

# 基于灰色物元的变压器多指标 绝缘状态评估方法

张梦瑶<sup>1</sup>, 李磊<sup>2</sup>, 刘彦文<sup>2</sup>, 徐鹏程<sup>2</sup>, 王昕<sup>3</sup>

(1. 上海海事大学物流工程学院, 上海 201306; 2. 国网吉林省电力有限公司四平供电公司, 吉林 四平 136000;  
3. 上海交通大学电工与电子技术中心, 上海 200240)

**摘要:**为准确评估变压器绝缘状态,提出一种基于灰色物元分析法的变压器绝缘状态评估方法。首先,选取变压器的绝缘状态检测量和实际运行状态作为评估指标,建立多指标评估体系;然后,针对指标信息的模糊性,用灰色物元表示评估指标并将其特征值量化,从而能准确地对变压器进行定性和定量评估;同时,考虑到指标之间并不独立,基于物元理论构造关联函数,将多指标评估转化为单目标评估;但指标间相关性将导致信息重复,为解决该问题,将变异系数法和复相关系数法2种客观赋权法组合,根据指标在综合评估中的作用计算权重,该权重反映了各指标的实际状态;最后,应用改进方法计算灰色关联度,确定变压器所处的绝缘老化等级。实例证明该方法合理可行。

**关键词:**物元理论;灰色关联;客观赋权;绝缘老化;状态评估

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.018 中图分类号:TM41 文章编号:1673-9140(2020)01-0137-07

## Multi-indices insulation condition assessment method for transformer based on grey matter-element method

ZHANG Mengyao<sup>1</sup>, LI Lei<sup>2</sup>, LIU Yanwen<sup>2</sup>, XU Pengcheng<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>3</sup>

(1. Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Siping Power Supply Company, Jilin Electric Power Co., Ltd., State Grid Corporation of China, Siping 136000, China; 3. Center of Electrical & Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:**In order to assess the insulation condition of transformer accurately, a comprehensive evaluation method is proposed on the basis of the grey matter-element analysis method. First of all, measurement results of insulation parameters and the actual operating condition of transformers are selected as evaluation indices to establish a multi-indices evaluation system. Then, the grey matter-elements are utilized to quantify eigenvalues of indices and then the condition of transformer more can be evaluated qualitatively and quantitatively. Meanwhile, the independence among indices is taken into account and correlation functions are constructed based on the matter-element theory. The multi-indices evaluation problem is then transformed into a single-objective assessment. However, the correlation between indices

would bring duplicate information. To solve this problem, two objective weighting methods, which are the variation coefficient method and the multiple correlation coefficient method, are employed to calculate weights according to the importance of the indices. Finally, the improved method is applied to calculate the degree of grey correlation and the aging level of transformer insulation is evaluated. It is shown that this method is reasonable and feasible.

**Key words:** agglomerative matter-element theory; grey correlation; objective weighting method; insulation aging; condition assessment

变压器作为电力系统中的重要输变电设备,其运行状态直接关系到电力系统的安全运行。然而,变压器损坏事故却屡有发生,其中有85%以上<sup>[1]</sup>属于绝缘老化故障,因此,有必要对变压器的绝缘老化状态进行准确评估。

长期以来,国内外专家学者通过预防性试验和定期检修的方式来评估变压器的绝缘老化状态<sup>[2]</sup>,但这些方法并没有考虑变压器的实际运行状态。基于此,文献[3]增加变压器不良工况作为指标来评估变压器绝缘老化状态,然而,不良工况的定性评估指标在进行数据处理时具有模糊性。为解决该问题,文献[4]采用层次分析法,将定性指标量化处理,但当评估指标数较多时,仍有判断模糊性。而文献[5]利用模糊理论能克服判断模糊性,但隶属度函数选择时易受主观性影响。文献[6]采用证据理论能客观处理评估指标,但其要求指标之间必须独立。实际上,由于多种老化因素的共同影响,变压器各指标并非独立的,需要考虑其相关性和不相容性。为此,文献[7]应用灰色关联分析计算各指标间的关联度,从而判断变压器绝缘状态,但分辨系数不易确定。文献[8]运用物元理论解决变压器指标的不相容性问题,实现指标的量化评估。因此,可将灰色理论与物元理论相结合来解决变压器多指标的评估问题。另一方面,对多指标权重的分配目前主要采用主观赋权法<sup>[9]</sup>,但由于只借鉴专家经验,主观误差无法规避。文献[10]计算信息熵来确定客观权重,但未考虑各指标间的相关性,将导致评估信息重复,影响变压器的准确评估。

