

Z427/1033(2008)-(20)



NUAA2009044433

Z427
1033(2008)-(20)

自动化学院

033~034~035 系



20

2009044433

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文(6)

序号	作者姓名	职称	单位	论文题目	刊物名称	年卷期
1	崔江 王友仁	中级 正高	033 033	一种云样本的控制产生及在电路故障诊断中的应用	控制理论与应用	2008, 25 (3)
2	崔江 王友仁	中级 正高	033 033	模拟电路故障的一种聚类二叉树支持向量机诊断新方法	仪器仪表学报	2008, 29 (10)
3	崔江 王友仁	中级 正高	033 033	基于DAGSVC的模拟软故障字典诊断方法	CTC' 08论文集	2008
4	陈飞 王友仁 崔江	硕士 正高 中级	033 033 033	基于电流信息CMOS SRAM存储单元故障测试	传感器与微系统	2008,27(6)
5	高桂军 王友仁 姚睿 崔江	硕士 正高 中级 中级	033 033 033 033	基于演化硬件的容错系统设计技术研究	信息与控制	2008,37(3)
6	韩晓静 王友仁 崔江	硕士 正高 中级	033 033 033	基于小波径向基网络的电力电子电路故障诊断	微电子学	2008,38(3)
7	王丽 王友仁 施玉霞	硕士 正高 副高	033 033 033	嵌入式存储器内建自修复电路的一种改进设计	高技术通讯	2008,18(2)
8	丁万山 席峻 柳莲花	副高 硕士 硕士	033 033 033	基于复Cinzburg-Landau方程的双核光纤中调制不稳定性的仿真研究	物理学报	2008, 57 (12)
9	郭艳平 丁万山	硕士 副高	033 033	基于VHDL的彩色线阵CCD驱动时序设计	微处理机	2008, 29 (5)
10	靖相坤 丁万山	硕士 副高	033 033	基于ARM的红外气体浓度检测系统的设计	计算机测量与控制	2008, 16 (7)
11	李鹏 丁万山	硕士 副高	033 033	基于USB总线的TMS320VC5509引导装载设计	电子科技	2008, 21 (4)
12	李艳楠 丁万山	硕士 副高	033 033	基于普通数据采集卡的远程测控系统的设计	电子科技	2008, 21 (2)
13	李亮 丁万山	硕士 副高	033 033	基于ARM的纸币号码识别系统	电子测量技术	2008, 31 (10)
14	丁万山	副高	033	在教学中实施“研究性学习”的探索	南京航空航天大学学报 (社科版, 高等教育研究)	2008, 10 (1)
15	贾银亮 张焕春 经亚枝	讲师 正高 副高	033 033 033	Bresenham直线生成算法的改进	中国图象图形学报	2008, 13 (1)
16	王海滨 徐贵力 王友仁	硕士 副高 正高	033 033 033	胚胎电子系统动态重构的设计与实现	计算机测量与控制	2008, 16 (10)
17	刘晓霞 徐贵力	硕士 副高	033 033	一种改进的舰船红外图像分割算法	传感器与微系统	2008. 27 (6)
18	王海滨 徐贵力 王友仁	硕士 副高 正高	033 033 033	基于JTAG接口的配置主控器的设计	仪器仪表用户	2008. 15 (2)
19	徐贵力 程月华	副高 助理 研究员	033 033 033	基于合作目标和视觉的无人飞行器全天候自动着陆技术	航空学报	2008. 29 (2)
20	蔡梦颖 徐贵力	硕士 副高	033 033	仿蝇复眼视觉系统中大视场图像的拼接	传感器与微系统	2007. 26 (12)
21	稽盛育 徐贵力	硕士 副高	033 033	基于红外视觉的无人机自主着舰合作目标的研究	红外技术	2007. 29 (10)

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文

22	倪立学 徐贵力	硕士 副高	033 033	一种地面合作目标的研究与设计	光电工程	2007. 34 (7)
23	朱永凯	讲师	033	A sensing system for monitoring the thickness of thin films by spectrum analysis of white-light interference	The International Society for Optical Engineering	2008年7064卷
24	孙逸飞 朱永凯	硕士 讲师	033 033	用于分子测量的光学相干法的信号处理	光学学报	2008年28卷
25	薛莉 朱永凯	硕士 讲师	033 033	小波变换在缺陷红外图像去噪中的应用	无损检测	2008年30卷
26	陈智军	中级	033	声表面波与声板波激发特性对比研	中国机械工程	2008, 19 (11)
27	王 丽 施玉霞 王友仁	硕士 副高 正高	033 033 033	一种嵌入式存储器内建自测试电路设计	计算机测量与控制	2008. 16 (5)
28	何义华 施玉霞	硕士 副高	033 033	变噪声环境下的语音端点检测算法	电声技术	2008. 32 (8)
29	姚 睿 于盛林 王友仁	副高 教授 教授	033 033 033	使用进化硬件的自适应形态滤波器设计	中国电机工程学报	2008. 28 (3)
30	朱寿高 田贵云	硕士 正高	033 033 033	金属磁记忆检测技术在残余应力测量中的应用	南昌航空大学学报	2007 年 21 卷 s8 期
31	周德强 田贵云	博士 生 正高	033 033 033	小波变换在脉冲电涡流检测信号中的应用	《传感器与微系统》	2008年, Vol. 27, No. 10: 115-117,120
32	张斌强 田贵云	硕士 正高	033 033 033	脉冲涡流检测技术的研究	《无损检测》	Vol.30 No. 20, 2008
33	王 颖 王海涛	硕士 副高	033 033	Style preserving Chinese character synthesis based on hierarchical representation of character	2008 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PROCESSING	VOLS 1-12
34	王海涛	副高	033	基于动态聚类与神经网络的车牌字符识别方法	《数据采集与处理》	2008 年 32 卷 2 期
35	崔 菊 王海涛	硕士 副高	033 033	基于光斑重心的交锁髓内钉远端定位方法研究	《应用光学》	20 08 年 29 卷 6 期
36	王 威 王海涛	硕士 副高	033 033	某小型无人机飞控系统的中断控制器设计	计算机测量与控制	20 08年 16 卷 12期
37	赵 敏 姚 敏 刘兼唐	正高 副高 硕士	033 033 033	基于遗传算法的小卫星多Agent任务调度优化设计	仪器仪表学报	2008, 29 (7)
38	邓军军 赵 敏 李 然	硕士 正高 硕士	033 033 033	基于ARM的CAN与ARINC249总线网关的实现	电子科技	2008, 21 (6)
39	顾 伟 赵 敏	硕士 正高	033 033	嵌入式数据库SQLite在家居能源控制子系统的应用	佳木斯大学学报	2008, 26 (6)
40	胡中华	博士	033	弧焊机器人MOTOMAN-UP20离线编程系统	电焊机	2008, 38 (6)
41	李 然 赵 敏 邓军军	硕士 正高 硕士	033 033 033	基于嵌入式系统的家居能源控制子系统人机交互设计	电子测量技术	2008, 31 (5)
42	孙 栓 赵 敏	硕士 正高	033 033	微小卫星星载计算机存储容错技术研究	计算机技术与发展	2008, 18 (8)

