

遗传算法在变压器故障诊断中的应用

谢可夫, 罗 安

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 根据变压器油中溶解气体分析的三比值法建立了基于 Mamdani 模糊推理的变压器故障诊断系统。该故障诊断系统由历史数据库、模糊推理诊断模块和优化模块三部分组成。利用遗传算法和历史试验数据对模糊推理模块的隶属度函数进行优化, 克服了传统的三比值法对变压器进行故障诊断时存在的临界值判据缺损问题, 并可对故障诊断过程中的编码缺损情况作出解释。实例验证, 该诊断系统具有较好的诊断能力, 可提高变压器故障诊断的准确性。

关键词: 遗传算法; 电力变压器; 故障诊断; 模糊推理

中图分类号: TP 206+.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)04-0055-04

0 引言

在输电系统中, 电力变压器的故障不仅造成工农业生产的停产和日常生活的不便, 还直接给供、用电部门带来巨大的经济损失。对电力变压器的运行状态进行监测, 及时地发现变压器的故障前兆, 预测故障趋势以防止故障带来的损失一直是输电部门追求的目标。因此, 变压器的故障诊断技术便成为电力系统工程界和学术界重点关注的课题。

目前, 在变压器故障诊断中广泛使用的仍然是基于变压器油中溶解气体分析(DGA)的各种诊断技术。我国当前在现场中大量应用的是罗杰斯三比值法^[1]。利用传统的三比值判据诊断变压器故障存在两方面的不足, 即所谓编码缺损和临界值判据缺损。近十几年来, 随着人工智能理论和技术的发展, 各种人工智能方法被应用于基于 DGA 的变压器故障诊断技术之中, 这主要包括变压器故障诊断专家系统^[2,3]、神经网络诊断系统^[4-6]和模糊诊断系统^[7-9]。尽管这些方法弥补了传统 DGA 方法的不足, 但仍存在一些问题,

如诊断专家系统中专家知识的获取一直是一个难以解决的瓶颈问题。

人工神经网络虽然能够处理复杂的分类问题, 并且具有自学习、自组织的能力, 但人工神经网络收敛慢, 而且网络结构和参数凭经验设定, 难以获取一个基于特定问题的最优网络结构。另一方面, 专家系统中专家经验的不确定性而难以量化的问题和神经网络诊断系统无解释功能的问题也引起人们极大的关注。

模糊理论是处理不确定问题的强有力工具, 并具有推理解释能力。为此, 模糊推理方法被应用于变压器的故障诊断中。同时, 为提高模糊诊断系统的诊断准确性, 提出了利用历史数据对模糊推理故障诊断系统进行优化的问题。文献[10,11]应用进化算法对模糊推理变压器故障诊断系统进行了优化, 但编码过长, 搜索空间太大。本文根据三比值法建立了一个简化的模糊推理故障诊断系统, 并利用遗传算法和历史数据对该系统进行优化。

1 模糊诊断系统结构

模糊诊断系统由数据库模块、模糊诊断模块和

收稿日期: 2005-01-11
基金项目: 2002 年国家科技攻关计划课题(2002BA218C)

优化模块组成,其结构以及各模块之间的相互关系如图 1 所示。

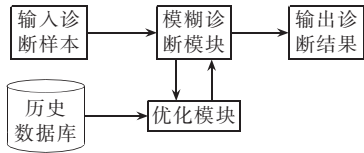


图 1 变压器模糊故障诊断系统组成

Fig.1 The block diagram of fuzzy fault diagnosis system for transformer

其中,历史数据库用于存储和管理色谱实验的历史数据,可将色谱实验的实验数据转化成模糊诊断系统所需的三比值数据。模糊诊断模块根据所提供样本的三比值进行故障诊断。优化模块利用优化算法调用历史数据库中的数据对模糊诊断模块进行优化,优化算法除遗传算法外还可扩充其他优化算法,如进化规划、模拟退火、随机搜索等,通过多种优化算法确定模糊诊断模块的最优结构,本文讨论遗传算法在优化中的应用。

