

复杂电子装备故障模式及影响分析方法研究

袁心成¹ 杨智明² 俞洋² 彭喜元² 彭宇² 刘旺² 张世平²

(1. 北京航天自动控制研究所 北京 100854; 2. 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系 哈尔滨 150001)

摘要: 本文针对复杂电子装备故障诊断实用化过程中存在的故障模式缺乏问题,提出了针对电路不同层次结构的故障模式分析方法。该方法将电路划分为器件层、电路层和系统层3个层次,对于器件层故障模式分析,采用硬件加速应力实验分析其失效模式;对于电路级和系统级故障模式分析,设计并开发了通用型电子装备边界特性测试系统,该系统能够对各类电子设备进行极限边界特性测试,并可获得设备超边界后的故障模式及相应的检测方法。利用本文提出的故障模式分析方法,能够对电子系统各个层次的故障模式进行全面的获取和分析,从而为故障诊断方法实用化进程奠定基础。

关键词: 复杂电子装备;故障模式分析;加速应力试验;边界测试

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Failure mode and effect analysis method for complex electronics system

Yuan Xincheng¹ Yang Zhiming² Yu Yang² Peng Xiyuan² Peng Yu² Liu Wang² Zhang Shiping²

(1. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;

2. Department of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The practical application of fault diagnosis method is limited because of the lack of accurate failure mode analysis, and in order to solve this problem, a hierarchical analysis framework for failure mode and effect analysis (FMEA) is proposed in this paper. This method divides the FMEA analysis into three levels: the device level, the board level and system level. As to the device level, accelerated stress test method is proposed to analyze the temporal deterministic effect. As to the board level and system level FMEA, a limit test platform is developed. The specification boundary for electronics system can be acquired using this platform, as well as the test method and fault mode. Using the method proposed in this paper, the failure mode of whole electronic system can be acquired, and provide practical application basis for fault diagnosis.

Keywords: complex electronic system; fault mode analysis; accelerated stress test; limit test

1 引言

进入二十一世纪以来,随着计算机和微电子技术的不断发展,导弹、卫星、雷达、载人航天器等大型装备的功能逐渐完善,其内部结构日益复杂,自动化程度不断提高。而在现代大型系统中,电子系统往往占据着核心地位,在装备中占有较大的比重。目前,电子技术的发展呈现以下趋势:一是电子装备不断向小型化、轻量化、集成化和低功耗方向发展;二是对地高分辨率卫星、雷达及第3代光电探测器的探测距离、分辨率等性能达新水平;三是计算机运算速度已达 10^{15} 次/s,软件支持信息系统和武器功能的能力全面提高;四是通信系统传输速率达到GB/s以上;五是导航系统定位精度等性能达到新水平,作战平台的导航能力和武器制

导能力提升。以上技术发展趋势使武器系统中电子装备的功能日益强大,复杂程度不断提高。

先进而复杂的电子系统在提高武器系统作战效能的同时,其故障占全系统故障比例也越来越高,对系统性能影响越来越突出。因此,对电子系统及时有效的故障诊断和维护是保证大型系统安全、可靠运行的关键。然而,由于大型系统内部不仅同一设备的不同部分之间互相关联,紧密结合,而且不同设备之间也存在着紧密的联系,在运行过程中形成一个整体。在这类系统中,导致故障的各种因素相互交杂,时刻影响着系统的安全运行。往往一个传感器、一个ASIC芯片或系统本身的微小故障,甚至一些偶然因素影响就会导致整个系统性能恶化,造成难以估计的后果。因此,研究先进的故障诊断方法,提高其运行安全性和可靠性,对

避免由于故障引起的重大人员伤亡和财产损失具有重大的现实意义。

目前,常用的故障诊断方法包括基于信号处理的方法^[1-2]、基于模型的方法^[3-4]以及基于数据驱动的方法^[5-6],这些方法原理不同,适用范围也不同。然而,以上方法的工程实用化推广都离不开被诊断电子系统故障模式分析,因为只有准确地获取电子设备故障模式,分析其在电子设备中产生、传播和影响的规律,才能有针对性地选择不同的故障诊断方法,解决电子系统故障检测、定位以及重组等问题。然而,同机械系统和化工系统故障模式分析技术相比,电子系统的故障模式以及故障传播特性的研究还处于相对滞后状态,这主要是由于以下原因:1)电子装备故障模式多样;2)装备故障具有层次性、相关性、综合性特点;3)装备故障涉及光、机、电等多种信号。这些原因都造成电子系统故障模式分析困难,而无法有效地获取电子系统故障模式信息,无法获得准确地退化模型,无法准确地分析故障产生、传递、推演的规律,是制约电子装备故障诊断技术发展的重要瓶颈,也是电子装备故障诊断技术严重滞后于机械系统故障诊断技术的首要原因。

