

# 基于改良三比值法的变压器故障基本信度分配计算方法

张卫华<sup>1</sup>, 苑津莎<sup>1</sup>, 王杉<sup>2</sup>, 张珂<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 广西电网公司南宁供电局, 广西 南宁 530031)

**摘要:** 为了解决三比值法诊断结果不能直接应用于故障基本信度分配函数的构造问题, 提出一种基于空间插值的变压器故障基本信度分配计算方法。根据有限元法基本原理, 在分析了三比值法定义的故障特征空间基础上, 按照各故障特征区域在空间几何上的分布特征对整个空间进行离散化, 最后利用空间插值得到整个空间连续的故障基本信度分配函数。所述方法能够满足基本信度分配函数的要求, 且计算结果定量地反映了各种故障发生的可能性。通过实例计算, 验证了该方法的正确性和工程实际应用的可行性。

**关键词:** 基本信度分配; 变压器; 故障诊断; 空间插值; 三比值法

## A calculation method for transformer fault basic probability assignment based on improved three-ratio method

ZHANG Weihua<sup>1</sup>, YUAN Jinsha<sup>1</sup>, WANG Shan<sup>2</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
2. Nanning Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530031, China)

**Abstract:** The diagnostic conclusions by three-ratio method cannot be directly applied to the construction of the basic probability assignment (BPA) function. In order to solve the problem, this paper proposes a calculation method for transformer fault BPA based on spatial interpolation. According to the basic principle of finite element method, the fault characteristic distribution of three-ratio codes in the spatial geometry is analyzed and the entire fault characteristic space is discretized, and finally the continuous BPA function of faults in the entire space is obtained using spatial interpolation. The method meets the requirements of BPA function, and its calculating result quantitatively reflects the probability of various faults. With examples calculation, the correctness and feasibility of this method in actual engineering projects are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61302163) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014MS104).

**Key words:** basic probability assignment (BPA); transformer; fault diagnosis; spatial interpolation; three-ratio method

中图分类号: TM41; TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0115-07

## 0 引言

证据体的基本信度分配<sup>[1]</sup>(Basic Probability Assignment, BPA)是D-S证据理论进行信息融合的基础,其数值不仅表示该证据体对结论支持的程度,而且通过对多个证据体的BPA数值进行有效融合,能够得到更准确合理的结论。因此,BPA计算是否

准确决定了最终结论的可信性,但D-S证据理论并没有给出计算BPA的具体方法,必须根据实际问题给出合理的函数定义公式。

目前,构造BPA函数的常见方法主要包括:(1)根据领域专家的经验给出合理的BPA函数定义<sup>[2-4]</sup>,但找到具有丰富经验的领域专家难度很大,而且不同的专家可能给出不同的建议,存在人为的主观性偏差;(2)由模糊数学中的隶属度函数给出<sup>[5-7]</sup>,但隶属度函数的设计同样存在很大的主观性;(3)由BP神经网络训练获得<sup>[8-10]</sup>,但BP神经网络存在固

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61302163); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014MS104)

有缺陷,包括设计合理的训练样本集、初始权值的设定等问题,使得计算结果具有很大的不确定性;

(4) 基于“典型样本”的 BPA 函数构造方法<sup>[11]</sup>,但对于像变压器故障诊断这样的复杂问题,确定每种故障模式对应的“典型样本”难度较大。

油中溶解气体分析(Dissolved gas analysis, DGA)是对油浸式变压器进行故障诊断最方便、有效的手段之一,能够比较准确、可靠地发现逐步发展的潜伏性故障,防止由此引起重大事故<sup>[12]</sup>。其中改良三比值法(本文简称三比值法)作为国标推荐的判断油浸式变压器故障类型的主要方法,在工程实践中有着广泛应用。其优点包括:(1) 三比值法具有较高的故障诊断准确率。根据文献<sup>[13]</sup>,对 314 台故障变压器油中溶解气体样本进行分析判断,其准确率为 97.1%;(2) 使用三比值法能够得到明确的诊断结果,不会产生模棱两可的结论;(3) 应用方便,利于在工程实际中使用。因此,三比值法可以认为是规范化的领域专家经验。

