

# 基于模糊粗糙集的变压器油纸绝缘状态评估\*

谢 松, 邹 阳, 蔡金锭

(福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108)

**摘 要:** 回复电压法(RVM)是一种研究电力变压器绝缘老化状态的检测方法,基于大量回复电压测试数据,提出运用模糊粗糙集理论评估变压器油纸绝缘状态,并构建变压器油纸绝缘状态评估系统。首先,基于回复电压特征量建立变压器油纸绝缘状态评估指标;其次,采用模糊C均值聚类算法获得变压器测试数据对于特征量模糊划分的隶属度函数;然后,根据可辨识矩阵对油纸绝缘状态评估表的模糊属性进行约简,并提取油纸绝缘状态评估规则;最后,在历史数据库的基础上构建油纸绝缘状态评估系统。通过实例演绎论证提出的评估系统能有效、准确地评估电力变压器绝缘状态,为变压器油纸绝缘状态评估提供了新思路,且在工程应用中具有实际价值。

**关键词:** 回复电压;模糊粗糙集;绝缘评估;油纸绝缘;模糊C均值聚类

**中图分类号:** TM411 TH183      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Assessment of transformer oil-paper insulation status with fuzzy rough set

Xie Song, Zou Yang, Cai Jinding

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

**Abstract:** Recovery voltage method (RVM) is to study insulation aging status of power transformer. Based on a lot of test data of recovery voltage, the fuzzy rough set theory is proposed and used to assess the oil paper insulation status of transformer. And the assessment system of oil paper insulation of transformer is constructed. Firstly, the evaluation index of oil-paper insulation status of transformer is identified based on recovery voltage feature parameters. Secondly, the membership function of fuzzy partitioning feature parameters for transformer test data is obtained by using FCM clustering algorithm. Then, the fuzzy attributes are reduced for the assessment table of oil paper insulation statue in accordance with the discernibility matrix, and the assessment rules of oil-paper insulation status are extracted. Finally, the assessment system of oil-paper insulation status is built based on the historical database. The experiments demonstrate that the assessment system is effective and feasible which provides a new solution for the assessment of transformer oil-paper insulation status. This work is of practical value in actual engineering applications.

**Keywords:** recovery voltage; fuzzy rough set; insulation evaluation; oil-paper insulation; fuzzy C means clustering

## 1 引 言

基于时域介电响应的回复电压法(recovery voltage method, RVM)是一种无损诊断变压器油纸绝缘状态的绝缘检测方法。利用回复电压法能够准确反映变压器油纸绝缘内部缓慢的弛豫过程,有效地诊断电力变压器油纸绝缘系统的状态<sup>[1]</sup>。

目前,部分学者通过回复电压法对变压器油纸绝

缘系统进行深入的研究,提出回复电压法测试获得的特征量定性分析电力变压器油纸绝缘系统的状态。如文献[2]通过实验指出油纸绝缘老化越严重,主时间常数越小;文献[3]通过热加速老化实验验证了回复电压极化谱峰值电压随绝缘劣化加深而增大,但目前都只局限在单个特征量的研究或多个特征量分开讨论,并未充分利用多个特征量来综合评估电力变压器油纸绝缘老化状态,同时针对不同特征量对变压器油纸绝缘状态评估的重要程度的研究鲜有报道;文献[4]引入灰

色关联法对变压器油纸绝缘状态综合评估,但其并未考虑到油纸绝缘状态评估中冗余特征量的存在。

鉴于上述不足,提出了利用模糊粗糙集理论来综合评估变压器油纸绝缘状态,解决了变压器不完备数据以及部分信息未知的不确定性问题。首先,通过分析并提取特征量建立油纸绝缘状态评估指标;其次,通过模糊 C 均值(fuzzy C-means, FCM)聚类算法对变压器测试数据模糊化,分析各特征量对于油纸绝缘状态评估的重要程度;然后,利用模糊粗糙集的属性约简对冗余的特征量及模糊语言项进行删减;最后,建立油纸绝缘评估规则表,并基于历史数据库构建油纸绝缘评估系统。

## 2 模糊粗糙集理论

模糊粗糙集是数据挖掘中的一种重要理论,它不需要提供求解问题时所需要处理的数据集合之外的任何先验信息,通过不可分辨关系和模糊等价关系可有效地分析和处理不精确、不一致和各种不完备的数据,从中发现隐含的知识,找出该问题的潜在规律<sup>[5-6]</sup>。

基于模糊粗糙集理论的油纸绝缘诊断系统(fuzzy information system)<sup>[7]</sup>可用有序四元组表示:  $FIS = \{U, A, V, f\}$ , 全集论域  $U = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  为  $n$  个对象的非空有限集合,  $A = P \cup Q$  为属性集合, 其中  $P = \{P_i | i = 1, 2, \dots, p\}$  为  $p$  个特征量的条件属性集合, 表征变压器油纸绝缘状态评估的特征量, 条件属性  $P_i$  可表示为  $g$  个模糊语言项的集合  $A(P_i) = \{F_{ij} | j = 1, 2, \dots, g\}$ 。  $Q$  为决策属性, 表征变压器油纸绝缘状态, 决策属性可表示为  $q$  个模糊语言项的集合  $A(Q) = \{F_l | l = 1, 2, \dots, q\}$ 。  $V = \bigcup V_r | r \in A$  为属性值的集合,  $V_r$  表示属性  $r$  的取值范围;  $f: U \times A \rightarrow V$  为诊断系统信息函数, 用于确定论域  $U$  中每一个对象  $x$  的属性值。

