

# 基于组合赋权和改进 TOPSIS 的绝缘纸老化状态评估

耿江海<sup>1</sup>, 祝建昊<sup>1</sup>, 姚嘉欣<sup>1</sup>, 王平<sup>1</sup>, 汪鑫宇<sup>1</sup>, 高树国<sup>2</sup>, 俞华<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学 河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

3. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

**摘要:**为实现变压器绝缘纸老化状态的准确评估,提出一种基于组合赋权和改进 TOPSIS 的绝缘纸老化状态评估方法。首先,为克服单一特征量评估的不足,选取聚合度、抗张强度、断裂伸长率、击穿电压和介质损耗因数作为老化特征量,建立绝缘纸老化状态评价体系;其次,利用组合赋权模型计算特征量的组合权重值;最后,提出一种改进 TOPSIS 模型,构建欧氏-灰色关联距离测度,利用改进 TOPSIS 模型计算贴近度,并设置贴近度区间对绝缘纸的老化状态进行分级评估。结果表明:基于组合赋权和改进 TOPSIS 的绝缘纸老化状态评估方法既考虑了专家主观经验赋权,又利用特征量数据自身特征进行了权重修正,赋权更加科学合理;同时弥补了传统 TOPSIS 模型的距离判据缺陷,使计算得到的贴近度更加合理;通过电-热-力联合老化试验实例验证了该评估方法能准确、有效地判断绝缘纸的老化状态,且通过设置贴近度区间可以实现老化状态的分级评估。

**关键词:**绝缘纸;电-热-力-联合作用;组合赋权;改进 TOPSIS;状态评估

## Ageing state evaluation of insulating paper based on combined assignment and improved TOPSIS

GENG Jianghai<sup>1</sup>, ZHU Jianhao<sup>1</sup>, YAO Jiabin<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>, WANG Xinyu<sup>1</sup>, GAO Shuguo<sup>2</sup>, YU Hua<sup>3</sup>

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

3. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** In order to realize the accurate assessment of the ageing state of transformer insulating paper, an ageing state assessing method of insulating paper based on combined assignment and improved TOPSIS was proposed. Firstly, in order to overcome the shortcomings of single feature quantity evaluation, polymerization degree, tensile strength, elongation at break, breakdown voltage, and dielectric loss factor were selected as ageing feature quantities to establish an evaluation system for the ageing state of insulating paper. Secondly, the combined weight value of feature quantities was calculated using the combined assignment model. Finally, an improved TOPSIS model was proposed to construct the Euclidean-gray correlation distance measure. The closeness degree was calculated using the improved TOPSIS model, and the closeness degree interval was set to grade and evaluate the ageing states of insulating paper. The results show that the ageing state assessing method of insulating paper based on combined assignment and improved TOPSIS not only considers the subjective experience weight of experts, but also uses the inherent characteristics of feature quantity data for weight correction, making the weight more scientific and reasonable. At the same time, it compensates for the distance criterion deficiency of the traditional TOPSIS model, making the calculated closeness degree more reasonable. Through the electricity-heat-force combined ageing test, the evaluation method has been verified to determine the ageing states of insulating paper accurately and effectively, and the grading evaluation of ageing states can be achieved by setting a closeness degree interval.

**Key words:** insulating paper; electricity-heat-force combined action; combined assignment; improved TOPSIS; state evaluation

## 0 引言

核心设备,其绝缘系统的健康状况对于保证电力的优质供应和电力系统的可靠运行有重要意义<sup>[1-2]</sup>。变压器的主绝缘系统主要由绝缘油和绝缘纸复合而成,绝缘油老化可以通过更换或过滤绝缘油等措施解决,而绝缘纸的老化过程是不可逆的,即绝缘纸的老化状态将直接决定变压器的运行寿命<sup>[3-4]</sup>。在变压器服役期间,绝缘纸在长期电场和温度场的作用下会发生老化,同时变压器不可避免地会流过各种短路故障电流,此时在绕组两端会产生很大的轴向电动力,使包裹在绕组外面的绝缘纸与垫块间产生挤压,加速绝缘纸的老化进程,这意味着在变压器运行时,绝缘纸在电-热-力联合作用后很容易发生绝缘失效事故<sup>[5-7]</sup>。因此选择有效的评估方法,准确评估绝缘纸在电-热-力联合作用下的老化状态,有利于变压器的可靠稳定运行。

目前,有学者利用物理化学诊断方法,通过测量绝缘纸的聚合度和抗张强度等力学性能特征量来反映其老化状态;还有学者利用击穿电压、介质损耗因数测试,基于时域的回复电压法、基于频域的频域介电谱等电气绝缘诊断方法来获取绝缘纸的老化状态特征量<sup>[8-10]</sup>,进而开展绝缘纸老化状态的评估研究。其中部分研究只针对单一特征量指标评估绝缘纸的老化状态,所得结果不一定准确可靠。文献[11]通过测量绝缘纸的聚合度来对其老化状态进行评估,文献[12]利用频域介电谱实现了对绝缘纸老化状态的评估。还有研究通过加权或融合特征量指标,采用综合评估方法来判断绝缘纸的老化状态。文献[13]提出利用层次分析法确定各特征量指标权重,并利用 TOPSIS 计算贴近度实现了对油-纸绝缘老化状态的评估,但此方法确定权重时受主观因素影响较大,而且在计算贴近度时不一定能准确划分绝缘纸的老化状态。文献[14]也利用了层次分析法确定特征量指标权重值,并结合灰色关联法实现了油-纸绝缘老化状态的评估,该方法同样受主观因素影响较大。还有文献提出利用主成分分析法对各特征量指标进行融合分析,将特征量指标转化成主成分指标,并选取其中占比较大的几个主成分指标进行综合分析,实现了对绝缘纸老化状态的评估<sup>[3,15]</sup>,但仅依靠部分主成分指标进行评估可能会丧失一些数据特征。上述评估研究在对各特征量进行赋权和融合分析时都存在一定缺陷,而且在利用综合评估方法判断绝缘纸老化状态时

