

文章编号: 1000-8055(2006) 03-0581-07

面向FADEC系统BIT验证的 综合故障注入器研究

秦海波^{1,2}, 张天宏¹, 孙健国¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;
2. 中国一航 动力控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

摘要: 为了评价航空发动机数字电子控制器机内自测试检测能力, 提出了一种面向全权限数字电子控制(FADEC)系统机内自测试(BIT)验证的综合故障注入器的设计思想。综合故障注入器采用ARM 处理器作为核心控制器; 基于数模混合电路, 分别通过后驱动技术和电压求和技术实现对数字电路节点和模拟电路节点的故障注入; 针对各种传感器和执行机构的电气特征, 设计了具有良好逼真度的接口模拟电路, 从而与电子控制器(EEC)构成FADEC系统运行环境。通过对具有BIT功能的电子控制器原理样机的故障注入实验, 证明该综合故障注入器作为航空发动机FADEC系统BIT设计和应用研究的工具是非常有效的。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 全权限数字电子控制; 电子控制器; 内建自测试; 故障注入器; 测试适配器

中图分类号: V233.7 文献标识码: A

Study on Comprehensive Fault Injector for BIT Verification of the FADEC System

QIN Hai-bo^{1,2}, ZHANG Tian-hong¹, SUN Jian-guo¹

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Aviation Motor Control System Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: In order to verify the BIT (Built-In-Test) ability of the EEC (Electronic Engine Controller), the design idea of a kind of comprehensive fault injector was proposed in this paper. The fault injector was based on ARM processor, and injected faults to digital and analog electronic nodes by back-driving and voltage summing technique respectively. According to the electronic characteristics of the sensors and actuators of a FADEC (Full Authority Digital Electronic Control) system, the realistic simulation interface circuits were designed to make a FADEC running system with an EEC. Fault injecting experiments to a principium EEC swatch show that the fault injector is a viable tool for BIT verification.

Key words: aerospace propulsion system; aero-engine; FADEC; EEC; BIT;
fault injector; test adaptor

收稿日期: 2005-05-03; 修订日期: 2005-08-28

作者简介: 秦海波(1959-), 男, 江苏无锡人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 中国一航动力控制系统研究所研究员, 主要从事航空发动机控制的研究。

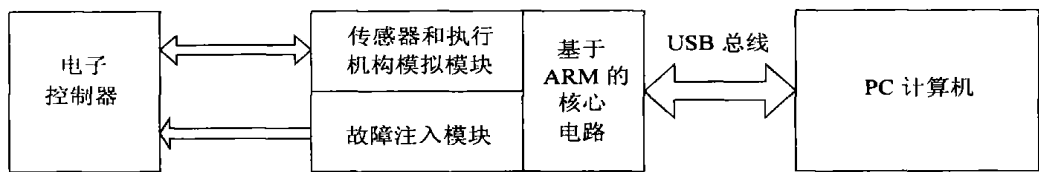


图1 智能化BIT 测试适配器总体结构框图

Fig.1 The diagram of smart BIT test adapter

测试时间长、检测和维修难度大、维护保障费用高,是目前影响航空发动机全权限数字电子控制(FADEC)技术得以广泛工程应用的障碍^[1,2]。现代电子技术的迅速发展促进了测试理论和测试技术的发展。特别是内建自测试(BIT)技术的发展,为航空发动机电子控制器的故障诊断提供了新的途径和方法。

国外对BIT 技术很重视,并已开展了大量的研究工作^[3~7]。该项技术主要由大型航空公司和军火生产企业发起,并且成功地将最先进的BIT 技术和方法应用在军用飞机中。例如:F-16,F/A-18,F-22,B-2 轰炸机和F-117 隐型战斗机等在设计过程中都大量采用BIT 技术,使得这些武器装备的测试性、可靠性、维修性以及战备完好性都具有很高的水平。在BIT 的研究和应用过程中,国外已形成了完整的技术体系,其中一个重要环节就是利用故障注入设备对系统BIT 的能力进行验证。

在国内,BIT 的研究起步较晚,但是自从指导BIT 设计的行业规范《装备测试性大纲》制订以后,在一些型号的研制过程中已经开展了BIT 设计,并且取得了一些成果^[3]。然而,由于缺少BIT 的设计规范和验证体系,所设计的BIT 故障检测覆盖率不高,而且BIT 本身的可靠性得不到验证,这些问题都影响了BIT 技术在工程中的应用。因此,迫切需要一种具有故障注入能力的BIT 验证工具。

