第35卷，第1期
2015年1月

光 谱 学 与 光 谱 分 析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 35，No. 1，pp10-13
January，2015

参数寻优支持向量机在基于光声光谱法的变压器故障诊断中的应用

张玉欣[1]，程志峰[2]，徐正平[2]，白 晶[1*]

1. 北华大学电气信息工程学院，吉林 吉林市 132021
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033

摘 要 为了解决变压器气相色谱分析法故障诊断中存在的操作繁琐、消耗待测气体和载气、检测周期长等缺点，提出了利用光声光谱技术检测变压器油中 CH_4，C_2H_2，C_2H_4，C_2H_6，H_2 五种特征气体的含量并计算 C_2H_2/C_2H_4，CH_4/H_2，C_2H_4/C_2H_6 三对比值数据。将五种 SVM 类型和四种核函数采用交叉组合建立20种不同的支持向量机模型，并采用启发式算法对于惩罚因子 c 和 g 的取值进行参数寻优，以建立变压器故障诊断准确率最高、最快运行速度的支持向量机模型。启发式算法主要对比研究了粒子群算法和遗传算法在寻优精度与速度上的效果。仿真实验结果表明 C-SVC 模型、RBF 核函数、遗传算法寻优构成的支持向量机模型对变压器故障的诊断准确率最高，测试集达到97.5%，训练集达到98.333 3%，并且遗传算法的寻优速度快于粒子群算法2倍左右。该方法具有操作简单、非接触性测量、不消耗载气、检测周期短、稳定性和灵敏度高等优点。可以代替传统的气相色谱分析法进行变压器故障诊断，满足变压器故障诊断的实际工程需要。

关键词 光声光谱；支持向量机；粒子群算法；遗传算法；变压器；故障诊断

中图分类号：TP18；TM41 **文献标识码**：A **DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2015)01-0010-04

引 言

电力变压器的可靠运行是保障电力系统安全的关键，中华人民共和国电力行业标准《变压器油中溶解气体分析和判断导则 DL/T 722-2000》推荐的改良三比值法是目前国内外分析变压器潜伏性故障的最有效措施之一，它是通过测量变压器油中特征气体含量并根据特征气体比值 C_2H_2/C_2H_4，CH_4/H_2，C_2H_4/C_2H_6 确定变压器故障类型。特征气体检测主要使用气相色谱法，但其存在操作繁琐、要消耗待测气体和载气、检测周期长等缺点。光声光谱法是基于光声效应来检测吸收物体积分数的一种光谱技术。电脉冲红外光源 MIRL17-900 构成的光声光谱装置经实验验证与气相色谱仪对故障气体各组分体积分数的测量结果差别不大[1]；采用激光共振光声光谱技术检测乙炔气体达到了 10^{-6} 量级的检测灵敏度[2]；基于半导体激光器的乙炔气体光声光谱检测偏差低于4.2%[3]。大量研究表明利用光声光谱法替代气相色谱法检测变压器油中溶解气体是可行的，检测结果满足变压器故障诊断的精度要求，且光声光谱法具有操作简单、非接触性测量、不消耗气体、检测周期短、稳定性和灵敏度高等优点。

在变压器特征气体的光谱分析中较多采用人工神经网络[4]，常见的有 BP 神经网络、概率神经网络等，BP 神经网络往往收敛性差，容易陷入局部最优，即使利用智能算法优化权值和阈值也不能完全改善这一问题；而概率神经网络模式层神经元个数等于训练样本个数，势必容易造成网络规模巨大，计算量庞大等问题[5]。

支持向量机(SVM)的主要思想是建立一个分类超平面作为决策面，使得正例和反例之间的隔离边缘被最大化，它是结构风险最小化的近似实现，在模式分类问题中其泛化能力更强、全局寻优能力更佳，更符合改良三比值法进行变压器故障诊断的复杂情况[6,7]。

1 实验部分

1.1 样品

考虑到变压器型式、容量、运行环境等因素的影响，在北华大学变压器厂、丰满发电厂、吉林省电科院共搜集并整

收稿日期：2014-01-02，修订日期：2014-04-15

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(61308099)和吉林省教育厅“十二五”科技技术研究项目(2013178，2014206)资助

