

基于 Volterra 核二次型分布的非线性模拟电路软故障诊断

邓勇, 张禾

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

摘要: 针对非线性模拟电路软故障诊断的难题, 基于 Volterra 核二次型分布——Wigner Ville 分布(WVD), 提出一种故障特征提取的新方法. 首先计算待测试电路(CUT)的 Volterra 核; 然后对该 Volterra 核进行 WVD 转换, 得到 WVD 函数, 从中提取出故障特征, 完成非线性模拟电路的软故障诊断. 仿真实验结果表明, 该方法能有效地解决故障混叠难题, 提升故障元件检测和定位的能力.

关键词: 非线性模拟电路; 软故障; Volterra 核; Wigner-Ville 分布

中图分类号: TN707

文献标志码: A

Diagnosis of soft fault in nonlinear analog circuits based on 2nd-order distribution of Volterra kernel

DENG Yong, ZHANG He

(School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China. Correspondent: DENG Yong, E-mail: y_den117@126.com)

Abstract: Aiming at the problem of soft fault diagnosis of nonlinear analog circuits, a novel approach of fault signature extraction is proposed based on the 2nd-order distribution—Wigner Ville distribution(WVD) of the Volterra kernel. Firstly, the Volterra kernel of the circuit under test(CUT) is calculated. Then the Volterra kernel of the CUT is transformed based on the WVD and the WVD functions are obtained. In the WVD functions, the fault signatures are extracted and the soft fault diagnosis of the nonlinear analog circuit is achieved. The simulation results show that the proposed method can solve the fault aliasing problem effectively and improve the capability of detecting and locating fault components.

Keywords: nonlinear analog circuits; soft faults; Volterra kernel; Wigner-Ville distribution

0 引言

非线性模拟电路故障诊断的难点在于非线性系统理论的不成熟^[1-2]. 非线性电路输出信号频率成分复杂^[3], 而且受元件容差的影响, 电路中故障元件的软故障特征与正常元件特征容易混叠, 因此, 非线性模拟电路软故障诊断一直是模拟电路故障诊断的瓶颈之一^[4], 国内外的研究成果并不多. 随着人工智能技术的发展, 神经网络^[5]、小波分析^[6]、频率优化^[7]、支持向量机^[8]、马氏距离模型^[9]等方法在模拟电路故障诊断领域已经得到了深入的研究. 在非线性电路领域, Volterra 模型得到了广泛的应用, 出现了自适应 Volterra 滤波器模型^[10]、Volterra 频域模型^[11]、并串型 Volterra 模型^[12]等改进模型. 但上述方法在处理软故障特征混叠问题时效果并不理想, 而且这些方法需要计算 3 阶或子带 Volterra 核, 完成故障诊断的开销(即

完成故障诊断所需的时间)也较大.

基于此, 本文提出一种基于 Volterra 核二次型分布的方法, 在仅需要计算 2 阶 Volterra 核的条件下, 通过计算 Volterra 核的 WVD 序列, 提取各故障状态对应的数据特征.

1 原理介绍

1.1 Volterra 核的计算

Volterra 核是一种具有记忆功能的级数. 一般 2 阶和 3 阶级数已经能建立比较精确的非线性系统模型. 电路状态不同, Volterra 核的参数也将不同.

Volterra 时域核的常用表达式为

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} y_i(t),$$

$$y_i(t) =$$

收稿日期: 2015-05-03; 修回日期: 2014-08-24.

基金项目: 四川省教育厅重点科研项目(13ZA0186).

作者简介: 邓勇(1972—), 男, 高级工程师, 博士, 从事复杂电子系统故障诊断与预测的研究; 张禾(1973—), 男, 副教授, 从事混合电路设计、测试等研究.

$$\int \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_i(\tau_1, \cdots, \tau_i) \prod_{j=1}^i u(t - \tau_j) d\tau_1 \cdots d\tau_i. \quad (1)$$

其中: $h_i(\tau_1, \cdots, \tau_i)$ 为 i 阶 Volterra 时域核, $u(t)$ 为输入信号, $y_i(t)$ 为 i 阶输出信号.

由于计算机处理的数据为离散型数据, 而且相关的数据序列为有限序列, 需要将式(1)变为有限离散形式(i 阶 Volterra 时域核用 i 阶 Volterra 级数 $h_i(m_1, \cdots, m_i)$ 表示), 即

$$Y(n) = \sum_{i=1}^I y_i(n) + e(n),$$

$$y_i(n) = \sum_{m_1=1}^{M_1-1} \cdots \sum_{m_i=1}^{M_i-1} h_i(m_1, \cdots, m_i) \prod_{j=1}^i u(n - m_j). \quad (2)$$

其中: M_i 为 i 阶记忆长度, $e(n)$ 为误差.

