

基于云物元分析原理的电力变压器故障诊断方法研究

谢庆¹, 彭澎², 唐山³, 李燕青¹, 郑娜¹, 律方成¹

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003; 2. 广东深圳供电公司, 广东 深圳 518020; 3. 广东大亚湾核电运营管理有限责任公司, 广东 深圳 518124)

摘要: 变压器油中溶解气体分析(DGA)是电力变压器故障诊断的重要方法。针对物元理论变压器故障诊断方法中,在建立故障模式物元模型时没有考虑边界值的不确定性的不足,首次在变压器故障诊断研究方面引入云模型,结合云模型的不确定推理特性以及物元理论能同时进行定性定量分析问题的优点,提出了一种基于云物元分析原理和 DGA 相结合的电力变压器故障诊断新方法。通过建立变压器故障诊断的云物元模型和计算特征云物元与标准云物元之间的关联函数,实现对变压器故障模式的有效识别。实例分析验证了方法的正确性和有效性。

关键词: 电力变压器; DGA; 云模型; 云物元分析原理; 故障诊断

中图分类号: TM41

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0074-04

Study on Fault Diagnosis for Power Transformer Based on Cloud Matter Element Analysis Principle and DGA

XIE Qing¹, PENG Peng², TANG Shan³, LI Yan-qing¹, ZHENG Na¹, LÜ Fang-cheng¹

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, North China Electric Power University, Ministry of Education, Baoding 071003, China; 2. Guangdong Shenzhen Electric Power Bureau, Shenzhen 518020, China; 3. Guangdong Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd., Shenzhen 518124, China)

Abstract: Dissolved gas-in-oil analysis (DGA) is an important method to find the hidden or incipient insulation faults of oil-immersed power transformer. Matter element theory was employed to research the fault diagnosis of transformer with qualitative and quantity advantages. However, the method did not consider the uncertain essence of the fault diagnosis of transformer. And in the fact, there were two uncertain characteristic in it, random and fuzzy. Hence a new fault diagnosis method is presented in this paper. The method has two advantages of considering two uncertain characteristic and realizing fault diagnosis qualitatively and quantitatively based on cloud model and matter element theory. By building the cloud matter element models of transformer fault diagnosis and calculating the correlation function of feature matter element models and standard ones, fault modes of transformer are identified effectively. Then, the results of examples research indicate the method is effective.

Key words: power transformer; dissolved gas-in-oil analysis(DGA); cloud model; cloud matter element analysis principle; fault diagnosis

0 引言

在电力变压器故障诊断各种方法中,油中溶解气体分析(DGA)是目前广泛使用的方法之一,被作为各种故障诊断的特征量^[1]。

近年来,多种方法被广泛应用到电力变压器故障诊断领域中,主要有贝叶斯网络分类器^[2]、专家系统^[3]、模糊数学^[4,5]、粗糙集理论^[6,7]、支持向量机^[8]、

灰色理论^[9]、证据推理^[10]、多神经网络^[11]、核可能性聚类^[12]、物元理论^[13,14]等方法,它们中的一种或几种集成的方法被应用于电力变压器绝缘诊断中,并取得了较好的诊断效果。其中,文^[13,14]基于物元理论较好地定性和定量两个方面研究了变压器故障诊断问题,效果良好。但是,该方法在建立变压器故障模式标准物元模型时,没有考虑边界的不确定性,这种处理实质是将故障诊断视为一个确定性的数学模型,这对于内部结构复杂和故障机理多样的

收稿日期:2009-06-25; 修回日期:2009-08-18

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0515)。

作者简介:谢庆(1979),男,博士研究生,主要从事电气设备在线监测与故障诊断的研究工作。

电力变压器而言,是一个不够完善的模型。

笔者首次在电气设备故障诊断方面引入云模型,结合云模型的双重不确定推理特性以及物元理论定性、定量分析问题的优点,提出了一种基于云物元分析原理和DGA的变压器故障诊断新方法。该方法充分考虑了变压器故障诊断的不确定性,实现了对变压器故障模式的有效识别。

