

模拟集成电路参数型故障定位方法^{*}

谢永乐[†] 李西峰

(电子科技大学自动化工程学院, 成都 610054)

摘要: 针对模拟集成电路参数型故障的测试难题, 提出了定位模拟集成电路参数型故障的功率谱相关分析方法. 利用小波滤波器组对被测电路响应进行子带滤波后, 计算子带响应序列的相干函数. 通过对以相干函数序列表征的功率谱进行相关分析, 不仅可以实现模拟集成电路参数型故障的数字化故障特征提取, 而且还可以完成对参数型故障的定位. 利用国际标准电路 ITC97 的状态变量滤波器和跳蛙滤波器, 通过对比实验, 验证了本文方法对定位参数型故障的有效性, 为实现模拟集成电路参数型故障诊断的高覆盖率和诊断自动化提供了一种新途径.

关键词: 模拟集成电路测试; 故障诊断; 参数型故障; 故障定位; 相干函数

EEACC: 2570

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)03-0598-08

1 引言

模拟集成电路中的故障通常分为灾难型故障(或称硬故障)和参数型故障(或称软故障)两类^[1~4]. 硬故障包括电路节点和连线的短路和开路, 这种故障可改变电路的拓扑结构. 模拟集成电路可由各种原因造成元件参数偏离(漂移)其标称值, 参数偏离可引起电路性能下降, 若参数偏离超出容差范围, 便成为参数型故障, 这时电路的拓扑结构虽未改变, 但会造成电路性能严重下降甚至失效. 当前相比硬故障的测试, 参数型故障的测试要困难得多, 相关研究十分活跃^[5~7].

模拟集成电路的测试一般可分为故障检测与故障定位两过程. 判明电路中是否有故障, 验证被测电路是否保持有设计时所赋予的性能规范是电路检测的主要工作, 一般也将其称为功能性测试^[4]. 若检测出电路中存在故障, 需进一步定位出发生故障的位置或元件, 这一过程一般和结构性测试^[4]相对应.

国内对模拟集成电路故障诊断方面的研究十分关注, 如基于测试节点优选的方法^[8], 基于多频灵敏度分析的 K 故障诊断方法^[9], 短路导纳参数法^[10], 最小二乘小波支持向量机方法^[11], 基于聚类预处理和支持向量机的方法^[12], 基于 kernel 特征提取器的方法^[13], 新故障字典方法^[14], 基于计算最大 Lyapunov 指数的方法^[15], 模块级软故障特征提取方法^[16], 改进故障类重叠方法^[17], 模糊软故障字典法^[18], 基于联合时频分析的方法^[19].

国外对参数型故障的测试已有不少成果问世, 典型方法如文献^[7, 20]. 在文献^[7]中提出了一种基于电路传输函数系数的参数型故障检测方法. 该方法从正常电

路的数学描述和电路元件的容差规范出发, 预先确定出电路传输函数系数的“容差盒(tolerance box)”. 随后利用实测的电路输入、输出信息, 借助系统辨识的方法提取被测电路的传输函数, 如果提取的传输函数中的一个或多个系数落到其“容差盒”之外, 便可宣告电路中存在故障. 这种方法的显著缺点是: 只能检测出电路中是否存在参数型故障, 但不能回答“故障在哪里?”的问题, 即不能实现故障定位. 这种方法还有不易实现测试自动化方面的不足.

在文献^[20]中提出了一种基于子带滤波的测试方法. 该方法将电路的故障效应置入特定的子带中观察, 可显著提高故障的分辨率, 突破了这之前许多方法的局限. 然而, 正如下文实验中所指出的那样, 这种方法对检测参数型故障十分有效, 但当检测出电路有故障后, 若需进一步区分出故障由哪一个元件参数引起, 该方法仍存在局限.

国外对参数型故障测试的方法还有: 基于特征空间映射的方法^[21~23], 基于统计理论加速测试的方法^[24], 基于供电电流小波分析的方法^[25]以及基于全局灵敏度计算的方法^[26].

一方面, 在集成电路工业中故障定位是一个不可避免的重要问题, 特别是对于模拟集成电路, 由于对故障模型化的困难以及参数容差的客观存在, 使模拟元件参数型故障的定位在理论上和工程实践上皆比单纯的故障检测困难许多. 当前, 尽管国内外对这个问题的研究十分活跃, 也取得了不少成果, 但对此问题的解决还很不理想, 相关研究正在蓬勃兴起. 另一方面, 当前数字集成电路的测试已实现了自动化, 而要实现模拟集成电路的测试自动化还有一系列问题亟待解决. 这些正是本文要探索的问题.

^{*} 国家自然科学基金资助项目(批准号: 90407007)

[†] 通信作者. Email: xieyongle@uestc.edu.cn

2007-08-12 收到, 2007-10-30 定稿

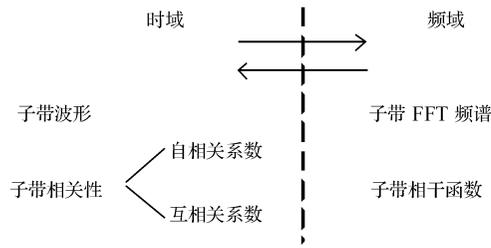


图 1 参数型故障信息的表征

Fig.1 Representation of fault information for parametric fault

2 原理

出于提高故障分辨率之目的,这里对某一故障下测试响应的观察仍在子带滤波器^[20]中进行,不同于已有方法^[20,27~29]的是,本文提出了如图 1 所示的参数型故障信息表示方式.

