

文章编号: 1001-0920(2006)10-1134-04

## Volterra 核的测量及在非线性模拟电路测试中的应用

殷时蓉, 陈光禡, 谢永乐

(电子科技大学 自动化工程学院, 成都 610054)

**摘要:** 研究了 Volterra 频域核的测量方法, 提出一种利用优化正弦谐波信号作为系统的激励信号测量 Volterra 频域核的方法。将其用于测量 2 阶 Volterra 核时, 没有 1, 3, 5 等奇数阶和 4 阶 Volterra 核的干扰, 测量精度高。利用 2 阶 Volterra 频域核作为故障特征对非线性模拟电路进行故障诊断, 仿真结果表明, 故障识别率高, 时间开销小, 通用性强。

**关键词:** 故障诊断; Volterra 频域核; 非线性模拟电路

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

## Volterra Kernels Measurement and Its Application in Nonlinear Analog Circuits Testing

YIN Shi-rong, CHEN Guang-ju, XIE Yong-le

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China. Correspondent: YN Shi-rong, E-mail: yinsr@126.com)

**Abstract:** The problem of how to measure Volterra frequency kernels is studied. A Volterra frequency kernels measurement method is presented using an optimized multisine signal as system stimulus. The second order Volterra frequency kernels based on this method are not disturbed by odd and the fourth order Volterra kernels and the measurement precision is high. The second order Volterra frequency kernels are used as the fault signatures in diagnosing nonlinear analog circuits. Experiment results demonstrate that the proposed technique is low time consuming with high fault identification rate and applicable extensively.

**Key words:** Fault diagnosis; Volterra frequency kernels; Nonlinear analog circuit

### 1 引言

Volterra 泛函级数能以任意精度逼近紧支集上的连续函数, 并能描述一大类的非线性现象。Volterra 时域和频域核有明确的物理意义, 分别为高阶脉冲响应函数和广义频率响应函数 GFRF, 它不依赖于系统的输入, 因而完全反映了系统的本质特性。基于 Volterra 级数的非线性系统辨识, 已成功地解决了一系列科学和工程上的非线性问题<sup>[1~7]</sup>, 逐渐引起了人们的重视。但是, 传统的测量 Volterra 核的方法会产生维数灾难, 需要的测试时间较长。本文提出一种利用优化正弦谐波信号作为

系统激励的快速简单测量 Volterra 频域核的方法, 该方法测量精度高, 并可用于在线测量。

由于非线性模拟电路模型化非常困难, 很多线性模拟电路的诊断方法不能直接用于非线性模拟电路, 所以非线性模拟电路的故障诊断一直很困难<sup>[8]</sup>。目前, 工程上普遍采用测量电路说明的方法诊断电路故障, 根据测试结果, 如果满足电路说明参数, 则认为电路无故障, 否则认为有故障。但这种方法测试时间开销大, 对不同的电路测试设备不能通用, 代价昂贵。这迫使人们寻找新的技术以降低测试成本。

在进行故障诊断前, 需对模拟电路进行仿真, 得到与故障相联系的电路特征, 利用这些特征建立故

收稿日期: 2005-08-26; 修回日期: 2005-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(60372001)。

作者简介: 殷时蓉(1974—), 女, 重庆人, 博士生, 从事故障诊断和信号处理等研究; 陈光禡(1939—), 男, 四川自贡人, 教授, 博士生导师, 从事集成电路测试、信号处理等研究。

障字典<sup>[9]</sup>。如果在线得到了电路的特征, 便可通过查询故障字典在线识别出电路的故障, 此方法实时、快速。故障特征的提取方法包括可用于线性和非线性模拟电路的直流法, 用于线性电路的频率法以及瞬态响应法等<sup>[8,9]</sup>。本文利用故障电路和非故障电路的 Volterra 2 阶频域核作为故障特征, 建立故障字典进行故障诊断。诊断流程如图 1 所示。

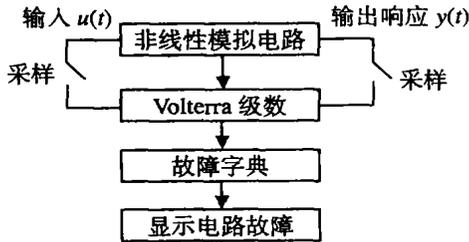


图 1 故障诊断框图

故障字典的建立类似于一个模式分类识别问题, 即将电路测试的特征信号映射到某个故障类。人工神经网络中的 BP 网络有较强的模式识别能力, 并具有自学习、并行处理、分布式存储以及联想记忆的优点, 比较适合于模拟电路的故障诊断。本文利用 BP 神经网络实现故障字典的功能, 查询故障快且具备一定的联想能力。

