

DOI: 10.7667/PSPC180526

基于降维技术与 K-means 聚类的油纸绝缘状态综合灰评估

刘庆珍, 张晓燕, 蔡金锭

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建省新能源发电与电能变换重点实验室, 福建 福州 350108)

摘要: 针对变压器油纸绝缘单一特征量评估易受多种因素干扰而影响准确性等问题, 提出一种基于降维技术与改进 K-means 聚类的变压器油纸绝缘状态综合灰评估新方法。首先, 提出去极化电流谱线末端双点解析法提取 3 个绝缘老化新特征量。接着, 基于特征量的多元评估指标阵, 结合组合权重法和降维技术, 提出特征量综合指标 Z 。最后, 采用基于 K-means 聚类算法对 Z 构建“好、中、差”3 等级的分级数据库并确定等级界限标准表, 形成变压器油纸绝缘老化状态灰色聚类评估体系。经若干实例分析证明所提方法能全面、准确地评估绝缘状态。

关键词: 末端双点解析; 极化最大直谱线; 组合权重; 降维技术; K-means 聚类; 油纸绝缘状态

Comprehensive grey evaluation for oil-paper insulation based on dimension reduction techniques and K-means cluster

LIU Qingzhen, ZHANG Xiaoyan, CAI Jinding

(College of Electrical Engineering and Automation, Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the problem that oil-paper insulation aging evaluation accuracy is vulnerable to single characteristic parameter under different circumstance, a new comprehensive gray evaluation method for transformer oil-paper insulation status based on dimension reduction techniques and K-means clustering is proposed. First, a terminal two-point analytical method of depolarization current spectrum is presented to extract three new features of insulation aging. Second, a multivariate evaluation index array is constructed and the comprehensive index Z is refined via a combined weighting method combining with main component dimension reduction techniques. Finally, a hierarchical database of ‘good, middle, and poor’ 3-level for Z is built by weighted Euclidean distance-based K-means clustering algorithm, the level limit standard table for comprehensive index is determined and the grey clustering evaluation system for transformer oil-paper insulation aging state is set up accordingly. The final numerous case analysis proves that the proposed method is comprehensive and accurate to evaluate the insulation state.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61174117).

Key words: direct spectrum solution; polarization maximum spectrum; combination weight; dimension reduction techniques; K-means cluster; oil-paper insulation state

0 引言

有效的特征量提取和完善的评估方法是时域介质响应法^[1-2]对油纸绝缘老化评估的关键技术。目前, 在电路模型的确定上, 利用微分解析法^[3]可以避免智能优化算法^[1]计算等效电路参数不唯一的问题, 但并不能直接挖掘弛豫响应特征, 难以解释微分过程的物理意义, 且数学计算工作量和计算误差较大。至于特征量的提取, 在前人的研究中, 已经

积累了一些有效的响应特征量。其中, 经典特征量^[4-5]包括: 回复电压峰值、主时间常数和初始斜率。接着, 文献[6]研究了复电容虚部 C'' 与变压器油纸绝缘的含水量与老化状态的关系; 文献[7]提出的峰值能量 W_{\max} 、主时间常数 t_m 以及文献[8]提出的去极化电流陷阱密度谱峰值大小 S_{\max} 、峰值时间 T_{\max} , 是通过二次仿真和复杂的数学转换间接自定义的, 而将这种参量作为油纸绝缘老化状态的评估特征量, 还有待日后的深入验证与完善。

对于评估方法的研究, 多数方法仅限单一特征量与绝缘状态的老化评估^[4-5]。实际上, 单一特征量

难以全面准确地诊断绝缘状态。目前出现的多类特征量综合分析, 如文献[9]提出的融合证据理论的多参量评价法、文献[10]提出的模糊灰色聚类诊断法, 但这两种方法难以消除参量间的重叠信息, 无法提炼重要指标, 且针对每项指标的逐一归类判别, 工作量大且效率低。因此, 如何综合分析多元特征量, 形成有效的特征值分类与准确系统评估方法, 是本文要解决的重点问题。

本文主要针对新特征量的直接提取、基于多元特征量的综合评价体系构建展开研究。首先通过末端双点解析直接提取 3 个新特征量, 构建包括 3 个新特征量在内的 9 个特征量的油纸绝缘老化状态多元评估指标阵 M ; 采用组合权重赋权法并结合主成分的降维技术提炼 M 的综合指标 Z ; 基于组合权重赋权法的改进 K-means 聚类算法对 Z 构建好、中、差 3 等级的等级界限标准表, 最终形成油纸绝缘状态的综合灰评估体系。最后, 通过实例验证本文所提方法的合理性和有效性。

1 油纸绝缘老化新特征量的直接提取

基于目前广泛采用的扩展 Debye 等效电路^[3-4], PDC 响应过程中, 去极化电流 $i_d(t)$ 可表示为 N 条弛豫支路电流 $i_{di}(t)$ 的叠加^[3], 如式(1)所示。

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^N i_{di}(t) = \sum_{i=1}^N B_i e^{-t/\tau_i} \quad (1)$$

式中: B_i 为第 i 条弛豫等效支路对去极化电流的贡献; $\tau_i = R_{pi} C_{pi}$ 为第 i 条弛豫等效支路的弛豫时间常数, R_{pi} 、 C_{pi} 分别为相应的极化电阻和极化电容。

1.1 末端双点解析法

去极化电流中每个弛豫支路电流 $i_{di}(t)$ 都是关于 e^{-t/τ_i} 的函数表达式, 都具有指数衰减特性, 而由多条子谱线叠加而成的谱线, 其末端处的数值将约等于时间常数最大的子谱线的值, 因此本文提出末端双点解析法进行解谱分析, 其具体解析过程如下所述。