1 云模型

云模型^[15-17]是由中国学者李德毅院士提出的一种新的数学理论。云模型反映宇宙中事物或人类知识中的两种不确定性:模糊性(边界的亦此亦彼性)和随机性(发生的概率),它把模糊性和随机性完全集成在一起,采用统一的数学表达式加以描述,从而研究自然界的双重不确定性现象的普遍规律。

1.1 云模型的基本概念

设 U 是一个精确数值量的集合 $U=\{x\}$,称为论域。 T 是与 U 相联系的语言值。 U 中的元素 x 对于 T 所表达的定性概念的隶属度 $C_T(x)$ (或称 x 与 T 的相容度)是一个具有稳定倾向的随机数,隶属度在论域上的分布称为隶属云,简称云。

$C_T(x)$ 在 $[0,1]$ 中取值,云是从论域 U 到区间 $[0,1]$ 的映射,即

$$C_T(x): U \rightarrow [0,1]$$

$$\forall x \in U \quad x \rightarrow C_T(x)$$

1.2 云模型的数字特征

云模型可以分为正态云模型、梯形云模型和矩形云模型等,而其中正态云模型是最基本也是应用最广泛的云模型之一,笔者基于正态云模型进行改进。正态云模型可用3个数字特征来刻画:期望值 E_x (Expected Value)、熵 E_n (Entropy)和超熵 H_e (Hyper Entropy)。

期望值 E_x :是属性在论域中的中心值,是最能够代表这个属性,换句话说,它100%地隶属于这个属性。

熵 E_n :是属性概念模糊度的量度,反映了在论域中可被这个属性所接受的数值范围,体现了属性概念亦此亦彼性的裕度。熵越大,越模糊。

超熵 H_e :是熵的不确定性的度量,反映了云滴的离散程度。超熵越大,云滴离散度越大,隶属度的随机性也越大。它反映属性样本出现的随机性,揭示了模糊性和随机性的关联性。

1.3 云模型的代数运算法则

给定论域 U 上的两个云 $C_1(E_{x_1}, E_{n_1}, H_{e_1})$ 、 $C_2(E_{x_2}, E_{n_2}, H_{e_2})$,令 C_1 与 C_2 代数运算的结果为 C

(E_x, E_n, H_e) ,运算法则如下。

加法:

$$E_x = E_{x_1} + E_{x_2} \quad (1)$$

$$E_n = \sqrt{E_{n_1}^2 + E_{n_2}^2} \quad (2)$$

$$H_e = \sqrt{H_{e_1}^2 + H_{e_2}^2} \quad (3)$$

减法:

$$E_x = E_{x_1} - E_{x_2} \quad (4)$$

$$E_n = \sqrt{E_{n_1}^2 + E_{n_2}^2} \quad (5)$$

$$H_e = \sqrt{H_{e_1}^2 + H_{e_2}^2} \quad (6)$$

乘法:

$$E_x = E_{x_1} E_{x_2} \quad (7)$$

$$E_n = |E_{x_1} E_{x_2}| \times \sqrt{\left(\frac{E_{n_1}}{E_{x_1}}\right)^2 + \left(\frac{E_{n_2}}{E_{x_2}}\right)^2} \quad (8)$$

$$H_e = |E_{x_1} E_{x_2}| \times \sqrt{\left(\frac{H_{e_1}}{E_{x_1}}\right)^2 + \left(\frac{H_{e_2}}{E_{x_2}}\right)^2} \quad (9)$$

除法:

$$E_x = \frac{E_{x_1}}{E_{x_2}} \quad (10)$$

$$E_n = \frac{E_{x_1}}{E_{x_2}} \times \sqrt{\left(\frac{E_{n_1}}{E_{x_1}}\right)^2 + \left(\frac{E_{n_2}}{E_{x_2}}\right)^2} \quad (11)$$

$$H_e = \frac{E_{x_1}}{E_{x_2}} \times \sqrt{\left(\frac{H_{e_1}}{E_{x_1}}\right)^2 + \left(\frac{H_{e_2}}{E_{x_2}}\right)^2} \quad (12)$$