针对航空发动机数字电子控制系统的特点,本文研究一种面向FADEC 系统BIT 验证的综合故障注入器,其目的就是通过向电子控制器主动注入典型故障模式,检查BIT 的故障检测能力,从而为BIT 的设计和验证提供工具。

1 综合故障注入器总体设计

面向FADEC 系统BIT 验证的综合故障注入器主要功能是,在提供电子控制器正常运行所需

接口环境的基础上,模拟FADEC 系统工作过程中可能出现的各种故障模式,从而达到验证电子控制器BIT 能力的目的。作为一种验证工具,本文提出了通用性和实用性的设计目标。一方面,要求故障注入器具有通用性,即通过灵活配置,可以模拟各种单一的或组合的故障模式;另一方面,要求故障注入器具有实用性,即在实际使用时,对被测试对象不需要设计专门的测试接口,不需要插拔芯片,仅通过移动探针方式即可进行故障注入。此外,综合故障注入器应具有良好的信号隔离能力和信号驱动能力,防止因故障注入器的投入而使被测试设备的性能受到影响。

为此,提出了智能化BIT 测试适配器的设计思想。如图1 所示,智能化BIT 测试适配器采用上、下位机的结构体系,包括一台PC 计算机和一个综合故障注入器,PC 计算机用于故障注入方案的配置、故障注入过程的管理和故障注入结果的回收分析处理,综合故障注入器通过USB 总线与PC 计算机之间进行高速数据通信。

综合故障注入器包括基于ARM 的核心电路模块、传感器及执行机构接口模拟模块和故障注入模块。接口模拟模块,用于模拟FADEC 系统中各种传感器和执行机构的电气特征,同时提供一个RS422 串口以模拟飞机系统与电子控制器之间的通信,从而为电子控制器提供一个全面的运行环境。故障注入模块通过移动探针将故障信号注入到电子控制器的故障注入节点。此外,故障注入器提供一个RS232 串口用于接收电子控制器的BIT 检测结果。

分析比较国内外几种故障注入方法,本文采用后驱动技术和电压求和技术,并结合电子开关和软件模拟的方法实现对电子控制器的综合故障注入^[4~9]。图2 为综合故障注入器的故障注入电路结构,其中ARM 微控制器通过D/A 转换器控制恒压电路或恒流电路来控制移动探针的电气特性;CPLD 电路控制电子开关实现故障注入时间