存在模糊不清的情况。

针对上述问题,本研究提出一种基于组合赋权和改进 TOPSIS 的绝缘纸老化状态评估方法。在原有的赋权方法基础上,利用组合赋权模型将层次分析法、熵权法和变异系数法等单一主观或客观赋权方法结合起来,综合两类赋权方法的优点,使得赋权既有专家主观经验指导,又可以利用特征量自身特征进行修正。同时建立改进 TOPSIS 模型,提出欧氏-灰色关联距离测度,克服传统 TOPSIS 模型中单一欧氏距离测度的缺陷,并通过设置贴近度区间实现对绝缘纸老化状态的分级评估。最后通过绝缘纸电-热-力联合老化试验实例验证该评估方法对绝缘纸老化状态评估的可行性。

## 1 电-热-力联合作用下绝缘纸老化特征量

### 1.1 基于绝缘纸力学性能的特征量

纤维素是变压器绝缘纸的主要成分。从微观分子结构看,纤维素分子链是由多个葡萄糖基通过 $\beta$ -1,4糖苷键连接成的高聚合碳氢化合物,其分子式通常表示为 $(C_6H_{10}O_5)_n$ ,其中 $n$ 为 $\beta$ -1-4糖苷键的数量即聚合度(degree of polymerization, DP)<sup>[16]</sup>。纤维素分子链中存在大量羟基,羟基之间相互吸引形成稳定的氢键网络,由于氢键和糖苷键的存在使得纤维素绝缘纸有着一定的机械强度。在电-热-力联合作用下,纤维素中的 $\beta$ -1,4糖苷键和氢键将被破坏发生断裂, $\beta$ -1,4糖苷键数量减少意味着聚合度下降,也意味着纤维素的机械强度下降,这说明可用聚合度 DP 间接表征纤维素的机械强度,DP 也是评估绝缘纸老化状态最常用的特征量。从宏观上看,还可以通过测量纤维素绝缘纸的抗张强度(tensile strength, TS)和断裂伸长率(elongation at break, EAB)直接表征纤维素的力学性能<sup>[17]</sup>。

基于绝缘纸纤维素断键速率符合一级动力学方程的假设,文献[18]得出绝缘纸 DP、TS 或 EAB 损失率( $\varepsilon_A$ )与老化时间之间的关系可用式(1)表示。由式(1)可知绝缘纸的 DP、TS 和 EAB 与老化时间呈负指数相关性,因此选取 DP、TS 和 EAB 作为表征绝缘纸力学性能劣化的特征量。

$$\varepsilon_A = \varepsilon_A^*(1 - e^{-k_A t}) \quad (1)$$

式(1)中: $A$ 为 DP、TS 或 EAB; $\varepsilon_A = 1 - A/A_0$ , $A_0$ 为 $A$ 的初值; $\varepsilon_A^*$ 为 $\varepsilon_A$ 峰值; $k_A$ 为降解速度; $t$ 为老化时间。

### 1.2 基于绝缘纸电气性能的特征量

绝缘纸是一种绝缘性能优良的电介质,可以承

受较高的电场强度。但电-热-力联合作用会使绝缘纸内部纤维素化学键断裂,导致其产生裂纹和局部缺陷。随着老化时间增加,裂纹和局部缺陷的存在使得绝缘纸在电场作用下更容易发生击穿放电,表现为绝缘纸承受电场能力下降,即随着老化时间增加,绝缘纸击穿电压下降。工程中常用击穿电压(电介质击穿的最低临界电压)来表征电介质耐受电场作用的能力<sup>[19]</sup>。由以上分析可知绝缘纸的击穿电压与老化时间呈负相关,因此选取击穿电压作为表征绝缘纸电气性能劣化的特征量。

电介质在电场作用下,在其内部的电导损耗和介电极化效应会引起能量损耗,一般用介质损耗因数( $\tan\delta$ )来表征电介质能量损耗的大小。绝缘纸在电-热-力联合作用时,纤维素中 $\beta$ -1,4糖苷键和氢键被破坏发生断裂,产生不稳定的氢原子和碳氢自由基,使得纤维素绝缘纸内部的极性基团和带电粒子增加,导致由电导损耗和介电极化效应引起的能量损耗增加,即随着老化时间的增加,绝缘纸的 $\tan\delta$ 增大<sup>[20]</sup>。由以上分析可知绝缘纸的 $\tan\delta$ 与老化时间呈正相关,因此将 $\tan\delta$ 作为表征绝缘纸电气性能劣化的特征量。

综上所述,本研究选取聚合度、抗张强度、断裂伸长率、击穿电压和介质损耗因数5个老化性能参数作为评估绝缘纸老化状态的特征量。

## 2 基于组合赋权和改进 TOPSIS 的绝缘纸老化状态评估模型

综合上节内容可知,绝缘纸的力学和电气性能特征量指标与老化时间存在量化关系,为此对上述特征量进行赋权综合评估,提出组合赋权和改进 TOPSIS 模型对绝缘纸的老化状态进行评估,构建了图1所示绝缘纸老化状态评价体系 and 式(2)所示原始评估矩阵 $X$ 。

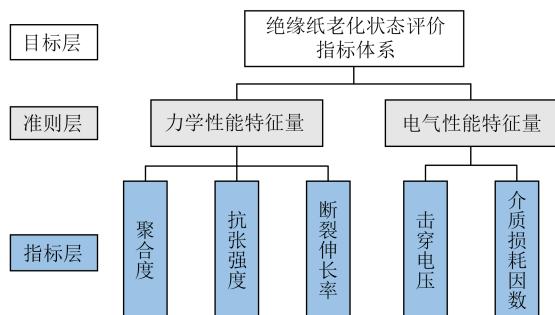


图1 绝缘纸老化状态评价体系

Fig.1 Ageing state evaluation system of insulating paper

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中: $x_{ij}$ 表示第 $i(i=1,2,\dots,m)$ 个老化时间下第 $j(j=1,2,\dots,n)$ 个老化特征量指标,本研究中 $m=9,n=5$ 。