模糊粗糙集理论将近似对象从经典粗糙集理论的精确集扩展到模糊集, 用模糊等价关系代替粗糙集的精确等价关系。模糊粗糙集的模糊上下近似集定义为<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} \mu_{F_i^-}(F_{ij}) = \inf_{x \in U} \max \{1 - \mu_{F_{ij}}(x), \mu_{F_i}(x)\} \\ \mu_{F_i^+}(F_{ij}) = \sup_{x \in U} \min \{\mu_{F_{ij}}(x), \mu_{F_i}(x)\} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mu_{F_{ij}}(x)$  表示论域  $U$  中对象  $x$  属于模糊划分  $F_{ij}$  的隶属程度,  $\mu_{F_i}(x)$  表示对象  $x$  属于模糊划分  $F_i$  的隶属程度。模糊粗糙集中模糊语言项  $F_{ij}$  的模糊正域定义为:

$$\mu_{\text{POS}}(F_{ij}) = \sup_{F_i \in A(Q)} \mu_{F_i^-}(F_{ij}) \quad (2)$$

论域  $U$  中对象  $x$  属于模糊正域的隶属度定义为:

$$\mu_{\text{POS}_r}(x) = \sup_{F_i \in A(P_i)} \min \{\mu_{F_{ij}}(x), \mu_{\text{POS}}(F_{ij})\} \quad (3)$$

模糊依赖度函数为:

$$\gamma_{P_i}(Q) = \frac{|\mu_{\text{POS}_r}(x)|}{|U|} = \frac{\sum_{x \in U} \mu_{\text{POS}_r}(x)}{|U|} \quad (4)$$

因此,属性  $P_i$  对  $Q$  的依赖度为:

$$\gamma_{P_i}(Q) = \frac{\sum_{x \in U} \sup \{ \min \{ \mu_{F_{ij}}(x), \max [1 - \mu_{F_{ij}}(x), \mu_{F_i}(x)] \} \}}{|U|} \quad (5)$$

式(5)表示条件属性  $P_i$  对决策属性  $Q$  的依赖程度, 依赖程度越大说明该特征量对于油纸绝缘老化状态的重要性越大。

## 3 油纸绝缘状态评估系统构建

### 3.1 油纸绝缘状态评估指标

RVM 是基于时域介质响应理论的变压器绝缘老化评估方法, 根据回复电压测试仪获得的回复电压曲线与回复电压极化谱的特征量可有效评估变压器油纸绝缘老化状态<sup>[9]</sup>。其测试原理: 当绝缘介质两端施加直流高压时, 绝缘介质极化, 表面出现束缚电荷, 内部偶极子定向排列, 即极化过程; 撤去外施电压并短接两极后, 表面电荷立即释放, 同时介质内部会发生缓慢去极化过程, 该过程为去极化过程; 去掉两极间的短接线后, 去极化过程仍在继续, 自由电荷会在电极之间呈现一个电势差, 称为回复电压<sup>[10]</sup>, 如图 1 所示。回复电压极化谱是通过改变极化时间  $t_c$  多次测量所得, 如图 2 所示。

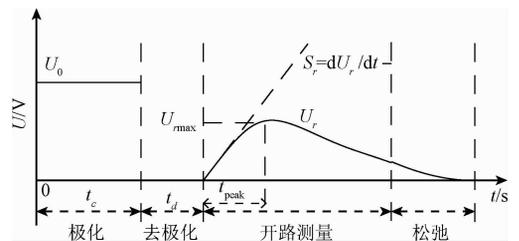


图 1 RVM 测试示意图

Fig. 1 Measurement schematic diagram of RVM

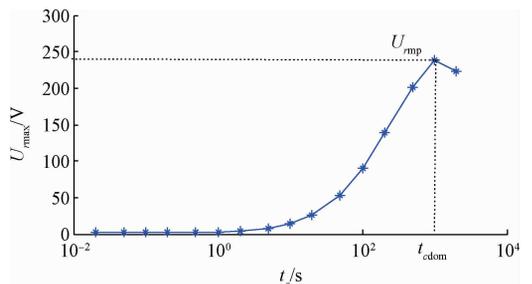


图 2 回复电压极化谱

Fig. 2 Return voltage polarization spectrum

本文选取回复电压极化谱峰值电压  $U_{rmp}$ 、主时间常数  $t_{cdom}$ 、最大初始斜率  $S_{rmax}$ 、绝缘电阻  $R_g$  和几何电容  $C_g$  作为变压器油纸绝缘状态评估指标<sup>[11]</sup>。