(a) 将现场测试变压器的去极化电流曲线 $i_d(t)$ 作为初始谱线;

(b) 在原始谱线上近末端取双点, 即时间常数最大的子谱线的末端两点 $P_1(t_1, i_d(t_1))$ 和 $P_2(t_2, i_d(t_2))$, 则有

$$\begin{cases} i_d(t_1) - B_1 e^{-t_1/\tau_1} = 0 \\ i_d(t_2) - B_1 e^{-t_2/\tau_1} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

解方程组(2), 可得去极化电流时域谱线中时间常数最大的子谱线 $i_{d1}(t)$ 的弛豫参数对 (B_1, τ_1) ;

(c) 将去极化电流原始谱线 $i_d(t)$ 减去步骤(b)求

得的子谱线 $i_{d1}(t)$ 解出剩余谱线 $i_{d10}(t)$, 用剩余谱线 $i_{d10}(t)$ 代替原始谱线 $i_d(t)$;

(d) 若剩余谱线峰值小于设定的阈值, 则终止解谱, 此时子谱线数目为 N ; 否则重复步骤(b)、(c), 依次求解出各子谱线的弛豫参数对 (B_1, τ_1) 、 (B_2, τ_2) 、 (B_3, τ_3) 、 \dots 、 (B_N, τ_N) 。

根据电路基本理论, 在去极化过程中, 第 i 条弛豫等效支路上极化电容 C_{pi} 的电压 U_{ci} 表示为

$$U_{ci} = U_0(1 - e^{-t_c/\tau_i})e^{-t/\tau_i} \quad (3)$$

式中, U_0 为充电电压。则 $i_{di}(t)$ 又可表示为

$$i_{di}(t) = C_{pi} \frac{dU_{ci}}{dt} = -\frac{U_0}{R_{pi}}(1 - e^{-t_c/\tau_i})e^{-t/\tau_i} \quad (4)$$

利用解谱过程中求得的每条子谱线的 (B_1, τ_1) 、 (B_2, τ_2) 、 (B_3, τ_3) 、 \dots 、 (B_N, τ_N) , 联立式(1)和式(4), 得参数 R_{pi} 的数学计算公式为

$$R_{pi} = -\frac{U_0}{B_i}(1 - e^{-t_c/\tau_i}) \quad (5)$$

这样, 通过简洁的双点解析过程, 就可以唯一确定出各弛豫支路的参数。

1.2 新特征量的直接提取

首先, 文献[11]指出变压器绝缘系统老化或受潮引起的电阻值变化幅度大于电容值的变化幅度, 这说明极化电阻相对于极化电容能更有效地表征绝缘介质中不同响应速度的极化弛豫过程。

其次, 弛豫响应阶段, 时间常数越小的子谱线衰减越快, 因此去极化电流中应属最大时间常数 τ_{max} 的分支去极化电流 $i_{d\tau_{max}}(t)$ 的弛豫影响最大, 大时间常数所在弛豫等效支路去极化电流 $i_{d\tau_{max}}(t)$ 为

$$i_{d\tau_{max}}(t) = B_{\tau_{max}} e^{-t/\tau_{max}} \quad (6)$$

对式(6)两边取对数得

$$\ln(i_{d\tau_{max}}(t)) = -\frac{1}{\tau_{max}}t + \ln(B_{\tau_{max}}) \quad (7)$$

定义 $y_{\tau_{max}} = \ln(i_{d\tau_{max}})$ 为极化最大直谱线,

$a_{\tau_{max}} = \frac{1}{\tau_{max}}$ 为极化最大斜率, $b_{\tau_{max}} = \ln(B_{\tau_{max}})$ 为极化最大截距, 式(7)可转化为线性方程

$$y_{\tau_{max}} = -a_{\tau_{max}}t + b_{\tau_{max}} \quad (8)$$

通过对绝缘状态不同的变压器进行计划去极化电流试验, 利用本节提出的方法解参数 R_{pi} 、 $a_{\tau_{max}}$ 、 $b_{\tau_{max}}$ 并加以展开分析。分析结果表明, 利用参数 R_{pi} 、 $a_{\tau_{max}}$ 、 $b_{\tau_{max}}$ 可以有效地对变压器绝缘老化状态进行

判断,且随绝缘老化程度的加深,极化小电阻($R_{pi} < 1 \text{ G}\Omega$)逐渐增多, $a_{\tau_{\max}}$ 与 $b_{\tau_{\max}}$ 值将增大。因此,本文将极化小电阻 ($R_{pi} < 1 \text{ G}\Omega$) 支路数 l_{Low_R} 、极化最大直谱线的极化最大斜率 $a_{\tau_{\max}}$ 、极化最大截距 $b_{\tau_{\max}}$ 这 3 个新特征量作为油纸绝缘老化诊断的新依据。其中 l_{Low_R} 反映绝缘老化过程大分子材料的强裂解程度及绝缘故障产生高电导率的产量极化支路数;

$a_{\tau_{\max}}$ 、 $b_{\tau_{\max}}$ 表征弛豫支路去极化电流性质。

2 综合灰评估体系的构建

2.1 建立多元评估指标阵

本文采用 10 年来收集到的 50 多台变压器油纸绝缘老化的实验测试数据及相应的老化机理分析与数学理论推导的计算数据为研究依据,如表 1 所示,为其中 10 台变压器的现场实测数据和计算的特征量。

