

# 边界扫描测试在数字电路自动测试系统中的研究与应用

曹子剑, 余美玲

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

**摘要:** 边界扫描测试是当前数字电路模块故障隔离的主要手段, 但测试能力受到模块可测试性设计限制, 其它方面作用也被忽略。文中对数字电路自动测试系统设计提出了边界扫描测试应用技术, 包括系统自检测试, 模块功能测试和模块故障隔离; 在系统自检测试中应用边界扫描, 提高了设备自检故障隔离精度; 而对于模块功能测试, 边界扫描测试技术提供了一种新的选择; 在故障隔离中扩展和延伸应用边界扫描技术, 突破了模块自身测试性的限制, 提高了边界扫描测试的故障覆盖率和故障隔离精度; 通过实际测试验证表明, 该设计方法稳定可靠, 同时提升了测试系统自身和模块的测试能力和隔离精度。

**关键词:** 边界扫描; 故障隔离; 自动测试系统; 功能测试

## Research and Application of Boundary—Scan Test in Digital Circuit Automatic Test Equipment System

Cao Zijian, She Meiling

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** Boundary—scan test is a main method for fault isolation of digital circuit modules. But it is restricted by the design for test of modules, and ignored on other sides for itself capability. The article puts forward a set of methods to design the digital circuit ATE system for Boundary—scan test, including self test for system, function test for modules and fault isolation for modules. Boundary—scan could enhance the precision for fault isolation for being applied in the self test for system. It is a new selection for module function test. And it would break the restriction of design for test of modules, and improve the fault coverage and the precision for fault isolation by the design of extensibility for boundary—scan. Through the carried out experiments, the design methods is stable and reliable, and it enhances both ATE system and the module test ability and the precision for isolation.

**Keywords:** boundary—scan; fault isolation; automatic test equipment; function test

## 0 引言

超大规模集成电路、表面贴装等新技术带来诸多测试难题, 边界扫描测试技术随之应运而生<sup>[1]</sup>, 在数字电路自动测试系统设计时, 将边界扫描作为数字电路模块故障检测的主要手段。但当前数字电路板基于边界扫描的可测试性设计并不理想, 数字模块设计时更倾向于功能实现, 测试性要求得不到足够的重视, 另外整板元器件在选型时, 也做不到均支持边界扫描测试, 并非所有芯片支持该标准。所以当运用边界扫描测试时, 故障覆盖率不高, 测试能力不足的问题显现出来。其实边界扫描测试的能力并没有完全开发出来, 边界扫描技术具有良好的可扩展性。本文从数字电路测试系统设计入手介绍了边界扫描测试技术的应用, 包括系统自检测试、模块功能测试和模块故障隔离, 分别对边界扫描测试技术进行了扩展和延伸, 能够有效地解决系统设计中的各个问题。

## 1 边界扫描测试原理

边界扫描测试, 即 JTAG 测试, 是一种基于 IEEE1149.1 标准制定的检测逻辑结构。它是在数字芯片内部增设控制寄存器<sup>[2-3]</sup>, 如指令寄存器、旁路寄存器及 TAP 控制器等; 在 I/O 管脚上增设边界扫描单元, 这些边界扫描单元串联在一起, 形成边界扫描测试通道, 即边界扫描链, 控制寄存器用于进行指令解码、工作方式分配和控制数据串在边界扫描链中的动作。扫描单元就像虚拟探针一样, 可以根据控制寄存器的指令, 在 I/O 管脚上完成信号的采集和发送。边界扫描器件如图 1 所示, 即支持 IEEE1149.1 标准的芯片, 当前的主流 DSP、FPGA、CPLD 等芯片均支持该标准。非边界扫描器件则不支持 IEEE1149.1 标准。在实际测试应用中主要针对数字电路板进行边界扫描测试, 具体测试内容包括: 链路测试, 互连测试, 存储器测试, FLASH 芯片测试以及自定义测试等。链路测试是对边界扫描链的测试验证, 是进行其它边界扫描测试的前提条件, 只有链路测试正常, 才能进行其它测试。互连测试是对数字电路板中边界扫描器件所覆盖的所有芯片进行整板连通性验证, 是边界扫描测试中应用最普遍的测试, 不仅能够验证边界扫描器件, 也能够验证非边界扫描器件<sup>[4]</sup>。存储器测试和 FLASH 芯片测试是有一定条件限制的, 对满足条件的芯片可

