

基于 IDDT 标准差和偏斜度的故障诊断方法

熊波 潘强 文申平 王小东
(海军工程大学 武汉 430033)

摘要: 以 CMOS 电路动态电流(IDDT)为研究对象,提出了一种针对 IDDT 测试信号数据的预处理方法。该方法从统计角度出发,通过计算故障电路 IDDT 的标准差和偏斜度得到故障特征。文中采用 CMOS 与非门电路进行仿真,将该方法与小波变换预处理方法进行对比,并结合概率神经网络分类方法对故障进行诊断。仿真结果证明了基于 IDDT 标准差和偏斜度预处理方法的有效性,并且结合概率神经网络对晶体管桥接故障、阻性开路故障和晶体管参数故障的故障诊断平均正确率达到 90.7%。

关键词: IDDT; 标准差; 偏斜度; 概率神经网络; CMOS 电路

中图分类号: TP206 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3040

Diagnosis method based on the standard deviation and skewness of IDDT

Xiong Bo Pan Qiang Wen Shenping Wang Xiaodong
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In this paper, the dynamic current (IDDT) of CMOS circuit is studied, and a preprocessing method for IDDT is proposed. the fault characteristics are obtained from the standard deviation and the skewness of the IDDT. This paper uses CMOS NAND gate circuit simulation, the method of wavelet transformation pretreatment methods were compared, and combined with the probabilistic neural network classification method of fault diagnosis. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method based on the IDDT standard deviation and the skewness of the method, and the average correct rate of the fault diagnosis of the transistor bridge fault, the open circuit fault and the transistor parameters is 90.7%.

Keywords: IDDT; standard deviation; skewness; probabilistic neural network; CMOS circuit

1 引言

随着微电子技术的发展和 COMS 电路的广泛应用,集成电路越来越小型化,复杂化^[1]。集成电路的故障诊断要求不断提高。传统的基于电压的测试方法对于高度集成的数字电路已显得有些力不从心。20 世纪 80 年代初人们提出了用静态电流 (IDDQ) 来测试 CMOS 电路的方法,由于 CMOS 工艺的提升,泄露水平的增加,IDDQ 可测试性不再适于 120 nm 及以下的 CMOS 集成电路^[2]。因此 20 世纪 90 年代中期人们提出了动态电流 (IDDT) 测试的概念,对电压和 IDDQ 测试起到了很好的补充。

在一个时期内 CMOS 电路正常工作时,静态电流非常小,但是存在缺陷的电路静态电流非常大,所以当检测到电路中的静态电流出现异常,即可判定电路出现了故障,这也正是 IDDQ 测试的原理。而当电路状态从触发到稳定的过程中,电路内部各点状态变化剧烈,在各点状态稳定下来之

前,由于电路中 PMOS 管和 NMOS 管可能在瞬间同时导通以及电路中电容的充放电,电源到地之间产生剧烈而复杂变化的电源电流,这个电流就是动态电流^[3]。IDDT 测试即观察这个电流变化的区别来判断电路是否存在故障。其测试原理如图 1 所示。

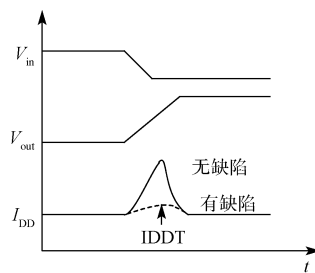


图 1 IDDT 测试原理

对于 IDDT 测试信号采用的处理方法有两类:一类是

基于积分的平均电流分析法,另一类是基于信号处理的方法,比如快速傅里叶变换和小波变换方法等^[4-6]。前者通过比较 IDDT 平均值的大小来判断是否有故障,后者通过对 IDDT 的信号采样分析来判断是否有故障。本文提出的方法是对 IDDT 信号采样,针对其波形变化特点,从统计的角度出发,通过计算其二阶统计量(即标准差)与三阶统计量(即偏斜度)的故障特征,并与小波变换方法进行对比来证明该数据预处理方法的有效性。