为实现变压器绝缘状态的准确评估,该文提出一种基于灰色物元的变压器多指标绝缘状态评估方法。① 考虑变压器实际运行状态,建立变压器绝缘老化状态评估体系;② 运用灰色理论量化处理各指标特征值,并结合物元可拓思想,将多指标评估转化为单目标评估,解决多指标间的不相容问题;③ 为

解决评估信息重复问题,运用变异系数法和复相关系数法根据指标在综合评估中的所起作用计算权重,所得权重更符合实际;④ 应用改进的灰色关联分析法确定变压器所处绝缘老化等级;⑤ 通过对一台220 kV变压器3个不同时间段的绝缘老化状态进行评估,并与现有评估方法对比,证明该文综合评估方法的可行性。

## 1 变压器绝缘老化状态评估体系

为评估变压器绝缘状态,该文建立变压器绝缘老化状态评估体系,如图1所示。

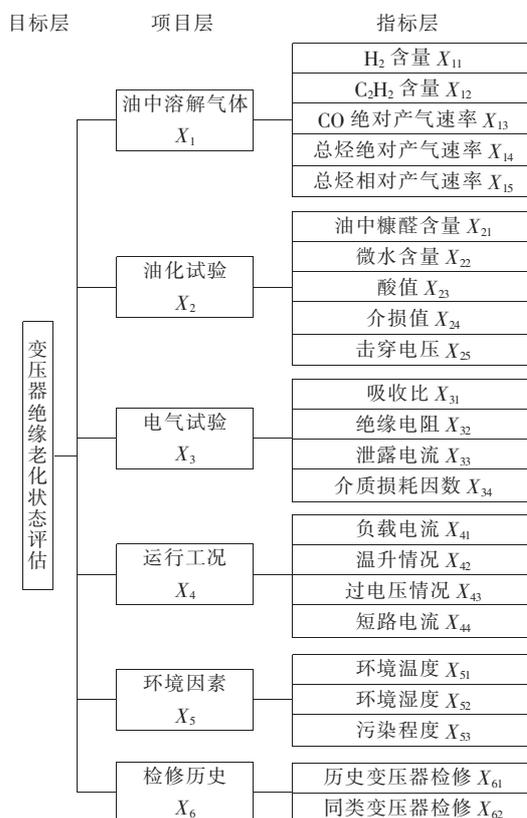


图1 变压器绝缘老化状态评估体系

Figure 1 Aging assessment system of transformer insulation

## 2 变压器绝缘老化灰色物元评估模型

### 2.1 评估体系的灰色物元

灰色物元是指用“事物、特征、灰量值”组成有序三元组来描述事物的基本元。假设以不同时期的变压器评估项目作为事物,评估指标作为特征,用  $\tilde{\otimes}R_{mn}$  表示  $m$  个评估项目的  $n$  维复合灰色物元,即

$$\tilde{\otimes}R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ c_1 & \tilde{\otimes}_{11} & \tilde{\otimes}_{21} & \cdots & \tilde{\otimes}_{m1} \\ c_2 & \tilde{\otimes}_{12} & \tilde{\otimes}_{22} & \cdots & \tilde{\otimes}_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_n & \tilde{\otimes}_{1n} & \tilde{\otimes}_{2n} & \cdots & \tilde{\otimes}_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $M_j (j=1,2,\dots,m)$  为第  $j$  个变压器绝缘状态评估项目,  $c_i (i=1,2,\dots,n)$  为第  $i$  个评估指标,  $\tilde{\otimes}_{ji}$  为各指标对应的灰量值。对于以  $a$  为基本值的灰数可记为  $\otimes(a) = a + \delta_a, \delta_a$  为扰动灰元,其灰量值  $\tilde{\otimes}_{ji} = a$ 。对于区间灰数  $\otimes \in [a, b]$ , 其灰量值取为  $\tilde{\otimes}_{ji} = \alpha \cdot a + (1-\alpha)b, \alpha \in [0, 1]$ 。

为了对不同的变压器评估项目进行比较,需要根据相对优化原则确定最佳复合灰色物元  $\tilde{\otimes}R_0$ 。相对优化原则中的理想值可选定为指标相应的灰量值中的最大值、或最小值、或适中值,可用预测的最佳值或《规程》中的注意值<sup>[11]</sup>。