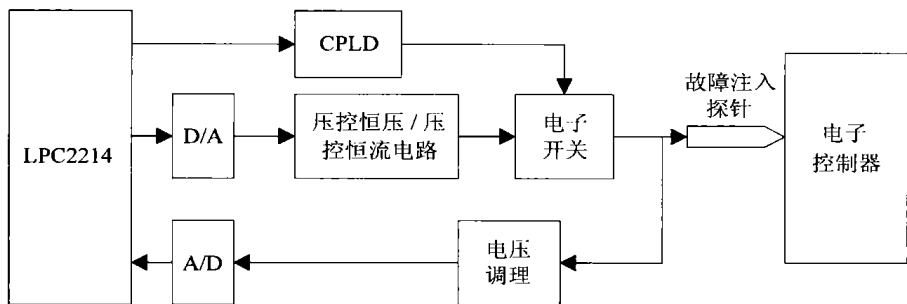


图2 综合故障注入器的故障注入电路结构图

Fig.2 The fault injection circuit diagram of the integrated fault injector

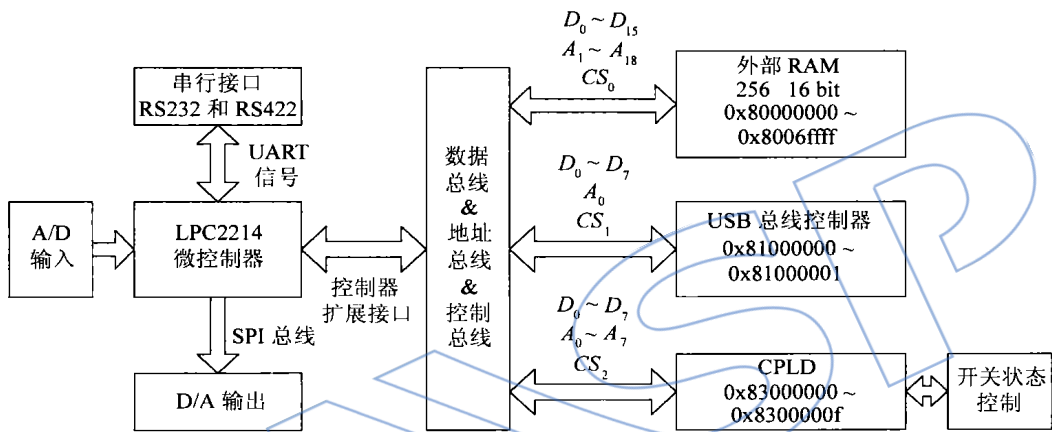


图3 故障注入器核心电路结构框图

Fig.3 The core circuit diagram of the fault injector

的精确控制; 电子开关输出端通过 A/D 进行回绕测量, 以实现故障注入节点真实状态的监测。

2 核心电路设计

综合故障注入器以 ARM 微控制器和 CPLD 电路为核心实现故障注入及接口模拟功能。其核心电路结构框图如图 3 所示。各组成部分的功能说明如下:

中央处理器: 作为故障注入器的控制和处理核心, 按照一定的逻辑和时序, 将设定的故障模式注入到指定的故障注入节点, 并且模拟发动机传感器和执行机构电路接口的功能。由于 EEC 的运行速度比较快, 所以要完成精确快速的故障注入控制和 EEC 接口环境的模拟, 对中央处理器的处理速度要求较高。为此, 本文采用面向嵌入式控制应用的基于 ARM7TDMI 内核的微处理器 LPC2214 作为故障注入器的中央处理器。该处理器具有 8 路 10 位 A/D 接口, 用于故障注入器中模拟信号的采集。

CPLD: 一方面实现对 ARM 的地址线译码, 提供外围电路的片选信号; 另一方面实现 ARM 的 I/O 端口扩展, 用于在故障注入过程中对大量开关状态的控制。

RAM 存储器: 用于存储上位 PC 机下传的传感器模拟及故障注入参数, 在故障注入过程中存储故障检测信息。由于 ARM 内部自带的 RAM 空间只有 16 K 字, 因此外部扩展了 256 K 字 SRAM 存储空间。

USB 通信模块: 通过 ARM 控制独立的 USB 总线控制器 PUSBD12, 实现故障注入器与上位 PC 机之间的高速数据传输。

串行通信模块: 包括 RS232 和 RS422 串口。RS232 用来与电子控制器进行通信, 以接收电子控制器的 BIT 故障检测结果, 并可以向电子控制器发送故障注入命令。RS422 用来模拟机载电子设备与发动机电子控制器之间的通信, 并且实现串口通信的故障注入。需要说明的是, 随着航空电子系统综合化水平的提高, 机载电子设备与发动

机电子控制器之间采用高速通信总线(如 ARINC429)进行通信是必然趋势,为此,可在智能化测试适配器的 PC 计算机上扩展一块相应的通信接口卡,以模拟机载电子设备与发动机电子控制器间的通信。

3 后驱动故障注入

后驱动(Back-Driving)技术最早由美国人 Fractron 在 1968 年提出,主要用于数字电路在线测试^[10]。其实质是在被测器件的输出级灌入或拉出瞬态大电流,迫使其电位按照要求变高或变低,从而达到对被测器件施加在线测试激励的目的。将上述思想拓展,应用到数字电路的故障注入技术领域,即应用后驱动技术,将被测电路器件管脚强制为高或低,来模拟故障行为。后驱动技术用于故障注入,从器件管脚注入故障,不需要设置专门的故障注入接口,只要将故障注入探针与被注入故障的电路管脚接触即可,因此具有很强的实用性。



图4 TXD 电路节点的故障注入效果

Fig. 4 The fault injection effects of the TXD electronic node

图4为综合故障注入器对电子控制器的异步串口发送电路节点TXD进行注入的情况。图4

(a)为注入固定低电平,图中可以看出TXD信号都低于0.8 V,从而使其处于常低故障态。图4(b)图为注入固定高电平,图中可以看出TXD信号都高于2.4 V,从而使其处于常高故障态。无论是固定高还是固定低,故障注入时间控制的精度均可达到200 μs。