### 2.1 组合赋权确定特征量权重

在多特征量综合评估方法中,特征量权重取值会影响评估结果。层次分析法是根据专家主观经验对特征量两两比较,确定特征量的重要程度,并据此确定特征量权重值的一种主观权重计算方法。熵权法和变异系数法都是根据各特征量自身包含的信息特征来确定特征量权重值的客观赋权方法。本文将层次分析法、熵权法和变异系数法结合起来对特征量进行组合赋权,既考虑了专家主观经验赋权,又利用特征量自身特征进行权重修正,使得特征量组合权重值的取值更科学合理,计算步骤如下:

(1)利用层次分析法计算各特征量指标的主观权重向量 $\alpha=[\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_n]$ ,熵权法计算客观权重向量 $\beta=[\beta_1,\beta_2,\dots,\beta_n]$ ,变异系数法计算客观权重向量 $\gamma=[\gamma_1,\gamma_2,\dots,\gamma_n]$ ,则组合权重如式(3)所示。

$$w_j = a\alpha_j + b\beta_j + c\gamma_j \quad (3)$$

式(3)中, $a$ 、 $b$ 和 $c$ 为权重系数, $a+b+c=1$ 且 $abc \geq 0$ 。

(2)计算权重系数。通过CRITIC权重法基于3种赋权方法所得权重向量的对比性和矛盾性来综合衡量各赋权方法所占权重,即权重系数。计算过程如下:将上述3种赋权方法计算得到的绝缘纸老化状态特征量权重向量组合成权重矩阵 $W=[\alpha, \beta, \gamma]= (w_{jl})_{n \times 3}$ , $w_{jl}$ 表示第 $j$ 个老化特征量指标的第 $l$ 种赋权方法所得权重值。

将第 $l$ 种赋权方法的信息承载量 $l_l$ 定义为式(4)。

$$l_l = \sigma_l f_l = \sigma_l \sum_{j=1}^n (1 - r_{jl}) \quad (4)$$

式(4)中: $\sigma_l$ 表示对比性,用标准差来表示,如式(5)所示; $f_l$ 表示矛盾性, $f_l = \sum_{j=1}^n (1 - r_{jl})$ ,其中 $r_{jl}$ 表示 Pearson 相关系数。

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left( w_{jl} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_{jl} \right)^2}{n-1}} \quad (5)$$

由信息承载量计算各赋权方法所占权重即权

重系数,如式(6)所示。

$$a = \frac{l_1}{\sum_{l=1}^3 l_l}, b = \frac{l_2}{\sum_{l=1}^3 l_l}, c = \frac{l_3}{\sum_{l=1}^3 l_l} \quad (6)$$

计算得到权重系数后,利用式(3)即可计算获得组合权重值。本研究提出的组合赋权方法解决了常用组合赋权法平均分配权重系数导致特征量赋权不合理的问题。

## 2.2 改进TOPSIS模型

传统TOPSIS模型由于只采用欧氏距离作为距离测度,在计算完贴近度后无法准确判断并区分各方案,而灰色关联分析可以利用特征量指标间的关联度来弥补单独采用欧氏距离测度的不足<sup>[21-22]</sup>。因此,本文提出一种新的距离测度——欧氏-灰色关联距离来改进TOPSIS模型。具体步骤如下:

### (1)构建标准化加权评估矩阵

根据式(7)对原始评估矩阵 $\mathbf{X}$ 进行标准化处理后,利用式(8)综合组合权重值计算得到标准化加权评估矩阵 $\mathbf{Z}$ 。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (7)$$

$$\mathbf{Z} = (z_{ij})_{m \times n} = (y_{ij} w_j)_{m \times n} \quad (8)$$

式(8)中: $y_{ij}$ 表示原始评估矩阵 $\mathbf{X}$ 中标准化处理后的各元素值; $w_j$ 表示各特征量的组合权重值; $z_{ij}$ 表示标准化加权评估矩阵 $\mathbf{Z}$ 中的各元素值。

### (2)欧氏-灰色关联距离的构建

首先确定正、负理想值 $z_j^+$ 和 $z_j^-$ (一般取 $\mathbf{Z}$ 中特征量指标的最大值和最小值的集合),之后利用式(9)计算绝缘纸老化状态特征量指标与正、负理想值间的欧氏距离 $E_i^+$ 、 $E_i^-$ 。

$$\begin{cases} E_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \\ E_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \end{cases} \quad (9)$$

之后根据式(10)计算出正、负关联系数,再根据式(11)计算出绝缘纸老化状态特征量指标与正、负理想值间的灰色关联度 $G_i^+$ 、 $G_i^-$ 。

$$\begin{cases} \zeta_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |z_{ij} - z_j^+| + \eta \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^+|}{|z_{ij} - z_j^+| + \eta \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^+|} \\ \zeta_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |z_{ij} - z_j^-| + \eta \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^-|}{|z_{ij} - z_j^-| + \eta \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^-|} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $\zeta_{ij}^+$ 和 $\zeta_{ij}^-$ 分别为正、负关联系数; $\eta$ 是分辨系数, $\eta \in [0,1]$ ,通常 $\eta$ 取值为0.5。

$$\begin{cases} G_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \zeta_{ij}^+ \\ G_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \zeta_{ij}^- \end{cases} \quad (11)$$

最后将灰色关联度和欧氏距离结合起来,计算出正、负欧氏-灰色关联距离 $D_i^+$ 、 $D_i^-$ ,如式(12)所示。

$$\begin{cases} D_i^+ = \lambda E_i^+ + (1 - \lambda) G_i^+ \\ D_i^- = \lambda E_i^- + (1 - \lambda) G_i^- \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, $\lambda$ 为对传统欧氏距离测度的偏好程度,本研究提出的欧氏-灰色关联距离测度对两种距离测度的偏好程度一致,因此 $\lambda=0.5$ 。