2 模糊推理原理

建立在模糊集合理论、模糊 IF-THEN 规则等概念基础上的模糊推理系统可以实现从输入到输出的非线性映射,这个映射是由一组 IF-THEN 规则完成的,其中每个规则描述映射的局部行为。规则的前件定义了输入空间的模糊区域,而后件规定模糊区域中的输出。本系统采用 Mamdani 模型。

2.1 多前件、多规则的 Mamdani 推理

设 $A_1, A_2, A' \in X; B_1, B_2, B' \in Y; C_1, C_2, C' \in Z$ 分别为 X, Y, Z 上的模糊集, $X \times Y \times Z$ 上的两个模糊关系 R_1 和 R_2 分别表示 $X \times Y \times Z$ 上模糊隐含 $A_1 \times B_1 \rightarrow C_1$ 和 $A_2 \times B_2 \rightarrow C_2$,则两前件、双规则的模糊推理问题:

- 前提 1(事实) x 是 A' and y 是 B'
 - 前提 2(规则 1) 如果 x 是 A_1 and y 是 B_1 , 则 z 是 C_1
 - 前提 3(规则 2) 如果 x 是 A_2 and y 是 B_2 , 则 z 是 C_2
 - 后件(结论) z 是 C'
- 可表示为

$$C' = (A' \times B') \circ (R_1 \cup R_2) = [(A' \times B') \circ R_1] \cup [(A' \times B') \circ R_2] \tag{1}$$

式中 $\circ$ 表示由模糊交、并运算构成的复合算子。若将式(1)中的交、并算子(包括复合算子中的交并算子)分别用极小和极大算子替代,则获得所谓 Mamdani 推理关系(2)。

$$\mu_{C'} = \bigvee_z \{ \bigvee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_{A_1}(x) \wedge \mu_{B_1}(y)], \bigvee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_{A_2}(x) \wedge \mu_{B_2}(y)] \} \tag{2}$$

式(1)(2)可推广到 n 前件和 m 规则推理问题。

2.2 变压器故障诊断模糊推理系统构造

IEC/IEEE 推荐的编码规则和故障性质判断如表 1 和表 2 所示(表中 C_2H_2/C_2H_4 为乙炔/乙炔; CH_4/H_2 为甲烷/氢气; C_2H_4/C_2H_6 为乙烯/乙烷;下同)。

表 1 三比值法的编码规则

Tab.1 Coding rules of three-ratio method

n	比值范围编码		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
<0.1	0	1	0
$0.1 \sim 1$	1	0	0
$1 \sim 3$	1	2	1
>3	2	2	2

注: n 为特征气体比值。

表 2 三比值法判断故障性质

Tab.2 Faults detected by three-ratio method

序号	故障性质	比值编码范围		
		C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
0	无故障	0	0	0
1	低能量密度的局部放电	0	1	0
2	高能量密度的局部放电	1	1	0
3	低能量放电	1~2	0	1~2
4	高能量放电(电弧)	1	0	2
5	低于 150℃ 的热故障	0	0	1
6	150~300℃ 低温过热故障	0	2	0
7	300~700℃ 中温过热故障	0	2	1
8	高于 700℃ 的高温过热故障	0	2	2

由表 1 和表 2 可见,三比值编码并非完全编码,存在编码缺损问题,当试验数据对应的编码落在表 2 所列的编码范围之外时,故障性质无法确定。另外,当试验数据落在临界值时(如 0.1,1,3)缺乏编码,即所谓临界值判据缺损问题。本系统可对故障诊断过程的编码缺损问题作出解释,此外,借助历史试验数据对模糊推理故障诊断系统进行优化解决了临界值编码缺损问题。根据表 1,2,选择输入变量为梯形隶属度函数,输出变量为三角形隶属度函数,可建立用于 Mamdani 推理的隶属度函数组如图 2 所示(图中纵坐标 y 为隶属度;横坐标 x_1, x_2, x_3, x_4 分别为乙炔/乙烯、甲烷/氢气、乙烯/乙烷、故障类型)。

其推理诊断规则如下:

- IF C_2H_2/C_2H_4 =低 and CH_4/H_2 =中 and C_2H_4/C_2H_6 =低 Then 故障类型=正常
 - IF C_2H_2/C_2H_4 =低 and CH_4/H_2 =低 and C_2H_4/C_2H_6 =低 Then 故障类型=故障 1
 - IF C_2H_2/C_2H_4 =中 and CH_4/H_2 =低 and C_2H_4/C_2H_6 =低 Then 故障类型=故障 2
 - IF C_2H_2/C_2H_4 =低 and CH_4/H_2 =高 and C_2H_4/C_2H_6 =高 Then 故障类型=故障 8
 - IF C_2H_2/C_2H_4 =低 and CH_4/H_2 =低 and C_2H_4/C_2H_6 =中 Then 故障类型=编码缺损
 - IF C_2H_2/C_2H_4 =高 and CH_4/H_2 =高 and C_2H_4/C_2H_6 =高 Then 故障类型=编码缺损
- 共 29 条诊断推理规则。

在诊断规则中,故障类型中“正常”对应表 2 中序号为 0 的故障性质,故障 1~故障 8 对应表 2 中序号 1~序号 8 的故障性质,其中故障 3 对应 3 条规则。因为故障类型对应的编码不重叠,所以推理过程中

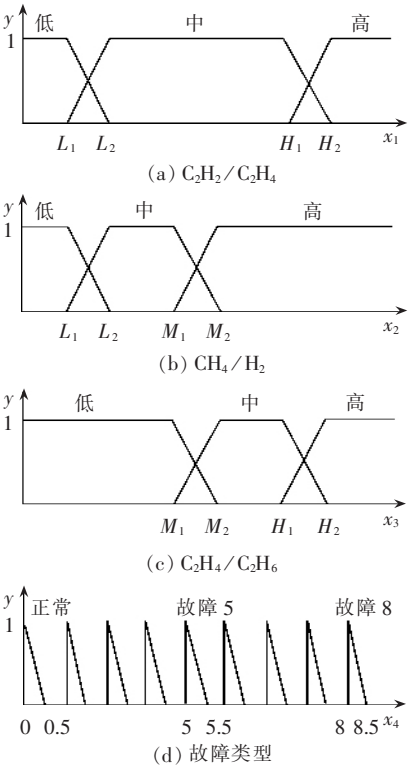


图 2 输入、输出变量的模糊隶属度函数
Fig.2 Fuzzy membership functions
of input and output variables

获取诊断结果的去模糊化方法采用极大最大法。模糊诊断模块的主要程序为模糊诊断程序 MHZD(X, CS, YQ),其中 X 为历史数据矩阵($m \times 3$ 维, m 是样本数据个数), CS 为隶属度函数参数矩阵 $[L_1 \ L_2 \ M_1 \ M_2 \ H_1 \ H_2]$, YQ 为期望诊断输出矩阵($m \times 1$ 维)。

3 系统优化

3.1 遗传编码

若设定要优化的隶属度函数参数 $L_1, L_2, M_1, M_2, H_1, H_2$ 精确到 3 位小数,则可用 44 位的二进制串($b_{43}b_{42} \cdots b_1b_0$)表示($L_1 \ L_2 \ M_1 \ M_2 \ H_1 \ H_2$)的染色体的基因码,根据表 1、表 2 和文献[12]有如下映射关系:

$$\begin{aligned} n_{L_1} &= \sum_{i=0}^5 b_i 2^{5-i}, & n_{L_2} &= \sum_{i=6}^{11} b_i 2^{11-i}, & n_{M_1} &= \sum_{i=12}^{19} b_i 2^{19-i} \\ n_{M_2} &= \sum_{i=20}^{27} b_i 2^{27-i}, & n_{H_1} &= \sum_{i=28}^{35} b_i 2^{34-i}, & n_{H_2} &= \sum_{i=36}^{43} b_i 2^{43-i} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} L_1 &= 0.05 + n_{L_1} \times \frac{0.05}{63}, & L_2 &= 0.10 + n_{L_2} \times \frac{0.05}{63} \\ M_1 &= 0.80 + n_{M_1} \times \frac{0.2}{255}, & M_2 &= 1.0 + n_{M_2} \times \frac{0.2}{255} \\ H_1 &= 2.80 + n_{H_1} \times \frac{0.2}{255}, & H_2 &= 3.0 + n_{H_2} \times \frac{0.2}{255} \end{aligned} \tag{4}$$

