

基于频率特性测试的模拟电路 BIST 设计

谈恩民,王海超

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院,广西 桂林 541004)

摘 要: 在大规模数模混合信号集成电路中,模拟信号的测试是一个重点和难点. BIST 技术不仅能缩短测试和验证时间,而且提高了故障覆盖率,被越来越多地应用在模拟电路的测试中. 由此对传统的模拟电路 BIST 方法进行了探讨,并提出一种利用方波信号作为激励源,通过比较电路响应输出波形变化来诊断故障的模拟电路频率特性测试 BIST 方案. 该方案结构简单,易于集成,减小了测试的复杂性和代价. 仿真实验结果表明,方案能够有效检测电路容差性故障,适合模拟集成电路的内建自测试.

关键词: 模拟电路;内建自测试;频率特性;容差性故障

中图分类号: TP206

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)11-0074-05

The Analog Circuit BIST Design Based on the Frequency Characteristic Test

TAN En-min, WANG Hai-chao

(School of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In the large-scale mixed analog-digital IC, the key and difficulty is the analog test. The Built-In-Self-Test (BIST) techniques can not only shorten the time consumed on test and verification, but also improve the fault coverage. Therefore, it has been applied in the analog circuits test more and more. In this paper, the traditional analog circuit BIST methods are discussed, and a kind of analog circuit Built-In Self-Test scheme is present, in which the square signal is utilized as the drive source and the fault diagnosis is conducted through comparing the waveform changes of the circuit response outputs. Its structure is simple and easy to be integrated. And the test complexity and cost can be reduced. The simulation results indicate that the circuit tolerance fault can be detected effectively through the designed scheme. It is fit for the BIST of the analog integrated circuit.

Key words: analog circuits; Built-in Self-test; frequency characteristic; tolerance fault

1 引言

随着微电子技术和集成电路的飞速发展,芯片的集成度越来越高,传统的测试技术越来越显得捉襟见肘^[1]. 对于模拟电路的可测性设计,不像数字电路那样,具有标准的可测性设计方法,其故障诊断及测试信号选取的算法和理论研究^[2]至今未取得突破性进展. 据报道,80%的测试耗费都花在仅占芯片面积 20%的模拟电路上^[3]. 为了降低测试代价,一种可行的方法就是把部分或全部测试功能集成到集成电路内部,也就是 BIST(内建自测试),它是由电路

自己生成测试向量,并且依靠自身逻辑来判断所得到的测试结果是否正确,这样就大大降低了对测试设备的要求,有效降低测试成本^[4].

由于模拟电路被测参数多且精度要求高,其测试矢量生成及响应分析远比数字电路困难. 传统的模拟电路 BIST 方案中,测试矢量需要经过数模转换器施加到被测电路,同时输出响应也要经过模数转换器在数字芯片中分析^[5]. 该方案的缺点是测试激励生成复杂,响应分析处理困难,对数据存储单元的容量以及模数转换器的采样速率有很高的要求,并且会占用较多的额外硬件电路.

文献[5]中提出一种基于伪随机测试的数模混合电路 BIST 方法,利用伪随机序列作为测试激励,通过计算输入输出的互相关系数判别电路有无故障。

文献[6]中提出基于边界扫描的模拟电路 BIST 方案,采用脉冲信号作为测试激励,并与边界扫描结构相结合,能够检测模拟电路的一些关键性能参数。

文献[7]中提出一种基于方波信号激励的模拟电路 BIST 方案,利用系统自带的微处理器进行测试激励生成和响应分析,减小了测试电路的硬件开销。

本文参考文献[6-7],使用方波信号作为测试激励,提出一种基于模拟电路频率特性的测试,通过比较电路响应输出波形变化来诊断故障的 BIST 方案,对测试矢量频率和响应输出采样点数进行优化,建立故障字典,能有效降低测试复杂性,减小测试代价。

2 传统模拟电路 BIST 方案

BIST 作为可测试性设计的一种重要方法,其基本思想就是在进行芯片设计之初,就将测试电路集成到芯片中^[5]。这样做的优点是测试方法简单,提高了可测试性和测试速度,降低了对测试设备的要求,但会增加芯片面积,增加电路的复杂性。