计算 $y_i(n)$ ($i = 1, 2, \cdots, I$) 的方法如下: 设激励 $a_i u(n)$ 产生的响应为 $Y_i(n)$, 则

$$Y = A\bar{Y} + E. \quad (3)$$

其中

$$Y = [Y_1(n), \cdots, Y_i(n), \cdots, Y_I(n)]^T,$$

$$\bar{Y} = [y_1(n), \cdots, y_i(n), \cdots, y_I(n)]^T,$$

$$E = [e_1(n), \cdots, e_i(n), \cdots, e_I(n)]^T,$$

$$A = [a_i^j]_{I \times I}, \quad i, j = 1, 2, \cdots, I,$$

a_i^j 为矩阵中第 i 行第 j 列元素.

忽略误差 $e_i(n)$, 当 a_i 彼此不相等时, 可以解出各阶 Volterra 级数输出 $y_i(n)$; 然后利用最小二乘法解出各阶 Volterra 级数^[13].

当电路出现故障时, 其 Volterra 级数会发生改变, 通过对比正常电路和故障电路之间以及故障电路之间各阶 Volterra 级数的差别, 能够提取出故障特征. 但由于 Volterra 级数有维数灾难的问题^[13], 使得高阶 Volterra 级数求解开销过大, 通过辨识高阶 Volterra 模型进行故障诊断的方法会遇到瓶颈. 而本文只需要计算到 2 阶 Volterra 级数, 再通过计算其 WVD 序列函数, 便可从中提取故障特征.

1.2 Volterra 级数的 Wigner_Ville 分布

Wigner_Ville 分布是一种二次型时频分析工具, $x(t)$ 的 WVD 定义式如下:

$$\bar{X}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (4)$$

因此, 1 阶 Volterra 核的 Wigner_Ville 分布为

$$\bar{H}_1(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1\left(t + \frac{\tau}{2}\right) h_1^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (5)$$

将式(5)离散化得

$$W_{h1}(m, k) = \sum_{l=-L}^{L-1} h_1\left(m + \frac{l}{2}\right) h_1^*\left(m - \frac{l}{2}\right) e^{-j2kl\pi/L}. \quad (6)$$

2 阶 Volterra 核的 Wigner_Ville 分布为

$$\bar{H}_2(t_1, t_2, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2\left(t_1 + \frac{\tau_1}{2}, t_2 + \frac{\tau_2}{2}\right) h_2^*\left(t_1 - \frac{\tau_1}{2}, t_2 - \frac{\tau_2}{2}\right) e^{-j\omega(\tau_1 + \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2. \quad (7)$$

将式(7)离散化得

$$W_{h2}(m_1, m_2, k) = \sum_{l_2=-L}^{L-1} \sum_{l_1=-L}^{L-1} h_2\left(m_1 + \frac{l_1}{2}, m_2 + \frac{l_2}{2}\right) \times h_2^*\left(m_1 - \frac{l_1}{2}, m_2 - \frac{l_2}{2}\right) e^{-j2k(l_1 + l_2)\pi/L}. \quad (8)$$

为提取故障特征, 需要计算待诊断电路的 1 阶和 2 阶 Volterra 级数的 Wigner_Ville 分布. 根据式(2)、(3)、(6)和(8), 可以解出这两个分布函数.

1.3 故障特征提取

设 $h_1(m), h_2(m_1, m_2)$ 为待诊断电路的 1 阶和 2 阶 Volterra 级数, $h_{1N}(m), h_{2N}(m_1, m_2)$ 为正常电路的 1 阶和 2 阶 Volterra 级数, $h_{1F}(m), h_{2F}(m_1, m_2)$ 为故障电路的 1 阶和 2 阶 Volterra 级数增量, 则

$$\begin{cases} h_1(m) = h_{1N}(m) + h_{1F}(m), \\ h_2(m_1, m_2) = h_{2N}(m_1, m_2) + h_{2F}(m_1, m_2). \end{cases} \quad (9)$$