图 1 中,在时域用子带序列相关系数表征故障信息,子带序列的相关系数包含两个参数:一是无故障子带序列的自相关系数,二是某一故障下子带序列与无故障子带序列的互相关系数.而在频域,用滤波子带的相干函数和子带快速傅里叶变换(FFT)频谱来表征故障信息.

本文的故障诊断方法基于现代数字信号处理技术.显著有别于已有方法的是,作者将时域中的相关分析方法应用到频域中的相干函数,通过获得频域相干函数的相关系数,不仅可以提取出参数型故障的数字特征,而且可以对多参数型故障实现定位,进而提高参数型故障的覆盖率,原理如图 2 所示.被测电路的响应经模/数(A/D)转换成为数字信号,随后经子带滤波器后成为子带序列 $x(n)$,对 $x(n)$ 计算相干函数,最后对频域中的相干函数序列进行相关分析便可实现参数型故障诊断.下文对有关概念的数学描述作一简要说明.

由维纳-辛钦公式^[30,31],对平稳信号 $x(n)$ 的自相关序列 $r_x(m)$ 施加以下运算,就成为功率谱 $P_x(f)$,

$$P_x(f) = P_x(e^{j\omega}) = \sum_{-\infty}^{+\infty} r_x(m) e^{-j\omega m}$$

对两平稳序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的互相关序列 $r_{xy}(m)$ 施加以下运算,可得到互功率谱 $P_{xy}(f)$,

$$P_{xy}(f) = P_{xy}(e^{j\omega}) = \sum_{-\infty}^{+\infty} r_{xy}(m) e^{-j\omega m}$$

有了上面的概念,就可以得到相干函数的定义:

$$C_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_x(f)P_y(f)} \quad (1)$$

相干函数 $C_{xy}(f)$ 取值在 0~1 之间,它反映了两序列功率谱之间相关的关系.

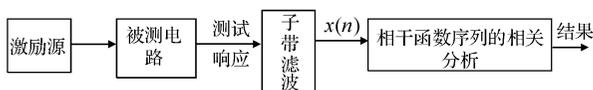


图 2 基于频域相关分析的模拟集成电路测试原理

Fig.2 Test principle of analog integrated circuits based on frequency-domain correlation analysis

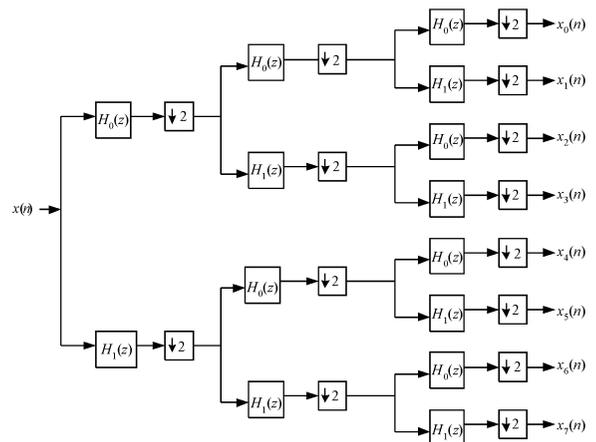


图 3 8 通道的金字塔型小波分解结构

Fig.3 8-channels wavelet decomposition with pyramid structure

对因果能量序列 $x[n]$ 和 $y[n]$, $x[n]$ 的自相关序列 $r_{xx}[l]$, $x[n]$ 和 $y[n]$ 的互相关序列 $r_{xy}[l]$, $x[n]$ 和 $y[n]$ 的相关系数 ρ_{xy} 如(2)~(4)式所示.

$$r_{xx}[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]x[n-l], l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

$$r_{xy}[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n-l], l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x[n]y[n]}{(\sum_{n=0}^{\infty} x^2[n] \sum_{n=0}^{\infty} y^2[n])^{1/2}} \quad (4)$$

相关系数 ρ_{xy} 表征了两序列之间的关联程度,其绝对值在 0~1 之间.当 $\rho_{xy} = 0$ 时,称序列 $x[n]$ 和 $y[n]$ 不相关; $\rho_{xy} = 1$ 时,序列 $x[n]$ 和 $y[n]$ 完全相同.除此外, ρ_{xy} 取值越接近 1,说明序列 $x[n]$ 和 $y[n]$ 的关联性越强; ρ_{xy} 取值越接近 0,说明序列 $x[n]$ 和 $y[n]$ 的相关性越弱.本文中用相关系数来定量描述某一故障下的输出和正常输出间的差异.

本文中所用到的正交小波滤波器组原理和实现见参考文献^[30,31].小波变换是临界抽取滤波器组的一种特殊情况,本文采用的小波滤波器组采用金字塔结构的 Haar 小波,通过 2 通道滤波器组级联,实现了 8 通道的均匀分解结构,如图 3 所示.

3 实验

实验分为三步,第一步用实例给出了已有的模拟电路测试方法^[20]在定位参数型故障方面的不足;第二步用同样的故障验证了本文提出方法对定位参数型故障的有效性;第三步验证本文方法对多个元件同时发生参数型故障的定位能力.

为了使实验结果具有可比性,实验电路采用国际标准电路^[20,32]中的状态变量滤波器(state variable fil-

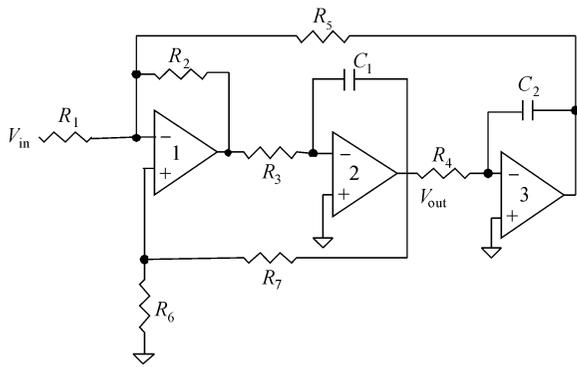


图 4 国际标准电路——状态变量滤波器

Fig. 4 International benchmark circuits—state variable filter

ter),如图 4 所示,测试激励信号的选择与文献[20]相同.器件参数: $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 1\text{k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 20\text{nF}$.两个参数型故障为:电阻 R_1 漂移 5%(下文简称 R 故障),以及电容 C_1 漂移 6%(下文简称 C 故障).

