

## 基于区间权重和改进云模型的变压器状态评估

杨杰明<sup>1</sup>, 董玉坤<sup>2</sup>, 曲朝阳<sup>1</sup>, 刘志颖<sup>1</sup>, 沈胜楠<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学信息工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网河北省电力公司信息通信分公司, 河北 石家庄 050000; 3. 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 针对变压器状态等级边界信息随机性和模糊性的问题, 提出建立基于正态云理论的变压器状态评估模型。考虑变压器状态评估数据的有限性, 提出对变压器少数运行数据进行正态云处理。对于变压器等级边界模糊性问题, 提出对变压器各等级进行适度扩展, 建立变压器指标等级正态云。根据不同云滴在数据正态云出现的不同概率, 计算变压器数据正态云云滴与各评估指标等级正态云之间的关联度, 得到评判矩阵。其次, 对变压器运行数据进行区间表示。针对各指标区间数据的波动性, 计算区间数据的方差和平均差, 进而赋予指标不同的权重, 在此基础上进行变压器状态评估。通过分析某台变压器运行数据, 验证了该方法应用于变压器状态评估中的有效性。  
**关键词:** 变压器; 正态云模型; 关联度; 区间权重; 状态评估

### Condition assessment for transformer based on interval weight and improved cloud model

YANG Jieming<sup>1</sup>, DONG Yukun<sup>2</sup>, QU Zhaoyang<sup>1</sup>, LIU Zhiying<sup>1</sup>, SHEN Shengnan<sup>3</sup>

(1. School of Information Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. State Grid Hebei Electric Company Information & Telecommunication Branch, Shijiazhuang 050000, China; 3. Institute of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** For the randomness and fuzziness problem of condition level boundary information in the power transformers, a new assessment method based on normal cloud theory is proposed. Given a full consideration to the limitation of data use for condition assessment, the limited data collected of the power transformers would be handled to establish the data normal cloud. For the issue of power transformers level boundary ambiguity, it proposes to properly expand each level and establish the level normal cloud. Depending on the different probabilities of cloud droplets in clouds, the cloud association degree is then calculated between the data normal cloud and the level normal cloud. Secondly, the operation data of power transformer is represented the range form. As for volatility for each interval data of performance indicators, it calculates the variance and average interval data and gives different weights index. The result of condition level of the power transformers is finally obtained. Through the analysis of a power transformer station operating data, the simulation example demonstrates that proposed method is efficient and practical to apply to assess the power transformers.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 651277023).

**Key words:** power transformer; normal cloud model; association degree; interval weight; condition assessment

## 0 引言

随着我国输变电电压等级和电网容量的不断提升, 电力系统的安全稳定运行工作面临着巨大的挑战<sup>[1-2]</sup>。作为输变电系统的核心设备, 变压器运行状态的优劣直接影响着整个电力系统的安全运行水

平<sup>[3-4]</sup>。基于此, 变压器状态评估应运而生。变压器状态评估通常是利用可获取的信息来评估和预测设备的退化趋势及未来变压器运行的安全性<sup>[5-6]</sup>。对变压器的状态进行准确评估, 可以发现变压器的危险因子, 还可以给变压器停电检修提供科学依据, 从而降低了变压器故障发生带来的巨大经济损失<sup>[7-8]</sup>。

在现有的变压器各类评估中, 大多是从方法的角度进行相关研究。国内外学者通过引入贝叶斯网络、故障树、模糊理论等方法对评估模型进行相关

研究, 但对变压器状态等级边界模糊性问题以及少数运行数据评估的研究却不够深入。

本文根据变压器的各类相关规程, 确定了一些对变压器各部件状态影响较大的运行指标用于状态评估; 通过对变压器运行数据进行处理, 将运行数据扩展成数据正态云; 并对各指标等级适度模糊化, 建立变压器指标等级正态云; 根据云滴在数据正态云出现的概率, 计算运行数据正态云云滴与变压器评估指标等级正态云之间的关联度, 得到评判矩阵。其次, 对变压器运行数据进行区间表示, 根据各指标数的波动性, 计算各区间数据的方差和平均值, 赋予变压器各指标不同权重, 在此基础上进行变压器状态评估, 以实现变压器状态的定性和定量评估。

## 1 云理论

### 1.1 正态云模型

云模型是在随机数学和模糊数学的基础上, 用于统一刻画信息随机性、模糊性及二者间关联性的一种方法<sup>[9]</sup>。由于正态云模型具有独特的数学性质, 在实际生产中得到了广泛应用, 而在变压器各类状态评估中, 状态等级边界划定一般都是绝对的, 不考虑边界的模糊性<sup>[10-11]</sup>。而正态云模型正是解决各类信息随机性和模糊性问题的有效方法。因此, 本文提出运用正态云模型进行变压器状态评估。