## 2 Volterra 频域核的测量方法

任意连续的时不变非线性动态系统, 若输入输出响应是解析的, 则该系统可用式 (1) 所示的 Volterra 级数完全描述:

$$y(t) = N u(t) = \sum_{n=0}^{\infty} y_n(t), \quad (1)$$

其中

$$y_n(t) = \int \dots \int h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) u(t - \tau_1) \times u(t - \tau_2) \dots u(t - \tau_n) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_n \quad (2)$$

为系统的  $n$  阶输出响应;  $h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  为非线性系统的  $n$  阶 Volterra 时域核, 或称广义脉冲响应函数;

$$H_n(\omega, \omega, \dots, \omega) = \int \dots \int h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \times e^{j(\omega_1 \tau_1 + j\omega_2 \tau_2 + \dots + j\omega_n \tau_n)} d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_n \quad (3)$$

为  $h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  的多维傅立叶变换, 称为非线性系统的  $n$  阶频域核, 或称  $n$  阶广义频率响应函数 (GFRF)。

$h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  和  $H_n(\omega, \omega, \dots, \omega)$  是系统的固有特征, 不依赖于系统输入信号的选择。当时不变非线性模拟电路发生故障时, 电路系统参数将发生改变, 系统的  $h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  和  $H_n(\omega, \omega, \dots, \omega)$  也相应发生改变, 因此可利用  $h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  和

$H_n(\omega, \omega, \dots, \omega)$  作为故障特征进行故障诊断。如果已知系统的非线性微分方程描述形式, 则可通过谐波分析等方法求解 GFRF<sup>[1,2]</sup>。但是, 非线性模拟电路的结构一般比较复杂, 很难用数学模型描述。

离散形式的 Volterra 级数可表示为

$$y(k) = h_0 + \sum_{n=1}^{\infty} y_n(k), \quad (4)$$

$$y_n(t) = \int \dots \int h_n(i_1, i_2, \dots, i_n) \times u(k - i_1) u(k - i_2) \dots u(k - i_n). \quad (5)$$

在已知非线性系统输入输出的情况下, 可以利用式 (5) 和最小二乘法求解系统的高阶脉冲响应函数, 然后用式 (3) 计算出 GFRF<sup>[3,4]</sup>。然而, Volterra 级数长度随模型的记忆长度和阶数的增长呈指数增加, 因而导致 Volterra 级数辨识存在维数灾难问题。文献 [3, 4] 虽然在计算过程中做了改进, 减少了维数灾难的影响, 但在计算中存在矩阵求逆, 计算误差较大, 而且时域方法要求激励信号是平稳的, 确定 Volterra 级数高阶脉冲响应函数记忆长度也很困难。

文献 [5 ~ 7] 利用频域方法计算 GFRF。设计一组谐波信号对被测系统进行部分激励, 利用系统输入输出的频谱计算系统的 GFRF。但这种方法在测量 2 阶频域核时有 3 阶和 4 阶频域核的干扰, 测量精度不高, 影响故障诊断的正确识别率。本文提出一种通过优化系统的激励信号的方法, 用于测量 2 阶 Volterra 核时, 没有 1, 3, 5 等奇数阶和 4 阶 Volterra 核的干扰, 测量精度高, 并且每一对频率组合的 Volterra 核都可作为故障特征进行故障诊断, 诊断效率高, 速度快。

如果有  $K$  个正弦谐波信号  $u(t)$  输入非线性系统, 即

$$u(t) = \sum_{k=1}^K a(k) \cos[i(k)\omega t + \theta(k)] = \sum_{k=-K}^K A_k e^{j\phi_k} e^{jm_k \omega t}, \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} -m-k &= m_k = i(k), i(k) \in N, \\ \phi_k &= \phi = \theta(k), A_{-k} = A_k = \frac{1}{2} a(k), \end{aligned}$$

则

$$U(\omega) = \sum_{k=-K}^K A_k e^{j\phi_k} \delta[\omega - m_k \omega], \quad (7)$$