首先采用金字塔结构的 Haar 小波滤波器组实现了 8 子带滤波.由于篇幅所限,这里不能将全部 8 个子带的结果示出,而仅以正常输出和故障输出差异最小的第 1 子带,以及正常输出和故障输出差异最大的第 8 子带为例.

实验结果表明,经小波滤波器组第 1 子带滤波后,无论是在时域还是在频域,由 R_1 和 C_1 两个不同器件所引起的参数型故障下的输出达到了难以区分的程度.为了从数学上说明在第 1 子带中区分两种故障的困难,实验中计算出了无故障序列分别和 R 故障序列、C 故障序列的互相关函数序列,如图 5 所示.

由图 5,从两故障序列与无故障序列的时域相关序列来看,幅度相当,周期一致,随延时的增大而渐近一致,可见,在时域难以区分这两个故障.这个事实可以利用相关系数得到证明:R 故障输出序列与无故障输出序列的相关系数为 0.7088,C 故障输出序列与无故障输出序列的相关系数为 0.5049,两故障序列皆具有和无故障序列很强的相关性.可见在第 1 子带中,不仅不能定

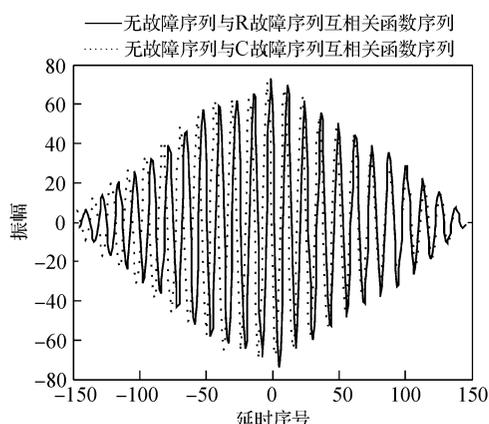


图 5 R 故障、C 故障序列分别与无故障输出的相关序列

Fig. 5 Correlation sequence of fault-free output versus R fault, C fault respectively

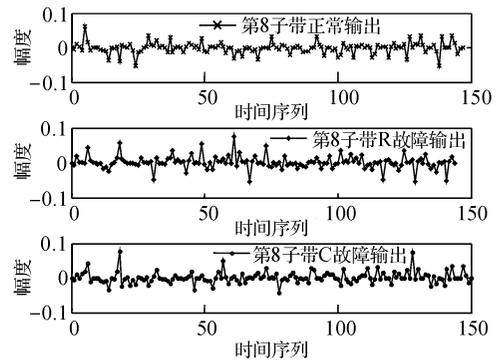


图 6 Haar 小波第 8 子带滤波后的时域波形

Fig. 6 Time domain waveforms of Haar wavelet's 8th sub-band filtering

位出 R 故障和 C 故障,而且由于 R 故障和 C 故障下的输出分别和无故障输出相似,对 R 故障和 C 故障实施故障检测皆难以实现.

经 Haar 小波滤波器组后的第 8 子带的正常输出、第 8 子带 R 故障输出和第 8 子带 C 故障输出的时域波形如图 6 所示;经 Haar 小波滤波器组后的第 8 子带的正常输出、第 8 子带 R 故障输出和第 8 子带 C 故障输出的 FFT 频谱见图 7.

由图 6 和图 7 可见,对于第 8 子带,无论是在时域和频域,R 故障与无故障输出间的差异,以及 C 故障与无故障输出间的差异皆很明显.这种明显的差异还可以借助图 8 得到进一步验证.图 8 是无故障序列分别和 R 故障序列、C 故障序列的互相关函数.由图 8 可见,根据互相关函数的数学含义,两故障序列和正常序列皆呈现出明显的差异,这说明采用文献[20]中的方法,在子带 8 中检测 R 故障和 C 故障十分有效.但在模拟集成电路测试中,仅完成故障检测是远远不够的,进一步,要查明故障输出究竟由 R 故障引起,还是 C 故障引起.经进一步计算可以得到 R 故障序列与 C 故障序列在第 8 子带中的互相关系数为 0.8333(在其他子带中此数值更大),数值接近 1,说明两故障输出的相似性明显.表明仅采用文献[20]中的方法对这两个故障可以实现故障检测,但要完成故障定位存在困难.造成区分 R 故

