10 台变压器进行归算评估后的结果如表 7 所示。可以得出：根据综合评分与分级区间匹配原则，变压器 T4、T7 评估结果为绝缘状态良好(I 级)；变压器 T2、T8、T9 评估结果为绝缘状态一般(II 级)；变压器 T1、T3 评估结果为绝缘状态较差(III 级)；变压器 T5、T6、T10 评估结果为绝缘状态严重(IV 级)，均与表 5 的绝缘状态以及以糠醛含量为指标的评判结果相符。

本文评估方法所得结果更加精细化，不仅能够反映绝缘状态劣化趋势，还能对比同一状态等级的差异性，具体如下：

1) 变压器 T3 综合评分为 2.884，说明正处于绝缘状态较差的初始阶段，建议做好全程监控、预测、检查工作；

2) 变压器 T1 综合评分为 3.311，可以推断出变压器 T1 整体可靠性更差，内部存在更严重的劣化

表 5 10 台待评估的油浸式变压器测量数据

Table 5 Measurement data of 10 oil-immersed transformers to be evaluated

序号	型号	运行年数	糠醛/(mg/L)	$U_{r\max}/V$	T_{cdom}/s	$S_{r\max}/(V/s)$	$R_g/G\Omega$	C_g/nF	绝缘状态
T1	SF08-31500/110	21	2.265	301.77	972.57	148.9	6.2	166.26	较差
T2	SFSE9-240000/220	13	0.793	184.89	1632	77.11	11.27	92.64	一般
T3	SFZ7-31500/110	17	1.275	274.92	1201.41	89.77	4.697	119.257	较差
T4	OSFPSZ9-180000/220	5	0.198	132.59	2514.2	25.61	18.26	52.62	良好
T5	SFPS10-50000/220	25	7.536	405.32	770.51	205.62	2.11	265.88	严重
T6	cub-MRM-120000/220	20	4.265	359.55	852.61	189.65	3.52	197.22	严重
T7	OSFPSZ9-180000/220	6	0.205	175.07	2415.99	32.11	13.36	70.37	良好
T8	SFSE9-240000/220	13	0.852	256.32	1512.94	92.21	10.25	105.51	一般
T9	SFZ-31500/110	10	0.275	256.8	2058.3	85.77	71.56	105.23	一般
T10	cub-MRM-120000/220	26	23.04	406.22	769.53	204.91	2.02	265.92	严重

表 6 变压器 T1 特征量的诊断结果

Table 6 Diagnosis result of T1 characteristic quantity of transformer

特征量	绝缘状态诊断结果
$U_{r\max}$	较差
T_{cdom}	较差
$S_{r\max}$	严重
R_g	一般
C_g	严重

表 7 10 台变压器评估结果

Table 7 Evaluation results of 10 transformers

变压器	T1	T2	T3	T4	T5
r	3.311	1.836	2.884	1.015	3.966
评估结果	III	II	III	I	IV
变压器	T6	T7	T8	T9	T10
r	3.844	1.021	2.244	1.75	3.964
评估结果	IV	I	II	II	IV

迹象, 整体处于绝缘状态较差末期, 且有往另一个等级状态转变的趋势, 建议提前做好维修检查工作。

4 结论

本文建立了基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估方法, 并结合实例分析, 得到以下结论。

1) 通过改进层次分析法与灰色关联分析法, 构建主客观权重融合的计算模型, 避免了数据信息丢失问题, 使得权重更加合理。

2) 提出基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估方法, 本文方法既考虑到变压器不确定性中的模糊性, 也考虑了随机性。评估过程简单方便, 面对多特征、多信息且复杂的变压