2 云物元分析原理

2.1 云物元模型的建立

物元理论^[18]是由中国学者蔡文等人创立的,它采用了形式化的工具,是从定性和定量两个角度去研究解决矛盾问题的规律和方法。物元理论将事物名称 N ,特征 c 和关于特征的量值 ν 组成有序三元组作为描述事物 $R=(N, c, \nu)$ 的基本元(简称物元),然后利用关联函数来刻画特征物元与标准云物元之间的关系。

传统物元模型所建立的标准云物元中 ν 是一个数值,其关联函数的计算也是基于确定数值之间而推导的。而实际情况中, ν 有可能是一个不确定的值, ν 附近的数值具有亦此亦彼性,即模糊性;同时,统计规律显示, ν 有时应该在一个相对稳定的范围,且服从某种分布,即随机性。因此,如果仍然采用一个确定数值来建立物元并计算关联函数显然是不够完善的。

云模型是一种反映宇宙中事物或人类知识中的双重不确定性的数学理论。云模型通常表示为 (E_x, E_n, H_e) ,其数学本质就是考虑了期望值 E_x 邻域的双重不确定性,用来衡量定性概念模糊程度, H_e 反映

代表样本出现的随机性。通过这 3 个值的定义,就可以用云模型来替代 ν 值,云物元模型为

$$\begin{bmatrix} N & c_1 & (E_{x_1}, E_{n_1}, H_{e_1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & (E_{x_n}, E_{n_n}, H_{e_n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.2 云物元关联函数

基于云物元模型的关联函数,可分为以下两种情况^[18]。

2.2.1 数值与云物元之间的关联度

首先,产生一个均值为 E_n 、标准差为 H_e 的正态随机数 E_n' ;然后,令该数值为 x ,称为云滴;最后计算 x 属于这个云模型关联度 y 。 y 为

$$y = \exp\left[-\frac{(x-E_n)^2}{2(E_n')^2}\right] \quad (14)$$

2.2.2 云物元与云物元之间的关联度

对于正态云而言,存在如下分布规则,即 99.74% 的云滴都落在 (E_x-3E_n', E_x+3E_n') 之间。将区间 (E_x-3E_n', E_x+3E_n') 看作一个集合,则两个云的共有部分和非共有部分可以用 N 和 M 表示,则关联度为

$$N = \{(E_x'^1-3E_n'^1, E_x'^1+3E_n'^1) \cap (E_x'^2-3E_n'^2, E_x'^2+3E_n'^2)\} \quad (15)$$

$$M = \{(E_x'^1-3E_n'^1, E_x'^1+3E_n'^1) \cup (E_x'^2-3E_n'^2, E_x'^2+3E_n'^2)\} \quad (16)$$

则关联度 K 为

$$K = \frac{|N|}{|M|} \quad (17)$$

2.3 云物元分析原理图

云物元分析原理图见图 1。

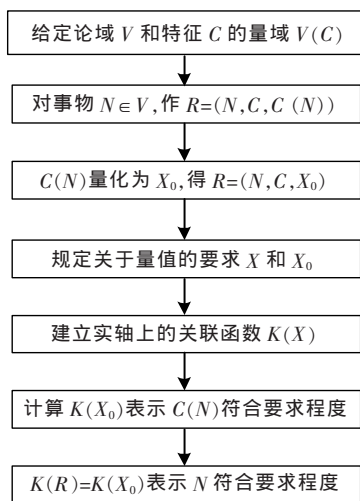


图 1 云物元分析原理图

3 基于云物元分析原理的变压器故障诊断

基于物元理论的变压器故障诊断方法中,没有

考虑各种故障类型分类边界的不确定性,这种处理实质是将故障诊断视为一个确定性的数学模型,不够完善。笔者基于云物元分析原理对变压器故障诊断进行研究,其主要步骤如下。

3.1 确定变压器故障类型的标准云模型

DGA 三比值法的标准云物元模型为

$$R_{0j} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (E_{x_1}, E_{n_1}, H_{e_1})_j \\ c_2 & (E_{x_2}, E_{n_2}, H_{e_2})_j \\ c_3 & (E_{x_3}, E_{n_3}, H_{e_3})_j \end{bmatrix} \quad (18)$$

