

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220008

基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器 状态评估方法

石宜金¹, 谭贵生¹, 赵波², 张桂莲¹

(1. 丽江文化旅游学院, 云南 丽江 674100; 2. 东北电力大学自动化工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对电力变压器状态评估中存在多特征指标和多故障类型问题, 提出一种基于模糊综合评估模型和皮尔逊相关系数的改进D-S证据理论的变压器状态评估方法。建立了变压器状态评估体系, 引入层次分析方法和改进的三角梯形隶属函数确定特征指标的基本概率。基于皮尔逊相关系数的改进D-S证据理论融合不同特征指标以评判变压器综合状态评估。经过实例分析, 该方法的评价结果与变压器实际运行状态一致, 其准确率达到95.83%, 验证了该方法的合理性和可行性。该方法对变压器状态评估具有一定的参考价值。

关键词: 电力变压器; 模糊评估模型; 改进D-S证据理论; 皮尔逊相关系数; 层次分析法; 关联规则

Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion

SHI Yijin¹, TAN Guisheng¹, ZHAO Bo², ZHANG Guilian¹

(1. Lijiang Culture and Tourism College, Lijiang 674100, China; 2. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: There is a problem of multiple characteristic indices and multiple fault types in power transformer condition evaluation. Thus a state evaluation method of a converter transformer is proposed based on a fuzzy comprehensive assessment model and improved D-S evidence theory fusion of the Pearson correlation coefficient. The transformer condition assessment system is built, and the basic probability of the state index is obtained using hierarchical analysis and an improved triangular trapezoidal membership function. The Pearson correlation coefficient is used to improve the D-S evidence theory in adopting different characteristic indices, and then the assessing result of the transformer is obtained from comprehensive evaluation. In the case analysis, the diagnostic accuracy of this method can reach 95.83% by comparing the condition assessment result and the actual operation condition of every transformer. This can validate the feasibility and rationality of the method. This method has a certain reference value for transformer state evaluation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61901101).

Key words: power transformer; fuzzy evaluation model; improved D-S evidence theory; Pearson correlation coefficient; analytic hierarchy process; association rules

0 引言

变压器是电力系统不可缺少的一部分, 保证变压器安全稳定运行需要有效的状态监测手段; 准确的状态评估可以使变压器的维护费用减少20%~50%^[1]。因此, 可靠的评估方法能够提高变压器状态检修和维护水平, 减少故障发生的概率, 这是电

网企业迫切需要解决的技术问题。

如何对电力变压器的实时运行状态进行监测、评估和诊断分析, 国内外专家和学者已经做了大量研究^[2-9]。文献[10-11]采用信息融合的变压器状态评估方法, 该方法的诊断效果很明显, 但选择不同的状态特征量, 使得评估结果不够准确, 评估结果差异较大, 因为不同状态特征值之间存在相悖结论的问题。文献[12-13]基于关联规则的方法诊断的数据都是静态指标, 诊断准确率比较高, 但并没有考虑变压器监测的时效性, 不能及时评估变压器的状态。文献[14]提出基于变权灰云模型的变压器状态层次

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61901101); 云南省教育厅研究基金项目资助(2022J1234); 丽江市科技局项目资助(20201jhb01, 2020ZX10)

评估方法,充分考虑模糊性和随机性,评估结果显著提高,但评估指标存在不确定性,也存在指标的量化和权重系数过分依赖专家系统。文献[15-16]采用模糊关联规则方法,能够评估变压器不同的故障类型和变压器故障等级,也能反映故障发生的具体位置和原因。此外,一些文献基于深度置信网络^[17-18]、聚类和时间序列分析^[19]、支持向量机^[20-21]、可拓分析^[22]等方法评估电力变压器状态。但在实际评估过程中,所需数据量大,存在严重不确定性因素,很难保证评估的准确性。

综上所述,模糊综合评估方法不依赖过多的试验数据,D-S 证据理论也具有处理不确定数据的能力,但存在融合结果与事实相悖的问题。鉴于以上分析,本文选取常规电气试验、绝缘油试验、溶解气体分析 3 方面作为评价指标体系,然后提出基于模糊综合评估模型和皮尔逊相关系数的改进 D-S 证据理论融合的变压器状态评估方法,有效地消除相悖结论的问题,保证状态评估的有效性和实用性,能够更好地监测变压器的运行状态。

1 变压器状态评估模型

为了保证所建立状态评估模型的合理性,需要选择合理、全面的变压器指标体系。本文基于关联规则,选取 3 种试验指标项,找出同一故障发生时试验指标相关性。

1.1 关联规则

引起电力变压器故障的指标种类较多,如果没有合理的指标,则严重影响诊断结果,为了提高变压器的故障诊断准确率,需要选择合理的指标进行状态评估。

根据关联规则的定义^[23],事务数据库为 D ,假设 A 与 B 是 D 的子集事务,则满足 $A \subset D, B \subset D$,且 $A \cap B$ 为空集,则 $A \Rightarrow B$ 的式子为关联规则, A 和 B 为关联规则的前件和后件。关联规则的有效性和可信度都是由支持度和置信度来衡量的。

支持度是数据库 D 中 $A \cup B$ 的百分比,如式(1)所示。

$$Sup(A \rightarrow B) = P(A \cup B) = \frac{\sigma(A \cup B)}{|D|} \times 100\% = \frac{\sigma(A \cup B)}{|D|} \times 100\% \quad (1)$$

置信度是数据库 D 中 A 与 B 的关系,通常用 A 出现时 B 的概率来表示,如式(2)所示。

$$C(A \rightarrow B) = P(B | A) = \frac{P(A \cup B)}{P(A)} \times 100\% \quad (2)$$

