

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.09.007

## 基于灰色 TOPSIS 和 DGA 的变压器状态预测

陈金强, 李群湛

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 以灰色预测和理想点解理论(TOPSIS)为基础,研究基于油中溶解气体体积分数的变压器状态预测及其应用。该方法不同于目前单纯依据数学算法预测油中溶解气体含量的方法,而是从系统的角度综合考虑各特征参数及三比值规则,对故障状态贴进度进行预测。首先根据理想点解法计算各期油中气体体积分数三比值的故障贴进度,以此作为变压器三比值状态信息,然后根据灰色 GM(1,1)模型,对变压器三比值故障状态贴进度发展趋势进行预测,最后得到其故障的贴进度,反应了变压器故障状态的发展趋势,对状态维修具有较直观的参考意义。实例数据分析验证了该预测方法的有效性。

**关键词:** 灰色预测; 理想点解理论(TOPSIS); 变压器油中溶解气体分析(DGA); 变压器; 状态维修

### Transformer Condition Prediction Model Based on Gray-TOPSIS and DGA

CHEN Jinqiang, LI Qunzhan

(School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on gray prediction and TOPSIS theory, a condition prediction model of power transformer is proposed. By considering all characteristic parameter and three ratios rule, the model predicts the approaching degree of fault condition instead of the contents of dissolved gases in transformer oil. First, the approaching degree of fault condition is calculated with TOPSIS theory according to the three ratios of the dissolved gases in oil in order to obtain the three ratio condition data of transformer. Then the gray GM(1,1) model is adopted to predict the trend of the approaching degree of three-ratio fault condition, hence to obtain the value of approaching degree, which intuitively reflects development trend of transformer fault condition. Example verifies the validity of the proposed transformer condition prediction model. This study may provide a reference for condition maintenance of transformers.

**Key words:** gray prediction; technique for order preference by similarity to an ideal solution(TOPSIS); dissolved gases analysis(DGA); transformer; condition maintenance

## 0 引言

根据已有的变压器油中溶解气体的质量体积分数来预测其变化趋势,进而实现变压器的故障预测,这对变压器实施状态维修具有重要意义。目前对变压器状态预测主要是以油中溶解气体质量体积分数序列为研究对象,进行预测的方法包括 BP 神经网络、灰色理论和线性回归预测等算法<sup>[1-8]</sup>,该类方法最后得到的结果为下一期的气体体积分数数据,对故障状态的反应不够直观,未能对变压器状态进行更准确的定量描述。

随着电力变压器在线监测系统的普及,变压器油中气体数据获得的实时监控数据越来越大,大量数据与缺乏有效后期信息处理的矛盾越来越突出。传统诊断方法采用三比值编码进行故障诊断,但是容易出现缺码和误判<sup>[9-15]</sup>,且结果为正常或者故障两种状态,未能定量分级地指示变压器当前的确切状态信息。

理想点解理论(TOPSIS)是一种常用的多目标决策方案或者排序分析法,其基本思路是通过构造多指标问题的理想解和负理想解,并以靠近理想解和远离负理想解两个基准作为评价各对象的判断依据,因此理想解法又称为逼近理想点法<sup>[16]</sup>。灰色预测

收稿日期:2015-03-02; 修回日期:2015-04-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU11BR034)。

Project Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(SWJTU11BR034).

是把预测数据序列看作随时间(序列数据的序号)变化的灰色量或灰色过程,建模前,先对原始数据进行整理和处理,通过累加生成和相关生成逐步使灰色量白化,使其呈现一定的规律性,最终建立相应于微分方程解的动态模型并做出预测<sup>[17]</sup>。

文中首先按照三比值规则计算油中溶解气体的三比值数据,然后根据以三比值规则中的典型故障目标作为目标状态。采用理想点解方法确定当前变压器色谱数据对于故障状态的贴近距离,然后对贴进度进行灰色模型预测,最后得到变压器故障状态贴进度序列和预测的贴进度。该方法定量地对变压器接近故障的状态进行了直观提示,为现场工作人员的维修决策提供了依据。文中研究了基于灰色 TOPSIS 和 DAG 的变压器状态预测方法,并进行了实例验证。