R_{0j} 为第 j 种故障的物元; N_j 为第 j 种故障的名称; c_1, c_2, c_3 分别对应 $C_2H_2/C_2H_4, CH_4/H_2, C_2H_4/C_2H_6$ 3 个比值; $(E_{x_1}, E_{n_1}, H_{e_1})_j, (E_{x_2}, E_{n_2}, H_{e_2})_j, (E_{x_3}, E_{n_3}, H_{e_3})_j$ 分别为 3 个比值中各比值在第 j 中故障的标准云模型。

在建立云模型时,首先将比值范围看作一个双约束空间 $[C_{min}, C_{max}]$,并参考 IEC 比值范围的数据编码,对约束空间边界值构成的区间进行适度扩展,再采用文^[16]给出的区间与云模型的转换关系得 E_x 和 E_{n_0} 。

$$E_x = (C_{min} + C_{max})/2 \quad (19)$$

$$E_{n_0} = (C_{min} - C_{max})/6 \quad (20)$$

表 1 无故障类型 C_2H_2/C_2H_4 的 IEC 编码范围小于 0.1,双约束空间为 $[0, 0.1]$,充分考虑右边界的 uncertainty,适度扩展后修正为 $[0, 0.11]$,再应用上式,可获得的云模型为 $(0.055, 0.018, 0.001)$ 。

3.2 确定油色谱样本的特征物元模型 R_0

油色谱样本的特征元模型 R_0 为

$$R_0 = \begin{bmatrix} q & c_1 & \nu_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & \nu_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

3.3 计算特征物元与故障标准云物元的关联度

特征物元与故障标准云物元的关联度为

$$k_j(q) = \sum_{i=1}^n a_i k_j(\nu_i) \quad (22)$$

式(22)中, a_i 是权系数,取 $1/3^{[13]}$ 。

3.4 确定变压器故障类型

变压器故障类型为

$$k_{j_0}(q) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} k_j(\nu_i) \quad (23)$$

式(23)中, j_0 为故障类型。

4 实例分析

(1)实例 1 为某变压器油色谱分析数据: $C_2H_6=47.7, C_2H_4=75.7, C_2H_2=68.7, H_2=176.0, CH_4=205.9$, 采

表1 IEC三比值法判断故障性质云模型列表

序号	故障类型	IEC 比值范围的数据编码			IEC 比值范围的云模型		
		C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
1	无故障	<0.1	0.1-1	<1	(0.055,0.018,0.001)	(0.595,0.168,0.002)	(0.550,0.183,0.001)
2	低能局部放电	<0.1	<0.1	<1	(0.055,0.018,0.001)	(0.055,0.018,0.002)	(0.550,0.180,0.001)
3	高能局部放电	0.1-3	<0.1	<1	(1.595,0.5,0.001)	(0.55,0.018,0.002)	(0.550,0.18,0.002)
4	低能量的放电	>0.1	0.1-1	>1	(1.595,0.5,0.001)	(0.595,0.168,0.002)	(2,0.367,0.001)
5	高能量的放电	0.1-3	0.1-1	>3	(1.595,0.5,0.001)	(0.595,0.168,0.002)	(6.45,1.18,0.001)
6	低温过热<150℃	<0.1	0.1-1	1-3	(0.055,0.018,0.001)	(0.595,0.168,0.002)	(2,0.367,0.001)
7	低温过热 150~300℃	<0.1	>1	<1	(0.055,0.018,0.001)	(2.1,0.33,0.002)	(0.550,0.18,0.001)
8	中温过热 300~700℃	<0.1	>1	1-3	(0.055,0.018,0.001)	(2,0.367,0.002)	(2,0.367,0.001)
9	高温过热>700℃	<0.1	>1	>3	(0.055,0.018,0.001)	(2,0.367,0.002)	(6.45,1.18,0.001)

用云物元分析原理对这台变压器进行故障诊断分析。

变压器油色谱数据待评物元 R_0 为

$$R_0 = \begin{bmatrix} q & c_1 & 0.91 \\ & c_2 & 1.17 \\ & c_3 & 1.59 \end{bmatrix} \quad (24)$$

计算待评物元与标准云物元之间的关联度,结果见表2。由此,即可确定变压器的故障类型是低能量放电,与实际故障类型一致。然而,基于IEC法和物元法^[13]进行故障诊断的结果分别是无法确定和中温过热、低能量放电两种,均与实际故障类型不符。