作为应用最广泛的变压器故障诊断方法之一,三比值法得到的诊断结论不能直接应用于 D-S 证据理论合成,其确定的故障模式值域为 {0,1},即只有“是”和“否”两种情况,非此即彼,不能反映信任程度强弱变化的规律,且目前尚未见到有文献研究三比值法 BPA 函数的构造问题。针对此问题,本文通过对三比值法故障模式的空间特征分布进行分析,在此基础上应用空间插值技术构造了满足要求的 BPA 函数,该函数在三维空间上连续且计算结果能够反映故障发生的可信程度,从而扩展了三比值法的应用范围,具有很好的实用性。

## 1 基本信度分配函数

定义<sup>[14]</sup>: 设  $\Theta$  为一识别框架,  $A$  是  $\Theta$  的子集,若函数  $m:2^\Theta \rightarrow [0,1]$  ( $2^\Theta$  为  $\Theta$  的所有子集), 满足:

$$\begin{cases} m(\Phi) = 0 \\ \sum_{A \in \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

则称  $m(A)$  为  $A$  的基本信度分配(也称基本概率分配),它表示对  $A$  的精确信任。证据理论对于基本信度分配函数的定义只给出了构造条件,而满足这样条件的函数有无穷多种,构造方式也不唯一,在应用中需要按照研究问题的实际情况定义。

## 2 基于三比值法构造基本信度分配函数

### 2.1 基本原理

三比值法是在对大量故障样本进行统计分析后

得到的经验或知识,其基本原理是根据充油变压器内油、绝缘纸在故障下裂解产生气体组分含量的相对浓度与温度的相互依赖关系,从五种特征气体中选择两种溶解度和扩散系数相近的气体组分组成 3 对比值,在其坐标下形成了较规则的故障特征区域,以不同的编码表示故障区域,根据比值的编码判断变压器所属的故障类型。这种方法消除了油的体积效应的影响,多年来一直是诊断变压器故障的主要方法之一<sup>[15]</sup>。三比值法的编码规则及故障类型对照请参考文献<sup>[16]</sup>。

根据三比值法对故障模式的分类,本文将变压器故障模式分为:低温过热(低于 150 °C)、低温过热(150~300 °C)、中温过热(300~700 °C)、高温过热(高于 700 °C)、局部放电、电弧放电、电弧放电兼过热、低能放电、低能放电兼过热、未定义故障模式 1(编码为“000”)和未定义故障模式 2(编码为“010”)等 11 类,用  $A_1, \dots, A_{11}$  表示,因此,定义变压器故障模式识别框架  $\Theta = \{A_1, \dots, A_{11}\}$ 。另外,根据三比值故障特征的定义,上述 11 种故障模式并无重叠情况,所以有  $Card(A) \geq 2$  时,  $m(A) = 0$ ,即具有两个以上元素的子集的 BPA 数值为 0。因此,设  $x = C_2H_2/C_2H_4$ 、 $y = CH_4/H_2$ 、 $z = C_2H_4/C_2H_6$ ,基于三比值法的故障 BPA 函数定义为

$$\begin{cases} m_i(A_i) = f_i(x, y, z) \\ \sum_{i=1}^{11} m_i(A_i) = 1 \end{cases} \quad (i=1, \dots, 11) \quad (2)$$

其中,  $f_i(x, y, z): (x, y, z) \rightarrow [0,1]$ , 是故障模式  $A_i$  对应的 BPA 函数。可以看出,  $m_i(A_i) = 0$  表示样本数据完全不支持发生了  $A_i$  故障,  $m_i(A_i) = 1$  表示样本数据完全支持发生了  $A_i$  故障,而函数取值介于 0 与 1 之间时,表示样本数据对发生故障模式  $A_i$  的支持程度也介于二者之间,且取值越大,支持程度越高。另外,函数还需满足对同一样本的所有故障 BPA 取值之和等于 1。

