

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240148

融合频谱特性与聚类云-证据推理的油纸绝缘老化程度诊断

邹阳¹, 黄煜¹, 俞豪奕², 金涛¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网莆田供电公司, 福建 莆田 351100)

摘要: 油纸绝缘系统老化程度与电力变压器的稳定运行密切相关。针对油纸绝缘频域介电谱(frequency-domain spectroscopy, FDS)所提相关特征量单一和未考虑频谱特性指标间冲突性与随机性而导致老化诊断结果误差大的问题, 提出了融合频谱特性与聚类云-证据推理的油纸绝缘老化程度诊断方法。首先, 根据不同老化试样的频谱特征提取老化诊断多特征指标, 并利用非线性拟合构建老化特征数据库。其次, 基于 Kmeans 聚类提出适配非线性变化指标的聚类云模型基本概率分配方法。最后, 针对多特征量的冲突性及相关性差异, 利用 CRITIC-G1 综合赋权法计算各指标对应的证据修正因子, 并进行基本概率再分配, 利用证据融合推理得出油纸绝缘系统真实老化程度。实验结果表明, 所提方法可准确诊断复合油纸绝缘样本的老化状态, 为电力检修策略的制定提供了理论指导。

关键词: 频谱特性; 油纸绝缘; 聚类云-证据推理; CRITIC-G1; 老化程度诊断

Diagnosis of oil-paper insulation aging degree by fusing spectral properties and clustered cloud-evidence reasoning

ZOU Yang¹, HUANG Yu¹, YU Haoyi², JIN Tao¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. State Grid Putian Power Supply Company, Putian 351100, China)

Abstract: The aging degree of an oil-paper insulation system is closely related to the stable operation of power transformer equipment. There is low accuracy in aging diagnosis when it relies on a single relevant feature quantity obtained by frequency-domain spectroscopy (FDS) and does not consider the conflict and randomness among the spectral indicators. Thus a new diagnostic method for determining the aging degree of oil-paper insulation is proposed. This method integrates spectral characteristics and clustering cloud-evidence reasoning. First, the multi-feature indicators for aging diagnosis are extracted through aging samples' spectral characterization. An aging feature database is then constructed through nonlinear fitting. Secondly, a basic probability assignment method for the clustering cloud model is proposed based on K-means clustering to accommodate the nonlinear change indicators. Finally, to address the conflict and correlation differences of multi-feature quantities, the CRITIC-G1 comprehensive assignment method is used to calculate the evidence correction factor for each indicator. Subsequently, the basic probability is reassigned, and evidence fusion inference is employed to determine the actual aging degree of the system. The results demonstrate that the proposed method can accurately diagnose the aging state of composite oil-paper insulation samples and offers theoretical guidance for developing power maintenance strategies.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 92266110 and No. 52377088).

Key words: spectral characterization; oil-paper insulation; clustering cloud-evidential reasoning; CRITIC-G1; diagnosis of aging degree

0 引言

随着我国明确稳步推进“碳达峰, 碳中和”的

目标, 建设新型电力系统成为了巩固战略目标的重大要求。在此背景下维护电力系统安全稳定运行尤为关键^[1]。油浸式变压器作为电力传输不可或缺的设备, 其承载电压等级转换的任务, 但长期受到电、热、机械应力等多方影响将导致变压器内部发生不

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(92266110, 52377088)

可逆转的绝缘劣化^[2-3]。为及时诊断其中的劣化程度，通常可利用表征纤维强度的物理量——聚合度 (degree of polymerization, DP) 来判定^[4]。然而传统吊芯式测试方法将对样本造成不可逆的损伤，故需要更加合理的诊断方法。

在近年来的研究中，频域介电法(the frequency-domain spectroscopy, FDS) 凭借自身的强抗干扰性与可靠性逐渐成为油纸绝缘诊断领域的前沿技术，随着研究深入基于 FDS 的介电特性研究也逐渐成熟，同时依靠该项技术对油纸绝缘受潮与老化程度诊断的相关研究也日益精进^[5]。文献[6-7]通过分析损耗因素 $\tan \delta$ ，提出积分量可作为老化特征因子；文献[8]利用 Poynting-Thomson 模型的参数辨识结果表征油纸绝缘老化状态；通过 FDS 测试曲线发现，随老化程度的加深，复介电常数虚部将逐渐隆起弛豫峰，该峰值特征可用于表征油纸绝缘老化程度^[9]。但上述研究均利用单特征指标表征油纸绝缘劣化程度，得出的结论过于片面，未能从不同角度对油纸绝缘老化程度进行分析解释。对此，部分学者提出利用多源 FDS 谱线特征进行油纸绝缘状态评估，如文献[10]提出基于多个积分特征指标的支持向量机机器学习方法判定老化状态，但未考虑油纸绝缘劣化相关的多项指标之间冲突性与波动性；文献[11]利用 K 近邻算法对状态等级进行分类，但该算法并未考虑随机性，也不具备多层等级划分的能力；文献[12]提取 $\tan \delta$ 与阻抗相位频谱的多处测量点作为特征指标，采用多输出支持向量回归算法融合诊断油纸绝缘状态，但该方法对含水量的预测精度较高，而对老化程度的预测精度较低。

针对上述研究的不足，本文利用 FDS 数据提取老化特征指标，并通过实验样品制备与数据库外推分析得到足够数量的老化试样，提出融合频谱特性与聚类云-证据推理的油纸绝缘老化程度诊断方法，综合 FDS 多特征指标进行老化等级判断。利用 Kmeans 算法构建聚类云模型进行证据基本概率分配，并提出基于 CRITIC-G1 综合赋权法的证据修正因子，在考虑多指标随机性、冲突性的同时避免了证据推理中指标相悖的情况。最后通过实例分析验证了本文所提方法的有效性。

1 样本制备与测试

本文通过模拟真实油箱环境还原油纸绝缘自然老化过程，从而得到所需样品并进行 FDS 测试，其中采用克拉玛依 25 号环烷烃矿物油以及魏德曼变压器纸板进行样本制备，制备流程如下。

1) 将魏德曼变压器绝缘纸板裁剪为大小

9 cm × 9 cm 的正方形以保障测试时可与三电极装置金属板贴合。

2) 将裁剪完毕的绝缘纸板放入 110 °C/50 Pa 的真空环境下进行 24 h 干燥处理，并将处理后的各组绝缘纸板按照 10:1 的油纸质量比充分密封，浸泡于 35 °C/50 Pa 的矿物油中 24 h，使其充分接触，置放容器选用高硼硅玻璃装置，并于容器中放置若干铜片，模拟真实油箱环境。