表2 关联度计算结果

故障类型	关联度	故障类型	关联度
1	0.264 4	6	0.536 0
2	0.057 2	7	0.358 7
3	0.360 4	8	0.632 2
4	0.839 0	9	0.556 8
5	0.765 0		

(2)实例2为某变压器油色谱分析数据:H₂=56, CH₄=61, C₂H₆=75, C₂H₄=32, C₂H₂=31

采用云物元分析原理进行变压器故障诊断,诊断本台变压器的故障类型是中温过热(300~700℃)。IEC三比值法编码无法确定变压器的故障类型。实际故障类型是变压器有过热的现象。

(3)实例3为某变压器油色谱分析数据:H₂=181, CH₄=262, C₂H₆=41, C₂H₄=28, C₂H₂=0

采用云物元分析原理进行变压器故障诊断,诊断该变压器发生了低中温过热。IEC编码是020;物元法对该变压器进行故障诊断,得到变压器发生了低温过热;而实际对变压器进行检修发现,变压器发生了低中温过热,该变压器发生的是双重故障。

为了进一步检验基于云物元的变压器故障诊断方法的正确性和优越性,采集了200个油色谱样本(实际故障类型已知),分别采用IEC法、物元法和笔者提出的方法对变压器进行故障诊断,诊断结果3种方法的准确率依次为73%,89%和94%,证明了笔者提出的方法的正确性和优越性。

5 结语

提出了一种基于云物元分析原理和DGA的电力变压器故障诊断新方法。建立了变压器故障的标准云物元模型,通过计算特征物元与标准云物元之间的关联函数,可以实现对变压器故障模式的有效识别。实例分析证明,笔者提出的方法能充分反映故障诊断的不确定性本质,与IEC三比值法和传统物元理论方法比较,具有更高的故障诊断准确率。

参考文献:

- [1] 孙才新,陈伟根,李俭,等.电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M].北京:科学出版社,2003.
- [2] 吴立增,朱永利,苑津莎.基于贝叶斯网络分类器的变压器综合故障诊断方法[J].电工技术学报,2005,20(4):45-51.
- [3] 杨兵,丁辉,罗为民,等.基于知识库的变压器故障诊断专家系统[J].中国电机工程学报,2001,22(10):121-124.
- [4] SU Q, MI C, LAI L L, et al. A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for the Diagnosis of Multiple Incipient Faults in a Transformer[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 593-598.
- [5] ISLAM S M, WU T, LEDWICH G A. Novel Fuzzy Logic Approach to Transformer Fault Diagnosis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 177-186.
- [6] 王楠,律方成,刘云鹏,等.基于粗糙集理论与模糊Petri网络的油浸电力变压器综合故障诊断[J].中国电机工程学报,2003,23(12):127-132.
- [7] 王永强,律方成,李和明.基于粗糙集理论与贝叶斯网络的电力变压器故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2006,26(8):137-141.

(下转第82页)

装等环节,但加强对 PT、避雷器间隔的验收,仍是排除该部位安全隐患行之有效的办法。

3.2 采取的措施

(1)GIS 安装应严格按照制造厂安装规范进行。设备安装质量是关系到设备尤其是 GIS 设备能否安全可靠运行的最重要环节,因此,生产运行管理部门应派专人参加设备安装的全过程。

设备安装前,首先应拆箱查看设备在运输过程中是否有损坏并逐件进行登记,要确认各元部件在安装之前完好无缺,基础施工应严格按照设备安装要求进行。基础的施工质量与设备的安装质量密切相关,只有基础的承载能力、水平度、垂直度、基础板块的接缝位置及相对位移量、预埋金属件的位置和数量、专用辅助地网引上线的位置和数量等均符合厂家提供的基础施工图和相应的技术要求后,设备才可进行安装。为了确保现场的安装环境条件,应设置尽可能满足安装清洁度和环境温度、湿度要求的安装棚,选择天气晴朗的时候进行安装。 SF_6 气体的充入必须严格按照安装规范进行,先抽真空再充入氮气进行内部干燥,再抽真空,静置 24 h 后再充入 SF_6 气体。设备的安装必须保证安装过程中人员和设备的安全,尤其是瓷套管的安全。

