

## 边界扫描测试技术发展综述

刘九洲, 王健

(中国人民解放军93325部队, 沈阳 110141)

**摘要:** 随着大规模和超大规模集成电路的应用越来越广泛, 迫切需要提出新的测试方法。边界扫描测试技术解决了数字电路, 特别是超大规模集成电路的测试问题, 受到了人们越来越多的关注。概述了边界扫描测试技术的基本原理, 对边界扫描测试技术应用比较广泛的几个标准内容进行了对比和总结; 在测试算法方面, 阐述了当前国内外应用比较广泛的一些算法及其优缺点; 在应用领域方面, 分析了国内外取得的主要应用成果; 最后, 在总结当前研究现状的基础上, 预测了未来在新标准的研究、远程测试技术、测试方法集成等5个方面的发展趋势, 为国内同行业了解边界扫描技术的现状与未来发展提供借鉴。

**关键词:** 边界扫描; 大规模集成电路; 电路测试技术; 综述

**中图分类号:** V271.4; TN407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)02-0046-04

## A Survey on Development of Boundary Scan Technology

LIU Jiuzhou, WANG Jian

(No. 93325 Unit of PLA, Shenyang 110141, China)

**Abstract:** As the application of Large Scale Integrated (LSI) circuits and Very Large Scale Integrated (VLSI) circuits, the new test method is needed for circuit testing. Boundary scan technology can solve the problem, especially for VLSI circuit testing. The principle of boundary scan is summarized. The standards of boundary scan are overviewed. Some widely used testing algorithms and their advantages and disadvantages are described. The main achievements on the application of boundary scan are analyzed. In the end, the development trends of new standard research, remote testing, and testing method etc. are predicted, which may provide a reference for one to understand the present and future of the boundary scan technology.

**Key words:** boundary scan; large scale integrated circuit; circuit testing technology; survey

### 0 引言

测试是任何电子系统、电路板、集成电路生产和维修过程中的一个重要环节。如今的数字电子系统, 大量采用 PGA、BGA、SMT 等高度封装器件, 使得 PCB 上各器件之间的连线间距越来越细密。用传统的线路检测设备(In Circuit Test, ICT)和针床测试需要付出很高的代价, 有时甚至不可能解决这些问题<sup>[1-2]</sup>。

联合测试行动组(JTAG)于1987年提出了一种新型的电路板可测性设计方法: 边界扫描测试技术。1988年, IEEE和JTAG组织达成协议, 共同开发边界扫描测试架构, 并于1990年形成了IEEE 1149.1标准, 也称为JTAG标准, 同时提出了规范化描述边界扫

描结构语言的建议<sup>[3-4]</sup>。至此, 边界扫描测试技术受到了人们越来越多的关注。

### 1 边界扫描测试基本原理

边界扫描技术是通过在芯片的每个信号引脚和芯片内部逻辑电路之间, 插入边界扫描单元(Boundary Scan Cell, BSC)实现的。BSC像一个虚拟的物理探头, 触及了芯片的内部状态, 这些电路单元不影响电路的正常工作<sup>[5]</sup>。

边界扫描的基本思想是在器件内部靠近内核电路的部分输入/输出(I/O)管脚处增加移位寄存器单元和锁存器单元, 在测试期间, 这些寄存器单元用于控制输入管脚的状态, 施加测试激励, 并读出输出管脚的状态, 取回测试响应, 寄存器单元实现类似“虚拟探针”的功能。如图1所示, 线缆之间的互连关系可以看成边界扫描器件之间的连接关系, 进行互连测试(EXTEST)即可实现网络之间的故障诊断<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2012-10-17 修回日期: 2012-11-16

作者简介: 刘九洲(1962—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 高工, 研究方向为雷达装备保障、自动测试技术等。

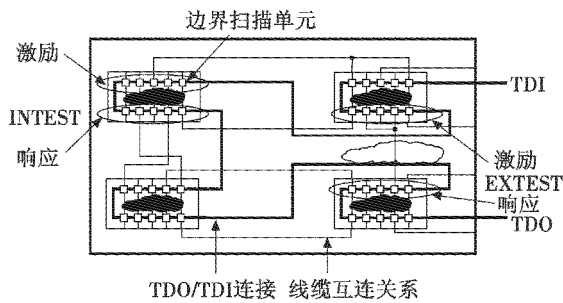


图1 边界扫描测试基本思想

Fig.1 The basic thought of boundary scan test

## 2 边界扫描测试标准研究现状

自从1990年IEEE Std 1149.1标准问世以来,IEEE组织一直致力于对该标准的修订和完善<sup>[7]</sup>。

在对IEEE 1149.1标准进行修订的同时,边界扫描的思想还扩展到其他测试领域。IEEE 1149.1标准只支持电路板级的测试要求,不能满足系统级的测试需求,1995年发布的关于模块测试及维护总线协议的IEEE 1149.5标准<sup>[8]</sup>,为系统级的边界扫描测试提供了解决方法,但由于系统级测试的复杂性及系统级故障诊断的困难,对该标准的实际应用目前尚在研究之中。