### 2.2 评估指标的量化处理

1) 定量评估指标的无量纲化。

对评估项目中定量评估指标的量化使用区间值化处理,与相对优化原则类似。如表 1 所示,  $\tilde{\otimes}'_{ji}$  表示评估指标经量化后的灰量值。

2) 定性评估指标的无量纲化。

对评估项目中的定性评估指标的量化采用专家评分法,分值范围为  $[0, 1]$ , 如表 2 所示。

表 1 定量评估指标分类

Table 1 Classification of evaluation indexes

越大越优型	越小越优型	适中型
$\tilde{\otimes}'_{ji} = \frac{\tilde{\otimes}_{ji} - \min \tilde{\otimes}_{ji}}{\max \tilde{\otimes}_{ji} - \min \tilde{\otimes}_{ji}}$	$\tilde{\otimes}'_{ji} = \frac{\max \tilde{\otimes}_{ji} - \tilde{\otimes}_{ji}}{\max \tilde{\otimes}_{ji} - \min \tilde{\otimes}_{ji}}$	$\tilde{\otimes}'_{ji} = \frac{\min(\tilde{\otimes}_{ji}, u_{ji})}{\max(\tilde{\otimes}_{ji}, u_{ji})}$

表 2 定性评估指标评分值

Table 2 Score values of evaluation indexes

取值范围	变压器绝缘老化状态描述
0~0.2	绝缘老化状态良好,可以继续运行
0.2~0.5	绝缘老化状态需要注意,加强各项指标监测
0.5~0.8	绝缘老化状态异常,适时安排停电检修
0.8~1.0	绝缘老化状态严重,尽快安排停电检修

### 2.3 关联分析

针对各评估项目进行关联分析。首先,构造变压器评估项目的关联系数复合灰元  $\tilde{\otimes}R_\xi$ , 即

$$\tilde{\otimes}R_\xi = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_n \\ c_1 & \tilde{\otimes} \xi_{11} & \tilde{\otimes} \xi_{21} & \cdots & \tilde{\otimes} \xi_{m1} \\ c_2 & \tilde{\otimes} \xi_{12} & \tilde{\otimes} \xi_{22} & \cdots & \tilde{\otimes} \xi_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & \tilde{\otimes} \xi_{1n} & \tilde{\otimes} \xi_{2n} & \cdots & \tilde{\otimes} \xi_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $\tilde{\otimes} \xi_{ji}$  为评估指标经量化的关联系数灰量值。

计算  $\tilde{\otimes} \xi_{ji}$ , 其方法为

$$\Delta_{ji} = |\tilde{\otimes}'_{0j} - \tilde{\otimes}'_{ji}| \quad (3)$$

$$\tilde{\otimes} \xi_{ji} = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{ji} + \xi \Delta_{\max}} \quad (4)$$

式中  $\tilde{\otimes}'_{0j}$  为最佳评估灰量值,  $\xi$  为分辨系数。

1) 分辨系数的改进。

考虑到分辨系数  $\xi$  对关联度有一定影响<sup>[12]</sup>, 该文改进了其取值方法。计算  $\Delta_{ji}$  均值公式为

$$\Delta_v = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \Delta_{ji} \quad (5)$$

式中 令  $\epsilon = \Delta_v / \Delta_{\max}$ , 则  $\epsilon \leq \xi \leq 2\epsilon$ 。  $\xi$  需要满足: 当

$\Delta_{\max} > 3\Delta_v$  时,  $\epsilon \leq \xi \leq 1.5\epsilon$ ; 当  $2\Delta_v \leq \Delta_{\max} \leq 3\Delta_v$  时,  $1.5\epsilon \leq \xi \leq 2\epsilon$ 。为体现各评估项目关联度的间接影响, 该文的分辨系数取计算所得区间的平均值, 最终设定的各评估项目分辨系数如表 3 所示。

表 3 各评估项目分辨系数取值

Table 3 Distinguish coefficient of evaluation items

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	总评估
0.55	0.78	0.68	0.73	0.5	0.5	0.63

2) 关联度计算。

针对评估指标的关联系数进行加权平均处理, 得到变压器评估项目的关联度复合灰元, 即

$$\tilde{\otimes} R_k = R_w * \tilde{\otimes} R_\xi \quad (6)$$

式中  $R_w$  为变压器评估项目下各评估指标的权重灰元, “\*” 为两元对应项先乘后加。

3) 优劣评判。

该文将变压器绝缘状态等级分为“正常”、“注意”、“异常”和“严重”, 并且选择最大隶属度原则<sup>[13]</sup>作为评判标准, 即找出  $\tilde{\otimes} R_k$  中各指标关联度的最大值所对应的绝缘状态等级, 判定为最终的变压器绝缘状态等级。