传统的模拟电路 BIST,测试矢量生成器产生测试矢量,经过 D/A 转换器给出测试输入激励信号,此激励信号加载在模拟电路的输入端,根据输出响应的不同来判断故障信息。这势必要分析整个输出的波形,因此对于测试电路就需要较高的采样速率,这种测试方法响应分析复杂,会增加很多额外的硬件开销,并且会对电路的性能产生影响。传统的模拟电路 BIST 结构如图 1 所示。

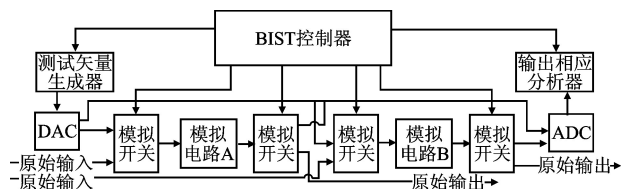


图 1 传统模拟电路 BIST 结构

3 基于模拟电路频率特性测试的 BIST 设计

3.1 测试方法的理论基础

理想的方波信号包括无穷多频率成分,是直流

信号和各种频率的正弦波和余弦波的叠加。采用方波信号作为测试激励,实际上是对被测电路同时施加了直流信号和不同频率成分的交流测试信号,这比仅仅施加单一频率的正弦波测试激励具有更宽的频谱,更能够反映出被测电路的频率特性^[7]。

一般模拟电路中包括电容和电阻等元件,当其参数超出容差范围时,视为发生参数型容差性故障。一个实际的模拟电路总可以等效为一个理想网络和一个 RC 电路的串联^[8],RC 电路代表该模拟电路的电抗性,如图 2 所示。当模拟电路的参数改变,即发生参数型容差性故障时,其电路的电抗性亦发生改变。给图 2 所示电路输入端施加固定频率与幅值的方波信号,当 RC 值变化时,其输出波形也会随之变化。模拟电路频率特性测试的原理就是让固定频率与幅值的方波信号经过被测电路,通过分析比较响应输出信号波形的变化,来判断模拟电路的参数是否超出容差范围,实现对参数型容差性故障的诊断^[6]。

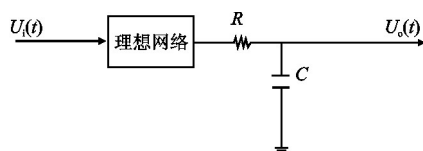


图 2 等效电路

3.2 测试方法的仿真实验

本文利用 Multisim 软件,以二阶有源低通滤波器作为验证电路,如图 3 所示,进行仿真实验。电路的特征参数分别为 $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 10 \text{ nF}$,对电路分别施加频率为 500 Hz 和 3 kHz\幅值为 3 V 的方波信号,当分别改变电路参数 R_1 和 C_1 的值时,其输出响应曲线如图 4 和图 5 所示。

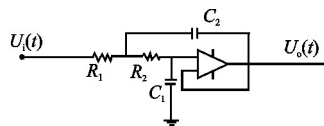


图 3 二阶有源低通滤波电路

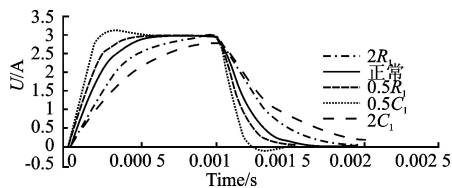
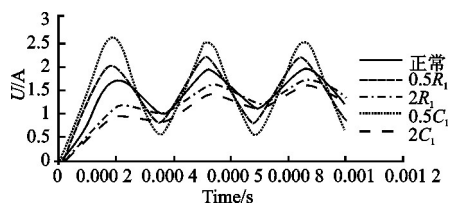


图 4 500 Hz 方波信号激励,参数 R_1 和 C_1

参数改变时的输出响应曲线

由图 4 和图 5 可看出,对被测电路施加固定频

图5 3 kHz 方波信号激励, 参数 R_1 和 C_1

参数改变时的输出响应曲线

率和幅值的方波信号, 电路的参数改变, 其输出响应波形也会改变, 因此使用方波信号作为测试激励, 通过比较被测电路响应输出曲线与无故障情况下的输出差异来判断电路有无故障的方法是可行的。

