

任意周期激励函数的模拟电路测试激励优化设计

罗 慧,王友仁,林 华,姜媛媛
(南京航空航天大学自动化学院,江苏南京 210016)

摘 要: 模拟电路测试中不同的激励源会影响电路的可测性,本文根据任意周期函数可由傅立叶级数展开成一个直流分量和一系列正弦函数叠加的原理,设计一种新的基于任意周期激励函数的模拟电路测试激励优化方法.该方法以任意周期激励函数作为优化对象,以最大特征样本的核类间距离作为优化目标,分析待测电路输入输出信号的幅值、频率和相位关系作为约束条件,设计构建一个单目标多约束的线性数学优化模型.该方法具有普适性能,优化得到的测试激励信号提高了模拟电路故障诊断性能.

关键词: 模拟电路; 测试生成; 故障诊断; 傅立叶级数

中图分类号: TP206+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 08-1950-05

Test Stimulus Optimization Design of Analog Circuit Based on Random Periodic Stimulus Function

LUO Hui, WANG You-ren, LIN Hua, JIANG Yuan-yuan

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

Abstract: Using different test stimuli have an affect on the testability of the circuit under test (CUT). According to the Fourier series expression theory, which is described as the periodic function can be decomposed into a direct current component and a series of sine functions, a new optimization method for test stimulus generation of analog circuit is proposed. In this method, the random stimulus function is used as the optimal object, the optimal target is to obtain the maximal distance of different classes of faulty samples in the kernel space, and the constraint conditions are designed on the base of the relationship of amplitude, frequency and phase between the input and the output of the CUT, so a linear optimal model is constructed with one target and multiple constraints. This method has general adaptability. The optimal test stimuli succeed in improving the diagnosis results.

Key words: analog circuit; test generation; fault diagnosis; Fourier series

1 引言

随着电子设备日益复杂,对电子系统的测试和诊断提出了新要求^[1~3].为提高模拟电路故障的可测性和可诊性,测试激励优化是一种重要途径^[4~10].

现有的测试激励选择方法有直流激励法^[4],该方法易于测试硬故障,却很难检测参数故障;灵敏度分析法^[5],该方法适合线性电路,对非线性电路,电路方程很难写出,计算复杂度很大;非线性建模法^[6],该方法是一种近似逼近法,建立的模型与实际电路存在误差;启发式方法^[7~9],该方法可寻找全局最优解,但是寻优时间过长.

常见的激励信号有直流信号^[4]、正弦信号^[7,8]、分段线性信号^[9]和脉冲信号^[10]等,测试人员首先需要判断选择何种信号作为测试激励源.在任意有限区间上的电压、电流周期信号都能由傅立叶级数展开,如果测试

激励是一个任意周期函数,则不需要选择激励信号类型,只需直接优化激励源的参数值.为此,本文设计一种基于傅立叶级数展开的模拟电路测试激励优化设计方法,该方法旨在设计一种通用的测试激励优化方法,并能提高模拟电路故障可测性.

2 任意周期激励函数分解原理

设周期为 $2l$ 的函数 $f(t)$ 为一非正弦周期函数,工程实际中的非正弦周期函数一般都满足狄里赫利条件,可展开成傅里叶级数:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] \quad (1)$$

其中, $a_k = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t) \cos \frac{k\pi t}{l} dt, (k=0, 1, 2, \dots)$,

$$b_k = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t) \sin \frac{k\pi t}{l} dt, (k=1, 2, \dots).$$

式(1)可合并成以下形式:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega t + \psi_k) \quad (2)$$

其中, $A_0 = \frac{a_0}{2}$, $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$,

$$\psi_k = \arctan\left(\frac{-b_k}{a_k}\right).$$

A_0 是直流分量, $A_k \cos(\omega t + \psi_k)$ 是信号的 k 次谐波. 在测试激励选择中常用的激励信号均可由傅立叶级数分解得到, 因此任意激励源函数可分解成一个直流信号源和一系列不同初相角而频率成整数倍关系的正弦源的叠加, 通过优化傅立叶级数中的 A_0 、 A_k 、 ψ_k 和 ω 的参数值, 得到最优的任意波形的激励周期函数.

