

航空发动机数字电子控制器的BIT技术

BIT Technology of Aeroengine Digital Electronic Controller

南京航空航天大学能源与动力学院 张天宏



张天宏

教授, 博士生导师。主要从事航空发动机控制、测试及嵌入式系统应用开发研究。发表学术论文 40 余篇, 获省部级科技进步奖 4 项, 获国家发明专利 1 项。

航空飞行器的安全性一直是业界的热点话题, 如今针对航空发动机的健康管理技术也成为研究热点。如何通过先进的机内自测试 (Built-In-Test, BIT) 技术来保障航空发动机控制系统的可靠性, 并将航空发动机的健康管理技术同数字

针对航空发动机数字电子控制器 BIT 的特殊性, 研究电子控制器、传感器、执行机构及发动机系统的故障检测方法, 规范 BIT 电路、检测算法和程序, 并发展新型高效的检测技术和 BIT 有效性评价技术是非常有意义的。

电子控制器的 BIT 技术有机结合起来, 成为当前业界的一个新课题。

BIT 技术是指系统或设备内部提供的检测和隔离故障的自动测试。它通过附加在系统内的硬件和软件周期性或连续性地在线监控系统的运行状态并进行故障检测, 是提高电子系统可测试性, 进而提高系统工作可靠性、减少系统维护费用的关键技术。

BIT 技术最早由大型航空公司和军工企业发起, 并逐步制定了 ARINC604、ARINC624 等设计规范。为了减少机载设备维修时间、降低维修费用, 大型航空公司成功地将先进的 BIT 技术应用到他们生产的飞机中^[1]。波音公司在其客机设计中大量采用 BIT 技术, 使波音 747、757、767 等客机的故障隔离时间和

维修时间大大缩短, 提高了飞机的工作可靠性。军用飞机中, 如美军的 F-15、F-16、F/A-18、F-117、F-22、B-2 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。其中, F-15E、F-16C/D 的新型航空电子系统中由于采用了 BIT 技术, 保证了这 2 种飞机在海湾战争中的执行任务率高达 95%。

随着飞机和发动机性能要求的不断提高, 对发动机控制系统的功能、计算能力、响应速度、控制精度等都提出了更加严格的要求, 从而使控制系统从原来比较简单的液压机械式, 逐步向以微处理器为中心的全权限数字电子控制 (Full Authority Digital Engine Control, FADEC)

技术发展。相对于传统的液压机械式控制,数字电子控制器在体积、重量、性能和灵活性方面具有显著优势,因此新研制的航空发动机控制系统几乎全部采用数字电子控制器,而且为了适应新的应用需求,许多在役动力装置也提出了将液压机械式控制器改造为全权限数字电子控制器的需求。而制约FADEC技术得以广泛应用的一个关键问题就是可靠性。合理利用BIT技术,可以有效地保证电子控制器的可靠性,同时可以增强控制系统的可维护性^[2]。

航空发动机FADEC系统是一种典型的嵌入式实时控制系统,数字电子控制器一般安装于发动机的附件机匣上,工作环境恶劣,而对可靠性要求极高。相对于一般电子设备的BIT,航空发动机数字电子控制器的BIT具有其特殊性,不仅要完成电子控制器内部电路模块的故障检测,还要负责控制系统中传感器和执行机构的故障检测,并参与控制系统的重构,甚至负责对控制对象航空发动机及其子系统的状态监视与故障检测。实际上,在当今已实现工程应用的FADEC系统电子控制器中,仅专门负责故障检测与处理任务的软件就占了大部分,足见BIT的分量^[3]。

国内对航空发动机数字电子控制器的BIT研究起步比较晚,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,有关单位已经开展了这方面的研究工作,并取得了一些成果。在某些型号控制器的研制中,已经把BIT作为一项设计指标纳入研制任务书,并开展了实际的BIT设计。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。

针对航空发动机数字电子控制器BIT的特殊性,研究电子控制器、

传感器、执行机构及发动机系统的故障检测方法,规范BIT电路、检测算法和程序,并发展新型高效的检测技术和BIT有效性评价技术是非常有意义的。

航空发动机数字电子控制器BIT的常规方法

1 航空发动机FADEC系统的一般结构及其与BIT的关系

如图所示,航空发动机FADEC系统包括数字电子控制器、电子式传感器和电控式执行机构。数字电子控制器是核心,一般采取互为热备份的双通道冗余结构,每个通道一般包括信号调理模块、输入接口电路、处理器模块、输出接口电路、驱动电路和通信电路等,此外设置一个独立保护及通道切换管理模块,用于控制系统重构和超转限制保护。传感器包括感受发动机工作状态的转速传感器,各截面的温度、压力传感器,以及执行机构的位置传感器等。执行机构包括各种电液伺服阀、力矩马达、电磁阀等,用于控制燃油流量、喷口面积、导叶角度、放气活门开度等。