### 3 组合赋权方法

为防止发生评估信息重复的现象, 变压器指标权重的选取需要既能体现不同评估指标之间的区别程度, 又能体现评估指标本身的独立程度。

#### 3.1 变异系数赋权

该文首先运用变异系数法计算评估指标的变异系数来衡量指标间的区别程度<sup>[14]</sup>。对变压器第  $p$  ( $p=1, 2, \dots, k$ ) 项指标的多个测试数据  $x_1, x_2, \dots, x_n$  进行计算:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n x_q \quad (7)$$

$$s_p = \left[ \frac{1}{n-1} \sum (x_q - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

则  $v_p = \frac{s_p}{|\bar{x}|}$  为  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的变异系数。

由上式计算出变压器评估指标  $X_p$  的变异系数  $v_p$ , 则可得到权重系数  $\omega_p^{(1)}$ , 即

$$\omega_p^{(1)} = \frac{v_p}{\sum_{p=1}^k v_p} \quad (9)$$

#### 3.2 复相关系数赋权

由于简单相关系数易受数据传递效应的影响, 该文通过计算复相关系数来衡量评估指标的独立程度, 具体步骤如下。

1) 计算出  $k$  个评估指标的相关系数矩阵  $\mathbf{R}$ , 利用相关系数矩阵  $\mathbf{R}$  计算得到第  $k$  个评估指标  $X_k$  的复相关系数。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{-k} & \mathbf{r}_k \\ \mathbf{r}_k^T & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (10)$$

式中  $\mathbf{R}_{-k}$  为  $\mathbf{R}$  除去  $X_k$  的相关阵,  $\mathbf{r}_k^T$  为  $\mathbf{r}_k$  的转置矩阵。此时,  $X_k$  对  $X_1, X_2, \dots, X_{k-1}$  的复相关系数为

$$\rho_k^2 = \mathbf{r}_k^T \mathbf{R}_{-k}^{-1} \mathbf{r}_k \quad (11)$$

2) 利用复相关系数求出各指标的权重, 计算出  $k$  个复相关系数并求倒数, 作归一化处理, 就能得到第  $p$  个指标  $X_p$  的权重  $\omega_p^{(2)}$ , 即

$$\omega_p^{(2)} = \frac{\rho_p^{-1}}{\sum_{p=1}^k \rho_p^{-1}} \quad (12)$$

#### 3.3 指标权重的最终确定

第  $p$  个指标  $X_p$  的权重系数最终确定为

$$\omega_p = \frac{\omega_p^{(1)} \omega_p^{(2)}}{\sum_p [\omega_p^{(1)} \omega_p^{(2)}]} \quad (13)$$

#### 3.4 不同权重方法的比较

表 4 中分别列出文献[5]中层次分析法定权与该文所使用的组合赋权法所计算得到的指标权重。层次分析法所计算得到的指标权重分配平均, 其中, 环境因素与检修历史的权重相同, 显然没有考虑到环境因素与前四项的相关性。而组合赋权法则能够按照评估指标在综合评估中所起的作用大小进行权重分配, 其准确性更好。

表 4 指标层中各指标的权重

Table 4 Index weights of index layers

评估项目	层次分析法		组合赋权法	
	权重	该项目下指标权重	权重	该项目下指标权重
$X_1$	0.18	{0.213,0.210,0.223,0.177,0.177}	0.188	{0.308,0.236,0.168,0.120,0.168}
$X_2$	0.19	{0.201,0.198,0.190,0.210,0.201}	0.191	{0.144,0.213,0.149,0.361,0.133}
$X_3$	0.20	{0.230,0.216,0.291,0.263}	0.220	{0.319,0.153,0.165,0.363}
$X_4$	0.15	{0.250,0.250,0.249,0.251}	0.131	{0.196,0.183,0.402,0.219}
$X_5$	0.14	{0.3,0.4,0.3}	0.144	{0.228,0.543,0.228}
$X_6$	0.14	{0.5,0.5}	0.126	{0.506,0.494}

### 4 实例分析

为验证该文方法的有效性,以吉林地区某变电站一台型号为 SFPZ9-120000/220 的主变压器为

例,对其运行在不同工况下的绝缘状态进行分析。

测试时分为  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  3 个时刻, $t_1$  时刻变压器油平均温升为 40 K, $t_2$  时刻运行工况正常, $t_3$  时刻受到一次短路冲击。该变压器经历过大修,无家族缺陷。其他试验数据如表 5 所示。

