

文章编号: 1000-8055(2009)04-0886-06

边界扫描技术在电子控制器测试中的应用

邓志伟^{1,2}, 徐凯¹, 张天宏¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 动力控制系统研究所, 无锡 214063)

摘 要: 航空发动机电子控制器向更高性能和更高集成度的方向发展, 使得传统测试方法难以满足需要. 提出了通过边界扫描技术来解决电子控制器核心电路的测试问题. 设计了边界扫描测试技术验证平台, 主要包括边界扫描测试适配器和被测电路. 对被测电路开展了基于边界扫描的测试试验, 完成了主要指令的测试. 同时通过扫描链实现了对被测电路的故障注入, 通过这种方法注入故障可对航空发动机电子控制器的机内测试(BIT)能力进行验证.

关 键 词: 电子控制器; 边界扫描; 故障检测; 故障注入

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Application of boundary scan technique in electronic controller

DENG Zhiwei^{1,2}, XU Kai¹, ZHANG Tianhong¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Aviation Motor Control System Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Wuxi 214063, China)

Abstract: With the development of electronic engine controller (EEC) in terms of performance and integration, the traditional test method can not meet the demand. Boundary scan technique was proposed to solve the problem of testing the kernel electronic circuit of EEC. A testing platform including a testing adapter and a testing circuit was designed. Testing experiment for the circuit was carried out based on boundary scan. The testing experiment of principal instructions was accomplished. Fault injection to testing circuit by boundary scan chain was realized, which can be used to validate the performance of the built in test (BIT) functions of EEC.

Key words: electronic engine controller (EEC); boundary scan; fault detection; fault injection

航空发动机电子控制器(EEC)是全权限数字电子控制系统的核心部分, 它包含的电子器件密度不断提高、功能更加复杂, 传统的测试方法已难以满足测试需要^[1-2]. 而电子控制器的可靠性和可维护性是影响其使用性的关键所在, 因此要实现电子控制器的故障检测, 需要一种更为有效的

测试技术^[3].

边界扫描测试技术, 通过一条在集成电路边界绕行的移位寄存器链, 对板内边界扫描器件的所有引脚进行扫描以完成电路检测. 这种方法为解决复杂电子系统的故障检测提供了高效的解决途径^[4-5].

收稿日期: 2008-04-28; 修订日期: 2008-07-24

作者简介: 邓志伟(1969-), 男, 江苏无锡人, 博士生, 研究员, 主要从事航空发动机电子控制技术研究.

本文设计了一个包含被测电路的边界扫描测试技术验证平台。目的是为了开展边界扫描测试试验和故障注入试验,探索边界扫描测试技术在航空发动机电子控制器测试中的应用。

1 边界扫描技术在 EEC 中应用的可行性

边界扫描技术作为一种国际标准,提供了一套完整的、标准化的超大规模集成电路测试性设计方法,能克服测试复杂数字电路的技术障碍,利用它可以实现芯片级、板级和系统级的测试。“边界”指测试电路被设置在电子器件功能逻辑电路的四周,位于靠近器件输入、输出引脚的边界处。“扫描”指连接器件各输入、输出引脚的测试电路实际上是一个串行移位寄存器,这种串行移位寄存器被叫做“扫描路径”,沿着这条路径可输入由“1”和“0”组成的各种编码,对电路进行“扫描”式检测,从输出结果判断其是否正确。

目前航空发动机电子控制器(EEC)的核心电路所包含的复杂核心器件如 486, DSP, FPGA 和 PowerPC 等,都包含国际通用的边界扫描接口,这就为在电子控制器中开展基于边界扫描技术的测试技术应用提供了基础^[6]。EEC 中具有复杂功能的电子器件大都支持边界扫描,对控制器电路

中一些不支持边界扫描的器件,也可以采用边界扫描器件置换和板级边界扫描结构置入这两种方式来提高故障检测的覆盖率。

在航空发动机电子控制器核心电路的设计中采用如图 1 所示的边界扫描链路。这种结构可以满足边界扫描测试的串行链、并行链、多输出和旁路工作的要求,实现多种模式的边界扫描测试。虽然系统中包含诸如存储芯片等非边界扫描器件,但通过与之互连的边界扫描器件,仍可实现故障检测^[7-9]。