$Sup(A \rightarrow B)$ 的范围为 $[0,1]$,支持度越大,说明

A 与 B 的关联度越强。 $C(A \rightarrow B)$ 的值越大,说明 A 与 B 的可信度越强。

利用关联规则找出电力变压器 3 种运行状态下的 13 种评估指标,确定各状态指标的权重系数。考虑 13 种指标的合理性,用支持度来验证,步骤如下:

- 1) 事务数据库 $D_i = \{ \text{第 } i \text{ 类故障状态指标出现的次数} \}$ 。
- 2) 确定项集 $I_{ij} = \{ \text{第 } i \text{ 类故障中第 } j \text{ 个状态指标的单项故障次数} \}$ 。
- 3) 确定项集 $F_i = \{ \text{第 } i \text{ 类故障发生类型} \}$ 。

电力变压器发生故障至少有 1 种故障类型,由式(2)可得变压器的置信度,计算如式(3)所示。

$$C(I_{ij} \rightarrow F_i) = P(F_i | X_{ij}) = \frac{P(X_{ij} \cup F_i) / |D_i|}{P(X_{ij}) / |D_i|} \times 100\% = \frac{\sigma(X_{ij} \cup F_i)}{\sigma(X_{ij})} \times 100\% \quad (3)$$

根据式(3)计算变压器故障类型的置信度 C_i ,找出变压器故障状态指标的相关性。

1.2 建立评估指标体系

本文借鉴国家电网公司的《油浸式变压器(电抗器)状态评估导则(Q/GDW16—2008)》^[24]和文献[19]中给出的故障类型。根据关联规则的支持度和置信度衡量变压器状态指标,将溶解气体分析、电气试验、绝缘油试验 3 个指标作为变压器故障的因素集的子集,即 $F = \{F_1, F_2, F_3\}$; 一个子集又由多个因素组成,如 $F_1 = \{F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{14}, F_{15}\}$,则电力变压器运行状态评估体系如图 1 所示。

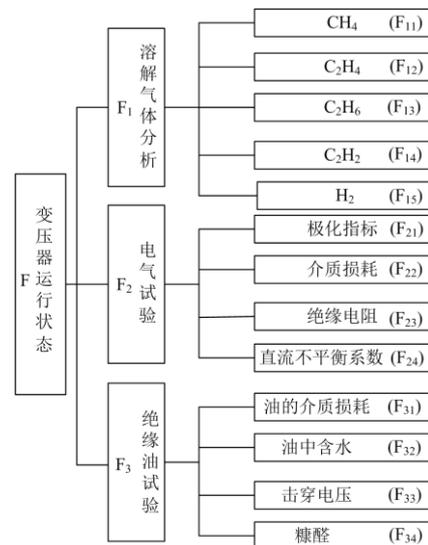


图 1 变压器状态评估体系

Fig. 1 State evaluating system of transformer

1.3 状态的评语集与评分标准的对照

将电力变压器的评语集划分为5个等级, 即优秀、良好、一般、故障、严重故障5个等级, 如表1所示。

表1 变压器运行状态劣化值

编号	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅
劣化值	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
状态描述	优秀	良好	一般	故障	严重故障

2 层次分析法与改进 D-S 证据理论

2.1 层次分析法确定权重系数

目前, 计算权重主要的3种方法是重要性排序法、德尔菲法和层次分析法^[25], 本文采用层次分析法计算权重系数。该方法从定性和定量的角度分析, 更能够反映变压器故障之间的关联, 通过每层中各因素的对比结果, 选择不同标度值, 结果清晰明确; 具体计算步骤如下。

1) 构造比较矩阵

设变压器状态评估状态集为 $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$, 对因素层各指标两两相互比较, 即 $F_i (i=1, 2, \dots, n)$ 与 $F_j (j=1, 2, \dots, n)$, 通过查找判断矩阵标度规则表(表2), 构造比较矩阵 R_A 。

表2 判断矩阵标度规则表

标度值	含义
1	两因素对比, 因素 F_i 与因素 F_j 一样重要
3	两因素对比, 因素 F_i 比因素 F_j 稍微重要
5	两因素对比, 因素 F_i 比因素 F_j 明显重要
7	两因素对比, 因素 F_i 比因素 F_j 强烈重要
9	两因素对比, 因素 F_i 比因素 F_j 极端重要
2, 4, 6, 8	为上面的中间标度值
倒数	当甲与乙的值是 A; 倒数为 1/A

2) 计算重要性排序

根据步骤(1)中的判断矩阵, 由式(4)求出特征向量, 即权重系数。

$$R_A \theta = \lambda_{\max} \theta \quad (4)$$

式中: θ 为特征向量; λ_{\max} 为最大特征值。

3) 一致性检验

一致性检验是为了保证比较矩阵接近电力变压器真实的运行情况, 避免随机状态指标导致变压器脱离实际运行情况, 如果不满足, 需要反复调整比较矩阵, 直到满足一致性检验为止。

按层次分析法的3个步骤, 计算出变压器的状态评估指标权重系数如表3所示。

表3 变压器状态指标权重系数

故障类型	单项试验指标	权重系数
F ₁	F ₁₁	0.1850
	F ₁₂	0.2527
	F ₁₃	0.1245
	F ₁₄	0.3133
	F ₁₅	0.1245
F ₂	F ₂₁	0.2637
	F ₂₂	0.2432
	F ₂₃	0.2004
	F ₂₄	0.2927
F ₃	F ₃₁	0.2061
	F ₃₂	0.2198
	F ₃₃	0.2314
	F ₃₄	0.3427

2.2 基于 D-S 证据理论的信息融合模型

D-S(Dempster-Shafer)证据理论是由Dempster提出, Shafer进一步完善, 得出的一种不确定的推理方法^[26]。目前, D-S证据理论在数据融合、状态评估、故障诊断等领域广泛应用。