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文

43	徐建波 赵敏 徐仕玲	硕士 正高 硕士	033 033 033	基于ARM的便携式小卫星塔架测试系统的研究	计算机与现代化	2008, 24 (10)
44	徐仕玲 赵敏 徐建波	硕士 正高 硕士	033 033 033	野外早期火灾图像识别方法研究	计算机技术与发展	2008, 18 (6)
45	张砦 王友仁	讲师 正高	033 033	The research of self-repairing digital circuit based on embryonic cellular array	Neural Computation & Application	2008(17) (SCI:267PW)
46	田裕鹏	副高	033	缺陷红外检测的定量化分析与研究	仪器仪表学报	2008, 29 (11)
47	冯晓伟 田裕鹏	硕士 副高	033 033	基于形状内容描述子的点特征匹配	光电工程	2008, 35 (3)
48	樊玉平 田裕鹏	硕士 副高	033 033	基于视频处理的视线稳定技术	电子技术应用	2008, 34 (3)
49	白茂生 田裕鹏	硕士 副高	033 033	H. 264在DSP上的实现及优化	电子测试	2008, (6)
50	田裕鹏	副高	033	传感器原理网络虚拟实验室的构建	南京航空航天大学学报 (社会科学版)	2008, 10 (1)
51	宋晓峰 陈卫民 姜斌	副高	034 034 034	Sample reducing method in support vector machine based on K-closest sub-clusters	International Journal of Innovative Computing Information and Control	2008, 4 (7)
52	张小白 宋晓峰 王惠南 张焕萍	博士 副高 正高 博士	034 034 034 034	Sequential local least squares imputation estimating missing value of microarray data	Computers in Biology and Medicine	2008, 38 (10)
53	易辉 宋晓峰	硕士 副高	034 034	基于稳定性的基因表达数据聚类算法选择	计算机与应用化学	2008, 25 (5)
54	成文莲 钱志余	博士 正高	034 034	基于ReHo方法的颞叶癫痫功能磁共振成像研究	生物物理学报	2008, 24 (6)
55	戴丽娟 王惠南 钱志余 于国强	博士 正高 正高	034 034 034 034	血液可见吸收光谱与血氧参数神经网络估算法	光谱学与光谱学分析	2008, 28 (7)
56	戴丽娟 钱志余 李宽正 杨天明 王惠南	博士 正高	034 034 034 034 034	In vivo detection of reduced scattering coefficient of C6 glioma in rat brain by near-infrared spectroscopy	Journal of Biomedical Optics	2008, 13 (4)
57	戴丽娟 钱志余 王惠南 于国强	博士 正高	034 034 034 034	大鼠脑组织血氧饱和度的神经网络估算法	生物医学工程学杂志	2008, 25 (4)
58	李婷 李匙韬 钱志余	博士 中级 正高	034 034 034	Near-Infrared Optical Tomography Image Reconstruction Approach Based on 2-layered BP Neural Network	Advances in Biomedical Photonics and Imaging	
59	郭丽娜 钱志余 李宽正 戴丽娟 何亮	博士 正高	034 034 034 034 034	近红外光谱 (NIRS) 技术的大鼠胶质瘤活体在位检测研究	量子电子学报	2008, 25 (4)
60	徐玲 钱志余 陶玲	硕士 正高 副高	034 034 034	一种改进的医学图像光线投影体算法	长城2008国际物理大会	2008

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文

61	于海燕 钱志余	硕士 正高	034 034	基于功能磁共振成像的低频振幅算法的逻辑计算任务的脑活动研究	生物物理学报	2008, 24 (5)
62	曹清华 钱志余	硕士 正高	034 034	微电极立体定向手术脑组织实时识别技术研究	计算机测量与控制	2008, 16 (9)
63	成文莲 钱志余	博士 正高	034 034	基于ReHo方法的颞叶癫痫研究	长城2008国际物理大会	2008
64	李 虹 王惠南 章晓国	博士 正高	034 034 034	基于多尺度分析的血管内超声图像去噪和增强 (英文)	四川大学学报	2008, 45 (5)
65	郑 罡 王惠南	博士 正高	034 034	塔式多相水平集三维医学图像多目标分割算法	生物医学工程学杂志	2008, 25 (5)
66	戴丽娟 钱志余 王惠南	博士 正高 正高	034 034 034	大鼠脑组织血氧饱和度的神经网络估算法	生物医学工程学杂志	2008, 25 (4)
67	杨志根 王惠南 张志强	硕士 正高	034 034 034	基于ICA的颞叶癫痫缺省模式网络的研究	生物物理学报	2008, 24 (4)
68	戴丽娟 王惠南 钱志余	博士 正高 正高	034 034 034	血液可见吸收光谱与血氧参数神经网络估算法	光谱学与光谱分析	2008, 28 (7)
69	钟 元 王惠南 卢光明	博士 正高	034 034 034	基于时间聚类分析和独立成分分析的癫痫fMRI盲分析方法	生物物理学报	2008, 24 (3)
70	李 虹 王惠南 翁晓光	博士 正高 博士	034 034 034	基于二进小波阈值决策的血管内超声图像噪声和抑制	南京航空航天大学学报	2008, 40 (3)
71	刘兆健 王惠南	硕士 正高	034 034	独立成分分析实现成组fMRI数据的信号分离	中国医疗设备	2008, 23 (5)
72	李艳丽 王惠南 陶 玲	硕士 正高 中级	034 034 034	真三维立体显示系统的旋转体扫描技术研究	计算机应用与软件	2008, 45 (5)
73	李 虹 王惠南 董海艳	博士 正高 博士	034 034 034	基于小波变换的血管内超声图像血流斑点噪声抑制研究	生物医学工程学杂志	2008, 25 (2)
74	郁 芸 王惠南 罗建平	硕士 正高 副高	034 034 034	外阴诱发电位及其应用	生物医学工程学进展	2008, 29 (1)
75	刘海颖 王惠南 陈志明	博士 正高 博士	034 034 034	基于 (w, z) 参数化的欠驱动微小卫星姿态再定位控制	动力学与控制学报	2008, 6 (1)
76	郁 芸 罗建平 王惠南	硕士 副高 正高	034 034 034	诱发电位及其在外阴神经系统中的应用	科技创新导报	2008, 4
77	许新梅 王惠南 黄 伟	硕士 正高	034 034 034	基于独立成分分析和时间相关分析的脑功能连通研究方法 (英文)	中国医学物理学杂志	2008, 25 (1)
78	许新梅 王惠南 黄 伟	硕士 正高	034 034 034	基于独立成分分析和互相关分析的脑功能连接研究	中国医疗器械信息	2008, 14 (1)
79	左俊青 王惠南 刘海颖	硕士 正高 博士	034 034 034	单目视觉下基于对偶四元数的卫星姿态的确定	中国惯性技术学报	2008, 16 (5)
80	汤 敏 王惠南	博士 正高	034 034	生物组织连续切片的两步配准及快速重建	中国图象图形学报	2008, 13 (9)
81	杜 杭 王惠南	硕士 正高	034 034	基于手势和真三维显示的交互作用初步构想	现代显示	2008, (95)