1999年发布的IEEE 1149.4标准<sup>[9]</sup>则在IEEE 1149.1的基础上增加了模拟电路测试功能,该标准使边界扫描测试技术能够实现模拟电路和混合电路的互连测试、参数测试和内测试。该标准目前已在AC参数测试和AC互连测试中得到一些应用,系统级的应用比较少见。

IEEE 1149.6边界扫描测试标准<sup>[10]</sup>是IEEE-SA标准委员会于2003年3月通过并公布的一种标准的高级数字网络边界扫描测试标准。制定标准的目的是为了给IC的可测试性电路提供设计指南,这些电路是在IEEE 1149.1标准确定的可测试性配置基础上加入的。当这些IC包含差分信号,具有交流耦合时,可以方便地以更高的故障覆盖率对其进行板级和系统级测试。

最新的边界扫描标准IEEE 1149.7于2010年被IEEE发布<sup>[11]</sup>。IEEE 1149.7是一种全新的双引脚测试与调试接口标准,可将IEEE 1149.1技术的引脚数量减半,使设计人员能够轻松测试并调试具有复杂数字电路、多个CPU以及应用软件的产品,已经被应用到系统级的测试中,如移动与手持通信设备等<sup>[12]</sup>。IEEE 1149.7是已使用20多年、获得广泛普及的IEEE 1149.1(JTAG)标准的配套扩展和延伸。该款作为连接嵌入式系统端口的新型标准,满足系统开发过程中器件制造、测试以及软件开发等需求。

在模拟电路测试方面,文献[13]在IEEE标准的

边界扫描描述语言(BSDL)基础上提出了模拟电路边界扫描描述语言(ABSBL),这是一种专门针对模拟电路的BSDL语言。针对电源和地引脚的测试,IEEE标准中一直没有明确规范。文献[14]首先提出了将电源和地作为边界扫描测试标准的一部分,并对硬件结构做出了简要论证,使边界扫描技术对电源与地引脚的测试成为一种可能。

各个阶段边界扫描标准的发展历程如表1所示。

表1 边界扫描标准发展历程

Table 1 The development of boundary scan standard

标准	发布时间	主要内容
IEEE 1149.1	1990	定义了一种标准的边界扫描结构及其测试接口。
IEEE 1149.5	1995	发展为模块测试和维护总线标准。总线采用背板总线连接方式,具有良好的可扩展性,支持寻址的子模块多达250个,而且具有较强的容错能力,同时定义了一些命令和内部寄存器来帮助实现普通测试和维护任务。
IEEE 1149.4	1999	测试总线能使板上所有支持该结构的芯片与板外的模拟激励信号源和对激励作出响应的信号采集系统相连。向被测的系统级芯片提供了连接模拟激励与响应的路径。
IEEE 1149.6	2003	为IC的可测试性电路提供设计指南,当这些IC包含差分信号,具有交流耦合时,可以方便地以更高的故障覆盖率对其进行板级和系统级测试。
IEEE 1149.7	2010	可将IEEE 1149.1技术的引脚数量减半,使设计人员能够轻松测试并调试具有复杂数字电路、多个CPU以及应用软件的产品。

我国学者对标准的研究较少,不再详述。

## 3 边界扫描测试技术取得的主要成果

关于边界扫描测试技术的研究,可以归纳为两个方面:边界扫描互连测试算法研究和边界扫描技术应用领域。

### 3.1 互连测试算法研究方面

算法研究方面,国内外均提出了很多测试向量生成算法。

国外方面,1974年,文献[15]中的二进制计数算法(CSA),首次提出了检测 $N$ 个线网的故障测试算法,开辟了互连测试算法研究的先河;但是,二进制算法存在严重的混迭和混淆症候,无法测试呆滞型故障。1982年,文献[16]提出了改进二进制计数算法(MCSA),使其具有了测试呆滞型故障的能力,但由于混迭和混淆问题,不能精确定位故障。之后比较有影响力的是1987年文献[17]中提出的计数补偿算法,其中增加了互补的测试矢量集,提高了故障的区分能力,