3 模拟电路测试激励优化设计

3.1 测试激励优化的目标模型

测试激励选择的目的是提高电路输出特征的可分性, 以此提高电路的可测性和可诊性, 本文将特征样本的可分性作为优化目标. 为了克服传统类内类间距离中样本对初始分布过度依赖的缺点, 本文采用模糊核聚类(Kernel Fuzzy C-Mean, KFCM)算法将原始样本集映射到高维空间, 计算核空间中的类间距离作为样本可分性的评价指标, KFCM 算法的目标函数为:

$$J_m(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^N u_{ij}^m \|\Phi(x_i) - \Phi(v_j)\|^2 \\ = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^N u_{ij}^m [K(x_i, x_i) - 2K(x_i, v_j) + K(v_j, v_j)] \quad (3)$$

约束条件为: $\sum_{j=1}^c u_{ij} = 1 (j=1, 2, \dots, c)$, $0 < \sum_{i=1}^N u_{ij} < N$, $\forall j$

$$\text{其中, } v_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m K^{-1}(x_i, v_j) x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m K^{-1}(x_i, v_j)}$$

$$u_{ij} = \frac{\left(\frac{1}{D^2(\Phi(x_i), \Phi(v_j))}\right)^{\frac{1}{(m-1)}}}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{1}{D^2(\Phi(x_i), \Phi(v_j))}\right)^{\frac{1}{(m-1)}}}$$

式(3)中 $U = [u_{ij}]$ 是隶属矩阵, u_{ij} 表示隶属度, $m \in [1, \infty)$ 是加权指数, v_j 是输入空间中的聚类中心, c 是聚类的类别数, Φ 是非线性映射, K 是核函数.

反复更新 v_j 和 U 后, 输出最优的聚类中心向量 v_j , 计算聚类中心均值 $m = \frac{1}{c} \sum_{j=1}^c v_j$, 可得样本的核类间距离:

$$Dis = \sum_{j=1}^c \frac{1}{c} (v_j - m)^T (v_j - m) \quad (4)$$

假设待测电路输出特征样本为 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$, 则

激励优化的目标函数:

$$\max Dis(v_j) \quad (5)$$

本文通过电路动态响应获得电路输出样本, 并将动态响应过程由 G 表示:

$$[x_1, x_2, \dots, x_n] = G(A_0 + \sum_k A_k \cos(k\omega t + \psi_k)) \quad (6)$$

本文的电路动态响应是指通过混合编程实现测试系统与电路仿真系统的交互调用, 实验中采用 Pspice 仿真电路, 将 PspiceUI 类添加到高级编程语言的类库中, 可实现编程语言对 Pspice 程序的启动、关闭、写入等功能. 然后通过高级编程语言动态的读取 Pspice 仿真的输出数据, 并读入测试系统中进行测试和诊断, 其优点是可利用 Pspice 工具直接实现电路的蒙特卡罗容差分析.

3.2 测试激励优化的约束模型

优化的激励源参数需要满足电路的有效输入范围, 分析待测电路的输入输出之间的幅值、频率和相位关系, 设置测试激励优化的约束模型.

(1)任意周期激励函数幅值的约束

根据叠加定理, 合成的幅值是各分量幅值的累加, 假设电路的有效电压幅值范围是 $[-N', +N]$, 不考虑电压方向, 则任意周期激励函数幅值的约束为:

$$0 < A_0 + \sum_k A_k < N, \quad k \text{ 是正弦分量数} \quad (7)$$

(2)任意周期激励函数频率的约束

首先, 每个分解的正弦分量频率不能超过电路的有效输入频率范围.