$\omega$  为基频。于是系统  $n$  阶输出  $y_n(t)$  和  $Y_n(\omega)$  可表示为

$$y_n(t) = \int \dots \int h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \times$$

$$\int_{\tau_1=0}^{\tau_1=K} \left[ \prod_{k_i=-K}^K A_{k_i} e^{j\phi_{k_i}} e^{jm_{k_i}\omega_0(\tau - \tau_i)} \right] d\tau_i =$$

$$\dots [A_{k_1} \dots A_{k_n} H_n(m_{k_1}\omega, \dots,$$

$$m_{k_n}\omega)] e^{j(\phi_{k_1} + \dots + \phi_{k_n})} e^{j(m_{k_1}\omega_0 + \dots + m_{k_n}\omega_0)\tau}, \quad (8)$$

$$Y_n(\omega) = \dots [A_{k_1} \dots A_{k_n} H_n(m_{k_1}\omega, \dots,$$

$$m_{k_n}\omega)] e^{j(\phi_{k_1} + \dots + \phi_{k_n})} \delta(\omega -$$

$$m_{k_1}\omega + \dots + m_{k_n}\omega), \quad (9)$$

$$Y_n(m_{k_1}\omega + \dots + m_{k_n}\omega) =$$

$$A_{k_1} e^{j\phi_{k_1}} \dots A_{k_n} e^{j\phi_{k_n}} H_n(m_{k_1}\omega, \dots, m_{k_n}\omega) =$$

$$U(m_{k_1}\omega) \dots U(m_{k_n}\omega) H_n(m_{k_1}\omega, \dots, m_{k_n}\omega), \quad (10)$$

$$Y(\omega) = \sum_{n=0}^N Y_n(\omega). \quad (11)$$

即  $n$  阶输出  $Y_n(\omega)$  包含  $n$  个输入信号的所有谐波的组合之和,  $y_n(t)$  中包含多种频率成分, 而同一频率分量可能包含在不同阶次的输出中. 在实际系统中, 当  $n > N$  ( $N$  为某一固定整数) 时,  $Y_n(\omega)$  的能量很小, 则  $Y(\omega)$  可表示为

$$Y(\omega) = \sum_{n=0}^N Y_n(\omega) =$$

$$\dots \sum_{n=0}^N \sum_{k_1=-K}^K \dots \sum_{k_n=-K}^K Y_n(m_{k_1}\omega + \dots + m_{k_n}\omega). \quad (12)$$

输出  $Y(\omega)$  中包含的频域成分为

$$(p - km - k + p - k + m - k + 1 + \dots + pkmk)\omega,$$

$$-N - p_i - N, -N - p_i - N. \quad (13)$$

如果能选择一种系统输入激励信号, 使输出  $Y(\omega)$  的某一频率成分  $\omega(\omega = m_{k_1}\omega + m_{k_2}\omega + \dots + m_{k_n}\omega)$  对于式(13) 只有一种可能的组合, 则可得到

$$H_n(m_{k_1}\omega, m_{k_2}\omega, \dots, m_{k_n}\omega) =$$

$$\frac{Y_n(m_{k_1}\omega + m_{k_2}\omega + \dots + m_{k_n}\omega)}{U(m_{k_1}\omega)U(m_{k_2}\omega) \dots U(m_{k_n}\omega)}. \quad (14)$$

例如: 对于一个可以用 5 阶 Volterra 级数逼近的系统, 如果输入信号  $u(t) = \cos(5\omega t) + \cos(11\omega t)$ , 则 2 阶 Volterra 频域核  $H_2(5\omega, 5\omega)$ ,  $H_2(-5\omega, 11\omega)$ ,  $H_2(5\omega, 11\omega)$ ,  $H_2(11\omega, 11\omega)$  都可由式(14) 计算得到

如果能选择一种正弦激励信号, 使式(13) 对于所有可能  $p_i$  的组合都只生成一个频率值, 将会大大提高计算的效率

但是, 由于正弦谐波信号中有相等的正负频率对, 不管选用什么信号, 输出中都有可能产生频域混叠. 对于偶数阶核, 由相等的正负频域对的组合会

产生直流输出; 对于奇数阶核, 相等的正负频率对和其他频率组合会生成一个与输入频率相等的频率, 这里称其为一类误差 而其他可由选择不同信号而改变的测量误差称为二类误差 由于大多数非线性系统的 3 阶核相对于 1 阶核不能忽略, 而且存在一类误差, 所以用 1 阶核作为系统特征很不准确 因此, 本文用系统的 2 阶 Volterra 频域核作为系统特征进行故障诊断 如果能选择一种谐波信号, 用于测量 Volterra 核时能消除二类误差, 并使一类误差尽量小, 则会大大提高测量的精度 用于故障诊断时, 能提高故障识别率