回复电压极化谱峰值电压随着油纸绝缘劣化程度的加深而增大<sup>[12]</sup>，极化谱峰值电压可由极化谱取得，其表达式为：

$$U_{rmp} = \max(U_{rmax}(t_c)) \quad (6)$$

式中： $U_{rmax}(t_c)$  为测试时间  $t_c$  时回复电压谱线最大值。

回复电压极化谱主时间常数不受外界测试条件的影响，油纸绝缘老化严重，主时间常数值越小<sup>[13]</sup>，主时间常数  $t_{cdom}$  可表示为：

$$t_{cdom} = \operatorname{argmax}(U_{rmax}(t_c)) \quad (7)$$

式中： $t_{cdom}$  表示为当极化谱回复电压  $U_{rmax}$  达到最大值所对应的测试时间  $t_c$ 。

回复电压谱线初始斜率反映了绝缘界面极化的响应速度，绝缘状态越差，其极化响应越快，初始斜率越大<sup>[14]</sup>，其表达式为：

$$S_{rmax} = \max\left(\lim_{t \rightarrow 0} \frac{du_r}{dt}\right) \quad (8)$$

变压器绝缘电阻  $R_g$  反映了油纸绝缘的电导情况，油纸绝缘劣化，绝缘电导率增加，绝缘电阻变小<sup>[15]</sup>，其表达式为：

$$R_g = \varepsilon_0 / \sigma C_0 \quad (9)$$

式中： $\varepsilon_0$  为真空介电常数， $\sigma$  为电介质材料的直流电导率， $C_0$  为真空电容值。

几何电容  $C_g$  反映了绝缘材料储电能力，文献[16]改变几何电容  $C_g$ ，仿真该参量与绝缘老化的关系，并通过实例验证随着绝缘劣化，绝缘介质储电能力增强，几何电容  $C_g$  值变大。其表达式为：

$$C_g = \varepsilon_r C_0 \quad (10)$$

式中： $\varepsilon_r$  为相对介电常数。

### 3.2 特征量的模糊划分

FCM 聚类算法是基于目标函数的聚类算法，因其能客观反映现实世界的聚类划分，有效减少主观判断对模糊划分的影响，广泛地应用于大规模数据分析、数据挖掘等领域<sup>[17-18]</sup>。利用 FCM 算法进行油纸绝缘状态评估特征量的模糊划分，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。

设  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为变压器特征量数据集， $n$  是变压器测试样本个数，模糊条件属性  $P$  划分为高中低 3 个模糊语言项；模糊条件属性划分的聚类中心向量为  $V = \{v_1, v_2, v_3\}$ ，FCM 聚类算法结果输出变压器数据相对于各模糊划分的隶属度矩阵  $\mu$  可表示为：

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \dots & \mu_{1j} & \dots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \dots & \mu_{2j} & \dots & \mu_{2n} \\ \mu_{31} & \dots & \mu_{3j} & \dots & \mu_{3n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： $\mu_{ij}$  表示第  $j$  个变压器样本对于第  $i$  项模糊划分的隶属度，FCM 聚类算法的迭代目标函数为：

$$\min J(\mu_{ij}, v_n) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n (\mu_{ij})^m \|x_j - v_i\|^2 \quad (12)$$

将式(8)、(9)代入目标函数  $J$ ，迭代求取目标函数  $J$  最小值。

$$v_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n (\mu_{ij})^m} \sum_{j=1}^n (\mu_{ij})^m x_j, \quad i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

$$\mu_{ij} = \frac{(1/\|x_j - v_i\|^2)^{1/m-1}}{\sum_{c=1}^3 (1/\|x_j - v_c\|^2)^{1/m-1}} \quad (14)$$

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油纸绝缘评估系统属性的隶属度函数。将模糊条件属性分为高、中、低 3 个模糊语言项，模糊划分隶属度函数如图 3 所示。

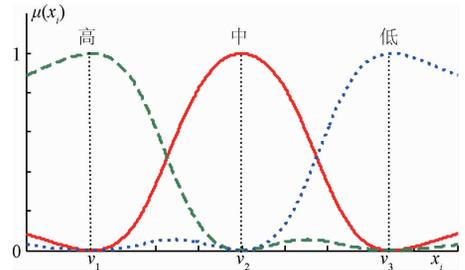


图 3 模糊划分隶属度函数

Fig. 3 Fuzzy partition membership function

以主时间常数  $t_{cdom}$  为例，通过 FCM 聚类算法对主时间常数样本数据进行模糊划分，求得主时间常数为低语言项的聚类中心  $v_1$  为 542.151 7 s，主时间常数为中语言项的聚类中心  $v_2$  为 1 296.1 s，主时间常数为高语言项的聚类中心  $v_3$  为 3 010.4 s。主时间常数  $t_{cdom}$  测试数据对模糊划分聚类中心的隶属度，如下表 1 所示，为部分样本的模糊划分隶属度。

表 1 部分样本的模糊划分隶属度

Table 1 Fuzzy partition membership degree of some samples

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	...
$v_1 = 542.1517 \text{ s}$	0.050 8	1.000 0	0.014 6	0.959 2	0.072 8	...
$v_2 = 1296.1 \text{ s}$	0.132 8	0.000 0	0.983 3	0.038 0	0.203 8	...
$v_3 = 3010.4 \text{ s}$	0.816 4	0.000 0	0.002 0	0.002 7	0.723 4	...