表 1 变压器实际状况与实测老化评估指标参量

Table 1 Actual conditions and measured aging evaluation index parameters for transformers

变压器基本信息			老化评估指标								
名称	运行年限/年	(绝缘状况/糠醛) (mg/L)	$T_{\text{cdom}} / \text{s}$	$U_{r_{\max}} / \text{V}$	$S_r / \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$	C_g / nF	$R_{\max} / \text{G}\Omega$	$\bar{\tau} / \text{s}$	$l_{\text{Low}_R} / \text{条}$	$a_{\tau_{\max}} \times 10^{-4}$	$ b_{\tau_{\max}} $
T_1	新投运	绝缘状态良好/0.002	1 549.868	93.626	16.656	86.400	48.850	538.733	1	4.560	17.021
T_2	18	低压绕组老化严重/9.814	10.007	204.243	127.517	305.631	1.162	45.168	5	39.868	13.272
T_3	11	高压侧已有老化/1.325	706.173	142.036	39.595	160.826	5.875	120.739	4	14.139	14.893
T_4	4	绝缘良好	4 315.871	86.583	35.633	90.103	19.242	482.232	1	5.287	16.084
T_5	15	老化严重且受潮/6.347	371.230	376.200	220.450	161.195	1.054	81.760	5	22.996	12.144
T_6	已退役	高、低压侧老化严重且受潮	180.660	304.586	145.976	369.792	0.309	54.462	6	38.599	11.946
T_7	7	绝缘良好/0.031	3 806.596	92.000	23.897	52.781	29.880	202.462	2	8.414	16.520
T_8	9	低压侧已有老化/2.017	572.348	132.729	38.991	140.943	6.538	111.886	4	15.240	15.000
T_9	2	绝缘状态良好	2 800.128	131.361	4.752	86.764	26.459	153.720	2	13.762	16.398
T_{10}	13	高、低压侧已有老化/2.576	687.327	201.828	71.815	142.808	6.315	82.734	3	22.044	14.965

基于表 1,建立多元评估指标阵 M , M 的指标元素包括以下 3 个方面。

(1) 回复电压测试特征量:包括极化谱主时间常数 T_{cdom} 、回复电压最大值 $U_{r_{\max}}$ 、初始斜率 S_r 。研究结果表明:随着绝缘劣化程度的加深, T_{cdom} 变小^[4]; $U_{r_{\max}}$ 随着绝缘老化程度的增加而增大^[12];而 S_r 越大,油纸绝缘系统老化越严重^[5]。

(2) 扩展德拜等效电路参数特征量:包括几何电容 C_g 随着变压器油纸绝缘系统整体老化程度加深而增大^[13];最大时间常数下的极化电阻 R_{\max} 随油纸绝缘老化严重增大^[14];平均时间常数 $\bar{\tau}$ 随绝缘老化加重而减小^[15]。基于本文第 1 部分的分析,极化小电阻支路数 l_{Low_R} 随绝缘老化程度的加深逐渐增多,是新增特征量。

(3) 极化/去极化电流测试特征量

本文在第 1 节中提出极化最大斜率 $a_{\tau_{\max}}$ 、极化

最大截距 $b_{\tau_{\max}}$ 这 2 个新特征量,并通过分析得出:随绝缘老化程度加深, $a_{\tau_{\max}}$ 、 $b_{\tau_{\max}}$ 增大。

2.2 组合权重赋权法

2.2.1 客观权重

本文采用熵权法^[16-17]中根据评价对象中指标变异性的确定客观权重。设评价指标的原始矩阵 X 包含 n 个评价对象, s 个评价指标,则原始矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times s}$,其中: $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, s$ 。按照熵权法的求解步骤对原始矩阵进行标准化处理并计算各指标的熵值,最后确定客观权重

$$\omega_j = (\omega_j), \quad j = 1, 2, \dots, s。$$

利用表 3 中 10 台变压器的实测数据为例,构建 10 组评价对象,9 项评价指标的评价矩阵 X ,因而客观权重 ω_j 的计算结果如下

$$\omega_1 = [0.1733 \ 0.0555 \ 0.0525 \ 0.0560 \ 0.2000 \ 0.2121 \ 0.0828 \ 0.0799 \ 0.0879]$$

2.2.2 主观权重

本文采用改进层次分析法^[10]求解主观权重, 其具体求解步骤如下所述。

(a) 构建判断矩阵。依据多元评估指标阵 M 的

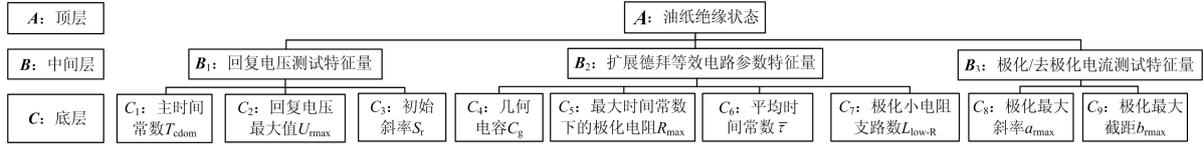


图 1 变压器油纸绝缘状态综合评估层次结构模型

Fig. 1 Hierarchical structural model for transformer oil-paper insulation evaluation

(b) 求解各层指标权重及其一致性检验。以顶层判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 为例, 采用和积法 (SPM) 求解其权重向量 $W_A = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 和最大特征值 λ_{\max_A} , 得

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{q=1}^n a_{iq}}, \quad i, j, q = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

最大特征值 λ_{\max_A} 的计算公式

$$\lambda_{\max_A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW_A)_i}{W_i} \quad (10)$$