$h_1(m)$ 和 $h_2(m_1, m_2)$ 的离散 WVD 函数分别为

$$W_{h1}(m, k) = \sum_{l=-L}^{L-1} \left[h_{1N}\left(m + \frac{l}{2}\right) + h_{1F}\left(m + \frac{l}{2}\right) \right] \times \left[h_{1N}^*\left(m - \frac{l}{2}\right) + h_{1F}^*\left(m - \frac{l}{2}\right) \right] e^{-j2kl\pi/L} = W_{11}(m, k) + W_{22}(m, k) + W_{12}(m, k) + W_{21}(m, k), \quad (10)$$

$$W_{h2}(m_1, m_2, k) = \sum_{l_2=-L}^{L-1} \sum_{l_1=-L}^{L-1} f_1(h_{2N}, h_{2F}) \times f_2(h_{2N}^*, h_{2F}^*) e^{-j2k(l_1 + l_2)\pi/L} = W'_{11}(m_1, m_2, k) + W'_{22}(m_1, m_2, k) + W'_{12}(m_1, m_2, k) + W'_{21}(m_1, m_2, k). \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} f_1(h_{2N}, h_{2F}) = h_{2N}\left(m_1 + \frac{l_1}{2}, m_2 + \frac{l_2}{2}\right) + h_{2F}\left(m_1 + \frac{l_1}{2}, m_2 + \frac{l_2}{2}\right), \\ f_2(h_{2N}^*, h_{2F}^*) = h_{2N}^*\left(m_1 - \frac{l_1}{2}, m_2 - \frac{l_2}{2}\right) + h_{2F}^*\left(m_1 - \frac{l_1}{2}, m_2 - \frac{l_2}{2}\right). \end{cases} \quad (12)$$

由于

$$\left\{ \begin{aligned} W_{12}(m, k) &= \sum_{m=-L}^{L-1} h_{1N}^* \left(m - \frac{l}{2} \right) h_{1F} \left(m + \frac{l}{2} \right) e^{-j2kl\pi/L}, \\ W_{21}(m, k) &= \sum_{m=-L}^{L-1} h_{1F}^* \left(m - \frac{l}{2} \right) h_{1N} \left(m + \frac{l}{2} \right) e^{-j2kl\pi/L}; \\ W'_{12}(m_1, m_2, k) &= \sum_{l_2=-L}^{L-1} \sum_{l_1=-L}^{L-1} h_{2N}^* \left(m_1 - \frac{l_1}{2}, m_2 - \frac{l_2}{2} \right) \times \\ & h_{2F} \left(m_1 + \frac{l_1}{2}, m_2 + \frac{l_2}{2} \right) e^{-j2k(l_1+l_2)\pi/L}, \\ W'_{21}(m_1, m_2, k) &= \sum_{l_2=-L}^{L-1} \sum_{l_1=-L}^{L-1} h_{2F}^* \left(m_1 - \frac{l_1}{2}, m_2 - \frac{l_2}{2} \right) \times \\ & h_{2N} \left(m_1 + \frac{l_1}{2}, m_2 + \frac{l_2}{2} \right) e^{-j2k(l_1+l_2)\pi/L}. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

所以有

$$\left\{ \begin{aligned} W_{12}(m, k) &= W_{21}^*(m, k), \\ W'_{12}(m_1, m_2, k) &= W'_{21}^*(m_1, m_2, k). \end{aligned} \right. \quad (14)$$

因此, 式 (10) 和 (11) 可变为

$$\left\{ \begin{aligned} W_{h1}(m, k) &= W_{11}(m, k) + W_{22}(m, k) + 2 |W_{12}(m, k)|, \\ W_{h2}(m_1, m_2, k) &= W_{11}^*(m_1, m_2, k) + W_{22}^*(m_1, m_2, k) + \\ & 2 |W_{12}'(m_1, m_2, k)|. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

构造特征函数为

$$\left\{ \begin{aligned} Q_1(k) &= \frac{\sum_{m=0}^{M-1} 2|W_{12}(m, k)|}{\sum_{m=0}^{M-1} W_{h1}(m, k)}, \\ Q_2(k) &= \frac{\sum_{m_1=0}^{M_1-1} \sum_{m_2=0}^{M_2-1} 2|W'_{12}(m_1, m_2, k)|}{\sum_{m_1=0}^{M_1-1} \sum_{m_2=0}^{M_2-1} W_{h2}(m_1, m_2, k)}. \end{aligned} \right. \quad (16)$$