以隶属度值为 0.5 作为断点对隶属度函数离散化。当测试数据与模糊语言项的隶属度  $\mu_{ij}$  在  $(0, 0.5)$  区间时,表示该测试数据不属于该模糊语言项。当测试数据与模糊语言项的隶属度  $\mu_{ij}$  在  $(0.5, 1)$  区间时,表示测试数据属于该模糊语言项。以表 1 中  $x_1$  为例,其隶属度  $\mu_{11}$  与  $\mu_{12}$  均在  $(0, 0.5)$  区间; $\mu_{13}$  则在  $(0.5, 1)$  区间;表明  $x_1$  数据在  $v_3$  的聚类范围内,不在  $v_1, v_2$  的聚类范围,属于为高语言项划分。

### 3.3 模糊属性的约简

油纸绝缘评估系统中并非所有的特征量属性及模糊语言项都是必要的,去除这些多余的特征量属性与模糊语言项并不影响原有的油纸绝缘诊断效果<sup>[19]</sup>。油纸绝缘评估系统  $(U, R \cup Q)$ ,  $R$  是由模糊属性得到的一族模糊相似关系,  $Q$  是由决策属性绝缘状态得到的模糊相似关系。对于油纸绝缘评估系统的约简采用由模糊属性构建的可辨识矩阵  $M(U, R)$ , 实现对条件属性与属性值的统一约简,具体约简步骤如下。

1) 计算变压器测试数据的模糊属性  $C_k$  的模糊相似关系  $R_k(x_i, x_j)$  如下:

$$R_k(x_i, x_j) = \begin{cases} \min\{C_k(x_i), C_k(x_j)\}, & C_k(x_i) \neq C_k(x_j) \\ 1, & C_k(x_i) = C_k(x_j) \end{cases} \quad (16)$$

2) 计算油纸绝缘评估系统中所有模糊属性集成的模糊相似关系  $Sim(R)$  如下:

$$Sim(R) = \cap \{R_k \mid R_k \in R\} \quad (17)$$

3) 计算油纸绝缘评估系统的可辨识矩阵  $M(U, R)$ ;  $c_{ij}$  表示可辨识矩阵中第  $i$  行第  $j$  列的元素,可辨识矩阵  $M(U, R) = (c_{ij})_{n \times n}$  定义为:

$$c_{ij} = \begin{cases} \{R_k : 1 - R_k(x_i, x_j) \geq \lambda_i\}, & \lambda_i \geq \lambda_j \\ \phi, & \lambda_i < \lambda_j \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\lambda_i = Sim(R) \cdot ([x_i]_Q)(x_i)$ ;  $\lambda_j = Sim(R) \cdot ([x_j]_Q)(x_j)$ ,  $[x]_Q(x) \in U/Q$ 。

4) 计算可辨识矩阵  $M(U, R)$  的合析取函数  $f_D(U, R) = \wedge \{ \vee (c_{ij}) : c_{ij} \neq \emptyset \}$ , 式中  $\wedge$  和  $\vee$  符号分别表示析取运算和合取运算。

5) 将合析取函数  $f_D(U, R)$  转换为析合取函数  $g_D(U, R) = (\wedge R_1) \vee \dots \vee (\wedge R_l)$ ;

6) 输出全体模糊属性集合  $R$  相对于决策属性  $Q$  的约简集合  $Red_D(R) = \{R_1, \dots, R_l\}$ ;

7) 对属性约简后的样本数据依据隶属度区间范围构建绝缘状态评估规则表,删除重复评估规则,提取油纸绝缘状态评估规则。

通过上述步骤可获得变压器油纸绝缘状态的评估规则,同时删减了冗余特征量与模糊语言项,使得评估规则更直观、简便。

### 3.4 油纸绝缘评估系统流程

基于以上评估流程,可得基于模糊粗糙集的变压器油纸绝缘评估系统如图 4 所示。用匹配度来表征实测特征量数据与油纸绝缘状态评估规则的匹配程度,匹配度小于设定阈值  $\psi$  时即视为实测特征量数据与纸绝缘状态评估规则相匹配,该阈值据专家经验给出,匹配度定义为:

$$\theta = \frac{1}{m} \left[ \sum_{i=1}^m \left( 1 - \frac{x_i}{\omega_i \beta_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

式中:  $m$  为参与计算的信息总数,  $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$  为经隶属关系分析后的数据信息,  $\beta_i (i = 1, 2, \dots, m)$  为油纸绝缘状态评估规则中数据信息,  $\omega_i (i = 1, 2, \dots, m)$  为评估规则可信度。若匹配度小于设定阈值,则实测特征量数据与油纸绝缘状态评估规则相匹配,根据评估规则输出油纸绝缘状态评估结果;若匹配度大于或等于设定阈值,则将经实时评估后的数据更新到历史数据库。