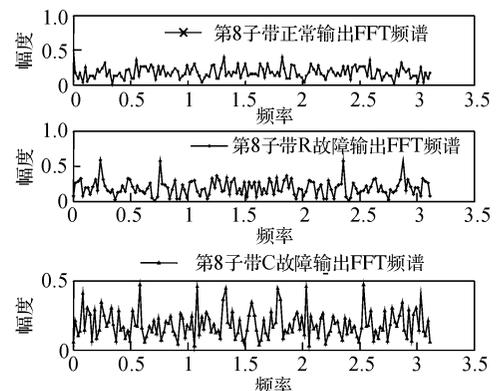


图 7 Haar 小波第 8 子带滤波后的 FFT 频谱图

Fig. 7 FFT frequency spectra of Haar wavelet's 8th sub-band filtering

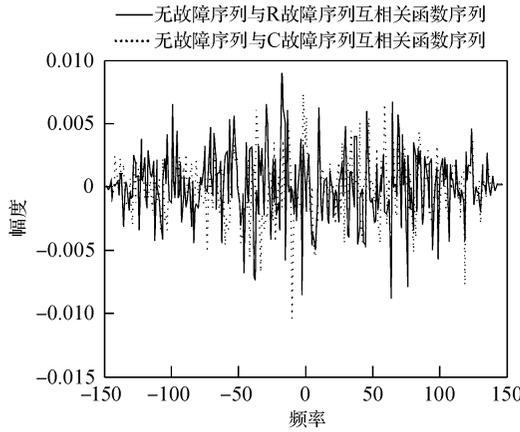


图 8 无故障序列分别与 R 故障和 C 故障序列的互相关函数序列
 Fig.8 Cross-correlation function sequences of fault-free sequence versus R fault ,C fault sequence ,respectively

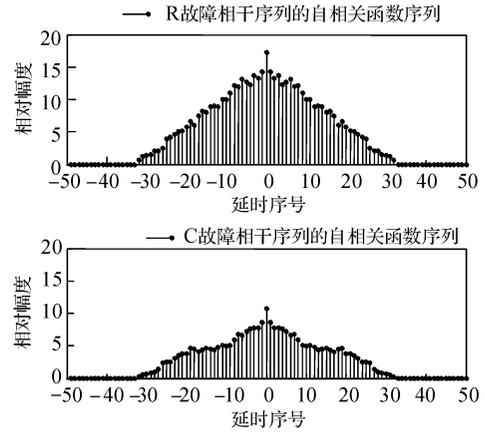


图 10 R 故障和 C 故障相干函数序列的自相关函数序列
 Fig.10 Auto-correlation function sequences of coherence function sequence for R fault and C fault

障和 C 故障困难的原因在于:R 故障和 C 故障输出具有较强的相关性、相似性.除了上面的定量分析外,这从图 6 和图 7 也可以得到定性说明.

然而,在测试中对这两个故障的定位是很必要的,下文的实验研究将证明利用本文提出的方法(见图 2)可以对这两种参数型故障作出良好的区分.

按本文所提出的思想(如图 2),借助相干函数的相关分析可以在第 8 子带中区分出 R 故障和 C 故障.

首先计算出 R 故障序列、C 故障序列分别与无故障序列的相干函数序列,如图 9 所示.

由图 9,借助相干函数,R 故障、C 故障与无故障输出的相干度差异明显.可见利用相干函数从数学上可以区分 R 故障与 C 故障.但至此还未形成故障特征量,为了实现在后续测试工作中对故障的分类识别,特别是为了实现测试自动化,有必要对故障表现提取数字特征.所以,接着对图 9 的两相干序列进行相关分析,即将时域的分析方法引入频域,求出图 9 两相干序列的自相关函数序列,如图 10 所示.

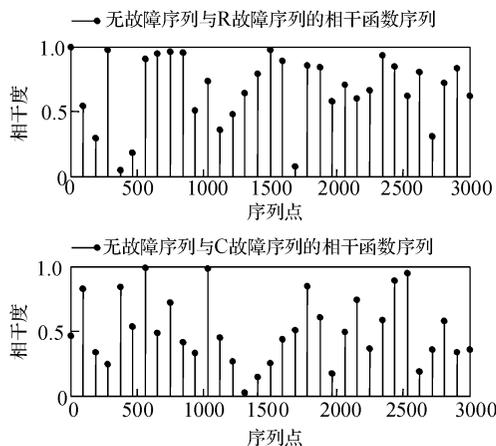


图 9 第 8 子带无故障序列与 R 故障、C 故障序列的相干函数序列
 Fig.9 Coherence function sequences of fault-free sequence versus R fault ,C fault sequence ,respectively

由图 10 可以看出,R 故障相干序列的自相关序列的包络呈三角型,C 故障相干序列的相关序列的包络呈变化缓慢的钟型,最大值点均在延时为 0 处.这里研究得出了两个数字化的故障特征量,一是相干函数自相关序列的最值,二是相干函数自相关序列的定积分值.

故障特征 1:以相干函数自相关序列的最值作为故障的数字特征.图 10 示出了 R 故障相干序列的自相关序列最大值为 17.2208,C 故障相应的值为 10.6647,两者相对差值百分比为 $(17.2208 - 10.6647) / 10.6647 = 61.5\%$,从幅度最值这个特征量,通过大量样本取值求相干序列的相关序列的最值,就可以得到两类故障的区分特征.

故障特征 2:以相干函数自相关序列的定积分值作为故障的数字特征:图 10 中 R 故障和 C 故障的相干序列的自相关序列对坐标横轴的不同延时序号的定积分值分别如图 11 和 12 所示.R 故障的定积分值为 491.7,而 C 故障在相同积分区间下的定积分值为 279.6,两者相对差值百分比为 $(491.7 - 279.6) / 279.6 = 75.9\%$,这是一个很明显的差异.