式 (17) 所构造的特征函数实际上已建立了目标电路 Volterra-WVD (Volterra 核二次型分布) 中由级数参数增量产生的交叉项的权重, 对于不同的电路, 由于级数参数的增量不同, 该值也会不同 (Volterra 核与目标电路为映射关系). 与其他特征函数或特征值相比, 式 (17) 构造出的特征函数在物理意义上是关于目标电路时频信号的统计学函数, 充分考虑了模型本身的时域、频域和非线性的细节特征. 由式 (10)、(11) 和 (17) 可知, 当 $0 \leq Q_1(k), Q_2(k) \leq 1$ 时, $Q_1(k)$ 和 $Q_2(k)$

越接近 1, 故障电路与正常电路的特征偏差越明显. 而对于不同的故障电路, $Q_1(k)$ 和 $Q_2(k)$ 也有明显的不同, 因此本文以 $Q_1(k)$ 和 $Q_2(k)$ 作为故障特征, 并设定阈值以区别不同电路的差别, 利用隐马尔科夫模型进行电路分类, 实现非线性模拟电路软故障的诊断.

2 实验分析

实验采用如图 1 所示的对数放大器电路^[2], 其中 $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = 100 \pm 5 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 1 \pm 0.05 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 20 \pm 1 \text{ nF}$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 100 \pm 5$ (α_1 和 α_2 分别为 T_1 和 T_2 的放大倍数), 随机预设该电路的 2 种硬故障和 6 种软故障状态, 如表 1 所示.

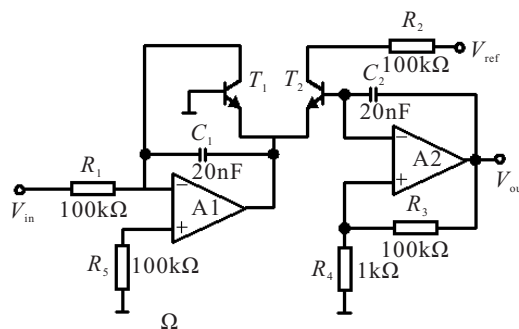


图 1 实验电路-对数放大器

表 1 实验电路故障集

电路序号	故障类型
正常电路 1	所有元件都在容差范围
故障电路 2	R_4 短路, 硬故障
故障电路 3	C_2 开路, 硬故障
故障电路 4	R_1^+ , $R_1 = (105, 115) \text{ k}\Omega$, 软故障
故障电路 5	R_1^- , $R_1 = (85, 95) \text{ k}\Omega$, 软故障
故障电路 6	R_3^+ , $R_3 = (105, 115) \text{ k}\Omega$, 软故障
故障电路 7	R_3^- , $R_3 = (85, 95) \text{ k}\Omega$, 软故障
故障电路 8	C_1^+ , $C_1 = (21, 23) \text{ nF}$
故障电路 9	α_1^+ , $\alpha_1 = (105, 115)$

为使实验结果具有通用性, 对每种电路状态建立蒙特卡罗模型, 输入信号为正弦信号, 其频率为 1 kHz. 根据输入信号和输出的电压信号序列计算出相应电路的 1 阶和 2 阶 Volterra 级数, 利用式 (10)、(11) 和 (17) 计算出各故障电路的特征函数 $Q_1(k)$ 和 $Q_2(k)$.

下面以 R_1^+ 软故障 (故障电路 4) 和 R_3^+ 软故障 (故障电路 6) 为例说明如何利用本文方法检测和定位故障元件. 其中为区别不同电路 (电路 1 ~ 电路 9) 的差别所使用的阈值为 15%. 图 2 ~ 图 4 显示了故障诊断的主要步骤.

图 2 显示出在直接计算 Volterra 级数的情况下, 得到的 R_1^+ 软故障与 R_3^+ 软故障状态的 Volterra 二阶级数. 从图 2 中可以看出, 彼此的差别很小, 需要进一步提取故障特征. 按照本文方法计算出这两种电路的特征函数 $Q_1(k)$ 和 $Q_2(k)$, 得到数据序列如图 3 和图 4 所示.

