DOI: 10.7667/PSPC180504

基于粗糙集理论的变压器油纸绝缘状态评估

林晓宁，蔡金锭

(福州大学电气工程与自动化学院，福建 福州 350108)

摘要：基于回复电压测试数据，运用粗糙集理论评估变压器绝缘状态，并建立变压器绝缘状态评估系统。首先选取回复电压法特征量和扩展德拜等效弛豫电路特征量作为评估特征量。其次利用模糊 C 均值聚类算法对评估特征量进行模糊划分并指标化，生成绝缘状态决策表。接着利用差别矩阵对绝缘状态决策表进行属性约简。最后，利用盲目删除值约简算法对已约简决策表进行属性值约简，得到完全约简的决策表，并在此基础上建立变压器绝缘状态评估的规则表。通过实例分析证明提出的评估方法能够有效地评估变压器内部绝缘状态。

关键词：粗糙集；回复电压法；模糊 C 均值聚类；差别矩阵；盲目删除值约简算法；绝缘状态评估

Evaluation of transformer oil-paper insulation based on rough set theory

LIN Xiaoning, CAI Jinding

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Based on the recovery voltage test datum, the rough set theory is used to evaluate the insulation status of the transformer and a transformer insulation status evaluation system is established. Firstly, the characteristics of the recovered voltage method and the extended Debye equivalent relaxation circuit are selected as the evaluation features. Then, the fuzzy C-means clustering algorithm is used to divide the quantities of evaluation features into fuzzy indicators and generate the insulation status decision table. The discrepancy matrix performs attribute reduction on the insulation status decision table. Finally, the blind reduction value reduction algorithm is used to reduce the attribute value of the reduced decision table, and a complete reduction decision table is obtained. On this basis, the transformer insulation status evaluation rule table is established. The example analysis proves that the proposed evaluation method can effectively evaluate the internal insulation status of the transformer.

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

Key words: rough set; recovery voltage method; fuzzy C-means clustering; discrepancy matrix; blind deletion value reduction algorithm; insulation status assessment

0 引言

变压器的绝缘状态对电力系统的安全运行有重要的意义[1-2]。电力变压器在运行过程中，其绝缘系统会逐渐老化[3-4]。近年来，国内外研究者都针对变压器绝缘状态评估开展了大量的工作。

目前的变压器绝缘状态评估方法可以按评估指标的个数分为单指标评估方法和多指标评估方法。文献[5]使用了陷阱密度谱特征量作为指标评估绝缘老化状态，应用陷阱密度谱峰值 S_{max}、峰值时间常数 T_{max} 两个特征量分别定性评价变压器的绝缘状态。文献[6]提出平均弛豫时间常数作为评估指标评估绝缘状态。文献[7]提取去极化能量谱上的特征量评估绝缘老化状态。文献[8]引入带线性因子的介质响应函数，进一步利用线性因子评估变压器绝缘状态。这些单指标评估方法都只利用单个指标进行绝缘评估，准确性不足而且无法全面利用变压器实际测量数据。文献[9]分别建立油中溶解气体分析指标、绝缘油试验指标、电气试验指标这三者的状态函数并建立状态值和绝缘状况之间的对应关系，利用未确知理论的指标权重确定方法融合多个指标的状态信息，构建绝缘评估模型。文献[10]采用主客观相结合的综合赋权法确定各个时域特征量的权重系数，并融合证据理论和多指标评估方法，建立变

基金项目：国家自然科学基金项目资助(61174117)

压器油纸绝缘状态综合评价体系。这两种多指标评估法都牵涉到主观权重的确定，不同专家对指标权重判断的差异会影响绝缘评估的客观性和准确性。文献[11]引入模糊层次分析法来评估变压器状态，克服了主观定权的缺点，但是其模糊标度定义的过于复杂导致其模糊判断矩阵阶数很高，大大增加了计算的复杂程度。综上所述，仍需进一步改进变压器绝缘状态的评估方法。