2.2.1 D-S证据理论

1) 识别框架 Θ

识别框架是一个非空集合样本空间, 证据理论建立在识别框架之上。本文识别框架分为5个等级 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 和不确定 \emptyset , 即

$$\Theta = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, \emptyset\}$$

2) 基本概率赋值 BPA

设识别框架为 Θ , $A \subseteq \Theta$, 则函数满足以下条件:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum m(A) = 1 \\ 0 \leq m(A) \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $m(A)$ 为 A 的基本概率赋值。

3) Dempster 组合规则

Dempster 组合规则的一般形式为

$$\begin{cases} m(A) = \frac{\sum_{A_i \cap A_j = A} m_1(A_i) m_2(A_j)}{1 - \sum_{A_i \cap A_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j)}, A \neq \emptyset \\ m(\emptyset) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $m_1(A_i)$ 和 $m_2(A_j)$ 分别为 A_i 、 A_j 的基本概率可信度函数。

2.2.2 基于皮尔逊相关系数的改进 D-S 证据理论

在实际应用中,传统的 D-S 证据理论可能存在冲突,严重造成实际结果与常理相悖,为避免这类现象^[23],本文提出一种基于皮尔逊相关系数的改进 D-S 证据理论。首先根据皮尔逊相关系数计算证据体之间的相关性系数,确定可信度的值,计算权重;对原始基本概率进行修正,将修正后的证据基本概率再利用 Dempster 组合规则进行融合,以此来达到解决证据冲突的目的。

皮尔逊相关系数的改进 D-S 证据理论流程图如图 2 所示。

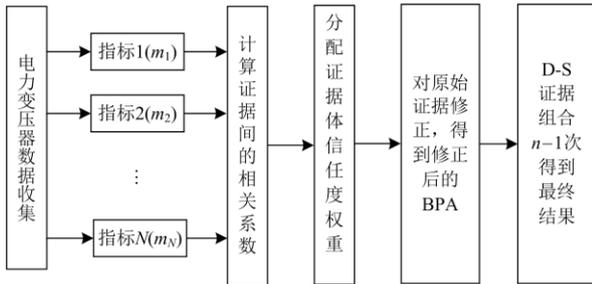


图 2 皮尔逊相关系数的改进 D-S 证据理论流程图

Fig. 2 Flow chart of improved D-S evidence theory fusion of Pearson correlation coefficient

1) 根据皮尔逊相关系数计算证据体之间的相关性,如 m_1 和 m_2 的相关系数 w_{12} 为

$$w_{12} = \frac{\text{cov}(m_1, m_2)}{\sigma_{m1}\sigma_{m2}} = \frac{E((m_1 - \mu_{m1})(m_2 - \mu_{m2}))}{\sigma_{m1}\sigma_{m2}} \quad (7)$$

式中: E 为期望; cov 为协方差。

$$\mu_{mi} = E(m_i) \quad (8)$$

$$\sigma_{mi}^2 = E(m_i^2) - E^2(m_i) \quad (9)$$

按照式(7)一式(9)计算两两证据体的相关系数,构成证据体相关系数矩阵 w_{ij} , 如式(10)所示。

$$w_{ij} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2) 皮尔逊系数的范围为 $[-1, 1]$, 负值越小,表示相关程度越高,为了保证非正相关的证据体的权重系数和可信度的值,当 $\text{cred}(m_i) \leq 0$ 时,取 $m(A) = 0.001$ 。定义证据体 m_i 的可信度为

$$\text{cred}(m_i) = \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij}(m_i, m_j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n w_{ij}(m_i, m_j)} \quad (11)$$

式中, $\text{cred}(m_i) \in [0, 1]$ 且 $\sum_{i=1}^n \text{cred}(m_i) = 1$ 。

3) 对原始基本概率进行修正,修正的结果为

$$m_i^*(A) = m_i(A) * \text{cred}(m_i) \quad (12)$$

其中, $\sum m_i^*(A) = 1$, $m_i^*(A)$ 为新的基本概率。

按式(5)、式(6)和式(12)进行合成,得出最后结果为 $M(A)$ 。

3 模糊综合评估方法

3.1 建立评断矩阵

3.1.1 评估指标的标准化处理

变压器的评估体系中每个指标的量纲和标度是不同的,需要进行归一化处理,采用式(13)进行无量纲处理,即可计算单项状态指标的评分值。

$$x_i' = \frac{x_{i0} - x_z}{x_c - x_z} \times 100 \quad (13)$$

式中: x_z 为注意值; x_c 为初始值; x_{i0} 为实测值。

在评估电力设备中,都是引入劣化度表示设备的健康状态,劣化度值越大说明设备状态越严重^[24]。为了保证运行状态和检修状态与状态量的劣化度保持一致,需要对式(13)进行修正,如式(14)所示。

$$x_i = 100 - x_i' = (1 - \frac{x_{i0} - x_z}{x_c - x_z}) \times 100 \quad (14)$$

3.1.2 隶属函数

运用改进的三角梯形分布的隶属函数来表征模糊综合评估模型的指标。改进的三角梯形隶属分布如图 3 所示。

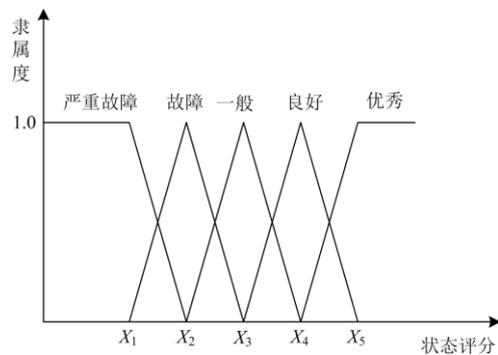


图 3 模糊三角梯形隶属分布

Fig. 3 Distribution of fuzzy triangular trapezoidal membership

三角梯形分布隶属函数的表达式为

$$f(x_i) = \begin{cases} 1, & x < x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, & x_1 < x \leq x_2 \\ 0, & x_2 < x \end{cases} \quad (15)$$