### (3)计算贴近度

利用欧氏-灰色关联距离计算相对贴近度( $T_i$ ),如式(13)所示。将未老化绝缘纸的特征量数据作为正理想值,贴近度 $T_i$ 值越大,说明该老化时间下绝缘纸的老化状态越贴近正理想值,则该老化时间下的绝缘纸绝缘状态越优。

$$T_i = \frac{D_i^+}{D_i^+ + D_i^-} \quad (13)$$

## 2.3 绝缘纸老化状态综合评估

为实现绝缘纸老化状态的综合评估,构建组合赋权和改进TOPSIS模型,具体流程如图2所示:

(1)选取聚合度、抗张强度、断裂伸长率、击穿电压和介质损耗因数等力学和电气性能参数作为评估绝缘纸老化状态的特征量,建立相应评价体系并获取量化数据。

(2)利用组合赋权将层次分析主观赋权和熵权、变异系数客观赋权结合起来计算权重。

(3)构建欧氏-灰色关联距离改进TOPSIS,准确反映各评估对象与正、负理想值间的位置关系,使得贴近度计算更加准确,最后通过设置贴近度区间实现绝缘纸老化状态的分级评估。

## 3 实例分析

### 3.1 电-热-力联合作用下绝缘纸老化试验

#### 3.1.1 老化试验条件有限元仿真计算

为准确模拟绝缘纸在电-热-力联合作用下的老化过程,老化试验将有限元仿真计算得到的结果作为试验条件参数施加的依据。本研究基于SF-SZ7-31500/110型变压器利用COMSOL有限元仿真计算软件进行变压器电场、温度场和短路应力的仿

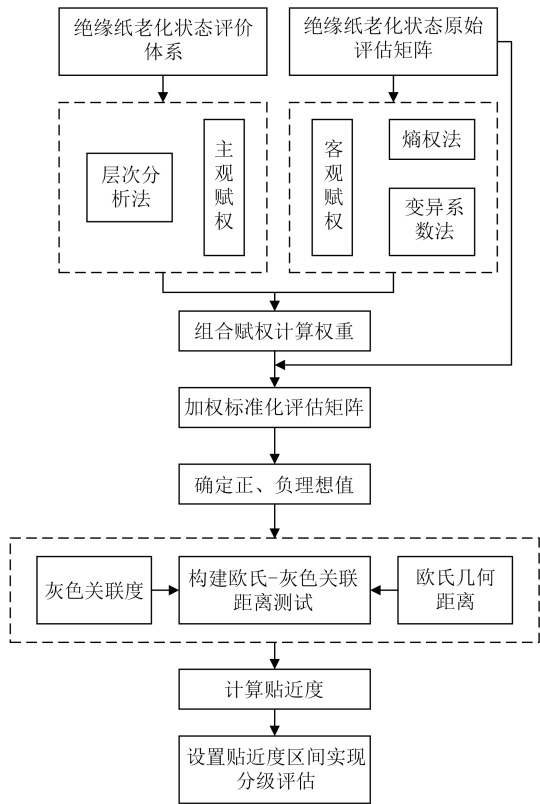


图2 绝缘纸老化状态评估流程

Fig.2 Evaluation process of insulating paper ageing state

真计算。

在进行电场仿真计算时，考虑到变压器的主绝缘结构有较好的对称性，可近似认为是同心圆柱体，因此取其二维轴对称模型即可满足计算要求，构建的电场仿真几何模型及网格划分如图3所示，计算得到的电场分布如图4所示。由图4可知，变压器内部电场分布不均匀，电场强度最大值出现在绕组端部，而中部的电场强度分布均匀，大致分布在  $2 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$  V/m，考虑到大部分绝缘纸都受绕组中部电场强度的影响，因此将计算得到绕组中部

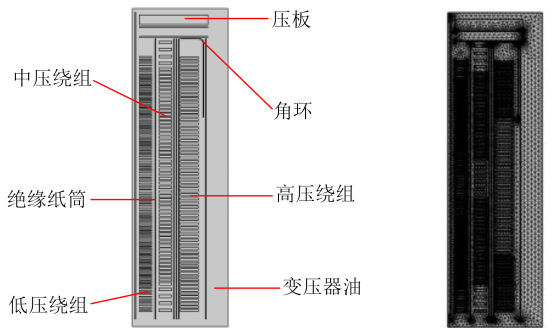


图3 电场仿真几何模型及网格划分

Fig.3 Electric field simulation geometry model and mesh division

的电场强度平均值  $2.26 \times 10^6$  V/m 作为试验施加电场的依据。

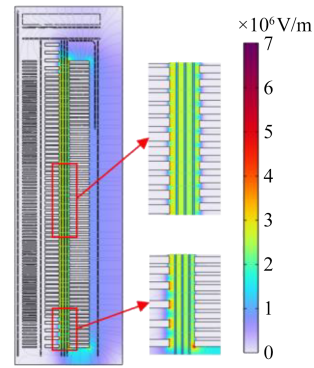


图4 电场分布图

Fig.4 Electric field distribution diagram

在进行温度场仿真时，主要考虑各绕组和变压器油，忽略夹件、油箱等结构件，建立油浸式变压器二维仿真模型进行计算，构建的温度场仿真几何模型及网格划分如图5所示。温度设置为最极端的外界环境温度  $40^\circ\text{C}$ ，计算得到变压器温度分布如图6所示。通过计算得到绕组的热稳定平均温度为  $113.7^\circ\text{C}$ ，因此老化试验施加的温度条件为  $113.7^\circ\text{C}$ 。