目前,该算法也是 Asset 公司 ScanWorks 软件的主要测试算法,但该算法在定位精度方面仍然有待提升。1992 年,文献[18]中在不降低诊断能力的条件下,对测试矢量进行了压缩,针对 3 种测试需求提出 3 种优化测试矢量生成算法,但需要首先对测试需求进行分析。2007 年,文献[19]中提出了在进行系统级测试时加窗的走“1”算法,对  $N$  个网络分成  $M$  组分别测试,加窗后,减少了测试向量的总数,紧凑性有所提升,而窗口的数量与被测网络的数量,实际上也是一种相互权衡的关系。2010 年,文献[20]在 MCSA 算法的基础上,提出将不同线网的相同测试矢量不予考虑的方法,避开了混淆症候。

国内方面,算法研究比较多。文献[21]提出了同时具备 W-O 和 W-A 的对角独立性多故障生成算法,用递归的方式生成同时具备抗“线与”和“线或”短路的测试矩阵,且测试向量是“走步”算法的一半,增加了算法的紧凑性。为了提高抗误判能力,文献[22]提出边界扫描测试优化算法,对比了 4 种测试算法,证明遗传算法是相对最优算法,能生成具有抗征兆误判能力且紧凑性较好的测试向量。为了降低算法复杂度,文献[23]提出了一种改进互连测试抗误判算法,通过递归得到测试向量集,证明了紧凑性和完备性指标较好,在软件算法上简单实用。为了提高算法的紧凑性,文献[24]提出两种基于反向测试的自适应算法,对单入多出和多人单出的线网,有效地减少了并行测试向量的数量。为了减少混淆症候,文献[25]提出了改进的等权值抗混淆算法,通过在每个串行测试向量后增加不同标志补充测试向量的方法提高了抗混淆能力。

### 3.2 边界扫描测试技术应用方面

在应用方面,国外比国内应用领域广泛得多,主要集中在边界扫描测试技术的扩展和改进上。文献[26]提出基于以太网的远程边界扫描测试技术,将 JTAG 口转换成网络接口,既能以有线方式测试,又能以无线方式测试,实现了基于边界扫描技术的远程测试方法,不再受限于短距离的测试形式。文献[19]提出在大规模复杂电子系统中,用边界扫描状态与正常工作状态相互切换来实现对大型复杂系统的测试,并对结构设计进行了论证,为基于边界扫描技术的系统级测试提供了一种解决方案。文献[27-28]首次提出基于边界扫描技术,用电容耦合方法对悬空连接插头进行测试,能够测试一端悬空,一端连接到边界扫描芯片的开路故障,解决了边界扫描技术不能测试一端为悬空连接头的测试问题。

在国内,为了在板级或系统级应用边界扫描技术,对边界扫描控制器的研究比较多。文献[29]开发了基

于微机的边界扫描测试系统,该系统能够根据硬件描述文件和测试要求自动生成测试向量,完成测试任务,设计完成了一种边界扫描控制器。文献[30]提出了完整的边界扫描测试控制系统的设计方案,完成了测试系统中核心部分主控器的逻辑功能设计。文献[31]采用虚拟仪器思想研制了基于 SOPC 的边界扫描控制器,把 JTAG 协议转换和控制器大部分功能模块集成在一个可编程片上系统上,设计开发了 IEEE 1149.1 测试总线控制器 IP 核,实现 JTAG 协议的自动转换。文献[32]设计并实现了一种边界扫描的通用测试系统,能够根据测试算法自动生成测试向量。文献[33]设计了一种基于高速数字 IO 的边界扫描模块,通过设计驱动实现了边界扫描控制器的功能,达到对电路板故障诊断的目的。

## 4 发展趋势

### 1) 新标准应用的增加。

自从边界扫描各个标准提出以后,边界扫描技术得到了广泛的研究,但成功开发出的实用产品相对较少。目前边界扫描技术应用最广泛的是 IEEE 1149.1 标准,只针对数字电路的应用,随着新标准应用的普及,各种标准,如 IEEE 1149.4、IEEE 1149.6、IEEE 1149.7 等应用越来越广泛,将逐渐由单纯的数字电路扩展到数模混合电路、高频电路等更多的应用范围。