尽管 R 故障和 C 故障下的输出具有较大的相似性(互相关系数为 0.8333),导致直接区分这两种故障有困难,但借助本文提出的方法,完全可以对这两类故障

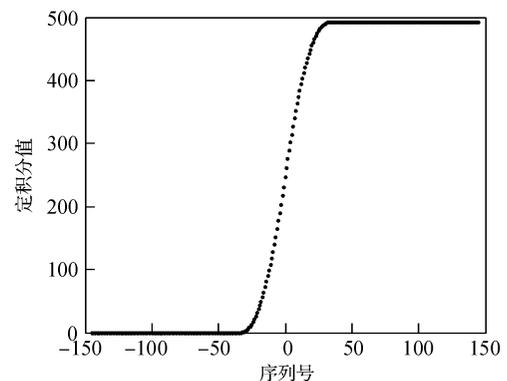


图 11 R 故障的积分曲线
 Fig.11 Integral curve of R fault

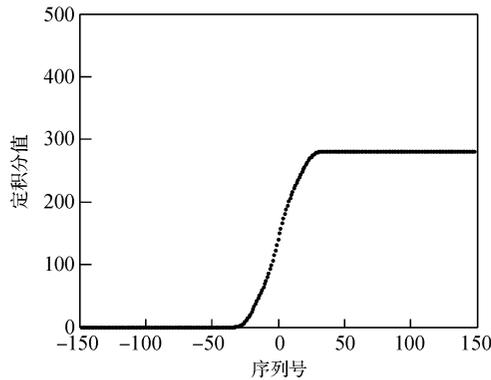


图 12 C 故障的积分曲线
Fig. 12 Integral curve of C fault

进行区分. 这种方法的优点是: 第一, 该方法借助现代数字信号处理理论, 对解决这类问题具有通用性; 第二, 该方法提取出了差异明显的数字化故障特征, 容易实现测试自动化.

以上针对国际标准电路——状态变量滤波器中的单电阻和单电容漂移的双参数型故障的一个实例, 所进行的实验证明了本文提出的功率谱相关分析方法对定位参数型故障的有效性. 然而模拟集成电路发生参数型故障的实际情况十分复杂, 既可能出现同一种类型的两个或两个以上元件的参数型故障, 如双电阻或双电容, 甚至三电阻或三电容; 也可能出现不同类型的多个元件构成的更加复杂的参数型故障组合, 如双电阻加双电容共 4 个元件发生参数漂移的情形. 为了证明本文提出的方法在上述复杂的故障模式下, 仍具有准确的参数型故障定位能力, 下文利用另一比状态变量滤波器复杂的国际标准电路——跳蛙 (Leapfrog) 滤波器^[20, 32] (见图 13), 共对 10 种多参数型故障组合进行了实验, 结果如表 1 所示. 10 种故障包括双电阻、双电容、三电阻、三电容, 以及双电阻加双电容共 4 个元件的多参数型故障.

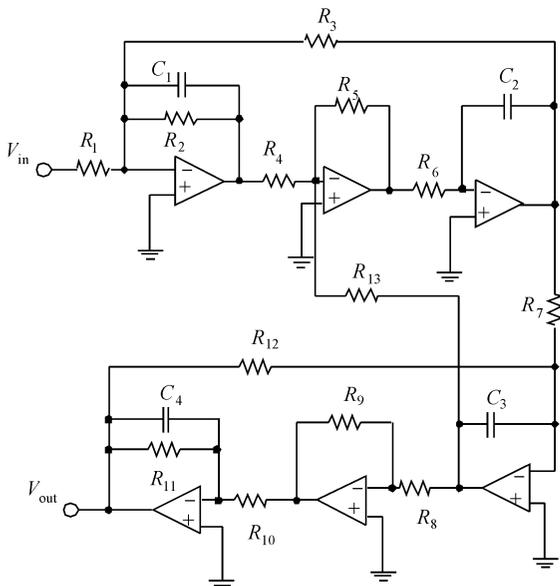


图 13 国际标准电路——跳蛙 (leapfrog) 滤波器
Fig. 13 International benchmark circuit——leapfrog filter

表 1 对跳蛙 (leapfrog) 滤波器 10 种参数型故障的实验结果

Table 1 Experimental results of 10 parametric faults in leapfrog filter

故障序号	参数型故障	小波子带	相关系数	相干函数的自相关序列定积分值
1#	$(C_1 \& C_2) + 5\%$	7#	-0.0013	389.6140
2#	$(C_1 \& C_3) + 5\%$	8#	-0.0721	583.7254
3#	$(C_2 \& C_3) + 5\%$	6#	0.0107	535.5262
4#	$(C_1 \& C_2 \& C_3) + 5\%$	7#	-0.0441	431.3105
5#	$(R_7 \& R_8) + 5\%$	8#	-0.0079	485.9794
6#	$(R_8 \& R_9) + 5\%$	8#	0.0444	365.2369
7#	$(R_7 \& R_9) + 5\%$	4#	-0.0139	660.6529
8#	$(R_7 \& R_8 \& R_9) + 5\%$	7#	-0.0249	339.4309
9#	$(R_{11} \& R_{10} \& C_1 \& C_2) + 5\%$	6#	-0.0378	264.5886
10#	$(R_{12} \& R_{13} \& C_3 \& C_4) + 5\%$	4#	0.0768	713.9460

图 13 中, 所有电阻 ($R_1 \sim R_{13}$) 阻值皆为 $10\text{k}\Omega$, 电容 $C_1 = C_4 = 0.01\mu\text{F}$, $C_2 = C_3 = 0.02\mu\text{F}$.

表 1 中, 第 1 列为故障序号, 共实验了 10 种参数型故障组合; 第 2 列为故障, 采用“(元件 1 & 元件 2 & …) + 5%”的方式, 它表示括号中的各个元件皆正漂移 5%. 1# 故障“($C_1 \& C_2$) + 5%”表示电容 C_1 和 C_2 各正漂移 5% 的双电容参数型故障, 4# 故障“($C_1 \& C_2 \& C_3$) + 5%”表示电容 C_1 , C_2 和 C_3 各正漂移 5% 的三电容参数型故障; 5# ~ 7# 为双电阻参数型故障, 8# 为三电阻故障, 9# 和 10# 分别表示双电阻和双电容的 4 元件参数漂移型故障; 表 1 的第 3 列为所使用的小波子带, 共有 8 个小波子带. 表 1 第 4 列为对应子带的相关系数, 为了提高故障定位的精度, 这里选择了相关系数最小, 即选择故障下输出和正常输出间差异最大的子带. 表 1 的第 5 列为相干函数的自相关序列的定积分值.