### 3 搜索算法

本文提出一种搜索谐波信号频率的方法, 搜索出的谐波信号用于测量 2 阶 Volterra 频域核时没有二类误差, 同时也没有 1, 3, 5 等奇数阶和 4 阶 Volterra 核的干扰 设谐波信号的基频为  $\omega$

如果只选基波和奇数次谐波, 则奇数阶  $Y_n(\omega)$  中的频率成分  $(m_{k_1}\omega + m_{k_2}\omega + \dots + m_{k_n}\omega)$  只可能为奇数, 而  $Y_2(\omega)$  中的频率成分都为偶数, 则可避免 1, 3, 5 阶等奇数阶 Volterra 核对 2 阶核的干扰

搜索算法如下:

Step 1: 设搜索起始频率为 star, 搜索步长为 jump, star 和 jump 都为奇数 谐波个数为  $K$ . 设置第 1 个谐波频率为  $m_1, m_1 = \text{star}$ , 搜索次数  $i = 2$

Step 2: 设置第  $i$  次搜索步长为  $\text{jump}_i, \text{jump}_i = \text{jump}$ .

Step 3: 计算第  $i$  个谐波  $m_i, m_i = m_{i-1} + \text{jump}_i$ .

Step 4:  $m_i$  和  $m_j (j < i)$  合成的 2 次, 4 次谐波是否与  $m_j (j < i)$  之间合成的 2 次谐波重叠? 如果有重叠,  $\text{jump}_i = \text{jump}_i + 2$ , 转至 Step 3; 如果没有重叠,  $i = i + 1$ .

Step 5:  $i > K$ ? 否, 转至 Step 2; 是, 结束搜索, 输出谐波阶次  $\{m_i\}$ .

用此方法搜索出的谐波组, 每一对频率组合的 Volterra 核都可作为故障特征进行故障诊断, 诊断效率高, 速度快

### 4 用 Volterra 核诊断模拟电路

模拟电路的故障分为两类: 一类为硬故障(也称灾难性故障), 指元件的短路开路失效故障, 通常会引起电路结构的变化; 另一类为软故障(也称参数故障), 指元件的参数偏移超出允许的容差范围, 电路发生软故障一般仅引起系统性能的异常或恶化<sup>[10]</sup>. 因此对硬故障的检测与诊断比软故障要容易些 但诊断软故障的方法一般也可诊断硬故障, 因为硬故障可看成是软故障的一个特例 本文只研究软故障

软故障可用电路元件参数的偏移  $COM_{var}$  超出电路系统允许的容差范围仿真 每个电路元件参数的允许容差范围是指电路的增益和相频响应不超过电路用标称元件时的增益和相频响应的 10% 时的元件参数变化范围<sup>[10]</sup>。无故障电路的最大允许容差为  $\delta_{com}$ 。当  $3\delta_{com} = COM_{var} > \delta_{com}$  时认为是参数故障, 当  $COM_{var} > 3\delta_{com}$  时认为是硬件故障

利用一个对数放大器验证用 Volterra 频域核进行故障诊断的效率, 其电路原理如图 2 所示 本文故障集如表 1 所示

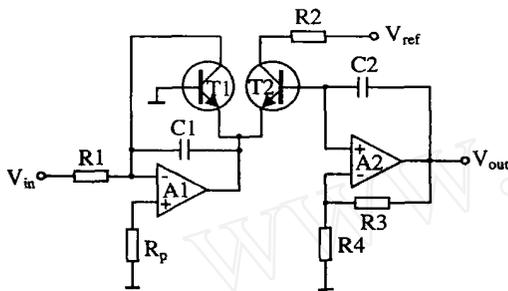


图 2 对数放大器原理图

表 1 故障集

$R3_{var}^+$	电阻 R3 的偏移为 $(\delta_{R3}, 3\delta_{R3})$
$R3_{var}$	电子 R3 的偏移为 $(-3\delta_{R3}, -\delta_{R3})$
$V_{ref_{var}}^+$	参考电压 $V_{ref}$ 的偏移为 $(\delta_{V_{ref}}, 3\delta_{V_{ref}})$
$V_{ref_{var}}$	参考电压 $V_{ref}$ 的偏移为 $(-3\delta_{V_{ref}}, -\delta_{V_{ref}})$
$A1^+$	放大器失调电压偏移为 $(\delta_{A1}, 3\delta_{A1})$
$A1^-$	放大器失调电压偏移为 $(-3\delta_{A1}, -\delta_{A1})$

