

基于改进灰色聚类分析的电力变压器故障诊断

郑蕊蕊, 赵继印, 王志男, 吴宝春

(吉林大学 通信工程学院, 长春 130022)

摘要:提出了基于高斯白化权函数的灰色聚类算法和高斯白化权函数参数 σ 的选择方法,通过对34组故障变压器DGA数据的学习,初步确定了 σ 参数值。实验分析证明,本文提出的故障诊断方法与实际检测结果一致,具有一定的有效性和实用性,并且具有分析速度快、实时性好的优点。

关键词:自动化技术;电力变压器;灰色聚类;高斯白化权函数;故障诊断

中图分类号:TP206 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)05-1237-05

Power transformer fault diagnosis based on improved gray clustering analysis

ZHENG Rui-rui, ZHAO Ji-yin, WANG Zhi-nan, WU Bao-chun

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: A gray clustering algorithm based on Gauss whitening weighting function and a method to choose the parameter σ of the function were proposed. The values of the parameter σ were defined preliminarily after studying the DGA data of 34 groups of the fault power transformers. The experimental analysis demonstrates that the proposed fault diagnosis method leads to the results in good agreement with those by practical detections. This method seems effective and practical, and is characterized by fast analysis and good real-timeness.

Key words: automatic technology; power transformer; gray clustering; Gauss whitening weighting function; fault diagnosis

电力变压器是电力系统中的关键设备,是影响整个电网安全运行的主要因素。电力变压器故障诊断技术是国内外电力部门极为重视的科研项目^[1-4],它对于提高电网供电可靠性和运行安全性,降低变压器维修费用,减少变压器故障带来的经济损失具有重要意义。由于常规的油中溶解气体分析方法(Dissolved Gases Analysis, DGA)对充油电气设备故障诊断的可靠率达85%以上,因此已成为国内外诊断充油电气设备故障的一种最为有效的手段^[5]。GB/T7252-2001《变压器油

中溶解气体分析和判断导则》推荐改良的三比值法虽然形式比较简单,但是因为简化了故障因素的复杂性而使得故障诊断正确率只能达到80%左右^[1]。近年来,国内外学者以电力变压器油中溶解气体为特征量,研究开发以模糊数学、神经网络、灰色系统及粗糙集等理论为基础的智能化诊断方法,对推动在线监测为主要手段的状态维修体系的逐步实施起了非常重要的作用^[2-9]。神经网络本身存在局部最优以及运算复杂等缺点,而模糊理论在确定隶属度函数以及模糊规则方面存

收稿日期:2007-05-28.

基金项目:国家中小企业技术创新项目(SC0604101);长春市科技局项目(05GG17).

作者简介:郑蕊蕊(1982-),女,博士研究生.研究方向:智能信息处理与传输. E-mail: aidazheng@126.com

通信作者:赵继印(1960-),男,教授,博士生导师.研究方向:智能信息处理与传输. E-mail: zhaojiyin2000@163.com

在人为因素,缺乏令人信服的客观依据。文献[2]和文献[9]通过分析变压器故障性质与油中溶解气体的特征量之间的关系,引入灰色系统理论,采用灰色聚类算法进行变压器故障诊断,说明灰色聚类算法在变压器故障诊断中具有一定的应用价值和理论依据。本文提出一种基于改进灰色聚类的电力变压器故障诊断方法,能够提高电力变压器故障类型和部位的诊断精度,力求使电力变压器故障诊断技术的研究在现有工作基础上更进一步。

1 灰色聚类法的基本原理

1.1 灰色聚类法

在理论上,对于不同性质的变压器故障,变压器内部绝缘物分解产生的气体不同。对于同一性质的故障,由于故障程度不同,所产生的气体数量也不同。即使得到变压器油中溶解气体的数据,单一气体因素也不能够决定变压器的故障,即变压器系统中单一因素对导致故障原因的机理缺乏完备性。同时,由于油中溶解气体相互制约关系的不确定性,发生哪类故障将产生哪类气体没有明确的定性和定量描述^[9]。因此,电力变压器故障系统是一个典型的“灰色系统”,通过灰色理论诊断电力变压器故障的实质是一个灰色系统的“白化”过程。灰色聚类属于灰评估理论,是灰色系统理论的重要组成部分,它根据灰数的白化权函数将一些观测指标或观测对象按若干个灰类进行归纳,从而判断聚类对象所属的灰类。