正态云模型可表示为 $(E_x, E_n, H_e)$ 。期望 $E_x$ 是信息空间的中心值, 是最能够代表此信息的值<sup>[12]</sup>。在变压器状态评估过程中, 是最能描述相应变压器状态等级的数据; 熵 $E_n$ 是信息随机性和模糊性的度量, 既反映了代表此信息云滴的离散程度, 也反映了论域空间中可被信息接受的云滴的取值范围, 是对信息模糊性的度量。在变压器状态评估中, 可反映变压器评估过程中各指标数据的模糊性和随机性; 超熵 $H_e$ 是对熵的不确定性的度量, 是熵的熵, 反映了在论域空间代表该信息所有数据不确定度的凝聚性, 它的大小间接地反映了云的厚度, 在变压器评估过程中, 表示各指标数据的离散程度。

### 1.2 云模型关联度

本文基于正态云模型的变压器状态等级指标的关联度计算步骤如下。

1) 针对变压器各指标等级 $[c_{\min}, c_{\max}]$ , 针对等级边界的模糊性, 对边界进行适度扩展, 成为等级正态云, 等级正态云的各参数可用下列公式计算, 云的期望值 $E_x$ 和熵 $E_n$ 为

$$E_x = (c_{\min} + c_{\max}) / 2 \quad (1)$$

$$E_n = (c_{\max} - c_{\min}) / 6 \quad (2)$$

其中,  $c_{\min}$ ,  $c_{\max}$ 分别为指标等级的上下边界。超熵 $H_e$ 选取参照文献<sup>[12]</sup>, 本文中等级云的超熵 $H_e$ 取值如表4所示。

2) 关联度的计算。用云滴 $x$ 表示变压器某一指标数据正态云云滴, 然后以此等级正态云中的熵 $E_n$ 为均值、超熵 $H_e$ 为标准差, 产生随机数 $E_{nm}$ 。则云滴 $x$ 与此等级正态云的关联度 $k$ 计算公式为

$$k = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2E_{nm}^2}\right) \quad (3)$$

## 2 变压器状态评估指标的选取

本文根据变压器的各类相关规程, 从油化试验、电气试验、油中溶解气体3个方面确定12个状态参量用于变压器状态评估<sup>[13-15]</sup>。如表1所示。

表1 变压器状态指标

油化试验		c1 油中微水/(mg/L)
		c2 油介损/%
		c3 油击穿电压/kV
		c4 油中糠醛/(mg/L)
变压器	电气试验	c5 绝缘电阻吸收比/%
		c6 极化指数
		c7 绕组介损损耗因数/%
		c8 绕组泄漏电流/mA
油中溶解气体		c9 H <sub>2</sub> 含量/( $\mu$ L/L)
		c10 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 含量/( $\mu$ L/L)
		c11 总烃含量/( $\mu$ L/L)
		c12 总烃相对产气速率/%

## 3 云模型的改进方法

### 3.1 数据的处理

在现有的变压器各种评估中, 大多数只是通过少数运行数据来进行评估<sup>[16-17]</sup>。而本文提出对变压器运行数据进行扩展成正态云。根据不同云滴在数据正态云出现的不同概率计算关联度, 从而提高关联度计算的精确性。在此基础上, 对变压器状态进行评估。表2为变压器部分运行数据。将变压器指标数据进行正态云处理的具体步骤如下:

1) 输入变压器各指标 $n$ 个数据 $x_i (1 \leq i \leq n)$ , 分别计算数据正态云的参数 $E_x, E_n, H_e$ 。样本均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

样本方差 $s$ 为

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|^2} \quad (5)$$

期望 $E_x$ 为

$$E_x = \bar{x} \quad (6)$$

熵 $E_n$ 为

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2n} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x|} \quad (7)$$