2 标准差、偏斜度和小波变换

2.1 标准差

设 X 是一个随机变量,如果 $E[X - E(X)]^2$ 存在,则称 $E[X - E(X)]^2$ 为 X 的方差,记为 $D(X)$,即:

$$D(X) = E[X - E(X)]^2 \quad (1)$$

而 $\sqrt{D(X)}$ 称为 X 的标准差或均方差。它刻画了随机变量的取值对其数学期望的离散程度,即用来衡量一组数据的离散程度的统计量。

2.2 偏斜度

偏斜度是表示概率密度为非正态分布的随机信号偏离正态分布的歪斜程度的度量,其定义为:

$$s = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (2)$$

式中: x 为原始数据样本; μ 是 x 的均值; σ 为 x 的标准差; $E(\cdot)$ 为数学期望。

由式(2)可以看出,偏斜度实际上是随机序列的三阶中心矩,表征的是概率密度为非正态分布的随机序列偏离正态分布的歪斜程度,其中,正偏斜度表示不对称部分的分布更趋向正值,负偏斜度表示不对称部分的分布更趋向负值。

2.3 小波变换

小波变换在时域和频域同时具有良好的局部化性质。可以对高频成分采用逐渐精细的时域或空间域取代步长,从而可以聚焦到对象的任意细节^[7-9]。小波分解就是利用函数将信号分解为得到信号高频和低频两部分。多层分解就是将高频的细节信号保留,低频的近似信号进一步分解再次得到高频和低频两部分信号。信号的小波多层次分解如图 2 所示。

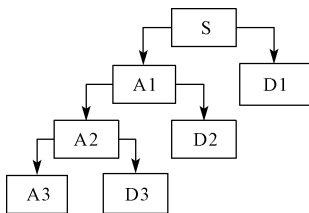


图 2 信号的小波多层次分解

其中 S 表示信号, $A1, A2, A3$ 表示信号的低频近似成份, $D1, D2, D3$ 表示信号的高频细节成份。本次实验采用 Haar 小波函数将信号分解后计算 $A1, D1, D2, D3$ 的标准

差作为电路故障特征。

3 概率神经网络的基本原理

概率神经网络是在 1989 年由 Specht 博士提出的一种神经网络,其结构简单,应用广泛。由于概率神经网络是在径向基神经网络基础上融合了密度函数估计和贝叶斯决策理论,在某些条件下,概率神经网络实现的判别边界可以非常逼近贝叶斯最佳判定面^[10]。其结构由输入层、隐含层、求和层和输出层组成,结构如图 3 所示。

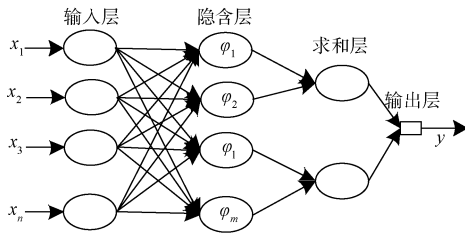


图 3 概率神经网络结构

向量 x 输入到隐含层,隐含层中第 i 类模式的第 j 神经元所确定的输入/输出关系由下式定义:

$$\phi_{ij}(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{d}{2}} \sigma^d} e^{-\frac{(x_{ij} - \mu_{ij})^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$, n 为训练样本中的总类数。 d 为样本空间数据的维数, x_{ij} 为第 i 类样本的第 j 个中心。求和层把隐含层中属于同一类的隐含神经元的输出做加权平均:

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^L \phi_{ij}}{L} \quad (4)$$

式中: v_i 表示第 i 类类别的输出, L 表示第 i 类类别的神经元个数。

输出层取求和层中最大的一个作为输出的类别:

$$y = \operatorname{argmax}(v_i) \quad (5)$$

概率神经网络由于其特点,训练容易,收敛速度快,形成的判决曲面与贝叶斯最优准则下的曲面非常接近,能达到快速准确的目的。

4 故障诊断实例

本文对基本的 CMOS 与非门电路如图 4 所示进行 PSPICE 仿真实验。由于动态电流是电路从未接通到建立稳定状态过程中产生的,本文采用了两个不同频率的正弦信号来模拟各种不同的跳变输入情况,并通过引入桥接故障、开路故障及晶体管参数故障通过标准差、偏斜度和小波变换方法分别来处理 IDDT 数据。同样采用概率神经网络进行故障诊断,证明了标准差和偏斜度数据预处理方法的有效性。