## 1 TOPSIS 评价理论

### 1.1 TOPSIS 评价原理

设多属性决策方案集为  $D=\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ , 决策问题的指标集为  $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , 决策问题的评价指标的加权向量设为集合  $W=\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , 满足  $0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。则可根据方案集  $D$  和指标集  $U$  确定一个新矩阵, 称它为决策矩阵, 记为  $A=(a_{ij})_{m \times n}$ <sup>[18-19]</sup>。

正理想解  $C^*$  是一个方案集  $D$  中并不存在的虚拟的最佳方案, 而负理想解  $C^0$  则是虚拟的最差方案。在  $n$  维空间中, 既靠近正理想解又远离负理想解的方案就是方案集  $D$  中的最佳方案。求解多属性决策问题需要在属性空间定义适当的距离测度来计算备选方案与理想解的欧式距离。

### 1.2 TOPSIS 评价步骤

1) 数据预处理。数据预处理即决策矩阵规范化, 因为指标的属性类型有很多种, 在进行决策时, 一般要进行属性值的规范化, 即对数据的归一化, 即把属性数值均变换到  $[0, 1]$  区间上。数据根据三比值的取值范围定义进行 0-1 变换的方法进行预处理。设多属性决策问题的决策矩阵为  $A=(a_{ij})_{m \times n}$ , 记规范化决策矩阵为  $B=(b_{ij})_{m \times n}$ , 效益型属性有:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{ij}^{\min}}{a_{ij}^{\max} - a_{ij}^{\min}} \quad (1)$$

$$\text{式(1)中: } a_{ij}^{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} a_{ij}; a_{ij}^{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} a_{ij}。$$

而对于成本型属性的规范化公式:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}^{\max} - a_{ij}}{a_{ij}^{\max} - a_{ij}^{\min}} \quad (2)$$

2) 构件加权规范阵  $C=(c_{ij})_{m \times n}$ 。设由决策人给定各

属性的权重向量集为  $W=\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , 则

$$c_{ij} = w_j \cdot b_{ij} \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n。 \quad (3)$$

3) 确定正理想解  $C^*$  和负理想解  $C^0$ 。设正理想解  $C^*$  的第  $j$  个属性值为  $c_j^*$ , 负理想解  $C^0$  的第  $j$  个属性值为  $c_j^0$ , 则

效益型属性的正理想解为

$$c_j^* = \max_i c_{ij} \quad j=1, 2, \dots, n。 \quad (4)$$

负理想解为

$$c_j^0 = \min_i c_{ij} \quad j=1, 2, \dots, n。 \quad (5)$$

成本型属性的正理想解为

$$c_j^* = \min_i c_{ij} \quad j=1, 2, \dots, n。 \quad (6)$$

负理想解为

$$c_j^0 = \max_i c_{ij} \quad j=1, 2, \dots, n。 \quad (7)$$

4) 计算各方案到正理想解和负理想解的距离, 用误差平方和来表示。备选方案到正理想解的距离  $d_i^+$  为

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^*)^2 = \sum_{j=1}^n (w_j b_{ij} - w_j b_j^*)^2 = \sum_{j=1}^n w_j^2 (b_{ij} - b_j^*)^2 \quad i=1, 2, \dots, m。 \quad (8)$$

备选方案到负理想解的距离  $d_i^-$  为

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^0)^2 = \sum_{j=1}^n (w_j b_{ij} - w_j b_j^0)^2 = \sum_{j=1}^n w_j^2 (b_{ij} - b_j^0)^2 \quad i=1, 2, \dots, m。 \quad (9)$$

5) 计算各方案的贴近度  $t_i^+$

$$t_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad 1 \leq i \leq m。 \quad (10)$$