表 1 的实验结果再次验证了由本文给出的一种模拟集成电路测试方法: 由相关系数的计算实现故障检测, 随后由相干函数的自相关序列的定积分实现故障定位. 当然在实施故障定位时, 为了增大定位的可信度, 个别情形下可能还会以相关系数的绝对值以及取值的正负作为参考.

表 1 中, 所有相关系数值皆低于 0.1000, 由相关系数的数学含义, 这表示故障输出和正常输出间的差异明显, 在对应子带中检测故障的分辨率高.

10 个故障的相干函数的自相关序列的定积分值总体差异较明显, 依据此定积分值可以实现故障定位. 在个别情形下, 如 1# 和 4# 故障的定积分值差异不大, 似乎定位困难, 但若参考相关系数值 (1# 故障的相关系数仅为 4# 故障相关系数的 $1/34$), 仍能实现准确的故障定位.

值得一提的是, 对由双电阻加双电容共 4 个元件发生的较复杂的参数型故障, 如 9# 和 10# 故障, 由表 1 依据本文方法得到的定积分值差异反而更大, 说明故障定位的能力在此种情形下更加强健, 这是本文方法的优点之一. 9# 和 10# 故障的相干函数的自相关序列分别如图 14 和图 15 所示, 其定积分值分别见图 16 和 17, 差异很明显.

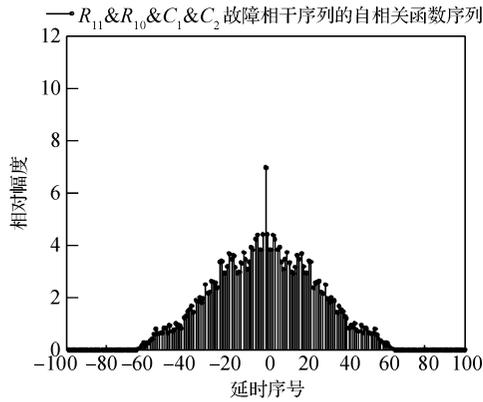


图 14 表 1 中 9# 故障相干函数的自相关序列

Fig.14 Auto-correlation sequence of coherence function for fault 9# in Table 1

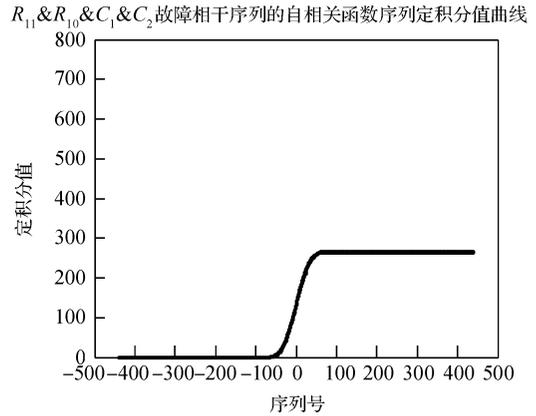


图 16 表 1 中 9# 故障相干函数的自相关序列的定积分值

Fig.16 Definite integral value of auto-correlation sequence of coherence function for fault 9# in Table 1

基于故障字典的测试前仿真(simulation before test, SBT)方法是当前模拟集成电路测试的主流测试方法^[24,26,33~35],本文提出的参数型故障定位方法与基于故障字典的 SBT 方法完全一致.故障诊断前,通过理论计算(SBT)或对无故障电路的实测得到电路的无故障特征.再对被测电路在不同故障条件下进行仿真,将按本文方法所得到的特征编入一个可按查找表组织的特征-故障字典中^[24,26,33~35],随后采用模式识别的概念进行故障识别,用实测获得的特征和事前生成的特征——故障字典完成故障诊断.本文所提出的方法为提高故障诊断的精度、增大故障分辨率和故障覆盖率以及提高测试自动化程度提供了技术途径.

4 结论

模拟集成电路的测试是国内外工程界和学术界研究的热点问题之一,对元件参数漂移及参数型故障的测试又是其中的难题,当前对这个问题的解决还很不理想,相关研究十分活跃.模拟电路本身的特性使得故障特征提取,特别是参数型故障的数字特征的提取对实

现高故障覆盖率和测试自动化至关重要.实验证明已有的方法在定位参数型故障方面存在较大局限.鉴于此,本文将时域相关分析方法引入频域,提出了定位模拟电路参数型故障的方法.该方法的基本原理是利用子带滤波的思想,选择故障分辨率最高的子带诊断故障,若仍不能定位故障,则对正常响应与实际响应相干函数序列进行相关分析,这不仅可以实现参数型故障的数字化故障特征提取,而且可以对多参数型故障定位.这种方法的优点是:第一,该方法借助现代数字信号处理理论,对解决这类问题具有通用性;第二,该方法提取出了差异明显的故障数字化特征,容易实现测试自动化.

本文的实验利用国际标准电路——状态变量滤波器和跳蛙滤波器,通过和已有典型方法的对比实验,特别实验了本文方法对由多个元件参数漂移构成的故障组合下的定位能力,验证了本文方法的有效性.本研究工作给出了模拟集成电路测试的一种技术途径:由相关系数的计算实现故障检测,随后由相干函数的自相关序列的定积分实现故障定位.