因此,本文针对电子系统故障模式分析方法展开研究,按照电子系统实际组成特点,将其故障模式分析划分为器件级、电路级和系统级3个层次,分别使用不同的方法分析其故障表征以及对系统的影响,从而为故障诊断方法的验证和工程实用化推广奠定坚实的基础。

2 电子装备器件级故障模式分析方法

器件是组成电子电路和系统的最基本元素,而由于器件问题所引起故障在电子设备全系统故障中占有非常高的比例。例如,2008年在关岛发生的美军B-2飞机坠毁事件,事后定位的原因之一便是由于飞控系统电子元件由于受到潮湿环境的影响而引发的全系统故障。因此本文首先针对电子装备中器件级故障模式进行分析。

目前,器件在工作中发生的故障主要可分两个类型:

1)时间确定性可靠性效应。大规模集成电路在使用过程中,随着时间的推移而发生的性能退化现象^[7]。该类故障现象属于可预测的时间确定性故障,即可利用数学模型定量的加以描述,这类故障的典型代表包括:负偏置温度不稳定度现象^[8](negative biased temperature instability,简称NBTI效应),热载流子注入效应^[9](hot carrier injection,简称HCI效应),时间相关的介质击穿效应(time-dependent dielectric breakdown,TDDB)等类型。

2)时间随机性可靠性效应。电子设备在外界环境的影响下会出现一些随机性故障,例如受到振动、冲击、潮热、电磁辐射等因素的影响,出现固高、固低、桥接、单粒子翻转等故障现象,这类故障具有突发特性,出现的时间具有随机分布的特性,属于不可预测的故障类型。对于该类故障,一般采用硬件故障注入的方法来分析其失效模式^[10]。本文重

点介绍基于加速应力实验的电子产品退化机理分析和失效模式分析方法。

2.1 超大规模集成电路退化机理

电子器件退化效应是时间确定性可靠性效应的典型代表,其属于可预测的失效模式,即对器件特性的影响可以利用闭环的数学公式加以描述,能够建立器件特性随时间变化的函数关系。对于这些退化效应,本文采用加速应力实验的方法,加速器件退化进程,观察其关键外部特性随时间变化的趋势,并分析其对电子系统所造成的影响。

研究表明,对于超大规模集成电路,其基本组成单元晶体管的各类退化效应是影响到电路长期工作可靠性的最主要因素,常见退化效应的基本故障机理如图1所示。

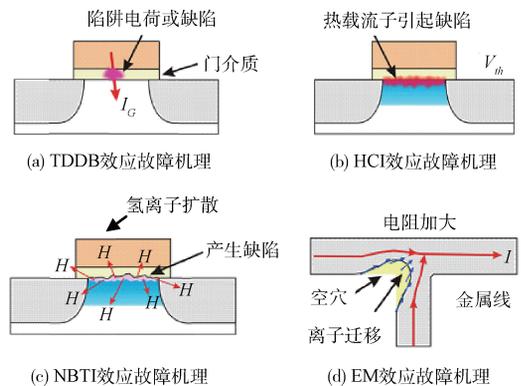


图1 超大规模集成电路常见退化效应

2.2 基于加速应力试验的集成电路退化机理分析

对于上节中论述的各类集成电路退化现象,本文采用加速应力试验的方式,考察其对于器件特性造成的影响,其原理框图如图2所示。

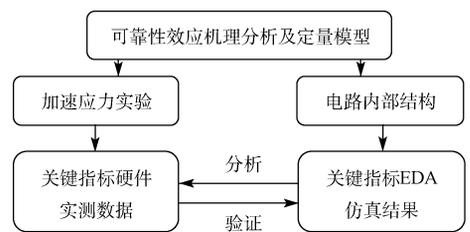


图2 基于加速应力试验的集成电路退化效应分析原理框图

如图2所示,首先根据待分析可靠性效应的数学模型,指导进行加速应力测试具体的实验设置参数;然后根据设置的参数,对于集成电路进行加速应力实验,加速其退化的过程,并且在器件退化到一定时间后(例如100天),测试其关键的硬件技术指标;除硬件加速应力实验外,对于给定电路内部结构,采用EDA软件仿真的方式,加入退化效应模型,并分析其对电路特性造成的影响;以上两种方式互为依托,硬件加速应力实验的测试结果可以作为软件EDA仿真测试结果的验证方式,而软件EDA仿真的测试结果又可以