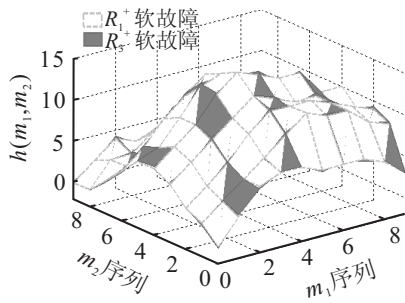


图2 2阶 Volterra 级数数据序列

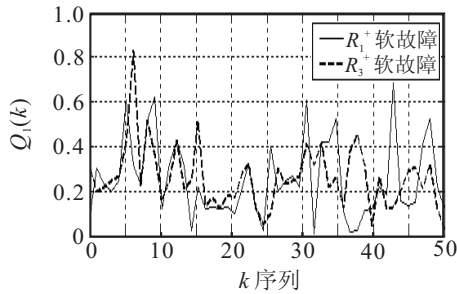


图3 特征函数 $Q_1(k)$ 数据序列

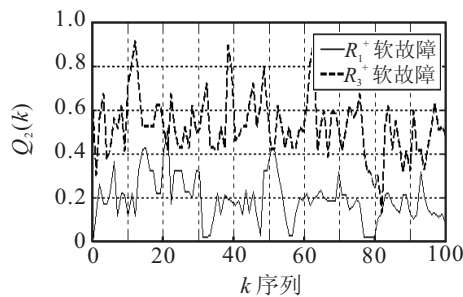


图4 特征函数 $Q_2(k)$ 数据序列

根据图3和图4, 结合相关的中间计算过程, 可以进行精确的定量分析. 由于已经求得了特征函数 $Q_1(k)$ 和 $Q_2(k)$, 可以通过函数值的比较得到最大函数值 (即 Q_1 或 Q_2 的最大值及相应的 k). R_1^+ 软故障的最大函数值点在 $Q_1(k=43) = 0.68$ 和 $Q_2(k=21) = 0.52$ 两点; R_3^+ 软故障的最大函数值在 $Q_1(k=6) = 0.83$ 和 $Q_2(k=12) = 0.92$ 两点, 两种故障电路特征点的位置有明显差别. 在 Q_1 最大函数值指标上, R_3^+ 软故障超过了 R_1^+ 软故障 22%; 在 Q_2 最大函数值上, R_3^+ 软故障超过了 R_1^+ 软故障 76%, 其差别远超过阈值 15%. 从数据序列的能量考虑, 对于 R_3^+ 软故障, 虽然其 Q_1 数据序列能量为 4.401 0, 是 R_1^+ 软故障 Q_1 数据序列能量 (4.666 4) 的 94.3%, 差别并不大, 但其 Q_2 数据序列能量为 29.429 4, 是 R_1^+ 软故障 Q_2 数据序列能量 (4.758 0) 的 618.5%, 差别明显. 根据 Q_1 和 Q_2 的最大函数值点位置、最大函数值和序列能量, 可以提取出这两种故障电路的特征, 结合隐马尔科夫模型进行电路分类, 便能准确完成故障诊断.

采用本文所提出的方法对表1预设的故障进行诊断, 诊断结果如表2所示. 可以看出, 本文方法能够

准确辨识这9种电路.

表2 故障诊断结果

电路序号	故障类型	诊断结果
正常电路1	无故障	无故障
故障电路2	R_4 短路	R_4 短路
故障电路3	C_2 开路	C_2 开路
故障电路4	$R_1 = 109\text{ k}\Omega$	R_1 增大
故障电路5	$R_1 = 91\text{ k}\Omega$	R_1 减小
故障电路6	$R_3 = 112\text{ k}\Omega$	R_3 增大
故障电路7	$R_3 = 87\text{ k}\Omega$	R_3 减小
故障电路8	$C_1 = 22\text{ nF}$	C_1 增大
故障电路9	$\alpha_1 = 108$	α_1 增大

为了验证本文方法对软故障定位的效果, 与文献[10]进行了对比, 在每种软故障条件下 (故障电路4~故障电路9) 进行100次蒙特卡洛实验, 结果见表3. 这里需要说明的是, 本文方法与文献[10]一样, 实际上都是一种建模方法, 都可以通过阈值的设定来区分电路, 将其用到模拟电路故障诊断领域, 可以确定正常电路和故障电路以及不同故障电路之间的差别, 从而完成故障电路的检测和故障元件的定位.