超熵 $H_e$ 为

$$H_e = \sqrt{|(s - E_n) \cdot (s + E_n)|} \quad (8)$$

2) 利用上述参数构造正态云发生器, 不断产生云滴, 直至产生足够的云滴(本文云滴数取500)。

表 2 某变压器部分运行数据  
Table 2 The part of transformer run data

No.	日期	c1/ (mg/L)	c2 (%)	c3/ kV	c4/ (mg/L)	c5/ (%)	c6	c7 (%)	c8/ mA	c9/ (μL/L)	c10/ (μL/L)	c11/ (μL/L)	c12 (%)
1	20091229	13.57	1.70	55.02	0.27	1.61	1.72	0.27	24.30	158.98	0.18	105.42	9.32
2	20091230	12.02	2.75	48.54	0.35	1.28	1.96	0.26	22.50	200.64	0.21	113.90	7.56
3	20100104	10.79	2.50	50.17	0.29	1.41	2.32	0.34	25.10	178.30	0.27	120.68	6.74
4	20100107	17.50	2.20	50.11	0.37	1.50	2.47	0.39	28.20	181.30	0.29	123.34	7.19
5	20100109	15.80	2.41	45.50	0.32	1.68	1.91	0.35	28.60	170.80	0.23	106.37	8.23
6	20100111	12.10	2.70	57.19	0.31	1.75	2.34	0.20	32.40	180.33	0.19	122.54	10.22
7	20100113	11.34	1.57	52.04	0.22	1.48	1.78	0.27	26.80	168.80	0.26	105.80	10.64
8	20100117	16.70	2.10	53.52	0.23	1.45	1.91	0.35	24.70	172.60	0.20	113.90	10.79
9	20100121	21.92	1.80	51.77	0.30	1.50	1.88	0.39	25.30	172.10	0.18	114.58	8.51
10	20100123	16.03	2.30	48.78	0.36	1.46	1.97	0.37	32.40	197.60	0.32	110.63	9.77
11	20100127	21.20	1.73	45.91	0.25	1.20	2.45	0.18	29.20	186.30	0.26	110.41	7.56
12	20100130	25.01	1.70	50.50	0.35	1.40	1.81	0.20	23.30	170.80	0.24	113.80	7.74
13	20100131	21.26	1.57	50.22	0.27	1.64	1.72	0.42	24.40	180.33	0.20	110.42	7.19
14	20100202	17.07	2.41	55.28	0.32	1.46	2.01	0.35	29.60	168.8	0.18	108.91	8.23
15	20100203	14.30	1.57	49.83	0.27	1.44	2.03	0.28	27.10	172.60	0.21	112.68	10.61
16	20100205	13.54	2.41	52.17	0.32	1.45	1.72	0.29	22.20	172.10	0.28	110.63	9.32
17	20100207	16.30	2.50	48.40	0.36	1.51	2.31	0.29	22.3	201.36	0.27	123.08	7.56
18	20100208	21.36	2.20	52.29	0.25	1.55	1.72	0.43	25.10	170.8	0.23	106.37	6.94
19	20100210	16.80	2.41	48.30	0.35	1.44	2.30	0.36	28.20	182.33	0.19	112.25	7.19
20	20100213	17.42	1.73	48.31	0.32	1.72	2.44	0.29	28.60	169.80	0.26	114.58	8.13
21	20100214	14.53	1.76	55.78	0.27	1.61	1.79	0.27	24.31	168.98	0.20	109.42	9.21
22	20100217	15.17	1.85	49.51	0.35	1.28	1.91	0.26	22.53	201.64	0.21	117.23	7.26
23	20100218	16.42	2.30	51.17	0.29	1.47	2.35	0.34	25.19	175.31	0.28	123.62	8.71
24	20100220	17.19	2.17	50.64	0.37	1.52	2.41	0.39	27.22	178.39	0.23	129.31	8.39
25	20100221	15.27	2.31	47.37	0.32	1.62	1.98	0.35	26.69	172.84	0.28	116.37	8.93
26	20100224	18.31	2.62	51.69	0.31	1.70	2.21	0.20	30.21	181.23	0.19	129.24	10.52
27	20100227	16.76	1.97	52.29	0.22	1.54	1.70	0.27	27.71	171.87	0.27	115.21	11.34
28	20100228	16.89	2.01	51.72	0.23	1.67	1.81	0.35	27.34	179.69	0.21	119.91	10.09
29	20100302	20.91	1.79	54.13	0.30	1.62	1.80	0.39	28.32	174.16	0.19	111.28	9.11
30	20100304	18.57	2.17	49.32	0.36	1.49	1.98	0.37	31.47	190.61	0.22	114.23	8.71
31	20100307	20.16	1.93	49.11	0.25	1.51	2.14	0.18	29.92	187.38	0.27	120.51	7.76
32	20100310	24.39	1.90	53.63	0.35	1.49	1.71	0.20	28.31	177.82	0.25	123.83	8.14
33	20100313	19.03	2.13	50.78	0.31	1.66	1.87	0.27	30.43	192.16	0.29	117.31	8.29