正弦分量中的频率成整数倍关系, $f_k = kf_1$, 假设待测电路的有效频率范围是 $[f_{low}, f_{high}]$, 则任意周期激励函数频率的约束为

$$f_{low} < \text{Max}[f_1, f_2, \dots, f_k] < f_{high} \\ f_{low} < kf_1 < f_{high} \quad (8)$$

理论上一个周期函数可分解为无穷的傅立叶级数, 实际中总是选择有限的傅立叶级数分量, 级数分量越大, 分解的误差越小, 正弦分量数 k 需满足:

$$\left\lfloor \frac{f_{low}}{f_1} \right\rfloor < k < \left\lfloor \frac{f_{high}}{f_1} \right\rfloor \quad (9)$$

其次, 还需考虑电路的采样频率 f_s , 采样定理中采样频率至少大于最高频率的 2 倍, $f_s > 2kf_1$, 在实际测试时, 单个周期内仅采集 2 个数据点, 不能有效反映电路输出的细部特征, 假设单个周期内需要采集 s 个数据点, 则

$$k < \frac{f_s}{s f_1} \quad (10)$$

(3)测试激励相位的约束

只有同频率正弦量之间超前和滞后才有意义, 傅立叶级数分解的各个正弦分量的频率满足倍数关系,

本文仅设置相位满足以下条件:

$$0 \leq \psi_k \leq 180^\circ \quad (11)$$

3.3 优化模型的构建

由上可知,基于任意周期激励函数的模拟电路测试激励优化是一个单目标多约束的数学模型规划问题,其一般模型如下:

$$\begin{aligned} \max \quad & Dis(J_m(G(A_0 + \sum_k A_k \cos(k2\pi f_1 t + \psi_k))) \\ \text{s.t.} \quad & 0 < A_0 + \sum_k A_k < N \\ & f_{low} < kf_1 < f_{high} \\ & k < \frac{f_s}{f_1 s} \\ & 0 \leq \psi_k \leq 180 \end{aligned} \quad (12)$$

本文采用遗传算法求解上述规划问题,采用二进制串形成单个染色体,假设需要优化 k 个正弦分量,优化的变量有直流分量 A_0 、基频率 f_1 、 k 个正弦分量幅值 A_k 和相位 ψ_k ,则染色体的维数为 $2k + 2$,以最大的核类间距离作为寻优目标,进行选择、交叉、变异和重插入操作,动态寻找最优参数值。

4 实验及结果分析

实验电路如图 1、2,分别是视频放大电路和有源滤波电路.电容和电阻容差分别为 10%、5%,电路 1 的测点是 $N_2 - N_4$ 、 $N_6 - N_8$,电路 2 的测点是 out,故障设置如表 1.采用 SVM 的“一对多”算法进行故障诊断,用小波变换提取近似系数作为故障特征,SVM 中采用 RBF 核函数,设置不同的核参数 σ 和惩罚参数 C ,进行 50 次交叉验证比较平均诊断结果。

4.1 测试实验 1

(1)电路 1 的约束条件分析

电路 1 中直流分量被电容 C_1 隔离,采用参数扫描分析电路的有效幅值范围.幅值扫描范围为 $[1V \sim 3V]$,测点 N_6 处的扫描结果如图 3,当幅值大于 2.8V 时输出电压信号发生失真,本文设置的有效电压幅值范围是 $[0V \sim 2.8V]$.采用交流扫描分析电路的有效频率范围,频率扫描范围是 $[0.1Hz \sim 1MHz]$,曲线如图 4,本文选取其中的有效敏感频率范围为 $[0.1Hz \sim 1000Hz]$.电路的

表 1 电路的故障设置

电路 1 的故障设置				电路 2 的故障设置			
标识	故障	标识	故障	标识	故障	标识	故障
f_1	$R1 \uparrow, 7k$	f_5	$R1_open$	f_1	$C1 \uparrow, 15nf$	f_5	$R1 \downarrow, 10k$
f_2	$R2 \uparrow, 12.75k$	f_6	$R5_short$	f_2	$C2 \downarrow, 5nf$	f_6	$R3 \uparrow, 15k$
f_3	$C1 \downarrow, 10\mu F$	f_7	$Q1_b_open$	f_3	$C3 \uparrow, 15nf$	f_7	$R6 \uparrow, 45k$
f_4	$R4 \downarrow, 0.01k$	f_8	$Q1_c_e_short$	f_4	$C4 \downarrow, 5nf$	f_8	$R8 \downarrow, 2.5k$

采样频率是 100Hz,为满足单周期至少采集 100 个数据点,由式(8)~(10)得 $k < 10$.因此,实验 1 的任意激励函数由一个直流分量和 9 个正弦分量叠加而成。