4 电压求和故障注入

航空发动机的电子控制器中通常包含传感器的信号调理、执行机构的驱动及稳压电源等模拟电路,这些模拟电路形式多样,可能出现的故障类型也很多。但是,无论是什么原因引起的故障,最终进入处理器时都表现为信号突变、漂移或固定不变。因此本文采用电压求和的方法,使模拟信号偏离正常状态,从而实现模拟电路的故障注入。

电压求和方法最早用于对模拟电路进行BIT检测^[3],本文将其用于针对模拟电路的故障注入。在信号调理或驱动电路中几乎都采用运算放大器进行信号变换,其原理如图5所示。



图5 电压求和故障注入原理

Fig. 5 The principle of voltage summing circuit

正常情况下, $V_{out} = -V_{in1} \times R_f / R_i$, 而当故障注入器将探针移至运算放大器的反相端时 $V_{out} = -V_{in1} \times R_f / R_i - V_{in2} \times (R_f / R_2)$, R_2 为故障注入器中的电阻, V_{in2} 为故障注入器的可控电压。由此可以看出通过改变 V_{in2} 的输入可以改变 V_{out} 的输出, 由此实现模拟电路的故障注入。通过这种方法在模拟电路中注入故障不会对电路产生损坏, 而且可以预测模拟电路的输出。图6为采用电压求和法对模拟电路进行故障注入, 图6(a)为模拟电路不存在滤波电容, 在注入故障后输出电压立即出现了改变。图6(b)为模拟电路存在滤波电容, 所以当注入故障后模拟电路的输出电压变化出现了延迟。由于采用电压求和法对模拟电路进行故障注入对电路不会造成损坏, 因此可以将注入故障的时间加长些以模拟固定故障模式。

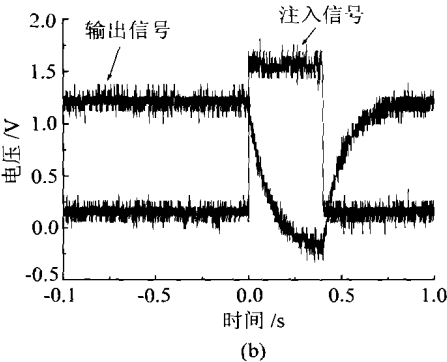
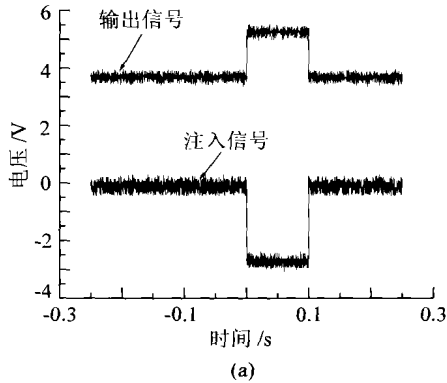


图6 模拟电路故障注入效果

Fig.6 The fault injection effects of analog circuit

5 接口模拟电路设计

分析EEC 的接口需求,综合故障注入器模拟的传感器接口电路有输出开关量的行程开关传感器、输出频率量的转速传感器、位移传感器LVDT、热电阻、热电偶和压力传感器;模拟的执行机构接口电路有开关量信号控制的电磁阀和模拟信号控制的力矩马达。

对于执行机构的模拟,一方面模拟电磁阀和力矩马达的线圈负载,另一方面模拟执行机构的运动状态。前者可以通过小功率电阻模拟,流过负载的电流大小通过取样电阻得到电压信号,再由ARM 的A/D 电路采集;后者需要模拟行程开关传感器或位置传感器的电气特征。

开关量传感器和频率量传感器的信号模拟直接由CPLD 实现,高低电平信号经过隔离和放大电路输出到电子控制器。热电偶输出的0~50mV 的电压信号,通过将D/A 输出的信号衰减即可模拟。热电阻和压阻式压力传感器的本质是用电阻值的变化反映信号的大小,因此模拟热电阻和模拟压力传感器的方法相同。下面详细介绍LVDT 和热电阻的模拟。