### 2) 应用领域的扩展。

在国外,边界扫描技术被 EIEE 接受后,受到军方和工业界的普遍重视,在 F-22、波音 777 等飞机和个人计算机(Compaq)等设备中得到成功应用,成为新型电子设备的主要测试和可测性设计技术<sup>[34]</sup>。据 Schlumberger 公司的 Wiglye 预计,今后 5 年内将有多于 50% 的芯片包含边界扫描结构,因此应用前景和应用领域非常广泛<sup>[35]</sup>。在我国,随着飞机、雷达等现代化电子装备的发展,边界扫描技术将得到广泛的应用。

### 3) 远程测试技术应用。

运用边界扫描技术测试,需要引出其专用的测试接口,这既是其缺点,也是其优势。它具有一个标准的通用测试接口,这为远程测试技术的应用提供了良好的应用背景。随着各种总线技术的发展,特别是 LXI 等远程总线技术的应用,未来可能发展成基于无线或有线以太网的远程测试系统,不再受限于距离和延迟时间的困扰,最大限度地减少人为的干预。

### 4) 多种测试方法集成。

目前,国内外在故障诊断技术的理论研究方面已经有了很大发展,但真正在工程实践中将故障诊断和定位进行成功应用的实例还较少。尤其在对一个大型复杂的电子设备进行故障诊断分析时,传统测试方法、经验

和新型测试技术必须相互弥补。单一依靠某一种测试方法很难完成对复杂电路的百分之百测试,可以将边界扫描技术与在线测试技术等多种测试技术相结合,最大限度地对被测试电路实现全覆盖测试,只有这样才能满足现代武器装备的保障维修要求。

5) 基于边界扫描技术的可测性辅助设计工具开发。

可测性辅助设计工具是实现理论技术向工程应用转化的必要手段。在我国,可测性辅助设计工具的应用并不广泛<sup>[36]</sup>,良好的可测性辅助设计工具将为设计开发阶段的产品提供重要的支持。基于边界扫描的可测性辅助设计工具还很少见,随着技术应用的广泛,这方面的需求有可能逐渐增加。

## 5 总结

本文从边界扫描技术的产生开始论述,简要概述了边界扫描技术的基本原理,总结了边界扫描技术的发展历程,从算法研究和技术应用方面,对当前国内外研究现状进行了详细的阐述和总结,最后对未来可能的发展趋势进行了概括。

### 参考文献

- [1] 俞红娟. 组合电路测试生成算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2006: 7-16.
- [2] 王建业, 阚保强, 吴法文. 边界扫描技术在 PCB 可测性设板的测试性设计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2003, 4(5): 60-63.
- [3] PARKER K P. Observation on the 1149. x family of standards[C]//International Test Conference, 1994: 71-73.
- [4] IEEE Standards Board. IEEE Standard 1149. 1.-1990[S]. New York, USA, 1990.
- [5] 于德伟. 基于边界扫描的数字系统可测性设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [6] 齐丽彬. 电子功能模块边界扫描测试技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008.
- [7] 潘小龙. 基于边界扫描技术的测试系统的研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [8] IEEE STD 1149. 5. IEEE standard for Module Test and Maintenance Bus (MTM-Bus) protocol[S]. IEEE Computer Society, 1995, 8.
- [9] IEEE STD 1149. 4. IEEE Standard for a Mixed-Signal Test Bus[S]. IEEE Computer Society, 1999, 6.
- [10] IEEE STD 1149. 6. IEEE standard for boundary-scan testing of advanced digital networks[S]. IEEE Computer Society, 2003, 7.
- [11] IEEE STD 1149. 7. IEEE standard for reduced-pin and enhanced-functionality test access port and boundary-scan architecture[S]. IEEE Computer Society, 2010, 2.
- [12] 陈星, 黄考利, 连光耀, 等. 从 1149. 1 标准到 1149. 7 标准分析边界扫描技术的发展[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(8): 1460-1462.
- [13] SUPARJO B, LEY A, CRON A, et al. Analog Boundary-Scan Description Language (ABSDL) for mixed-signal board test [C]//IEEE International Test Conference, 2006: 1-8.
- [14] PARKER K, JACOBSON N G. Boundary-scan testing of power/ground pins [C]//IEEE International Test Conference, 2008: 1-7.
- [15] KAUTZ W K. Testing of faults in wiring interconnects [J]. IEEE Trans on Computers, 1974, 23(4): 358-363.
- [16] GOEL P, MCMAHON M T. Electronic chip-in-place test [C]//Proc. Intl. Test Conf, 1982: 126-137.
- [17] WAGNER P T. Interconnect testing with boundary scan [C]//Proc. Intl. Test Conf, 1987: 52-57.
- [18] CHENG W T, LEWANDOWSKI J L, WU E. Optimal diagnostic methods for wiring Interconnects[J]. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on, 1992, 11(9): 1161-1166.
- [19] CHAKRABORTY T J, CHIANG C H, TREUREN B G V. A practical approach to comprehensive system test & debug using boundary scan based test architecture[C]//IEEE International Test Conference, 2007: 1-7.
- [20] KUMAR P, SHARMA R K, SHARMA D K, et al. A novel method for diagnosis of board level interconnect faults using boundary scan[C]//Intl Conf. on Computer & Communication Technology, 2010: 270-275.
- [21] 牛春平, 陈圣俭, 任哲平. 同时具备 W-O 和 W-A 对角独立性的多故障测试生成算法[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(1): 54-57.
- [22] 徐丹, 杨新环, 晏新晔. 边界扫描测试优化算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(20): 255-257.
- [23] 高群凯. 边界扫描全自动化的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [24] 李洋. 基于边界扫描技术的电路板测试研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [25] 刘静. 边界扫描测试算法和 BIST 技术的研究与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [26] COLLINS P, REIS I, SIMONEN M, et al. A transparent solution for providing remote wired or wireless communication to board and system level boundary-scan architectures [C]//IEEE International Test Conference, 2005: 1-8.
- [27] NORRGARD D, PARKER K P. Augmenting boundary-scan tests for enhanced defect coverage [C]//IEEE International Test Conference, 2008: 1-8.