针对已有方法的不足，本文提出结合粗糙集理论的变压器绝缘状态评估系统。首先利用回复电压法和扩展德拜等效电路参数辨识得到评估特征量；其次，利用模糊 C-均值聚类(FCM)算法将特征量聚类划分，从而将其指标化，并生成决策表；然后，利用粗糙集的可辨识矩阵进行决策表的属性约简消去冗余属性；再接着，利用盲目删除值约简算法对已经属性约简的决策表进行属性值的约简，得到决策表的一个完全约简结果；最后，利用完全约简结果建立变压器绝缘状态评估规则表，并通过实例验证本文提出的绝缘状态评估系统的准确性。

1　粗糙集理论

粗糙集理论能在保留关键信息的前提下，对数据进行化简并求得知识的最小表达[12]。决策表 DT (decision table)是一类特殊而重要的知识表达系统。基于粗糙集的变压器绝缘状态评估系统可以用一个四元组表示为 DT=(U,$C\cup D$,V,f)，也可称为变压器绝缘状态决策表。其中 $U=\{r_i|i=1,2,\cdots,n\}$为变压器绝缘状态决策规则的非空有限集，称为论域； A 为属性的非空有限集，$A=C\cup D$； C 为 n 个评估特征量$\{c_1,c_2,\cdots,c_n\}$构成的条件属性集合；D 为变压器绝缘状态的决策属性；V 是属性值的集合，$V=\{V_a|a\in A\}$，V_a 为属性 a 的值域；$f:U\times A\rightarrow V$ 是一个信息函数，它为论域 U 中的每个对象的每个属性赋予一个信息值：任意 $a\in A$，$r\in U$，$f(r,a)\in V_a$[13-14]。

2　变压器绝缘状态评估系统构建

2.1 绝缘状态评估指标

绝缘状态评估指标由回复电压极化谱特征量(峰值电压 U_{rmax}、主时间常数 t_{cdom}、最大初始斜率 S_{rmax})和扩展德拜等效弛豫电路特征量(绝缘电阻 R_{g}、几何电容 C_{g} 和弛豫机构数 N)两部分组成。其中回复电压极化谱峰值电压随着变压器绝缘劣化程度的加深而增大；回复电压极化谱主时间常数随着绝缘老化加重而减小[15]；回复电压谱线初始斜率反映了绝缘界面极化的响应速度，随着绝缘劣化，初始斜率越大[16]。绝缘电阻 R_{g} 越大，油纸绝缘状态越好。随着绝缘劣化，绝缘介质储电能力增强，几何电容 C_{g} 值变大[17]。弛豫机构数 N 对油纸绝缘状态具有良好的灵敏性，弛豫机构数 N 增加，表征为变压器油纸绝缘的老化程度加深[18]。

2.2 特征量的模糊划分以及指标化

FCM算法使用了在欧几里得空间确定数据点几何贴近度的概念，它将这些数据分配到不同的聚类，然后确定这些聚类之间的距离[19]。本文利用FCM算法对特征量的原始数据按高中低三类进行聚类划分，计算变压器测试数据的模糊划分聚类中心与数据相对于各模糊划分的隶属度函数[20]，确定数据所属聚类，并以划分结果对原始数据进行指标化。

含有n个变压器测试数据样本的样本集合可以表示为$X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$，条件属性C划分为高中低3个类别，3个聚类中心向量为$\boldsymbol{V}=\{v_1,v_2,v_3\}$，$\boldsymbol{U}$是变压器各条件属性相对于各属性3个聚类中心的隶属度组成的矩阵，可以表示为

$$\boldsymbol{U}=\begin{bmatrix}\mu_{11}\cdots\mu_{1j}\cdots\mu_{1n}\\ \mu_{21}\cdots\mu_{2j}\cdots\mu_{2n}\\ \mu_{31}\cdots\mu_{3j}\cdots\mu_{3n}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，μ_{ij} 表示第 j 台变压器测试样本对于第 i 项模糊划分的隶属度。FCM 聚类算法的迭代目标函数为

$$\min J(\mu_{ij},v_n)=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{n}\mu_{ij}{}^{m}\left\|x_j-v_i\right\|^2 \tag{2}$$