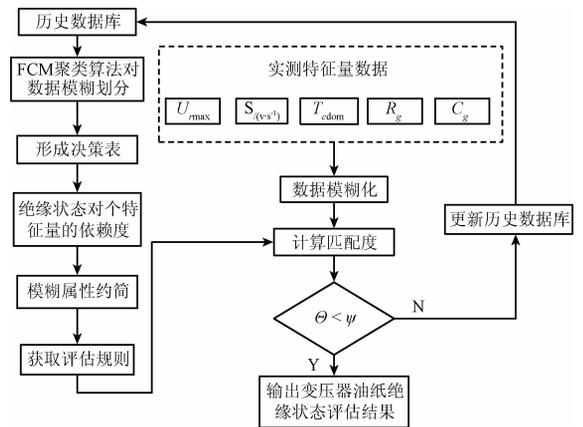


图4 变压器油纸绝缘评估系统

Fig. 4 Assessment system for transformer insulation

## 4 油纸绝缘评估系统评估演绎

对 20 台不同绝缘状态的变压器进行回复电压测试试验,获得变压器回复电压测试样本数据如表 2 所示。油纸绝缘评估系统中条件属性  $P_1$  为主时间常数  $t_{cdom}$ , 条件属性  $P_2$  为回复电压极化谱峰值电压  $U_{rmp}$ , 条件属性  $P_3$  为最大初始斜率  $S_{rmax}$ , 条件属性  $P_4$  为变压器绝缘电阻  $R_g$ , 条件属性  $P_5$  为变压器几何电容  $C_g$ 。油纸绝缘评估系统中决策属性  $Q$  为变压器油纸绝缘状态,按照《电力设备预防性试验规程》的规定,将变压器油纸绝缘状态按照糠醛含量检测等试验划分为绝缘性能良好(G)无需要检测维修与绝缘性能差(B)需要检测维修两个模糊语言项。

模糊划分变压器测试数据时,将特征量条件属性按高中低 3 项模糊语言项分为 15 个模糊属性  $C_k (k = 1, 2, \dots, 15)$ 。经 FCM 算法获得变压器测试数据对于模糊属性  $C_k$  的隶属度函数,如表 3 所示。

表 2 变压器回复电压测试样本数据

Table 2 Recovery voltage test sample data of some transformers

	$t_{edom}/s$	$U_{rmp}/V$	$S_{rmax}/(V \cdot s^{-1})$	$R_g/G\Omega$	$C_g/nF$	绝缘状态 $Q$
$x_1$	2 517.62	183.592 4	31.200 0	12.261 2	92.172 1	G
$x_2$	546.600 0	353.368 2	257.120 0	1.961 0	186.927 2	B
$x_3$	1 214.139 6	256.000 0	96.457 1	4.899 9	109.388 7	G
$x_4$	667.370 0	385.500 0	293.240 0	1.440 7	190.174 0	B
$x_5$	2 415.985 0	175.066 7	32.112 5	13.355 9	70.369 7	G
$x_6$	1 226.876 9	248.250 0	87.663 7	4.026 2	106.800 7	G
$x_7$	649.535 0	363.425 0	179.275 0	2.743 7	169.909 7	B
$x_8$	3 613.15	269.4	80.10	11.005 9	45.231 8	G
$x_9$	333.72	32.60	74.02	2.830 5	64.386 5	B
$x_{10}$	3 540.26	223.4	23.70	3.682 4	99.515 8	B
$x_{11}$	1 265.2	236.1	44.50	1.535 8	235.367 3	B
$x_{12}$	2 655.384	218.516 7	67.72	11.775 5	80.400 4	G
$x_{13}$	896.964 3	169.742 9	120.57	2.885 4	149.879 5	B
$x_{14}$	1 524.36	320.34	79.24	2.831 6	183.021 8	G
$x_{15}$	3 289.51	239.7	19.71	13.051 1	47.88	G
$x_{16}$	700.64	83.45	46.40	2.339 4	125.764 7	G
$x_{17}$	189.15	313.8	54.50	1.253 3	168.806 4	B
$x_{18}$	2 706.59	110.7	32.43	12.401 7	127.105 3	G
$x_{19}$	788.56	185.2	78.7	2.543	91.477	B
$x_{20}$	345.37	53.9	78.80	2.725 6	254.462 5	B