收稿日期: 2015-04-30; 修回日期: 2015-05-28。

**作者简介:** 曹子剑(1979-), 男, 吉林农安人, 工学硕士, 工程师, 主要从事边界扫描测试技术及数字电路模块自动测试技术理论与应用方向的研究。

进行读写验证。自定义测试主要是指对某些特定的管脚进行测试验证，排除故障隔离中的疑难问题。

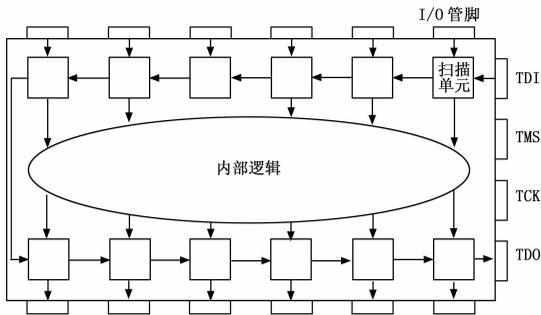


图 1 边界扫描器件示意图

## 2 基于边界扫描测试系统构建

### 2.1 系统组成

本文以某型雷达系统中的数字电路模块为被测模块 (UUT)，包括标准总线的数字电路模块和非标准总线的数字电路模块。基于边界扫描的测试系统要求具备边界扫描测试能力和故障隔离能力。测试系统由计算机、标准总线测试插箱、程控电源、UUT、适配器、边界扫描测试设备、PXI 机箱、数字 I/O 模块、扫描开关模块、示波器、信号源、自检适配盒、边界扫描专用测试板、网线等组成，如图 2 所示。

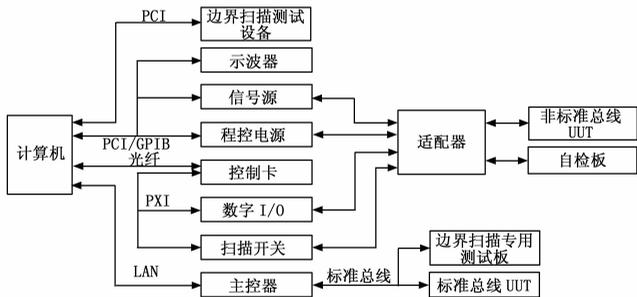


图 2 测试系统组成框图

计算机是测试系统的显示控制中心，通过程序控制测试资源发送测试激励，回收测试响应<sup>[5]</sup>，经过软件分析和处理得出测试结论。测试资源包括边界扫描测试设备、示波器、信号源、数字 I/O 模块、扫描开关模块以及程控电源等。边界扫描测试设备是用于边界扫描测试的硬件设备，是连接系统软件和 UUT 的桥梁，将软件生成的测试激励序列转换为实际电平信号发送给 UUT，并回收测试响应反馈给软件系统分析处理。标准总线插箱用于标准总线数字模块的测试，适配器用于非标准总线数字模块的测试。

### 2.2 硬件设计

测试系统中需要自主设计的硬件包括适配器、自检测试模块和边界扫描专用测试模块。适配器用于非标准总线数字电路的测试，提供多路数字 I/O、扫描开关以及直流电源等信号。完成系统测试资源和 UUT 之间的信号转接。具体实现方法是：在适配器中设计专用背板，测试资源信号通过电缆连接到专用背板，汇聚所有测试资源信号，对外提供统一接口，每个 UUT 块根据自己的测试需求设计专用适配盒，实现背板接口

和 UUT 接口之间的信号匹配。

自检测试模块用于数字 I/O 通道和扫描开关通道信号测试。以往系统自检模块设计时，简单的将数字 I/O 通道信号两两对接，利用数字 I/O 信号回路方式完成自检，故障定位到双通道，不能直接定位到故障通道。在本系统中设计了基于边界扫描的自检测试模块，采用支持 IEEE1149.1 标准的 FPGA 芯片，提供多路 I/O 信号，连接适配器提供的数字 I/O 信号和扫描开关通道信号，形成测试通路。系统设备自检时，执行边界扫描测试，故障定位可到某个具体通道。