### 3.2 关联度概率系数的确定

由于云滴在数据正态云中服从正态分布, 所以不同云滴在数据正态云出现的概率是不同的。在计算关联度时, 必须考虑云滴在关联度计算中的贡献

度。本文使用云滴在正态云中出现的概率系数来表示该云滴的贡献度。

对于服从正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$  的云滴  $x$ , 在区间  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  中取  $n$  个数据来参与计算。由于选取

数据的概率是不同的, 那么计算关联度时, 该选取点对关联度计算的贡献度也是不同的。设在数据正态云中取某一个云滴点  $x_m (0 \leq m \leq n)$  的概率为  $p_{rm}$ , 则此云滴数据在计算关联度  $k_m$  时的贡献度也为  $p_{rm}$ 。因此, 对于指标  $j$  关于等级  $i$  关联度  $K_{ij}$  的计算, 将  $p_{rm}$  作为该关联度的贡献度。故得

$$K_{ij} = \sum_{m=1}^n (p_{rm} \cdot k_m) \quad (9)$$

式中:  $K_{ij}$  为指标  $j$  关于等级  $i$  的关联度;  $p_{rm}$  为云滴点概率;  $k_m$  为  $i$  指标正态云云滴关于等级  $i$  的关联度。

#### 4 基于改进正态云的变压器状态评估方法

变压器状态评估流程可概括为: 对变压器运行数据进行扩展成数据正态云; 对变压器各等级进行适度模糊化, 建立变压器各评估指标的等级正态云; 计算数据正态云云滴与等级正态云之间的关联度, 得到评判矩阵  $D$ ; 求取各指标权重向量  $W$ ; 最后将评判矩阵与权重向量的乘积作为评判结果向量  $R = W \times D$ , 得出变压器状态评估结果。

#### 4.1 变压器状态评估指标等级确定

变压器各指标的等级边界如表 3 所示。变压器各指标的等级正态云参数如表 4 所示。变压器状态的评定结果分为正常状态、注意状态、异常状态、严重状态<sup>[18-20]</sup>。对应等级 1-4, 如表 5 所示。

表 3 变压器各评估指标的等级

Table 3 Transformer rank of the assessment indicators

评估指标	等级边界			
	1	2	3	4
$c_1$	(0,10)	(10,15)	(15,25)	(25,35)
$c_2$	(0,0.6)	(0.6,1.5)	(1.5,3)	(3,4.5)
$c_3$	(60,100)	(50,60)	(40,50)	(30,0)
$c_4$	(0,0.1)	(0.1,0.2)	(0.2,0.4)	(0.4,0.75)
$c_5$	(1.6,2)	(1.45,1.6)	(1.3,1.4)	(0,1.3)
$c_6$	(0,0.5)	(0.5,1)	(1,1.5)	(1.5,2)
$c_7$	(0,0.3)	(0.3,0.49)	(0.49,0.58)	(0.58,0.7)
$c_8$	(0,30)	(30,45)	(45,70)	(70,100)
$c_9$	(0,400)	(400,500)	(500,700)	(700,800)
$c_{10}$	(0,2)	(2,4)	(4,6)	(6,8)
$c_{11}$	(0,75)	(75,120)	(120,150)	(150,180)
$c_{12}$	(0,6.5)	(6.5,10)	(10,13.5)	(13.5,24)

表 4 变压器状态各评估指标等级正态云参数

Table 4 Normal cloud parameters of the assessment indicators rank of the transformer

评估指标	等级正态云数字特征 ( $E_x, E_n, He$ )			
	1	2	3	4
$c_1$	(5.000,1.667,0.080)	(12.500,0.833,0.080)	(20.000,1.667,0.080)	(30.000,1.667,0.080)
$c_2$	(0.300,0.100,0.080)	(0.450,0.300,0.080)	(0.750,0.750,0.080)	(0.750,1.250,0.080)
$c_3$	(80.000,6.667,0.080)	(55.000,1.667,0.080)	(45.000,1.667,0.080)	(35.000,1.667,0.080)
$c_4$	(0.050,0.017,0.080)	(0.150,0.017,0.080)	(0.300,0.033,0.080)	(0.575,0.058,0.080)
$c_5$	(1.800,0.067,0.080)	(1.525,0.025,0.080)	(1.350,0.017,0.080)	(0.650,0.217,0.080)
$c_6$	(0.250,0.083,0.080)	(0.750,0.083,0.080)	(1.250,0.083,0.080)	(1.750,0.083,0.080)
$c_7$	(0.150,0.050,0.100)	(0.317,0.025,0.100)	(0.535,0.015,0.100)	(0.640,0.020,0.100)
$c_8$	(15.000,5.000,0.0800)	(37.500,2.500,0.080)	(57.500,4.167,0.080)	(85.000,5.000,0.080)
$c_9$	(200.000,66.667,10.000)	(450.000,16.667,10.000)	(600.000,33.333,10.000)	(750.000,16.667,10.000)
$c_{10}$	(1.000,0.333,0.100)	(3.000,0.333,0.100)	(5.000,0.333,0.100)	(7.000,0.333,0.100)
$c_{11}$	(37.500,12.500,0.100)	(97.500,7.500,0.100)	(135.000,5.000,0.100)	(165.000,5.000,0.100)
$c_{12}$	(3.250,1.083,0.100)	(8.250,0.583,0.100)	(11.750,0.583,0.100)	(18.750,1.750,0.100)