3) 将制备完毕的 35 组油纸试样分别放入 130 °C/50 Pa 高温的真空烘箱内进行 0、10、20、30、40 天的加速老化，每类试样分别准备 7 组，以保证测试结果的稳定，消除偶然偏差。

4) 将获得的所有样本组取出，其中绝缘油倒入三电极平台，绝缘纸板夹于电极之间并保证油面高于纸面，在室温 35 °C 环境中进行 FDS 测试，具体接线如图 1 所示，设备选用了奥地利 Omicron 公司所研发的 DIRANA 频域介电响应测量装置，设定输入电压为 200 V，频率范围为 0.001~1000 Hz。

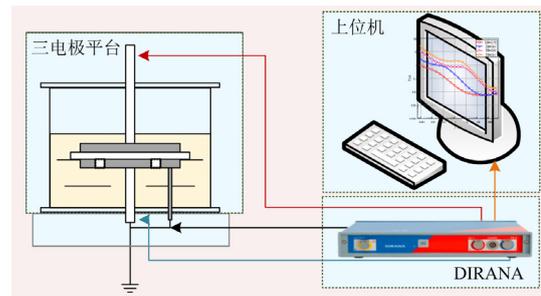


图 1 FDS 测试接线图

Fig. 1 FDS test wiring diagram

5) 根据 IEC 60450—2007 采用粘度计法测试所取试品的 DP 值，剔除相同条件下 DP 值误差较大的试样，得到不同老化阶段的绝缘纸平均 DP 分别为 1178、865、543、326 和 241。

综上，整体制备与测试的流程如图 2 所示。结合 GB/T 29305-2012 的国标要求，将所制的样本根据其聚合度划分为 4 类老化程度，具体如表 1 所示。

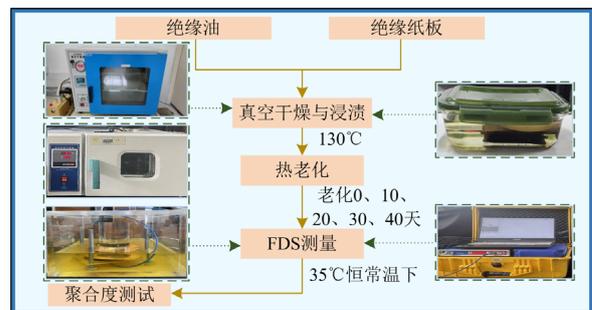


图 2 样本制备与测试流程图

Fig. 2 Sample preparation and testing flowchart

表 1 根据 DP 值的老化程度分类等级

Table 1 Classification level according to the degree of aging of the DP value

| DP | DP ≥ 1000 | 650 ≤ DP < 1000 | 350 ≤ DP < 650 | DP < 350 |
|------|-----------|-----------------|----------------|----------|
| 老化程度 | 绝缘优质 | 轻微老化 | 中度老化 | 重度老化 |

2 构建频域介电特征数据库

2.1 表征老化特征指标的选取

通过 FDS 测试得到包括损耗因子 $\tan \delta$ 、复介电常数以及复电容在内的介电谱线, 其中包含丰富的复合绝缘劣化程度信息^[13]。图 3 为每组试样平均水平的介质损耗曲线。

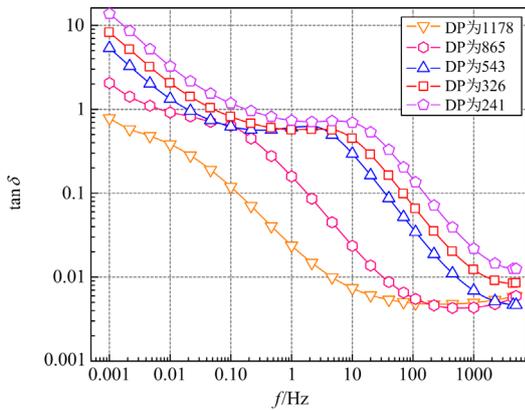

 图 3 不同老化程度下的 $\tan \delta$ 介电谱

 Fig. 3 The $\tan \delta$ dielectric spectra at various aging degree

现有研究通过测试不同老化 DP 值下油纸绝缘系统所产生的 $\tan \delta$ 差异, 发现当频率 f 为 0.001~10 Hz 时, 老化程度对谱线形态十分敏感, 因此可将该范围内的频率值、积分量作为劣化特征进行分析^[14-16]。当老化程度加深时, 其频率点对应的介损值与积分量均增加。故本文利用该频率敏感区间对 $\tan \delta$ 进行分段积分, 并将 D_1 和 D_2 命名为特征量, 分段积分式表示为

$$D_1 = \int_{10^{-3}}^{10^{-1}} \tan \delta(f) df \quad (1)$$

$$D_2 = \int_{10^{-1}}^{10^1} \tan \delta(f) df \quad (2)$$

此外, 复介电常数实虚部中同样蕴藏丰富的老化状态因素^[17]。复介电常数参量如式(3)、式(4)所示, 可用于衡量绝缘介质在交流电场下的阻容性, 以区分电导分量与弛豫分量^[18]。

$$\varepsilon_o^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{j\omega\varepsilon_s} \quad (3)$$

$$\varepsilon_p^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (4)$$

式中: ω 为 FDS 测试中施加电压的频率对应角速度; $\varepsilon_o^*(\omega)$ 和 $\varepsilon_p^*(\omega)$ 分别表示施压条件下复介电常数的电导分量与弛豫分量; σ_0 表示静态电导率; ε_s 和 ε_∞ 分别表示静态介电常数、光频介电常数; τ 表示弛豫时间常数。根据 Kramers-Kronig 复变换方程可剔除其中电导分量^[19]。最终可将弛豫复介电常数分解为

$$\varepsilon_p'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon_p''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (6)$$

式中, $\varepsilon_p'(\omega)$ 和 $\varepsilon_p''(\omega)$ 分别为 $\varepsilon_p^*(\omega)$ 的实部和虚部。