作者简介：张玉欣，女，1979年生，北华大学电气信息工程学院讲师 e-mail：Qxlife816@163.com

*通讯联系人 e-mail：bhdxzyx@163.com

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

理出 160 组不同制造厂生产的、运行在不同电压等级的、经吊芯检查有明确结论的变压器油样，分别对应改良三比值法中的八种变压器故障类型，每种故障样品数量为 20 组。

1.2　仪器

英国凯尔曼公司的 Transport-X 油浸式变压器油中溶解气体及微水便携式监测仪，该仪器利用光声光谱技术检测变压器油中 H_2，CH_4，C_2H_6，C_2H_4，C_2H_2，CO，CO_2 共七种故障气体及微水含量，检测精度为±5%或±2 ppm。

分析软件 Matlab 2011b[8]、支持向量机工具箱 libsvm-3.1-[FarutoUltimate3.1 Mcode][9]。

1.3　方法

对 160 组样品油进行编号，每组油样取 50 mL 注入检测设备后按照触摸屏提示操作，23 min 内可完成一组油样故障气体及微水含量的检测，记录 160 组油样的检测数据。根据国际改良三比值法，计算每组实测数据的三对特征气体比值 C_2H_2/C_2H_4，CH_4/H_2，C_2H_4/C_2H_6，结果如图 1 所示。

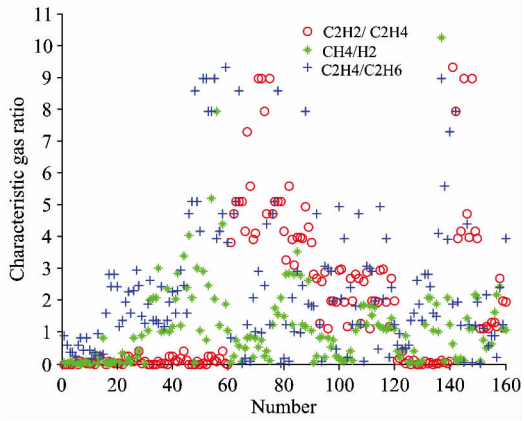

Fig. 1　Three ratios for 160 set of samples

1.4　数据处理

将图 1 中的每组油样的改良三比值数值和对应的故障类型标签值保存到 data.mat 文件中，data 是 double 型 160×4 矩阵，1 到 3 列分别对应 C_2H_2/C_2H_4，CH_4/H_2，C_2H_4/C_2H_6 三组特征气体比值，第 4 列是故障类别标签值。

用 mapminmax 函数对图 1 中的数据进行[0,1]归一化处理，结果如图 2 所示。每一种故障类型提取 15 组样本作为训练集，其余 5 组样本作为测试集，即训练集有 120 组数据，测试集有 40 组数据。

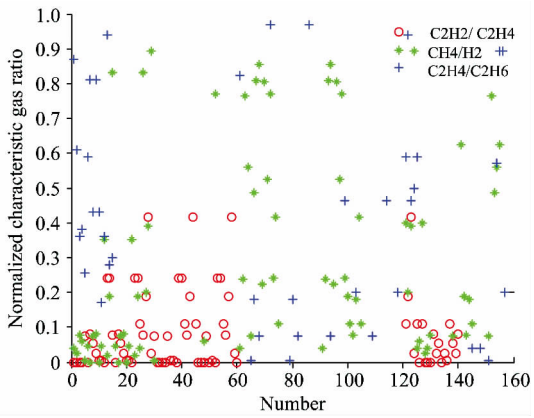

Fig. 2　Normalized three ratios for 160 set of samples

1.5　支持向量机建模

LIBSVM 工具箱提供的 SVM 类型有五种，包括 C-SVC，nu-SVC，one-class SVM，spsilion-SVR 和 nu-SVR，分别对应的 $-s$ 的取值为 0，1，2，3，4；核函数类型有四种，线性核函数，多项式核函数，*RBF* 核函数和 *sigmoid* 核函数，分别对应的-t 的取值为 0，1，2，3。将五种 *SVM* 类型和四种核函数采用交叉组合建立 20 种不同的支持向量机类型，对于惩罚因子 c 和 g 的取值采用启发式算法进行参数寻优，通过对比各实验结果，找出最佳的 *SVM* 模型和惩罚因子 c 和 g 取值。在实验部分对比遗传算法和粒子群算法两种参数寻优方法的效果[10]。