$$f(x_2) = \begin{cases} \frac{x-x_1}{x_2-x_1}, & x_1 < x < x_2 \\ \frac{x_3-x}{x_3-x_2}, & x_2 < x < x_3 \\ 0, & x \leq x_1, x_3 < x \end{cases} \quad (16)$$

$$f(x_3) = \begin{cases} \frac{x-x_2}{x_3-x_2}, & x_2 < x < x_3 \\ \frac{x_4-x}{x_4-x_3}, & x_3 < x < x_4 \\ 0, & x \leq x_2, x_4 < x \end{cases} \quad (17)$$

$$f(x_4) = \begin{cases} \frac{x-x_3}{x_4-x_3}, & x_3 < x < x_4 \\ \frac{x_5-x}{x_5-x_4}, & x_4 < x < x_5 \\ 0, & x \leq x_3, x_5 < x \end{cases} \quad (18)$$

$$f(x_5) = \begin{cases} 0, & x \leq x_4 \\ \frac{x-x_4}{x_5-x_4}, & x_4 < x < x_5 \\ 1, & x_5 < x \end{cases} \quad (19)$$

式中: $f(x_i)$ 为 5 种状态量对应的隶属函数; x 为评分值, 其中 $x_1 = 10, x_2 = 30, x_3 = 50, x_4 = 70, x_5 = 90$; x_i 为状态量对应的模糊分界线。

3.2 模糊综合评估模型

基于模糊层次分析法和改进 D-S 证据理论融合技术构建电力变压器的综合评估模型, 如图 4 所示。变压器故障的模型为

$$m_i = \theta_i R_{Bi} \quad (20)$$

式中: R_{Bi} ($i = 1, 2, 3$) 为隶属分布的模糊评判矩阵; θ_i 为 3 种故障类型的权重系数; m_i 为 3 种故障的基本概率。

变压器的最终评分计算式为

$$T = \sum_{i=1}^5 M(A)H_i \quad (21)$$

式中: $M(A)$ 为状态指标劣化值的平均值; H_i 为劣化等级, 其中 $H_1 = 10, H_2 = 30, H_3 = 50, H_4 = 70, H_5 = 90$; T 为变压器最终评分值。

4 工程实例分析

4.1 实例 1

为了验证本文提出方法的有效性, 对文献[11]给定的 220 kV 变压器的电气实验、绝缘油实验和油中溶解气体进行分析, 具体数据如表 4 所示。

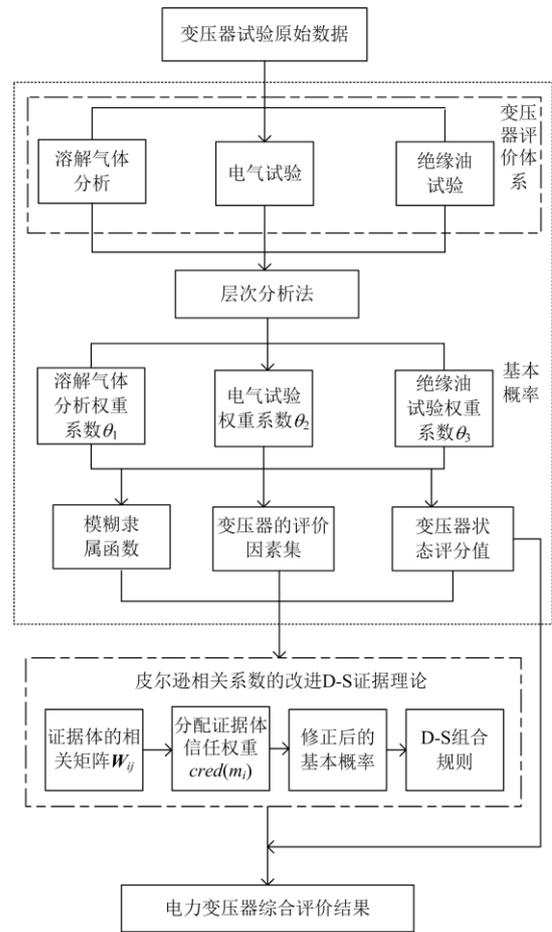


图 4 电力变压器的评价流程

Fig. 4 Flow chart of transformer condition assessment

表 4 变压器试验数据

Table 4 Test data of transformer

故障类型	单项试验指标	试验数据
油中溶解气体	CH ₄ /(μL·L ⁻¹)	6.4
	C ₂ H ₄ /(μL·L ⁻¹)	1.5
	C ₂ H ₆ /(μL·L ⁻¹)	1.5
	C ₂ H ₂ /(μL·L ⁻¹)	0.3
	H ₂ /(μL·L ⁻¹)	116
电气试验	极化指数	1.59
	介电损耗 tanθ/%	0.64
	绝缘电阻/MΩ	10 000
	直流不平衡系数/%	1.02
绝缘油试验	油的介电损耗/%	2.97
	油中微水含量/(mg L ⁻¹)	19.5
	击穿电压/kV	40.8
	糠醛/(mg L ⁻¹)	0.16

4.1.1 评估指标的基本概率

根据式(13)和式(14), 对变压器不同指标数量进行无量纲处理, 得出评分值和劣化值如表 5 所示。

表 5 单项试验状态量数据

Table 5 Test data of independent status parameter

单项指标	实测值	初始值	注意值	单项评分	劣化值
F ₁₁	6.4	2	120	96.27	3.73
F ₁₂	1.5	0.23	50	97.45	2.55
F ₁₃	1.5	0.55	65	98.53	1.47
F ₁₄	0.3	0.01	1	70.71	29.29
F ₁₅	116	6	150	23.61	76.39
F ₂₁	1.59	1.7	1.5	45.00	55.00
F ₂₂	0.64	0.15	0.8	24.62	75.38
F ₂₃	10 000	1000	100	100.00	0.00
F ₂₄	1.02	0.16	2	53.26	46.74
F ₃₁	2.97	3.2	1	89.55	10.45
F ₃₂	19.5	5.2	25	27.78	72.22
F ₃₃	40.8	41	40	80.00	20.00
F ₃₄	0.16	0	1	84.00	16.00