由于复合油纸绝缘系统存在多类弛豫过程, 且相互耦合的特性使得复介电常数实虚部难以表征老化程度, 因此采用复介电常数实部一阶微分的方法突出弛豫特征。首先进行坐标变换, 令 $\omega = e^x$, 接着对复介电常数实部进行一次微分, 表示为

$$\frac{\partial \varepsilon_p'(\omega)}{2\partial \ln(\omega)} = \frac{(\tau\omega)^2(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{(1 + (\tau\omega)^2)^2} = \frac{\varepsilon_p''(\omega)^2}{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)} \quad (7)$$

由此可见, 复介电常数实部一阶微分与剔除电导分量的弛豫复介电常数虚部的平方成比例, 利用此方法可得到突出弛豫特点的介电谱线, 如图 4 所示, 其峰值点与积分量均与老化程度密切相关, 故选取 D_3 、 D_4 作为老化-弛豫相关特征指标, 分别表示为

$$D_3 = \max \left(-\frac{\partial \varepsilon_p'(\omega)}{2\partial \ln(\omega)} \right), \omega \in [0.002\pi, 2000\pi] \quad (8)$$

$$D_4 = \int_{\ln(0.002\pi)}^{\ln(2000\pi)} -\frac{\partial \varepsilon_p'(\omega)}{2\partial \ln(\omega)} d(\ln(\omega)) \quad (9)$$

相关研究表明交流电阻 R_{oil} 与绝缘老化程度之间有很强的关联性^[20], 其与静态电导率 σ_0 互为倒数。

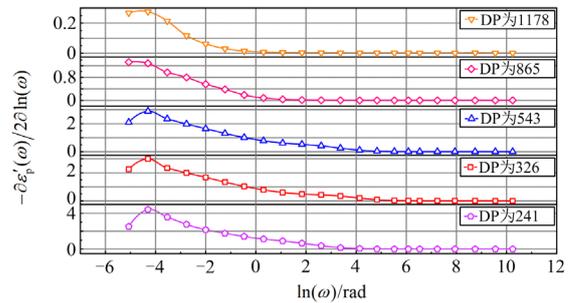


图 4 不同老化试样复介电常数实部一阶微分谱线

Fig. 4 First-order differential spectra of the real part of the complex dielectric constant of various aged samples

为分离出交流电阻分量, 利用式(7)得到复介电常数虚部的极化部分 $\varepsilon_p''(\omega)$, 令虚部实测分量与其相减,

通过最小二乘法拟合得到与交流电阻相关的虚部分量 $\varepsilon''_o(\omega)$ 在双对数坐标系下的斜率与截距, 该截距即包含交流电阻分量。结合式(3)可得交流电阻为

$$\begin{cases} \varepsilon''_o(\omega) = \varepsilon''(\omega) - \varepsilon''_p(\omega) = \frac{1}{R_{oil}\varepsilon_s\omega} \\ \ln(R_{oil}) = \ln\left(\frac{1}{\varepsilon''_o(\omega)\varepsilon_s}\right) - \ln(\omega) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\varepsilon''(\omega)$ 表示双对数坐标系下实测复介电常数的虚部分量。

由式(10)可知, 在双对数坐标系下电导分量为斜率近似 -1 的直线, 通过拟合其截距, 即可将交流电阻 R_{oil} 单独分离, 以其中一组未老化的样本数据为例, 其分离过程如图 5 所示。综上, 将交流电阻 R_{oil} 作为其辅助特征指标 D_0 , 该指标与聚合度之间的关系如图 6 所示。

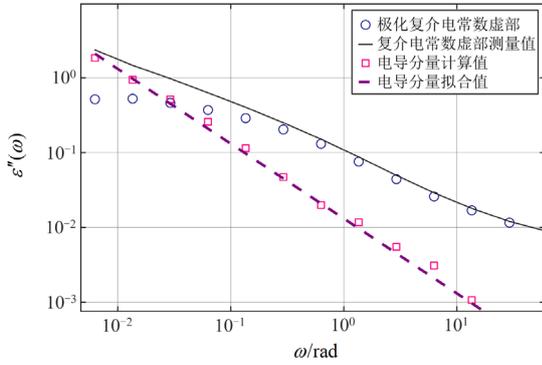


图 5 交流电阻分离过程

Fig. 5 AC resistor separation process

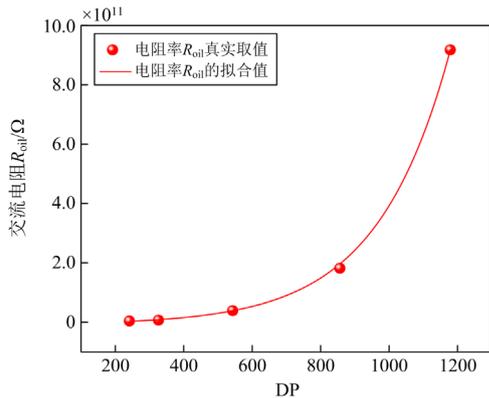


图 6 交流电阻 R_{oil} 与聚合度之间的关系

Fig. 6 Correlation between AC resistor R_{oil} and degree of polymerization

由图 5 可知, 经最小二乘法拟合后电导计算值斜率为 -0.994 , 曲线拟合优度为 99.27% , 证实了式(10)在分离交流电阻分量方面的有效性。

2.2 利用所提特征指标构建老化特征数据库

从图 6、图 7 可以看出本文所提取的特征指标 $D_0 - D_4$ 均随着老化程度的加深发生规律性变化。

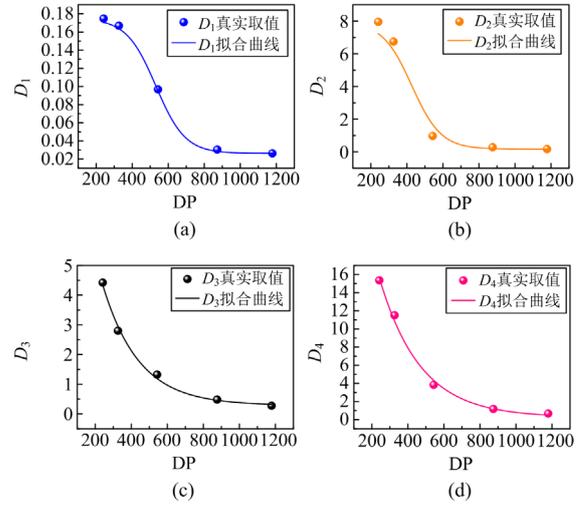


图 7 不同老化特征指标 $D_1 - D_4$ 拟合效果

Fig. 7 $D_1 - D_4$ fitting for various aging characteristic indicators

然而由于试样制备时间过长, 模型搭建所需数据量不足, 本文利用非线性拟合扩大数据密度的方法弥补样本数量有限的不足。具体步骤如下所述。

1) 设置非线性函数变量, 令本文所选取 5 个特征量 $D_0 - D_4$ 分别对应函数 $y_0 - y_4$ 。

2) 分别确定各特征指标量的非线性函数类型, 通过设置参数 a 、 b 、 c 、 k 进行非线性拟合模型的构建, 并利用拟合优度表征模型的拟合效果, 将已知自变量代入求解, 辨识方程参数。各特征指标拟合方程如表 2 所示。