通过分析电子控制器中核心器件的边界扫描描述语言(BSDL)文件,可以得到核心器件 I/O 管脚的边界扫描单元属性和扫描指令。每个边界扫描单元都有两个数据通道:正常数据通道和测试数据通道。边界扫描单元在器件内部以串行方式连接成扫描链,既可以通过扫描输入端将测试矢量以串行扫描的方式输入,对相应的管脚状态进行设定,实现测试矢量的加载;也可以通过扫描输出端将系统的测试响应串行输出,进行数据分析与处理^[10]。

在航空发动机电子控制器的电路设计时,只需在控制器电路板上设计边界扫描测试接口并与相应的核心电路构成扫描链路,就可开展边界扫描测试与故障注入。

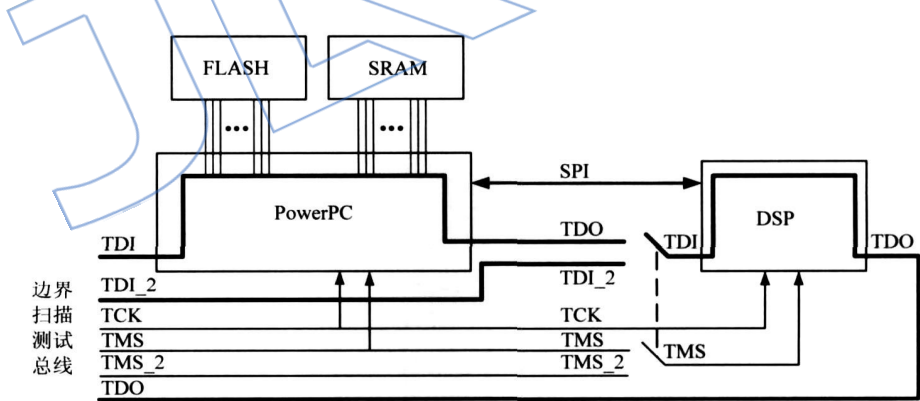


图 1 电子控制器扫描链路结构示意图
Fig. 1 Boundary scan chain of EEC

2 边界扫描测试技术验证平台设计

为了探索边界扫描测试技术在航空发动机电子控制器中的应用,本文开发了边界扫描测试适配器以及支持边界扫描的被测电路,进行试验研究。

边界扫描测试适配器主要包括嵌入式测试总线控制器和 USB 接口芯片两部分^[11]。

边界扫描测试适配器总体框图如图 2 所示。边界扫描测试总线输出信号来自于嵌入式测试总线控制器 eTBC8980 芯片,主要包括 TDI, TDO, TMS, TCK 和 TRST。TCK 为边界扫描操作提供了一个独立的、基本的时钟信号,测试访问端口控制器(TAP)的所有操作都是通过这个时钟信号来驱动的。TMS 信号用来控制边界扫描器件内部的测试状态机的转换,它在 TCK 的上升

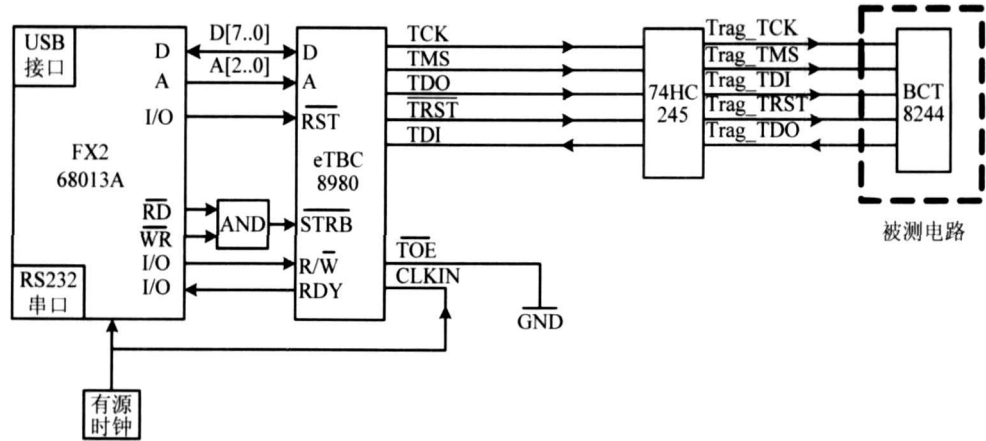


图 2 边界扫描测试适配器总体框图

Fig.2 Block diagram of the testing adapter for boundary scan

沿有效。TDI 是数据输入口，所有要输入到扫描寄存器的数据都是通过 TDI 接口串行输入的。TDO 是数据输出口，所有要从扫描寄存器中输出的数据都是通过 TDO 接口串行输出的。TRST 信号用来对边界扫描器件内部的 TAP 进行复位^[12]。