3.2 利用遗传算法进行系统优化

优化模块利用遗传算法通过调用历史数据库中的试验数据和模糊诊断模块中的诊断程序 MHZD(X, CS, YQ)对系统进行优化。本优化过程适应度函数取最大诊断误差与诊断误差的差值,交叉概率为 0.3,变异概率为 0.05,具体算法如下:

- a. 输入历史试验数据 X 和期望输出矩阵 YQ ;
- b. 随机产生 50 个 44 位的二进制串作为初始种群;
- c. 利用 3.1 中所描述的映射关系将 50 个种群的二进制串转化为 50 个参数矩阵 $CS_k = [L_{1k} \ L_{2k} \ M_{1k} \ M_{2k} \ H_{1k} \ H_{2k}]$, $k=1, 2, \cdots, 50$;
- d. 对种群的每一个体所对应的 CS_k 和矩阵 X 调用 MHZD(X, CS_k, YQ),利用诊断输出计算每一个体的诊断均方误差和适应度;
- e. 若某一个体对应之诊断均方误差达到设定要求,则结束优化过程,输出对应该个体的参数矩阵 CS ,否则继续下一步;
- f. 根据适应度计算每一个体的选择概率和累积概率;
- g. 利用轮盘赌子程序选择参与再生繁殖交叉操作的个体,随机生成交叉位置,以 0.3 的交叉概率对选择出来的个体按交叉位置随机单点交叉进行再生繁殖;
- h. 对经历交叉后形成的种群的每一个体,以 0.05 的变异概率在随机生成的位置进行变异操作,生成新一代种群,转步骤 c。

图 3 为两次优化过程中,每一代的最小诊断均方误差 $e_{\min}$ 与进化世代 d 的关系。

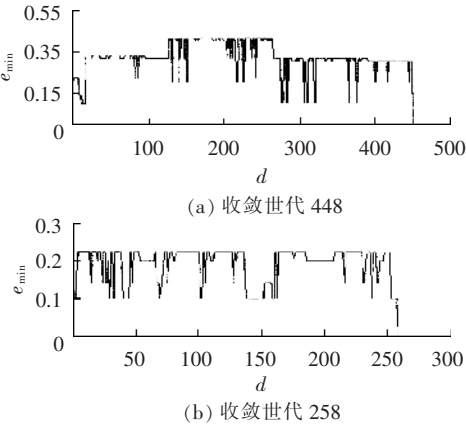


图 3 优化过程的最小误差

Fig.3 The minimum error during optimization

4 诊断实例

表 3 为利用本系统对所收集的 10 个样本数据进行诊断的记录。

表 3 样本诊断记录					
Tab.3 The records of sample diagnosis					
序号	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	诊断结果	实际结论
1	0.034	2.571	6.800	故障 8	高温过热
2	0.000	7.352	1.998	故障 7	中温过热
3	0.002	6.357	5.620	故障 8	高温过热
4	3.269	0.117	4.333	故障 3	低温放电
5	0.003	3.296	4.561	故障 8	高温过热
6	0.000	1.700	0.057	故障 6	低温过热
7	0.002	4.387	6.510	故障 8	高温过热
8	0.058	4.175	3.068	故障 8	高温过热
9	0.004	4.300	4.909	故障 8	高温过热
10	6.100	0.522	0.833	故障 5	电弧 *

第10条记录与实际情况有差异,这是因为在用历史数据模糊诊断系统进行优化时,对应表2中序号为4(电弧)和序号为5的样本记录较少使得优化不充分所导致。由表2可见,故障4(电弧)的编码为102,故障5的编码为001,而表3中的第10条记录对应的编码为200,所以第10条记录到故障4和故障5的编码距离均为 $\sqrt{5}$,当优化不充分时导致误判。因此,要使该诊断系统能有效地工作,必须给优化模块提供充分的样本记录。