表3 故障诊断对比结果

故障电 路序号	本文方法		文献[10]方法	
	故障识别率/%	断时间开销/s	故障识别率/%	诊断时间开销/s
4	94	4.2	87	9.8
5	98	4.2	86	9.7
6	92	4.3	75	9.9
7	89	4.3	75	9.8
8	93	4.2	75	9.7
9	86	4.4	56	9.9
平均	92	4.3	76	9.8

由表3可知, 在软故障诊断率方面, 本文提出的方法明显优于文献[10]提出的方法. 本文方法软故障平均识别率为92%, 其最差的故障识别率为86% (故障电路9- α_1^+ 故障); 文献[10]方法的平均软故障识别率为76%, 其最差的故障识别率为56% (故障电路9- α_1^+ 故障). 与之相比, 本文方法的故障诊断能力更强. 究其原因有两个: 1) Volterra 核和 Wigner_Ville 分布都是非线性模型, 二者结合, 能建立更准确的非线性模拟电路故障模型; 2) 由于软故障电路彼此差别不大, 其故障特征通常都集中在很小的频带中, 容易形成故障特征的混叠, 而本文方法通过计算 Volterra 核的 Wigner_Ville 分布并构造出新的特征函数, 使故障特征的能量重新分布, 从而实现了故障特征的分离.

由于本文方法只需计算2阶 Volterra 核, 而文献[10]的方法是通过反复迭代得到2阶子带 Volterra 核, 在诊断成本方面本文方法优势明显, 其软故障的平均诊断时间开销远低于文献[10]的方法 (如表3).

3 结 论

本文根据 Volterra 核的 Wigner-Ville 分布, 构造出新的特征函数, 从中提取了相应电路的故障特征, 并利用故障特征的差异, 解决了各故障现象彼此容易混叠的问题, 完成了故障诊断。

与其他信号处理方法相比, Wigner-Ville 分布本身就是二次型, 既具有非线性特征, 又兼具时域和频域的信号内容, 因此, 用该分析工具来表达非线性电路 Volterra 核, 能够保留非线性、时域和频域 3 个方面的信号信息, 这是其优势所在。本文考虑到 Volterra 级数的求解开销, 只计算到了 2 阶级数, 这在一定程度上降低了所建模型的精度, 若要提高该精度, 则需要提高所求 Volterra 级数的阶次。二者该如何平衡, 将是下一步研究的重点。

参考文献(References)

- [1] 刘崇新. 非线性电路理论及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 1-10.
(Liu C X. Nonlinear circuit theory and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 1-10.)
- [2] 刘本德, 胡昌华. 基于 Volterra 频域核辨识的非线性模拟电路故障诊断[J]. 控制与决策, 2009, 24(8): 1167-1171.
(Liu B D, Hu C H. Fault diagnosis of nonlinear analog circuits based on Volterra frequency domain kernel identification[J]. Control and Decision, 2009, 24(8): 1167-1171.)
- [3] Evans C, Rees D, Jones L, et al. Periodic signals for measuring nonlinear Volterra kernels[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(4): 362-371.
- [4] Deng Y, Shi Y B, Zhang W. Diagnosis of soft faults in analog integrated circuits based on fractional correlation[J]. J of Semiconductors, 2012, 33(8): 1-6.
- [5] Aminian F, Aminian M. Analog fault diagnosis of actual circuits using neural networks[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(3): 544-550.
- [6] Jeongjin R, Abraham J A. Subband filtering for time and frequency analysis of mixed-signal circuit testing[J]. IEEE Trans on Instrum Meas, 2004, 53(2): 602-611.
- [7] Yang C L, Yang J, Liu Z, et al. Complex field fault modeling-based optimal frequency selection in linear analog circuit fault diagnosis[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2014, 64(4): 813-825.
- [8] 马超, 陈西宏. 基于支持向量机属性约简集成的模拟电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 660-666.
(Ma C, Chen X H. Analog circuit fault diagnosis based on attribute reduct ensemble of support vector machine[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 660-666.)
- [9] 韩涵, 王厚军, 龙兵, 等. 基于改进马氏距离的模拟电路故障诊断方法[J]. 控制与决策, 2013, 17(28): 1713-1717.
(Han H, Wang H J, Long B, et al. Method for analog circuit fault diagnosis based on improved Mahalanobis distance[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1713-1717.)
- [10] Burton T G, Goubran R A, Beaucoup F. Nonlinear system identification using a subband adaptive Volterra filter[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(5): 1389-1397.
- [11] Yang J J, Tan S X D. Nonlinear transient and distortion analysis via frequency domain Volterra series[J]. Circuits Systems Signal Processing, 2006, 25(3): 295-314.
- [12] Kinbangou A Y, Favier G. Identification of parallel-cascade wiener systems using joint diagonalization of third-order Volterra kernel slices[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(3): 188-191.
- [13] 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.)

(责任编辑: 孙艺红)