

航空发动机控制系统的实时仿真技术

Real-Time Simulation Technology for Aeroengine Control System

南京航空航天大学能源与动力学院 张天宏



张天宏

南京航空航天大学教授,博士生导师。主要从事航空发动机电子控制器设计、控制系统仿真及试验测试技术研究。发表学术论文 60 余篇,获省部级科技进步奖 4 项,获国家发明专利 4 项。

随着航空发动机技术的发展,其对发动机控制系统的设计要求日益提高。全权限数字电子控制(Full Authority Digital Electronic Control, FADEC)是现代航空发动机的重要特征之一。FADEC 系统是一种典型的复杂嵌入式控制系统,具有极高的可靠性要求。航空发动机控制系统

鉴于航空发动机控制系统的复杂性及行业特殊性,采用成品实时仿真平台进行控制系统开发时需要进行适应性改造,以保证仿真的便利性和置信度。在充分掌握实时仿真机理、领会仿真意图的前提下,自主开发针对航空发动机控制系统的专业仿真接口适配器,甚至全套实时仿真平台,无疑将是一种非常有效的技术途径。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.12.026

设计正面临着控制任务多、复杂度高、难度大且需求多样化的技术挑战,传统的量体裁衣和基于经验的设计流程已经不能适应现代航空发动机控制技术的发展需求,迫切需要采用先进的设计理念和高效的研发手段加以应对。

美国英国等技术先进国家在航空、汽车等复杂嵌入式控制系统研制领域已广泛采用基于模型的设计(Model Based Design, MBD)理念。所谓 MBD 是指,在整个控制系统的开发过程中使用系统模型作为载体进行方案评估、验证和目标系统的发

布,整个开发流程呈现一种从上至下的技术分解以及从下而上的系统综合过程,即所谓的“V”形体系结构。与传统的基于经验的设计方法相比,基于模型的设计方法有助于更好地理解备选设计方案和权衡设计要素,从而能够对复杂系统进行高效的优化设计。设计师采用图形化的工具快速构建各种系统模型,将现有的 C 代码与标准控制模块库整合,实现基于代码复用的自动代码生成,使嵌入式控制系统设计效率大幅度提高。

基于 MBD 理念开展复杂嵌入式控制系统研发的必要条件是拥有一

种合适的实时仿真平台,这种仿真平台一方面能实时运行控制对象或控制器本身的模型;另一方面要具备与控制器实物或控制对象的信号接口能力。基于这样的仿真平台可以构建控制器快速原型(RCP),或者开展控制器实物在回路仿真(HIL)^[1-2]。通过实时仿真,能够及时发现各种模型之间的差异,而不需要等到设计周期完成后才发现存在的问题。

目前,国外已推出了多种商用化的实时仿真平台,最具代表性的是美国 ADI、德国 dSPACE、英国 ADS2 和加拿大的 RT-Opal 公司的实时仿真平台。dSPACE 的实时仿真系统 Simulator 在航空航天领域的复杂嵌入式系统开发中已经得到广泛应用,它与 MATLAB/SIMULINK 无缝集成,可以直接生成代码下载到实时仿真平台上。ADI 公司一直着眼于为汽车、航空航天、国防军工等领域的用户提供复杂控制系统的实时仿真产品,其 AD10、AD100 仿真系统在 20 世纪 80~90 年代就享誉实时仿真领域,引领了后来 AD RTS 系统和 RTX 系统的发展。ADI 的 RTX 和 RTS 系列仿真平台提供独具特色具有故障注入功能的中断板、具有自检及自校能力并可快速配置的接口面板,可用于构建 RCP 和开展 HIL 实时仿真。

虽然国内有关单位先后以极其昂贵的价格引进了 dSPACE 和 ADI 等公司的实时仿真平台,但这些产品的内部实现机制不开放,而且针对性不强,部分信号接口的模拟逼真度不理想,难以直接使用。近年来由于相关产品的航空高技术应用背景,西方国家已经开始限制其出口到中国。

为了避免我国航空高技术领域受制于人,我们有必要突破 FADEC 系统实时仿真技术关键,研制具有自主知识产权的仿真接口设备。而且,未来 20 年我国航空发动机市场规模巨大,必将孕育一个巨大的 FADEC 系统设计和售后服务市场,我国对高