表 3 模糊属性隶属度函数

Table 3 Membership function of Partial fuzzy attributes

	$P_1$			$P_2$			$P_3$			$P_4$			$P_5$			$Q$
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	
$x_1$	0.050 8	0.132 8	0.816 4	0.085 5	0.873 1	0.041 4	0.993 7	0.006 0	0.000 3	0.000 0	0.000 1	0.999 9	0.374 9	0.597 4	0.027 6	G
$x_2$	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 7	0.002 9	0.996 4	0.001 4	0.002 4	0.996 2	0.981 4	0.017 8	0.000 8	0.006 3	0.018 4	0.975 3	B
$x_3$	0.014 6	0.983 3	0.002 0	0.032 9	0.827 4	0.139 6	0.028 7	0.967 6	0.003 7	0.081 7	0.907 9	0.010 4	0.013 2	0.983 2	0.003 6	G
$x_4$	0.959 2	0.038 0	0.002 7	0.014 6	0.052 2	0.933 2	0.011 3	0.017 5	0.971 2	0.911 0	0.084 0	0.005 0	0.002 8	0.007 7	0.989 5	B
$x_5$	0.072 8	0.203 8	0.723 4	0.141 9	0.805 0	0.053 1	0.996 0	0.003 8	0.000 2	0.008 5	0.012 2	0.979 4	0.975 6	0.021 7	0.002 7	G
$x_6$	0.010 1	0.988 4	0.001 5	0.024 3	0.895 6	0.080 1	0.001 1	0.998 8	0.000 1	0.001 9	0.998 0	0.000 1	0.032 2	0.960 4	0.007 4	G
$x_7$	0.971 2	0.026 8	0.002 0	0.003 4	0.014 1	0.982 4	0.162 3	0.385 5	0.452 2	0.881 5	0.116 2	0.002 3	0.049 4	0.182 6	0.767 9	B
$x_8$	0.034 8	0.061 2	0.904 0	0.042 9	0.668 4	0.288 7	0.016 9	0.982 2	0.001 0	0.021 4	0.034 4	0.944 2	0.920 8	0.065 5	0.013 7	G
$x_9$	0.949 7	0.044 5	0.005 8	0.947 1	0.039 1	0.013 8	0.087 0	0.909 4	0.003 5	0.825 4	0.171 5	0.003 1	0.999 8	0.000 2	0.000 0	B
$x_{10}$	0.028 7	0.051 3	0.920 0	0.000 8	0.997 9	0.001 3	0.963 4	0.034 3	0.002 3	0.079 8	0.918 1	0.002 2	0.149 4	0.830 4	0.020 2	B
$x_{11}$	0.001 8	0.997 9	0.000 3	0.010 3	0.966 3	0.023 4	0.952 9	0.045 5	0.001 6	0.924 6	0.071 4	0.004 0	0.043 7	0.088 4	0.867 8	B
$x_{12}$	0.025 7	0.062 2	0.912 1	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.240 4	0.753 2	0.006 4	0.003 3	0.005 1	0.991 6	0.796 1	0.187 7	0.016 3	G
$x_{13}$	0.550 0	0.434 5	0.015 5	0.185 9	0.755 3	0.058 9	0.135 3	0.818 0	0.046 7	0.783 5	0.213 0	0.003 6	0.096 6	0.578 5	0.324 9	B
$x_{14}$	0.050 1	0.928 0	0.021 9	0.009 9	0.060 1	0.930 0	0.022 9	0.975 8	0.001 3	0.824 6	0.172 3	0.003 1	0.012 7	0.038 8	0.948 5	G
$x_{15}$	0.010 0	0.019 0	0.970 9	0.014 2	0.949 8	0.036 0	0.942 9	0.053 2	0.003 9	0.004 5	0.006 5	0.989 0	0.936 5	0.052 9	0.010 6	G
$x_{16}$	0.929 8	0.065 9	0.004 4	0.988 5	0.009 1	0.002 4	0.926 6	0.071 1	0.002 3	0.997 3	0.002 6	0.000 1	0.030 2	0.946 8	0.023 0	G
$x_{17}$	0.895 0	0.091 0	0.014 0	0.015 6	0.102 4	0.882 0	0.727 2	0.266 9	0.005 9	0.884 8	0.108 0	0.007 2	0.053 2	0.200 3	0.746 5	B
$x_{18}$	0.018 5	0.043 5	0.938 0	0.856 8	0.118 2	0.025 0	0.996 7	0.003 2	0.000 2	0.000 1	0.000 1	0.999 9	0.035 9	0.934 4	0.029 6	G
$x_{19}$	0.801 3	0.188 8	0.009 9	0.076 7	0.884 3	0.039 0	0.027 3	0.971 2	0.001 5	0.965 1	0.034 1	0.000 9	0.400 6	0.571 6	0.027 7	B
$x_{20}$	0.953 9	0.040 9	0.005 2	0.986 9	0.010 0	0.003 2	0.026 5	0.972 1	0.001 4	0.891 6	0.106 2	0.002 2	0.072 4	0.134 7	0.792 9	B

依据式(1)、(5)依次计算变压器绝缘状态决策属性对各特征量条件属性的依赖度,各特征量依赖度  $\gamma_{P_i}(Q)$  分别为 1.279 1/20、0.244 9/20、6.981 5/20、6.992 8/20、1.929 4/20,从依赖度可知各特征量对于变压器油纸绝缘状态的重要性  $P_4 > P_3 > P_5 > P_1 > P_2$ 。表 3 中隶属度数据经式(18)计算得油纸绝缘评估系统的可辨识矩阵,并通过析合取运算求取油纸绝缘状态评估的模糊属性约简集合,获得模糊属性约简集合为  $\{C_3, C_4, C_8, C_9, C_{10}, C_{12}, C_{15}\}$  或  $\{C_3, C_6, C_8, C_9, C_{10}, C_{12}, C_{15}\}$ 。以模糊属性约简集合  $\{C_3, C_4, C_8, C_9, C_{10}, C_{12}, C_{15}\}$  为例,其含义为

模糊属性主时间常数  $t_{cdom}$  (H)、最大回复电压低类别  $U_{rmp}$  (L)、最大初始斜率中类别与高类别  $S_{rmax}$  (M、H)、绝缘电阻低类别与高类别  $R_g$  (L、H) 与几何电容高类别  $C_g$  (H) 是有效评估变压器油纸绝缘状态的模糊属性集合,其余模糊属性为冗余属性。经规则提取获得油纸绝缘状态评估规则表,如表 4 所示,表中元素为隶属度函数所属区间。以油纸绝缘状态评估规则第 1 条为例,当测试数据经计算所得隶属度函数符合评估规则 1 中的隶属度区间范围时,即可判定变压器油纸绝缘状态良好,无需进行检测。