3) 据表 2 构建扩充数据库 Θ_A , 如式(11)所示, 考虑精度影响, 在区间范围 $[241, 1178]$ 内以每 20 的 DP 值为步长进行 44 组数据拓展。

$$\Theta_A = \begin{bmatrix} y_0(x_{01}), y_1(x_{11}), y_2(x_{21}), y_3(x_{31}), y_4(x_{41}) \\ y_0(x_{02}), y_1(x_{12}), y_2(x_{22}), y_3(x_{32}), y_4(x_{42}) \\ y_0(x_{03}), y_1(x_{13}), y_2(x_{23}), y_3(x_{33}), y_4(x_{43}) \\ \vdots \\ y_0(x_{0j}), y_1(x_{1j}), y_2(x_{2j}), y_3(x_{3j}), y_4(x_{4j}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\Theta_{Aj} = \{y_0(x_{0j}), y_1(x_{1j}), y_2(x_{2j}), y_3(x_{3j}), y_4(x_{4j})\}$ 表示所扩充的第 j 组数据对应的非线性函数求得特征值; $y_i(x_{ij})$ 表示特征量 D_i 通过非线性方式外扩的第 j 组数据。综上所述, 本节利用非线性函数拟合扩展了老化特征数据库, 且各拟合模型优度均达理想值, 可为后续老化程度诊断模型提供数据基础。

表2 非线性拟合模型
Table 2 Nonlinear fitting model

| | | | | |
|------|---------------------------------------|-----|---------|------------|
| 拟合方程 | $y_0 = a + \frac{b(e^{kx} - 1)}{k}$ | | | |
| a | 4.83×10^9 | k | 0.0047 | 拟合优度 0.999 |
| b | 1.75×10^7 | | | |
| 拟合方程 | $y_1 = a + \frac{b}{1 + 10^{c(k-x)}}$ | | | |
| a | 0.2631 | c | -0.0053 | 拟合优度 0.998 |
| b | 0.1484 | k | 531.44 | |
| 拟合方程 | $y_2 = a + \frac{b}{1 + 10^{c(k-x)}}$ | | | |
| a | 0.1666 | c | -0.0053 | 拟合优度 0.972 |
| b | 7.7856 | k | 426.95 | |
| 拟合方程 | $y_3 = a + b \exp(kx)$ | | | |
| a | 0.2875 | k | -0.0049 | 拟合优度 0.995 |
| b | 13.4819 | | | |
| 拟合方程 | $y_4 = a + b \exp(kx)$ | | | |
| a | 0.2566 | k | -0.0044 | 拟合优度 0.992 |
| b | 44.5 | | | |

3 融合聚类云与证据推理的老化评估模型

3.1 证据推理理论

证据推理理论(dempster-shafer evidence theory, D-S)是处理一系列模糊性问题的融合性理论, 可将多子指标分析结论推理融合, 决策能力强大^[21], 其基本原理如下。

1) 定义基本辨识框架 Θ

Θ 为相互排斥且结论完备的命题集, 根据表 1, 本文将油质绝缘介质的老化程度划分为 4 类等级, 构成 $\Theta = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 。

2) 基本概率分配

Θ 中所有命题的集合记作 2^Θ , 其中概率分配函数记作 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 且满足:

$$\sum_{A_i \in \Theta} m(A_i) = 1, m(\emptyset) = 0 \quad (12)$$

式中: m 为 Θ 的基本可信度分配(basic credibility assignment, BPA); $m(A_i)$ 表示分配于命题 A_i 的基本概率, 也称 mass 函数。同时定义辨识框架的基本概率分配函数为 $m(\Theta)$, 表示所得结论的不确定度。

3) 证据推理合成

证据推理通过 Dempster 经典规则合成, 具体表示为

$$\begin{cases} (m_1 \oplus \dots \oplus m_N)(A) = \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap \dots \cap A_i = A} \prod_{j=1}^N m_j(A_j) \\ K = 1 - \sum_{A_1 \cap \dots \cap A_i = \emptyset} \prod_{j=1}^N m_j(A_j) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $m_j(A_i)$ 表示证据指标 j 分配给 A_i 命题的 mass 函数值; K 表示证据合成的冲突系数, 当其值趋近 0 时, 将导致规则失效; N 为证据指标数量。

3.2 基于聚类云的证据推理概率分配方法

根据证据推理规则进行多子指标合成之前, 需要对证据概率进行分配, 但以往研究通常利用主观决策判断进行分配, 导致人为偏差。因此本文提出基于聚类云的证据推理概率分配方法。

3.2.1 云模型理论及建模步骤

云模型概率分配体系是融合随机性与模糊性的综合概率模型, 该理论由于出色的定性与定量转换问题处理能力而被广泛应用于众多领域^[22]。云模型分为正向发生器与逆向发生器, 其中正向发生器将概念云特征 (E_x, E_n, H_e) 转化为定量云滴, 反之则为逆向发生器。其中: E_x 表示云模型期望; 云熵值 E_n 用于表征定性概念的可度量粒度大小, 也可用于描述概念清晰性; H_e 用于反映云滴雾化性的熵值, 称为云超熵。

令 U 为论域集合, A 为论域 U 的定性表达, 则通过云模型可计算出 A 中的变量 $a \in U$ 的概率。假设 $\mu(a) \in [0, 1]$ 为 a 对 A 的隶属度, 且其满足式(14)。

$$\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall a \in U, a \rightarrow \mu(a) \quad (14)$$