表 5 变压器部分试验数据

Table 5 Parts of experimental results of transformer

测试时刻	油中溶解气体( $X_1$ )					油化试验( $X_2$ )					电气试验( $X_3$ )			环境因素( $X_6$ )			
	H <sub>2</sub> 含量/ ( $\mu\text{L/L}$ )	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 含量/ ( $\mu\text{L/L}$ )	CO含量/ ( $\mu\text{L/L}$ )	总烃相对产气率/ (mL/d)	总烃绝对产气率/ (mL/d)	糠醛含量/ (mg/L)	微水含量/ (mg/L)	酸值/ (mg (KOH)/g)	油介损值 (90℃)/ %	击穿电压/ kV	吸收比	绝缘电阻/ M $\Omega$	泄露电流/ mA	介质损耗因 数/%	环境温度/ ℃	环境湿度/ %	污染程度
$t_1$	18.00	2.2	21.20	6.20	8.70	0.32	21	0.042	2.5	48.3	1.023	5 200	19	0.39	33	68	低
$t_2$	20.57	0.4	13.62	5.29	2.87	0.27	16	0.017	2.0	48.0	1.48	8 000	15	0.20	25	40	低
$t_3$	52.10	1.1	16.88	11.06	10.62	0.30	17	0.064	2.0	52.0	1.037	6 600	25	0.29	10	49	中

以油中溶解气体项目为例,有 4 个步骤。

2)利用越小越优的标准化处理准则对  $R_0$  进行无量纲化处理,并根据式(1)得出关联系数复合灰元

1)取灰化系数  $\alpha=0.5$ ,计算该评估项目中各指

标对应的灰量值  $\tilde{\otimes}R_{mn}$  和最佳评估灰元  $R_0$  :

$\tilde{\otimes}R_{\xi}$ ,其中  $\Delta_{\min}=0,\Delta_{\max}=33.2,\xi=0.55$ ,得到:

标对应的灰量值  $\tilde{\otimes}R_{mn}$  和最佳评估灰元  $R_0$  :

$$\tilde{\otimes}R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ X_{11} & 18 & 20.57 & 51.2 \\ X_{12} & 2.2 & 0.4 & 1.1 \\ X_{13} & 21.2 & 13.62 & 16.88 \\ X_{14} & 6.2 & 5.29 & 11.06 \\ X_{15} & 8.7 & 2.87 & 10.62 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\tilde{\otimes}R_{\xi} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ X_{11} & 1 & 0.877 & 0.355 \\ X_{12} & 0.91 & 1 & 0.963 \\ X_{13} & 0.707 & 1 & 0.849 \\ X_{14} & 0.953 & 1 & 0.76 \\ X_{15} & 0.758 & 1 & 0.702 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} M_0 \\ X_{11} & 18 \\ X_{12} & 0.4 \\ X_{13} & 13.62 \\ X_{14} & 5.29 \\ X_{15} & 2.87 \end{bmatrix}$$

3)应用变异系数和复相关系数组合赋权得到油中溶解气体项目  $R_{\omega}$  :

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} \\ [\omega & 0.308 & 0.236 & 0.168 & 0.12 & 0.168] \end{bmatrix} \quad (16)$$

4)根据式(6),计算得到各评估指标的关联度,如表6所示。变压器 $t_1$ 、 $t_2$ 时刻处于绝缘老化正常等级,变压器 $t_3$ 时刻处于注意等级。

依此类推,变压器 $t_1$ 时刻的评估项目的绝缘等级如表7所示。虽然油中溶解气体( $X_1$ )和检修历史( $X_6$ )项目的绝缘老化等级处于正常,但是其他都处于注意等级。从表8可知,该变压器 $t_1$ 时的整体绝缘等级为注意,变压器 $t_2$ 时处于正常等级, $t_3$ 时处于异常等级。经实际检修结果证明, $t_1$ 时刻变压器由于油箱顶部密封不严,绝缘受潮; $t_2$ 时刻变压器已解决受潮问题,变压器绝缘正常; $t_3$ 时刻变压器现场吊罩发现由于受到了短路冲击,绕组明显变形,引线被烧断,属于接近严重状态。这说明了解体检査与评估结果是一致的。