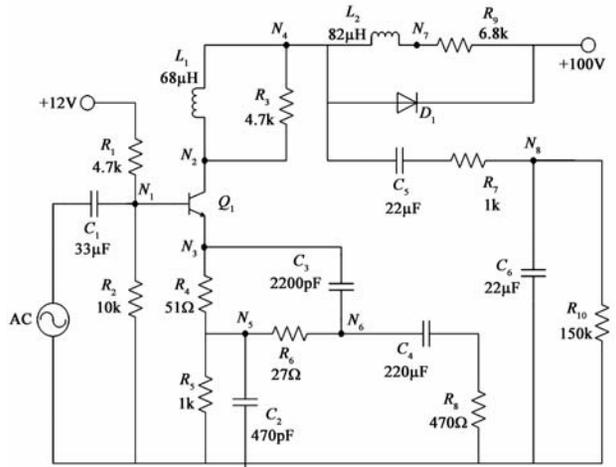


图1 视频放大电路

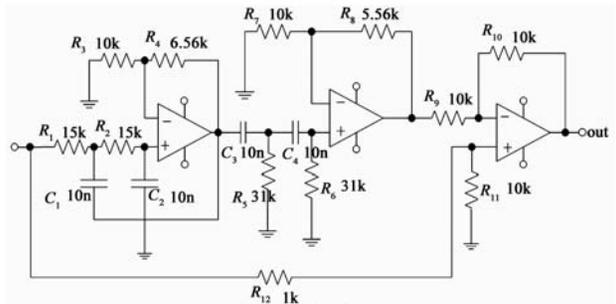


图2 有源滤波电路

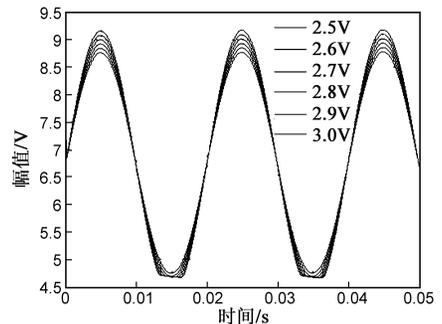


图3 电路1 N_6 测点的参数扫描结果

(2)电路 1 的实验结果分析

优化得到的激励源参数分别为: $A_0, 0.23V$; $f_0, 25Hz$; $A_k (k = 1, 2, \dots, 9)$ 分别是 $0.16V, 0.02V, 0.064V, 0.15V, 0.19V, 0.23V, 0.092V, 0.23V, 0.25V$; ψ_k 分别是 $69^\circ, 87^\circ, 100^\circ, 17^\circ, 160^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 95^\circ, 120^\circ$, 将此激励源加载到待测电路进行故障诊断.实验 1 中对比的激励源是单频正弦源、PWL 信号源,脉冲信号

源(其参数值是在反复实验中优选得到,见表 2),SVM 中核参数 σ 的变化范围是 1~100,步长为 10,惩罚参数 C 的变化范围是 1~50,步长为 10.

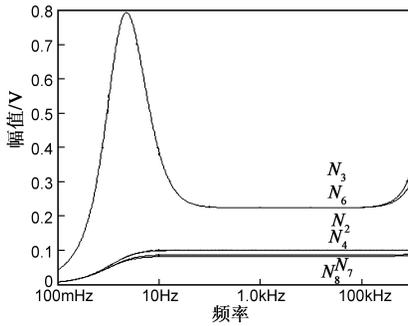


图4 电路1的幅频曲线

表 2 电路 1 的平均诊断结果

激励源 参数	单频正弦源	PWL	脉冲源	本文优化源 (%)
	25Hz, 0.16V (%)	0 3V 10 μ s 3V 15 μ s 6V 40 μ s 6V 45 μ s 2V 60 μ s 2V (%)	5V, 10 μ s (%)	
故障 类				
f_1	66.67	66.67	66.67	66.67
f_2	100	100	100	100
f_3	93.33	100	100	100
f_4	53.33	66.67	60	93.33
f_5	26.67	26.67	26.67	26.67
f_6	100	100	100	100
f_7	86.67	93.33	93.33	100
f_8	100	100	100	100
average	78	82	81	86

由表 2 得,与其它三种激励源相比,本文获取的激励源取得了最好的故障诊断结果.另外,对于故障类 f_4 ,本文方法明显提高了诊断精度,由 53.33% 的诊断精度提高到 93.33%. 4 种激励信号的 50 次故障诊断结果曲线如图 5,本文方法的诊断曲线基本高于其他三种方法的诊断曲线,因此其诊断性能要优于其它三种方法.