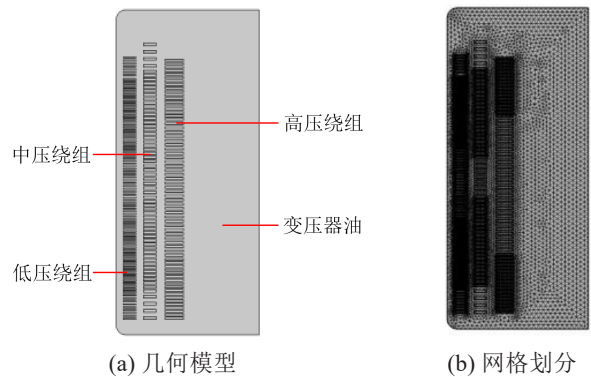


图5 温度场仿真几何模型及网格划分

Fig.5 Temperature field simulation geometry model and mesh division

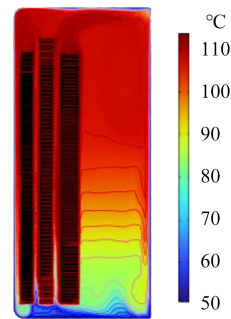
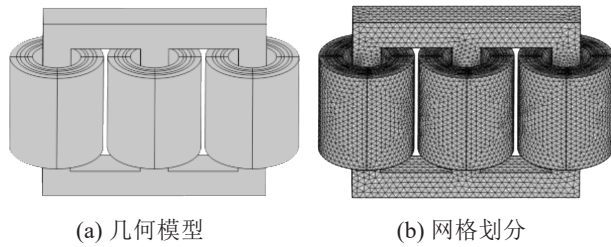


图6 温度分布图

Fig.6 Temperature distribution diagram

由于二维仿真模型难以准确计算出短路时绕组所受短路应力,本研究建立了三维磁场-电路-力场(磁-路-力)多物理场耦合有限元仿真模型进行计算,构建的短路应力仿真几何模型及网格划分如图7所示,计算得到短路应力分布如图8所示。从图8可以看出,绕组所受最大短路应力为8.71 MPa,因此老化试验将绝缘纸可能受到的最大短路应力8.71 MPa作为施加机械力的依据。



(a) 几何模型 (b) 网格划分

图7 短路应力仿真几何模型及网格划分

Fig.7 Short-circuit stress simulation geometry model and mesh division

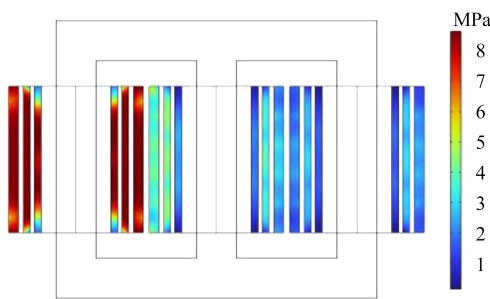


图8 短路应力分布图

Fig.8 Short-circuit stress distribution diagram

### 3.1.2 电-热-力联合老化试验步骤

试验材料为普通牛皮绝缘纸和昆仑25#矿物油。试验过程如下:先将绝缘纸(厚度为0.3 mm)裁剪成电极形状(直径为8 cm的圆),再将绝缘纸真空干燥24 h后,叠放5层夹在电极之间放入试验油罐中,并往油罐中注入昆仑25#矿物油,然后将油罐放入高低温交变湿热试验箱中,最后将高压进线与油罐中电极上的铜杆相连,试验箱内局部图如图9所示。试验电极间距为5层绝缘纸的厚度(0.3 mm×5=1.5 mm=1.5×10<sup>-3</sup> m),为使电极间场强达到2.26×10<sup>6</sup> V/m,根据公式 $U = E \cdot d$ ( $U$ 为极间电压, $E$ 为电场强度, $d$ 为极间距离)计算得到电极间电压应为2.26×10<sup>6</sup> V/m×1.5×10<sup>-3</sup> m=3.39 kV。因此,通过高压进线连接工频高压试验加压装置在电极两侧施加3.39 kV工频电压来模拟绝缘纸受到的电场强度2.26×10<sup>6</sup> V/m。设定高低温交变湿热试验箱温度为113.7℃,试验取样时间为48、96、144、192、240、360、480、720 h。老化

完成后,利用图10所示机械冲击装置对绝缘纸施加8.71 MPa应力,以此来模拟绝缘纸受到的机械力。



图9 试验箱内局部图

Fig.9 Local diagram in test box

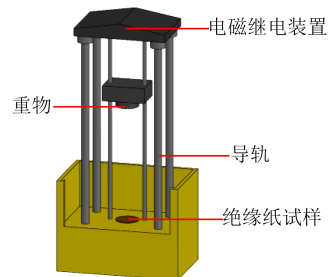


图10 机械冲击装置示意图

Fig.10 Schematic diagram of mechanical impact device

### 3.1.3 绝缘纸老化特征量检测数据

绝缘纸的聚合度依据GB/T 1548—2016测量得到黏度后,再根据黏度计算得到。抗张强度和断裂伸长率依据GB/T 12914—2018进行测试:首先将绝缘纸裁剪成50 mm×15 mm的试样,之后利用力学万能试验机进行测试,拉伸速度为5 mm/min。击穿电压依据GB/T 1408.1—2016进行测试:选用20 s逐级升压法对单层绝缘纸进行击穿试验,记录绝缘纸击穿时的电压数值,即击穿电压。介质损耗因数依据GB/T 1409—2006,采用全自动抗干扰精密介质损耗测试仪进行测试。测得绝缘纸的老化特征量数据如表1所示。

表1 绝缘纸老化特征量数据  
Table 1 Ageing characteristic quantity data of insulating paper

老化时间/h	聚合度	抗张强度/(kN/m)	断裂伸长率/%	击穿电压/kV	tanδ
0	1 194	10.90	7.06	4.70	0.29
48	832	9.52	6.12	4.63	0.31
96	713	8.46	5.27	4.55	0.32
144	631	8.02	4.63	4.45	0.35
192	561	7.53	3.77	4.30	0.36
240	512	6.98	3.21	4.15	0.40
360	429	6.53	2.62	4.00	0.45
480	352	5.97	2.03	3.80	0.55
720	253	5.30	1.61	3.60	0.76