5.1 LVDT 的模拟

由LVDT 原理可知,原线圈采用正弦激励信号,幅值固定不变,副线圈的输出幅值随着铁芯位置的移动而变化的正弦信号,但是两个副线圈输出的正弦信号幅值之和固定不变。根据该原理本文采用两路D/A 转换器来模拟LVDT 的两个副线圈的输出信号,其本质是利用D/A 转换器的输出电压为参考电压和数字量的乘积,即D/A 转换器的输出:

$$V_{out} = (K/D)V_{ref}$$

V_{ref} 代表D/A 的参考电压, K 代表当前输入D/A

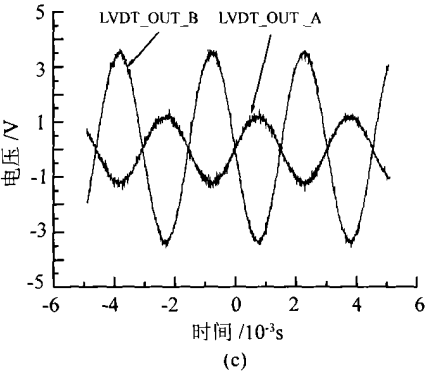
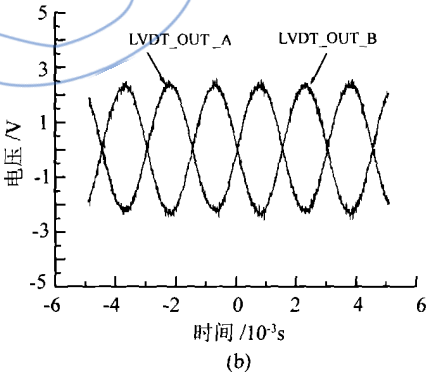
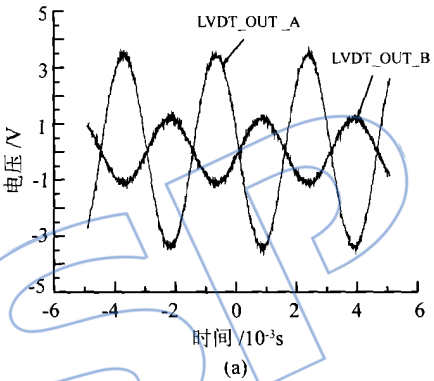


图7 LVDT 传感器的模拟输出信号

Fig.7 The output signals of the emulated LVDT sensor

的数字量, D 代表 D/A 能输入的最大数字量, 如果是 12 位的 D/A 转换器则 $D = 4095$ 。根据 D/A 转换器的这个特性, 将原线圈的正弦激励信号作为 D/A 转换器的参考电压 V_{ref} , D/A 的输出 V_{out} 作为副线圈的输出, 通过改变 D/A 的输入数字量 K , 来改变 D/A 输出信号的幅值, 并且保持两路 D/A 的输入数字量 K 的和等于 D , 从而实现 LVDT 的模拟。

图 7 为基于上述设计思想设计的 LVDT 模拟电路模拟结果, 从图 7(a) ~ 图 7(c) 分别表示当位置传感器的位置在 25%, 50% 和 75% 时 LVDT 输出信号, 从图中的曲线可以看出本文采用的方法非常精确地模拟了 LVDT 的特性。此外, 通过程序控制很容易实现 LVDT 信号断路、短路、漂移等故障模式的动态模拟。

5.2 热电阻的模拟

热电阻的特性是温度变化导致其阻值变化, 本文利用运算放大器和 D/A 转换器等电路构成单口网络, 通过编程得到输入电压及电流的比值, 从而获得可编程的合成电阻, 实现热电阻的模拟^[11]。

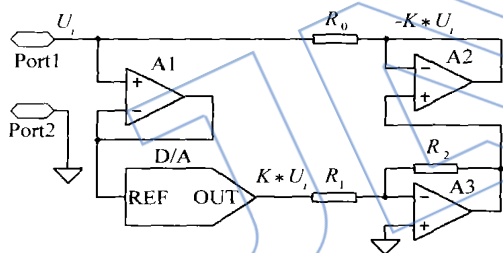


图 8 模拟热电阻电路原理

Fig. 8 The principle of thermal resistor emulation

合成电阻的电路原理如图 8 所示, 由输入运算放大器 A1、D/A 转换器、输出运算放大器 A2、A3 和标准电阻 R_0 构成。施加于标准电阻 R_0 一端的输入电压值 U_i 经过缓冲、放大、比例调节后, 反馈到标准电阻 R_0 的另一端, 以此来控制输入电流, 从而确定输入电阻值。运算放大器 A1 接成电压跟随器形式, 输出电压 U_i 作为 D/A 转换器的参考电压。D/A 转换器采用电压输出型乘法转换器, 使参考电压即使减小到接近零也可得到较好的比例输出。D/A 转换器的传输系数 K 由输入到 D/A 的数字信号决定, 其输出电压为 $K \times U_i$ 。经过反相放大器 A3 后输出为 $-K \times U_i$ 。由于 A2 工作于线性放大状态时两输入端电位相等, 因此 A2 的反相端电压也为 $-K \times U_i$ 。合成电阻的输入电流