对比图 4 和图 5 发现, 对被测电路施加 500 Hz 的方波激励, 其响应输出与无故障输出的差异, 比对电路施加 3 kHz 方波激励时要小。这种情况下为了准确判断电路有无故障, 就要增加响应输出波形的采样个数, 这会增大测试功耗以及测试代价, 因此选择合适的测试矢量频率是非常重要的^[9]。

本文以二阶有源低通滤波电路为例, 根据模拟电路频率特性原理, 讨论最优测试矢量频率的选取。其幅频响应曲线如图 6 所示^[10]。

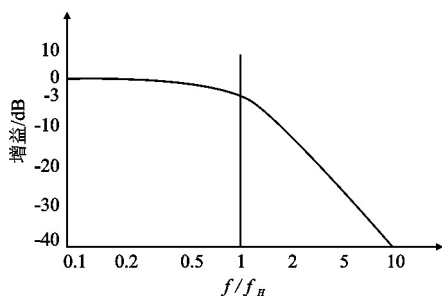


图6 二阶低通滤波电路的幅频响应曲线

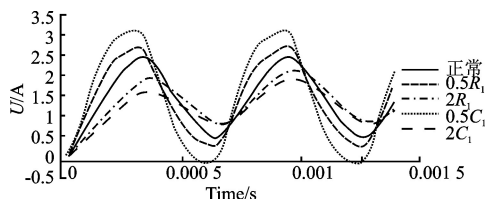
图中, f_H 为电路的截止频率, 当输入信号的频率 $f < f_H$ 时, 电路的响应输出幅值较大, 而且几乎不随信号频率变化而变化。当 $f > f_H$ 时, 电路的响应输出开始随频率的变化而发生明显变化。

当给电路施加的测试矢量频率小于电路截止频率时, 若电路的参数改变量较小, 其响应输出波形变化很小, 如图 4 所示, 不利于电路故障的检测。当测试矢量频率大于电路截止频率时, 虽然其响应输出波形变化较大, 如图 5 所示, 但是若测试矢量频率远大于电路的截止频率, 可能会出现响应输出完全被截止的情况, 这也会增加被测电路故障检测的难度, 甚至无法检测故障。

所以最佳的测试矢量频率应该为被测电路的截止频率, 本文选取验证电路的截止频率公式为

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (1)$$

求解式(1), 验证电路的截止频率为 1.6 kHz。使用频率为 1.6 kHz, 幅值为 3 V 的方波信号作为其测试矢量, 其响应输出曲线如图 7 所示。

图7 1.6 kHz 方波信号激励, 参数 R_1 和 C_1

参数改变时的输出响应曲线

比较图 4、5、7, 用 1.6 kHz 方波信号作为测试激励, 被测电路的故障输出与无故障输出差异更显著, 可以用更少的采样点检测出更多小改变量参数型容差性故障, 能够提高测试效率。

3.3 BIST 结构

本文提出的基于频率特性测试的模拟电路 BIST 结构如图 8 所示, 在被测集成电路系统中一般都会包含有微处理器 MCU 和 A/D 转换电路, 可以考虑使用被测电路中原有电路完成测试控制、测试矢量生成、数据采集以及响应分析等工作。该 BIST 结构只需要添加一些模拟开关控制被测电路正常工作或者进行测试, 不需要增加过多的额外硬件电路。图 8 中串口的作用只是为了更直观的观察 A/D 转换器采集到的响应输出数据, 并不属于测试电路部分。