### 3.2 基于组合赋权和改进 TOPSIS 的绝缘纸老化状态评估

依据表 1 中测量到的绝缘纸老化特征量数据, 选取 9 个不同老化时间下的老化性能参数作为评价指标特征量, 构造原始评估矩阵  $X$ , 如式(14)所示。

$$X = \begin{bmatrix} 1194 & 10.90 & 7.06 & 4.70 & 0.29 \\ 832 & 9.52 & 6.12 & 4.63 & 0.31 \\ 713 & 8.46 & 5.27 & 4.55 & 0.32 \\ 631 & 8.02 & 4.63 & 4.45 & 0.35 \\ 561 & 7.53 & 3.77 & 4.30 & 0.36 \\ 512 & 6.98 & 3.21 & 4.15 & 0.40 \\ 429 & 6.53 & 2.62 & 4.00 & 0.45 \\ 352 & 5.97 & 2.03 & 3.50 & 0.55 \\ 253 & 5.30 & 1.61 & 3.60 & 0.76 \end{bmatrix} \quad (14)$$

#### 3.2.1 组合赋权法确定权重

将层次分析法计算所得权重  $\alpha_j$ , 熵权法所得权重  $\beta_j$  以及变异系数法所得权重  $\gamma_j$  列于表 2 中。根据式(4)~(6)计算得到组合权重系数  $a=0.435$ ,  $b=0.219$ ,  $c=0.346$  后, 利用式(3)求得组合权重  $\omega_j$ , 见表 2。

表 2 特征量权重值  
Table 2 Characteristic quantity weight values

特征量指标	$\alpha_j$	$\beta_j$	$\gamma_j$	$\omega_j$
聚合度	0.404	0.242	0.289	0.329
抗张强度	0.223	0.222	0.143	0.195
断裂伸长率	0.123	0.251	0.290	0.209
击穿电压	0.083	0.171	0.056	0.093
$\tan\delta$	0.167	0.114	0.222	0.174

由表 2 可知, 不同赋权方法所得权重在某些特征量间存在一些差异, 这是由于主观赋权层次分析法在进行赋权计算时受人们主观经验影响, 而熵权法和变异系数法这类客观赋权方法则根据特征量自身拥有的数据特征进行赋权计算。

#### 3.2.2 改进 TOPSIS 模型计算贴近度

##### (1) 矩阵加权标准化处理

通过式(7)对原始评估矩阵进行标准化处理, 并通过式(8)综合组合权重值计算得到标准化加权评估矩阵  $Z$ , 如式(15)所示。

$$Z = \begin{bmatrix} 0.197 & 0.090 & 0.112 & 0.034 & 0.075 \\ 0.137 & 0.079 & 0.097 & 0.034 & 0.070 \\ 0.118 & 0.070 & 0.084 & 0.033 & 0.068 \\ 0.104 & 0.066 & 0.073 & 0.032 & 0.062 \\ 0.092 & 0.062 & 0.060 & 0.031 & 0.060 \\ 0.084 & 0.058 & 0.051 & 0.03 & 0.054 \\ 0.071 & 0.054 & 0.041 & 0.029 & 0.048 \\ 0.058 & 0.050 & 0.032 & 0.028 & 0.039 \\ 0.042 & 0.044 & 0.025 & 0.026 & 0.029 \end{bmatrix} \quad (15)$$

##### (2) 欧氏-灰色关联距离及贴近度的计算

绝缘纸没有经过电-热-力的联合老化作用时, 其绝缘性能优良, 对应特征量数据可认为是绝缘纸老化状态评估的正理想值。绝缘纸经过电-热-力联合作用 720 h 后, 其聚合度下降为 253, 已经接近绝缘寿命终止值 250<sup>[23]</sup>; 抗张强度下降为 5.30 kN/m, 下降至绝缘纸未老化时抗张强度 10.90 kN/m 的 48.6%, 比绝缘寿命终止参考值 50% 低<sup>[3]</sup>, 绝缘性能已被严重破坏, 此时对应的特征量数据可认为是绝缘纸老化状态评估的负理想值。通过式(9)~(13), 计算得到欧式-灰色关联距离和贴近度如表 3 所示。

表 3 改进 TOPSIS 计算结果

老化时间/h	$D^+$	$D^-$	$T$
0	0.297	1.000	0.771
48	0.453	0.813	0.642
96	0.531	0.732	0.579
144	0.593	0.667	0.527
192	0.655	0.613	0.484
240	0.713	0.557	0.438
360	0.786	0.497	0.387
480	0.875	0.418	0.323
720	1.000	0.297	0.229

由表 3 可知, 不同老化时间下的贴近度  $T$  随着老化时间的增加逐渐减小, 说明绝缘纸的绝缘性能逐渐降低, 表明改进 TOPSIS 模型在综合考虑了聚合度、抗张强度、断裂伸长率、击穿电压和介质损耗因数等绝缘纸老化特征量指标的影响后, 获得的不同老化时间下的贴近度  $T$  可用于评估绝缘纸的老化状态。

#### 3.2.3 老化状态与贴近度区间设置原则

基于前文计算的绝缘纸贴近度, 可以初步判断绝缘纸绝缘性能的优劣, 然而如何有效划分绝缘纸的老化状态, 还需要设置贴近度区间来区分。文献[13]基于主观经验确定贴近度区间, 文献[24]则基于复杂公式确定贴近度区间, 缺乏实际物理意义。为此, 本研究拟从绝缘纸聚合度的劣化规律出发, 探索贴近度区间的设置原则。

对表 3 中数据进行分析, 发现基于改进 TOPSIS 模型计算出的贴近度  $T$  变化率是非线性的。这与绝缘纸 DP 损失率与老化时间关系类似, 因此尝试对电-热-力联合老化试验测得的 DP( $D_p$ ) 与计算得到