表 5 变压器状态等级

Table 5 Condition rank of the transformer

状态等级	范围	状态描述
1	(0,0.2)	正常状态, 状态稳定, 运行安全。
2	(0.2,0.4)	注意状态, 需要加强运行监视。
3	(0.4,0.7)	异常状态, 需要适时安排停电检修。
4	(0.7,1)	严重状态, 需尽快安排停电检修。

#### 4.2 评判矩阵的计算

在变压器状态评价过程中, 评判矩阵  $D$  的确定

实质为数据正态云与等级正态云关联度的计算。在各指标数据正态云中取  $n$  个云滴, 计算各指标关联度  $k_1, k_2, \dots, k_n$ 。根据每个数据的选取概率 ( $pr_1, pr_2, \dots, pr_n$ ), 与各自关联度 ( $k_1, k_2, \dots, k_n$ ) 的乘积之和作为该数据正态云和该  $i$  等级正态云的关联度  $K_{ij}$ 。分别求出指标  $j$  下数据正态云与各个等级正态云的关联度, 用向量  $P_j$  表示为

$$P_j = [K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j}] \quad (10)$$

分别计算变压器 12 个运行指标与 4 个等级之间

的关联度 $P_1, P_2, \dots, P_{12}$ , 得到评判矩阵 $D$ :

$$D = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}] \quad (11)$$

### 4.3 基于区间表示的变压器状态指标权重计算

一般地, 对于变压器各运行数据, 若各指标数据差异越小, 说明该指标波动性越小, 也预示变压器运行状态变化较小; 反之, 若各指标数据差异越大, 说明该指标波动性越大, 也预示此变压器运行状态发生了较大变化。因此, 从变压器安全运行的角度考虑, 若指标数据波动性越大则应赋予其较大的权重。相反, 若指标数据波动性越小则应赋予其较小的权重。对于各指标数据波动性的衡量, 本文使用方差和平均差进行表示。

#### 4.3.1 变压器指标值归一化处理

由于变压器各指标间量纲不统一化、指标间无法进行直接比较。所以需要对各指标数据进行归一化。对于指标数据越小表明运行状况良好的评估指标, 如油中微水含量等, 采用式(12)进行归一化。

$$x_{nr} = \begin{cases} 0 & x_r \leq x_0 \\ \frac{x_r - x_0}{x_1 - x_0} & x_0 \leq x_r \leq x_1 \\ 1 & x_r > x_1 \end{cases} \quad (12)$$

对于指标数据越大表明运行状况良好的评估指标, 如油击穿电压等, 采用式(13)进行归一化。

$$x_{nr} = \begin{cases} 1 & x_r \leq x_1 \\ \frac{x_0 - x_r}{x_0 - x_1} & x_1 \leq x_r \leq x_0 \\ 0 & x_r > x_1 \end{cases} \quad (13)$$

式(12)、式(13)中:  $x_r$ 为各评价指标的实际测量值;  $x_{nr}$ 为归一化后的值;  $x_0$ 和 $x_1$ 为归一化的阈值,  $x_1$ 由变压器各运行规程确定, 表示评价指标的警戒值,  $x_0$ 为评价指标的出厂值。对归一化数据进行区间表示, 如图1所示, 图中横轴为各指标量, 纵轴表示各指标量的波动范围, 从图中可以看到指标 $c_1, c_5$ 变化明显, 而 $c_{10}$ 指标变化较小。