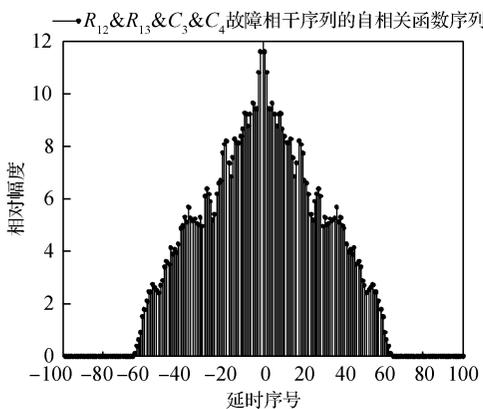


图 15 表 1 中 10# 故障相干函数的自相关序列

Fig.15 Auto-correlation sequence of coherence function for fault 10# in Table 1

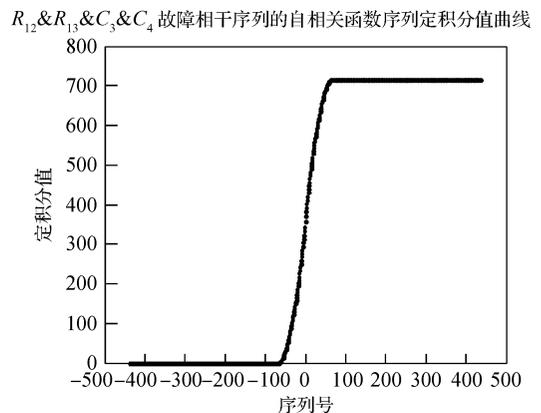


图 17 表 1 中 10# 故障相干函数的自相关序列的定积分值

Fig.17 Definite integral value of auto-correlation sequence of coherence function for fault 10# in Table 1