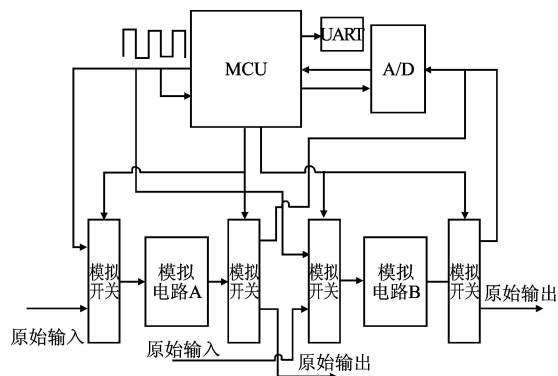


图8 基于频率特性测试的模拟电路 BIST

测试时, 微处理器 MCU 产生方波信号作为测试矢量, 并控制模拟开关将测试矢量施加到被测电路上, 同时利用测试矢量的上跳沿开启 A/D 采样, 采集一个周期的响应输出数据送入到 MCU 中处理, 与正确值进行比较, 判断被测电路有无故障。

3.4 BIST 结构的方案仿真实验

本文使用 Proteus 软件,选择 ARM7 芯片 LPC2124 作为微处理器,二阶有源低通滤波电路作为被测电路进行 BIST 方案验证.其响应输出采样数据见表 1.

ADC 采集到的电压值以二进制编码形式存储在其数据寄存器中,对这些编码值进行乘除运算才会得到实际的电压值,文中为了减小处理器的运算量,直接以这些编码值代表采样电压值大小.本文给出了故障电路与无故障电路响应输出差异表达式:

表 1 验证电路响应输出采样数据

参数变化	响应输出电压采样值										输出差异 U_{Dif}
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	
正常	001	080	187	25E	2ED	2CB	1F4	135	0B2	0D8	0000
0.8R ₁	001	091	1B3	28F	314	2D7	1DB	10F	093	0D0	0107
1.2R ₁	001	00C	0B4	1A1	25F	269	1CA	12F	0BB	0EA	033F
R ₁ 短路	023	1EC	2DD	34B	380	1B5	0C9	05D	02A	1F3	0925
R ₁ 开路	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	0ED1
0.8R ₂	001	0B1	1D0	2A0	31E	2BF	1C0	0FE	088	0E8	019E
1.2R ₂	001	05F	14B	21F	286	20B	166	0E2	0BA	160	0334
R ₂ 短路	023	1A3	2BB	33C	377	1FF	0EB	06C	032	1AB	07D2
R ₂ 开路	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	0ED1
0.8C ₁	001	0BB	1F2	2D1	350	2DA	1BA	0DE	05F	0CF	0278
1.2C ₁	001	013	0D4	1AE	259	2C2	254	1AB	11E	0C8	0381
C ₁ 短路	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	0ED1
C ₁ 开路	3A9	3A9	3A9	3A9	3A9	000	000	000	000	3A9	01470
0.8C ₂	001	089	171	228	2A8	27E	1CF	13C	0D4	10C	0169
1.2C ₂	000	014	0CC	1A4	255	272	1ED	158	0E1	0EE	0342
C ₂ 短路	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	0ED1
C ₂ 开路	00F	06A	150	1F6	26E	267	1BD	142	0E8	107	024F

$$U_{Dif} = \sum_{i=1}^N |U_i - U_{inorm}| \quad (2)$$

式中, U_i 表示待检测电路第*i*次采样的响应输出电压值, U_{inorm} 表示无故障情况下该电路第*i*次采样的输出电压值, $i=1,2,\dots,N$. N 代表一周期内采样点数.本文只考虑发生单故障的情况,设定故障阈值 U_{Thre} ,若 $U_{Dif} > U_{Thre}$,则认定电路发生故障.以验证电路为例,认定当电路中某一参数变化量超过20%,会对电路性能产生严重影响,即发生故障.假设采样误差为5%,考虑最坏的情况,可以得出故障阈值 $U_{Thre} = \max\{U_{Dif}\} \times 10\%$.根据表1数据, $U_{Thre} = 0xED$.

很明显,采样点数*N*越大,越能够反映出故障电路响应输出与无故障电路之间的差异.但是采样点数的增加会增大测试代价,所以应该在保证有足够高的故障覆盖率的情况下,尽量减小*N*的值.本

文提出确定最佳采样个数*N*的算法流程如图9所示.经过仿真,验证电路的响应输出最佳采样个数为10个.