如图 1 所示,三比值法定义的每一种故障模式对应三维空间中的一个长方体形特征区域,当样本数据坐标处于特征区域内则被判断属于该故障类型。可以看出,故障模式之间存在一个明确的分界面,因此,当样本数据的坐标处于分界面上时,发生这两种故障的可能性相同,当样本数据的坐标远离故障分界面时,则属于对应故障的可能性越高。据此,可建立如下规则:(1) 各故障特征区域的长方体中心处属于该故障的可能性最高,其相应的 BPA 数值为 1,其他故障模式的 BPA 值为 0;(2) 在两类故障特征区域交界面上的点由于发生这两类故

障的可能性相同, 其 BPA 数值均为 0.5; (3) 多个故障特征区域连接的交点处, 根据围绕该交点的各类故障特征区域所占立体角的比例设定 BPA 数值。

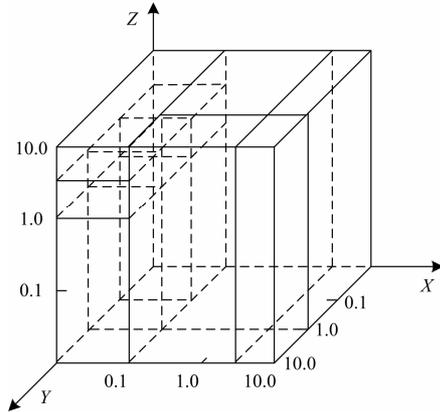


图 1 三比值法的故障特征空间

Fig. 1 Fault characteristic spaces of three-ratio method

基于上述规则, 在确定了关键位置的 BPA 值后, 引入有限元分析基本思想, 应用空间插值技术, 在三维空间上建立连续的 BPA 函数, 其基本思路如下。

首先, 按照三比值法的故障特征空间分布, 对三维空间进行离散化, 离散化的原则是: (1) 采用长方体单元对空间进行剖分。为便于设定单元顶点处的 BPA 值, 单元的顶点应与各故障特征区域的中心重合或处于故障区域交界面等关键位置; (2) 各长方体单元只在节点处连接。这样将整个空间划分为多个长方体单元, 离散化后的空间分布如图 2 所示。

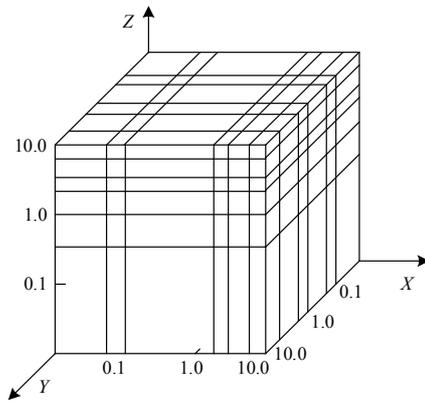


图 2 故障模式特征空间的离散化

Fig. 2 Discretization of fault characteristic spaces

其次, 根据前述的 BPA 的设定规则, 设置各长方体单元节点的故障模式 BPA 数值。

最后, 对于空间中的任何一点, 取出其所在的长方体单元, 利用该单元节点位置的各故障模式 BPA 数值, 通过八节点六面体单元的插值方法可计

算出该点对应的各故障模式 BPA 数值。

根据有限元的基本原理, 这样通过空间离散化然后插值得到的 BPA 函数在整个空间是连续的<sup>[17]</sup>。

## 2.2 八节点六面体的空间插值<sup>[17]</sup>

故障模式空间进行离散化后每个单元都是一个八节点六面体单元, 如图 3 所示。根据有限元分析原理, 单元内场函数的计算可以用节点数值插值表达, 因此, 根据单元各节点处的坐标和故障 BPA 数值能够计算单元内任一点的故障 BPA 数值, 其公式为

$$m_j = \sum_{k=1}^8 N_k u_{k,j} \quad (j=1, \dots, 11) \quad (3)$$

式(3)中:  $m_j$  为故障模式  $A_j$  的 BPA 数值;  $u_{k,j}$  为六面体单元第  $k$  节点故障模式  $A_j$  的 BPA 数值;  $N_k$  为形函数, 按照式(4)计算。