器状况, 可以对变压器油纸绝缘状态进行有效、准确的评估。经过验证, 其评估结果可作为油纸绝缘设备在实际检修中的参考依据。

3) 运用模糊综合评判思维, 实现评估结果的精细化, 不仅能够反馈变压器劣化趋势, 还能体现相同绝缘状态变压器间的差异性。

参考文献

- [1] 刘庆珍, 黄昌硕. 基于 FCBF 特征选择和 XGBoost 原则的油纸绝缘介电响应特征量优选研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 50-59.
- LIU Qingzhen, HUANG Changshuo. Optimization of dielectric response characteristics of oil paper insulation based on FCBF feature selection and the XGBoost principle[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 50-59.
- [2] 廖瑞金, 孙会刚, 袁泉, 等. 采用回复电压法分析油纸绝缘老化特征量[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 136-142.
- LIAO Ruijin, SUN Huigang, YUAN Quan, et al. Analysis of oil-paper insulation aging characteristics using recovery voltage method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 136-142.
- [3] 邹阳, 俞豪奕, 金涛. 融合模糊 K 近邻及证据理论的变压器油纸绝缘状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 55-63.
- ZOU Yang, YU Haoyi, JIN Tao. Evaluation method of the oil-paper insulation condition of a transformer based on fuzzy K nearest neighbor and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 55-63.
- [4] 黄云程, 蔡金锭. 融合改进层次分析与灰色关联法评估油纸绝缘状态[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 2083-2090.
- HUANG Yuncheng, CAI Jinding. Fusing improved analytic

- hierarchy process and grey correlation method to evaluate oil-paper insulation condition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 2083-2090.
- [5] 高竣, 廖瑞金, 王有元, 等. 基于扩展 Debye 模型的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 211-217.
GAO Jun, LIAO Ruijin, WANG Youyuan, et al. Ageing characteristic quantities of oil-paper insulation for transformers based on extended debye model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 211-217.
- [6] 许梦素, 莫付江, 陈惠, 等. 基于回复电压法的变压器油纸绝缘状况的等效仿真分析[J]. 绝缘材料, 2018, 51(1): 70-74.
XU Mengsu, MO Fujiang, CHEN Hui, et al. Ageing condition equivalent simulation of transformer oil-paper insulation based on recovery voltage method[J]. Insulating Materials, 2018, 51(1): 70-74.
- [7] 谢松, 邹阳, 蔡金锭. 基于模糊粗糙集的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 190-197.
XIE Song, ZOU Yang, CAI Jinding. Assessment of transformer oil-paper insulation status with fuzzy rough set[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 190-197.
- [8] 陈汉城, 蔡金锭. 基于多时域特征参量的变压器油纸绝缘状态综合评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 184-190.
CHEN Hancheng, CAI Jinding. Synthetic insulation state evaluation based on multiple time-domain characteristic parameters for transformer oil-paper[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 184-190.
- [9] 王林, 彭倩, 周利军, 等. 油纸绝缘老化特性的回复电压分析[J]. 绝缘材料, 2012, 45(5): 42-45.
WANG Lin, PENG Qian, ZHOU Lijun, et al. Analysis of oil-paper insulation aging characteristics based on return voltage method[J]. Insulating Materials, 2012, 45(5): 42-45.
- [10] 邹阳, 蔡金锭. 变压器极化谱特征量与绝缘状态关系研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 608-614.
ZOU Yang, CAI Jinding. Study on the relationship between polarization spectrum characteristic quantity and insulation condition of oil-paper transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 608-614.
- [11] 邹阳, 何倩玲, 蔡金锭. 基于组合赋权-双基点法的变压器油纸绝缘状态综合评估[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4400-4408.
ZOU Yang, HE Qianling, CAI Jinding. Comprehensive evaluation of transformer oil-paper state based on combined weight-double base point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4400-4408.
- [12] 张宁, 蔡金锭. 基于层次分析和逼近理想解法的绝缘状态评估[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 35-42.
ZHANG Ning, CAI Jinding. Evaluation of insulation state based on the combination of analytical hierarchy process and TOPSIS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 35-42.
- [13] 夏彦卫, 赵军, 付浩川, 等. 基于模糊评判与 DSMT 的变压器本体多级绝缘状态评估方法[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 157-164.
XIA Yanwei, ZHAO Jun, FU Haochuan, et al. Multi-level insulation state assessment method of transformer proper based on fuzzy judgment and DSMT[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 157-164.
- [14] 邢晓敏, 徐海瑞, 廖孟柯, 等. 基于云模型和 D-S 证据理论的配电终端健康状态 综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 72-81.
XING Xiaomin, XU Hairui, LIAO Mengke, et al. Comprehensive evaluation method of distribution terminal units health status based on a cloud model and D-S evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 72-81.
- [15] 季玉琦, 潘超, 肖晗, 等. 分布式电源电压支撑能力层次分析评价[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 163-171.
JI Yuqi, PAN Chao, XIAO Han, et al. Hierarchical analysis and evaluation of the voltage support capability of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 163-171.
- [16] 贾晋峰, 程超贻, 周欣, 等. 基于模糊矩阵的计量装置状态评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 164-172.
JIA Jinfeng, CHENG Chaoyi, ZHOU Xin, et al. Evaluation method of metering device condition based on fuzzy matrix[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 164-172.
- [17] 熊汉武, 樊炜, 牛艳召, 等. 基于熵权-层次分析融合的电力电缆质量评价方法[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 185-192.
XIONG Hanwu, FAN Wei, NIUYanzhao, et al. Quality evaluation method of power cable based on fusion of entropy weight-analytic hierarchy process[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 185-192.
- [18] LI Zongbo, JIAO Zaibin, HE Anyang, et al. A denoising-classification neural network for power transformer protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 814-827.