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文

82	陶玲 钱志余 陈春晓	副高 正高 副高	034 034 034	基于光线投影的医学影像体绘制加速技术	光电工程	2008年 35卷 1期
83	陶玲 钱志余 陈春晓	副高 正高 副高	034 034 034	主动轮廓模型及其在医学体分割中的应用	华南理工大学学报（自然科学版）	2008年 36卷 1期
84	陶玲 钱志余 陈春晓	副高 正高 副高	034 034 034	基于小波变换模极大值的医学图像融合技术	华南理工大学学报（自然科学版）	2008年 36卷 8期
85	张艳 陈春晓	硕士 副高	034 034	基于代价函数掩模法的局部脑损伤fMRI 数据处理	中国生物医学工程学报	2008, 27 (6)
86	陈渊博 陈春晓	硕士 副高	034 034	抑制MR成像中刚体运动伪影的新方法	北京生物医学工程	2008, 27 (1)
87	李赳韬 钱志余 王惠南	中级 正高 正高	034 034 034	近红外光断层成像的理论和研究进展	生物医学工程学杂志	2008, 25 (1)
88	李赳韬 王惠南 钱志余	中级 正高 正高	034 034 034	近红外光断层成像逆向问题的优化算法	生物医学工程学杂志	2008, 25 (2)
89	李志宇 胡寿松	中级 正高	035 031	一类非线性不确定时滞系统的鲁棒容错控制	东南大学学报	2008, 38增刊
90	孙春贞 黄一敏	中级 正高	035 035	重复使用运载器无动力投放自适应制导技术	南京航空航天大学学报	2008, 40 (1)
91	孙春贞 黄一敏	中级 正高	035 035	重复使用运载器末端区域能量管理轨迹鲁棒性分析	兵工学报	2008, 29 (3)
92	孙春贞 黄一敏	中级 正高	035 035	重复使用运载器基于轨迹线性化的俯仰角控制	航空动力学报	2008, 23 (10)
93	孙春贞 黄一敏	中级 正高	035 035	重复使用运载器在线轨迹生成技术研究	弹箭与制导学报	2008, 28 (4)
94	王小青 黄一敏	博士 正高	035 035	无人直升机悬停姿态控制系统设计	南京航空航天大学学报	2008, 40 (5)
95	王小青 黄一敏	博士 正高	035 035	一种改进的显模型跟踪回路成形控制方法	第27届中国控制会议	2008 (EI084011616988)
96	王小青 黄一敏	博士 正高	035 035	Model System Design for Small-size Unmanned Helicopter Based on Moment Theory, Blade Element Theory and FlightLab Software,	the 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics	2008 (EI084011616988)
97	刘久富 杨忠	中级 正高	035 035	Test case generation based on orthogonal table for software black-box testing	哈尔滨工业大学学报	2008, 15 (3)
98	贺成龙 陈欣	博士 正高	035 035	RLV上升段控制技术研究	全国博士生论坛	2008
99	贺成龙 陈欣	博士 正高	035 035	Optimizing RLV Ascent trajectory Using PSO Algorithms	ISSCAA	2008.12
100	贺成龙 陈欣 李春涛	博士 正高 副高	035 035 035	无人机地面滑行自主起飞的建模与控制	航空学报	2008, 29增刊
101	魏林 陈欣	硕士 正高	035 035	无人机舵回路伺服系统变阻尼控制律研究	电气传动	2008, 10
102	魏林 陈欣	硕士 正高	035 035	无人机无刷直流数字式舵机控制器设计	微电机	2008, 5
103	朱晓娟 陈欣	硕士 正高	035 035	一种无人机高度传感器信息融合方法	航空学报	2008, 29增刊

南京航空航天大学自动化学院2008年度发表论文

104	梁葆华 陈欣	硕士 正高	035 035	一只支持双余度CAN总线接口的A/D 采集单元设计	航空计算技术	2008, 3
-----	-----------	----------	------------	------------------------------	--------	---------

一种云样本的控制产生及在电路故障诊断中的应用

崔江, 王友仁

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 江苏 210016)

摘要: 为了选择电路故障诊断中的特征样本, 提出了产生云样本的方法, 并用于神经网络的训练和识别. 首先采用逆向云理论对初始特征样本进行统计以获取数字特征, 其次采用正向云理论产生扩展训练样本, 并用新产生的样本训练两种神经网络. 仿真结果表明, 采用云样本训练的神经网络要比采用常规样本训练的性能稳健, 具有较好的抗噪声性能, 在模拟电路故障诊断中达到了较好的诊断效果.

关键词: 云模型; 特征样本; 神经网络; 故障诊断

中图分类号: O235; TM930

文献标识码: A

A method of cloud-sample control and generation with application to circuit fault diagnosis

CUI Jiang, WANG You-ren

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Automation and Engineering, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: To select feature samples in circuit fault diagnosis, we propose a method of cloud-sample generation, and apply it to artificial-neural-network training and recognition. First, the inverse cloud model theory is employed to obtain the statistical digital feature of the samples, and then the extended training data set is produced by positive cloud theory. Second, two kinds of networks are trained with the newly produced data set. Simulation results reveal that the performance of the neural network trained by the cloud samples is better than that trained by the conventional methods. The results also proved that the network is robust to random noise, and the proposed method is valid in the faults diagnosis of analog circuit.

Key words: cloud model; feature samples; neural network; fault diagnosis

1 引言(Introduction)

模拟电路的故障诊断是一项较为复杂和困难的研究课题^[1]. 其主要方法可分为两大类: 基于模型的方法和基于机器学习的方法. 前者主要应用于线性电路的故障诊断; 后者采用基于机器学习方法直接建立电路特征样本和故障模式之间的映射关系, 不依赖电路内部结构和先验知识.