1.2 灰色聚类基本原理

选取 N 个聚类对象,以 $i=1,2,\dots,N$ 表示;选取 S 个聚类灰类,以 $k=1,2,\dots,S$ 表示;选取 M 个聚类指标,以 $j=1,2,\dots,M$ 表示。设 d_{ij} 为第 i 个聚类对象对于第 j 个聚类指标的样本,则可得样本矩阵 D

$$D = (d_{ij})_{N \times M} \quad (1)$$

令 F 为映射, $OPf_{jk}(d_{ij})$ 为样本 d_{ij} 用第 j 个聚类指标的 k 个灰类量所作的运算, f_{jk} 为第 j 个聚类指标对第 k 个灰类的白化权函数,即

$$F: OPf_{jk}(d_{ij}) \rightarrow \sigma_{jk} \in [0,1]$$

其中 $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M, 1 \leq k \leq S$, 称 F 为灰色聚类。

确定灰类白化权函数 f_{jk} , f_{jk} 有以下三种形式:

(1) 若灰类 $\otimes \in [x_1, x_2, \infty]$, 则

$$f_{jk}(d_{ij}) = \begin{cases} \frac{d_{ij} - x_1}{x_2 - x_1}, & d_{ij} \in [x_1, x_2] \\ 1, & d_{ij} \in [x_2, \infty] \end{cases} \quad (2)$$

(2) 若灰类 $\otimes \in [x_1, x_2, x_3]$, 则

$$f_{jk}(d_{ij}) = \begin{cases} \frac{d_{ij} - x_1}{x_2 - x_1}, & d_{ij} \in [x_1, x_2] \\ \frac{x_3 - d_{ij}}{x_3 - x_2}, & d_{ij} \in [x_2, x_3] \\ 0, & d_{ij} \notin [x_1, x_3] \end{cases} \quad (3)$$

(3) 若灰类 $\otimes \in [0, x_1, x_2]$, 则

$$f_{jk}(d_{ij}) = \begin{cases} \frac{x_2 - d_{ij}}{x_2 - x_1}, & d_{ij} \in [x_1, x_2] \\ 1, & d_{ij} \in [0, x_1] \end{cases} \quad (4)$$

记 λ_{jk} 为第 j 个聚类指标对于第 k 个聚类灰类的分级界限, 则第 j 个聚类指标对于第 k 个聚类灰类的权 η_{kj} 为

$$\eta_{kj} = \lambda_{jk} / \sum_{j=1}^5 \lambda_{jk} \quad (5)$$

第 i 个聚类对象对第 k 个聚类灰类的聚类系数 σ_{ik} 为

$$\sigma_{ik} = \sum_{j=1}^M f_{jk}(d_{ij}) \eta_{kj} \quad (6)$$

$\sigma_i = (\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{is})$ 为 σ_{ik} 的聚类向量, σ_i 中的最大值所对应的聚类灰类就是该聚类对象所属的灰类。

2 基于高斯白化权函数的灰色聚类

根据灰色聚类基本算法,文献[2]提出了基于灰色聚类的变压器故障诊断方法,该方法简单、实用。但是在文献[2]采用的三角形的白化权函数和文献[9]采用的梯形白化权函数中,都存在函数与横轴(气体百分含量)相交的点的确定问题。在灰色聚类的白化权函数中,明确规定函数的起点和终点应有其明确含义^[10],文献[2]仅指出该值应为聚类中心值的 2 倍,没有说明依据,缺乏合理、有效的指导方法;对某种故障各种百分含量的权值,也就是斜率相等也不符合实际情况。因此,本文采用正态分布的概率密度函数(高斯函数)作为白化权函数,这样对于所有的气体含量对应某一种故障的权值不同,越接近标准值的权值越大,越远离标准值的权值越小;同时也不用人为地确定零点,减少了人为因素的干扰;并且使得聚类对象指标在任何实测值对每个给定影响的类别都有不为零的隶属度,既考虑到了相邻级别聚类标准值对中间级别标准值的影响,又体现了灰色系统