测试基本频率  $\omega_b = 2$ , 测试输入信号选为  $m_i = [5, 11, 51, 105]$  PSPICE 仿真电路, 先用仿真软件测得电路在各种故障状态(容差为  $\pm 2\delta_{com}$ ) 和无故障状态(电路元件参数为标称值) 的响应, 并计算其 Volterra 的 2 阶频域核作为故障诊断的特征向量, 用测量到的数据训练神经网络, 建立故障字典 本实验中故障字典用一个 3 层 BP 神经网络实现

对无故障电路和各故障电路进行 Monte-Carlo 分析, 测出 20 组数据, 验证神经网络, 测量结果如表 2 所示

表 2 用 Volterra 频率核进行故障诊断的正确识别率

故障	文献[5]方法			本文方法		
	测试总数	正确识别数	正确识别率/%	测试总数	正确识别数	正确识别率/%
无故障电路	10	5	50	20	15	75
$R3_{var}^+$	10	6	60	20	17	85
$R3_{var}$	10	4	40	20	16	80
$V_{ref_{var}}^+$	10	6	60	20	15	75
$V_{ref_{var}}$	10	5	50	20	18	90
$A1^+$	10	3	30	20	17	75
$A1^-$	10	7	70	20	18	90

为了比较本文方法的效率, 这里还用文献[5]的方法计算了各故障电路和无故障电路的 Volterra 的 2 阶频域核, 并训练神经网络进行故障诊断, 测量结果见表 2

从表 2 可以看出, 本文方法故障识别率高, 有推理能力, 而且具有很强的通用性, 可用于很多非线性电路

## 5 结 论

本文研究了 Volterra 频域核的测量方法, 并提出一种 2 阶频域核的测量方法, 其测量精度高, 可作为时不变非线性模拟电路的故障特征在线诊断电路故障 仿真结果表明, 本文方法的故障识别率高, 时间开销小, 而且适用于很多非线性电路, 具有很强的通用性

## 参考文献 (References)

- [1] 胡朴, 韩进能 渥尔特拉最佳滤波器及其应用于非线性系统辨识[J] 武汉大学学报, 2004, 37(1): 120-124  
(Hu P, Han J N. Volterra Optimum Filter and Its Application to Identification of Nonlinear System [J] Engineering J of Wuhan University, 2004, 37(1): 120-124 )
- [2] 李义府, 谢宏, 何怡刚, 等 非线性网络广义频率响应函数统一递推分析法[J] 中南大学学报, 2004, 35(2): 268-272  
(Li Y F, Xie H, He Y G, et al An Unified Recursive Analyzed Method of Generalized Frequency Response Functions of Nonlinear Network [J] J of Center South University, 2004, 35(2): 268-272 )
- [3] 欧文, 韩崇昭, 王文正 Volterra 泛函级数在非线形系统辨识中的应用[J] 控制与决策, 2002, 17(2): 239-242  
(Ou W, Han C Z, Wang W Z Application of Volterra Series in the Identification of Nonlinear Systems [J] Control and Decision, 2002, 17(2): 239-242 )
- [4] 孔祥玉, 韩崇昭, 魏瑞轩, 等 一种全解耦的 RLS 自适应 Volterra 滤波器[J] 电子学报, 2004, 32(4): 687-689  
(Kong X Y, Han C Z, Wei R X, et al A Fully Decoupled RLS Adaptive Algorithm for Volterra Filters [J] Acta Electronica Sinica, 2004, 32(4): 687-689 )
- [5] Michael Weiss, Ceri Evans, David Rees Identification of Nonlinear Cascade Systems Using Paired Multisine Signals [J] IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(1): 332-336
- [6] Wang T H, Thomas J Brazil Volterra mapping-based Behavioral Modeling of Nonlinear Circuits and Systems for High Frequencies [J] IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(5): 1433-1440

(下转第 1142 页)

256M)上,算法的参数设置为:种群规模为50,迭代次数为400次,交叉概率 $p_c = 0.4$ ,变异概率 $p_m = 0.4$ 对于10组数据仿真运行时间最长为12min,完全满足现场生产调度的要求