通过使用嵌入式测试总线控制器芯片，外部主控制器无需自行产生 TAP 状态机和在其内部进行测试数据的串并转换操作。所有这些操作由嵌入式测试总线控制器硬件实现，能使主机高效地执行 8 位并行数据操作，主控芯片只需执行扫描指令操作和 TAP 状态控制，从而加快了测试速度。选用 USB 接口芯片 CY7C68013A 作为嵌入式总线控制器 eTBC8980 的外部主控制器，因其具有 51 处理器内核，同时具有 USB 2.0 接口及 UART 串口，可以满足与上位管理计算机的通讯需求。

边界扫描测试技术验证平台上的被测电路为 BCT8244。BCT8244 作为美国德州仪器公司的 SCOPE 系列器件，支持边界扫描，同时也具有一般的 74LS244 器件功能。通过在普通电路中置入该器件，将所需观测的非边界扫描器件的管脚与该器件管脚相连，利用 BCT8244 的缓冲/驱动的基本功能和边界扫描链，可以实现对观测点的可控和可测。在测试试验时将其边界扫描总线与边界扫描测试适配器的总线信号相连即可开展试验。

3 基于边界扫描的测试试验

根据 IEEE 1149.1 标准，边界扫描测试指令

主要包括旁路指令 Bypass、采样指令 Sample 和外部测试指令 Exttest。Bypass 和 Sample 指令用于正常工作模式，Exttest 用于测试工作模式。针对平台上的边界扫描器件 BCT8244 分别开展了旁路测试试验、采样测试试验和外部测试试验。

3.1 旁路测试试验

边界扫描器件的 TAP 控制器缺省工作状态为 Bypass 状态，也可通过测试适配器先行加载 Bypass 指令。通过在边界扫描被测器件 BCT 8244 的 TDI 和 TDO 引脚间一个仅为 1 位的寄存器可将其旁路穿过，允许控制器核心器件正常工作而使边界扫描测试加载的数据直接通过被设置为此模式的器件而送到邻近需测试器件的 TDI 输入端。

输出波形如图 3 所示，对边界扫描被测器件 BCT8244 的 TDI 管脚输入信号为 0100 0100 1010 0101，由于发送时低位在前，高位在后，故对应输出为 2 2 5 A。此时器件 TDO 管脚的输出与 TDI 管脚的输入相同，但延迟一个时钟周期。

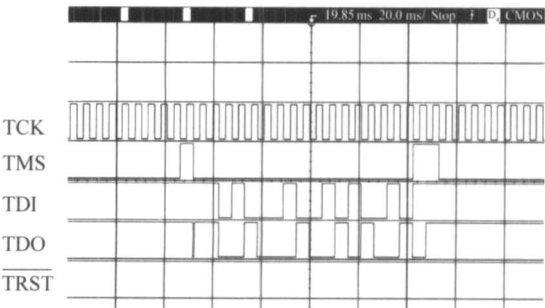


图 3 Bypass 旁路试验波形图

Fig.3 Waves of the Bypass testing

3.2 采样测试试验

采样测试时需通过测试适配器对被测器件 BCT8244 加载 Sample 指令, 使被测器件 BCT8244 工作在 Sample 状态并进行管脚数据移位操作, 此命令不改变器件原有逻辑。

如图 4 所示可见该器件的 TDO 输出为 0110 1010 和 0110 1010, 反映了被测器件的管脚工作状态。此时 TDO 输出与 TDI 输入信号无关。