人工神经网络(ANN)是一种基于机器学习的方法, 此类技术已在国内外得到了广泛的研究和应用^[2]. 神经网络的诊断性能取决于不同的训练样本, 故研究特征样本的选择或产生技术具有重要的理论和实际价值, 但目前相关的研究成果很少^[3~6].

本文提出了一种训练样本的云模型产生方法. 通过基于云模型的统计方法产生新的样本(称为“云样本”), 并设计训练集进行神经网络的训练和

分析. 实际研究表明, 采用云样本训练的神经网络获得了较稳健的网络性能, 对随机噪声具有良好的抵抗力, 在模拟电路测试中取得了较好的诊断效果.

2 基于云模型的样本产生方法和训练(Samples generation method based on cloud model and training)

研究表明, 组成电路的模拟分立元件参数值都近似服从正态分布^[7]. 当元件产生故障时, 得到的电路响应曲线也具有一定的正态分布特性. 通过对待测电路响应进行特征提取, 可以得到各故障模式的特征空间分布. 各样本集在特征空间内形成一个个中间“厚”、边缘“薄”的“云团”: 中央是所谓的“好样本”^[3]; 和其他“云团”交界的样本是“边界样本”; 和其他“云团”混合的样本是“差样本”.

样本集的“云团”分布特点,客观上较为符合云模型特别是正态云模型的相关理论^[8]:特征样本对应云模型概念中的“云滴”;“好样本”、“边界样本”和“差样本”可分别对应云模型概念中的“基本元素”、“外围元素”和“弱外围元素”等概念.因此,采用云模型的相关统计理论产生新样本可突出“好样本”的作用,且新样本的分布和原始训练样本基本一致^[5],这有利于提高分类器的泛化能力和诊断性能;且云样本的产生融合了随机产生理论,对随机噪声具有一定的抵抗作用.

2.1 云样本的产生方法(Cloud samples generation method)

云样本的控制和产生同时需要逆向云和正向云模型算法,如图1所示.

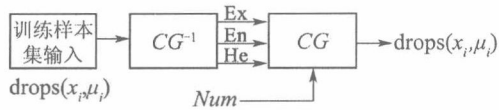


图1 云样本产生方法框图

Fig. 1 Flow of cloud samples generation method

记第*i*类故障模式样本集为 $x_i=[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$,其中, $x_{ij}(j=1, 2, \dots, n)$ 为该集合中的第*j*个样本向量, μ_i 表示 x_i 的确定度.由于模拟电路故障样本往往具有较高的数据维, μ_i 的值难以获取,一般情况下仅需估计3个数字特征,即:期望 Ex 、熵 En 和超熵 He .该方法称为无需确定度的逆向云算法^[8],步骤如下:

1) 估算训练集 x_i 的均值 $\bar{X}$ 、一阶中心矩 K 和方差公式 S :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |x_{ij} - \bar{X}|, \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n |x_{ij} - \bar{X}|^2}. \quad (3)$$

2) 估算3个数字特征 Ex, En 和 He :

$$Ex = \bar{X}, \quad (4)$$

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot K, \quad (5)$$

$$He = \sqrt{(S - En) \cdot (S + En)}. \quad (6)$$

设定云滴个数 Num ,利用正向云模型产生云样本的基本步骤如下:

1) 产生期望值为 En 、方差为 He^2 的正态随机数:

$$En' \sim N(En, He^2); \quad (7)$$

2) 利用上述1)产生的正态随机数,进一步产生期望值为 En 、方差为 En'^2 的正态随机数并计算其确定度;

3) 根据设定的云滴个数,重复步骤1)和2)即可获取第*i*类故障模式的云样本集: $drops'(x_i, \mu_i)$,其中 μ_i 是一种“副产品”.

重复上述所有算法,即可得到全部故障模式的云样本集.

2.2 网络训练集和测试集(Training and test set)

为测试云样本的有效性,建立BP神经网络和RBF神经网络并进行训练.设计的3类训练样本集合分别为: $Tr1=\{\text{原始训练样本叠加1\%均值白噪声}\}$ 、 $Tr2=\{50\% \text{原始训练样本}, 50\% \text{云样本}\}$ 、 $Tr3=\{\text{原始训练样本}\}$.其中,原始训练样本从初始特征样本集中加以选取(这里选取一半),再利用原始训练样本产生云样本集.为提高训练效率,对所有样本集运用了主元分析(PCA)技术.

此处设计的测试集包括12个,依次记为Test1, Test2, ..., Test12.其中Test1={初始特征样本}, Test2~Test6为Test1依次叠加1%, 5%, 10%, 15%, 20%白噪声形成; Test7={云样本}, Test8~Test12为Test7依次叠加1%, 5%, 10%, 15%, 20%白噪声形成.

由于实际采集的数据往往受各种不确定因素的影响,由此得到的测试样本也与计算机仿真得到的样本有所差别,这些不确定性因素的影响可归结至随机噪声的干扰.因此,采用云样本参与网络训练和测试具有重要的实际意义.

3 电路故障诊断实例和数据分析(Sample circuit diagnosis and analysis)

3.1 实例电路和云样本产生(Sample circuit and cloud samples generation)

如图2所示为一带通滤波器,其中的 R_2, R_4, C_1 和 C_2 为可能产生单软故障的元件,加上无故障情况,整个电路一共有9种故障模式.

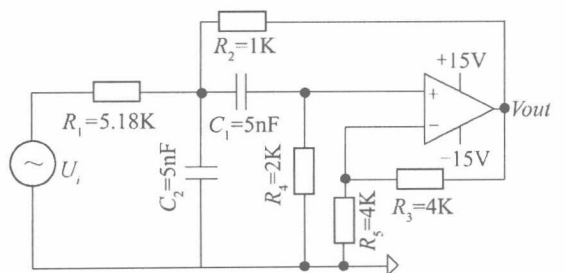


图2 模拟带通滤波器

Fig. 2 Analog band-pass filter

在Pspice环境下进行电路建模和Monte Carlo分析;故障模式的设置采用ITC'97基准^[7]. V_{out} 为电压信息的可测节点,特征提取方法采用多层小波包分解算法.取初始特征样本集的一半(4500个)作为神经网络的原始训练样本,其余作为测试样本.

依据云样本产生算法,并设定云滴数量为500,产生所有故障模式的云样本共4500个.图3为元件 R_4 阻值减小的软故障多维云样本在二维空间内的图像显示.

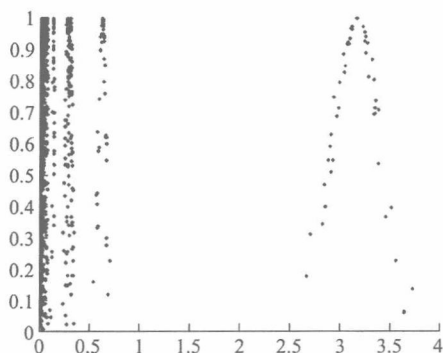


图3 元件 R_4 减小软故障所产生的云样本

Fig. 3 Cloud samples image produced by reducing R_4 value

对产生的云样本集合和初始特征样本集合同时进行归一化和PCA分析(分析误差为0.01)等预处理,特征维数由16降为9.