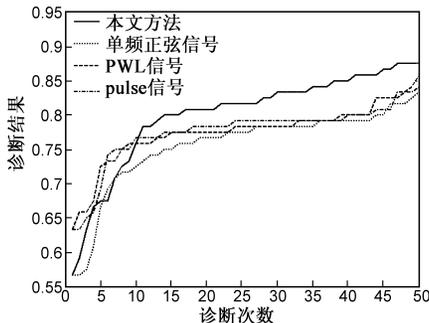


图5 电路1的50次诊断结果曲线

4.2 测试实验 2

(1) 电路 2 的约束条件分析

分别采用直流扫描分析和频率扫描分析电路的参数有效输入范围,幅值扫描范围是 $[-12V \ +12V]$,频率扫描范围是 $[0.1Hz \ 100MHz]$,扫描结果如图 6、7. 据此,本文设置有效的电压幅值范围为和频率范围分别

为 $[0 \ 6V]$ 和 $[0.5KHz \ 5KHz]$,另外,由电路的采样频率为 250KHz 可得, $k < 5$,因此,实验 2 的任意激励函数由一个直流分量和 4 个正弦分量组合而成.

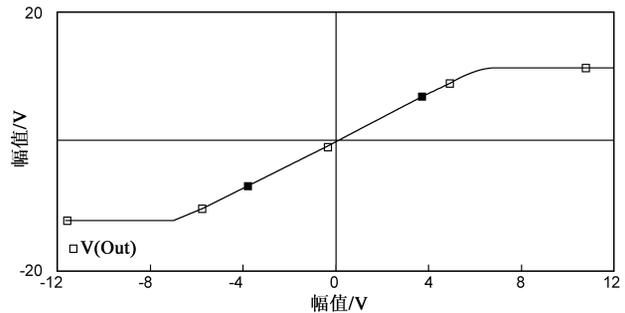


图6 电路2的直流扫描结果

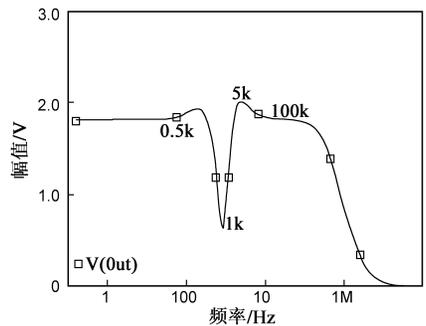


图7 电路2的幅频曲线

(2) 电路 2 的实验结果分析

优化得到的激励源参数分别是: $A_0, 1V; f_0, 0.8KHz;$ $A_k (k = 1, 2, \dots, 4)$ 分别是 0.53V、1.1V、1.2V、0.8V; ψ_k 分别是 $10^\circ, 100^\circ, 120^\circ, 94^\circ$,将此激励源用于故障诊断测试中,并与文献[8]中得到的最优激励源作对比,文献[8]中采用 3 种启发式方法:基因表达规划法(GEP)、遗传算法(GA)、模拟退火法(SA).SVM 算法中核参数 σ 的范围是 60~100,惩罚参数 C 的范围是 1~100,步长均为 10.

诊断结果和曲线分别见表 3 和图 8,本文方法与 SA 方法同时取得了最好的诊断结果,诊断结果曲线可知,本文方法和 SA 方法的诊断曲线基本在 GA 和 GEP 方法的结果曲线之上,表明这两种方法的诊断性能要优于前两者.另外,同样采用遗传算法,文献[8]中优化对象

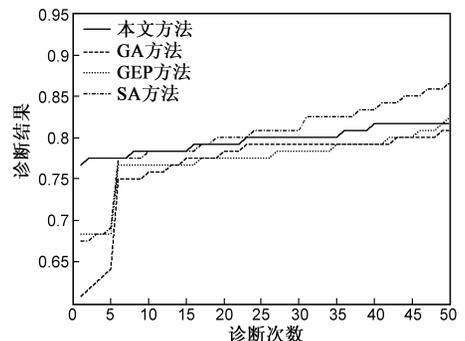


图8 测试电路2的50次诊断结果曲线

是 2 个正弦分量,本文优化的对象是一个直流分量和 4 个正弦分量,由表 3 可知本文方法明显比文献[8]中的 GA 方法提高了诊断性能.