表6 油中溶解气体项目的关联度

Table 6 Correlation of DGA

时刻	变压器状态			
	正常	注意	异常	严重
$t_1$	-0.114 2	-0.301 9	-0.378 7	-0.469 9
$t_2$	0.229 9	-0.445 4	-0.603 1	-0.753 2
$t_3$	-0.334 8	0.345 0	-0.420 1	-1.071 1

表7 变压器 $t_1$ 时刻评估项目的绝缘等级

Table 7 Insulating grade of evaluation items at  $t_1$

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
正常	注意	注意	注意	注意	正常

为进一步证明方法的可行性,应用文献[5]、[7]、[8]中的方法评估 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 时刻的变压器的整体绝缘状态,并与该文评估方法进行对比。其中,模糊层次分析法结果以状态评分显示,其他3种方法以关联度值表示。由表8可知,物元可拓法和灰色物元法的评估结果最为准确,但是后者的关联程度与实际情况更加符合,体现了灰色物元法能够更加准确而细致地反映出变压器的绝缘老化状态。

表8 评估对比结果

Table 8 Evaluation results from different methods

评估方法	$t_1$	$t_2$	$t_3$
模糊层次分析法	注意(0.708 4)	注意(0.705 3)	异常(0.509 1)
灰色关联分析法	正常(0.722 3)	正常(0.512 4)	异常(0.498 2)
物元可拓法	注意(0.073 1)	正常(0.182 0)	异常(0.023 3)
灰色物元法	注意(0.155 1)	正常(0.229 9)	异常(0.345 0)

## 5 结语

1)采用灰色理论量化处理变压器评估指标,能实现对变压器绝缘状态的定性和定量评估。并结合物元可拓思想将评估指标细化分级,解决了多指标间的不相容问题。实例证明该文方法相较于其他评估方法具有优越性,能够更加准确地判断变压器所处绝缘等级。

2)将变异系数法和复相关系数法组合赋权,能够根据指标在综合评估中的重要程度赋权,避免评估指标信息的重复。

3)对灰色关联计算中的分辨系数传统取值方法进行改进,提高了关联度分辨力。

## 参考文献:

- [1] 雷春燕,刘从法,罗日成.基于多目标智能加权灰靶理论的电力变压器状态维修决策[J].电力科学与技术学报,2013,28(2):85-88.  
LEI Chunyan, LIU Congfa, LUO Richeng. Condition-based maintenance decision of transformer based on multi-attribute intelligent grey target [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(2): 85-88.
- [2] Saha T K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2003, 10(5): 903-917.
- [3] WANG Manghui. A novel extension method for transformer fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 164-169.
- [4] 王有元,陈璧君.基于层次分析结构的变压器健康状态与综合寿命评估模型[J].电网技术,2014,38(10):2845-2850.  
WANG Youyuan, CHEN Bijun. An integrated life estimation model of power transformer based on hierarchical architecture and health index [J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2845-2850.
- [5] 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.
- [6] Liao R, Zheng H, Grzybowski S, et al. An integrated decision-making model for condition assessment of power transformers using fuzzy approach and evidential reasoning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1111-1118.
- [7] 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.
- [8] 杜林, 袁蕾, 熊浩, 等. 电力变压器运行状态可拓层次评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 897-903.
- DU Lin, YUAN Lei, XIONG Hao, et al. Extension hierarchy assessment for operating condition of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 897-903.
- [9] Flores W C, Mombello E E, Jardini J A, et al. Expert system for the assessment of power transformer insulation condition based on type-2 fuzzy logic systems[J]. Expert Systems with Applications An International Journal, 2011, 38(7): 8119-8127.
- [10] 廖瑞金, 刘斌, 张懿议, 等. 基于部件划分和熵权的变压器绝缘状态评估策略[J]. 高电压技术, 2013, 39(8): 1830-1836.
- LIAO Ruijin, LIU Bin, ZHANG Yiyi, et al. Assessing strategy of power transformers insulation state based on part-division and entropy method[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8): 1830-1836.
- [11] Mitchell S D, Welsh J S. Initial parameter estimates and constraints to support gray box modeling of power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2411-2418.
- [12] 李玉洁, 方瑞明. 基于改进加权灰关联分析法的风电机组可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 63-69.
- LI Yujie, FANG Ruiming. Reliability assessment for wind turbine based on weighted degree of improved grey incidence[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 63-69.
- [13] Azis N, LIU Qiang, WANG Zhongdong. Ageing assessment of transformer paper insulation through post mortem analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2014, 21(2): 845-853.
- [14] 张文朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2741-2746.
- ZHANG Wenchao, GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2741-2746.