3.2 神经网络训练(ANN training)

首先建立3层感知器网络,网络参数如下:输入层神经元个数为9;隐层神经元个数选为8,采用Tansig激活函数;输出层节点个数为9(即故障模式数),激活函数采用Sigmoid.采用基于附加动量法的BP算法进行训练,训练精度设为0.01.对3种样本集训练完毕,得到3种BP ANN(采用Tr1, Tr2和Tr3训练的依次记为BP1, BP2和BP3).

其次,建立3层RBF网络进行训练.其输入和输出节点都为9;训练精度设定为0.01;隐层激活函数采用高斯径向基函数,输出则采用线性激活函数.最后得到3种RBF ANN(采用Tr1, Tr2和Tr3训练的依次记为RBF1, RBF2和RBF3).

在MATLAB7.0仿真环境下,编程实现特征样本的提取、归一化、PCA分析和云样本产生算法.对两组神经网络进行训练,得到的各种参数对比如表1所示.

表1 两组神经网络的训练时间和步长对比

Table 1 Comparison for two groups of ANN

名称	训练精度	训练时间/s	所需步长
BP1	0.01	133	19107
BP2	0.01	126	17321
BP3	0.01	150	21922
RBF1	0.01	24	200
RBF2	0.01	21	173
RBF3	0.01	26	202

3.3 诊断和数据分析(Diagnosis and analysis)

将待诊断的疑似故障特征样本 x 输入至神经网络,通过激活函数计算得到输出诊断向量:

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_q, \dots, F_9], \quad (8)$$

其中 F_q 为第 q 类故障和样本 x 之间的相似程度,且 $F_q \in [0, 1]$.一般地,输出向量中的最大值所对应的故障模式应为待诊断的故障类型 F ,即

$$F = \max_{1 \leq q \leq 9} \{F_1, F_2, \dots, F_q, \dots, F_9\}. \quad (9)$$

对某个测试样本集进行诊断时,对应的故障诊断率 F_r 按下式计算:

$$F_r = \frac{\sum_{q=1}^9 c_q}{T} \times 100\%, \quad (10)$$

其中: c_q 为正确诊断第 q 类故障模式的样本个数, T 为该测试样本集的全部样本数目.

利用BP ANN分别对Test1~Test12进行测试,其故障诊断率如表2所示.设计的测试集既包含训练样本也包含其他测试样本,故对应诊断率是网络性能的一种综合反映.

表2 BP神经网络的故障诊断率对比

Table 2 Diagnosis rate comparison for BP ANN

	Test1	Test2	Test3	Test4
BP1/%	90.22	89.33	85.56	75.56
BP2/%	89.33	88.44	85.33	75.67
BP3/%	94.89	94.22	87.33	77.11
	Test5	Test6	Test7	Test8
BP1/%	66.22	60.44	73.11	72.89
BP2/%	68.22	66.00	89.11	88.89
BP3/%	66.00	59.33	61.78	61.56
	Test9	Test10	Test11	Test12
BP1/%	70.00	66.00	63.56	59.56
BP2/%	83.56	77.78	70.00	68.22
BP3/%	60.89	59.28	57.11	54.00

采用RBF ANN对测试集进行测试,得到的诊断

率如表3所示。

表3 RBF神经网络的故障诊断率对比
Table 3 Diagnosis rate comparison for RBF ANN

	Test1	Test2	Test3	Test4
RBF1/%	79.56	79.11	72.00	66.44
RBF2/%	78.78	79.00	72.78	67.00
RBF3/%	86.44	80.67	61.56	53.78
	Test5	Test6	Test7	Test8
RBF1/%	59.56	55.11	52.89	53.56
RBF2/%	62.89	57.56	71.33	71.33
RBF3/%	48.22	47.56	41.11	40.89
	Test9	Test10	Test11	Test12
RBF1/%	53.78	53.00	52.67	52.56
RBF2/%	68.89	68.00	59.56	59.11
RBF3/%	39.78	38.00	37.56	36.44

由表2可看出, BP3的记忆力较好, 但整体的泛化性能要逊于BP1和BP2。BP1在诊断Test1~Test6时性能稍逊BP3, 但在识别云样本方面远好于BP3。BP2在测试云样本性能方面优于另外两种, 随着噪声污染的加重, 3个BP网络的诊断性能有接近的趋势, 但BP2的故障诊断率变化趋势最为平缓, 对随机噪声的鲁棒性优于另外两个网络。从表1和表3可看出, RBF的训练速度很快, 但采用RBF网络进行故障诊断的整体正确率要低于BP网络; 另外, 就诊断Test1~Test6而言, RBF1和RBF2的性能较为接近, 但RBF2的整体性能要优于另外两个RBF网络, 决策性能较为稳健, 这和表2的变化趋势相一致; 在诊断Test7~Test12方面, RBF2的优势更为明显。

综上, 基于云样本训练的BP2或RBF2对噪声样本具有较好的鲁棒性, 性能较为稳健, 且在故障决策方面宜采用BP网络。

4 结论(Conclusions)

针对神经网络训练中的特征样本选择问题, 本文

提出了一种基于云模型统计理论的样本控制和产生方法, 并进行了仿真研究。结果表明, 云样本产生简单有效, 应用于基于神经网络的模拟电路测试中取得了较好的诊断效果。

参考文献(References):

- [1] FENTON W G, MCGINNITY T M, MAGUIRE L P. Fault diagnosis of electronic systems using intelligent techniques: a review[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2001, 31(3): 269 – 281.
- [2] AMINIAN F, AMINIAN M, COLLINS H W. Analog fault diagnosis of actual circuits using neural networks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(3): 544 – 550.
- [3] 刘刚, 张洪刚, 郭军. 不同训练样本对识别系统的影响[J]. *计算机学报*, 2005, 28(11): 1923 – 1928.
(LIU Gang, ZHANG Honggang, GUO Jun. The influence of different training samples to recognition system[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2005, 28(11): 1923 – 1928.)
- [4] 杨慧中, 卢鹏飞, 张素贞, 等. 网络泛化能力与随机扩展训练集[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(6): 963 – 966.
(YANG Huizhong, LU Pengfei, ZHANG Suzhen, et al. Generalization of networks and random expanded training sets[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(6): 963 – 966.)
- [5] GEORGE N K. On over fitting, generalization, and randomly expanded training sets[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2000, 11(5): 1050 – 1057.
- [6] 解培中, 张志涌. 一种新的用于故障诊断分类器的特征样本生成方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2001, 23(11): 35 – 37.
(XIE Peizhong, ZHANG Zhiyong. New approach to conform feature samples for fault diagnosis classifiers[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, 23(11): 35 – 37.)
- [7] KAMINSKA B. Analog and mixed-signal benchmark circuits-first release[C] // *Proceedings of International Test Conference*. Washington, DC: IEEE Press, 1997: 183 – 190.
- [8] 李德毅, 杜鹂. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
(LI Deyi, DU Yi. *Artificial Intelligence with Uncertainty*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.)