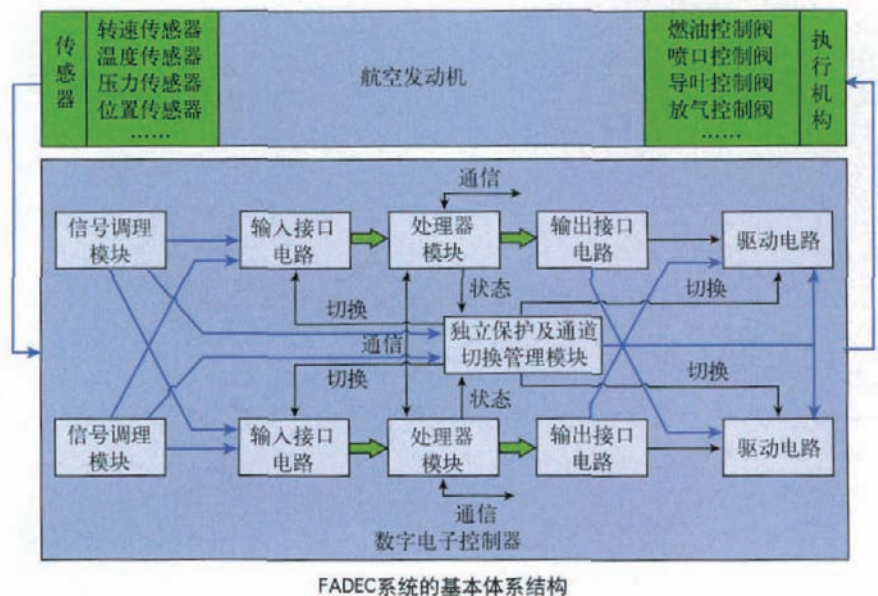
在FADEC系统中,数字电子控制器一方面负责航空发动机的所有控制功能,另一方面负责FADEC系统的故障检测和容错控制,以提高

控制系统的可靠性。此外,FADEC系统还可以实现航空发动机的状态监视,以提高发动机的运行可靠性。根据故障检测的对象,数字电子控制器的BIT包括3部分:负责电子控制器内部电路模块故障检测的基本BIT、负责传感器故障检测的传感器BIT和负责执行机构故障检测的执行机构BIT,它们共同构成了FADEC系统的机电BIT。

2 电子控制器的基本BIT

电子控制器的基本BIT负责对电子控制器内部的电路模块进行故障检测。航空发动机的电子控制器一般包括以下电路模块:CPU、RAM、ROM、A/D、D/A、DI、DO和通信电路等。

常规的方法是:采用功能测试法对CPU进行检测,即让CPU执行一段包含其全部指令集的测试代码,对运行结果和标准结果的对比可判断CPU是否正常;RAM的BIT方法应力图在尽量少的测试时间内检测到尽可能多的故障模式,可采用一种标准的March算法检测RAM的故障;对ROM的典型测试方法包括奇偶校验、循环冗余码校验、字节和校验,其中字节和校验最为常用;结合A/D、D/A转换接口电路的具体故障模式,采用联合回绕测试方



法,即在电路上提供一个固定的参考电压供 A/D 采集以判断 A/D 电路的正确性,进一步将 D/A 输出回绕到 A/D 的输入以判断 D/A 的正确性;DI、DO 及通信电路也采取类似的回绕法进行故障检测。

3 针对传感器的 BIT 方法

航空发动机控制系统中的传感器一般包括磁电脉冲式转速传感器、热电阻温度传感器、热电偶温度传感器、压阻式压力传感器、线性差动变压器式位移传感器、旋转变压器式角度传感器以及一些行程开关式位置传感器等。对于热电阻式温度传感器和压阻式压力传感器,通常通过检测电桥的一个端点电压,判断传感器线路是否断线或短路;对于线性差动变压器式位移传感器,检测 2 个副边信号的幅度和,判断激励线圈或副边线圈是否开路;热电偶信号利用专门的热电偶调理集成电路检测断偶或短路;转速信号在发动机起动期间应处于合适的范围,行程开关式位置信号在发动机起动前的状态是确定的,以此判断相应传感器是否处于正常工作状态。