通过一致性检验指标 CI 、 RI 和检验系数 CR 的计算调整^[10], 所得判断矩阵具备令人满意的一致性。

同理, 其他判断矩阵都依次类推, 分别求取中间层各判断矩阵的权重向量 W_{B_1} 、 W_{B_2} 、 W_{B_3} 及其最大特征值 $\lambda_{\max_B_1}$ 、 $\lambda_{\max_B_2}$ 、 $\lambda_{\max_B_3}$ 并做一致性检验。所得结果如表 2—表 5 所示。

表 2 构建判断矩阵 $A - B$

Table 2 Build a judgment matrix $A - B$

A	B_1	B_2	B_3	B_A
B_1	1	5	3	0.633 3
B_2	1/5	1	1/3	0.106 2
B_3	1/3	3	1	0.260 5

注: $\lambda_{\max_A} = 3.038 7$, $CI = 0.019 4$, $RI = 0.58$, $CR = 0.033 4$

表 3 构建判断矩阵 $B_1 - C$

Table 3 Build a judgment matrix $B_1 - C$

B_1	C_1	C_2	C_3	W_{B_1}
C_1	1	3	5	0.633 3
C_2	1/3	1	3	0.260 5
C_3	1/5	1/3	1	0.106 2

注: $\lambda_{\max_B_1} = 3.038 7$, $CI = 0.019 4$, $RI = 0.58$, $CR = 0.033 4$

(c) 输出主观权重。最后输出的主观权重 $\omega_{II} = W_A \cdot [W_{B_1}, W_{B_2}, W_{B_3}] = (\omega_{2j})$, $j = 1, 2, \dots, s$ 。

综上所述, 本文主观权重 ω_{II} 的计算结果为

构建过程, 建立如图 1 所示的层次关系图, 根据 9 标度法和该领域专家评分结果分别构建顶层判断矩阵 A 、中间层判断矩阵 B 和底层判断矩阵 C 。

$$\omega_{II} = [0.4011 \quad 0.1650 \quad 0.0672 \quad 0.0130 \quad 0.0592 \quad 0.0280 \quad 0.0651 \quad 0.1954 \quad 0.0060]$$

表 4 构建判断矩阵 $B_2 - C$

Table 4 Build a judgment matrix $B_2 - C$

B_2	C_4	C_5	C_6	C_7	W_{B_2}
C_4	1	1/5	3	1/3	0.121 9
C_5	5	1	7	3	0.557 9
C_6	1/3	1/7	1	1/5	0.056 9
C_7	3	1/3	5	1	0.263 3

注: $\lambda_{\max_B_2} = 4.118 5$, $CI = 0.039 5$, $RI = 0.9$, $CR = 0.043 9$

表 5 构建判断矩阵 $B_3 - C$

Table 5 Build a judgment matrix $B_3 - C$

B_3	C_8	C_9	W_{B_3}
C_8	1	1/3	0.25
C_9	3	1	0.75

注: $\lambda_{\max_B_3} = 2$, $CI = 0$, $CR = 0$

2.2.3 组合权重

客观权重 $\omega_I = (\omega_{1j})_{1 \times s}$ 基于指标内的信息量能较为准确, 但易受样本选择的影响。主观权重 $\omega_{II} = (\omega_{2j})_{1 \times s}$ 充分考虑专家的丰富经验, 但未考虑各指标间的潜在联系。本文兼顾主客观因素, 将两种权重相组合优化计算权重值, 计算汇集主客观意义的组合权重 $\omega = (\omega_j)_{1 \times s}$, ω_j 的计算式为

$$\omega_j = (\alpha_j \omega_{1j} + \beta_j \omega_{2j}) / \sum_{j=1}^m (\alpha_j \omega_{1j} + \beta_j \omega_{2j}) \quad (11)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, s$; α_j 和 β_j 分别为客观权重和主观权重的重要系数。

依旧利用表 3 中 10 台变压器的实测数据为例, 通过主客观权重值计算结果, 求得表 3 中 9 项油纸绝缘老化评估指标的组合权重为 $\omega = [0.2645 \quad 0.1094 \quad 0.0484 \quad 0.0381 \quad 0.1336 \quad 0.1517 \quad 0.0597 \quad 0.1288 \quad 0.0658]$ 。

2.3 基于降维技术的综合指标 Z 的提炼

本文利用主成分分析降维技术^[18-19]提炼并输出多元评估指标阵 M 的综合指标 Z 。

设多元评估指标阵 M 有 s 个老化指标变量:

m_1, m_2, \dots, m_s , 共有 n 个评价样本, 记作 $M = (m_{ij})_{n \times s}$, 其中, $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,s$ 。

本文主成分降维算法实现步骤如下:

(1) 数据预处理。首先对 M 中的逆指标采用倒数法进行指标正向化处理, 然后为消除量纲影响对指标数据 M 进行标准化处理, 得到标准化矩阵 $M^* = (m_{ij}^*)_{n \times s}$, 拥有 s 个指标观测变量: $m_1^*, m_2^*, \dots, m_s^*$;

(2) 计算样本相关系数矩阵。求取 M^* 指标间的相关系数矩阵 R 。

$$R = M^{*T} M^* \quad (12)$$

(3) 求解特征值和特征向量。由相关系数矩阵 R 的特征方程 $|R - \lambda E| = 0$ 求解的 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_s \geq 0$ 为 R 的 s 个特征量, t_1, t_2, \dots, t_s 为相应的正交单位特征向量。其中, $t_j = (t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{nj})$ 是第 j 主成分载荷矩阵。由特征向量组成 s 个新的指标变量, 即主成分

$$\begin{cases} Y_1 = t_{11}m_1^* + t_{21}m_2^* + \dots + t_{n1}m_n^* \\ Y_2 = t_{12}m_1^* + t_{22}m_2^* + \dots + t_{n2}m_n^* \\ \vdots \\ Y_s = t_{1s}m_1^* + t_{2s}m_2^* + \dots + t_{ns}m_n^* \end{cases} \quad (13)$$