表 4 油纸绝缘评估规则表

Table 4 The rules table of insulation assessment system

规则序号	$P_1$ (H)	$P_2$ (L)	$P_3$ (M)	$P_3$ (H)	$P_4$ (L)	$P_4$ (H)	$P_5$ (H)	$Q$
	$C_3$	$C_4$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{12}$	$C_{15}$	
1	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0, 1)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	G
2	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	G
3	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	G
4	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	G
5	(0.5, 1)	(0, 1)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	G
6	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 1)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	B
7	(0, 0.5)	(0, 1)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	B
8	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0, 1)	B
9	(0.5, 1)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	(0, 0.5)	B

选取未加入历史数据库的 3 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 5 所示,按照变压器油纸绝缘状态评估系统流程,利用 FCM 聚类算法对测试数据模糊划分,获得 3 台变压器的隶属度函数,如表 6 所示。T1 变压器的隶属度函数与油纸绝缘评估规则表中评估规则 1 的隶属度区间相匹配,根据评估规则判定 T1 变压器油纸绝缘状态为绝缘良好,无需进行检测维修;评估结果与实测变压器通过糠醛含量检测等试验获取的绝缘检测结果相符,如表 5 中所示,T1 变压器为新投入运行变

压器,绝缘状态良好。同理,T2 变压器隶属度函数与评估规则 6 相匹配,根据评估规则判定 T2 变压器绝缘劣化,需要检测维修;评估结果 T2 变压器绝缘状态相符:T2 变压器运行 14 年绝缘受潮较严重,经检修后更换变压器绕组和变压器油。T3 变压器隶属度函数与评估规则 9 相匹配,判定 T3 变压器绝缘劣化,需要检测维修;T3 变压器运行年限超过 20 年,绝缘老化严重,评估结果与实测变压器绝缘状态一致。通过实例演绎论证了本文所提出的基于模糊粗糙集理论的油纸绝缘状态评估方法是有效、准确的。

表 5 3 台电力变压器基本信息与测试数据

Table 5 The basic information and test data of 3 power transformers

序号	型号	运行年限/年	$t_{cdom}/s$	$U_{rmp}/V$	$S_{rmax}/(V \cdot s^{-1})$	$R_g/G\Omega$	$C_g/nF$	糠醛含量/ $(mg \cdot L^{-1})$	绝缘状态
T1	SFSE9-240000/220	1	2 314.82	230.30	27.8	15.74	90.35	0.063	绝缘状态良好
T2	SFP9-24000/220	14	1 449.8	243.1	45.4	1.795	364.2	0.738	绝缘受潮较严重
T3	cub-MRM/220	22	3 328.12	289.3	23.90	4.027 6	95.48	0.984	绝缘老化严重

表 6 3 台电力变压器的隶属度函数与评估结果

Table 6 The membership function and assessment results of 3 power transformers

	$P_1$ (H)	$P_2$ (L)	$P_3$ (M)	$P_3$ (H)	$P_4$ (L)	$P_4$ (H)	$P_5$ (H)	匹配规则	评估结果
T1	0.668 4	0.003 4	0.012 3	0.000 7	0.000 1	0.998 0	0.023 6	1	绝缘良好
T2	0.005 2	0.013 2	0.041 8	0.001 4	0.988 3	0.005 0	0.993 2	6	绝缘劣化
T3	0.978 7	0.034 1	0.024 5	0.001 6	0.000 7	0.000 0	0.017 0	9	绝缘劣化

将本文模糊粗糙集理论与文献[4]的灰色关联法相比较,对相同的20台变压器测试数据进行评估,基于模糊粗糙集理论的油纸绝缘评估系统保留了样本原有的决策属性,可有效、准确评估变压器绝缘状态,未出现误评估,而灰色关联法在油纸绝缘状态评估时出现了3次误评估。通过与灰色关联法绝缘评估对比,模糊粗糙集理论的绝缘状态综合评估结果更为精确,验证了本方法的优越性。

## 5 结 论

1) 基于回复电压测试数据分析并提取特征量建立油纸绝缘老化状态评估指标。

2) 利用FCM聚类算法计算变压器样本与各特征量模糊划分的隶属度函数,有效减少人为主观因素对特征量隶属度函数的影响,依据模糊粗糙集理论分析了各特征量对于油纸绝缘状态评估的重要程度。

3) 通过模糊粗糙集理论对油纸绝缘老化评估特征量约简,并提取油纸绝缘状态评估规则,解决了多个特征量的油纸绝缘综合评估问题,并实现了对冗余属性的删减。

4) 收集大量不同绝缘状态变压器测试数据,建立历史数据库,并基于模糊粗糙集理论构建变压器油纸绝缘状态评估系统,为评估电力电压器油纸绝缘状态提供了新思路。

## 参 考 文 献

- [1] 陈伟根, 杜杰, 凌云, 等. 基于能量-小波矩特征分析的油纸绝缘气隙放电过程划分[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1062-1069.  
CHEN W G, DU J, LING Y, et al. Air-gap discharge process partition in oil-paper insulation based on energy-wavelet moment feature analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1062-1069.
- [2] 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 Y, CAI J D. 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.
- [3] 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 R J, SUN H G, YUAN Q, et al. Analysis of oil-paper insulation aging characteristics using recovery voltage method [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 136-142.
- [4] 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 J D, HUANG Y CH. Study on insulation aging of power transformer based on gray relational diagnostic model [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3296-3301.