CMOS 管的桥接故障以栅极和源极的桥接为例,在 M1 的栅极和源极间分别连接 1Ω 和 10Ω 的电阻模拟桥接的故障。

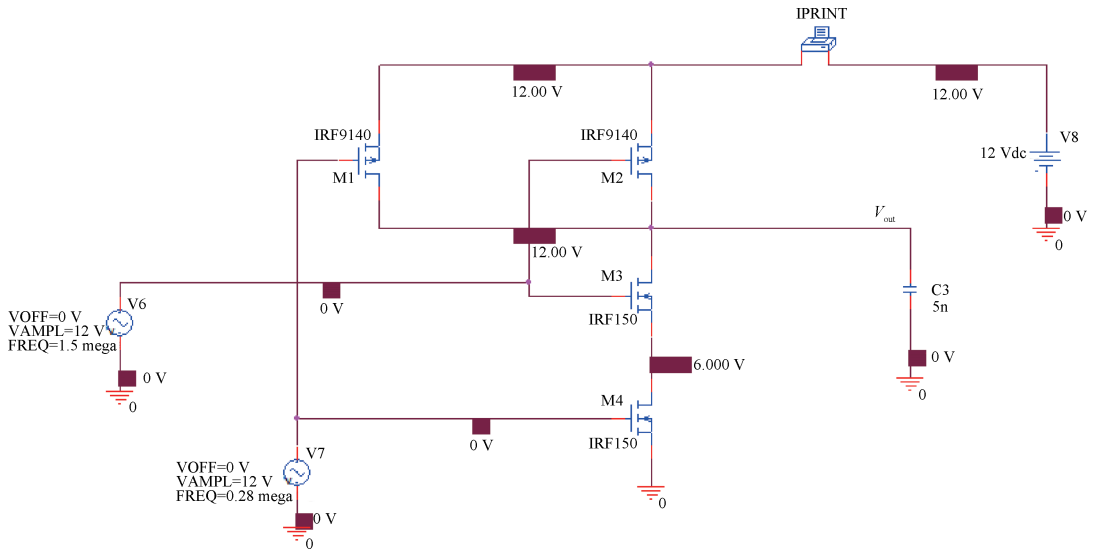


图 4 CMOS 与非门电路

其晶体管参数故障通过修改 CMOS 管的沟道宽度 W 来模拟故障。实验中将 M1 的 W 参数分别调至 10 和 50 来模拟晶体管参数故障。

开路故障在实际中,大多数情况下并不等效于信号线完全断开,可以通过再串联一个较大的电阻来模拟^[11]。所以可以在 M1 的漏极串联一个 $1\text{ M}\Omega$ 的大电阻来模拟开路故障。

仿真 $7\text{ }\mu\text{s}$ 在 PSPICE 软件中采样其输出的 I (PRINT1) 的波形数据,导入 MATLAB 处理后得到故障下其波形的标准差和偏斜度以及小波分解系数的标准差。重复上面的步骤得到 M2、M3 和 M4 开路故障状态下的标准差和偏斜度以及小波分解系数的标准差。

M1 故障状态下的标准差和偏斜度如表 1 所示,其波形信号小波分解系数的标准差如表 2 所示。

表 1 M1 故障状态下的标准差和偏斜度

特征量	M1				
	$r=1\text{ }\Omega$	$r=10\text{ }\Omega$	$W=10$	$W=50$	开路
标准差	68.331 7	16.989 9	21.461 5	23.740 7	15.388 0
偏斜度	-0.278 5	-4.119 4	-4.085 3	-3.126 7	-5.198 7

表 2 M1 桥接故障信号小波分解的标准差

标准差	M1				
	$r=1\text{ }\Omega$	$r=10\text{ }\Omega$	$W=10$	$W=50$	开路
std(A3)	8.142 5	3.065 9	7.530 7	2.824 1	6.599 3
std(D1)	0.722 6	0.713 9	0.971 5	0.667 7	0.852 6
std(D2)	1.176 5	1.155	1.611 9	1.075 1	1.459 3
std(D3)	1.385 4	1.330 6	2.649 8	1.799 6	2.605 5