式中: Y_1 是第 1 主成分; Y_2 是第 2 主成分; Y_s 是第 s 主成分。

(4) 确定主成分。第 j 个主成分 Y_j 的方差所占比例 $\lambda_j / \sum_{j=1}^s \lambda_j$ 称为主成分 Y_j 的方差贡献率, 则前 $k(k \leq s)$ 个主成分的累积方差贡献率为

$$\gamma_k = \sum_{j=1}^k \lambda_j / \sum_{j=1}^s \lambda_j \quad (14)$$

按 $\gamma_k \geq 0.85$ 确定 k 值, 保证 k 个主成分具备良好的反映综合原始指标变量信息的能力。

(5) 提炼最终的综合评估指标 Z 。首先, 本文定义前 s 个主成分的权重为 $\omega'' = (\omega_j'')_{1 \times s}$, ω_j'' 的计算式为

$$\omega_j'' = \sum_{i=1}^n t_{ij}^T \omega_j^T \quad (15)$$

式中: t_j 是第 j 主成分载荷矩阵; ω_j 取自 2.2.3 节求得的第 j 个指标的组合同权重值, ω_j' 是第 j 个主成分的最终权重值, 则利用式(16)进行权数归一化处理。

$$\omega_j' = \omega_j'' / \sum_{j=1}^k \omega_j'' \quad (16)$$

当存在负权数时, 采用式(17)先移轴后映射处

理将之归结为机构相对数, 取 $\theta > \max_{1 \leq j \leq k} |\omega_j|$, 相应地

$$\omega_j' = (\theta + \omega_j'') / 2\theta \quad (17)$$

综合评估指标 Z 是 k 个老化指标变量 Y_1, Y_2, \dots, Y_k 的线性组合。

$$Z = \omega_1' Y_1 + \omega_2' Y_2 + \dots + \omega_k' Y_k \quad (18)$$

现用表 3 中 10 台变压器的实测样本数据为例, 提炼综合评价指标向量 Z 。首先, 计算表 3 的多元评估指标阵 M 并标准化为 M^* (M^* 为 10×9 阶矩阵), 计算相关系数矩阵 R 、 R 的特征值、相应的单位特征向量以及贡献率, 并依据累积贡献率提取主成分, 主成分计算结果如表 6 所示。

表 6 主成分分析的特征量与方差贡献率

Table 6 Eigenvalues and variance contribution rates of principal component analysis

成分	特征值	方差贡献率/%	方差累积贡献率/%
1	6.612 0	73.466 9	73.466 9
2	1.173 1	13.034 1	86.501 1
3	0.609 6	6.773 5	93.274 6
4	0.324 9	3.610 0	96.884 6
5	0.212 5	2.361 2	99.245 8
6	0.047 0	0.522 0	99.767 7
7	0.018 5	0.206 0	99.973 7
8	0.002 3	0.026 1	99.999 8
9	0	0.000 2	100

从表 6 中可以看出, 前 2 个主成分的贡献率达到了 $86.5011\% > 85\%$, 故选取第一、二主成分即可。主成分是 9 个标准化后指标的线性组合, 对应于特征向量集 $\{T_{cdom}, U_{rmax}, S_r, C_g, R_{max}, \bar{\tau}, l_{Low_R}, a_{\tau_{max}} \times 10^{-4}, |b_{\tau_{max}}|\}$, 第一、二主成分的载荷矩阵分别为

$$t_1 = (0.3521, 0.3670, 0.1708, 0.3234, 0.3550, 0.3430, 0.3587, 0.3596, 0.3525)^T$$

$$t_2 = (0.1821, -0.0514, 0.7219, 0.2724, 0.0658, -0.3848, -0.2606, -0.3312, 0.1970)^T$$

由式(15)可计算出前 2 个主成分: Y_1 、 Y_2 。

利用式(18)计算前 2 个主成分的权重为 $\omega' = [0.3371 \ -0.0070]$, 进而用式(17) ($\theta = 0.5$) 得出前 2 个主成分的最终权重 $\omega' = [0.8371 \ 0.4930]$ 。

因此, 计算表 3 的多元评估指标阵 M 的综合评价指标 Z 为

$$Z = \omega_1' Y_1 + \omega_2' Y_2 = [5.7483 \ 0.8793 \ 2.2254 \ 5.2624 \ 0.7948 \ 0.4050 \ 5.5983 \ 2.3364 \ 5.6070 \ 2.0070]^T$$

2.4 油纸绝缘灰色聚类评估体系的构建

灰色聚类法是将观测指标通过关联矩阵或白化权函数集成若干个可定义类别, 从而得到有价值

信息的方法, 它能够在信息不完全的条件下实现系统建模、预测和决策, 使决策结果更加准确客观。

2.4.1 确定灰类及其界限值

根据《电力设备预防性试验规程》的各项指标规定, 变压器油纸绝缘状态可划分为绝缘状态良好(好)、绝缘状态一般(中)、绝缘老化严重(差)等 3 种状态。本文仍以表 1 的多元评估指标阵 M 确定的综合评价指标 Z 为例, 首先采用变异系数加权欧式距离的 K-means 聚类算法^[20-21]对 Z 进行有效数据分类, 其轮廓图如图 2 所示。