#### 4.3.2 基于区间表示的权重定义与计算

对于变压器运行数据可根据采集时间进行区间表示(本文间隔4次采集时间进行区间表示)。对于表示的变压器运行数据区间数 $\tilde{c}_{ij} = [c_{ij}^L, c_{ij}^H]$ , 可构成区间数矩阵 $\tilde{c} = [\tilde{c}_{ij}]_{m \times n}$ , 对区间矩阵进行标准化处理为 $\tilde{S} = [\tilde{s}_{ij}]_{m \times n}$ , 其中 $\tilde{s}_{ij} = [s_{ij}^L, s_{ij}^H]$ 。

$$s_{ij}^L = \frac{c_{ij}^L}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (c_{ij}^H)^2}} \quad (14)$$

$$s_{ij}^H = \frac{c_{ij}^H}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (c_{ij}^L)^2}} \quad (15)$$

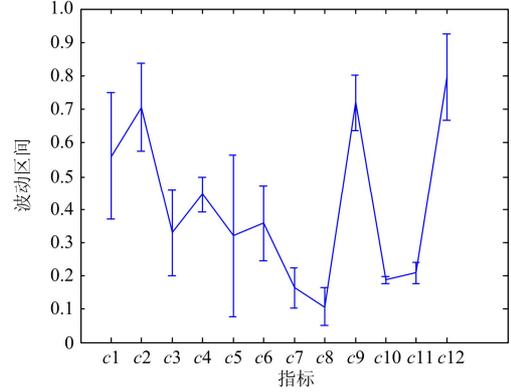


图1 变压器运行数据区间表示

Fig. 1 Range representation of the run data of the transformer

式(14)、式(15)中:  $c_{ij}^L$ 为指标数据区间表示的下界;  $c_{ij}^H$ 为指标数据区间表示的上界;  $s_{ij}^L$ 为指标数据标准化处理后区间表示的下界;  $s_{ij}^H$ 为指标数据标准化处理后区间表示的上界。在区间数表示下, 变压器各项指标标准差 $T$ 和平均差 $V$ 定义为

$$T_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \tilde{s}_{ij} w_j - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \tilde{s}_{kj} w_j \right)^2 = \quad (16)$$

$$w_j \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d^2(\tilde{s}_{ij}, \tilde{s}_j)$$

$$V_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \tilde{s}_{ij} w_j - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \tilde{s}_{kj} w_j \right) = \quad (17)$$

$$w_j \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d(\tilde{s}_{ij}, \tilde{s}_j)$$

式中,  $\tilde{s}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{s}_{ij}$ ,  $d(\tilde{s}_{ij}, \tilde{s}_j)$ 表示各指标平均值 $\tilde{s}_j$

与各区间指标值 $\tilde{s}_{ij}$ 的距离。

对于权重向量 $W$ 的计算, 应满足所有评价指标的总标准差和总平均差最大。为此, 构造如下目标函数:

$$\max F(w) = \sum_{j=1}^n (\alpha T_j + \beta V_j) = \sum_{j=1}^n w_j \left[ \frac{\alpha}{m} \sum_{i=1}^m d^2(\tilde{s}_{ij}, \tilde{s}_i) + \frac{\beta}{m} \sum_{i=1}^m d(\tilde{s}_{ij}, \tilde{s}_i) \right] \quad (18)$$

其中,  $\alpha + \beta = 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0$ 。 $\alpha, \beta$ 需根据试验进行调整。记 $\sigma_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d^2(\tilde{s}_{ij}, \tilde{s}_i), \delta_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d(\tilde{s}_{ij}, \tilde{s}_i)$ ,

因而, 求解指标权重向量  $W$  转变成如下问题:

$$\max F(w) = \sum_{j=1}^n (\alpha\sigma_j + \beta\delta_j) \quad (19)$$

解此模型, 最后得出指标权重向量  $W$  计算公式为

$$w_j = (\alpha\sigma_j + \beta\delta_j) / \sum_{j=1}^n (\alpha\sigma_j + \beta\delta_j) \quad (20)$$

调整  $\alpha, \beta$  的值, 求出数据最佳权重值并输出。

#### 4.4 变压器状态指标等级的确定

结合式(3)、式(9)求得变压器各项指标数据正态云云滴与第  $j$  级变压器状态的第  $i$  项评估指标的等级正态云关联度  $k_{ij}$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 12; j=1, 2, \dots, 4$ ), 计算出各项指标数据正态云与等级正态云之间的关联度, 得出评判矩阵  $D$ , 并利用权重向量  $W$  得出评判向量  $R = W \times D$ , 得出变压器当前所处状态。

### 5 实例分析

#### 5.1 指标权重的计算

某变压器型号ODFS-250 MVA/500 kV, 运行中试验记录如表2所示, 求取的各项指标的区间权重  $W$ :  
 油化试验 {0.1013, 0.0847, 0.0726, 0.0941};  
 电气试验 {0.10821, 0.0753, 0.1024, 0.1147};  
 油中溶解气体 {0.0832, 0.0653, 0.0571, 0.0672}。