2　结果与讨论

利用上述方法交叉建立各种 *SVM* 模型并利用遗传算法进行惩罚因子寻优，当-s 取 2，3，4 时准确率很低；$-$s 取 0 或 1 同时 $-$t 取 3 时的准确率也非常低，以上的各种 *SVM* 模型不论测试集还是训练集的准确率均低于 60%。表 1 列出了准确率较高的 *SVM* 模型的测试结果。

Table 1　Validation accuracy for various SVM model

		$t=0$	$t=1$	$t=2$
$s=0$	测试集准确率	95%(38/40)	92.5%(37/40)	97.5%(39/40)
	训练集准确率	94.1667%(113/120)	94.1667%(113/120)	98.3333%(118/120)
$s=1$	测试集准确率	85%(34/40)	52.5%(21/40)	90%(36/40)
	训练集准确率	90%(108/120)	73.333 3%(88/120)	97.5%(117/120)

从表 1 的结果可以看出 $-s=0$，$t=-2$ 时，即 C-SVC 模型、RBF 核函数构成的支持向量机模型(简称 CRGA)的预测准确率最高，测试集准确率达到 97.5%，40 个测试样本中只有 1 个错误，预测结果如图 3，此时 Best Validation Accuracy =94.166 7%，Best $c=2.972\ 8$，Best $g=16.318\ 9$，程序运行时间 30.867 1 s。训练集准确率达到 98.333 3%，120 个训练样本进行测试时只有 2 个错误，预测结果如图 4，此时 Best Validation Accuracy=95%，Best $c=1.971\ 4$，Best $g=28.094$，程序运行时间 36.0806 s。

C-SVC 模型、RBF 核函数构成的支持向量机模型，同一组测试集采用粒子群算法进行参数寻优建立模型(简称 CRPSO)。对测试集、训练集反复多次测试后的预测结果与

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

遗传算法结果相同，准确率分别是 97.5%和 98.333 3%，此时 Best Validation Accuracy=94.166 7%，Best c=13.811 5，Best g=17.602 1，程序运行时间 72.632 1 s；训练集粒子群算法寻优时 Best Validation Accuracy=94.166 7%，Best c=1.74，Best g=30.554 1，程序运行时间 71.444 s。

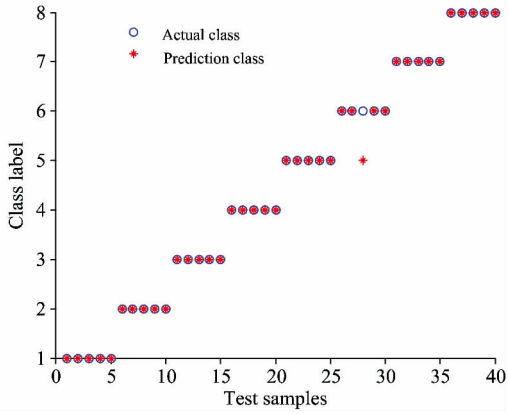

Fig. 3 Prediction of test data based on CRGA

经过多次实验发现遗传算法和粒子群算法在 C-SVC 模型、RBF 核函数构成的支持向量机参数优化结果相同，但是粒子群算法耗时却是遗传算法的 2 倍左右，因此综合考虑后采用遗传算法进行参数寻优。

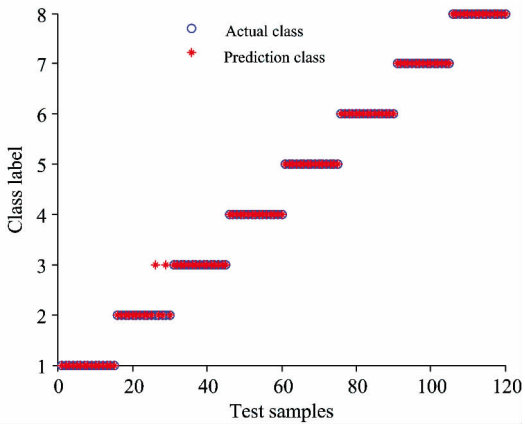

Fig. 4 Prediction of train data based on CRGA

3 结 论

利用光声光谱法提取变压器油中特征气体基于改良三比值法的数据文件作为输入量，通过对 SVM 类型、核函数类型、参数寻优算法进行交叉验证建立了最佳 SVM 模型，即 CRGA 寻优，通过多次实验对测试样品集准确性可达 97.5%以上，对训练样本集准确性可到 98.333 3%以上，实验结果满足变压器故障诊断的实际工程需要。光声光谱仪具有造价低、可靠性高、可维护性好等显著的优点，因此基于光声光谱法的变压器故障在线监测与诊断具有良好的应用前景。

References

[1] CHEN Wei-gen, YUN Yu-xin, PAN Chong, et al(陈伟根，云玉新，潘 翀，等). Automation of Electric Power Systems(电力系统自动化), 2007, 31(15): 94.