则称 A 为分布于论域 U 中的一类云, 而 a 为其中的一个云滴, 可表示为 $\text{drop}(a, \mu(a))$ 。

在概率分配过程中, 需通过云发生器实现定性概念到定量的映射, 故本文选取正向云发生器, 且生成云模型步骤如下:

1) 为确定云滴个数, 首先以 E_n 为期望、 H_e 为标准差生成标准正态分布随机数 E_{nm} , 并选取合适云滴数值 N_{drop} ;

2) 生成以 E_x 为期望、 E_n 为标准差的标准正态随机分布数 x_i , 并计算其分配概率 $\mu(x_i)$, 构成云滴 $\text{drop}(x_i, \mu(x_i))$, 分配概率计算公式为

$$\mu(x_i) = e^{-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_n^2}} \quad (15)$$

3) 重复计算上述步骤, 直至生成云滴数为 N_{drop} 的标准云。

选择正向云发生器进行云模型构建时, 概念云特征 (E_x, E_n, H_e) 值的选定尤为重要, 以往常用特征

区间中心值作为云期望,采用“ $3E_n$ ”法计算云熵,但在本文所提老化程度特征区间内,DP 数值与特征指标数值在非线性函数拟合下拟合效果最佳,利用“ $3E_n$ ”法进行模型构建将产生中心性及随机性偏差,故本文提出聚类云模型对上述偏差进行修正并建模。

3.2.2 生成基于 Kmeans 的聚类云模型

本节利用 Kmeans 算法搭建聚类云模型,该算法通过衡量样本距离而确定样本间的关联性^[23],根据需要将样本集划分为 Q 簇,用 C_i 表征其中某簇,则该簇均值为

$$\beta_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x \quad (16)$$

β_i 可表征该簇的质心,也即聚类中心,该质心质量的衡量标度为其与簇内其余样本的平方误差。

$$E = \sum_{i=1}^Q \sum_{x \in C_i} \|x - \beta_i\|^2 \quad (17)$$

式中, E 为平方误差值,用于量化簇内样本相似程度,其值越小表征相似度越高,该质心置信度越高。

求解聚类中心的具体步骤如下。

1) 数据归一化处理,由于交流电阻数值与其余老化特征指标间的数值差异过大,为优化聚类效果,首先对原数据 Θ_A 进行归一化处理,具体为

$$\begin{cases} y'_{ij} = \frac{y_{ij} - y_{i\min}}{y_{i\max} - y_{i\min}} & y_{ij} \in \Theta_A, i = 1, 2, 3, 4 \\ y'_{ij} = \frac{y_{i\max} - y_{ij}}{y_{i\max} - y_{i\min}} & y_{ij} \in \Theta_A, i = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: y'_{ij} 表征第 i 个特征指标中第 j 个值的归一化结果; $y_{i\max}$ 、 $y_{i\min}$ 分别为第 i 个特征指标中的最大、最小值。由于对于 DP 值而言,油纸绝缘介质的交流电阻 R_{oil} 为正向指标,而 $D_0 - D_4$ 均为负向指标,故 R_{oil} 归一化取值也对应与其余特征指标相反。

2) 输入经处理后的数据样本集,令簇值为 4,设定输出簇为 $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ 。

3) 从样本中随机选取 Q 个样本值 $\{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$ 进行质心初始化,将其代入式(17)计算该质心平方误差值,并将剩余样本与其最近质心划为同簇。

4) 针对每个簇类分别通过式(16)重新计算质心。

5) 重复步骤 3)、步骤 4),直至质心变幅小于设定阈值 0.001。

通过 Kmeans 聚类最终得到聚类效果 SC 轮廓系数为 0.77,聚类成效及质心分布如图 8 所示,表 3 给出 4 类老化程度等级对应的质心原数据。

综上所述, Kmeans 聚类算法修正云模型参数

步骤如下:将特征参数聚类质心的归一化数值作为聚类云模型期望;同时由于数据的非线性分布特征,选取样本数据方差作为云模型云熵,具体表示为

$$\begin{cases} E'_x(Q) = \beta_Q \\ E'_n(Q) = \frac{\sum_{i=1}^n |x_n - E'_x(Q)|}{n} \quad x_n \in C_i \end{cases} \quad (19)$$

式中: n 为某簇中样本总数; E'_x 与 E'_n 分别表示聚类后的云模型参数,取定 $H_c = 0.01$ 。将表 3 所得样本质心作为样本数据区间,重新利用式(18)进行数据归一化处理,生成 R_{oil} 云模型,如图 9 所示。

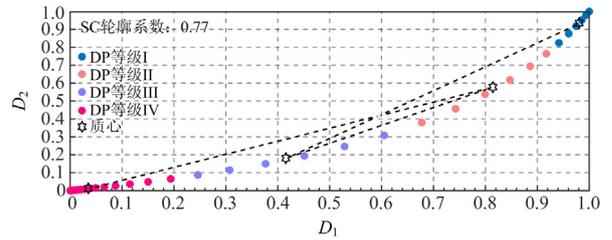


图 8 聚类成效及质心分布图

Fig. 8 Clustering effectiveness and distribution of mass center

表 3 油纸绝缘老化程度分级质心原数据

Table 3 Grading mass center original data of oil paper insulation aging degree

| Kmeans | D_0 | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | 老化程度 |
|--------|----------------------|-------|-------|-------|--------|------|
| C_1 | 7.6×10^{11} | 0.029 | 0.221 | 0.455 | 1.158 | 绝缘优质 |
| C_2 | 3.6×10^{11} | 0.078 | 1.279 | 1.040 | 3.719 | 轻微老化 |
| C_3 | 1.7×10^{11} | 0.145 | 4.380 | 2.055 | 7.631 | 中度老化 |
| C_4 | 3.4×10^{10} | 0.169 | 6.946 | 4.018 | 14.535 | 重度老化 |

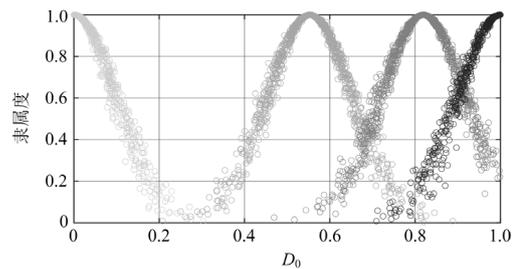


图 9 R_{oil} 聚类云模型

Fig. 9 R_{oil} clustering cloud model

3.3 基于 CRITIC-G1 综合法的证据修正因子计算

由于表征老化程度的多指标之间存在冲突性与波动性,故在进行 Dempster 多证据合成的过程中,需要对各证据进行依赖程度分析,因此本文提出利用证据修正因子使多指标证据合成过程合理化^[24]。