#### 5.2 评判矩阵的确定

通过各指标数据正态云和等级正态云计算得到的各个指标的关联度得到评判矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} 7.00 \times 10^{-2} & 7.86 \times 10^{-1} & 2.14 \times 10^{-1} & 3.28 \times 10^{-6} \\ 9.31 \times 10^{-14} & 3.28 \times 10^{-1} & 6.72 \times 10^{-1} & 2.84 \times 10^{-8} \\ 1.01 \times 10^{-6} & 9.43 \times 10^{-1} & 5.70 \times 10^{-2} & 7.12 \times 10^{-10} \\ 2.23 \times 10^{-10} & 8.81 \times 10^{-1} & 1.19 \times 10^{-1} & 5.31 \times 10^{-14} \\ 2.37 \times 10^{-4} & 7.18 \times 10^{-4} & 8.25 \times 10^{-1} & 1.75 \times 10^{-1} \\ 7.36 \times 10^{-13} & 1.29 \times 10^{-11} & 9.13 \times 10^{-1} & 8.70 \times 10^{-2} \\ 7.90 \times 10^{-2} & 9.21 \times 10^{-1} & 5.28 \times 10^{-8} & 3.39 \times 10^{-11} \\ 7.19 \times 10^{-1} & 2.81 \times 10^{-1} & 7.32 \times 10^{-9} & 2.71 \times 10^{-6} \\ 8.01 \times 10^{-1} & 1.99 \times 10^{-1} & 2.39 \times 10^{-8} & 8.07 \times 10^{-6} \\ 7.32 \times 10^{-1} & 2.68 \times 10^{-1} & 7.51 \times 10^{-14} & 6.47 \times 10^{-7} \\ 5.16 \times 10^{-16} & 2.37 \times 10^{-1} & 7.73 \times 10^{-1} & 5.31 \times 10^{-10} \\ 6.23 \times 10^{-11} & 6.61 \times 10^{-1} & 3.39 \times 10^{-1} & 7.26 \times 10^{-10} \end{bmatrix}$$

其中,  $D_{ij}$  表示关于变压器状态指标  $j$  的运行数据对变压器状态指标等级  $i$  的关联度。

评判矩阵  $D$  与对应的权重向量  $W$  相乘即可得到评估矩阵  $R = WD = [0.2121, 0.4774, 0.2973, 0.0209]$ 。从结果  $r=0.4774$  可知该变压器状态评估为第2等级

注意状态与第3等级异常状态之间。在经过实际变压器进行停电检查发现, 此变压器油运行时间长, 绝缘油中分解出水分, 并且绝缘电阻吸收比、极化指数和总烃含量超标, 此变压器安全运行状况较差, 需要跟踪观察, 并且优先安排维修。

### 6 结论

本文针对现有的各类变压器各种评估, 只是通过少数数据来进行评估的特点, 通过对变压器运行数据扩展成数据正态云, 使数据的选取更具普适性和合理性。全面考虑变压器状态评估分级界限值的随机性和模糊性, 建立变压器等级正态云。将变压器运行数据表示成区间形式, 计算区间数的标准差和平均差, 确定各指标不同权重, 使得变压器状态各项指标权重的确定避免了专家经验的差异性以及主观随机性, 为实现准确的变压器综合评估提供了有力保障。通过仿真算例, 该方法不仅可以得到满意的综合评估结果, 而且模型算法简单、适应性较强、便于编程实现, 为变压器状态综合评估提供了一种新方法。

#### 参考文献

- [1] 徐小宁. 变电站主接线方式可靠性评估与方案优选[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 441-446.  
XU Xiaoning. Reliability assessment and optimization of main electrical connection of substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 441-446.
- [2] 廖瑞金, 刘捷丰, 杨丽君, 等. 电力变压器油纸绝缘状态评估的频域介电特征参量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 247-254.  
LIAO Ruijin, LIU Jiefeng, YANG Lijun, et al. Investigation on frequency domain dielectric characteristics for condition assessment of transformer oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 247-254.
- [3] 钱国超, 邹德旭, 颜冰, 等. 集成证据推理与多神经网络的电力变压器故障综合诊断[J]. 高压电器, 2015, 12(9): 71-76.  
QIAN Guochao, ZOU Dexu, YAN Bing, et al. Synthetic fault diagnosis for power transformers based on integration of evidence reasoning and neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 12(9): 71-76.
- [4] 郑蕊蕊, 赵继印, 吴宝春, 等. 基于加权灰靶理论的变压器绝缘状态分级评估方法[J]. 电工技术学报, 2008,