大型航空发动机的传感器通常具有硬件冗余,可以根据同一个测点不同传感器的不一致性和有效范围综合判断传感器的故障状态。此外,可以利用发动机的机载模型,基于卡尔曼滤波技术实现传感器的解析冗余,根据该冗余信息可以诊断传感器硬故障,并在物理传感器全部失效时提供解析冗余,使数控系统仍能正常工作。

4 针对执行机构的 BIT 方法

航空发动机控制系统中的执行机构一般包括电液伺服阀、力矩马达、电磁开关阀、高速电磁阀、继电器、步进电机等。通常通过检测流过执行机构的电流或检测控制器端对应电磁线圈两端的电压大小,判断执行机构的线路是否断线或短路,并利用与执行机构相对应的位置或位移

传感器判断执行机构是否失效。

5 与控制系统重构容错技术的结合

航空发动机数字电子控制器 BIT 的任务不仅仅在于检测控制系统的故障,还要参与控制系统的重构。当 BIT 检测并确认某个通道中的某个环节故障时,一方面将故障信息记录下来或实时报告飞机系统,另一方面向切换管理模块发送切换信息,由切换管理模块利用冗余通道及时构成一个完整的控制回路,或构成一个权限降低的控制回路,从而提高控制系统的可靠性水平。对于单冗余执行机构故障的容错,一般将执行机构冻结在一个故障安全位置,控制能力下降。

航空发动机数字电子控制器 BIT 技术新的发展方向

1 智能 BIT 技术

在实际应用过程中,常规 BIT 技术不断暴露出诊断能力差、虚警率高、不能识别间歇性故障等问题。为了降低虚警率,提高识别间歇性故障的能力,把人工智能(AI)技术通过专用处理器和 AI 软件应用到 BIT 技术中,称为智能 BIT 技术。

与常规 BIT 相比,智能 BIT 不单纯根据 BIT 内部信息进行决策,还运用专家系统、神经网络等人工智能技术,并综合考虑了 BIT 输出、温度、振动等环境信息、BIT 历史信息、设备动态历史信息等,从而扩大了 BIT 故障诊断的数据信息来源,增强了常规 BIT 的决策能力,提高了 BIT 故障诊断准确性。而且智能 BIT 比常规 BIT 更不易受外界干扰,它使 BIT 本身能适应被测单元的特性变化,及时对被测单元进行跟踪、分析,能有效地检测间歇性故障,消除虚警。因此,智能 BIT 技术能够大大提高常规 BIT 的自适应性,使其具有连续监控、自动重构、知识冗余度、分散性自动测试和学习机制等特点,能够较全面地反映被测单元的

状态,避免常规 BIT “非此即彼”的简单决策方法导致的诊断失误^[4]。

智能 BIT 技术是武器装备测试系统发展的重要方向。美国为了解决 BIT 的虚警问题,开展了智能 BIT 技术研究并加以运用,使 F-22 的故障诊断能力比 F-15E 提高了近一个数量级。

2 在线式边界扫描技术

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。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,对边界扫描器件的所有引脚进行扫描以完成电路检测。“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、输出引脚的串行移位寄存器形成“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。

边界扫描技术为解决复杂电子系统的故障检测,提供了一套完整的、标准化的测试方法,能实现芯片级、板级和系统级的测试。一般的边界扫描测试系统适用于离线式的 ATE 设备。随着技术的进步,有可能将边界扫描控制器、扫描测试向量和诊断逻辑集成在目标电路系统中,从而实现在线式边界扫描测试,可以极大地简化 BIT 硬件电路的设计。

目前航空发动机电子控制器的核心电路所包含的复杂核心器件如 486、DSP、FPGA 和 PowerPC 等,都包含边界扫描接口,这就为在电子控制器中开展基于边界扫描的测试技术应用提供了基础。电子控制器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 2 种方式来提高故障检测

的覆盖率。

3 与航空发动机健康管理技术的结合

将BIT技术与航空发动机健康管理技术的结合,是对FADEC系统机电BIT思想的进一步扩展。

航空发动机健康管理系统包括发动机气路故障诊断、发动机振动故障诊断、发动机有关子系统(含控制、起动、点火、滑油、燃油、空气等子系统)的故障诊断及发动机的寿命管理。从实现方式上分为在线和离线2种,即机载和地面维护2部分。根据故障模式的危害性和机载工程的可实现性确定各个健康管理项目是否采取机载方式。机载工程可实现性要考虑相应状态参数的可测性、故障诊断算法的实时性以及工程实现的代价效益比等因素;故障模式的危害性主要考虑对飞行安全是否造成重要影响且需要及时诊断处理。