3.3.1 基于 CRITIC 法的客观权重

客观赋权时常采用灰色关联度或熵权法,而

CRITIC 因其重点考虑不同指标间的相关性、冲突性而更具有优势^[25]。该方法利用相关系数、量化标准差分别表征相关系数与冲突系数。首先构建评价矩阵 \mathbf{X} , 令指标数为 p , 样本数为 q , 评价矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \cdots & x_{qp} \end{bmatrix} \quad (20)$$

根据式(20), 将评价矩阵 \mathbf{X} 的正向指标与负向指标按列分别无量纲化, 得到标准矩阵 \mathbf{X}' , 通过标准矩阵可量化相关系数 s_i 与冲突系数 ρ_{ij} 。

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q (\mathbf{X}'_{ij} - \bar{\mathbf{X}}_i)^2} \quad i=1,2,\dots,p \quad (21)$$

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(\mathbf{X}'_i, \mathbf{X}'_j)}{s_i s_j} \quad i, j=1,2,\dots,p \quad (22)$$

式中: $\bar{\mathbf{X}}_i$ 为标准矩阵第 i 个指标均值; \mathbf{X}'_{ij} 为第 i 个指标中的第 j 个样本值; $\text{cov}(\mathbf{X}'_i, \mathbf{X}'_j)$ 为 i 、 j 行两个指标间的协方差。故各指标信息量 G_i 与客观权重 z_i 分别如式(23)和式(24)所示。

$$G_i = s_i \sum_{j=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad i=1,2,\dots,p \quad (23)$$

$$z_i = \frac{G_i}{\sum_{j=1}^q G_j} \quad i=1,2,\dots,p \quad (24)$$

3.3.2 基于 G1 法的主观权重

G1 法也称序关系分析法, 其由层次分析法改进而得^[26]。假设指标数为 p , 则指标间的序关系按重要程度排列为: $\tilde{C}_1 \succ \tilde{C}_2 \succ \cdots \succ \tilde{C}_p$, 对于两个任意相邻指标 \tilde{C}_j 和 \tilde{C}_{j-1} 而言, 决策专家所赋予相对重要程度 r_b 表示为

$$r_b = \frac{\omega_{b-1}}{\omega_b} \quad b=p, p-1, \dots, 2 \quad (25)$$

式中, ω_{b-1} 表示第 $b-1$ 个指标所占主观权重。 r_b 取值参照表 4。

表 4 r_b 取值参考表

Table 4 Reference table for r_b values

| r_b 取值 | 意义 |
|----------|------|
| 1.0 | 同等重要 |
| 1.2 | 稍显重要 |
| 1.4 | 明显重要 |
| 1.6 | 非常重要 |
| 1.8 | 极其重要 |

最后, 通过式(26)求得各指标主观权重 ω_i 。

$$\omega_i = (1 + \sum_{\beta=2}^p \prod_{i=\beta}^p r_i)^{-1} \quad (26)$$

3.3.3 综合证据修正因子的确定

首先结合上述主客观权重, 通过综合赋权可得指标 p_i 的综合权重系数 W_i 为

$$W_i = \frac{z_i \omega_i}{\sum_{i=1}^p z_i \omega_i} \quad (i=1,2,\dots,p) \quad (27)$$

根据综合权重得到证据修正因子 α_i 为

$$\alpha_i = u \frac{W_i}{W_{\max}} \quad (28)$$

式中: u 为证据可信度; W_i 为指标 p_i 的综合权重; W_{\max} 为综合权重系数中的最大值。基于此修正因子, 可对聚类云的基本概率进行分配修正, 表示为

$$\begin{cases} m'_{p_i}(A_j) = \alpha_i m_{p_i}(A_j) \\ m'_{p_i}(\Theta) = 1 - \alpha_i (1 - m_{p_i}(\Theta)) \end{cases} \quad (29)$$

式中: p_i 表示第 i 个指标; m'_{p_i} 、 m_{p_i} 分别表示修正前后的基本概率分配。利用修正后的证据基本概率可得证据不确定度。

3.4 老化程度诊断流程

综合上述内容, 得到油纸绝缘系统老化程度诊断流程如图 10 所示。

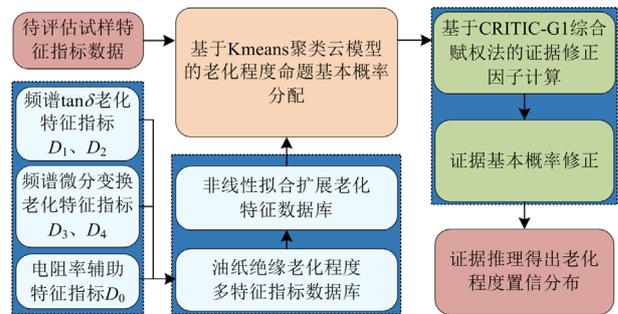


图 10 老化程度诊断流程图

Fig. 10 Diagnostic flowchart for aging degree

4 实例分析

为进一步验证本文所提方法的有效性 with 准确性, 利用第 1 节所提步骤重新制备 5 组不同老化程度的复合油纸绝缘试样, 其各项特征值如表 5 所示。限于篇幅, 本节以试样 3 为例进行诊断。

4.1 基于聚类云模型的基本概率分配

基于式(19)、非线性数据拓展所得老化特征训练数据库及 Kmeans 聚类成效生成特征指标 D_1 — D_4 云模型, 如图 11 所示。

表 5 待测试样绝缘信息

Table 5 Insulation information of the sample to be tested

| 试样 | D_0 | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 |
|----|-----------------------|--------|--------|--------|---------|
| 1 | 5.61×10^{11} | 0.0264 | 0.1695 | 0.3513 | 0.6494 |
| 2 | 4.57×10^{11} | 0.0811 | 0.5682 | 1.6344 | 3.5310 |
| 3 | 9.21×10^{10} | 0.1346 | 4.1057 | 1.9114 | 7.1151 |
| 4 | 1.31×10^{10} | 0.1425 | 5.2536 | 2.3706 | 8.8028 |
| 5 | 7.17×10^9 | 0.1717 | 7.1468 | 4.8131 | 10.0577 |