其中：

$$v_i=\frac{1}{\sum_{j=1}^{n}(\mu_{ij})^m}\sum_{j=1}^{n}(\mu_{ij})^m x_j \tag{3}$$

$$\mu_{ij}=\frac{(1/\left\|x_j-v_i\right\|^2)^{1/m-1}}{\sum_{c=1}^{3}(1/\left\|x_j-v_c\right\|^2)^{1/m-1}} \tag{4}$$

将式(3)、式(4)代入式(2)，通过迭代求取目标函数最小值。通过 FCM 算法可有效快速客观地计算出各变压器样本数据对于变压器绝缘评估属性的隶属度函数以及各属性的 3 个聚类中心。

以回复电压极化谱峰值电压 U_{rmax} 为例说明指标化的具体过程，通过 FCM 聚类算法对极化谱峰值电压样本数据进行模糊划分，求得极化谱峰值电压为低类别的聚类中心 v_1 为 61.124 8 V，极化谱峰值电压为中类别的聚类中心 v_2 为 139.782 2 V，极化谱峰值电压为高类别的聚类中心 v_3 为 331.689 3 V。部分样本的极化谱峰值电压 U_{rmax} 测试数据相对于模糊划分聚类中心的隶属度如表 1 所示。

表 1 部分样本的模糊划分隶属度

Table 1 Fuzzy partition membership degrees of some samples

电压	x_1	x_2	x_3	…
v_1=61.124 8 V	0.926 0	0.094 6	0.109 4	…
v_2=139.782 2 V	0.065 6	0.848 7	0.882 4	…
v_3=331.689 3 V	0.008 4	0.056 7	0.008 2	…

测试数据对于三个类别的隶属度μ_{1i}、μ_{2i}、μ_{3i}中的最大值所对应的类别即是该测试数据所属的类别。以表 1 中 x_1 为例，其隶属度μ_{11}、μ_{21}、μ_{31}三者中μ_{11}为最大值；表明 x_1 数据在 v_1 的聚类范围内，不在 v_2、v_3 的聚类范围，属于高类别。

进一步，依据所属类别将测试数据指标化并生成变压器绝缘状态决策表。将属于高类别的数据指标化为 3，将属于中类别的数据指标化为 2，将属于低类别的数据指标化为 1。

2.3 基于差别矩阵的决策表属性约简

变压器绝缘状态评估系统的条件属性集$C=\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_5,c_6\}$中的属性对于该决策表并不全是必要的，有些是多余的，去除这些属性不会影响原有的评估效果。决策表的约简就是去除决策表中冗余的条件属性，约简后的决策表具有更少的条件属性，但具有约简前的决策表的功能，具体约简步骤如下。

1) 生成差别矩阵 $\boldsymbol{M}$，差别矩阵 $\boldsymbol{M}$ 中的元素 m_{ij} 定义为

$$m_{ij}=\begin{cases}\left\{c_k\middle|c_k\in C\wedge c_k(x_i)\neq c_k(x_j)\right\}, d(x_i)\neq d(x_j)\\ \phi, d(x_i)=d(x_j)\end{cases} \tag{5}$$

式中，c_k 和 d_k 是条件属性 C 和决策属性 D 子集中的元素。辨识矩阵中 m_{ij} 为能够辨识研究对象 x_i 和 x_j 的全部属性的集合，如若研究对象 x_i 和 x_j 隶属相同决策属性时，则 m_{ij} 为空集。

2) 计算差别矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的合析取函数 δ，合析取函数定义为

$$\delta=\wedge\{\vee(m_{ij}):m_{ij}\neq\phi\} \tag{6}$$

合析取函数为一个具有 m 元变量的布尔函数，式中∧和∨符号分别表示析取运算和合取运算。

3) 将合析取函数δ转换为析合取函数$\zeta=(\wedge R_1)\vee(\wedge R_2)\vee\cdots(\wedge R_n)$，定义析合取函数中的元素 R_1 为最小析取范式，即是条件属性(评估特征量)相对于变压器绝缘状态决策属性的最小约简子集，根据最小约简子集删除决策表中的冗余属性，经过属性约简后的决策表再删除重复的决策规则构成约简决策表 $T_B=(U_B, B\cup D, V, f)$，其中 $B\subset C$，$U_B\subset U$。