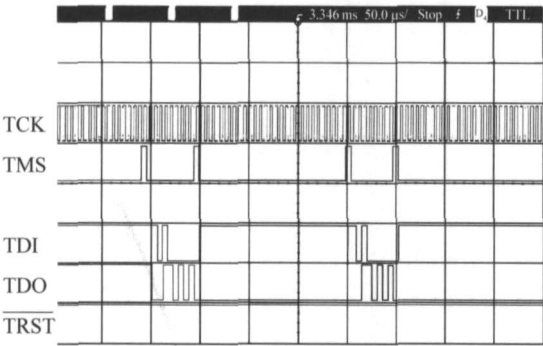


图 4 Sample 测试试验波形图
Fig. 4 Waves of the Sample testing

3.3 外部测试试验

将边界扫描测试目标芯片 BCT8244 相应的管脚输入电平设置为 1101 1010。测试时首先需通过测试适配器对被测器件加载 Extest 指令命令控制该器件的 TAP 状态, 使目标被测芯片进行指定的管脚数据移位操作。如图 5 所示可见 BCT8244 的 TDO 输出为 0101 0111, 将器件管脚对应的管脚状态予以移出, 反映了被测器件的管脚工作状态。

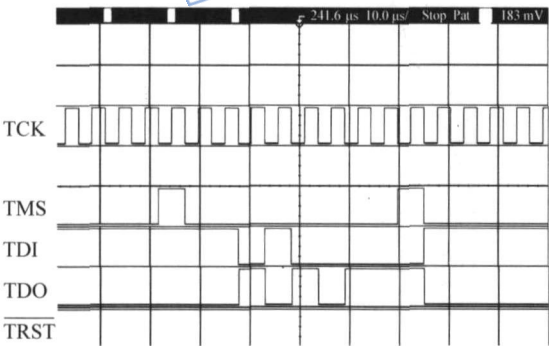


图 5 Extest 测试试验波形图
Fig. 5 Waves of the Extest testing

与 Sample 指令不同的是加载 Extest 指令后, 器件输出管脚的电平将由此时移入边界扫描寄存器的测试数据完全确定。利用这个原理可以实现嵌入式的故障注入, 其机理在下一章节阐述。

4 基于边界扫描的故障注入试验

为了保证航空发动机电子控制系统的可靠性, 机内测试(BIT) 技术已经成为电子控制器研究计划中的关键技术之一。为了考核控制器 BIT 的故障检测率, 需要通过在控制器电路中注入典型故障模式, 来为 BIT 的设计和研究提供参考以将其完善。以下阐述了利用边界扫描技术实现的故障注入。

通过控制器的边界扫描链可以加载测试矢量, 从而改变控制器核心器件管脚的输出状态, 这样能方便的实现固定电平故障注入, 可以作为一种较为先进和有效的故障注入技术。

下面说明通过边界扫描技术实现故障注入的原理:

如图 6 所示是器件管脚 JTAG 链示意, 被测器件为支持边界扫描的核心器件。通过控制 TAP 控制器的状态机, 可以对被测器件的边界扫描单元进行串行访问。如图假设扫描前的输入数据是 101010, 并通过被测器件的内部逻辑设置, 由输入 I_1, I_2, I_3 管脚通过内部逻辑控制输出 O_1, O_2, O_3 管脚。

一次完整的边界扫描移位实现故障注入操作如下:

- 1) TAP 控制器的边界扫描状态机处于挂起状态, 边界扫描单元并不影响器件信号的输入输出;
- 2) TAP 控制器的边界扫描状态机处于 Capture DR 状态, 把 I/O 口上的数据捕获到边界扫描单元的移位寄存器上;
- 3) TAP 控制器的边界扫描状态机处于 Shift-DR 状态, TCK 的一次跳变, 把数据从 TDI 移位到边界扫描移位寄存器的高位上, 并从 TDO 输出移位寄存器的低位(就是 O_3 的数据);
- 4) 经过 6 个 TCK 的时钟, 可以把捕获到的边界扫描链的移位寄存器上的数据移出, 并且把新的数据移入边界扫描链;
- 5) 在 TAP 控制器的边界扫描状态机的 Update DR 状态, 可以把新的数据锁存到器件的输入或者输出 I/O 口上, 从而完成一次数据更新。

如图 7 所示, 此时原有的扫描链输入数据 101010 进入器件的扫描单元, 改变了器件的输出 O_1, O_2, O_3 由原来的正常工作时的 000 为 101, 此时器件管脚的输入没有改变而管脚的输出电平已经改变, 无须外部附加故障注入电路或者切换开