图8 短波红外成像系统成像

Fig. 8 Image of SWIR imaging system

从图8可以看出,该短波红外成像系统在雾天成像清晰,图像对比度好,呈现很多图像细节,如建筑物、电线、树木。

## 5 结论

短波红外成像系统的成功研制及其成像的结果表明,基于 NIOS II 的  $640 \times 512$  InGaAs 短波红外成像系统成像细节清晰、分辨率高、透雾能力强,并且无需低温制冷、体积小、功耗低,可用于手持式监视设备、无人机以及其他需要体积、重量和功耗小的地面和海上成像系统,在军用和民用领域都具有重要的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 蔡毅,胡旭. 短波红外成像技术及其军事应用[J]. 红外与激光工程,2006,35(6):643-647.
- [2] HANSEN M P, MALCHOW D S. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications [C]// Thermosense XXX, Proc. of SPIE, 2008, 6369:01-1-11.
- [3] 曹扬,金伟其. 短波红外焦平面探测器及其应用进展[J]. 红外技术,2009,31(2):63-68.
- [4] 潘建旋,以善珍,周航宇. InGaAs 短波红外探测器[J]. 红外与激光工程,2007,36(s):202-205.
- [5] 曾祥鸣,刘慧.  $320 \times 240$  非制冷红外焦平面阵列驱动电路的设计[J]. 现代电子技术,2005,20:40-41.
- [6] 夏宇闻. 复杂数字电路与系统的 Verilog HDL 设计技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1998.
- [7] 陈锐,谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术,2002,24(1):1-3.
- [8] 汪江华,邹伟峰. 红外图像实时处理系统设计一种算法的研究[J]. 电光与控制,2006,13(3):69-71.
- [9] 李怀琼,陈钱,高文昆. 红外焦平面阵列失效元动态检测与校正算法[J]. 红外与激光工程,2006,35(2):107-111.
- [10] 郭经纬. 基于 ADN8831 的高性能温度控制系统设计[J]. 传感器与微系统,2008,27(2):103-105.
- [11] (上接第49页)
- [12] DUBBERKE D, GREALISH J J, DICK B V. Solving in-circuit defect coverage holes with a novel boundary scan application [C]//IEEE International Test Conference, 2008:1-9.
- [13] 徐建洁. 边界扫描测试系统设计与实现[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.
- [14] 张书静. 边界扫描技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2005.
- [15] 彭立章. 边界扫描板级测试技术的研究及 SOPC 实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [16] 潘小龙. 基于边界扫描技术的测试系统的研究与应用[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- [17] 何庆佳. 雷达电路板故障诊断系统的边界扫描模块的软件设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2011.
- [18] 于德伟. 基于边界扫描的数字系统可测性设计研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [19] WHETSEL L. An IEEE1149. 1 based test access architecture for ICs with embedded cords [C]//Proceedings of IEEE International Test Conference, 1997:69-78.
- [20] 温熙森,邱静,刘冠军. 装备可测性设计与评估技术综述[J]. 国防科技,2009,30(1):1-5.

欢 迎 投 稿      欢 迎 刊 登 广 告