[2] YUN Yu-xin, ZHAO Xiao-xiao, CHEN Wei-gen, et al(云玉新，赵笑笑，陈伟根，等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2009, 35(9): 2156.

[3] CHEN Wei-gen, ZHOU Heng-yi, HUANG Hui-xian, et al(陈伟根，周恒逸，黄会贤，等). Chinese Jouranl of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 2010, 31(3): 665.

[4] ZHANG Yu-xin, LIU Yu(张玉欣，刘 宇). Applied Mechanics and Materials, 2014, 448—453: 3605.

[5] DUAN Hui-da, TIAN Yan-tao, LI Jin-song, et al(段慧达，田彦涛，李津淞，等). Control and Decision(控制与决策), 2012, 27(2): 216.

[6] LIU De-jun, TIAN Yan-tao, ZHANG Lei(刘德君，田彦涛，张 雷). Control and Decision(控制与决策), 2012, 27(12): 1890.

[7] LIU De-jun, TIAN Yan-tao, ZHANG Lei(刘德君，田彦涛，张 雷). Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报), 2011, 47(19): 14.

[8] CHEN Ming(陈 明). Neural Networks 43 Case Studies Based On MATLAB (Neural Network Theory and Examples Based on MATLAB(MATLAB 神经网络原理与实例精解). Beijing: QingHua University Press(北京：清华大学出版社), 2013. 10.

[9] WANG Xiao-chuan, SHI Feng, YU Lei, et al(王小川，史 峰，郁 磊，等). Neural Networks 43 Case Studies Based on MATLAB (MATLAB 神经网络 43 个案例分析). Beijing: Tsinghua University Press(北京：北京航空航天大学出版社), 2013. 102.

[10] DU Yan-li, TANG Zhi-guo, LI Yuan-chun(杜艳丽，唐志国，李元春). Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) (吉林大学学报·工学版), 2013, 43(2): 466.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Application of Optimized Parameters SVM Based on Photoacoustic Spectroscopy Method in Fault Diagnosis of Power Transformer

ZHANG Yu-xin[1], CHENG Zhi-feng[2], XU Zheng-ping[2], BAI Jing[1]*

1. School of Electronic and Information Engineering, Beihua University, Jilin 132021, China

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract In order to solve the problems such as complex operation, consumption for the carrier gas and long test period in traditional power transformer fault diagnosis approach based on dissolved gas analysis(DGA), this paper proposes a new method which is detecting 5 types of characteristic gas content in transformer oil such as CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6 and H_2 based on photoacoustic spectroscopy and C_2H_2/C_2H_4, CH_4/H_2, C_2H_4/C_2H_6 three-ratios data are calculated. The support vector machine model was constructed using cross validation method under five support vector machine functions and four kernel functions, heuristic algorithms were used in parameter optimization for penalty factor c and g, which to establish the best SVM model for the highest fault diagnosis accuracy and the fast computing speed. Particles swarm optimization and genetic algorithm two types of heuristic algorithms were comparative studied in this paper for accuracy and speed in optimization. The simulation result shows that SVM model composed of C-SVC, RBF kernel functions and genetic algorithm obtain 97.5% accuracy in test sample set and 98.333 3% accuracy in train sample set, and genetic algorithm was about two times faster than particles swarm optimization in computing speed. The methods described in this paper has many advantages such as simple operation, non-contact measurement, no consumption for the carrier gas, long test period, high stability and sensitivity, the result shows that the methods described in this paper can instead of the traditional transformer fault diagnosis by gas chromatography and meets the actual project needs in transformer fault diagnosis.

Keywords Photoacoustic spectroscopy; SVM; Particles swarm optimization; Genetic algorithm; Power transformer; Fault diagnosis

(Received Jan. 2, 2014; accepted Apr. 15, 2014)

* Corresponding author

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net