6) 按  $t_i^+$  的大小对方案进行排序得出评价优劣顺序, 对于评价对象来说也就是获得了评价目标相对于评价等级的贴近程度。

## 2 基于理想点解的变压器状态计算

### 2.1 评价指标体系

DGA 工程上称色谱分析, 是发现变压器故障的有效手段, 油中溶解气体成分的相对数量和形成速率表征了变压器故障点能量的释放形式和故障严重程度<sup>[20]</sup>。GB/T 7252—2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》定义了油中溶解气体的若干故障状态和对应的三比值编码<sup>[21]</sup>, 文中选取三比值数据作为评价指标体系, 以三比值编码作为评价目标等级, 对变压器油中溶解气体的评价状态进行计算。

### 2.2 指标规范化处理

因评价对象是随时间变化的一组油中溶解气

体, 因此先计算该台变压器当前运行周期里的第 1 组数据的三比值状态, 指标的正理想解对应健康状态下的变压器, 负理想解对应当前数据最接近的三比值故障编码值。在将理想点解法用于变压器状态评估时, 对效益型指标的规范化处理做如下改进:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^b}{a_j^a - a_j^b} \quad (11)$$

式(11)中:  $a_j^b$  为 GB/T 7252—2001 导则规定的某个编码的气体比值指标的取值下限;  $a_j^a$  为该编码的气体比值指标的取值上限;  $a_{ij}$  为变压器第  $i$  个试验周期里的实测数据。

### 2.3 状态评价计算

根据 1.2 中介绍的方法对范化处理后的数据进行计算。由此计算出的变压器当前油气数据到正理想解和负理想解的距离就在一定程度上分别表示了变压器目前状态偏离最优状态和故障状态的程度, 最后根据式(10)计算出当前变压器状态与相应故障状态的贴近度。

## 3 变压器状态贴近度的灰色预测

灰色预测模型通过特有的累加生成变换进行序列数据建模, 把原始数据序列不明显的变化趋势通过累加变换后呈现明显的增长趋势, 并用灰色差分方程和灰色微分方程对变换后的数据进行建模, 最后用累减生成进行数据模拟和预测<sup>[22]</sup>。灰色预测模型中最基本的是一次拟合参数模型, 即 GM(1,1), 其通过对原始数据进行累加生成后, 得到规律性较强的序列, 再用指数曲线去拟合得到预测值。

文中在 2.3 中通过对变压器不同试验周期中油气数据计算正理想解和负理想解的距离得到了描述变压器状态一组定量的数值, 该状态贴近度反应了变压器状态的变化趋势。针对该数列, 文中利用灰色 GM(1,1)模型进行了变压器下个周期状态的预测, 其预测数据指示了未来变压器状态的发展趋势。

## 4 预测实例

整个变压器状态预测步骤如下: 首先根据 DGA 技术原则确立变压器故障状态集, 然后根据实测数据的 IEC 三比值规则编码作评价等级, 利用 TOPSIS 计算各期试验数据相对于评价等级的欧氏距离贴近度, 进而建立 GM(1,1)预测模型对变压器状态发展趋势进行预测, 最后得到预期的变压器故障状态贴近度。整个计算预测流程见图 1。

文中选取了 1993—1994 年间徐庄 1 号主变压器的色谱分析数据<sup>[23]</sup>, 见表 1。将表 1 作为分析对象(该变压器在这段时间区间后期出现过热报警)。根据