考虑到实际元件的容差,分别对 CMOS 与非门电路的

8 种桥接故障状态、8 种晶体管故障状态、4 种开路故障状态和正常状态进行 50 次蒙特卡洛分析。其中 30 组作为训练样本集,20 组作为测试样本集。由于整个训练样本集和测试样本集较大,本文未列出。将样本集处理后构建概率神经网络进行故障诊断。其流程如图 5 所示,采样 IDDT 信号数据后,分别用两种方法预处理得到故障特征,建立概率神经网络模型诊断故障,输出最终结果。最终诊断结果如表 3 所示。

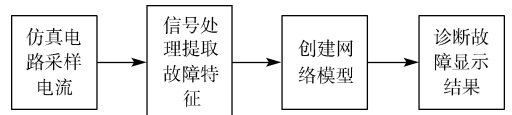


图 5 概率神经网络诊断流程

从表中可以看出采用 IDDT 标准差和偏斜度的概率神经网络诊断方法的正确率比小波概率神经网络的方法诊断的正确率要高,20 次测试中平均正确次数有 18.14 次,达到 90.7%。

5 结 论

本文采用动态电流 IDDT 的分析方法,针对 CMOS 与非门电路进行故障诊断。分别用标准差、偏斜度方法和小波变换方法分析晶体管桥接故障、阻性开路故障和晶体管参数故障三种故障状态下的 IDDT 数据,得到故障特征,再采用概率神经网络的分类方法,有效的区分各种故障状态。其中基于 IDDT 标准差和偏斜度预处理方法结合概率神经网络对三种故障状态的诊断平均正确率达到 90.7%,证明了采用标准差和偏斜度方法预处理故障电路 IDDT 数据得到故障特征的有效性。

表 3 最终诊断结果比较

故障模式	测试样本数	标准差与偏斜度方法	
		小波分解方法	正确数
正常	20	20	18
M1	$r=1$	20	20
	$r=10$	20	12
	$W=10$	20	20
	$W=50$	20	18
	开路	20	20
M2	$r=1$	20	13
	$r=10$	20	20
	$W=10$	20	14
	$W=50$	20	20
	开路	20	20
M3	$r=1$	20	20
	$r=10$	20	20
	$W=10$	20	18
	$W=50$	20	18
	开路	20	20
M4	$r=1$	20	20
	$r=10$	20	20
	$W=10$	20	12
	$W=50$	20	14
	开路	20	18
平均值	20	18.14	18.09

参考文献

- [1] 金撼尘. 微电子技术发展的新领域[J]. 电子世界, 2014, 18(9):5-6.
- [2] 贾静. 生生不息——我国集成电路测试的自主创新

之路[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12):1-3.

- [3] 潘强, 王怀龙, 杨超. 基于 IDDT 和 SVM 的混合电路故障诊断探究[J]. 电子测试, 2013, 24(21): 113-118.
- [4] 方玉龙, 吕洪善. 利用小波分析的电流测试方法实现模数混合电路的故障诊断[J]. 常州工学院学报, 2013, 6(1):33-36.
- [5] 余长庚, 雷加. 基于小波-神经网络的数字电路 I_L (DDT)故障诊断[J]. 计算机工程与应用, 2010, 36(1):211-214.
- [6] 谢暄. 基于动态电流信息的集成电路测试研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009:100.
- [7] 苏志金, 许建华, 韩民. 基于小波变换的 MPSK 短信号符号率估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2):140-144.
- [8] 梁利平, 徐科军, 许伟. 基于静态 Haar 小波变换的电磁流量传感器非平稳浆液流量信号分离方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11):2626-2633.
- [9] 王佳宁. 常用时频变换方法的浅析与比较[J]. 科技创新导报, 2011(27):112.
- [10] 裴峻峰, 毕昆磊, 吕苗荣, 等. 基于多特征参数和概率神经网络的滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国机械工程, 2014, 24(15):2055-2058.
- [11] 贾其燕. 数字电路 IDDT 测试生成及故障诊断技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009:59.

作者简介

熊波, 硕士研究生, 主要研究方向电路系统综合测试与故障诊断。

E-mail: doctorbbx@126.com

潘强, 硕士, 副教授, 主要研究方向为弱信号检测、集成测试和电子技术教学工作。