作者简介:

崔江 (1977—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为电路测试, E-mail: cuijiang@nuaa.edu.cn;

王友仁 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为仿生硬件理论和测试等技术研究, E-mail: wangyirac@nuaa.edu.cn.

模拟电路故障的一种聚类二叉树支持向量机 诊断新方法*

崔江, 王友仁

(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

摘要: 针对模拟电路故障特征样本的分类(诊断)问题, 提出了一种基于聚类二叉树支持向量机(SVMs)多分类器的故障诊断新方法, 并分析了几种分类器的平均测试复杂度。首先, 利用自组织特征映射神经网络(SOFM)对训练样本进行层次聚类, 得到一棵聚类二叉树; 其次, 按照树的结构利用二元SVMs设计故障分类器, 并对样本进行分组训练和测试。实际仿真和测试表明, 所设计的故障分类器性能在诊断精度和效率上皆优于传统的“1-v-r”SVMs和“1-v-1”SVMs分类器, 较为适合模拟电子电路的故障分类和诊断。

关键词: 模拟电路; 故障诊断; 自组织特征映射神经网络; 二叉树; 二元SVMs

中图分类号: TP181 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Novel method for analogue circuit fault diagnosis based on clustering binary tree SVMs

Cui Jiang, Wang Youren

(College of Automation and Engineering, NUA, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of classifying (diagnosing) analogue circuit fault samples, this paper proposes a novel fault classifier based on clustering binary tree support vector machines (SVMs) and analyzes the average diagnosis complexity. First of all, self-organizing feature map (SOFM) neural network is employed to cluster the fault feature samples into a hierarchical structure, forming a cluster binary tree; secondly, the fault classifiers are designed using binary SVMs to train the samples. The actual simulation and test results show that the proposed method gains better performance than traditional SVMs classifier, such as “1-v-r”SVMs and “1-v-1”SVMs, and is suitable for diagnosing analogue electronic circuit.

Key words: analogue circuit; fault diagnosis; self-organizing feature map neural network; binary tree; binary support vector machine

1 引言

模拟电路的测试方法按仿真顺序可分为测前仿真(SBT)和测后仿真(SAT)^[1]。因SBT方法不需对电路进行精确建模和复杂运算,且不过分依赖对电路的先验知识,因此正得到越来越多的研究和应用^[2-7]。在现有的SBT方法中,基于神经网络的故障诊断技术是一个研究

热点,但神经网络往往需要较多的样本,且当故障模式数目变大、训练样本的维数变高时,往往导致网络的训练效率下降,甚至不能收敛。

近几年,支持向量机方法开始在模拟电路故障诊断技术中逐步得到一定的研究和应用^[8-10]。但模拟电路故障诊断是一个典型的多类问题,常规的二元SVMs并不能直接进行多模式分类,必须设计多类SVMs分类器。当前,在模拟故障诊断中常用的支持向量机多分类器主

要有两种:“1-v-r”SVMs 和“1-v-1”SVMs^[8,10],除此之外,关于 SVMs 故障分类器设计的研究内容较少^[9]。

针对上述问题,本文提出了一种聚类二叉树 SVMs 多分类器的设计方法,并用于模拟电路的测试和故障诊断。该方法首先采用 SOFM 神经网络对训练样本进行分层聚类,每层聚为 2 类,层层深入,最终得到一棵聚类二叉树;其次,在二叉树的每个节点处设计相应的二元 SVMs 对样本加以训练和测试;最后,利用实例电路对设计的分类器进行了性能验证。

2 聚类二叉树生成步骤

为了应用二元 SVMs 构建多分类器进行故障诊断,需要设计对应的二叉树结构。此处的二叉树属于一种决策树分类器^[11],其结构利用 SOFM 神经网络聚类得到,称为聚类二叉树。

自组织特征映射神经网络(SOFM)是一种自适应聚类分析技术^[12],其构造模仿了人的大脑皮层功能,即对外界信号刺激的感知和处理是分区进行的。SOFM 神经网络作为故障分类器在模拟电路测试中得到了一定的研究^[13];但此处利用 SOFM 产生一种适合二元 SVMs 训练和测试的二叉树,属于一种预处理技术。所采用的算法主要包括 3 个步骤,基本描述如下:

- 1) 初始化聚类样本集 T 为全部训练样本集;
- 2) 调用 SOFM 神经网络对训练样本 T 进行二类聚类,得到本次运算步骤的节点及左、右树枝 T_{left} 和 T_{right} ,其中, T_{left} 、 T_{right} 为包含本次聚类得到的故障模式集。聚类完成之后,需要保存本次聚类获取的节点位置和树枝内容;
- 3) 分别令 T_{left} 和 T_{right} 代替 T ,按步骤 2 进行深入聚类,直至分开所有故障模式。

对上述第 2 步骤中的具体操作步骤解释如下:首先经过网络聚类之后,应该判断某种故障模式属于哪边树枝,其准则如下:若第 i 类故障模式 F_i 中超过一半的样本标签为“1”(属于第 1 类),则添加 F_i 至 T_{left} ;否则其标签为“2”,添加 F_i 至 T_{right} 。本次聚类结束,尚需进一步判断,若 $T_{\text{left}} = \emptyset$ 或 $T_{\text{right}} = \emptyset$ ($\emptyset$ 为空集),则提示本次步骤的训练样本不能深入聚类,保存对应参数并退出;若 T_{left} 包含的故障模式数目为 1 或 2,则不再对 T_{left} 进行深入聚类(因为采用一个二元 SVMs 已经可以将其分开),反之对 T_{right} 亦然;其余情况,则还需对对应的树枝进行深入聚类,直至把所有模式分开,最终得到一棵聚类二叉树。

对于某些故障模式,反复采用 SOFM 方法有时并不能将其分为两大类,即对应上述情况中的 $T_{\text{left}} = \emptyset$ 或 $T_{\text{right}} = \emptyset$ 。如果产生此类情况,可对这些故障模式按“1-v-r”SVMs 加以训练即可(此时产生的树结构已不再是严格意义上的