边界扫描专用测试板用于标准总线模块的故障隔离，针对 UUT 外部接口连接器边缘的大量非边界扫描器件，通过设计外围边界扫描链的方式进行边界扫描测试。设计要求能够提供满足所有 UUT 测试需求的 I/O 通道；匹配接口电平信号；采用与 UUT 相同的连接器对接。硬件设计并不复杂，选用普通 FPGA 芯片实现，主要是利用其边界扫描功能。

### 2.3 软件组成及设计

测试系统软件可分三部分：软件平台、TPS、边界扫描测试系统软件。软件平台运行于主控计算机，是实现 UUT 故障检测的软件操作平台。其主要功能包括 UUT 测试，设备管理，系统维护，数据库管理，用户管理和在线帮助。TPS 是被测模块的测试程序集，在软件平台下开发和运行，包括 UUT 的各种指标测试、故障检测和故障定位。TPS 与 UUT 一一对应，和软件平台相互独立，便于更新和移植。

边界扫描测试软件由两部分组成：测试系统软件和测试工程软件。测试系统软件是指软件按 IEEE1149.1 标准设计，能够根据 UUT 的电路拓扑结构信息如网表文件，以及边界扫描器件的 BSDL 文件，生成边界扫描测试所需要的测试数据，支持边界扫描链路测试、互连测试、存储器测试等各项测试的软件系统。该类产品目前国内外都有成熟的货架产品，本系统中使用的是 ASSET 公司的 SCANWORKS 软件。系统稳定，提供 API 接口，支持用户二次开发调用，支持边界扫描各项测试，并提供 MACRO 测试功能，用于用户自定义测试。测试工程软件是指按照 UUT 逻辑电路特征开发的边界扫描测试软件，实现 UUT 的各项边界扫描测试。每个 UUT 对应一个测试工程，基于 SCANWORKS 软件开发，并运行于 SCANWORKS 系统环境中。

## 3 测试应用

### 3.1 系统自检

测试系统提供大量的数字 I/O 资源和扫描开关资源，通常存在通道开路、短路和固定电平故障，而边界扫描对于电路连通性的检测具有独特优势，可以利用边界扫描对这部分资源完成检测。测试原理框图如图 3 所示，主要使用边界扫描互连测试和 MACRO 测试实现。互连测试是对数字电路中边界扫描器件所覆盖的逻辑电路连通性验证，通过自检模块的 FPGA 芯片可执行互连测试。在互连测试中采用经典的“走步 0”算法和“1”算法，能够准确快捷的完成故障检测和故障定位。互连测试能够验证测试资源的短路故障和固定电平故障，而对于开路故障，在当前逻辑电路中测试数据序列无法形成回路，不能覆盖，增加 MACRO 测试进行补偿。MACRO 测试是自定义的边界扫描测试，通过编写 MACRO 测试程序，控制 FPGA 芯片管脚上的扫描单元，完成测试矢量数据发送和接收。

MACRO 程序语法比较简单, 主要利用边界扫描的两个控制指令: SAMPLE 和 EXTEST。SAMPLE 指令控制扫描单元完成数据采集; EXTEST 指令控制扫描单元完成数据发送。MACRO 测试需要使用系统中数字 I/O 资源联合测试, 边界扫描发送测试数据, 数字 I/O 采集输出响应数据; 或数字 I/O 发送测试数据, 边界扫描采集输出响应数据。通过实际采集数据与期望数据的比较和分析, 完成故障检测和故障定位。