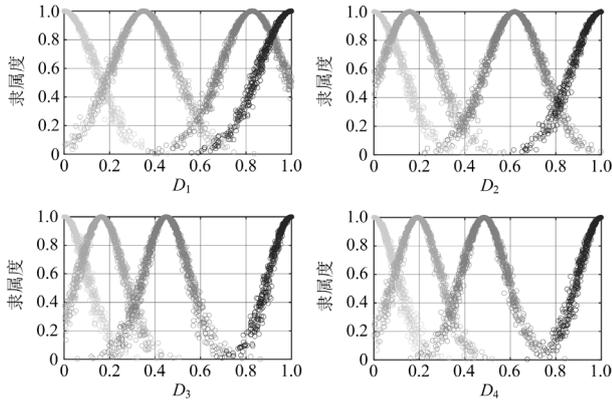


图 11 特征指标 D_1 — D_4 聚类云模型

Fig. 11 Clustering cloud model for feature metrics D_1 — D_4

根据生成的云模型，对待评估试样 3 进行基础概率分配，如表 6 所示。

表 6 待评估试样 3 的老化程度基本概率分配

Table 6 Basic probability assignment of the degree of aging of the specimen 3 for evaluation

| 证据 | $m(A_1)$ | $m(A_2)$ | $m(A_3)$ | $m(A_4)$ |
|-------|----------|----------|-------------|-------------|
| p_1 | 0 | 0.13 | 0.69 | 0.81 |
| p_2 | 0 | 0.07 | 0.81 | 0.22 |
| p_3 | 0 | 0.06 | 0.92 | 0.13 |
| p_4 | 0.04 | 0.46 | 0.69 | 0 |
| p_5 | 0.07 | 0.37 | 0.71 | 0 |

由表 6 可知，证据 p_1 与其余证据间出现冲突，故需进行证据基本概率修正。

4.2 证据基本概率修正

基于式(20)计算 5 个老化程度特征量的无量纲化矩阵，并通过式(21)一式(24)计算得到试样客观修正因子为

$$z = [0.132, 0.466, 0.150, 0.138, 0.114]$$

同理，根据式(25)与表 4，结合专家经验得到主观修正因子为^[11, 27-28]

$$\omega = [0.252, 0.210, 0.190, 0.174, 0.174]$$

根据式(27)一式(28)得到综合证据修正因子为

$$\alpha = [0.306, 0.899, 0.262, 0.221, 0.182]$$

最后，基于式(29)修正表 6 中原有证据基本分配概率以及不确定度 $m(\Theta)$ ，具体如表 7 所示。最终证据推理合成命题信度如表 8 所示。

表 7 老化程度基本概率修正

Table 7 Basic probability correction for aging

| 证据 | $m(A_1)$ | $m(A_2)$ | $m(A_3)$ | $m(A_4)$ | $m(\Theta)$ |
|-------|----------|----------|---------------|---------------|-------------|
| p_1 | 0 | 0.0092 | 0.2111 | 0.2478 | 0.5320 |
| p_2 | 0 | 0.0630 | 0.7289 | 0.1980 | 0.0101 |
| p_3 | 0 | 0.0157 | 0.2411 | 0.0341 | 0.7091 |
| p_4 | 0.0088 | 0.1016 | 0.1524 | 0 | 0.7372 |
| p_5 | 0.0128 | 0.0675 | 0.1295 | 0 | 0.7902 |

表 8 待测试样 3 的老化命题信度

Table 8 Aging propositional confidence of sample 3 to be tested

| 命题 | $m(A_1)$ | $m(A_2)$ | $m(A_3)$ | $m(A_4)$ | $m(\Theta)$ |
|----|----------|----------|---------------|----------|-------------|
| 信度 | 0.0001 | 0.0358 | 0.8273 | 0.1325 | 0.0042 |

由表 8 可知，根据隶属度原则可判定试样 3 属于轻微老化等级，置信度达 0.8273。可见，利用单一特征证据聚类云模型进行基本概率分配的老化程度等级判断易出现偏差，而基于证据修正因子调整多特征证据间冲突性的方法，通过量化每一证据对辨识框架的不确定度，不仅能够消除单一证据的偏差，还能适应更广泛的绝缘情形，提高命题判断精度。

4.3 证据推理合成命题

按照式(13)的证据推理合成规则，对所有待测试样进行老化程度命题诊断，并对其实际测试所得 DP 值，如表 9 所示。

表 9 待测试样评估结果

Table 9 Evaluation results of the sample to be tested

| 试样 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 命题 | 优质绝缘 | 轻微老化 | 中度老化 | 中度老化 | 重度老化 |
| A_1 信度 | 0.8413 | 0.1645 | 0.0050 | 0.0002 | 0.0054 |
| A_2 信度 | 0.1045 | 0.7730 | 0.0310 | 0.0202 | 0.0288 |
| A_3 信度 | 0.0423 | 0.0164 | 0.8273 | 0.8034 | 0.1429 |
| A_4 信度 | 0.0083 | 0.0001 | 0.1325 | 0.1678 | 0.8169 |
| $m(\Theta)$ | 0.0036 | 0.0451 | 0.0042 | 0.0084 | 0.0060 |
| DP 值 | 1089 | 849 | 513 | 406 | 265 |

通过表 9 可发现，所构建模型对油纸绝缘老化程度诊断的置信度均达到 80%，所制备的 5 个试样诊断结论均符合实际情况。同时发现中度老化状态的试样 3 与试样 4 中，试样 3 中度老化置信度为 82.73%，试样 4 为 80.34%，根据计算得到重度老化置信度为 13.25%，而试样 4 重度老化置信度为 16.78%，表明试样 4 较试样 3 劣化程度更深，更加偏向重度老化，故所提方法在一定程度上可反映试样的劣化程度。

5 结论

本文提出一种融合频谱特性与聚类云-证据推理的油纸绝缘老化程度诊断方法, 经过验证后得到如下结论:

1) 经实验测试, 基于频谱特性提取的多特征量 D_0 — D_4 可有效表征油纸绝缘系统老化程度;

2) 基于 Kmeans 算法构建的聚类云模型, 结合 CRITIC-G1 综合赋权的证据修正方法可更加客观地表征证据组合的随机性与冲突性;