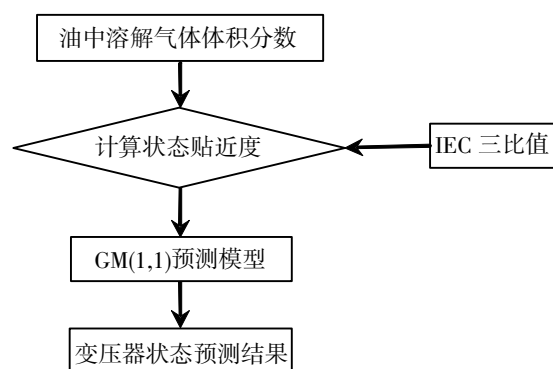


图 1 变压器状态预测流程

Fig. 1 Transformer condition forecasting flow

其前 6 期数据对最后一期变压器状态进行预测, 并与文[23]的 BIC 与 SVRM 方法预测结果进行了对比。

表 1 色谱数据表

| Table 1 Data of dissolved gases $\mu\text{L/L}$ |                |                 |                               |                               |                               |
|-------------------------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 日期                                              | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
| 1993-12-14                                      | 211            | 79.2            | 139.0                         | 33.0                          | 1.6                           |
| 1993-12-17                                      | 177            | 84.0            | 40.6                          | 9.9                           | 0.0                           |
| 1994-01-06                                      | 164            | 90.2            | 111.0                         | 21.0                          | 2.5                           |
| 1994-01-19                                      | 200            | 94.2            | 107.0                         | 13.7                          | 2.2                           |
| 1994-03-24                                      | 340            | 77.0            | 108.0                         | 12.1                          | 2.2                           |
| 1994-04-08                                      | 342            | 81.3            | 94.1                          | 15.3                          | 1.9                           |
| 1994-05-11                                      | 280            | 44.6            | 110.0                         | 17.8                          | 1.4                           |

首先对第 1 组数据计算其 IEC 三比值编码, 得知其初始状态比较接近编码 002, 确定高温过热为本变压器状态评价目标等级, 然后以三比值编码 002 的取值范围作为指标对各期试验数据进行泛化归一, 获得数据, 见表 2。最后利用文中 2.3 中的算法对表 2 数据中前 6 期数据进行正负理想解计算(计算主程序在 MATLAB 2011 环境里运行), 计算各期油色谱三比值数据得到的正理想解和负理想解的距离分别为

$$d_1^+ = 0.407\ 7, d_2^+ = 0.542\ 2, d_3^+ = 0.417\ 1, d_4^+ = 0.278\ 1, \\ d_5^+ = 0.205\ 8, d_6^+ = 0.238\ 5;$$

$$d_1^- = 0.226\ 2, d_2^- = 0.064\ 3, d_3^- = 0.342\ 9, d_4^- = 0.403\ 1,$$

表 2 范化后的数据

| Table 2 The processed data |                                                              |                                 |                                                              |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 日期                         | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
| 1993-12-14                 | 0.115 1                                                      | 0.388 0                         | 0.421 2                                                      |
| 1993-12-17                 | 0.000 0                                                      | 0.167 6                         | 0.410 1                                                      |
| 1994-01-06                 | 0.225 2                                                      | 0.000 0                         | 0.528 5                                                      |
| 1994-01-19                 | 0.205 6                                                      | 0.175 5                         | 0.781 0                                                      |
| 1994-03-24                 | 0.203 7                                                      | 0.718 9                         | 0.892 5                                                      |
| 1994-04-08                 | 0.201 9                                                      | 0.693 9                         | 0.615 0                                                      |
| 1994-05-11                 | 0.127 2                                                      | 0.868 2                         | 0.617 9                                                      |

$d_5^- = 0.424\ 2, d_6^- = 0.408\ 5$ 。

由式(10)计算得到各组数据的贴进度为

$t_1^+ = 0.356\ 8, t_2^+ = 0.106\ 0, t_3^+ = 0.451\ 2, t_4^+ = 0.591\ 7,$   
 $t_5^+ = 0.689\ 4, t_6^+ = 0.673\ 4$ , 该序列即为变压器接近高温过热状态的贴进度序列。

最后采用灰色模型 GM(1,1)以贴进度  $t_1^+ \dots t_6^+$  为预测序列数据, 对该变压器高温故障过热的状态贴进度进行预测。经计算得到该变压器下期高温过热状态贴进度为 0.984 0, 而高温过热状态的极限贴进度为 1.000, 说明该变压器的下期状态已经非常接近高温过热状态, 与文[23]的 BIC 与 SVRM 方法预测结果以及实际情况一致。

## 5 结语

区别于当前单纯依据算法预测油中溶解气体含量的方法, 综合考虑了气体特征参数及三比值规则, 利用定量的故障贴进度数列对变压器状态发展趋势进行描述和预测, 取得了较好的效果。