性价比的实时仿真设备有大量需求,急需研究。

本文从工程应用的角度阐述航空发动机控制系统实时仿真的必要性、实时仿真的技术要点,并探讨了实时仿真涉及到的几个关键技术问题,为国内进一步开展航空发动机控制系统的实时仿真技术研究提供参考。

航空发动机控制系统实时仿真的必要性

航空发动机 FADEC 系统是一种典型的复杂嵌入式实时控制系统,它包括数字电子控制器、传感器和执行机构。数字电子控制器是 FADEC 系统的核心,一般采用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、驱动电路和通信接口电路等,此外还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;另一方面采取自检(BIT)技术实现 FADEC 系统的故障检测和容错控制,提高控制系统的可靠性^[3]。

此外,FADEC 系统还可以实现航空发动机的状态监视和健康管理,以提高发动机的运行可靠性。

随着航空发动机技术的发展,控制变量增加、功能要求提高,使得 FADEC 系统的复杂度不断加大,研制难度和周期增加,传统的量体裁衣和基于经验的设计流程已经不能适应现代航空发动机控制技术的发展需求。通常 FADEC 系统和发动机的研制过程是并行推进的,在实际用于真实发动机控制之前,如何有效开展 FADEC 系统的设计和验证工作是一个迫切需要解决的问题。

MBD 设计理念及实时仿真技术为 FADEC 系统的设计和验证提供了一个有效的途径。FADEC 系统的开发过程是一种系统工程,其研制过程符合系统工程的基本方法,即从上至下的技术分解以及从下而上的逐级综合和验证过程,如图 1 所示的“V”形体系结构^[4]。

在 FADEC 系统开发的每一个阶段都需要进行全面的测试。首先是电子控制器的硬件与软件的综合和验证,即电子控制器 HIL 实时仿真;第二步是电子控制器与液压机械系统及传感器的综合和试验验证,称为半物理实时仿真。FADEC 系统研制流程中的实时仿真环节如图 2 所示。经过全面的实时仿真验证之后,才会开展地面台架试验、高空台试验及飞行试验验证。

基于控制器 HIL、控制系统半物

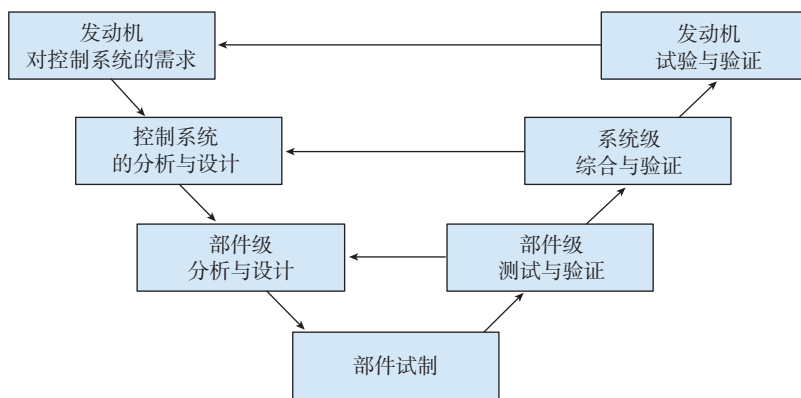


图1 FADEC系统的研制流程

理仿真,可以从工程可行性的角度,对控制算法、逻辑、程序的正确性以及控制系统软硬件和参数的匹配性进行实时验证。通过充分的实时仿真试验,特别是各种故障模式和极限工作场景的模拟试验,为进一步开展台架试验奠定基础,规避试验风险,缩减试验周期,从而可以极大地提高控制系统的研制效率和降低研制成本。

航空发动机控制系统实时仿真平台的技术特征

1 实时仿真的定义

仿真是指利用系统模型对实际

的或设想的系统进行动态模拟试验,现代仿真技术一般基于计算机上运行的数值模型程序来模拟被研究系统的动态特性,实时数字仿真一般采用固定的时间步长。实时数字仿真要求在给定的时间步长内完成系统的所有函数和方程的计算过程,并且正确输出系统的所有状态和变量。实时仿真时序图如图3所示^[1]。