理论对信息的默承认原理。

表 1 为变压器故障的参数模型^[2]。其中 X_1 为变压器正常运行序列; X_2 为低能放电序列; X_3 为高能放电序列; X_4 为中低温过热故障序列; X_5 为高温过热故障序列; X_6 为围屏树枝状放电序列; X_7 为变压器匝间、层间故障序列; X_8 为分接开关故障序列; X_9 为铁心两点或多点接地故障序列。 $X_1 \sim X_9$ 构成变压器故障诊断的 9 个灰类。 $H_2\%$ 表示 H_2 占总气体的体积分数; $CH_4\%$ 、 $C_2H_6\%$ 、 $C_2H_4\%$ 和 $C_2H_2\%$ 分别表示 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 占总烃的体积分数。

表 1 变压器故障诊断的参数模型^[2]

Table 1 Parameter model of transformer fault diagnosis

溶解气体 /%	故障类型								
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
H_2	46.1	58.0	43.7	15.3	11.3	58.6	28.8	13.6	11.2
CH_4	21.5	44.9	30.2	26.2	24.6	30.5	28.2	21.6	30.8
C_2H_6	61.5	11.0	3.7	21.0	12.7	4.9	3.9	10.8	11.6
C_2H_4	15.8	20.6	46.6	52.8	59.9	26.2	34.4	58.1	56.2
C_2H_2	1.2	23.5	19.4	0.0	2.8	38.4	33.4	9.5	1.4

2.1 高斯白化权函数构造

高斯白化权函数的公式为

$$f_{jk}(d_{ij}) = \begin{cases} 1, & x \in [0, d_{ij}] \\ \exp\left\{-\frac{(x-d_{ij})^2}{2\sigma^2}\right\}, & x \in [d_{ij}, \infty] \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{jk}(d_{ij}) = \exp\left\{-\frac{(x-d_{ij})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (8)$$

$$f_{jk}(d_{ij}) = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{(x-d_{ij})^2}{2\sigma^2}\right\}, & x \in [0, d_{ij}] \\ 1, & x \in [d_{ij}, \infty] \end{cases} \quad (9)$$

高斯白化权函数公式对应的函数图见图 1。

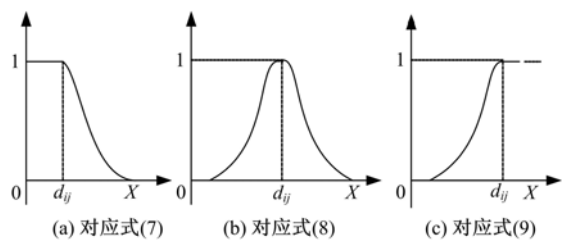


图 1 高斯白化权函数图

Fig. 1 Gauss Whiten function

2.2 高斯白化权函数 σ 的选择

通过对高斯白化权函数的分析,确定函数中的均值就是表 1 中对应的值,但是方差 σ 有待进

一步确定。结合灰色聚类算法,认为对应标准模式的白化值应该最大,即等于 1;当聚类值属于 $[f^*, 1](f^* \in [0, 1])$ 时对该模式的影响较大,则大的白化值应该越大,使聚类结果更清晰明显;其他白化值对聚类结果影响很小,则白化值越小越好,下降速度快以减少干扰,如图 2 所示。所以,选择的高斯型白化权函数应具有以下特性:当 $f \in [f^*, 1]$ 时, $f_{jkG} \geq f_{jk\Delta}$;当 $f \in [0, f^*]$ 时, $f_{jkG} < f_{jk\Delta}$ 。其中, f_{jkG} 表示高斯函数对应的白化值, $f_{jk\Delta}$ 表示三角函数对应的白化值。确定 λ 的具体算法流程如图 3 所示。