采用理想点解计算当前变压器的故障状态贴进度, 对该状态贴进度进行灰色预测。计算过程中初始三比值故障状态目标的选择尤为重要, 如果选择不当, 则状态序列的发展方向可能出现错误, 实际应用中应该根据情况及时进行调整。

文中方法可为现场人员的维修工作提供较为直观的决策依据, 尤其适用于变压器油气在线监测系统的辅助决策, 具有一定的实际应用价值。

## 参考文献:

- [1] 王有元, 廖瑞金, 孙才新, 等. 变压器油中溶解气体浓度灰色预测模型的改进[J]. 高电压技术, 2003, 29(4): 24-26.  
WANG Youyuan, LIAO Ruijin, SUN Caixin, et al. An improved grey prediction model for dissolved gas in transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(4): 24-26.
- [2] 沙立成, 宋 珺. 基于改进粒子群优化 LS-SVM 的变压器故障气体预测[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(1): 35-38.  
SHA Licheng, SONG Jun. Predicting method for dissolved gas in transformer oil based on modified particle swarm optimization[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(1): 35-38.
- [3] 费胜巍, 孙 宇. 融合粗糙集与灰色理论的电力变压器故障预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 154-160.  
FEI Shengwei, SUN Yu. Fault prediction of power transformer by combination of rough sets and grey theory[J]. High Voltage Engineering, 2008, 28(16): 154-160.
- [4] 肖燕彩, 朱衡君, 陈秀海. 用灰色多变量模型预测变压器油中溶解的气体浓度[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 64-67.  
XIAO Yancai, ZHU Hengjun, CHEN Xiuhai. Concentration prediction of dissolved gas-in-oil of a power transformer with the multivariable grey model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 64-67.
- [5] 袁 蕾, 杜 林, 吴俊美, 等. 基于模糊隶属函数的变压器多参量故障综合诊断方法[J]. 高压电器, 2011, 47(5): 35-42.  
YUAN Lei, DU Lin, WU Junmei, et al. Transformer multi-parameter integrated fault diagnosis method based on fuzzy membership function[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 35-42.
- [6] 王 鹏, 许 涛. 用统计学习理论预测变压器油中溶解气体浓度[J]. 高电压技术, 2003, 29(11): 13-14.  
WANG Peng, XU Tao. An prediction model for dissolved gas in transformer oil based on statistical learning theory [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(11): 13-14.
- [7] 王 罡, 杨海涛, 胡伟涛, 等. 基于改进遗传算法与 LS-SVM 的变压器故障气体预测方法 [J]. 高压电器, 2010, 46(9): 11-14.  
WANG Gang, YANG Haitao, HU Weitao, et al. Predicting method for dissolved gas in transformer oil based on improved genetic algorithm and LS-SVM [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 11-14.
- [8] 毛自娟. 基于灰色马尔可夫模型的变压器油中溶解气体体积分数预测[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 47-51.  
MAO Zijuan. Concentration prediction of gases dissolved in transformer oil via grey markov chain model [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 47-51.
- [9] 杨 洪, 古世甫, 陶加贵, 等. 自适应分级多分类支持向量机在变压器故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 49-52.  
YANG Hong, GU Shifu, TAO Jiagui, et al. Application of adaptive hierarchical multi-class SVM to transformer fault diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 49-52.
- [10] 谢 庆, 彭 澎, 唐 山, 等. 基于云物元分析原理的电力变压器故障诊断方法研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 74-77.  
XIE Qing, PENG Peng, TANG Shan, et al. Study on fault diagnosis for power transformer based on cloud matter element analysis principle and DGA[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 74-77.
- [11] 乔维德. 基于模拟退火改进粒子群混合算法的变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 208-210.  
QIAO Weide. Transformer fault diagnosis based on SAP-SO-BP hybrid algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 208-210.
- [12] 贾 嵘, 徐其惠, 李 辉, 等. 基于邻域粒子群优化神经网络的变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 8-10.