根据表1可以看出:应用本文设计的遗传局部搜索算法求解加热炉调度问题,结果均优于现在正在使用的人工调度方法得到的结果

## 5 结论

加热炉调度问题是钢铁企业中存在的一类重要的生产调度问题,目前还没有给予充分的研究。本文根据加热炉生产的特点建立了加热炉调度问题的数学模型,并提出了求解这一问题的遗传局部搜索算法。仿真实验表明,本文所提出的生产调度方法比目前生产实际中使用的人工调度方法的效果更好,对于钢铁生产中的节能降耗具有重要的实际意义。

## 参考文献(References)

- [1] Tang L, Liu J, Rong A, et al. A Review of Planning and Scheduling Systems and Methods for Integrated Steel Production [J]. *European J of Operational Research*, 2001, 133(1): 1-20
- [2] Lee H S, Murthy S S, Haider S W, et al. Primary Production Scheduling at Steelmaking Industries[J]. *IBM J of Research and Development*, 1996, 40(2): 231-252
- [3] Peter Cowling, Wafa Rezig. Integration of Continuous Caster and Hot Strip Mill Planning for Steel Production [J]. *J of Scheduling*, 2000, 3(4): 185-208
- [4] Tang L X, Peter B Luhz, Liu J Y, et al. Steelmaking Process Scheduling Using Lagrangian Relaxation [J]. *Int J of Production Research*, 2001, 40(1): 55-70
- [5] Leo Lopez, Michael W Carter, Michel Gendreau. The Hot Strip Mill Production Scheduling Problem — A Tabu Search Approach [J]. *European J of Operational Research*, 1998, 106(2): 317-335
- [6] Peter Cowling, Djamila Ouelhadj, Sanja Petrovic. A Multi-agent Architecture for Dynamic Scheduling of Steel Hot Rolling [J]. *J of Intelligent Manufacturing*, 2003, 14(5): 457-470
- [7] 柴天佑, 王中杰, 王伟. 加热炉控制技术的回顾与展望 [J]. *冶金自动化*, 1998, 22(5): 1-5  
(Chai T Y, Wang Z J, Wang W. Review and Prospect of Control Techniques for Reheating Furnace [J]. *Metallurgy Automation*, 1998, 22(5): 1-5.)
- [8] Clifford Mui, Edmund Oskinski, John A Meech, et al. A SCADA-based Expert System to Provide Delay Strategies for a Steel Billet Reheat Furnace [A]. *Proc of the 2nd Int Conf on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials* [C]. Hawaii, 1999: 111-118
- [9] Paralic J, Malinzak D, Csonto J. Scheduling of Slabs into Push Furnaces — Two Different Approaches [A]. *Proc of the 12th Int Conf on Process Control and Simulation* [C]. Kosice: FBERG Technical University of Kosice, 1996: 355-360
- [10] 玄光男, 程润伟. *遗传算法与工程优化* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 60-63  
(Gen Mitsuo, Cheng R W. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization* [M]. Beijing: Tsinghua University, 2004: 60-63.)
- [11] Cheng R W, Gen Mitsuo. Parallel Machine Scheduling Problems Using Memetic Algorithms [J]. *Int J of Intelligent Automation and Soft Computing*, 1996, 3(2): 273-286
- [12] Baker J. Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms [A]. *Proc of the 2nd Int Conf on Genetic Algorithms* [C]. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1987: 100-111

(上接第1137页)

- [7] Ceri Evans, David Rees, Lee Jones. Periodic Signals for Measuring Nonlinear Volterra Kernels [J]. *IEEE Trans on Instrument and Measurement*, 1996, 45(2): 362-371
- [8] Taylor D, Platts A. Transient Response Testing of Nonlinear Analogue Circuits Using Optimised Fault Sets [J]. *Circuits, Devices and Systems, IEE Proc*, 2003, 150(2): 104-112
- [9] Cesare Alippi, Marcantonio Catelani, Ada Fort, et al. SBT Soft Fault Diagnosis in Analog Electronic Circuits: A Sensitivity-based Approach by Randomized Algorithms [J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(5): 1116-1125
- [10] Ramakanth Kondagunturi, Eugene Bradley, Krisiti Maggard, et al. Benchmark Circuits for Analog and Mixed-signal Testing [A]. *Southeastern '99 Proc of IEEE* [C]. Kentucky, 1999: 217-220