2.4 基于盲目删除值约简算法的决策表属性值约简

由第 2.3 节可知，约简决策表 T_B 如表 2 所示。

表 2 约简决策表

Table 2 Reduction decision table

论域 U_B	条件属性 B				决策属性 D
	c_1	c_2	…	c_t	
r_1	v_{11}	v_{12}	…	v_{1t}	d_1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
r_k	v_{k1}	v_{k2}	…	v_{kt}	d_k

表 2 中 v_{kt} 表示决策规则 x_k 在属性 c_t 下对应的属性值。利用盲目删除值约简算法对约简决策表 T_B 进行属性值的约简，得到约简决策表的一个完全约简决策表。对于规则集合 U_B 中的每条规则 r_i，如果从 r_i 中删除某个属性 c_j，其余的规则也同时删除相同的列，即条件属性 c_j 所在的列后，不会产生与 r_i 不相容的规则，则属性 c_j 下的值 v_{ij} 相对于决策属性 D 就是不必要的，$Z\leftarrow Z-v_{ij}$，其中 $Z=\{v_{i1},v_{i2},\cdots,v_{it}\}$ 为规则 r_i 对应的所有属性值的集合，否则为必要的，不能删除，令 $\mathrm{CORE}_{ri}\leftarrow\mathrm{CORE}_{ri}\cup\{v_{ij}\}$，$\mathrm{CORE}_{ri}$ 为规则 r_i 对应的核值集合；接着，继续删除决策规则 r_i 中不同属性下的其他值，直至获得规则 r_i 的一个完全约简 r_i^* 为止，然后 $R\leftarrow R\cup r_i^*$，$\mathrm{CORE}\leftarrow\mathrm{CORE}\cup\mathrm{CORE}_{ri}$，用上述方法遍历所有决策规则 r_i，得到 T_B 的一个核值表 CORE 以及一个完全约简的决策表 R。

利用完全约简决策表生成变压器绝缘状态评估规则表，提取变压器绝缘状态评估规则。通过以上步骤可以获得变压器绝缘状态评估规则，同时删减了冗余特征量，使得评估规则更为简便。

2.5 变压器绝缘状态评估流程

综合上述评估过程，可得基于粗糙集理论的变压器绝缘状态评估方法的流程图，如图 1 所示。

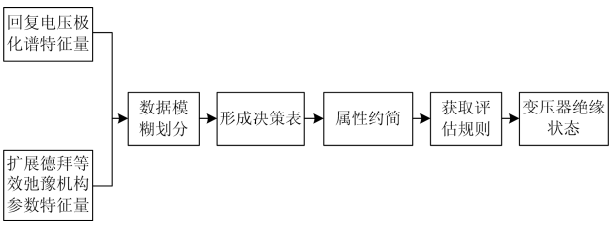


图 1 绝缘状态评估流程图

Fig. 1 Insulation status assessment process

3 变压器绝缘状态评估演绎

本文对 26 台油纸绝缘变压器的测试历史数据进行处理。变压器绝缘状态评估系统中条件属性 c_1 为主时间常数 T_{cdom}，条件属性 c_2 为回复电压极化谱峰值电压 U_{rmax}，条件属性 c_3 为最大初始斜率 S_{rmax}，条件属性 c_4 为变压器绝缘电阻 R_{g}，条件属性 c_5 为

变压器几何电容 C_g，条件属性 c_6 为弛豫支路数 N。变压器绝缘状态评估系统中决策属性 Q 为变压器绝缘状态，按照《电力设备预防性试验规程》各项指标规定，可以将变压器油纸绝缘状态划分为绝缘性能良好(G)与绝缘性能差(B)两个状态。部分变压器测试样本数据如表 3 所示。利用第 2.2 节介绍的方法对变压器测试数据进行指标化，支路数这一列数据已是整数且只有 5、6、7 三个数值，故不必进行指标化，保留原值，绝缘状态中绝缘性能良好(G)指标化为 1，绝缘性能差(B)指标化为 0，指标化后生成的决策表如表 4 所示。