- JIA Rong, XU Qihui, LI Hui, et al. Power transformer fault diagnosis via neural network based on particle swarm optimization with neighborhood operator [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 8-10.
- [13] 韩筛根, 郭献清, 汤茜, 等. 有载调容变压器运行中最佳容量调节点分析和计算 [J]. 变压器, 2013, 50(9): 1-3.  
HAN Saigen, GUO Xianqing, TANG Qian, et al. Analysis and calculation of the best capacitive set-point of on-load adjustable capacitive transformer in operation [J]. Transformer, 2013, 50(9): 1-3.
- [14] 董景义, 李杰, 马立明, 等. 换流变压器漏磁场分布特性仿真研究 [J]. 变压器, 2013, 50(10): 20-23.  
DONG Jingyi, LI Jie, MA Liming, et al. Simulation study on distribution characteristics of leakage magnetic field converter transformer [J]. Transformer, 2013, 50(10): 20-23.
- [15] 王录亮, 刘文里, 于会凤. 电力变压器绕组轴向短路动态力的计算 [J]. 变压器, 2013, 50(1): 14-16.  
WANG Luliang, LIU Wenli, YU Huifeng. Calculation of winding axial short-circuit dynamic force of power transformer [J]. Transformer, 2013, 50(1): 14-16.
- [16] 马亚龙, 王精业, 徐享忠, 等. 基于正负理想点的仿真结果评估方法研究 [J]. 计算机工程, 2002, 28(2): 21-22.  
MA Yalong, WANG Jingye, XU Xiangzhong, et al. Study of evaluation method for simulation result based on positive and negative ideal point [J]. Computer Engineering, 2002, 28(2): 21-22. [13]
- [17] 李俊卿, 王德艳, 雍靖. 基于组合预测模型的变压器油中溶解气体质量浓度的预测 [J]. 广东电力, 2011, 24(9): 19-23.  
LI Junqing, WANG Deyan, YONG Jing. Forecast of mass concentration of dissolved gas in transformer oil based on combinative forecasting model [J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(9): 19-23.
- [18] 程文清, 李新叶. 基于改进理想点解法的电力变压器状态综合评估 [J]. 高压电器, 2009, 45(6): 120-123.  
CHENG Wenqing, LI Xinye. Integrated condition assessment of power transformer based on improved TOPSIS [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 120-123.
- [19] 胡元潮, 阮玲, 阮江军, 等. 基于改进逼近理想点法的变电站智能化改造评估 [J]. 电网技术, 2012, 36(10): 42-48.  
HU Yuanchao, RUAN Ling, RUAN Jiangjun, et al. Evaluation on intelligent renovation of substations based on improved TOPSIS [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 42-48.
- [20] 肖燕彩, 朱衡君, 张霄元, 等. 基于溶解气体分析的电力变压器在线监测与诊断技术 [J]. 电力自动化设备, 2006(6): 93-96.  
XIAO Yancai, ZHU Hengjun, ZHANG Xiaoyuan, et al. On-line monitoring and diagnosis of power transformer based on dissolved gas analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006(6): 93-96.
- [21] GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.  
GB/T 7252—2001 Transformer oil dissolved gas analysis and judgment guide [S]. Beijing: China Standard Press, 2001.
- [22] 郝宁波, 廖海斌. 基于灰色理论的电力变压器故障预测 [J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(1): 138-142.  
HAO Ningbo, LIAO Haibin. Predication of power transformer faults based on gray theory [J]. Computer and Digital Engineering, 2011, 39(1): 138-142.
- [23] 郑元兵, 陈伟根, 李剑, 等. 基于 BIC 与 SVRM 的变压器油中气体预测模型 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 46-49.  
ZHENG Yuanbing, CHEN Weigen, LI Jian, et al. Forecasting model based on BIC and SVRM for dissolved gas in transformer oil [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 46-49.
- 陈金强(1977—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力设备故障诊断、状态检测与评估。  
李群湛(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为同相供电理论、电能质量监测等。