表 3 测试电路 2 的平均诊断结果

故障类	激励源参数			本文优化源 (%)
	GEP 592.9Hz, 160mV, 2.951KHz, 171mV(%)	GA 998Hz,298mV, 3.936KHz, 156mV (%)	SA 628.1Hz, 149mV, 6.37KHz, 160mV(%)	
f_1	68.93	67.87	71.6	51.6
f_2	37.07	26.27	34.8	61.2
f_3	79.07	78.67	84	100
f_4	100	100	100	99.6
f_5	100	100	100	100
f_6	62.27	80.06	70.53	61.2
f_7	100	100	100	99.2
f_8	71.47	61.07	79.47	64.67
average	77	76	80.0	80

5 结论

本文研究了一种新的测试激励优化方法,该方法适合任意的线性和非线性电路,具有普适性,优化的激励源可提高电路的可测性.另外,在物理实验过程中,可由仿真实验得到最优激励源的参数,然后采用任意波形发生器产生实际测试激励.

参考文献

- [1] 陈圣俭,洪炳熔,王月芳,等.可诊断容差模拟电路软故障的新故障字典法[J].电子学报,2000,28(2):127-129.
Chen S J, Hong B R, Wang Y F, et al. A new fault dictionary method enable to diagnose soft fault of tolerance analog circuits [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(2): 127-129. (in Chinese)
- [2] 朱大奇,于盛林.基于 D-S 证据理论的数据融合算法及其在电路故障诊断中的应用[J].电子学报,2002,30(2):221-223.
Zhu D Q, Yu S L. Data fusion algorithm based on D-S evidential theory and its application for circuit fault diagnosis[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(2): 221-223. (in Chinese)
- [3] 罗慧,王友仁,崔江.基于分数阶 Hilbert 变换的模拟电路双层故障特征提取方法[J].电工技术学报,2010,25(6):150-154.
Luo H, Wang Y R, Cui Jiang. A method of analog circuit two-layer fault feature extraction based on fractional Hilbert transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 150-154. (in Chinese)
- [4] Devarayanadurg G, Soma M. Analytical fault modeling and

static test generation for analog ICs[A]. Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design [C]. San Jose, California, United States, 1994. 44-47.

- [5] Alippi C, Catelani M, Fort A, et al. Automated selection of test frequencies for fault diagnosis in analog electronic circuits[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(3): 1033-1044.
- [6] Bernhard B. Generation of optimum test stimuli for nonlinear analog circuits using nonlinear programming and time-domain sensitivities[A]. IEEE International Conference on Design, Automation and Test in Europe[C]. Munich, Germany, 2001. 603-608.
- [7] Golonek T, Rutkowski J. Genetic algorithm based method for optimal analog test points selection[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2007, 54(2): 117-121.
- [8] Jantos P, Grzechca D, Golonek T. Heuristic methods to test frequencies optimization for analogue circuit diagnosis[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2008, 56(1): 29-38.
- [9] Kalpana P, Gunavathi K. Test-generation-based fault detection in analog VLSI circuit using neural network[J]. Journal of Electronics and Telecommunications Research Institute, 2009, 31(2): 209-214.
- [10] Aminian M, Aminian F. Neural-network based analog-circuit fault diagnosis using wavelet transform as preprocessor[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 2000, 47(2): 151-156.

作者简介



罗慧女,1982年生,安徽人,现为南京航空航天大学博士研究生,目前主要研究方向为机载电子系统故障诊断与测试与信号处理.
E-mail: lh821005@126.com



王友仁男,1963年生,江苏人,1984年于东南大学获得学士学位,1987年于东南大学获得硕士学位,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,2008年英国曼切斯特大学高级访问学者.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: wangyiac@nuaa.edu.cn