的贴近度( $T$ )开展定量拟合,发现二者间存在拟合优度为0.98的指数关系,如式(16)所示, $D_p$ 和贴近度 $T$ 的拟合曲线如图11所示。

$$D_p = -89.1 + 205e^{2.377T} \quad (16)$$

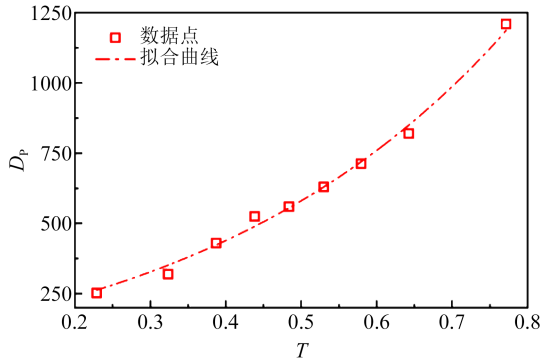


图11  $D_p$ 和贴近度 $T$ 拟合曲线

Fig.11 Fitting curves of  $D_p$  and closeness degree  $T$

绝缘纸聚合度损失率  $\varepsilon_{DP}$  满足式(1),若记  $a = 1/k_{DP}$ ,  $b = 3/k_{DP}$ 。当式(1)中  $t=a$ 时,计算得到聚合度损失率升至其峰值的63.2%,认为  $t \in [0, a]$ 时绝缘纸的绝缘状态良好,为绝缘纸老化初期;当  $t=b$ 时,计算得到聚合度损失率上升到其峰值的95%,并且随着时间的推移几乎没有变化,认为  $t \in (a, b)$ 时绝缘状态适中,为绝缘纸老化中期,而  $t \in [b, +\infty)$ 时则认为绝缘老化严重。由此,根据聚合度损失率公式求得  $t=a$ 和  $t=b$ 时的聚合度  $D_{p_a}$ 和  $D_{p_b}$ ,再结合式(16)获得对应的贴近度  $T_a=0.538$ 和  $T_b=0.335$ ,并记正、负理想值对应的贴近度分别为  $T^+=0.771$ 、 $T^-=0.229$ 。在此基础上,建立了如表4所示的绝缘纸贴近度区间与其老化状态之间的对应关系。

表4 绝缘纸贴近度区间与其老化状态之间的对应关系

Table 4 Correspondence between closeness degree interval of insulating paper and its ageing state

贴近度区间	老化状态
$0.229 \leq T \leq 0.335$	老化严重
$0.335 < T < 0.538$	绝缘适中
$0.538 \leq T \leq 0.771$	绝缘良好

### 3.2.4 绝缘纸老化状态评估

根据表4建立的贴近度区间,将绝缘纸的老化状态分为绝缘状态良好、适中和老化严重,得到绝缘纸老化状态评估结果如表5所示。

从表5可以看出,本研究评估方法结合层次分析法、熵权法和变异系数法对电-热-力联合老化试验得到的绝缘纸老化特征量指标进行组合赋权,之

表5 绝缘纸老化状态评估结果

Table 5 Evaluation results of ageing state of insulating paper

老化时间/h	$T$	老化状态
0	0.771	良好
48	0.642	良好
96	0.579	良好
144	0.527	适中
192	0.484	适中
240	0.438	适中
360	0.387	适中
480	0.323	老化严重
720	0.229	老化严重

后结合改进TOPSIS模型计算贴近度,并通过设置贴近度区间将不同老化时间的绝缘纸划分为3种老化状态,实现了对绝缘纸老化状态的分级评估。

需要说明的是,本研究是根据老化试验数据进行绝缘纸的老化状态评估,充分模拟了变压器实际运行时可能受到的工况,即利用本文提出的老化状态评估方法,对现场采集的聚合度、抗张强度、断裂伸长率、击穿电压和介质损耗因数等能够反映绝缘纸老化状态的特征量数据进行计算处理,可以得到贴近度,进而实现对绝缘纸老化状态的分级评估,可为现场实际运行的变压器绝缘状态进行运维指导。

## 4 结论

本文提出一种基于组合赋权和改进TOPSIS的绝缘纸老化状态评估方法,并通过绝缘纸电-热-力联合老化试验实例对绝缘纸的老化状态进行了准确评估,主要得到以下结论:

(1)利用组合赋权对层次分析法获得的主客观权重和熵权法、变异系数法获得的客观权重值进行主、客观融合赋权,综合两类赋权方法的特点,使得赋权既有主观经验作为指导,又可利用实际数据特征进行修正。

(2)通过引入灰色关联度改进TOPSIS模型中的欧氏距离,构建欧氏-灰色关联距离测度,克服了TOPSIS模型中单一欧氏距离无法准确反映相对位置关系的缺陷,使计算得到的贴近度更加准确、可靠。