- 23(9): 60-66.
- ZHENG Ruirui, ZHAO Jiyin, WU Baochun, et al. Method for insulative condition classification evaluation of power transformer based on weight coefficient grey target theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(9): 60-66.
- [5] 王春宁, 耿志慧, 马宏忠, 等. 基于振动的电力变压器铁心松动故障诊断研究[J]. 高压电器, 2015, 20(12): 59-65.
- WANG Chunning, GENG Zhihui, MA Hongzhong, et al. Synthetic fault diagnosis for power transformers based on integration of evidence reasoning and neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 20(12): 59-65.
- [6] 王明松, 马鸿雁. 基于组态王的变电站运行状态在线监控系统设计与应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 484-489.
- WANG Mingsong, MA Hongyan. Design and application of running status of substation online monitoring system based on kingview[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 484-489.
- [7] 周淦, 徐智, 廖瑞金, 等. 基于云理论和核向量空间模型的变压器套管绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1101-1106.
- ZHOU Quan, XU Zhi, LIAO Ruijin, et al. Insulation condition assessment of power transformer bushing based on cloud model and kernel vector space model[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(7): 1101-1106.
- [8] 刘永欣, 师峰, 姜帅, 等. 智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 37-41.
- LIU Yongxin, SHI Feng, JIANG Shuai, et al. A fuzzy evaluation algorithm for condition monitoring of smart substation relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 37-41.
- [9] 李辉, 胡姚刚, 唐显虎, 等. 并网风电机组在线运行状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 33(4): 103-109.
- LI Hui, HU Yaogang, TANG Xianhu, et al. A matter-element assessment method of a grid-connected wind turbine driven generator system under on-line operating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 33(4): 103-109.
- [10] 廖瑞金, 张懿议, 黄飞龙, 等. 基于可拓分析法的变压器本体绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 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(12): 521-526.
- [11] 秦红霞, 武芳瑛, 彭世宽, 等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 35-40.
- QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 35-40.
- [12] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33, 6.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33, 6.
- [13] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 57-62.
- YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 57-62.
- [14] 廖瑞金, 郑含博, 杨丽君, 等. 基于集对分析方法的变压器绝缘状态评估策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 55-60.
- LIAO Ruijin, ZHENG Hanbo, YANG Lijun, et al. A power transformer insulation condition assessment method based on set pair analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 55-60.
- [15] 廖瑞金, 孟繁津, 周年荣, 等. 基于集对分析和证据理论融合的变压器内绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(13): 474-481.
- LIAO Ruijin, MENG Fanjin, ZHOU Nianrong, et al. Assessment strategy for inner insulation condition of power transformer based on set-pair analysis and evidential reasoning decision-making[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(13): 474-481.
- [16] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi

- synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- [17] 金恩淑, 马仲涛, 陈亚潇, 等. 基于电流差动原理的智能变电站层次化保护策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(3): 12-17.  
JIN Enshu, MA Zhongtao, CHEN Yaxiao, et al. The hierarchical protection strategy research of intelligent substation based on the principle of current differential[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(3): 12-17.
- [18] 张健康, 粟小华, 夏芸. 750 kV 变压器保护配置及整定计算探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 89-94.  
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, XIA Yun. Discussion on protection configuration and setting calculation for 750 kV transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 89-94.
- [19] 韩富春, 高文军, 廉建鑫, 等. 基于免疫优化多分类 SVM 的变压器故障诊断新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 106-110.  
HAN Fuchun, GAO Wenjun, LIAN Jianxin, et al. A novel approach based on multi-class support vector machine of immune optimization for transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 106-110.
- [20] 游子跃, 王宁, 李明明, 等. 基于 EEMD 和 BP 神经网络的风机齿轮箱故障诊断方法[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(1): 64-72.  
YOU Ziyue, WANG Ning, LI Mingming, et al. Method of an fault diagnosis of gearbox based on EEMD and BP neural network[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(1): 64-72.

---

收稿日期: 2015-11-18; 修回日期: 2016-01-15

作者简介:

杨杰明(1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向为文本分类和数据挖掘; E-mail: yjmlzy@sina.com

董玉坤(1990-), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为数据挖掘; E-mail: 358368724@qq.com

曲朝阳(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网, 数据挖掘。E-mail: 116150247@qq.com

(编辑 葛艳娜)