$$N_k(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi_k \xi)(1 + \eta_k \eta)(1 + \zeta_k \zeta) \quad (4)$$

$$(k=1, \dots, 8)$$

式(4)中,  $(\xi, \eta, \zeta)$  为样本数据坐标变换后的局部坐标值。局部坐标的原点取在单元的形心, 坐标轴的方向与原直角坐标方向一致, 局部坐标与原坐标之间的关系为

$$\begin{cases} \xi = \frac{1}{a}(x - x_0), x_0 = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}, a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \\ \eta = \frac{1}{b}(y - y_0), y_0 = \frac{y_{\max} + y_{\min}}{2}, b = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} \\ \zeta = \frac{1}{c}(z - z_0), z_0 = \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2}, c = \frac{z_{\max} - z_{\min}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$(\xi_k, \eta_k, \zeta_k)$  为六面体单元的 8 个顶点的局部坐标。

标。

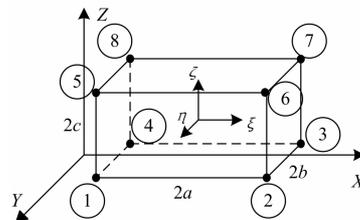


图 3 八节点六面体单元插值模型

Fig. 3 Interpolation model of 8 nodes and hexahedron element

## 2.3 构造变压器故障基本信度分配函数

根据上述的基本原理, 构造故障模式 BPA 函数

的步骤如下。

(1) 根据三比值法建立三维立体空间, 根据各比值定义的范围, 不妨设各坐标取值区间为[0,10], 当比值大于 10 时取作 10, 则各故障模式对应的特征区域坐标如表 1 所示。

表 1 变压器故障模式特征空间

Table 1 Transformer fault mode characteristic space

故障模式	x 范围	y 范围	z 范围
A <sub>1</sub>	0≤x<0.1	0.1≤y<1	1≤z<3
A <sub>2</sub>	0≤x<0.1	1≤y≤10	0≤z<1
A <sub>3</sub>	0≤x<0.1	1≤y≤10	1≤z<3
A <sub>4</sub>	0≤x<0.1	0≤y≤10	3≤z≤10
A <sub>5</sub>	0≤x<0.1	0.1≤y<1	0≤z<1
A <sub>6</sub>	3≤x≤10	0≤y<1	0≤z≤10
A <sub>7</sub>	3≤x≤10	1≤y≤10	0≤z≤10
A <sub>8</sub>	0.1≤x<3	0≤y<1	0≤z≤10
A <sub>9</sub>	0.1≤x<3	1≤y≤10	0≤z≤10
A <sub>10</sub>	0≤x<0.1	0.1≤y<1	0≤z<1
A <sub>11</sub>	0≤x<0.1	0≤y<0.1	1≤z<3

(2) 将整个空间离散化, 剖分为小的长方体单元, 按照前述的剖分原则, 将三个坐标的取值范围分别划分为 6 个区间, 划分后 x 的 6 个区间为: [0, 0.05]、[0.05, 0.1]、[0.1, 1.55]、[1.55, 3]、[3, 6.5]、[6.5, 10]; y 的 6 个区间为: [0, 0.05]、[0.05, 0.1]、[0.1, 0.55]、[0.55, 1]、[1, 5.5]、[5.5, 10]; z 的 6 个区间为: [0, 0.5]、[0.5, 1]、[1, 2]、[2, 3]、[3, 6.5]、[6.5, 10], 这样, 整个空间被划分为 216 个长方体单元, 具有 343 个节点。