(2)对运行、检修和试验技术人员加强培训和交流。根据设备类型,开展专项培训,切实提高运行、检修、试验人员的技术水平,同时加强技术人员的相互交流和相互学习。组织相关人员到设备厂家进行参观学习,深入了解设备的内外部结构,给其充分创造条件,掌握各项检修试验技术。同时,利用开展状态检修的契机,编制适合本地区设备特点检修导则和规范,为检修工作的有效开展提供技术依据。

(3)推动状态监测技术的研究和应用。积极推广

应用 GIS 在线超高频、超声波局放测量技术、 SF_6 气体分解产物的检测技术,制定相关的规范和标准,将通过该项技术获得的数据和监测信息纳入设备状态信息中,结合国网公司系统推行的输变电设备状态检修工作,使监测信息作为辅助决策系统中的重要参考依据,逐步推动状态监测和设备评价工作,不断提高对设备状况的掌握程度。

(4)做好备品备件的管理。结合 GIS 元器件使用年限和检修计划,及时与厂家落实备品备件的供给。督促制造厂在设备全寿命周期内,始终能够保证提供合格的备品备件。对于产品型号的更新换代,要求厂家新产品的元部件最好和老型号的保持兼容。

(5)规范 GIS 设备交接验收工作。一是 GIS 的 PT、避雷器回装后,应进行最高运行电压检查试验;二是认真查验 PT、避雷器出厂试验、各型绝缘子交流耐压和水压试验等报告。三是查验 GIS 的施工记录、监理记录,重点检查 GIS 的 PT、避雷器安装时的天气情况、装配顺序、安装工艺、气室的清理等是否满足要求;四是新 GIS 设备投运后,最好对各间隔进行局放超声波定位的测试。

参考文献:

- [1] 中国电力科学研究院. 国家电网公司 2008 年高压开关工作总结[R].北京:中国电力科学研究院,2008.
- [2] DL/ 837-2003 输变电设施可靠性评价规程[S].
- [3] 刘卫东,黄瑜琰,王剑锋,等. GIS 局部放电特高频在线检测和定位[J].高压电器,1999,34(01):64-67.
- [4] 李 信. GIS 局部放电特高频检测技术的研究[D].北京:华北电力大学,2005.
- [5] GB 50150-2006 电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S].
- [6] DL/T 617-1997 气体绝缘金属封闭开关设备技术条件[S].

(上接第 77 页)

- [8] 董 明,孟源源,徐长响,等.基于支持向量机及油中溶解气体分析的大型电力变压器故障诊断模型研究[J].中国电机工程学报,2003,23(7):88-92.
- [9] 吕干云,程浩忠,翟海保,等.基于改进灰色关联分析的变压器故障识别[J].中国电机工程学报,2004,24(10):121-126.
- [10] 董 明,严 璋,杨 莉,等.基于证据推理的电力变压器故障诊断策略[J].中国电机工程学报,2006,26(1):106-114.
- [11] 廖瑞金,廖玉祥,杨丽君,等.多神经网络与证据理论融合的变压器故障综合诊断方法研究[J].中国电机工程学报,2006,26(3):119-124.
- [12] 熊 浩,孙才新,廖瑞金,等.基于核可能性聚类算法和油中溶解气体分析的电力变压器故障诊断研究[J].中国电机工程学报,2005,25(20):163-167.
- [13] WANG M H.A Novel Extension Method for Transformer Fault Diagnosis[J].IEEE Trans on Power Delivery,2003,18(1):164-169.
- [14] 黄文涛,赵学增,王伟杰,等.基于物元模型的电力变压器故障的可拓诊断方法[J].电力系统自动化,2004,28(13):45-49.
- [15] 李德毅.不确定性人工智能[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [16] 胡 涛,王树宗,杨建军.基于云模型的物元综合评估方法[J].海军工程大学学报,2003,18(1):85-88.
- [17] LI Deyi.Uncertainty Reasoning Based on Cloud Models in Controllers Journal of Computer Science and Mathematics with Application[J].Elsevier Science,1998,35(3):99-123.
- [18] 蔡 文.物元模型及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994.