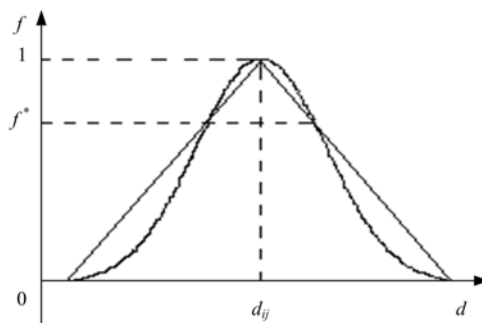


图 2 高斯函数与三角函数对比图

Fig. 2 Comparison between Gauss function and triangle function

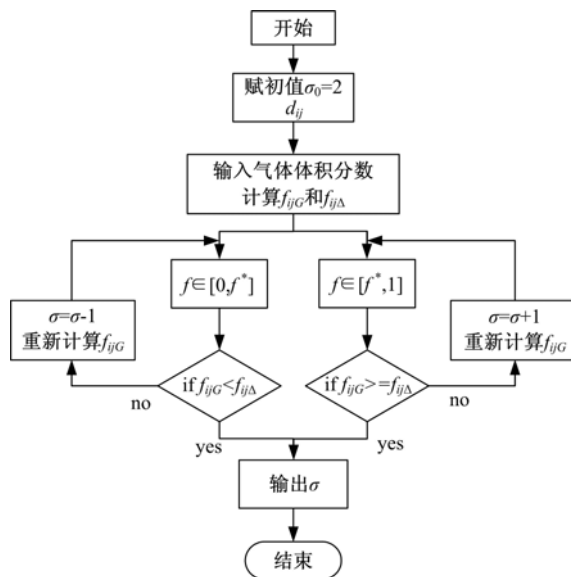


图 3 确定 σ 的算法流程图

Fig. 3 Flowchart of defining σ

通过对三角白化权函数代入数值进行分析,当代入值所对应的白化值大于 0.75 时,对聚类结果影响较大;当白化值小于 0.75 时,对聚类结果影响较小。通过大量的实验,最终选择 $f^* = 0.75$,采用 34 组变压器故障诊断历史数据作为训

练集,通过对这些数据的初步分析,得到了一系列高斯函数方差 σ 值。在实践中,通过同一值与文献[2]方法所得结果的比较,对高斯函数方差 σ 值进行微调。

3 实验结果分析

以 21 组故障变压器油色谱数据为例,用文献

[2]中所述变压器故障诊断法与基于高斯白化权函数的灰色聚类法诊断的对比见表 2。在表 2 列出的 21 组数据中,有 16 组与文献[2]判断故障类型一致;4 组诊断结果优于文献[2];1 组诊断结果不如文献[2],但与实际吊罩检查结果较符合。在实际应用中,可以综合考虑两种方法,以提高变压器故障诊断的准确度。

表 2 基于高斯白化权函数的灰色聚类算法与文献[2]方法结果对比

Table 2 Comparison between gray clustering arithmetic based on Gauss Whiten function and the method in reference [2]

故障变压器	油色谱数据/ 10^{-6}					文献[2]结论	与实际	本文结论	与实际
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	故障类型	是否符合	故障类型	是否符合
四川 220 kV 大康站 1 号主变	164	244	103	497	8.3	9.5	符合	9.5	符合
湖南金竹山电厂 200 kV 主变	59	28	9	70	15	8.5	符合	8.5	符合
东北某 1 号变	20.6	19.89	7.4	61.27	1.51	5	符合	5	符合
SFPSL-6300/220	150	27	3.6	63	90	6	符合	6	符合
宜宾叙南 110 kV1 号变	162	109	11.1	201	183	7	符合	7	符合
麻山旧主变	6.33	28.21	42.23	351.43	30.42	5	符合	5	符合
梨东主变	303.00	406.26	72.05	409.08	69.94	9.3	符合	3.9	符合
浙江某变电站 7 号主变	70.4	69.5	28.9	241.2	10.4	5	符合	5	符合
营口熊岳某主变	201	36.1	6	32.3	47.2	6	符合	6	符合
重庆电厂 11 号主变	26.6	22.7	22.5	109	0	5	符合	5	符合
四川电力局某变电站 1# 主变	188	236	18.1	237	31.8	3	符合	3	符合
兰州某电厂 2# 主变	19.6	320.7	279.2	574.7	0	4	符合	4	符合
SSPZ-45000/110	139	52	6.8	63	9.6	9	不符合	3	较符合
黄石电厂 2 号主变	93	58	43	37	0	2	符合	2	符合
陕西金家坪电站某变压器	4670	3500	2120	5040	2560	7.3	符合	3.7	符合
某变压器	650	53	34	20	0	6.2	符合	2.6	符合
某变压器	41.6	25.1	124	15.7	206	1	不符合	6	符合
某变压器	14.7	3.8	10.5	2.7	0.2	1	符合	1	符合
某变压器	127	107	11	154	224	7.5	不符合	6,7,3	较符合
某变压器	4.3	193	118	128	0	9.4	符合	2.6	较符合
某变压器	7.6	96.3	26.7	4.7	135	9,6,2	较符合	9,6,3	符合