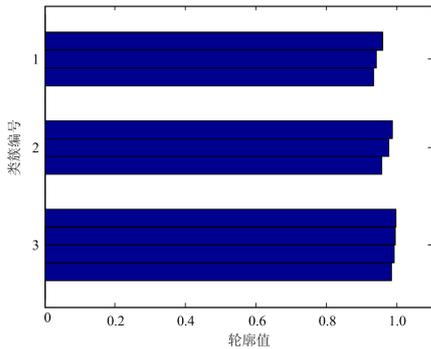


图 2 加权欧式距离的 K-means 聚类的轮廓图

Fig. 2 Outline drawing of weighted euclidean distance K-means

图 2 中, 每个轮廓值都趋近与 1, 表明此次聚类效果极佳, 其对应类簇个数是非常合适的。进而确定: “好”、“中”、“差”, 这 3 个灰类评估等级的变压器油纸绝缘状态分级数据库, 如表 7 所示。

其次, 根据 Z 数据分布特征, 确定综合指标 Z 各灰类评价等级界限值, 如表 8 所示。其中 H_Z 、 D_Z 、 L_Z 分别为“好”类下限、“中”类中限、“差”类上限。

表 7 不同绝缘状态的变压器分类结果及其分级数据库

Table 7 Classification results and their hierarchical database for different insulation state transformers

类别	变压器台数	变压器名称	综合评价指标数据	等级
1	3	T ₂ 、T ₅ 、T ₆	0.879 3、0.794 8、0.405 0	差
2	3	T ₃ 、T ₈ 、T ₁₀	2.225 4、2.336 4、2.007 0	中
3	4	T ₁ 、T ₄ 、T ₇ 、T ₉	5.748 3、5.262 4、5.598 3、5.607 0	好

表 8 综合指标 Z 的等级界限标准表

Table 8 Level limit standard of comprehensive index Z

	H_Z	D_Z	L_Z
Z 的等级界限值	5.262 4	2.225 4	0.879 3

2.4.2 确定白化权函数及权系数评价矩阵

假设拟评价的 n 台变压器的综合指标数据为 $Z = (z_i)_{n \times 1}$, 如表 8 可知, 建立综合指标对应的评价等级集合为 $\{H_Z, D_Z, L_Z\} = \{5.2624, 2.2254, 0.8793\}$, 相应的评价等级集为 {好, 中, 差}, 定义评价灰类序号集为 $X = \{x|x=1,2,3\}$, 依次代表“好”、“中”、“差”。则综合指标各灰类等级白化权函数 f_Z^x , ($x=1,2,3$) 分别如下所述。

第 1 灰类“好”的白化权函数 f_Z^1 示意图如图 3(a)所示, 其表达式为

$$f_Z^1 = \begin{cases} 1, z_i \geq H_Z \\ \frac{z_i - D_Z}{H_Z - D_Z}, D_Z < z_i < H_Z \\ 0, z_i \leq D_Z \end{cases} \quad (19)$$

第 2 灰类“中”的白化权函数 f_Z^2 示意图如图 3(b)所示, 其表达式为

$$f_Z^2 = \begin{cases} 0, z_i \geq H_Z \\ \frac{H_Z - z_i}{H_Z - D_Z}, D_Z < z_i < H_Z \\ 1, z_i = D_Z \\ \frac{z_i - L_Z}{D_Z - L_Z}, L_Z < z_i < D_Z \\ 0, z_i \leq L_Z \end{cases} \quad (20)$$

第 3 灰类“差”的白化权函数 f_Z^3 示意图如图 3(c)所示, 其表达式为

$$f_Z^3 = \begin{cases} 1, z_i \leq L_Z \\ \frac{D_Z - z_i}{D_Z - L_Z}, L_Z < z_i < D_Z \\ 0, z_i \geq D_Z \end{cases} \quad (21)$$

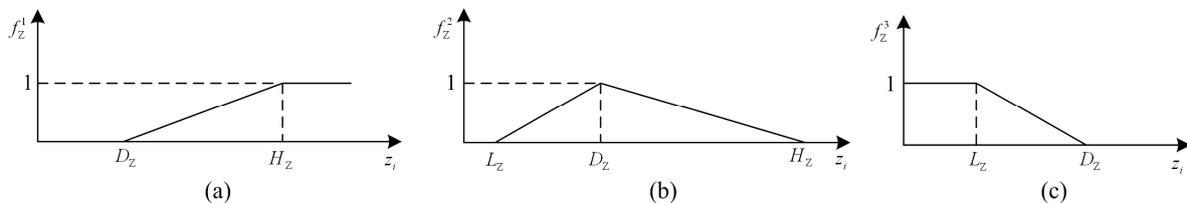


图 3 各灰类等级白化权函数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of whitening weight function for grey classes

设第 i 台变压器综合指标值 z_i 第 x 灰类评价等级的权系数 $f_z^x(i)$ ，即第 i 台变压器综合指标第 x 灰类评价等级白化权函数值，则最终综合指标权系数评讲矩阵 Q 为

$$Q = \begin{Bmatrix} f_z^1(1) & f_z^2(1) & f_z^3(1) \\ f_z^1(2) & f_z^2(2) & f_z^3(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_z^1(n) & f_z^2(n) & f_z^3(n) \end{Bmatrix} \quad (22)$$