5 结语

本文根据DGA三比值法建立了一个模糊推理变压器故障诊断系统,并利用遗传算法对该系统进行优化。实例验证该系统具有较好的诊断能力。该系统的优化模块可进一步扩充以包含多种优化算法,诊断模块也可进一步扩充使含更多形式的隶属度函数供选择,进一步提高其诊断能力和诊断精度。

参考文献:

- [1] 电力部. 变压器油中溶解气体分析和标准导则 (SD187-86)[M]. 北京:水利电力出版社,1986.
- [2] LIN C E, LING J M, HUANG C L. An expert system for transformer fault diagnosis and maintenance using dissolved gas analysis [J]. *IEEE Trans. on Power Deliv.*, 1993, 8(1): 231-238.
- [3] 杨启平, 薛五德, 符 扬, 等. 专家系统在变压器故障诊断中的应用[J]. 变压器, 1996, 33(5): 35-38.
YANG Qi-ping, XUE Wu-de, FU Yang, *et al.* An expert system for transformer fault diagnosis [J]. *Transformer*, 1996, 33(5): 35-38.
- [4] BHATTACHARYYA S K, SMITH R E, HASKEW T A. A neural network approach to transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis data [A]. *Proceedings 1993 North American Power Symposium*[C]. Washington D C, USA: [s.n.], 1993. 125-129.
- [5] 黄鞠铭, 朱子述, 胡文华, 等. BP网络在基于DGA变压器故障诊断中的应用[J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 21-23.
HUANG Ju-ming, ZHU Zi-shu, HU Wen-hua, *et al.* The application of BP for dissolved gas analysis based on transformer fault diagnosis [J]. *High Voltage Engineering*, 1996, 22(2): 21-23.
- [6] 金 明, 吴新振, 邓 忠, 等. 基于Kohonen网络的电力变压器故障诊断方法[J]. 变压器, 1997, 34(8): 28-31.
JIN Ming, WU Xin-zhen, DENG Zhong, *et al.* A new method used for power transformer fault diagnosis based on the Kohonen network [J]. *Transformer*, 1997, 34(8): 28-31.
- [7] 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 Trans. on Power Systems*, 2000, 15(2): 593-598.
- [8] 徐 文, 王大忠, 周泽存. 基于模糊理论的变压器故障诊断专家系统[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(6): 32-37.
XU Wen, WANG Da-zhong, ZHOU Ze-cun. Expert system for faults diagnosis of transformer based on fuzzy set theory [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1995, 19(6): 32-37.
- [9] 张宇辉, 侯 勇, 徐丽杰. 模糊关系方程及其在电力变压器故障诊断中的应用[J]. 东北电力技术, 1996, (4): 1-3.
ZHANG Yu-hui, HOU Yong, XU Li-jie. Transformer fault diagnosis based on fuzzy relation equation [J]. *Northeastern Electric Power Technology*, 1996, (4): 1-3.
- [10] YANG Hong-tzer, LIAO Chiung-chou. Adaptive fuzzy diagnosis system for dissolved gas analysis of power transformers [J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1999, 14(4): 1342-1350.
- [11] HUANG Y C, YANG H T, HUANG C L. Developing a new transformer diagnosis system through evolutionary fuzzy logic [J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1997, 12(2): 762-768.
- [12] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论与应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

谢可夫(1956-), 男, 江西奉新人, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统故障诊断理论和技术(E-mail: kefuxie@hnnu.edu.cn);

罗 安(1957-), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统故障诊断理论和技术、电力系统谐波治理等。

Fuzzy diagnosis system optimized with genetic algorithm for power transformer

XIE Ke-fu, LUO An

(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the three-ratio method of dissolved gas analysis for power transformer, a fuzzy diagnosis system obeying Mamdani fuzzy reasoning rules is presented. The system composes of history database, fuzzy reasoning and diagnosing module, optimization module. Its fuzzy membership functions are optimized by genetic algorithm and historical test data, the lack of criterion for critical value in three-ratio method is overcome and the lacking codes in fault diagnosis can be explained. Ten sampling data are diagnosed by the proposed system, and the results show that it improves the veracity of transformer fault diagnosis.

This project is supported by the National Key Technologies R&D Program of China (2002BA218C).

Key words: genetic algorithm; power transformer; fault diagnosis; fuzzy reasoning