(3) 确定所有节点处的 BPA 数值, 确定方法为: 围绕该节点的各类故障特征区域所占立体角的比例, 用向量  $U_i=(u_{i,1}, u_{i,2}, \dots, u_{i,11})$  表示 i 节点处的故障 BPA 数值, 其中  $u_{i,j}(j=1,2,\dots,11)$  为第 i 节点第 j 类故障模式相应的 BPA 数值; 例如坐标(0.1,0.1,3)处节点, 围绕该节点的 8 个单元的故障模式分别为 A<sub>1</sub>(1 个单元)、A<sub>4</sub>(2 个单元)、A<sub>7</sub>(4 个单元)、A<sub>10</sub>(1 个单元), 因此, 该节点的故障 BPA 数值向量  $U=(0.125,0,0,0,0.25,0,0,0.5,0,0,0.125,0)$ 。

(4) 最后, 对于待诊样本, 判断出其所处的长方体单元, 并根据此单元所有节点处的故障 BPA 数值插值得到样本所对应的 BPA 数值。其具体过程如下。

(a) 计算待判别的油中溶解气体样本(五种气体组份: H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)的三组比值,

并检查比值范围, 当比值大于 10 时取作 10;

(b) 确定该样本比值坐标所处的长方体单元, 并取出该单元 8 个节点相应的 BPA 值, 得到向量组  $U_k=(u_{k,1}, u_{k,2}, \dots, u_{k,11})$ , (k=1, ..., 8);

(c) 按照式(5)计算样本数据的局部坐标  $(\xi, \eta, \zeta)$ , 并代入式(4)计算形函数  $N_k$ , 将  $N_k$ 、 $u_{k,j}$  代入式(3)计算各故障模式 BPA 值向量  $M'=(M'_1, M'_2, \dots, M'_{11})$ ;

(d) 根据上述插值过程得到的 BPA 值  $M'$ , 原理上可以保证计算结果满足 BPA 函数的归一化要求, 但在计算过程中存在舍入误差, 故须对计算的 BPA 值归一化处理, 处理方法为

$$m_j = \frac{m'_j}{\sum_{i=1}^{11} m'_i} \quad (j=1, \dots, 11) \quad (6)$$

最后, 得到该油气样本对应的各故障模式 BPA 向量  $M=(m_1, m_2, \dots, m_{11})$ 。

### 3 计算实例

某电力变压器油中溶解气体样本<sup>[18]</sup>数据为(单位: μL/L): H<sub>2</sub>(292.36)、CH<sub>4</sub>(981.2)、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(300.11)、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(1 493.65)、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(4.38)。按照本文所述方法计算各故障模式的 BPA, 过程如下。

(1) 按照 2.3 节中的方法对三维空间进行剖分, 并计算 216 个长方体单元共 343 个节点处的故障 BPA 数值。

(2) 计算得到该样本的空间坐标为(0.002 9, 3.356 1, 4.977 0)。

(3) 判断该样本所处的长方体单元为 x: [0, 0.05]、y: [1, 5.5]、z: [3, 6.5], 按照图 3 所示的节点顺序取出此单元各节点的 BPA 值和对应的局部坐标, 如表 2 所示。

表 2 单元节点处的基本信度分配

Table 2 BPA of element nodes

节点	局部坐标	基本信度分配向量
1	(-1, 1, -1)	$U_1=(0.,0.,0.5,0.5,0.,0.,0.,0.,0.,0.)$
2	(1, -1, -1)	$U_2=(0.,0.,0.5,0.5,0.,0.,0.,0.,0.,0.)$
3	(1, 1, -1)	$U_3=(0.25,0.,0.25,0.5,0.,0.,0.,0.,0.,0.)$
4	(-1, -1, -1)	$U_4=(0.25,0.,0.25,0.5,0.,0.,0.,0.,0.,0.)$
5	(-1, 1, 1)	$U_5=(0.,0.,0.,1.,0.,0.,0.,0.,0.,0.)$
6	(1, -1, 1)	$U_6=(0.,0.,0.,1.,0.,0.,0.,0.,0.,0.)$
7	(1, 1, 1)	$U_7=(0.,0.,0.,1.,0.,0.,0.,0.,0.,0.)$
8	(-1, -1, 1)	$U_8=(0.,0.,0.,1.,0.,0.,0.,0.,0.,0.)$