最后，结合最大隶属度规则确定评价等级，即将综合指标权系数评价矩阵 Q 行向量各元素中最大值所在灰类评价等级作为最终评价结果等级。

3 实例分析

现从实验测试及计算数据库中随机选取 5 台变压器的实测数据作为案例分析。其余变压器实测数据样本按照本文第 2 节阐述的算法步骤与具体计算过程对待诊变压器的绝缘状态进行评估。

(1) 根据本文提出的组合权重赋权法，采用主成分的降维技术对由近 50 台变压器构建的多元评估指标阵完成综合指标的提炼。然后，借助加权欧式距离的 K-means 聚类算法对近 50 台油纸绝缘变压器的综合指标数据库进行数据分类，构建“好”、“中”、“差”，这 3 个灰类评价等级的变压器油纸绝缘状态分级数据库，最终确定综合指标 Z “好”、“中”、“差”这 3 灰类评价等级界限值 H_z 、 D_z 、 L_z ，如表 9 所示。

根据表 9 可知，确定了绝缘状态良好、绝缘状态一般、绝缘老化严重等 3 种不同绝缘状态变压器

综合指标灰类评价等级界限标准表，结合各台变压器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，证实上述 3 种灰类评价等级的数据与糠醛含量表示的不同老化程度数据相接近，计算所得 3 种不同绝缘状态下变压器的数量分别为 19、14、16 台，各级变压器数量差异较小，表明了采用加权欧式距离的 K-means 聚类算法可以进行绝缘状态老化指标更细致的分类。

表 9 变压器综合指标的等级界限标准表

Table 9 Level limit standard of comprehensive

index for transformers			
	H_z	D_z	L_z
Z 的等级			
界限值	5.157 2	2.304 2	0.527 6

(2) 现采用本文提出的方法对 5 台待诊断变压器的油纸绝缘老化状态进行评估。在诊断之前，这 5 台变压器的油中糠醛含量未知，为了验证诊断结果的可行性及准确性，评估诊断后与其抽中糠醛含量检测结果校验。根据 5 台变压器的现场实测特征量数据建立多元评估指标阵 M ，如表 10 所示。

首先按照 2.2 节的分析方法计算确定组合权重 $\omega = [0.2648 \ 0.1089 \ 0.0659 \ 0.0418 \ 0.1267 \ 0.1201 \ 0.0659 \ 0.1296 \ 0.0763]$ ；其次，通过降维技术算法提炼综合指标 $Z = [0 \ 1.5833 \ 5.1717 \ 4.4900 \ 0.6360]^T$ ；最后，由式(21)一式(23)计算各台变压器综合指标各灰类等级白化权系数并输出综合指标权系数评价矩阵。同时基于时域介电响应无损检测法，将诊断结果与糠醛含量检测分析进行校验，如表 11 所示。

表 10 5 台待诊断变压器的多元评估指标阵数据表

Table 10 Multivariate evaluation indicator arrays for 5 transformers to be diagnosed

名称	老化评估指标									
	T_{cdom}/s	U_{rmax}/V	$S_i/(V \cdot s^{-1})$	C_g/nF	$R_{max}/G\Omega$	$\bar{\tau}/s$	$l_{Low_R}/条$	$a_{tmax} \times (10^{-4})$	$ b_{tmin} $	
T_I	201.735	416.376	137.237	449.504	0.258	22.076	7	112.250	11.768	
T_{II}	846.345	188.737	67.715	153.391	5.966	86.376	3	21.004	14.908	
T_{III}	2 076.154	114.317	15.795	77.706	38.346	452.917	1	6.547	16.369	
T_{IV}	3 896.455	86.889	21.599	95.860	17.009	389.891	2	5.860	15.959	
T_V	52.742	229.558	112.963	171.838	0.472	33.877	6	55.828	12.372	

由表 11 可知，以上得到的各台变压器综合指标各灰类等级权系数矩阵中每台变压器对应“好”、“中”、“差”三个灰类的不用数值描述了该变压器属于各个灰类的强度大小，其数值总和为 1。应用最大隶属度规则取各变压器对应行向量中的最大值对应的灰类作为综合评价结果。由此得出： T_{III} 、 T_{IV} 综合评价为“好”， T_{II} 综合评价为“中”， T_I 、 T_V 综

合评价为“差”。根据本文提出变压器油纸绝缘状态老化评估判据判定：变压器 T_{III} 、 T_{IV} 的油纸绝缘状态良好，变压器 T_{II} 的油纸绝缘状态一般，变压器 T_I 、 T_V 的油纸绝缘老化严重。诊断结果与糠醛含量检测分析结果具有一致性，证实了本文所提的理论和方法能准确、有效地诊断变压器绝缘老化状态。

表 11 5 台变压器的油纸绝缘状态综合灰评估诊断结果

Table 11 Comprehensive grey evaluation and diagnosis result of insulation status for 5 oil-paper transformers

名称	变压器型号	运行年限/ 年	变压器综合指标各灰类等级白化权重系数			综合评价	糠醛含量/(mg/L)	绝缘结果/一致性
			好	中	差			
T _I	SFPS-240000/220	已退役	0	0	1	差	21.896	绝缘老化严重/一致
T _{II}	SFP9-240000/220	12	0	0.594 2	0.405 8	中	2.178	绝缘状态一般/一致
T _{III}	SF08-31500/110	1	1	0	0	好	0.004	绝缘状态良好/一致
T _{IV}	SFSZ10-18000/220	3	0.766 1	0.233 9	0	好	0.031	绝缘状态良好/一致
T _V	S9-630/10	18	0	0.004 7	0.995 3	差	11.625	绝缘老化严重/一致