根据表 5 给出的单项试验数据中的评分值，把评分值代入式(14)，得出各指标的劣化度，随后把对应的劣化度分别代入隶属函数表达式(15)一式(18)，可得出各故障类型隶属度如表 6 所示。

表 6 评价指标隶属度分布

Table 6 Evaluation index membership distribution

指标	指标劣化等级				
	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅
F ₁₁	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₁₂	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₁₃	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₁₄	0.0354	0.9646	0.0000	0.0000	0.0000
F ₁₅	0.0000	0.0000	0.7500	0.2500	0.0000
F ₂₁	0.0000	0.0000	0.0000	0.7308	0.2692
F ₂₂	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₂₃	0.0000	0.1630	0.8370	0.0000	0.0000
F ₂₄	0.0000	0.0000	0.7500	0.2500	0.0000
F ₃₁	0.0000	0.9773	0.0227	0.0000	0.0000
F ₃₂	0.0000	0.0000	0.0000	0.8889	0.1111
F ₃₃	0.5000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₃₄	0.7000	0.3000	0.0000	0.0000	0.0000

根据表 3 和表 5，按式(6)得出油中溶解气体、电气试验和绝缘油试验的基本概率分别为 m_1 、 m_2 、 m_3 。

$$m_1 = [0.5733 \quad 0.3022 \quad 0.0000 \quad 0.0847 \quad 0.0398]$$

$$m_2 = [0.2004 \quad 0.0477 \quad 0.4428 \quad 0.2436 \quad 0.0655]$$

$$m_3 = [0.3556 \quad 0.4199 \quad 0.0047 \quad 0.1954 \quad 0.0244]$$

4.1.2 改进 D-S 证据理论的合成结果

基于皮尔逊相关系数的改进 D-S 证据理论，由式(7)一式(11)计算出油中溶解气体、电气试验和绝缘油试验的证据体可信度 $cred(m_i)$ ：

$$cred(m_1) = 0.5965; cred(m_2) = 0.0012; cred(m_3) = 0.4023$$

按式(5)和式(6)的 D-S 组合规则修正后的 $m_i^*(A)$ 进行计算，得出最后合成的结果 $M(A)$ 。

$$M(A) = [0.8010 \quad 0.1187 \quad 0.0001 \quad 0.0790 \quad 0.0012]$$

由式(21)计算变压器模糊综合评估结果， $T = 82.79$ ，按表1变压器运行状态劣化度，说明变压器存在严重故障，比文献[11]中的评估试验结果更好。

4.1.3 对比分析

本文方法与其他传统方法对比分析结果如表7所示。

表 7 算法对比分析

Table 7 Comparative analysis of algorithms

方法	指标劣化度等级					劣化结果
	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	
D-S经典	0.6349	0.1429	0.0697	0.1420	0.0103	75.01
Murphy	0.4933	0.2566	0.1077	0.1375	0.0048	71.93
本文方法	0.8010	0.1187	0.0001	0.0790	0.0012	82.79

从表 7 可知：D-S 经典证据理论与 Murphy 算法，变压器的劣化结果分别为 75.01 和 71.93，表示变压器运行状态处在故障状态，需要尽快检修。本文方法劣化结果为 82.79，需要立即检修。停电检查变压器，发现绕组有烧蚀熔断痕迹，说明本文方法更能符合检修设备的要求。

4.2 实例 2

4.2.1 不同时空变压器评估分析

选用文献[28-29]的实验数据进行分析，即对山东某电力公司一台型号为 SZ9-12500/35、容量为 12 500 kVA 的变压器在 2014 年 5 月—2015 年 5 月期间的数据进行分析。利用变压器 3 个不同阶段的历史数据，评估本文方法的有效性。

根据表 3 和表 5，按式(6)得出 3 个不同历史时间(t_1 — t_3)的基本概率分配矩阵：

$$m_{t_1} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 & H_3 & H_4 & H_5 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.5329 & 0.2034 & 0.0879 & 0.1758 & 0.0000 \\ 0.7155 & 0.0531 & 0.1680 & 0.0634 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

$$m_{t_2} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 & H_3 & H_4 & H_5 \\ 0.6111 & 0.3889 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.4694 & 0.2669 & 0.0000 & 0.1099 & 0.1538 \\ 0.6928 & 0.0758 & 0.1680 & 0.0634 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

$$m_{t_3} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 & H_3 & H_4 & H_5 \\ 0.7959 & 0.1994 & 0.0046 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.4935 & 0.2428 & 0.0000 & 0.0549 & 0.2088 \\ 0.6473 & 0.1213 & 0.1680 & 0.0634 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

按式(15)一式(18), 可得出隶属度如表 8 所示。再按式(5)和式(6)的 D-S 组合规则修正后的 $m_i^*(A)$ 进行计算, 得出最后合成的结果 $M(A)$ 如图 5 所示。