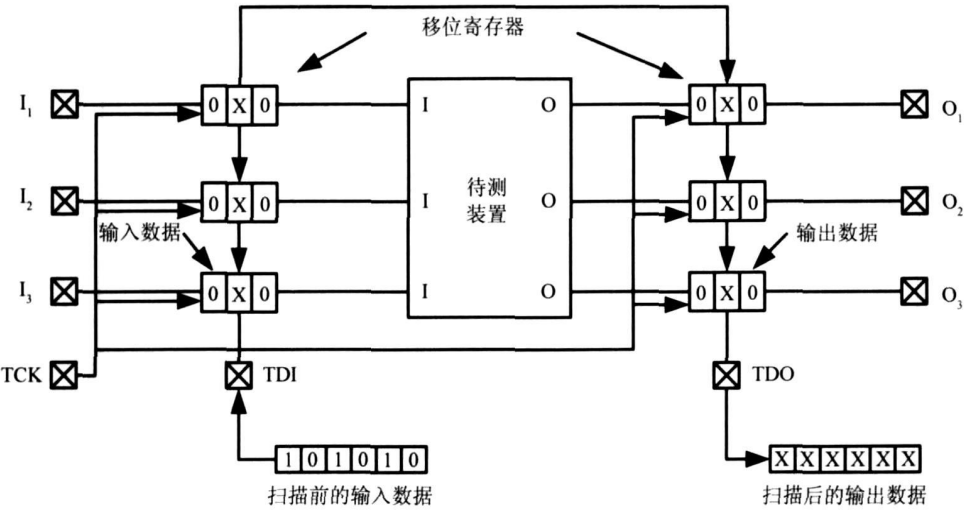


图 6 器件串行扫描前状态示意图
Fig.6 State before serial scan

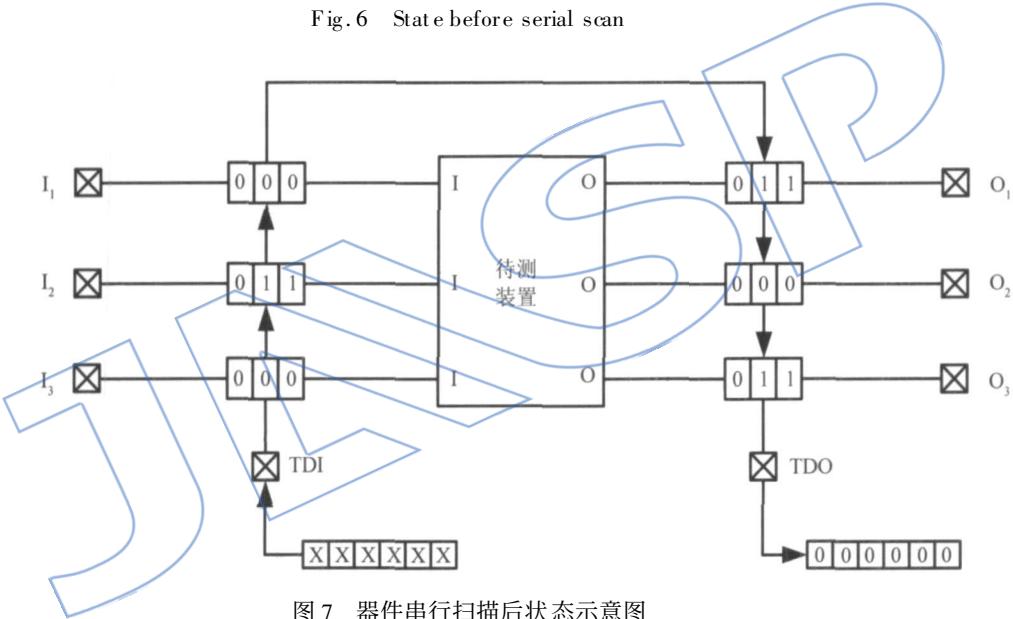


图 7 器件串行扫描后状态示意图
Fig.7 State after serial scan

关, 就实现了基于边界扫描技术的嵌入式故障注入.

实际试验时首先对边界扫描被测器件 BCT8244 加载 Extest 指令, 然后通过扫描测试适配器写入需要串行输出的值 0X0A, 经过并串转换后对 BCT8244 相应管脚的移位寄存器输入 1010, TDI 的波形如图 8 所示.