(4) 按照式(5)计算该样本的局部坐标为(-0.882 7, 0.047 2, 0.129 7), 按照式(4)计算对应的形函数  $N_k$ ,

得:  $N_1=0.2145$ ,  $N_2=0.01216$ ,  $N_3=0.01336$ ,  $N_4=0.1952$ ,  $N_5=0.2784$ ,  $N_6=0.01579$ ,  $N_7=0.01735$ ,  $N_8=0.2533$ 。

(5) 将  $N_k$  和  $u_{k,j}$  数据代入式(3), 计算得到该样本的 BPA 向量  $M'=(0.0521, 0, 0.1654, 0.7824, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 。

(6) 将计算结果代入式(6)进行归一化处理, 最终得到该样本数据的 BPA 向量  $M=(0.0521, 0, 0.1654, 0.7825, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ , 该结果表明, 样本数据对  $A_4$  的支持程度最高为 0.7825, 明显高于其他故障模式的 BPA 数值, 因此发生  $A_4$  故障的可能性最高。

该样本的实际故障为通流回路存在 700 °C 的高温过热, 计算结果与实际故障类型一致。

#### 4 分析与讨论

(1) 本文提出的基于三比值法的变压器故障基本信度分配计算函数, 其基本思路来源于有限元分析基本原理, 其定义的变压器故障 BPA 函数在三维空间上是连续的, 图 4 显示了该方法定义的 BPA 函数的三维空间分布情况, 可以看出, 当故障样本的坐标处于两类故障的分界面上时, 对应的 BPA 函数取值为 0.5, 而坐标远离故障分界面逐渐接近故障特征区域的中心时, BPA 的值逐渐增大至 1。除此之外, 空间中任何一点处的所有故障模式 BPA 取值之和等于 1。因此本文方法得到的函数能够满足 BPA

函数的要求, 并且很好地表现了故障信度的变化规律。表 3 所示的是使用该方法计算的部分实际工程样本的 BPA 结果, 进一步证实了方法的有效性。

(2) 通过实例计算可知, 如果按照本文规则构造 BPA 函数, 则对于同一样本其计算结果是稳定的。这是因为对三比值法故障特征空间进行剖分得到的长方体单元及其节点是确定的, 而所有节点处的 BPA 数值按照规则也能够完全确定下来, 则整个空间所有位置的 BPA 数值就可根据其所在单元所有节点处的 BPA 数值插值得到, 而插值的计算过程也是确定的。

(3) 本文提出的方法不是一种变压器故障诊断的新方法, 而是三比值法为基础的变压器故障基本信度分配函数构造方法, 所以其诊断结果与三比值法是一致的, 但其计算结果为每种故障模式添加了一个 BPA 数值用以表示发生该故障的可能性程度, 这样, 就可以应用 D-S 证据理论将该结果与其他变压器故障诊断方法得到的诊断结果进行有效的信息融合, 得到更全面准确的诊断结果, 因此, 本文方法扩展了三比值法的应用范围。而对于其他的规范性故障诊断方法, 如大卫三角形法、立体图示法等, 可以借鉴本文的基本思想, 通过相应的故障特征空间分析, 在对其特征空间进行结构离散化基础上应用插值方法从而得到对应的 BPA 函数。