表 8 3 种不同时空评估的隶属度

Table 8 Membership degrees of assessing indices of three different times

实验日期	指标	指标评估等级				
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅
2014 年 5 月	F ₁₁	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₁₂	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₁₃	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₁₄	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₁₅	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₂₁	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	0.0000
	F ₂₂	0.9253	0.0747	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₂₃	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₂₄	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₃₁	0.7586	0.2414	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₃₂	0.0000	0.0000	0.7258	0.2742	0.0000
	F ₃₃	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₃₄	0.7155	0.0531	0.1680	0.0634	0.0000
	2014 年 11 月	F ₁₁	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₁₂		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₁₃		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₁₄		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₁₅		0.6111	0.3889	0.0000	0.0000	0.0000
F ₂₁		0.0000	0.0000	0.0000	0.4167	0.5833
F ₂₂		0.5230	0.4770	0.0000	0.0000	0.0000
F ₂₃		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₂₄		0.4844	0.5156	0.0000	0.0000	0.0000
F ₃₁		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F ₃₂		0.6552	0.3448	0.0000	0.0000	0.0000
F ₃₃		0.0000	0.0000	0.7258	0.2742	0.0000
F ₃₄		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2015 年 5 月		F ₁₁	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₁₂	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₁₃	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₁₄	0.7462	0.2538	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₁₅	0.0000	0.9630	0.0370	0.0000	0.0000
	F ₂₁	0.0000	0.0000	0.0000	0.2083	0.7917
	F ₂₂	0.2931	0.7069	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₂₃	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₂₄	0.7578	0.2422	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₃₁	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₃₂	0.4483	0.5517	0.0000	0.0000	0.0000
	F ₃₃	0.0000	0.0000	0.7258	0.2742	0.0000
	F ₃₄	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

不同时空状态评估结果

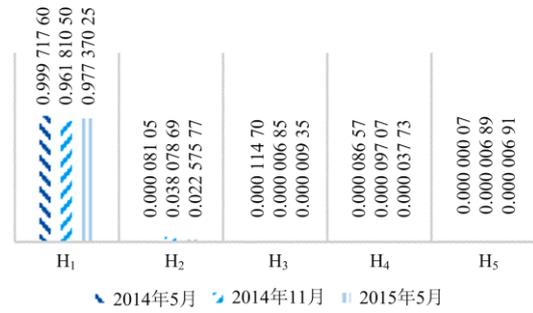


图 5 不同时空状态评估结果

Fig. 5 Evaluation results of different temporal and spatial

3 个不同时间状态信息融合的状态评估结果为: $T_1 = 10.01$, $T_2 = 10.77$, $T_3 = 10.45$ 变压器的劣化结果属于[0-20], 表示变压器运行状态为优秀, 与文献[25-26]实际工况一致, 由此验证本文方法的可行性。

4.2.1 综合评估结果分析

为了进一步验证本文方法的可行性和有效性, 现收集 48 台变压器试验数据和巡检记录, 48 组数据中包括 4 种电压等级的变压器, 500 kV 的变压器 3 组, 220 kV 的变压器 12 组, 110 kV 的变压器 18 组, 35 kV 的变压器 15 组, 如表 9 所示; 其运行状态包括 21 组优秀, 16 组良好, 11 组一般。

表 9 4 种电压等级变压器

Table 9 Transformers with four voltage levels

电压等级/kV	型号	容量/MVA	冷却方式	数量
500	ODFS-250000/500	250/250/80	ONAN/ONAF	3
220	SFPSZ4-150000/220	150/150/75	ODAF	12
110	SFZ7-31500/110	31.5(40)	ONAN/ONAF	18
35	SF9-20000/35	20	ONAN	15

通过本文方法对 48 台变压器试验数据和巡检记录进行状态评估结果如表 10 和图 6 所示。从表 10 可知, 20 组优秀运行状态, 18 组良好运行状态, 10 组一般运行状态。从图 6 可知, 46 台变压器的状态评价结果与实际运行工况相吻合, 其中第 9 台和第 30 台变压器的评估结果与实际工况不同, 分析可知: 第 9 台变压器的评估结果为 20.59, 接近表 1 变压器运行状劣化值分界线 20; 同理第 30 台变压器评估结果为 39.51, 接近表 1 变压器运行状劣化值分界线 40; 结果差异仅存在相邻两个等级之间。通过上述分析, 本文方法的准确率为 95.83%, 说明本文方法对变压器状态评估的有效性。