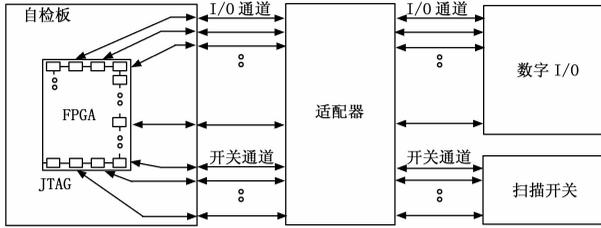


图 3 自检测试框图

### 3.2 功能测试

在板级测试系统中, 功能测试是指被测模块的逻辑功能验证。通过测试资源生成测试需要的控制信号和数据信号, 送入 UUT 并采集 UUT 的输出, 与期望输出信号比较得出测试结论。但对一些复杂数字电路这种方法难以实现。尤其是含 DSP、FPGA 等芯片的数字模块, 通常具有独立时钟, 对控制输入和数据输入具有严格同步要求, 测试资源很难在速率和信号同步上实现完全匹配。这种情况下, 一般有两种方法可以解决: 专用设备测试和在线程序测试。专用设备测试是根据 UUT 的测试需求, 开发专门的测试设备模块, 测试效果很好, 但代价高, 难以达到通用化要求。在线程序测试是开发专门的测试程序, 通过仿真器对 DSP 和 FPGA 等芯片使用在线加载的方法来完成模块测试。该方法相对实用, 但 DSP 和 FPGA 等芯片的种类繁多, 对于测试人员来说全部掌握这些芯片的可编程技术具有很高的难度。

边界扫描极少用于功能测试, 多数边界扫描芯片不支持内建自测试, 对 DSP 和 FPGA 等芯片的内部逻辑无法验证, 但是对于一些非边界扫描器件可以实现逻辑功能验证。当前复杂数字电路板设计基本是模块化实现的, 整个电路板根据不同功能拆分成多个子模块, 如图 4 所示, 可对满足边界扫描测试条件的子模块分别进行边界扫描测试。子模块可划分为两大类: 内部资源子模块和对外接口子模块。内部资源子模块以存储器和缓冲或驱动芯片为主, 存储器测试需要建模, 边界扫描根据模型对其进行读写测试, 缓冲或驱动芯片在物理上位于两个扫描芯片之间, 测试同样需要建模, 边界扫描完成芯片端口输入输出信号测试。对外接口子模块类型丰富, 可以细分为具体的各种对外接口, 如数据总线、地址总线、控制信号、差分输入、差分输出等, 包含的非边界扫描芯片品种较多。可采用 MACRO 测试结合数字 I/O 资源的方法, 只是在边界扫描和数字 I/O 之间多了一级中间器件。这部分测试主要是对子模块的逻辑功能验证, 不需要对非边界扫描器件单独建模。边界扫描虽然不能覆盖电路板的所有子模块测试, 但对功能测试提供了一种新的选择, 甚至可取代部分在线测试方法。

### 3.3 故障隔离

目前复杂数字电路板的故障隔离基本以边界扫描测试技术为主。复杂数字电路板集成度高, 封装复杂, 焊点不可见, 测

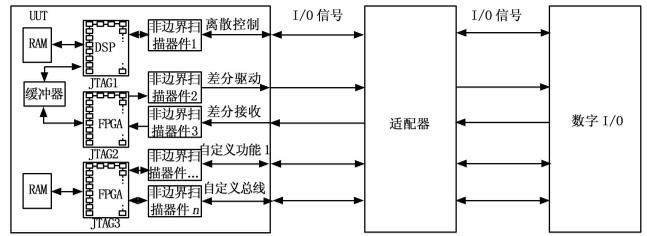


图 4 功能测试框图

试点少, 难以使用传统探针测试方式独立完成隔离。这类电路板基本支持边界扫描测试。但边界扫描并不能覆盖整板芯片, 尤其是 PCB 对外接口部分的非边界扫描芯片, 表贴封装为主, 管脚密集, 一直是故障隔离中的难点。对于这种情况可以对边界扫描测试技术进行扩展使用。标准总线电路板采用边界扫描专用测试板的方法, 非标准总线电路板采用 MACRO 测试结合数字 I/O 的联合测试方法。