本文根据提出的基于频率特性测试的BIST方案,建立故障字典,故障字典中的信息包括被测电路的最佳灵敏度测试矢量频率、最佳采样点数和故障阈值.以验证电路为例,建立其故障字典如表2所示.

实际测试时,通过故障字典中的信息对微处理器进行配置,使其产生频率为1.6 kHz的测试矢量,并控制ADC采样个数为10个.对采样数据进行响应分析,得到响应输出电压差异值与故障阈值进行比较,判断电路有无故障.经过仿真验证,本文提出的模拟电路BIST方案能有效检测出验证电路中所有参数的容差性故障.

表 2 二阶低通滤波电路的故障字典表

电路编号	测试矢量频率	采样点数	故障阈值	无故障电路响应输出采样数据									
				N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
0001	1.6 kHz	10	0xed	001	080	187	25e	2ed	2cb	1f4	135	0b2	0d8

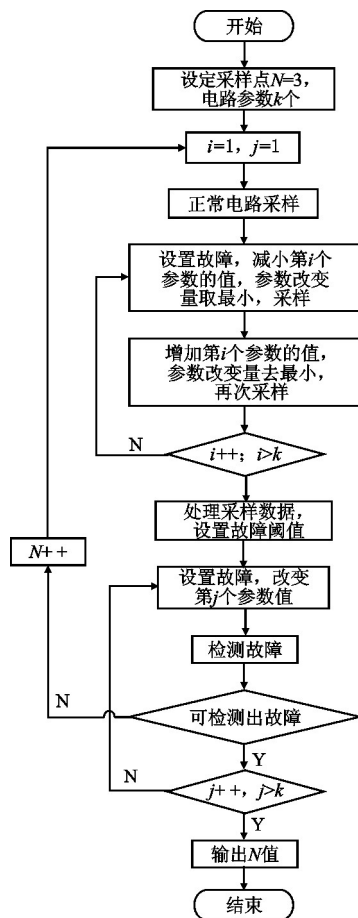


图9 确定最佳采样个数程序流程

4 结束语

本文针对传统模拟电路 BIST 方案的一些问题,提出一种利用方波信号作为测试激励,通过比较电路响应输出波形变化来诊断故障的 BIST 方案,并对测试矢量频率和响应输出采样个数等问题进行优化.方案降低了测试矢量生成和响应分析的复杂度,减小了额外硬件电路对被测电路性能的影响,能有效检测出电路的参数型容差性故障.

本文只讨论了电路发生单故障的情况,并没有将故障定位到具体元器件.对模拟电路的多故障检测和故障定位是下一步要研究的内容.

参考文献:

- [1] 王新安,吉利久. SOC 测试中 BIST 的若干思考[J]. 微电子学与计算机, 2003, 23(10): 41-44.
- [2] Duhamel P. Automatic test generation techniques for analog circuits and systems: a review[J]. IEEE Trans on Circuits Syst, 1979, 26(7): 411-439.
- [3] Stephen Sunter. Testing mixed-signal ICs using digital BIST [J]. Electronics Engineer, 1998(1): 1-3.
- [4] Lubuszewski S M, Liberali V, Countois B. Build-in-self-test approaches for analogue and mixed-signal integrated circuits[C]//IEEE MWSCAS 2003. Egypt: Cairo, 2003: 1145-1151.
- [5] 刘伟,雷加. 基于伪随机测试的模数混合信号内建自测试法[J]. 计算机工程与应用, 2008(30): 87-89.
- [6] 冯长江,薛冰,李晓峰. 基于边界扫描的模拟电路 BIT 技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2012(11): 2877-2879.
- [7] 朱敏. 电子系统内建自测试技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [8] 王武松. 电子创新设计与实践[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [9] 邹晓松,罗先觉. 模拟电路的多频灵敏度故障诊断方法[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(4): 109-112.
- [10] 华中理工大学电子学教研室,康华光. 电子技术基础[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

作者简介:

谈恩民 男, (1966-), 教授. 研究方向为计算机辅助测试和集成电路可测试性技术.

王海超 男, (1987-), 硕士研究生. 研究方向为计算机辅助测试.