航空发动机的健康管理系统应紧密结合控制系统而建立,充分利用控制系统中原有的传感器信息资源,并利用FADEC控制器的实时处理和诊断结果,再辅助必要的额外监视措施,实现航空发动机系统的健康管理。

根据国外民用发动机现状,发动机状态监视和故障诊断的功能可由FADEC控制器实现。现有的FADEC控制器可以获取的发动机运行状态参数包括进气温度、排气温度、压力、压比、转速、燃油流量、引气状态、可调进口导向叶片和可调静子叶片位置等。根据状态监控和故障诊断的需要,还可增加发动机振动、滑油温度、滑油量、滑油压力、滑油滤旁通活门状态、燃油流量和压力等参数的采集。由于需要监视的参数多,应考虑增强FADEC控制器的处理能力,也可以考虑在FADEC控制器内增加一个专门负责发动机健康管理的通道。从FADEC控制器获取的信息通过数据总线传送给机载数

据记录仪进行保存,以便在地面维护时导出,进行离线故障诊断。

4 独立的BIT模块

随着BIT设计指标不断提高、BIT功能要求不断增强以及新型BIT方法的应用,传统的在原有软件基础上增加BIT功能的方式将导致BIT的设计与实现变得更加复杂。在不断完善BIT设计规范的基础上,研制专门的BIT模块,将BIT功能独立出来,有利于电子控制器的标准化设计^[5]。

常见的双通道冗余电子控制器一般设置一个独立超转保护与通道切换模块,可以基于FPGA技术设计一种包括BIT功能和独立超转保护与通道切换功能的专用模块,这样既可以实现独立于软件控制的高度可靠的保护功能,又可以利用FPGA的灵活性实现复杂BIT功能。

5 BIT验证技术

在BIT的方案论证和设计中,BIT故障检测覆盖率的评估是不可缺少的。理论上的估算可以预测控制系统的故障检测覆盖率,但人们更感兴趣的是系统组装后如何度量其实际故障诊断能力,因此,有必要开展针对BIT的故障注入技术研究,以支持BIT设计及验证试验,为BIT的设计和使用提供有效的技术保障手段。

在系统BIT初级设计阶段,通常采用成本较低、基于仿真的故障注入方法来评价一个系统的性能^[6]。此时的系统还处于总体设计阶段,实现细节都未确定,因而系统仿真是基于众多假设和简化进行的,其评价结果也是初步的。

在BIT的工程化实施和应用过程中,可通过物理的故障注入方法获得更为精确的BIT检测结果。为此,可以研制一种面向FADEC系统BIT验证的综合故障注入器,一方面它可以和电子控制器构成完整的控制回路,另一方面可以灵活地设置

FADEC系统的各种典型故障模式,以检查BIT的故障检测能力,从而为BIT的设计和验证提供手段。采用这种方法不仅可以在硬件一级或软件一级向系统注入故障,同时还可以观测故障注入的效果并获得系统失效的全过程信息。

结束语

BIT技术是保障航空发动机FADEC控制系统得以有效应用的关键环节,必需在发动机控制系统的研制过程中充分重视BIT测试性设计。

需要进一步完善FADEC控制系统的常规BIT电路、算法和相应软件,形成航空发动机电子控制器的BIT设计规范。为了适应日益复杂、高度集成的控制电路发展,要研究新型高效的BIT电路和算法,如在线式边界扫描测试技术等。尽量将BIT技术与智能容错控制、发动机健康管理结合起来,充分发挥BIT的效能。此外,要通过建立FADEC控制系统BIT的验证和评价环境,不断提高BIT设计水平。

参考文献

- [1] 曾天翔. 电子设备测试性及诊断技术. 航空工业出版社,1996.
- [2] 孙健国. 面向21世纪航空动力控制展望. 航空动力学报,2001(2):97-102.
- [3] Angelo Martucci. Fault detection and accommodation in real time embedded full authority digital electronic engine controls. ASME, 98-GT-155.
- [4] 温熙森,徐永成,易晓山,等. 智能机内测试理论与应用. 国防工业出版社,2002.
- [5] Colins M A. Universal framework for managed built-in test. International Test Conference,1993,21-29.
- [6] Arlat J, Aguera M. Fault injection for dependability validation: A methodology and some applications. IEEE Tran: On Software Engineering, 1990(2): 166-181.

(责编 淡蓝)