表 3 变压器回复电压测试样本数据

Table 3 Transformer recovery voltage test sample data

	t_{cdom}/s	U_{rmax}/V	S_{rmax}/(V · s^{-1})	R_g/GΩ	C_g/nF	N/条	绝缘状态
x_1	33.37	32.60	54.50	2.63	161.72	5	B
x_2	1 634.98	179.20	78.70	2.54	163.42	7	B
x_3	2 040.50	119.30	37.60	5.06	86.64	6	B
x_4	0.01	14.80	158.00	14.99	153.34	6	G
x_5	2.24	156.10	772.00	0.02	146.02	6	G
x_6	2.44	148.00	985.00	0.05	241.37	6	G
x_7	68.87	22.70	120.00	0.07	137.43	7	G
x_8	0.24	3.80	52.80	2.34	151.37	6	B
x_9	182.22	80.90	46.40	1.66	165.08	7	G
x_{10}	37.11	80.60	78.80	0.68	177.52	7	B
x_{11}	2 322.14	71.10	62.90	0.40	148.42	7	B
x_{12}	2 257.94	115.50	24.20	10.31	112.08	6	G
x_{13}	2 706.59	110.70	32.30	5.32	105.95	6	G
x_{14}	3 540.26	223.40	23.70	12.19	104.12	6	G
x_{15}	3 289.51	239.70	19.70	16.05	67.64	6	G

表 4 变压器绝缘状态决策表

Table 4 Transformer insulation state decision table

规则	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	状态	规则	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	状态
1	1	1	1	2	2	5	0	17	3	3	1	3	1	7	1
2	2	2	1	2	2	7	0	18	3	3	1	3	1	6	0
3	3	2	1	2	1	6	0	19	2	1	1	1	1	7	0
4	1	1	2	3	2	6	1	20	2	2	1	3	2	5	0
5	1	2	3	1	2	6	1	21	1	3	1	2	1	7	1
6	1	2	3	1	3	6	1	22	2	3	1	1	1	4	0
7	1	1	1	1	2	7	1	23	2	3	1	1	1	6	0
8	1	1	1	2	2	6	0	24	1	3	2	1	2	6	0
9	1	1	1	2	2	7	1	25	1	1	1	2	1	6	0
10	2	1	1	3	1	7	0	26	1	1	2	1	3	7	0
11	2	2	1	2	1	7	0	27	1	2	2	1	2	7	0
12	2	1	1	1	2	6	1	28	1	2	1	1	2	7	0
13	1	1	1	1	2	6	1	29	1	2	2	1	3	6	0
14	3	1	1	1	2	6	1	30	1	1	2	1	3	7	0
15	3	2	1	3	1	6	1	31	1	2	1	1	2	7	0
16	3	2	1	2	1	5	1	—	—	—	—	—	—	—	—

依据表 4，即决策表由式(5)生成差别矩阵 $\boldsymbol{M}$，再应用式(6)由差别矩阵得到析合取函数：$\zeta=(c_1\wedge c_2\wedge c_3\wedge c_4\wedge c_6)\vee(c_2\wedge c_3\wedge c_4\wedge c_5\wedge c_6)$，通过析合取运算求取变压器绝缘状态评估的特征量属性约简集合，获得属性约简集合为 $\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_6\}$ 或 $\{c_2,c_3,c_4,c_5,c_6\}$。

选取属性约简集合 $\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_6\}$ 来构建约简决策表，如表 5 所示。

表 5 属性约简后的简化决策表

Table 5 Simplified decision table after attribute reduction

规则序号	c_1	c_2	c_3	c_4	c_6	绝缘状态	规则序号	c_1	c_2	c_3	c_4	c_6	绝缘状态
1	1	1	1	2	5	0	14	3	2	1	2	5	1
2	2	2	1	2	7	0	15	3	3	1	3	7	1
3	3	2	1	2	6	0	16	3	3	1	3	6	0
4	1	1	2	3	6	1	17	2	1	1	1	7	0
5	1	2	3	1	6	1	18	2	2	1	3	5	0
6	1	1	1	1	7	1	19	1	3	1	2	7	1
7	1	1	1	2	6	0	20	2	3	1	1	4	0
8	1	1	1	2	7	1	21	2	3	1	1	6	0
9	2	1	1	3	7	0	22	1	3	2	1	6	0
10	2	1	1	1	6	1	23	1	1	2	1	7	0
11	1	1	1	1	6	1	24	1	2	2	1	7	0
12	3	1	1	1	6	1	25	1	2	1	1	7	0
13	3	2	1	3	6	1	26	1	2	2	1	6	0