3) 利用证据推理合成老化程度等级命题, 体现了模糊置信的思想, 在此基础上, 所提策略可在一定程度反映复合绝缘试样老化程度的劣化趋势。实验验证了该方法可用于准确诊断不同样本的老化程度。

参考文献

- [1] 邹阳, 林锦茹, 李安娜, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 35-43.
ZOU Yang, LIN Jinjia, LI Anna, et al. Evaluation of transformer oil-paper insulation status based on grey relational analysis and a cluster cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 35-43.
- [2] 欧阳鑫, 李志斌. 基于样本扩充和特征优选的 IGWO 优化 SVM 的变压器故障诊断技术[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 11-20.
OUYANG Xin, LI Zhibin. Transformer fault diagnosis technology based on sample expansion and feature selection and SVM optimized by IGWO[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 11-20.
- [3] 邓祥力, 廖玥琳, 朱宏业, 等. 基于数字孪生模型电流动态时间规整差异度的变压器早期故障辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 156-167.
DENG Xiangli, LIAO Yuelin, ZHU Hongye, et al. Early fault identification for a transformer based on current dynamic time warping difference of a digital twin model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 156-167.
- [4] 杨丽君, 廖瑞金, 孙会刚, 等. 油纸绝缘热老化特性及生成物的对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 53-58.
YANG Lijun, LIAO Ruijin, SUN Huigang, et al. Contrasting analysis and investigation on properties and products of oil-paper during thermal aging process[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 53-58.
- [5] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [6] LIAO Ruijin, LIU Jiefeng, YANG Lijun, et al. Quantitative analysis of insulation condition of oil-paper insulation based on frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 322-334.
- [7] 张涛, 李林多, 王尧, 等. 应用介损积分谱对变压器老化程度的定量评估[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 115-121, 130.
ZHANG Tao, LI Linduo, WANG Yao, et al. Quantitative assessment of transformer aging degree using dielectric loss integral spectrum[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(8): 115-121, 130.
- [8] 张涛, 江世杰, 张宁, 等. 基于介电模量谱和分数阶模型的植物油纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1452-1461.
ZHANG Tao, JIANG Shijie, ZHANG Ning, et al. Research on evaluation of vegetable oil-paper insulation condition based on dielectric modulus spectrum and fractional model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1452-1461.
- [9] LINHJELL D, LUNDGAARD L, GAFVERT U. Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 156-169.
- [10] 范贤浩, 刘捷丰, 张镜议, 等. 融合频域介电谱及支持向量机的变压器油浸纸绝缘老化状态评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2161-2168.
FAN Xianhao, LIU Jiefeng, ZHANG Yiyi, et al. Aging evaluation of transformer oil-immersed insulation combining frequency domain spectroscopy and support vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 2161-2168.
- [11] FAN X, LIU J, LAI B, et al. FDS measurement-based moisture estimation model for transformer oil-paper insulation including the aging effect[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.
- [12] 杨飞豹, 高国强, 宋臻杰, 等. 基于频域介电谱和多输出支持向量回归的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 150-157.
YANG Feibao, GAO Guoqiang, SONG Zhenjie, et al. Transformer oil-paper insulation condition assessment based on frequency domain dielectric spectroscopy and multi-output support vector regression[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 150-157.
- [13] 杨丽君, 齐超亮, 吕彦冬, 等. 变压器油纸绝缘状态的频域介电谱特征参量及评估方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 212-219.
YANG Lijun, QI Chaoliang, LÜ Yandong, et al. Characteristic parameters and assessment methods of

- frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 212-219.
- [14] 王世强, 魏建林, 杨双锁, 等. 油纸绝缘加速热老化的频域介电谱特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 125-131.
WANG Shiqiang, WEI Jianlin, YANG Shuangshuo, et al. Frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation under accelerated thermal aging[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 125-131.
- [15] JADAV R B, EKANAYAKE C, SAHA T K. Understanding the impact of moisture and ageing of transformer insulation on frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 369-379.
- [16] 张福增, 王婷婷, 曾向君, 等. 阻燃剂对环氧树脂绝缘子护套材料耐热氧化性能的影响[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 154-160.
ZHANG Fuzeng, WANG Tingting, ZENG Xiangjun, et al. Effect of flame retardant on thermal and oxidative aging properties of epoxy resin insulator sheath material[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 154-160.
- [17] XIE J, DONG M, HU Y, et al. Modeling oil-paper insulation frequency domain spectroscopy based on its microscopic dielectric processes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1788-1796.
- [18] 殷之文. 电介质物理学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] 高岩峰, 卢毅, 梁曦东, 等. Kramers-Kronig 变换在介电响应分析中的数值计算方法、意义及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 318-329, 398.
GAO Yanfeng, LU Yi, LIANG Xidong, et al. Numerical computational method, application and significance of the Kramers-Kronig transform in the analysis of dielectric response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 318-329, 398.
- [20] 刘捷丰. 基于介电特征量分析的变压器油纸绝缘老化状态评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [21] 石宜金, 谭贵生, 赵波, 等. 基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 167-176.
SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 167-176.
- [22] 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): 104-113.
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.
- [23] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [24] 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.
- [25] 林冠强, 莫天文, 叶晓君, 等. 基于 TOPSIS 和 CRITIC 法的电网关键节点识别[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3383-3389.
LIN Guanqiang, MO Tianwen, YE Xiaojun, et al. Critical node identification of power networks based on TOPSIS and CRITIC methods[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3383-3389.
- [26] 王学军, 郭亚军. 基于 G1 法的判断矩阵的一致性分析[J]. 中国管理科学, 2006(3): 65-70.
WANG Xuejun, GUO Yajun. Analyzing the consistency of comparison matrix based on G1 method[J]. Chinese Journal of Management Science, 2006(3): 65-70.
- [27] GAO J, YANG L, WANG Y, et al. Condition diagnosis of transformer oil-paper insulation using dielectric response fingerprint characteristics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 1207-1218.
- [28] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘频域介电特征量与绝缘老化状态的关系[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 43-49, 76.
LIAO Ruijin, HAO Jian, YANG Lijun, et al. Relationship between frequency domain dielectric characteristic quantity and aging status of transformer oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 43-49, 76.

收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-05-15

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

黄煜(1999—), 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: 1051266256@qq.com

(编辑 许威)