二叉树)。

3 分类器训练和平均测试复杂度分析

3.1 分类器训练

本文采用 SOFM 对训练样本进行了层层深入的二元聚类分析(实际上是一种故障模式的分组训练策略),虽然从根部节点训练时的样本数目很多,但由于采用了聚类分析,使得类间距相对较大,类内间距相对较小;越靠近上层,相应的故障模式越容易分开,产生错分的概率就越小;当按树的结构层层深入进行训练时,虽然分类变得越来越困难,但训练样本的数量也越来越少,所需的时间也随之减少。更重要的是,聚类分析优化了分类器结构,在一定程度上避免了上层错分的样本再传递至下层的现象,从而使诊断精度和诊断效率都得到了一定程度的提高。

聚类二叉树的每个节点都需要一个基本的二元 SVMs 进行训练,对样本进行测试的时候也必须按照对应树的结构进行层层深入,直至划分到单独的故障模式为止。对疑似样本 x 进行测试时,利用二元 SVMs 进行故障判决的公式为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i K(x, X_j) + b_j^* \quad (1)$$

式中: α_i^* 为对应二叉树第 j 个节点进行二元 SVMs 训练中得到的支持向量; $K(x, X_j)$ 为对应的测试矢量和该节点训练样本 X_j 的 Mercer 函数内积; b_j^* 代表第 j 个节点训练完毕对应的网络偏差。

3.2 平均测试复杂度分析

从式(1)可以看出,如果保持核函数不变,测试所需的运算复杂度主要和全体训练样本的数量有关,即乘且累加(multiply and accumulation, MAC)的次数相关。此处,用 $O(\cdot)$ 代表单个二元 SVMs 执行样本识别的运算复杂度,其中的参数表示参加训练的样本数量,即诊断单个样本需要执行的 MAC 次数。

设故障模式数目为 n ,每种故障模式的训练样本数目为 t 。利用“1-v-r”SVMs 进行测试时,参加运算的训练样本数量恒为 $n \cdot t$,假设测试的疑似样本能够执行一次二元 SVMs 运算即可分开,则最小运算复杂度可表示为 $O(n \cdot t)$;假设执行 n 次运算才能分开,则该分类器的最大运算复杂度为 $O(n^2 \cdot t)$ 。本文用最大测试复杂度和最小测试复杂度的平均值,即平均测试复杂度作为衡量分类器效率的一个重要性能指标。

对“1-v-r”SVMs 分类器,其平均测试复杂度为:

$$\frac{[O(n \cdot t) + O(n^2 t)]}{2} = O\left(\frac{n \cdot (n+1) \cdot t}{2}\right) \quad (2)$$

对“1-v-1”SVMs 分类器而言,每次测试都需要 $\frac{n \cdot (n-1)}{2}$ 个分类器的参与和投票表决,容易得到其平

均测试复杂度为:

$$O(n \cdot (n-1) \cdot t) \quad (3)$$

对聚类二叉树,其可能形状很多,只能通过对具体生成树的深度加以分析计算得到。

4 诊断实例

4.1 待诊断电路

如图 1 所示,采用一个模拟滤波器作为待测电路 (circuit under test, CUT)。

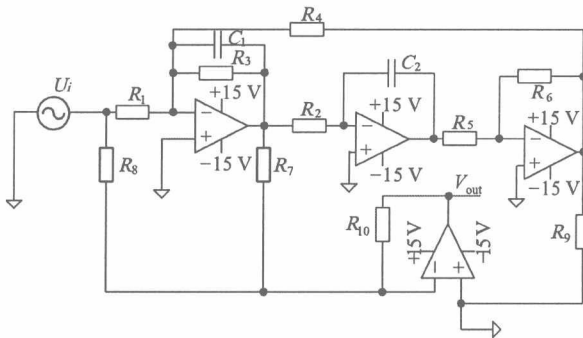


图 1 模拟滤波器
Fig. 1 Analogue filter

为验证本文方法的有效性并便于比较,该电路中的主要元件及对应的标称值、故障值和容差已经列入表 1,其各项设置和对应参考文献一致^[5-7]。其中,“↑”表示对应的元件值变大,“↓”表示对应的元件值减小,对应故障的代码依次表示为 f0~f12,其中,代码 f0 表示电路为无故障情况。

表 1 元件值和故障模式

Table 1 Component values and fault modes

故障代码	故障类型	标称值	容差	故障值
f0	-	-	-	-
f1	C ₁ ↑	5 nF	10%	10 nF
f2	C ₁ ↓	5 nF	10%	2.5 nF
f3	R ₄ ↑	1 600 Ω	5%	2 500 Ω
f4	R ₄ ↓	1 600 Ω	5%	500 Ω
f5	C ₂ ↑	5 nF	10%	15 nF
f6	C ₂ ↓	5 nF	10%	1.5 nF
f7	R ₃ ↑	6 200 Ω	5%	12 000 Ω
f8	R ₃ ↓	6 200 Ω	5%	2 700 Ω
f9	R ₂ ↑	6 200 Ω	5%	18 000 Ω
f10	R ₂ ↓	6 200 Ω	5%	2 000 Ω
f11	R ₁ ↑	6 200 Ω	5%	15 000 Ω
f12	R ₁ ↓	6 200 Ω	5%	3 000 Ω

4.2 样本产生

样本的产生和获取既可以来自仿真结果,也可来自于实际采集的数据^[5],这取决于实际需要。本文通过对电路进行软件建模和仿真以获取对应的故障特征样本。为方便比较,激励 U_i 选用幅度为 5 V、10 μs 的脉冲信号。对 13 种故障模式进行 Monte Carlo 均匀分析,每种故障模式仿真 500 次,其中的 100 个样本作为训练样本,剩余的 400 个样本作为测试。

设可测节点为 V_{out} (如图 1 所示),采集每种故障模式下的节点电压信号;利用多分辨率的 Haar 小波包进行变换分解,取第 5 层的所有变换系数 (共 32 维) 作为故障信息特征;为方便后续处理,对所有的数据进行归一化处理。

4.3 聚类二叉树生成

利用 SOFM 对训练样本进行分析,最终得到一棵聚类二叉树,如图 2 所示。图 2 中的虚线框部分所包含的节点及展开树枝是人工添加的,以方便采用二元 SVMs 训练。

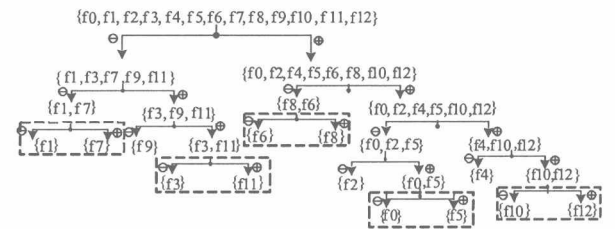


图 2 生成的聚类二叉树
Fig. 2 Generated clustering binary tree

另外,图 2 中符号“⊕”(“⊖”)分别表示在二元 SVMs 训练的时候,对应的右(左)树枝作为正标签(负标签)出现。经过层层训练之后,保存对应的权值系数,并按照图 2 的聚类二叉树结构进行测试。