对表 5 利用第 2.4 节所述盲目删除值约简算法进行属性值约简得到核值表如表 6 所示和属性值约简表即评估规则表如表 7 所示。以规则 1 为例对属性值约简过程进行说明：删除属性 c_1 以及其所在的列，不会产生与规则 1 相矛盾的规则，所以对于规则 1 而言 c_1 是不必要的，在生成核值表时需要删除；但是删除属性 c_5 以及其所在的列将会导致规则 8 与规则 1 矛盾，所以属性 c_5 是必要的，在核值表中规则 1 必须保留该属性。

由表 7 可以提取 17 条变压器绝缘状态评估规则，以规则 1 为例，回复电压极化谱峰值位于高类别，弛豫支路数为 5 条时，评估其绝缘状态为差(B)。

选取未加入历史数据库的 6 台不同绝缘状态的变压器为例，其基本信息与测试数据如表 8 所示；利用 FCM 算法对测试数据聚类划分，获得 6 台变压器特征量的聚类划分以及指标化数据如表 9 所示。

表 6 变压器绝缘状态评估核值表

Table 6 Transformer insulation status assessment core value table

规则	条件属性 C					决策属性 D	规则	条件属性 C					决策属性 D
序号	c_1	c_2	c_3	c_4	c_6	Q	序号	c_1	c_2	c_3	c_4	c_6	Q
1	*	*	*	*	5	0	10	*	*	*	*	5	1
2	*	*	*	2	6	0	11	*	*	*	*	7	1
3	*	*	3	*	*	1	12	*	3	*	*	6	0
4	1	1	1	*	*	1	13	2	*	*	*	7	0
5	*	*	*	2	6	0	14	*	3	*	*	*	0
6	*	*	*	*	7	1	15	*	*	2	*	*	0
7	*	1	*	*	6	1	16	*	2	*	*	*	0
8	*	*	*	1	*	1	17	*	*	2	*	*	0
9	*	2	*	3	*	1	—	—	—	—	—	—	—

表 7 变压器绝缘状态评估规则表

Table 7 Transformer insulation status evaluation rules table

规则序号	条件属性 C					绝缘状态 D	规则序号	条件属性 C					绝缘状态 D
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_6	Q		c_1	c_2	c_3	c_4	c_6	Q
1	*	1	*	*	5	0	10	*	2	*	2	5	1
2	*	*	*	2	6	0	11	*	3	*	*	7	1
3	*	*	3	*	*	1	12	*	3	*	*	6	0
4	1	1	1	1	*	1	13	2	*	*	*	7	0
5	*	*	*	2	6	0	14	*	3	*	*	6	0
6	*	1	*	2	7	1	15	*	*	2	*	7	0
7	*	1	*	1	6	1	16	*	2	1	1	*	0
8	*	1	*	1	6	1	17	*	*	2	1	*	0
9	*	2	*	3	6	1	—	—	—	—	—	—	—