(3)通过绝缘纸电-热-力联合老化试验实例,验证了该评估方法可以充分利用各特征量中蕴含的信息,准确评估绝缘纸的老化状态,同时通过设

置贴近度区间实现对绝缘纸老化状态的分级评估, 可为变压器绝缘系统的运行维护提供参考。

## 参考文献 References

- [1] 刘云鹏, 许自强, 付浩川, 等. 采用最优云熵改进可拓云理论的变压器本体绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 397-405.  
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, FU Haochuan, et al. Insulation condition assessment method of power transformer based on improved extension cloud theory with optimal cloud entropy[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 397-405.
- [2] 崔家齐, 董海鹰, 李帅兵, 等. 基于图像特征识别的绝缘纸老化状态评估[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 636-643.  
CUI Jiaqi, DONG Haiying, LI Shuaibing, et al. Aging state evaluation of insulating paper based on image feature recognition[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 636-643.
- [3] 姜雅男, 于永进, 李长云. 基于改进 TOPSIS 模型的绝缘纸机-热老化状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1572-1582.  
JIANG Ya'nian, YU Yongjin, LI Changyun. Evaluation method of insulation paper deterioration status with mechanical-thermal synergy based on improved TOPSIS model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1572-1582.
- [4] 李长云, 王一帆, 于永进, 等. 基于 FDS 的换流变绝缘纸寿命评估方法研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3576-3582.  
LI Changyun, WANG Yifan, YU Yongjin, et al. Study on estimation method for lifetime of converter transformer insulation paper based on FDS[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3576-3582.
- [5] 周利军, 周祥宇, 吴振宇, 等. 变压器绕组振荡波建模及轴向移位故障分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 157-163, 188.  
ZHOU Lijun, ZHOU Xiangyu, WU Zhenyu, et al. Oscillation wave modeling and axial shift fault analysis of transformer winding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 157-163, 188.
- [6] 李毅恒. 机械冲击累积效应对热老化绝缘纸击穿特性的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.  
LI Yiheng. Influence of cumulative effect of mechanical impact on breakdown characteristics of thermally aging insulating paper [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [7] CHI M H, XIA R C, GUAN Y, et al. Insulation degradation and fracture cracks of mechanical impacted thermal-ageing oil-impregnated papers[J]. High Voltage, 2023, 8(1): 21-30.
- [8] 黄明亮. 电热复合应力下的油纸绝缘老化特性研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.  
HUANG Mingliang. Study on aging characteristics of oil-paper insulation under combined electrical and thermal stresses[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [9] 张牧桑. 基于多参量数据融合的变压器绝缘老化状态评估[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.  
ZHANG Musang. Evaluation of transformer insulation aging status based on multi-parameter fusion[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022.
- [10] 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.
- [11] 韦雅. 纤维素绝缘纸加速热老化聚合度下降规律研究[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(6): 52-55, 91.  
WEI Ya. Study on decreasing law of degree of polymerization of cellulose insulating paper with accelerated thermal aging[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(6): 52-55, 91.
- [12] ZHOU L J, WEN R T, ZHANG J, et al. Parameter extraction for thermal aging of oil-paper insulation in onboard transformer based on the transfer function and dielectric response test[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1214-1222.
- [13] 张宁, 蔡金锭. 基于层次分析和逼近理想解法的绝缘状态评估[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 35-42.  
ZHANG Ning, CAI Jinding. Evaluation of insulation state based on the combination of analytical hierarchy process and TOPSIS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 35-42.
- [14] 宋人杰, 刘瑞英, 刘耀伟, 等. 基于层次灰关联分析的变压器状态评估关键指标体系构建及应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2509-2515.  
SONG Renjie, LIU Ruiying, LIU Yaowei, et al. Key indicator system establishment and application for transformer condition assessment based on hierarchy grey relation analysis[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2509-2515.
- [15] 肖伊, 李庆民. 基于多特征参量的油纸绝缘老化状态定量表征方法[J]. 绝缘材料, 2019, 52(8): 54-59.  
XIAO Yi, LI Qingmin. Quantitative characterization method of oil-paper insulation ageing condition based on multi-characteristic parameters[J]. Insulating Materials, 2019, 52(8): 54-59.
- [16] CHEN Q Y, YANG L J, YU H, et al. Quantitative measurements of DP in cellulose paper based on terahertz spectroscopy[J]. Polymers, 2023, 15(1): 247.
- [17] 赵莉华, 陈志杰, 安建国, 等. 芳纶纳米纤维绝缘纸在新型油纸绝缘中的热老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(3): 19-25.  
ZHAO Lihua, CHEN Zhijie, AN Jianguo, et al. Thermal ageing characteristics of aramid nano fiber insulating paper in new oil-paper insulation[J]. Insulating Materials, 2023, 56(3): 19-25.
- [18] DING H Z, WANG Z D. On the degradation evolution equations of cellulose[J]. Cellulose, 2008, 15(1): 205-224.
- [19] 姜良民, 殷守斌, 徐珂, 等. 变压器油纸绝缘电热联合老化机理研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 86-94.  
JIANG L M, YIN S B, XU K, et al. A study on the electrical-thermal aging mechanism of oil-paper insulation in transformers [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 86-94.
- [20] 齐金平, 李鸿伟, 何鹏, 等. 牵引变压器油纸绝缘老化机理与寿命预测方法综述[J]. 绝缘材料, 2023, 56(9): 14-22.  
QI Jinping, LI Hongwei, HE Peng, et al. Review on ageing mechanism and life prediction method of oil-paper insulation for

- traction transformer[J]. *Insulating Materials*,2023,56(9):14-22.
- [21] 姚忠胜,钱虹,吴文军,等. 基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究[J]. *电力系统保护与控制*,2021,49(11):28-34.
- YAO Zhongsheng, QIAN Hong, WU Wenjun, et al. Research on power supply reliability based on multi-factor comprehensive evaluation and improved gray relation[J]. *Power System Protection and Control*,2021,49(11):28-34.
- [22] 姚欢民,穆海宝,张大宁,等. 基于灰色关联与时-频域介电响应的油纸绝缘受潮状态快速评估方法[J]. *绝缘材料*,2023,56(3):54-60.
- YAO Huanmin, MU Haibao, ZHANG Daning, et al. Rapid evaluation method of oil-paper insulation damp condition based on grey correlation and time-frequency domain dielectric response [J]. *Insulating Materials*,2023,56(3):54-60.
- [23] 李长云,王铮. 机-热协同作用下绝缘纸机械性能的劣化机理[J]. *电工技术学报*,2018,33(21):5090-5097.
- LI Changyun, WANG Zheng. The degradation mechanism of insulation paper mechanical properties with mechanical-thermal synergy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2018,33(21):5090-5097.
- [24] 董坚,陈春芳,温磊,等. 具有四参数区间偏好序的TOPSIS群决策方法[J]. *统计与决策*,2016(19):42-44.
- DONG Jian, CHEN Chunfang, WEN Lei, et al. TOPSIS group decision making method with four parameters interval preference ordinal[J]. *Statistics & Decision*,2016(19):42-44.

---

收稿日期:2024-04-25;修回日期:2024-06-05。

作者简介:

耿江海(1980-),男(汉族),河北邯郸人,高级工程师,博士,主要从事高电压试验技术和外绝缘方面的教学与研究工作;

通信作者:祝建昊(2001-),男(汉族),山东德州人,硕士生,主要从事变压器绝缘老化及老化状态评估的研究工作。