参考文献

- [1] Sunil R D, Jila Z, Satyendra B, et al. Testing analog and mixed-signal circuits with built-in hardware: a new approach. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(3): 840
- [2] Haralamos G D S, Yiorgos M. Nonlinear decision boundaries for testing analog circuits. *IEEE Trans Comput-Aided Des Integr Circuits Syst*, 2005, 24(11): 1760
- [3] Sun Xiubin, Chen Guangyu, Xie Yongle. Selection of test nodes for analog integration circuits. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(4): 645 (in Chinese) [孙秀斌, 陈光禹, 谢永乐. 模拟集成电路的测试节点选择. *电子与信息学报*, 2004, 26(4): 645]
- [4] Brosa A M, Figueras J. On maximizing the coverage of catastrophic and parametric faults. *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*, 2000, 16: 251
- [5] Adel A K M, Abu E Y. Selection of input stimulus for fault diagnosis of analog circuits using ARMA model. *International Journal of Electronic and Communication*, 2004, 58: 212
- [6] Varaprasad B K S V L, Patnaik L M, Jamadagni H S, et al. A new ATPG technique (Expotan) for testing analog circuits. *IEEE Trans Comput-Aided Des Integr Circuits Syst*, 2007, 26(1): 189
- [7] Zhen G, Jacob S. Coefficient-based test of parametric faults in analog circuits. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2006, 55(1): 150
- [8] Wang Peng, Yang Shiyuan. New algorithm for test node selection for analog circuits diagnosis. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(10): 1780 (in Chinese) [汪鹏, 杨士元. 模拟电路故障诊断测试节点优选新算法. *计算机学报*, 2006, 29(10): 1780]
- [9] Zou Xiaosong, Luo Xianjue. A new fault verification method based on multi-frequency sensitivity analysis for analog circuits. *Microelectronics & Computer*, 2005, 22(3): 140 (in Chinese) [邹晓松, 罗先觉. 一种基于多频灵敏度分析的模拟电路故障诊断方法. *微电子学与计算机*, 2005, 22(3): 140]
- [10] Li Feng, Shang Huiliang, Kong Qingsheng. Fault detection for linear analog IC: the method of short circuit admittance parameters. *Journal of Applied Sciences*, 2001, 19(3): 228 (in Chinese) [李锋, 商慧亮, 孔庆生. 线性模拟集成电路故障测试与诊断: 短路导纳参数法. *应用科学学报*, 2001, 19(3): 228]
- [11] Luo Zhiyong, Shi Zhongke. A fault diagnosis approach for analog circuits with support vector machines. *Computer Engineering*, 2006, 32(15): 34 (in Chinese) [罗志勇, 史忠科. 一种模拟电路的支持向量机故障诊断方法. *计算机工程*, 2006, 32(15): 34]
- [12] Cui Jiang, Wang Youren. Analog circuit faults diagnosis based on clustering preprocess and SVM. *Journal of Computer Application*, 2006, 26(8): 1977 (in Chinese) [崔江, 王友仁. 基于聚类预处理和支持向量机的模拟电路故障诊断技术. *计算机应用*, 2006, 26(8): 1977]
- [13] Wan Jiuqing, Li Xingshan, Qin shiyin, et al. Kernel-based nonlinear feature extractor and its application in electronic circuit fault diagnosis. *Proceeding of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2004, 1775
- [14] Chen Shengjian, Hong Bingrong, Wang Yuefang, et al. A new fault dictionary method enable to diagnose soft fault of tolerance analog circuits. *Chinese Journal of Electronics*, 2000, 28(2): 127 (in Chinese) [陈圣俭, 洪炳榕, 王月芳, 等. 可诊断容差模拟电路软故障的新故障字典法. *电子学报*, 2000, 28(2): 127]
- [15] Ma Hongguang, Han Chongzhao, Kong Xiangyu, et al. A fault diagnosis approach for nonlinear analog circuits based on Lyapunov exponents. *Journal of Circuits and Systems*, 2004, 9(4): 71 (in Chinese) [马红光, 韩崇昭, 孔祥玉, 等. 基于 Lyapunov 指数的非线性模拟电路故障诊断方法. *电路与系统学报*, 2004, 9(4): 71]
- [16] Zheng Zhigang, Hu Yun'an, Qi Shumin. The method of soft fault feature extraction and fault diagnosis at functional module level in analog circuit. *Modern Electronics Technology*, 2006, (10): 113 (in Chinese) [郑致刚, 胡云安, 齐树民. 模拟电路模块级软故障特征的提取与故障诊断. *现代电子技术*, 2006, (10): 113]
- [17] Zhang Yi, Wei Xueye, Jiang Haifeng. Study on the fault re-classification method in analog circuit fault diagnosis. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2006, 30(2): 53 (in Chinese) [张屹, 魏学业, 蒋海峰. 模拟电路故障诊断中故障重分类方法的研究. *北京交通大学学报*, 2006, 30(2): 53]
- [18] Peng Minfang, He Yigang. A fuzzy soft fault dictionary method for diagnosis of analog circuits with tolerance. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2005, 32(1): 25 (in Chinese) [彭敏放, 何怡刚. 容差模拟电路的模糊软故障字典法诊断. *湖南大学学报*, 2005, 32(1): 25]
- [19] Xie Yongle, Wang Cheng, Chen Guangju, et al. Fault diagnosis in analog circuits based on testability analysis & multi-frequency TPG using neural networks. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2006, 2(1): 90
- [20] Roh J, Abraham J A. Subband filtering for time and frequency analysis of mixed-signal circuit testing. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2004, 53(2): 602
- [21] Zbigniew C, Romuald Z. On fault diagnosis of analogue electronic circuits based on transformation in multi-dimensional spaces. *Measurement*, 2004, 35: 293
- [22] EI-Gamal M A, Abu EI-Y M F. A combined clustering and neural network approach for analog multiple hard fault classification. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1999, 14: 207
- [23] Abu EI-Y M F, Adel A K M. A preprocessor for analog circuit fault diagnosis based on Prony's method. *International Journal of Electronic and Communication*, 2003, 57(1): 16
- [24] Abdelhakim K, Anne D. Fault simulation for analog circuits under parameter variations. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2000, 16: 269
- [25] Swarup B, Arijit R, Kaushik R. Frequency specification testing of analog filters using wavelet transform of dynamic supply current. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2005, 21: 243
- [26] Cesare A, Marcantonio C, Ada F, et al. SBT soft fault diagnosis in analog electronic circuits: a sensitivity-based approach by randomized algorithms. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2002, 51(5): 1116
- [27] Alippi C, Catelani M, Fort A, et al. Automated selection of test frequencies for fault diagnosis in analog electronic circuits. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2005, 54(3): 1033
- [28] Brosa A M, Figueras J. Digital signature proposal for mixed-signal circuits. *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*, 2001, 17: 385
- [29] Miura Y, Kato J. Fault diagnosis of analog circuits based on adaptive test and output characteristics. *21st IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT'06)*, 2006: 410
- [30] Diniz P S R, da Silva E A B, Netto S L. *Digital Signal Processing: System Analysis and Design*. Cambridge University Press, 2002
- [31] Zhang Xianda. *Modern signal process*. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 10 (in Chinese) [张贤达. *现代信号处理*. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 10]
- [32] Kaminska B, Arabi K, Bell I, et al. Analog and mixed-signal benchmark circuits; first release. *Proceeding of the International Test Conference*, 1997: 183
- [33] Xie Yongle. A correlation analysis approach based fault diagnosis of analog VLSI circuits. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(12): 84 (in Chinese) [谢永乐. 模拟 VLSI 电路故障诊断的相关分析法. *半导体学报*, 2007, 28(12): 84]
- [34] Xie Yongle. Wavelet based filter bank methodology for testing analog very large scale integrated circuits. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(11): 1459 (in Chinese)

nese)[谢永乐. 模拟 VLSI 测试的小波滤波器组方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(11): 1459]
[35] Xie Yongle, Li Xifeng. Subband signature extraction for fault diagnosis of analog VLSI circuits. Journal of Sichuan University

(Engineering Science Edition), 2007, 39(5): 149 (in Chinese)[谢永乐, 李西峰. 模拟 VLSI 电路故障诊断的子带特征提取方法. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(5): 149]

A Method to Locate Parametric Faults in Analog Integrated Circuits*

Xie Yongle[†] and Li Xifeng

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

Abstract: Aiming at the problem of testing parametric fault in analog integrated circuits, an approach based on power spectrum correlation analysis for diagnosing parametric faults is presented. After wavelet filter-banks' filtering, the coherence function of the subband response sequence is computed. Subsequently, correlation analysis is imposed upon the power spectrum described by the coherence function sequence. As a result, not only can extracting the digital signature of the parametric fault be completed, but also the location of the parametric fault can be found. By virtue of international benchmark circuits, state variable filter, and leapfrog filter, the effectiveness of this approach with respect to locating parametric faults is validated by comparison with that in Ref. [8]. This provides a novel way to realize high fault coverage and automation of diagnosing parametric faults in analog integrated circuits.

Key words: testing of analog integrated circuits; fault diagnosis; parametric faults; fault location; coherence function

EEACC: 2570

Article ID: 0253-4177(2008)03-0598-08

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 90407007)

[†] Corresponding author. Email: xieyongle@uestc.edu.cn

Received 12 August 2007, revised manuscript received 30 October 2007