表 8 6 台变压器基本信息与测试数据

Table 8 Basic information and test data of 6 sets of transformers

变压器	绕组序号	变压器型号	t_{cdom}/s	U_{rmax}/V	S_{rmax}/(V·s^{-1})	R_g/ GΩ	C_g/nF	N/条	绝缘状态
T_1	w_1	sp-250/10	245.36	132.40	60.20	0.60	61.79	5	绝缘老化
	w_2	sp-250/10	141.04	145.30	42.30	1.56	18.58	7	绝缘老化
T_2	w_3	s6	178.57	108.10	196.00	0.08	174.08	6	绝缘老化
	w_4	s6	76.53	113.00	464.00	0.04	226.54	6	绝缘老化
T_3	w_5	LB-220	514.96	75.30	80.20	1.35	115.45	6	绝缘老化
T_4	w_6	LB-220	2 040.41	53.50	49.50	1.81	106.42	6	绝缘老化
T_5	w_7	SF08-31500/110	1 267.37	85.50	52.20	9.07	50.14	6	绝缘老化
T_6	w_8	SFL-50000/110	1 454.52	118.40	42.80	2.76	91.96	7	绝缘良好
	w_9	SFL-50000/110	1 414.61	91.50	41.80	1.35	139.92	6	绝缘老化

表 9 6 台变压器的指标化数据与评估结果

Table 9 Indicators data and evaluation results of the 6 sets of transformers

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_6	匹配规则	评估结果	绝缘状态
w_1	1	1	2	1	5	规则 1	0	绝缘老化
w_2	1	1	2	1	7	规则 15	0	绝缘老化
w_3	2	3	3	1	6	规则 12	0	绝缘老化
w_4	1	2	1	1	6	规则 16	0	绝缘老化
w_5	1	2	1	2	6	规则 2	0	绝缘老化
w_6	1	2	2	1	6	规则 17	0	绝缘老化
w_7	1	2	2	1	6	规则 17	0	绝缘老化
w_8	1	1	1	1	7	规则 4	1	绝缘良好
w_9	3	1	1	2	6	规则 2	0	绝缘老化

由表 9 测试结果可知，T_1 变压器低压绕组 w_1 匹配规则 1，高压绕组 w_2 匹配规则 15，评估结果都是绝缘老化，所以该台变压器绝缘老化，实际上该台变压器为已退变压器，测试结果与实际情况吻合。T_2 变压器低压绕组 w_3 匹配规则 12，高压绕组 w_4 匹配规则 16，评估结果都是绝缘老化，所以评估该台变压器绝缘老化，该台变压器为已退变压器，测试结果与实际情况吻合。T_3 变压器绕组 w_5 匹配规则 2，评估结果为绝缘老化，所以评估认为该台变压器绝缘老化，实际上该台变压器为已退 CT，测试结果与实际情况吻合。T_4 变压器绕组 w_6 匹配规则 17，评估结果为绝缘老化，所以评估认为该台变

压器绝缘老化，实际上该台变压器为已退 CT，测试结果与实际情况吻合。T_5 变压器绕组 w_7 匹配规则 17，评估结果为绝缘老化，所以评估认为该台变压器绝缘老化，实际上该台变压器为已退变压器，测试结果与实际情况吻合。T_6 变压器低压绕组 w_8 匹配规则 4，高压绕组 w_9 匹配规则 2，评估结果是高压绕组绝缘已经老化，该台变压器为已退变压器，测试结果与实际情况吻合。通过实例演绎论证了本文所提出的基于粗糙集理论的变压器绝缘状态评估方法是有效、准确的。

4 结论

本文基于回复电压测试数据分析并提取特征量作为变压器绝缘状态评估指标；利用 FCM 聚类算法对变压器样本数据进行聚类划分，实现样本数据的指标化，使数据更为简便直观，并建立绝缘状态的决策表。利用粗糙集理论对变压器绝缘状态评估指标进行属性约简和属性值约简，删除冗余属性，生成变压器绝缘状态评估的核值表和简化的决策表，提取变压器绝缘状态评估规则，解决多时域特征量的综合评估问题，并利用多台变压器实际数据进行实例验证，证明该方法准确有效，为变压器的绝缘状态诊断提供新思路。相较于单指标评估法，本文提出的方法利用多个特征量综合诊断变压器绝缘状态，评估结果更为准确可靠。相较于运用赋权理论的评估方法有可能因为主观赋权带来评估结果的误差及可信度降低，本文的方法利用粗糙集理论进行评估指标的约简，得到的评估规则更为直观而且消除主观因素造成的误差。

参考文献

[1] 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.