表 3 故障样本的基本信度分配计算  
Table 3 Calculation for BPA of fault samples

序号	故障样本( $\mu\text{L/L}$ )					实际故障	故障 BPA
	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2		
1	32	50	91	11	0	$A_2$	(0,0.563,0,0,0,0,0,0,0,0.438,0)
2	44	202	110	220	0	$A_3$	(0.101,0,0.899,0,0,0,0,0,0,0,0)
3	34	96.2	30.6	94.7	0	$A_4$	(0.144,0,0.342,0.514,0,0,0,0,0,0,0)
4	40.47	123.28	44.29	191.84	0	$A_4$	(0.084,0,0.225,0.69,0,0,0,0,0,0,0)
5	118.8	312.2	84.8	472.2	2.9	$A_4$	(0.04,0,0.093,0.867,0,0,0,0,0,0,0)
6	327.9	439.7	55.9	481.4	13.3	$A_4$	(0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0)
7	56	23.61	3.9	32.23	12.5	$A_6$	(0,0,0,0.401,0,0.599,0,0,0,0,0)
8	95	39.86	5.6	63.98	61.66	$A_6$	(0,0,0,0.202,0,0.798,0,0,0,0,0)
9	90.46	17.23	1.54	4.93	9.14	$A_6$	(0,0,0,0,0,0.895,0,0.105,0,0,0)
10	115.4	18.7	3.5	32.8	114.7	$A_8$	(0,0,0,0,0,0.429,0,0.571,0,0,0)

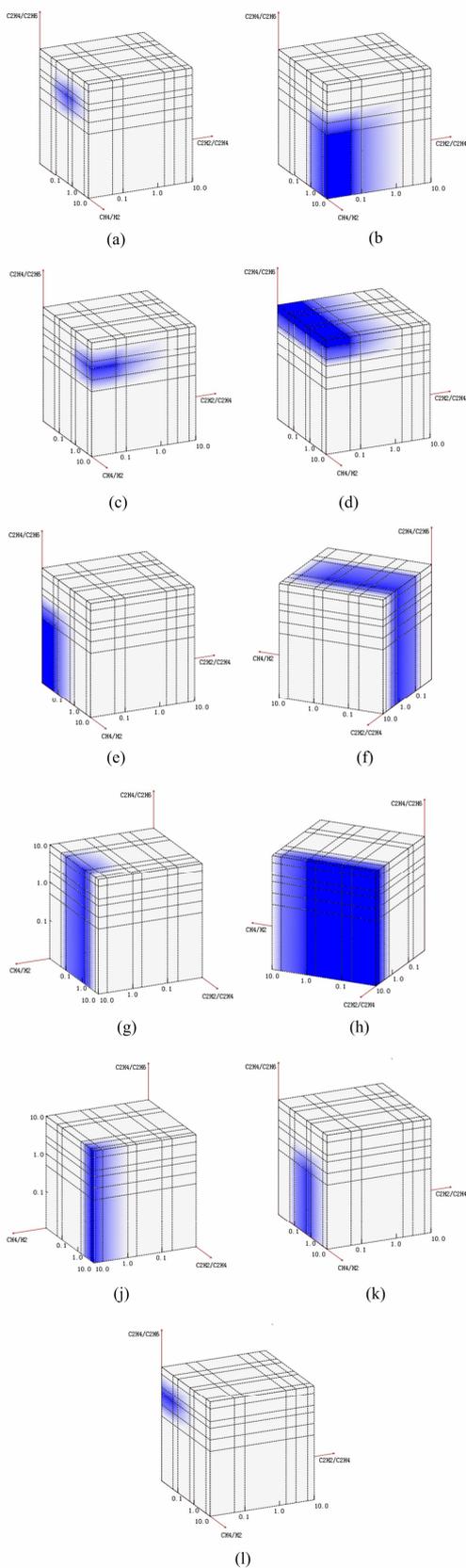


图 4 各种故障模式的基本信度分配函数分布  
 Fig. 4 BPA function distribution of all fault modes

### 5 结论

针对三比值法的诊断结果不能直接进行 D-S 证据融合的问题，提出一种应用空间插值技术构造基于三比值法的 BPA 函数方法。采用离散化的思想将三比值法的故障特征空间剖分为小长方体单元，并通过八节点六面体单元的插值公式计算空间中任一点处的 BPA 数值，保证了函数在空间上的连续性。该方法计算结果能够定量地反映发生各种故障模式的可能性程度，并且满足 BPA 函数的要求，从而扩展了三比值法的应用范围。实例计算表明，该方法计算结果准确并具有实际应用的可行性。

### 参考文献

[1] 杨露菁, 余华. 多源信息融合理论与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 49-56.