辅助帮助分析硬件测试结果,共同完成电子器件在不同退化效应下的故障模式分析。下面以 NBTI 效应对于静态 RAM 芯片造成长时间退化效应影响分析方法为例,来说明该故障模式分析方法的使用过程。如前所述,NBTI 退化效应分为应力阶段和恢复阶段两个阶段,式(1)和式(2)分别为两个阶段晶体管门限电压变化公式:

$$\text{应力阶段: } \Delta V_{th} = (K_v \sqrt{t-t_0} + \sqrt{2n\Delta V_{th0}})^{2n} \quad (1)$$

$$\text{恢复阶段: } \Delta V_{th} = V_{th0} \left(1 - \frac{2\xi_1 t_e + \sqrt{\xi_2 C(t-t_0)}}{2t_{ox} + \sqrt{C}} \right) \quad (2)$$

根据应力阶段和恢复阶段的闭环退化公式,可以选择集成电路工作温度(T),工作电压(V_{DD}),以及电路输入信号的概率分布特性作为施加应力的条件,然后对于给定的 SRAM 电路,施加相应的应力,促使电路加速退化,当退化到一定程度后,启动外部仪器进行测试,对于延迟、功耗、抗噪声能力等特性进行测试,判断电路退化情况。

此外,如图 3 所示为 SRAM 电路内部基本结构,可以在 Synopsys HSPICE 等工具中注入 NBTI 等效效应,并通过电路仿真的结果,验证并分析硬件加速应力试验的测试结果,最终,可以得到 SRAM 电路的长时间退化失效模型。

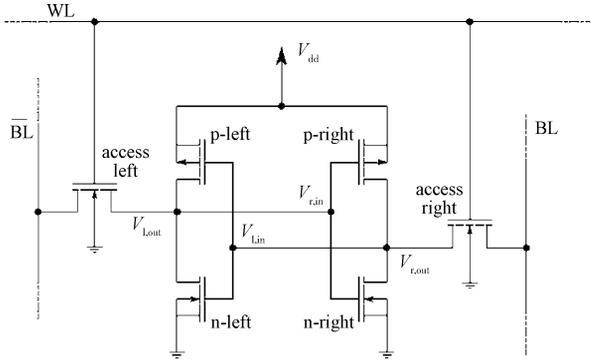


图 3 静态存储器 SRAM 电路内部结构

以上分析过程还可进一步推广到各类 FPGA 器件、FLASH 存储器件,以及各种类型的集成电路中,从而建立完整的器件失效退化模型,并获取其在装备全寿命周期中各类失效模式以及具体的检测方法。

3 电子装备电路和系统级故障模式分析方法

电子系统自底至顶可以划分为器件层,电路层和系统层三个层次,通过上面的分析,可以建立电子设备器件级故障模式分析方法,以此为基础,下面介绍电路级和系统级故障模式分析方法。

本文主要采用硬件物理实验的方式,获取电子设备在各种环境下的电路级和系统级故障模式。为了方便进行分析,本文搭建了通用型的电子设备边界特性测试系统,该测试系统可以实现以下几个功能:

1) 获得电子系统在各种环境下的电气边界;该系统可以为被测试系统提供几乎是任意的输入信号组合(1 kV 以上的高压信号,ns 级的高频信号等),能够考察电子系统在振动、冲击、温湿度、电磁辐射等不同环境下的电气边界特性,为系统可靠性提供依据;

2) 设备超电气边界后故障模式和检测方法。电子系统电气边界是其能够承受的最大电特性参数,而研究表明,电子设备出现故障的主要原因,除设备自身由于时间推移造成的性能退化所引起的故障外,另外一个重要原因是当电子系统工作在各种不同环境下,受到外部环境和噪声影响时,其电气特性可能会工作在允许的电气边界附近,甚至超过电气边界,进而造成设备出现故障。因此,边界测试系统还能够考察电子系统超边界后,其具体的故障模式及表现,进而还可以提供相对应的检测方法,从而为故障诊断提供验证手段和设计依据。

基于以上目标,本文以某型号弹上机上的控制组合电路为对象,设计了以 PXI 总线仪器和网络化仪器为核心的电气特性边界测试系统,该系统涵盖被测试电路类型如表 1 所示。

表 1 电子系统边界测试项目

序号	电路类型	边界测试项目
1	电磁继电器电路	启动电压,关断电压,直流耐压,尖峰耐压,直流负载,感性负载;
2	固态继电器类电路	波形畸变过冲扰动,带载能力,直流耐压,尖峰耐压;
3	串行通信类电路	输出波形幅度,输出波形扰动,上升/下降时间,过零稳定性,耐共模电压测试,波特率容限测试;
4	数字量输入类电路	启动电压,关断电压,耐压测试,滤波特性;
5	模拟量输入类电路	偏移误差,动态非线性误差,满刻度误差,输入带宽测试,正向/反向耐压测试;
6	模拟量输出类电路	零点偏移,幅度平坦度测试,动态非线性误差,输出精度测试,摆率测试,带负载能力;
7	电磁继电器电路	启动电压,关断电压,直流耐压,尖峰耐压,直流负载,感性负载;