[2] 吕守国, 崔玉新, 冯迎春, 等. 基于综合分析方法的变压器故障诊断技术与软件开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 123-128.
LÜ Shouguo, CUI Yuxin, FENG Yingchun, et al. Transformer fault diagnosis method based on comprehensive analysis and its software development[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 123-128.

[3] 郭洪英. 基于回复电压极化谱小波包变换的变压器绝缘老化诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 170-175.
GUO Hongying. Diagnostic method of transformer insulation aging based on the recovery voltage polarization spectrum's wavelet packet transform[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 170-175.

[4] 许渊, 刘有为, 王文焕, 等. 大型电力变压器油纸绝缘含水量的介质响应诊断技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 133-140.
XU Yuan, LIU Youwei, WANG Wenhuan, et al. Moisture content analysis of oil-paper insulation for large power transformers using dielectric response methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 133-140.

[5] 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 insulation based on trap density spectrum[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2574-2581.

[6] 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 parameters[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(6): 44-49.

[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): 53-58.
HUANG Yuncheng, CAI Jinding. Diagnosis of insulation condition of transformers by using depolarization energy spectrum[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(1): 53-58.

[8] 郑文迪, 蔡金锭, 曾静岚. 采用线型因子的油纸绝缘系统老化状态评估[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 677-682.
ZHENG Wendi, CAI Jinding, ZENG Jinglan. Aging evaluation of oil-paper insulation system using line shape factor[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 677-682.

[9] 廖瑞金, 黄飞龙, 杨丽君. 变压器状态评估指标权重计算的未确知有理数法[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 2219-2224.
LIAO Ruijin, HUANG Feilong, YANG Lijun. Calculation method of power transformer condition assessment index weight using unascertained theory[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 2219-2224.

[10] 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.

[11] 张晶晶, 许修乐, 丁明, 等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 75-81.
ZHANG Jingjing, XU Xiule, DING Ming, et al. A condition assessment method of power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 75-81.

[12] 李玲玲, 张士暖, 李志刚, 等. 基于粗糙集理论和生命初态信息的继电器寿命预测方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 46-53.
LI Lingling, ZHANG Shinuan, LI Zhigang, et al. The life prediction method of relay based on rough set theory and relay's initial life information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 46-53.

[13] 胡杨, 杨海亮, 张鹏飞, 等. 基于粗糙集理论和 PSpice 仿真的脉冲功率装置故障诊断方法[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(7): 1316-1321.
HU Yang, YANG Hailiang, ZHANG Pengfei, et al. Fault diagnosis of pulsed power device based on rough set theory and PSpice simulation[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(7): 1316-1321.

[14] 王思华, 杨桐, 段启凡, 等. 基于 DT 法和粗糙集理论的接地网安全性状态评定[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 48-54.
WANG Sihua, YANG Tong, DUAN Qifan, et al. Evaluation of security state in grounding grid based on DT method and rough set[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 48-54.

[15] 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.

[16] 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(9): 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(9): 190-197.

[17] 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.

[18] 彭积城, 蔡金锭. 变压器油纸绝缘老化状态的探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 132-138.
PENG Jicheng, CAI Jinding. Discussion on evaluation of aging condition for transformer oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 132-138.

[19] 王雪国, 贾振红, 覃锡忠. 基于 PM 扩散方程的 SAR 图像变化检测[J]. 激光杂志, 2017, 38(4): 28-31.
WANG Xueguo, JIA Zhenhong, QIN Xizhong. Change detection in SAR images based on P-M nonlinear diffusion model[J]. Laser Journal, 2017, 38(4): 28-31.

[20] 帅勇, 宋太亮, 王建平, 等. 改进的模糊时间序列模型论域划分算法[J]. 计算机工程与技术, 2017, 38(2): 379-383.
SHUAI Yong, SONG Tailiang, WANG Jianping, et al. Modified fuzzy time series model interval partitioning algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(2): 379-383.

收稿日期：2018-05-02；　修回日期：2018-06-07

作者简介：

林晓宁(1994—)，男，通信作者，硕士研究生，研究方向为电气设备绝缘老化诊断；E-mail: 1084813887@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: cjd@fzu.edu.cn

(编辑　魏小丽)