[2] 尚勇, 闫春江, 严璋, 等. 基于信息融合的大型油浸式电力变压器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 115-118.  
 SHANG Yong, YAN Chunjiang, YAN Zhang, et al. Synthetic insulation fault diagnostic model of oil-immersed power transformers utilizing information fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 115-118.

[3] 吴耀武, 娄素华, 卢斯煜, 等. 基于改进的 D-S 证据理论的中长期负荷预测方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 157-162.  
 WU Yaowu, LOU Suhua, LU Siyu, et al. The medium and long-term load forecasting based on improved D-S evidential theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 157-162.

[4] 高振兴, 郭创新, 俞斌, 等. 基于多源信息融合的电网故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 17-23.  
 GAO Zhenxing, GUO Chuangxin, YU Bin, et al. Study of a fault diagnosis approach for power grid with information fusion based on multi-data resources[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 17-23.

[5] 张钧, 何正友, 臧天磊. 一种基于 D-S 证据理论和稳态量的配电网故障选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 49-55.  
 ZHANG Jun, HE Zhengyou, ZANG Tianlei. A fault phase selection approach in neutral non-effectively grounded system based on D-S evidence theory and stationary component[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 49-55.

[6] HAN D Q. Multiple classifiers fusion based on weighted

- evidence combination[C] // IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, China: IEEE, 2007: 2138-2143.
- [7] 康兵义, 李娅, 邓勇, 等. 基于区间数的基本概率指派生成方法及应用[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1092-1096.  
KANG Bingyi, LI Ya, DENG Yong, et al. Determination of basic probability assignment based on interval numbers and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1092-1096.
- [8] 熊浩, 杨俊, 李卫国, 等. 多种类证据体的变压器故障综合诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 24-30.  
XIONG Hao, YANG Jun, LI Weigu, et al. Application of evidence theory to power transformer faults synthesized diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 24-30.
- [9] 程加堂, 艾莉, 段志梅. 改进证据理论与神经网络集成的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 92-96.  
CHENG Jiatang, AI Li, DUAN Zhimei. Transformer fault diagnosis based on improved evidence theory and neural network integrated method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 92-96.
- [10] 侯新国, 吴正国, 夏立. 基于D-S证据理论的感应电动机转子故障诊断方法研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(6): 36-41.  
HOU Xinguo, WU Zhengguo, XIA Li. Rotor fault diagnosis method of induction motor based on D-S evidential theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(6): 36-41.
- [11] 杨静, 田亮, 赵爱军, 等. 基于典型样本的证据理论信度函数分配构造方法[J]. 华北电力大学学报, 2008, 34(5): 70-72.  
YANG Jing, TIAN Liang, ZHAO Aijun, et al. Approach for constructing the confidence function distribution of evidence theory based on typical sample[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 34(5): 70-72.
- [12] LIAO R J, BIAN J P, YANG L J, et al. Forecasting dissolved gases content in power transformer oil based on weakening buffer operator and least square support vector machine-Markov[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(2): 142-151.
- [13] 操敦奎. 变压器油色谱分析与故障诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 93-99.
- [14] 杨风暴, 王肖霞. D-S 证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [15] 张卫华, 苑津莎, 张铁峰, 等. 应用B样条理论改进的变压器三比值故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4129-4136.  
ZHANG Weihua, YUAN Jinsha, ZHANG Tiefeng, et al. An improved three-ratio method for transformer fault diagnosis using B-spline theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4129-4136.
- [16] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T 722-2000 变压器油中溶解气体和判断导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [17] 赵均海, 汪梦甫. 弹性力学及有限元[M]. 2 版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2008: 173-175.
- [18] 赵荣. 一起 110 kV 变压器油色谱数据异常分析及处理[J]. 变压器, 2012, 49(7): 71-72.

收稿日期: 2014-05-13; 修回日期: 2014-11-20

作者简介:

张卫华(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向为智能信息处理; E-mail: zwhhdbd@126.com

苑津莎(1957-), 男, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理、智能电网、信息系统与信息安全。

(编辑 姜新丽)