边界测试系统以 PXI 总线仪器为核心,配以各种其它类型的高性能仪器,完成边界测试任务,其仪器列表如表 2 所示。

表2 标准化仪器选型列表

模块名称	模块型号	厂家
台式示波器	7104B	Agilent
程控电压源 1	N8757A	Agilent
程控电压源 2	N8762	Agilent
电子负载	6063B	Agilent
1553B 分析仪	AT15030	珠海矽微有限公司
校准源	5500A	福禄克公司
PXI 标准机箱	PXI-1045	美国国家仪器公司

如图4所示为测试系统组成框图,测试系统以PXI总线仪器为设备核心,配以1553B总线分析仪、高精度校准源、电子负载等设备组成。

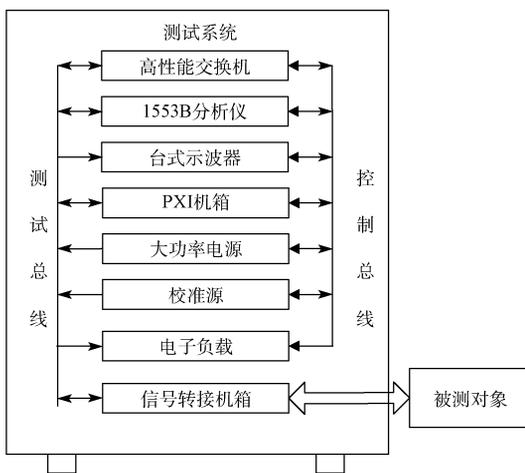


图4 边界测试系统组成框图

目前,边界特性测试系统已经开发完成,实现了对于各种类型电路和系统的边界测试,并且获取了被测电子系统超过电气边界之后故障表现,从而为系统故障诊断方法的研究工作提供了充分的验证手段和设计依据。

4 结 论

目前故障诊断技术在理论研究方面虽然取得一定进展,但真正在工程实践中成功应用的实例还较少,特别是真正实用的电子设备故障诊断系统目前还非常少,其中一个重要的原因是电子系统故障模式分析不够充分,对于故障在系统中产生、传播、影响的规律尚不完全清楚,这些原因制约了故障诊断技术的实用化推广。针对以上问题,本文提出了面向电子系统器件级、电路级和系统级故障模式的分层分析方法,研究成果对于故障诊断实用化具有积极的意义。后续还将继续利用文中提出的方法对于各类集成器

件、电路焊接,连接等故障模式,以及电子设备在各类环境下的故障模式进行更为深入的剖析和研究,为各种故障诊断方法的验证和评估提供设计基础。

参考文献

- [1] 蔡涛,段善旭,康勇. 电力电子系统故障诊断技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2008,45(509): 1-5.
- [2] 龙英,何怡刚,张镇,等. 基于信息熵和 Haar 小波变换的开关电流电路故障诊断新方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 701-711.
- [3] 高东,吴重光,张贝克,等. 基于 PCA 和 SDG 的传感器故障诊断方法研究及应用[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(3): 567-573.
- [4] 马翔楠,徐正国,王文海,等. 模拟电路性能退化型故障诊断方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 32-37.
- [5] 高坤,何怡刚,薄祥雷,等. 共空间模式和超限学习机的模拟电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 126-132.
- [6] 谈恩民,何正岭. 模拟电路故障重叠诊断方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 33-36.
- [7] CHEN Y, ZHOU J, TEDJA S, et al. Stress-induced MOSFET mismatch for analog circuits [C]// Integrated Reliability Workshop Final Report, 2001. 2001 IEEE International. IEEE, 2001: 41-43.
- [8] POLISHCHUK I, YEO Y C, LU Q, et al. Hot-carrier reliability of p-MOSFET with ultra-thin silicon nitride gate dielectric [C]//Reliability Physics Symposium, 2001. Proceedings. 39th Annual. 2001 IEEE International. IEEE, 2001: 425-430.
- [9] AGARWAL M, BALAKRISHNAN V, BHUYAN A, et al. Optimized circuit failure prediction for aging: practicality and promise[C]//Proceedings of International Test Conference, Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2008: 1-10.
- [10] ZHANG ZH B, WANG ZH L, GU X L, et al. Physical-defect modeling and optimization for fault-insertion test[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2012, 20(4): 723-736.

作者简介

杨智明(通讯作者),1979年出生,哈尔滨工业大学自动化测试与控制系副教授,工学博士,主要研究方向为自动测试技术、智能故障诊断、电路退化机理分析等。

E-mail: yzmhit@163.com