标准总线电路板在专用测试插箱中测试, 边界扫描专用测试板是相当于 UUT 的后出线板, 与 UUT 在插箱中通过背板实现信号对接。如图 5 所示, 前后两个模块同时执行边界扫描测试, UUT 外部接口部分芯片则完全被边界扫描覆盖。两个模块的边界扫描需要生成相同测试矢量, 同步执行测试, 否则无法达到数据同步, 测试能力不足。网表融合技术能够有效地解决测试数据同步问题。边界扫描测试软件以 UUT 网表文件和边界扫描芯片 BSDL 文件为依据生成测试矢量, 如果两个模块网表合二为一, 软件系统默认认为是同一个模块, 按同一个模块生成测试矢量, 多条链路可同步执行测试。网表融合有多种途径, 采用专业软件合成简单可靠。

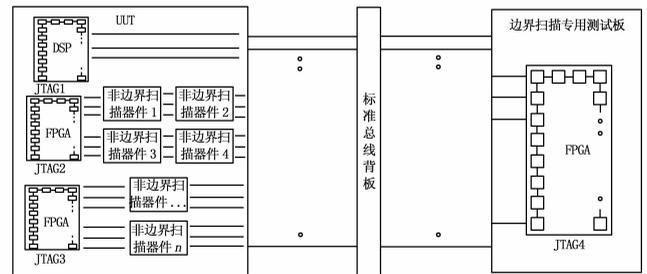


图 5 边界扫描扩展故障隔离测试框图

非标准总线电路板在适配器中测试, 对 PCB 外部接口部分芯片的故障隔离, 可采用 MACRO 测试结合数字 I/O 方式完成故障检测和故障定位。MACRO 程控发送或接收测试数据, 数字 I/O 接收或发送测试数据, 实际采集的结果数据与期望数据在软件平台系统中经过比较和分析, 得出测试结论。边界扫描测试过程中不需要对被测芯片建模, 测试结果处理时软件上需要对测试数据以芯片和管脚为单位加以区分, 这样故障隔离更精确, 可至具体网络和管脚。

## 4 结果分析

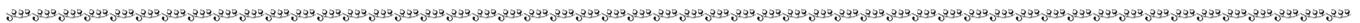
在数字电路自动测试系统中, 应用边界扫描测试技术分别对系统自检、UUT 功能测试和 UUT 故障隔离加以验证, 验证情况如表 1 所示。

通过对工厂周围的空气进行监测, 便于执法部门进行取证, 对排污企业进行有效的管理, 也可以向公众发布空气质量变化情况, 引导人们进行科学的户外锻炼和出行。

参考文献:

[1] 莫莉, 余新晓, 赵阳, 等. 北京市区域城市化程度与颗粒物污染的相关性分析 [J]. 生态环境学报, 2014, 23 (5): 806-811.  
 [2] 韩建彪, 张志红, 童国强, 等. 太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 对哮喘患者炎症因子的影响 [J]. 环境与健康杂志, 2014, 31 (3): 229-231.  
 [3] 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 等. 重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 [J]. 环境科学, 2014, 35 (3): 820-829.  
 [4] 齐晓艳, 周刚, 王卫峰, 等. 河南省医疗卫生机构室内 PM<sub>2.5</sub> 浓度监测 [J]. 郑州大学学报 (医学版), 2013 (6): 825-828.  
 [5] 王琪, 孙巍, 张新宇. 北京地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分布及其与气象条件影响关系分析 [J]. 计算机与应用化学, 2014, 31 (10): 1193-1196.  
 [6] 傅丽芳, 徐诗阳, 敖长林, 等. 基于覆盖模型的 pm<sub>2.5</sub> 监测站点