表 10 变压器评估结果

Table 10 Assessment result of transformers

序号	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	结果
1	0.9997	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	10.0114
2	0.8120	0.0875	0.0125	0.0210	0.0670	18.8700
3	0.7055	0.2074	0.0032	0.0790	0.0049	19.4080
4	0.0225	0.1136	0.7342	0.1220	0.0077	49.5760
5	0.4015	0.4750	0.0166	0.0970	0.0099	26.7760
6	0.7120	0.1875	0.0125	0.0630	0.0250	20.0300
7	0.7510	0.1057	0.0000	0.1290	0.0143	20.9980
8	0.8200	0.1124	0.0201	0.0000	0.0475	16.8520
9	0.7010	0.1875	0.0125	0.0790	0.0200	20.5900
10	0.3492	0.4804	0.0042	0.1212	0.0450	30.6480
11	0.4023	0.5021	0.0201	0.0755	0.0000	25.3760
12	0.2426	0.1085	0.4863	0.1561	0.0065	41.5080
13	0.4015	0.4750	0.0166	0.0970	0.0099	26.7760
14	0.3432	0.4939	0.0432	0.1197	0.0000	28.7880
15	0.2653	0.1146	0.4870	0.0543	0.0788	41.3340
16	0.3902	0.4862	0.0203	0.1013	0.0020	26.7740
17	0.1653	0.1146	0.4870	0.0543	0.1788	49.3340
18	0.7345	0.0074	0.0320	0.0790	0.1471	27.9360
19	0.8055	0.1074	0.0015	0.0790	0.0066	17.4760
20	0.7540	0.1880	0.0580	0.0000	0.0000	16.0800
21	0.8618	0.1267	0.0115	0.0000	0.0000	12.9932
22	0.7700	0.1950	0.0212	0.0000	0.0138	15.8520
23	0.9618	0.0381	0.0000	0.0001	0.0000	10.7682
24	0.3782	0.5862	0.0203	0.0000	0.0153	23.7600
25	0.4526	0.4627	0.0198	0.0649	0.0000	23.9400
26	0.0125	0.1360	0.6542	0.1032	0.0941	52.6080
27	0.3785	0.4941	0.0278	0.0986	0.0010	26.9900
28	0.6987	0.2224	0.0201	0.0000	0.0588	19.9560
29	0.7120	0.2880	0.0000	0.0000	0.0000	15.7600
30	0.2426	0.2085	0.3863	0.1561	0.0065	39.5080
31	0.2426	0.2085	0.4863	0.0561	0.0065	37.5080
32	0.6021	0.3023	0.0201	0.0000	0.0755	22.8900
33	0.7320	0.2124	0.0201	0.0000	0.0355	17.8920
34	0.8360	0.1640	0.0000	0.0000	0.0000	13.2800
35	0.2001	0.3754	0.0000	0.3574	0.0671	44.3200
36	0.0355	0.1350	0.6542	0.1032	0.0721	50.8280
37	0.0452	0.2341	0.6621	0.0324	0.0262	45.2060
38	0.1211	0.5085	0.3163	0.0541	0.0000	36.0680
39	0.7560	0.1640	0.0000	0.0000	0.0800	19.6800
40	0.9774	0.0226	0.0000	0.0000	0.0000	10.4547
41	0.8220	0.1780	0.0000	0.0000	0.0000	13.5600
42	0.4021	0.5023	0.0201	0.0000	0.0755	26.8900
43	0.6021	0.3023	0.0245	0.0000	0.0711	22.7140
44	0.0111	0.5485	0.4063	0.0341	0.0000	39.2680
45	0.2785	0.4871	0.0278	0.0913	0.1153	35.5560
46	0.7130	0.2780	0.0000	0.0000	0.0090	16.2800
47	0.8774	0.0224	0.0000	0.0000	0.1002	18.4653
48	0.1426	0.1085	0.4863	0.0561	0.2065	51.5080

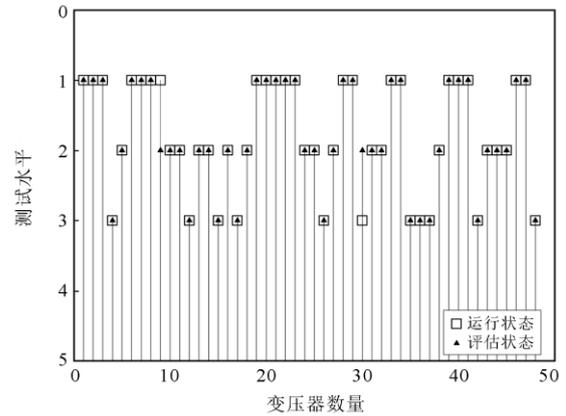


图 6 变压器的综合评估结果

Fig. 6 Comprehensive evaluation results of transformer

5 结论

本文提出基于模糊综合评价和皮尔逊相关系数的改进D-S证据理论融合的变压器状态评估方法，通过变压器试验数据进行验证，得出结果如下：

1) 建立变压器评价体系和评价指标，利用层次分析和改进的三角梯形隶属函数相结合的方法获得基本概率，引入模糊综合评价模型，可以为变压器评价提供理论方向。

2) 选取变压器的 3 种状态指标，采用皮尔逊相关系数的改进 D-S 证据理论进行信息融合，避免高冲突证据融合产生相悖现象，从而提高变压器状态评估的准确性。

3) 选取不用时空变压器运行数据，验证本文方法的可靠性和有效性；将本文方法与传统的D-S经典方法、Murphy方法进行对照试验，由此验证本文方法的有效性。

4) 通过 48 组不同状态试验数据，本文方法得出的评估结果与变压器实际工况相吻合，其准确率能达到 96%，可以进一步推广到其他电力设备。

参考文献

[1] 何先华, 张远鹏, 崔桂兴, 等. 基于回归算法的变压器故障检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 132-139.
HE Xianhua, ZHANG Yuanpeng, CUI Guixing, et al. Research on transformer fault detection method based on a regression algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 132-139.

[2] 黄新波, 王亨, 田毅, 等. 基于 PSO-ELM 融合动态加权 AdaBoost 的变压器故障诊断方法[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 39-46.