4 结论

本文提出一种便捷的末端双点解析法解析去极化电流谱并直接提取特征量；采用组合权重法与主成分降维技术与赋权法提炼全面凝聚各项特征量意义的综合指标，提出综合评价指标 Z ；提出基于 K-means 聚类算法及灰色聚类的综合灰评价体系。本文建立的油纸绝缘状态灰类评价 3 等级界限标准表，可为待诊变压器的定量分析提供参考依据。通过实例验证了该算法的简便性、全面性和准确性，为评估变压器油纸绝缘状态提供新思路。

本文主要基于实际变压器的油纸绝缘状态进行诊断，对于断路器的绝缘及其他电力设备的绝缘分析有待于进一步通过试验和分析拓展。

参考文献

- [1] 林智勇, 蔡金锭. 油纸绝缘极化等效电路参数计算方法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 62-66.
LIN Zhiyong, CAI Jinding. Novel method of calculation polarized equivalent circuit of oil-paper insulation[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(8): 62-66.
- [2] 林燕桢, 蔡金锭. 回复电压极化谱特征量与油纸绝缘变压器微水含量关系分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 148-153.
LIN Yanzhen, CAI Jinding. Analysis of the relationship between the characteristics of the return voltage polarization spectrum and micro water content of oil-paper insulation transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 148-153.
- [3] 郑君亮, 江修波, 蔡金锭, 等. 去极化电流解谱分析油纸绝缘等效电路参数研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 54-58.
ZHENG Junliang, JIANG Xiubo, CAI Jinding, et al. Research on spectrum analysis of the depolarizing current to identify the parameter of oil-paper insulation equivalent circuit[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 54-58.
- [4] 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.
- [5] 王晓剑, 吴广宁, 李先浪, 等. 酸值对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 133-139.
WANG Xiaojian, WU Guangning, LI Xianling, et al. Influence of acid value on recovery voltage parameters of transformer oil-paper insulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 133-139.
- [6] 廖瑞金, 刘捷丰, 杨丽君, 等. 电力变压器油纸绝缘状态评估的频域介电特征参量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 247-254.
LIAO Ruijin, LIU Jiefeng, YANG Lijun, et al. Investigation on frequency domain dielectric characteristics for condition assessment of transformer oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 247-254.
- [7] 黄云程, 蔡金锭. 应用去极化能量谱评估变压器绝缘老化受潮状态[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(1): 53-59.
HUANG Yuncheng, CAI Jinding. Diagnosis of insulation condition of transformer by using depolarization energy spectrum[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(1): 53-59.
- [8] 蔡金锭, 陈汉城. 基于陷阱密度谱特征量的油纸绝缘变压器老化诊断[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2574-2581.
CAI Jinding, CHEN Hancheng. Aging diagnosis of oil-paper insulated based on trap density spectrum[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2574-2581.
- [9] 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.

- [10] 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 Shunca, 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.
- [11] 林智勇, 蔡金锭. 变压器等效电路参数变化对极化谱的影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 292-298.
LIN Zhiyong, CAI Jinding. Analysis of influence of transformer equivalent circuit parameters change on polarization spectrum[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(3): 292-298.
- [12] 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 ageing characteristics using recovery voltage method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 136-142.
- [13] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘频域介电谱特性的仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 113-119.
LIAO Ruijin, HAO Jian, YANG Lijun, et al. Simulation and experimental study on frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 113-119.
- [14] 唐盼, 尹毅, 吴建东, 等. 基于去极化电流法的变压器油纸绝缘状态[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(4): 39-42.
TANG Pan, YIN Yi, WU Jiandong, et al. Study oil paper insulated transformer' aging state based on depolarization current method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(4): 39-42.
- [15] 贺德华, 蔡金锭, 黄云程. 基于等效电路参数特征量的油纸绝缘老化状态评估[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(6): 44-49.
HE Dehua, CAI Jinding, HUANG Yuncheng. Study on insulation condition of power transformer based on the equivalent circuit characteristic parameter[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(6): 44-49.
- [16] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission lines based on hierarchy analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [17] 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 relationship-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 87-93.
- [18] PERLIBAKAS V. Face recognition using principal component analysis of the wavelet packet decomposition[J]. Social Science Electronic Publishing, 2017, 15(15): 243-250.
- [19] 王守鹏, 赵冬梅, 商立群, 等. 基于主成分聚类分析的火电机组综合评价方法[J]. 热力发电, 2017, 46(5): 74-79.
WANG Shoupeng, ZHAO Dongmei, SHANG Liquan, et al. Comprehensive evaluation method for thermal power units based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Thermal Power Generation 2017, 46(5): 74-79.
- [20] 郭靖. 对 K-means 聚类算法欧氏距离加权系数的研究[J]. 网络安全技术与应用, 2016(10): 74-75.
GUO Jing. Research on euclidean distance weighted coefficients of K-means clustering algorithm network Security[J]. Technology & Application, 2016(10): 74-75.
- [21] 秦绪华, 王秋平, 陈志强. 基于改进 k-means 算法的电站最优外部运行工况划分[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 25-33.
QIN Xuhua, WANG Qiuping, CHEN Zhiqiang. Application of improved k-means algorithm in optimal operation of power plant[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6): 25-33.

收稿日期: 2018-05-05; 修回日期: 2018-07-02

作者简介:

刘庆珍(1971—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力设备故障诊断与系统优化; E-mail: lqz515@126.com

张晓燕(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力设备故障诊断; E-mail: 492854714@qq.com

蔡金锭(1954—), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电力系统故障诊断。E-mail: 1282112940@qq.com

(编辑 姜新丽)