4.4 结果分析

建立“1-v-r”SVMs 和“1-v-1”SVMs 分类器对训练样本进行训练,并对全部样本进行了综合测试。通过实验确定分类器的 Mercer 核函数,此处均采用二次多项式:

$$K(x, X_j) = (1 + x \cdot X_j)^2 \quad (4)$$

根据图 2 所示的聚类二叉树结构可知,定位某种故障模式所需的最小运算复杂度应对应诊断路径最短的树枝,即诊断出故障 f1 (或 f7) 所需的测试复杂度为 $O(13 \cdot t + 5 \cdot t + 2 \cdot t) = O(20 \cdot t)$;诊断 f12 (或 f10、f5) 所需的测试复杂度最大,为 $O(13 \cdot t + 8 \cdot t + 6 \cdot t + 3 \cdot t + 2 \cdot t) = O(32 \cdot t)$;该聚类二叉树的平均测试复杂度为 $O(26 \cdot t)$ 。

故障特征样本的处理、聚类二叉树生成、网络训练和测试全部通过 MATLAB6.5 编程实现,3 种分类器的比较

结果如表2所示(PC配置:PIV CPU,2.4 GHz 主频,512 MB 内存)。

表2 几种故障分类器的性能比较

Table 2 Performance comparison for several fault classifiers

分类器类型	诊断精度(%)	测试时间/s	平均测试复杂度
"1-v-r" SVMs	98.8	7.64	$O(91 \cdot t)$
"1-v-1" SVMs	99.2	66.98	$O(156 \cdot t)$
本文方法	99.2	3.61	$O(26 \cdot t)$

从表2可以看出,"1-v-1" SVMs 分类器的平均测试复杂度最高,对所有样本的测试时间也最长,但是诊断精度较高,这是由分类器的结构和投票规则决定的;本文方法进行测试的时间最小,而获得的精度较高,所需的平均测试复杂度和诊断时间明显要低于另外两种分类器。因此,与另外两种方法相比,本文方法较为适合模拟电路的快速测试和诊断。

另外,上述3种分类器的诊断精度都优于现有的参考文献[6-7]中基于神经网络的电路故障诊断精度,两种方法获取的诊断精度依次为98.76%和98.56%,而文献[5]中的训练数据来源于板卡采集的实际数据,和实际仿真的数据有一定的差距,可比性不强。

5 结 论

提出一种聚类二叉树 SVMs 多分类器的设计方法,并用于模拟电路的故障分类和诊断。通过仿真实例的分析表明,本文设计的故障分类器在诊断精度和平均测试复杂度等性能指标方面均优于"1-v-r" SVMs 和"1-v-1" SVMs 分类器,也优于现有方法中神经网络的诊断性能。

参考文献

- [1] ALLIPI C, CATELANI M, FORT A, et al. SBT soft fault diagnosis in analog electronic circuits: A sensitivity-based approach by randomized algorithms [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5): 1116-1125.
- [2] STARZYK J A, LIU D, LIU ZH H, et al. Entropy-based optimum test points selection for analog fault dictionary techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(3): 754-761.
- [3] CATELANI M, FORT A. Soft fault detection and isolation in analog circuits: some results and a comparison between a fuzzy approach and radial basis function networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 196-202.
- [4] AMINIAN F, AMINIAN M. Fault diagnosis of nonlinear analog circuits using neural networks with wavelet and Fourier transforms as preprocessors [J]. Journal of Electronic testing, 2001, 17: 471-481.
- [5] AMINIAN F, AMINIAN M, COLLINS H W. Analog fault diagnosis of actual circuits using neural networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(3): 544-549.
- [6] HE Y G, TAN Y H, SUN Y CH. Fault diagnosis of analog circuits based on wavelet packets [C]. IEEE TENCON, Thailand, 2004(1): 267-270.
- [7] 谭阳红, 叶佳卓. 模拟电路故障诊断的小波方法 [J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1748-1751.
TAN Y H, YE J ZH. Wavelet method for fault diagnosis of analogue circuits [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(9): 1748-1751.
- [8] WANG AN N, LIU B M. Fault diagnosis of circuits with tolerance based on support vector machines [C]. Proceedings of International Conference on Communications, Circuits and Systems, 2006(4): 2235-2238.
- [9] 万九卿, 李行善. 基于串行支持向量分类器的模拟电路故障诊断 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 789-792.
WAN J Q, LI X SH. Analog circuit s fault diagnosis based on serial support vector multi-classifier [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 789-792.
- [10] 连可, 王厚军, 龙兵. 基于SVM的模拟电子系统多故障诊断研究 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6): 1029-1034.
LIAN K, WANG H J, LONG B. Study on SVM-based analog electronic system multiple fault diagnosis [J]. Chinese Journal of scientific Instrument, 2007, 28(6): 1029-1034.
- [11] TAKAHASHI F, ABE S. Decision-tree-Based multi-class support vector machines [C]. Proceedings of ICONIP, Singapore, 2002: 1418-1422.
- [12] 张智星, 孙春在, 水谷英二. 神经-模糊和软计算 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 217-219.
ZHANG ZH X, SUN CH Z, MIZUTANIE. Neuro-fuzzy and soft computing [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publishing House, 2000: 217-219.
- [13] SOMAYAJULA S S, SÁNCHEZ-SINENCIO E, PINEDA de GYVEZ J. Analog fault diagnosis: A fault clustering approach [C]. Proceedings of ETC, 1993: 108-115.

作者简介



崔江, 2003 年于南京航空航天大学获得硕士学位, 现为南京航空航天大学讲师、博士研究生, 主要研究方向为模拟电路测试和故障预测、智能信息处理等。

E-mail: cuijiang@nuaa.edu.cn

Cui Jiang got his master degree from NUAA in 2003 and now is a lecturer and PhD candidate in NUAA. His main research interests include analogue circuit test and fault diagnostics, intelligent information processing, and etc.

E-mail: cuijiang@nuaa.edu.cn



王友仁, 1996 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为检测技术与信号处理、机载设备健康监测、仿生硬件与智能系统。

E-mail: wangyrac@nuaa.edu.cn

Wang Youren got his doctorate from NUAA in 1996, and now is a professor and supervisor for PhD student in NUAA. His main research interests include test technique and signal processing, avionics PHM, bionics hardware and intelligent system.

E-mail: wangyrac@nuaa.edu.cn