- [5] 高爽, 冬雷, 高阳, 等. 基于粗糙集理论的中长期风速预测[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 32-37.  
GAO SH, DONG L, GAO Y, et al. Mid-long term wind speed prediction based on rough set theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 32-37.
- [6] 吴陈, 李丹丹. 基于粗糙集的关联规则挖掘方法的研究与应用[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 44-48.  
WU CH, LI D D. Research and application of association rules based on rough set [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 44-48.
- [7] ZENG AN P, LI T R, LIU D, et al. A fuzzy rough set approach for incremental feature selection on hybrid information systems [J]. Fuzzy Sets & Systems, 2015, 258(1): 39-60.
- [8] 刘鑫蕊, 付倩, 孙秋野, 等. 直觉模糊粗糙集理论在电网灾害评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5692-5702.  
LIU X R, FU Q, SUN Q Y, et al. Application of intuitionistic fuzzy rough sets theory to the power grid disaster assessment [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5692-5702.
- [9] 林智勇, 蔡金锭. 基于回复电压特征量的油纸绝缘老化诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11): 1669-1676.  
LIN ZH Y, CAI J D. Aging diagnosis of oil-paper insulation based on the return voltage characteristics [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(11): 1669-1676.
- [10] 王世强, 魏建林, 张冠军, 等. 温度对油纸绝缘介电响应特性的影响[J]. 电工技术学报, 2012(5): 50-55.  
WANG SH Q, WEI J L, ZHANG G J, et al. Effect of temperature on dielectric response characteristics of oil impregnated pressboard [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 50-55.
- [11] LI X H, ZHANG J, LI CH R, et al. Study on the quality evaluation metrics for compressed spaceborne hyperspectral data [J]. Instrumentation, 2015, 2(1): 33-34.
- [12] 邹阳, 蔡金锭. 油纸绝缘变压器时域极化谱特性实验分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 307-313.  
ZOU Y, CAI J D. Experimental analysis on time-domain polarization spectrum of oil-paper insulation

- transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 307-313.
- [13] 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 X J, WU G N, LI X L, 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.
- [14] WOLNY S. Aging degree evaluation for paper-oil insulation using the recovery voltage method [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2455-2462.
- [15] 黄云程, 蔡金锭. 油纸绝缘系统回复电压函数建模及拓扑结构辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 149-153.  
HUANG Y CH, CAI J D. Return voltage function modeling and topology recognition of oil-paper insulation system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 149-153.
- [16] 江修波, 张涛, 黄彦婕. 变压器油纸绝缘极化谱的仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 31-35.  
JIANG X B, ZHANG T, HUANG Y J. Simulation of transformer insulation polarization spectrum [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 31-35.
- [17] LIU L F, SUN SAM Z D, YU H Y, et al. A modified fuzzy C-means (FCM) Clustering algorithm and its application on carbonate fluid identification [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 129(6): 28-35.
- [18] 钟群芳, 郭长欢, 黄建. 基于多层模糊评估模型的直升机供电系统综合评估方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 27-31.  
ZHONG Q F, GUO CH H, HUANG J. Comprehensive evaluation method of helicopter power supply system based on multi-hierarchy fuzzy evaluation model [J]. Foreign

Electronic Measurement Technology, 2015, 34(11): 27-31.

- [19] CHEN D, YANG Y. Attribute reduction for heterogeneous data based on the combination of classical and fuzzy rough set models [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(5): 1325-1334.

## 作者简介



谢松, 2014年于福州大学获得学士学位, 现为福州大学硕士研究生, 主要研究方向为电气绝缘老化设备诊断。

E-mail: 527202164@qq.com

**Xie Song** received his B. Sc. degree in 2014 from Fuzhou University. Now, he is a graduate student in Fuzhou University. His main research interest is insulation monitoring and fault diagnosis of electrical equipment.



邹阳(通讯作者), 2009年于福州大学获得硕士学位, 现为福州大学讲师、博士研究生, 主要研究方向为电气系统智能化故障诊断。

E-mail: 24001744@qq.com

**Zou Yang** (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 2009 from Fuzhou University. Now, he is a lecturer and Ph. D. candidate in Fuzhou University. His main research interest is intelligent fault diagnosis of electrical system.



蔡金锭, 1989年于湖南大学获得硕士学位, 2001年于西安交通大学获得博士学位, 现为福州大学教授、博士生导师, 主要研究方向为电力系统故障诊断的研究。

E-mail: cjd@fzu.edu.cn

**Cai Jinding** received his M. Sc. degree in 1989 from Hunan University and Ph. D. degree in 2001 from Xi'an Jiaotong University. He is now a professor and doctoral supervisor in Fuzhou University. His main research interest is fault diagnosis of power system.