4 结束语

本文提出了基于高斯白化权函数的灰色聚类算法,并将该方法引入到电力变压器故障类型的诊断当中。通过与文献[2]中灰色聚类算法结论和故障变压器实际情况的比较,发现基于高斯白化权函数的灰色聚类法具有较强的有效性和实用性,在一定程度上可以作为三比值法的必要补充。运用灰色聚类法对变压器故障类型进行诊断,不但能判断出故障的类型,同时还能反映出故障发

生的位置,是一种值得深入探讨和研究的方法。在基于高斯白化权函数的灰色聚类算法中,每个高斯白化权函数方差 σ 值的确定是该算法是否准确的前提条件。在后续的研究中,还应该通过更多数据的试验,确定最佳的 σ 值,以进一步提高故障诊断的准确度。

参考文献:

[1] 章政,杨荆林,肖登明,等. 基于油中溶解气体分析的变压器绝缘故障诊断方法的研究和发展[J]. 电力设

- 备,2004,5(1):20-24.
- Zhang Zheng, Yang Jing-lin, Xiao Deng-ming, et al. Research and development on insulation fault diagnosis of power transformer based on dissolved gas analysis[J]. *Electrical Equipment*, 2004, 5(1): 20-24.
- [2] 李俭,孙才新,陈伟根,等. 基于灰色聚类分析的充油电力变压器绝缘故障诊断的研究[J]. *电工技术学报*, 2002,17(4):24-29.
- Li Jian, Sun Cai-xin, Chen Wei-gen, et al. Study on fault diagnosis of insulation of oil-immersed transformer based on grey cluster theory[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2002, 17(4):24-29.
- [3] Duraisamy V, Devarajan N, Somasundareswari D, et al. Neuro fuzzy schemes for fault detection in power transformer[J]. *Applied Soft Computing*, 2007, 7(2):534-539.
- [4] Georgilakis P S, Katsigiannis J A, Valavanis K P, et al. A systematic stochastic petri net based methodology for transformer fault diagnosis and repair actions[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2006,45(2):181-201.
- [5] 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.
- [6] Syed M Islam, Wu T, Ledwich G. A novel fuzzy logic approach to transformer fault diagnosis [J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000,7(2):177-186.
- [7] Guardado J L, Naredo J L, Moreno P, et al. A comparative study of neural network efficiency in power transformers diagnosis using dissolved gas analysis[J]. *IEEE Trans Power Delivery*, 2001, 16(4):643-647.
- [8] 俞晓东,孙莹,臧宏志. 基于粗糙集与模糊神经网络的变压器故障诊断方法[J]. *电力自动化设备*, 2003, 23(2):15-17.
- Yu Xiao-dong, Sun Ying, Zang Hong-zhi. Transformer fault diagnosis based on rough set theory and neural fuzzy network[J]. *The Electric Power Automation Equipments*, 2003,23(2):15-17.
- [9] 赵继印,郑蕊蕊,刘宇. 基于梯形灰色聚类分析的变压器故障诊断的研究[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2008,38(3):726-730.
- Zhao Ji-yin, Zheng Rui-rui, Liu Yu. Research on power transformer fault diagnosis based on trapezium gray clustering analysis[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2008, 38(3):726-730.
- [10] 邓聚龙. 灰色系统理论[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [11] GB/T7252-2001. 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
- [12] Li Jian-po, Zhao Ji-yin, Zheng Rui-rui. Fault diagnosis system of transformer based on gas chromatography[C]//ICMLC2006, Dalian, China, 2006.