- [19] 李闯, 孔祥玉, 朱石剑, 等. 能源互联环境下考虑需求响应的区域电网短期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 71-78.
LI Chuang, KONG Xiangyu, ZHU Shijian, et al. Short-term load forecasting of regional power grid considering demand response in energy interconnection environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 71-78.
- [20] 江世艳, 王燕青, 徐越峰, 等. 基于灰色关联分析的电网安全事关键致因分析[J]. 中国电力, 2021, 54(6): 168-174, 198.
JIANG Shiyan, WANG Yanqing, XU Yuefeng, et al. Investigation of key causes for power grid safety events based on grey correlation analysis[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 168-174, 198.
- [21] 蔡金锭, 黄云程. 基于灰色关联诊断模型的电力变压器绝缘老化研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3296-3301.
CAI Jinding, HUANG Yuncheng. Study on insulation aging of power transformer based on gray relational diagnostic model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3296-3301.
- [22] 咸日常, 范慧芳, 张爱祥, 等. 基于组合赋权与加权秩和比的电力变压器状态评估[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 199-206.
XIAN Richang, FAN Huifang, ZHANG Aixiang, et al. Status assessment of power transformer based on combined weighting and WRSR[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 199-206.
- [23] 张冀, 张亚静, 仇向东. 基于博弈组合赋权的变压器差异化状态评估[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 205-212.
ZHANG Ji, ZHANG Yajing, QIU Xiangdong. Differential state evaluation of transformer based on game combination weighting[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 205-212.
- [24] 何雷, 李丽平. 基于云模型的电力变压器状态综合评判[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(3): 98-103.
HE Lei, LI Liping. Synthetic evaluation of power transformer condition based on cloud model[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2009, 36(3): 98-103.
- [25] 杜晓东, 曾四鸣, 刘科研, 等. 基于云模型的配电网运行画像数字孪生构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 105-113.
DU Xiaodong, ZENG Siming, LIU Keyan, et al. Construction of portraits for a distribution network with digital twins based on a cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 105-113.
- [26] 张宽, 吐松江·卡日, 高文胜, 等. 基于云模型和改进D-S证据理论的变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 196-204.
ZHANG Kuan, TUSONGJIANG·Kari, GAO Wensheng, et al. Fault diagnosis of transformer based on cloud model and improved D-S evidence theory[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 196-204.
- [27] 刘军, 王苗, 严清心, 等. 基于组合赋权和梯形云模型的发电商市场力评价[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 58-66.
LIU Jun, WANG Miao, YAN Qingxin, et al. Market power evaluation of generators based on combination weighting and trapezoidal cloud model[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2021, 36(2): 58-66.
- [28] 祝顺才, 蔡金锭. 基于模糊-灰色聚类的油纸绝缘状态综合诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 718-725.
ZHU Shuncai, CAI Jinding. Comprehensive diagnosis of oil-paper insulation status based on fuzzy gray clustering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 718-725.
- [29] 王建敏, 吴云洁. 基于聚类云模型的小样本数据可信度评估[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(7): 1263-1271.
WANG Jianmin, WU Yunjie. Credibility evaluation method of small sample data based on cluster cloud model[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(7): 1263-1271.
- [30] 陈永刚, 周净毓, 戴乾军, 等. 基于组合赋权-云模型的LTE-R系统的安全评估研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 3110-3118.
CHEN Yonggang, ZHOU Jingyu, DAI Qianjun, et al. Research on LTE-R safety evaluation based on combination weighting method-cloud model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 3110-3118.

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-08-12

作者简介:

邹阳(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电气系统智能化故障诊断; E-mail: 24001744@qq.com

林锦茹(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电气系统智能化故障诊断。E-mail: 452615266@qq.com
(编辑 张颖)