布局优化方法研究 [J]. 数学的实践与认识, 2014 (10): 208-215.  
 [7] 朱军, 向腾辉, 张小美, 等. 基于 ZigBee 技术的大气 PM<sub>2.5</sub> 监测系统设计 [J]. 测控技术, 2013, 32 (11): 10-13.  
 [8] 梁艳, 张增福, 陈文亮, 等. 基于  $\beta$  射线法的新型 PM<sub>2.5</sub> 自动监测系统研究 [J]. 传感技术学报, 2014, 27 (10): 1418-1422.  
 [9] 马天成, 刘大铭, 李雪洁, 等. 基于改进型 PSO 的模糊神经网络 PM<sub>2.5</sub> 浓度预测 [J]. 计算机工程与设计, 2014, 35 (9): 3258-3262.  
 [10] 杨永杰, 张裕胜, 杨赛程, 等. 一种 PM<sub>2.5</sub> 检测传感器设计 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (3): 76-78, 81.  
 [11] 赵鑫, 潘晋孝, 刘宾, 等. 基于  $\beta$  射线吸收法的 PM<sub>2.5</sub> 测量技术的研究 [J]. 电子技术应用, 2013, 39 (9): 74-76.  
 [12] 沈霖, 陈能. 基于 WebGIS 的 PM<sub>2.5</sub> 及空气质量信息的发布与共享 [J]. 测绘通报, 2012 (S1): 772-772.  
 [13] 李丽辉, 傅琪扬. 基于分布式无线传感网络的城市空气质量监测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (3): 706-708.



(上接第 2313 页)

表 1 测试验证统计表

序号	测试类型	测试对象	制造故障类型	检测结果	测试报告内容
1	系统自检	测试系统	数字 I/O 通道开路、短路	FAILED	报告具体通道故障
2	系统自检	测试系统	扫描开关通道开路	FAILED	报告具体通道故障
3	功能测试	非标准总线模块	开路、短路、固定电平	FAILED	报告子模块功能故障
4	功能测试	标准总线模块	开路、短路、固定电平	FAILED	报告子模块功能故障
5	故障隔离	非标准总线模块	开路、短路、固定电平	FAILED	报告具体网络故障及网络下相关管脚
6	故障隔离	标准总线模块	开路、短路、固定电平	FAILED	报告具体网络故障及网络下相关管脚

自检测试实际上包括仪表自检和设备自检, 仪表一般自带自检程序, 设备自检是指适配器的测试资源自检。在数字 I/O 通道上分别制造短路故障和开路故障, 在扫描开关通道上制造开路故障。短路故障在互连测试中报出具体通道可能存在短路故障, 开路故障在 MACRO 测试中报出具体通道故障, 故障隔离精确。

功能测试中所造故障是针对 UUT 的多个功能子模块而言的, 采用了两种方式同时进行功能测试: 在线加载测试程序和 MACRO 测试。两种测试方法均能准确报出该项子功能测试失败, 存在故障。该验证表明边界扫描同样可以用于功能测试验证。

故障隔离验证对 UUT 外部接口部分芯片制造的故障。对于标准总线模块, 互连测试中报出具体网络可能存在故障, 并报告故障网络下所有相关管脚。对于非标准总线模块, MACRO 测试可报出具体通道可能存在故障, 并报告故障通道下所有相关管脚, 故障隔离精确。

5 结束语

本文提出的边界扫描测试应用技术, 适用于数字电路自动测试系统设计, 包括系统自检、UUT 功能测试和 UUT 故障隔离。通过简单实用的硬件设计以及结合传统测试资源数字

I/O 的使用, 扩展和延伸使用了边界扫描测试技术, 为测试系统自检提供了新方法和手段; 使 UUT 功能测试有了新的选择; 解决了 UUT 对外接口部分非边界扫描器件的故障隔离难题。实际验证表明, 测试方法稳定可靠, 故障隔离精确, 能够解决系统自检、UUT 功能测试和 UUT 故障隔离的等问题。该技术已经在数字电路自动测试系统中应用和推广, 能够有效地解决测试系统和被测模块测试过程中遇到的实际问题, 已成为数字电路测试系统设计的重要方法和措施, 具有重要的实用价值。

参考文献:

[1] 王燕. 边界扫描技术在 VLSI 电路设计中的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (10): 1307-1309.  
 [2] IEEE Std 1149.1-1990, IEEE Standard Test Access Port and Boundary Scan Architecture [S].  
 [3] Kenneth P. Parker. The Boundary-Scan Handbook (Third Edition) [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.  
 [4] 张文广, 周绍磊, 李新. 边界扫描技术及其在 PCB 可测性设计中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (6): 713-715.  
 [5] 杜舒明. 数字电路板故障诊断的一种实用方法 [J]. 现代雷达, 1996, 18 (6): 12-20.