- HUANG Xinbo, WANG Heng, TIAN Yi, et al. Transformer fault diagnosis algorithm based on PSO-ELM fusion dynamically weighted AdaBoost[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 39-46.
- [3] 邓科, 侯晓松, 林湘宁, 等. 基于 5G 通信的电气设备监测终端性能在线评估方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 39-47.
- DENG Ke, HOU Xiaosong, LIN Xiangning, et al. Online evaluation scheme for the performance of an electrical equipment monitoring terminal based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 39-47.
- [4] 李雅欣, 候慧娟, 张立娟, 等. 近邻成分分析和 k 近邻学习融合的变压器不平衡样本故障诊断[J]. 高压技术, 2021, 47(2): 472-479.
- LI Yaxin, HOU Huijuan, ZHANG Lijuan, et al. Transformer fault diagnosis with unbalanced samples based on neighborhood component analysis and k-nearest neighbors[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 472-479.
- [5] 皮杰, 宋佳翰, 张先捷, 等. 基于故障本征证据和特征指标的换流变压器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 128-134.
- PI Jie, SONG Jiahuan, ZHANG Xianjie, et al. Condition assessment of converter transformer based on intrinsic fault evidences and characteristic indicators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 128-134.
- [6] 朱保军, 咸日常, 范慧芳, 等. WRSR 与改进朴素贝叶斯融合的变压器故障诊断技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 120-128.
- ZHU Baojun, XIAN Richang, FAN Huifang, et al. Transformer fault diagnosis technology based on the fusion of WRSR and improved naive Bayes[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 120-128.
- [7] HAN Jiexiang, KONG Xiangping, LI Peng, et al. A novel low voltage ride through strategy for cascaded power electronic transformer[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 227-238.
- [8] 周光宇, 马松龄. 基于机器学习与 DGA 的变压器故障诊断及定位研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 262-268.
- ZHOU Guangyu, MA Songling. Study of transformer fault diagnosis and location based on machine learning and DGA[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 262-268.
- [9] 余长厅, 黎大健, 汲胜昌, 等. 基于振动噪声及 BP 神经网络的变压器故障诊断方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 256-261.
- YU Zhangting, LI Dajian, JI Shengchang, et al. Research on transformer fault diagnosis method based on vibration noise and BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 256-261.
- [10] 张珂斐, 郭江, 肖志怀. 模糊综合评估和改进证据理论相融合的变压器状态评估方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(2): 279-314.
- ZHANG Kefei, GUO Jiang, XIAO Zhihui. Research on state evaluation method of transformer based on fusion of fuzzy comprehensive evaluation and improved D-S evidence theory[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(2): 279-314.
- [11] 张玉振, 吉兴全, 于永进, 等. 基于时空信息融合的矿用变压器绝缘状态评估方法[J]. 工矿自动化, 2017, 43(9): 75-82.
- ZHANG Yuzhen, JI Xingquan, YU Yongjin, et al. Insulation condition assessment method of mine-used transformer based on spatio-temporal information fusion[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(9): 75-82.
- [12] 谢龙君, 李黎, 程勇, 等. 融合集对分析和关联规则的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 277-286.
- XIE Longjun, LI Li, CHENG Yong, et al. A fault diagnosis method of power transformers by integrated set pair analysis and association rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 277-286.
- [13] 谭贵生, 曹生现, 赵波, 等. 基于关联规则与变权重系数的变压器状态综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 88-95.
- TAN Guisheng, CAO Shengxian, ZHAO Bo, et al. An assessment of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 88-95.
- [14] 杜江, 孙铭阳. 基于变权灰云模型的变压器状态层次评估方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4306-4316.
- DU Jiang, SUN Mingyang. Hierarchical assessment method of transformer condition based on weight-varying grey cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4306-4316.
- [15] GUO Chenxi, WANG Bin, WU Zhangyu, et al. Transformer failure diagnosis using fuzzy association rule mining combined with case-based reasoning[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(11): 2202-2208.
- [16] 刘文泽, 张俊, 邓焱. 基于深度置信网络和多维信息融合的变压器故障诊断方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 16-23.

- LIU Wenze, ZHANG Jun, DENG Yan. Transformer fault diagnosis method based on deep learning and multi-dimensional information fusion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 16-23.
- [17] 辛建波, 康琛, 翁新林, 等. 基于聚类和时间序列分析的变压器状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 64-70.
XIN Jianbo, KANG Chen, WENG Xinlin, et al. Evaluation method of transformer state based on clustering and time series analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 64-70.
- [18] 苏磊, 陈璐, 徐鹏, 等. 基于深度信念网络的变压器运行状态分析[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 56-62.
SU Lei, CHEN Lu, XU Peng, et al. Operation condition analysis of transformer based on deep belief network[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 56-62.
- [19] 谭贵生, 石宜金, 刘丹丹, 等. 基于混沌粒子群优化支持向量机的变压器故障诊断[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(5): 54-61.
TAN Guisheng, SHI Yijin, LIU Dandan, et al. Fault diagnosis method of transformer based on support vector machine with improved particle swarm optimization[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 44(5): 54-61.
- [20] 廖瑞金, 张镜议, 黄飞龙, 等. 基于可拓分析法的电力变压器本体绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 521-526.
LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, HUANG Feilong, et al. Power transformer condition assessment strategy using matter element analysis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 521-526.
- [21] 李亮, 范瑾, 闫林, 等. 基于混合采样和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 150-155.
LI Liang, FAN Jin, YAN Lin, et al. Transformer fault diagnosis based on hybrid sampling and support vector machines[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 150-155.
- [22] 南东亮, 王维庆, 张陵, 等. 基于关联规则挖掘与组合赋权-云模型的电网二次设备运行状态风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 67-76.
NAN Dongliang, WANG Weiqing, ZHANG Ling, et al. Risk assessment of the operation state of power grid secondary equipment based on association rule mining and combination weighting-cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 67-76.
- [23] 汪陪庄, 李洪兴. 知识表示的数学理论[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994.
- [24] 国家电网公司. 油浸式变压器(电抗器)状态评估导则: Q/GD169—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
State Grid Corporation of China. Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors): Q/GDW 169—2008[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [25] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88.
ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2): 80-88.
- [26] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(2): 325-339.
- [27] 张欢, 陆见光, 唐向红. 面向冲突证据的改进D-S证据理论算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(3): 616-623.
ZHANG Huan, LU Jianguang, TANG Xianghong. An improved D-S evidence theory algorithm for conflict evidence[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(3): 616-623.
- [28] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75.
LIAO Ruijin, WANG Qian, LU Sijia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 70-75.
- [29] 孙莹, 高贺, 李可军, 等. 基于多时段信息融合的配电变压器运行状态评估模型[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2054-2063.
SUN Ying, GAO He, LI Kejun, et al. Condition assessment model of distribution transformer based on multi-period information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2054-2063.

收稿日期: 2022-01-01; 修回日期: 2022-03-25

作者简介:

石宜金(1985—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为嵌入式技术; E-mail: 349497232@qq.com

谭贵生(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 副教授, 研究方向为电力设备故障诊断等; E-mail: tgs_jl@163.com

赵波(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为表面污垢监测与控制, 新能源发电检测技术与自动化装置等。
E-mail: rerbertzhao@163.com

(编辑 魏小丽)