通过标准电阻 R_0 流向运放 A2 的输出端。这样, 施加于标准电阻上的电压降为 $U_i + K U_i$, 电流为 $I_1 = (K + 1) \times U_i / R_0$ 。由于 A1 的同相端输入电流为零, 则对输入端来讲, 可得合成电阻的阻值为:

$$R = R_0 / (1 + K)$$

即标准电阻衰减了 $1 / (1 + K)$ 倍。当 $K = 0$ 时, 电阻值不变; 当 $K = 1.0$ 时, 电阻值衰减为一半。本文取 R_0 为 200Ω , K 的工作范围为 $0 \sim 1.0$ 时, 对应 R 变化范围为 $100 \sim 200 \Omega$ 。

6 结束语

实验证明, 采用后驱动技术和电压求和技术实现电路节点状态的强制变换, 可以有效地实现故障注入的目的。采用飞针探头工作方式的故障注入过程, 不需要插拔被测对象的器件, 也不需要 在被测对象上设置专门的故障注入接口, 因此相对于传统的采用总线介入方式, 本文提出的故障注入器在通用性和实用性方面得到了很大的提高。针对各种传感器和执行机构的电气特征设计的接口模拟电路具有良好的逼真度, 使故障注入器与电子控制器构成了完整的 FADEC 系统运行环境, 为 BIT 测试验证创造了便利条件, 同时可以模拟传感器和执行机构的各种故障模式。综合故障注入器与 PC 计算机配合, 构成智能化 BIT 测试适配器, 可以实现灵活的故障设置与注入、信息的回收与分析, 为电子控制器 BIT 性能验证提供了有效的手段。

参考文献:

- [1] Angelo Martucci. Fault Detection and Accommodation In Real Time Embedded Full Authority Digital Electronic Engine Controls[R]. *Proceedings of the 1998 International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition*, 1998, ASME Paper 98- GT- 155.
- [2] 孙健国. 现代航空动力装置控制[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [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, 1996.
- [4] Tsai T K, Lyer R K. FTAPE: A Fault Injection Tool to Measure Fault Tolerance[R]. NASA - CR- 198000.
- [5] Chillarege R. Understanding Large System Failure: A Fault Injection Experiment[R]. *IEEE 1989 AUTOTESTCON*, 1989: 356~363.
- [6] Karlsson J, Gunneflo U, Liden P, Torin J. Two Injection Techniques for Test of fault Handling Mechanisms[R]. *Proceedings of IEEE 1991 International Test Conference*, 1991: 140~149.

[7] Mei-Chen Hsueh, Timothy K Tsai, Ravisbanker K lyer. Fault Injection Techniques and Tools[J]. *Computer*, 1997, 30(4) : 75~82.

[8] 张天宏. 智能化 BIT 测试适配器研究[J]. 数据采集与处理, 1999, 14(4) : 462~466.

Zhang Tianhong. Study on Intelligent BIT Test Adapter [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 1999, 14(4) : 462~466.

[9] 卞春江. 航空发动机电子控制器 BIT 设计及验证技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.

[10] 韩熔. 如何评价电路在线维修测试仪的技术实现水平[J]. 医疗装备, 1998, (4) : 1~4.

Han Rong. How to Evaluate Technology Level in Realizing Online Service Test Equipment for Electric Circuits[J]. *Medical Equipment*, 1998, (4) : 1~4.

[11] 张天宏, 丁毅, 牟路勇. 合成电阻在发动机控制半物理仿真接口模拟器中的应用[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5) : 708~712.

Zhang Tianhong, Ding yi, Mou Luyong. Application of Electronic Synthesized Resistor to Matter-in-Loop Simulation Experimentations of Aero-Engine Control System[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(5) : 708~712.