通过 TAP 控制器的状态更新, 管脚锁存器将进行更新, 被测器件的管脚将输出更新后的电平. 此时输出管脚的电平为 1010. 实现了在不改变原目标器件核心逻辑的情况下, 通过边界扫描加载测试矢量来控制输出电平的操作, 即实现了

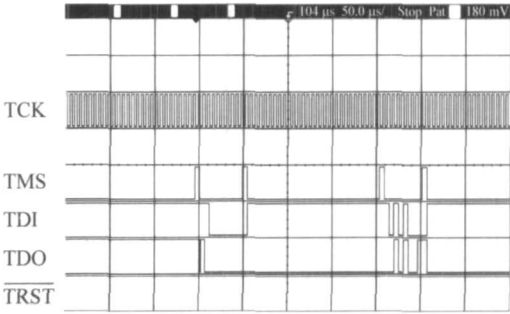


图 8 固定电平控制试验波形图
Fig. 8 Waves of the fixed level control testing

5 结束语

试验证明, 采用边界扫描技术, 可以有效地实现器件的扫描测试和故障注入. 采用边界扫描技术进行测试, 无需专门的测试电路, 只需提供边界扫描总线接口, 就可以实现整个系统的扫描测试. 在故障注入时也不需要设置专门的故障注入接口, 通过扫描链即可实现故障注入. 因此对于传统的测试方式, 本方案在应用时有很大的优势. 在航空发动机电子控制器功能设计的同时进行基于边界扫描的可测试性设计, 将减轻测试困难, 降低测试费用.

参考文献:

- [1] 孙健国. 现代航空动力装置控制[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [2] 秦海波, 张天宏, 孙健国. 面向 FADEC 系统 BIT 验证的综合故障注入器研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 581-587.
QIN Haibo, ZHANG Tianhong, SUN Jianguo. Study on comprehensive fault injector for BIT verification of the FADEC system[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 581-587. (in Chinese)
- [3] 曾天翔. 电子设备测试性及诊断技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- [4] IEEE Standard 1149.1-2001. IEEE standard test access port and boundary scan architecture[S]. New York: IEEE Standard Board, 2001.
- [5] 王海波, 侯同刚, 王旭. 边界扫描技术及其在武器装备中的应用[J]. 国防技术基础, 2005, 12: 39-40.
WANG Haibo, HOU Tonggang, WANG Xu. Application of boundary scan technique in weapon equipment[J]. Technology Foundation of National Defence, 2005, 12: 39-40. (in Chinese)
- [6] 张天宏, 牟路勇, 丁毅, 等. 基于 DSP 和 CAN 总线的发动机电子控制器核心电路模块研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 130-135.
ZHANG Tianhong, MOU Luyong, DING Yi, et al. Study of an engine electronic controller's core circuit module based on DSP and CAN[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 130-135. (in Chinese)
- [7] Texas Instruments. Impact of JTAG/1149.1: Testability on reliability[R]. Texas Instruments Inc, Jan, 1997.
- [8] Texas Instruments. Built In Self Test(BIST) using boundary scan[R]. Texas Instruments Inc, 1996, 12.
- [9] 王宁, 董兵. 基于边界扫描的非完全 BS 电路板测试诊断技术[J]. 半导体技术, 2005, 12(30): 38-41.
WANG Ning, DONG Bing. The test & diagnosis techniques of part BS board based on boundary scan[J]. Semiconductor Technology, 2005, 30(12): 38-41. (in Chinese)
- [10] 温熙森, 刘冠军, 黎琼炜, 等. 基于边界扫描的板级 BIT 技术研究现状及发展趋势[J]. 国外计测, 1999, 19(3): 38-41.
WEN Xisen, LIU Guanjun, LI Qiongwei, et al. Research status and trend of board level BIT technique based on boundary scan[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 1999, 19(3): 38-41. (in Chinese)
- [11] Texas Instruments. Embedded test bus controller[R]. Texas Instruments Inc., 2004, 3.
- [12] Bhavsar D. Synchronizing the IEEE 1149.1: Test access port for chip level testability[J]. IEEE Design and Test of Computer, 2000, April-June: 94-99.