由于计算机计算能力以及不同系统复杂度的差异,计算过程有可能比被模拟系统的实际时间进度快些或者慢些,如图3(a)和图3(b)所示,这两种仿真过程统称为非实时仿

真或离线仿真,其中图3(a)也叫加速仿真。离线仿真是为了尽快地获取仿真结果,仿真计算的速度取决于使用的计算机的计算能力和系统的复杂度。在实时仿真中,仿真的准确性不仅仅取决于计算结果的精度,同时也取决于求解计算结果所花费的时间长度。图3(c)表达了实时仿真的时间序列关系,要使一个实时仿真有效,实时仿真器在仿真中需要在精确的时刻产生内部变量和状态输出,使其与实际物理对象在相应的时间点上保持一致。实际上,在给定的时间步长内,如果仿真计算过程所花费的时间比实际物理对象经历的时间步长短,就能达到上述实时性的要求。实时仿真与加速仿真的不同之处是,内部变量和状态输出的更新应该发生在仿真步长所确定的时刻。如果仿真计算时间超过给定的时间步长,则被认为是超时,从而导致实时仿真的失效。

因此,只要仿真计算过程不超时,并对仿真计算结果的更新加以时间控制,就能做到实时仿真。而仿真计算是否超时和仿真步长的确定密切相关。根据经验,仿真步长一般取系统中最快环节最小时间常数的5%~10%。比如航空发动机的转速对燃油流量响应的最小时间常数在0.4s,那么可取仿真步长为20~40ms,而在燃油调节器等执行机构小回路中最小时间常数在0.1s,那么这些小回路的仿真步长可取5~10ms。对于用于压气机主动控制的高频响执行机构,其带宽高达500Hz,那么对应的仿真步长应在30μs以内。

对于一个复杂的大型系统,为了提高整体仿真性能,有可能针对不同环节的动态特性差异而采用不同的仿真步长,即多速率仿真,甚至将仿真计算过程分布于多个并行计算节点上,这时需要处理好节点之间仿真时刻的同步问题。对于因为通信接口造成仿真节点之间的时延,以及因

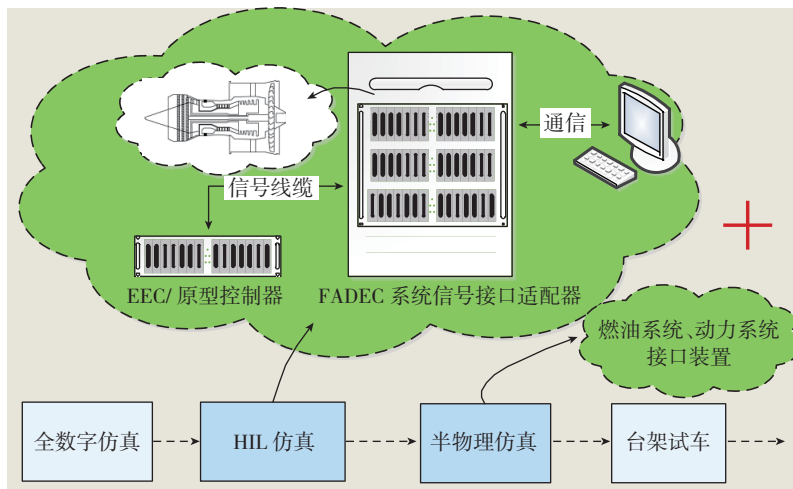


图2 FADEC系统研制流程中的实时仿真环节

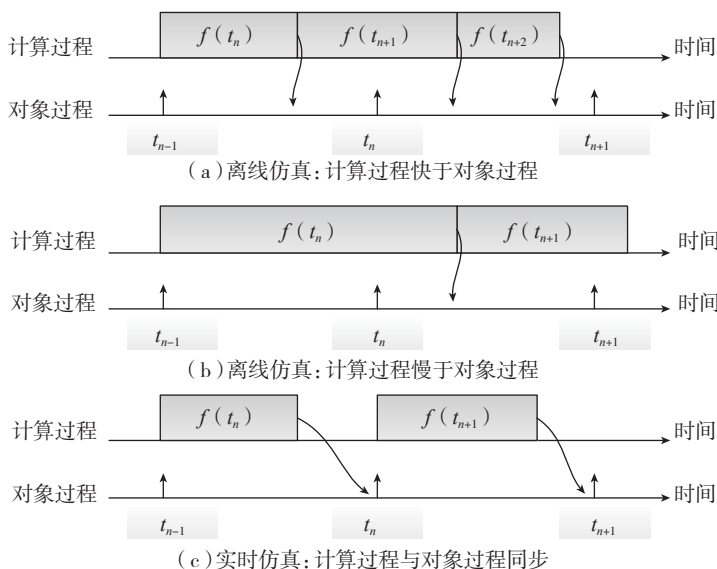


图3 实时仿真时序图

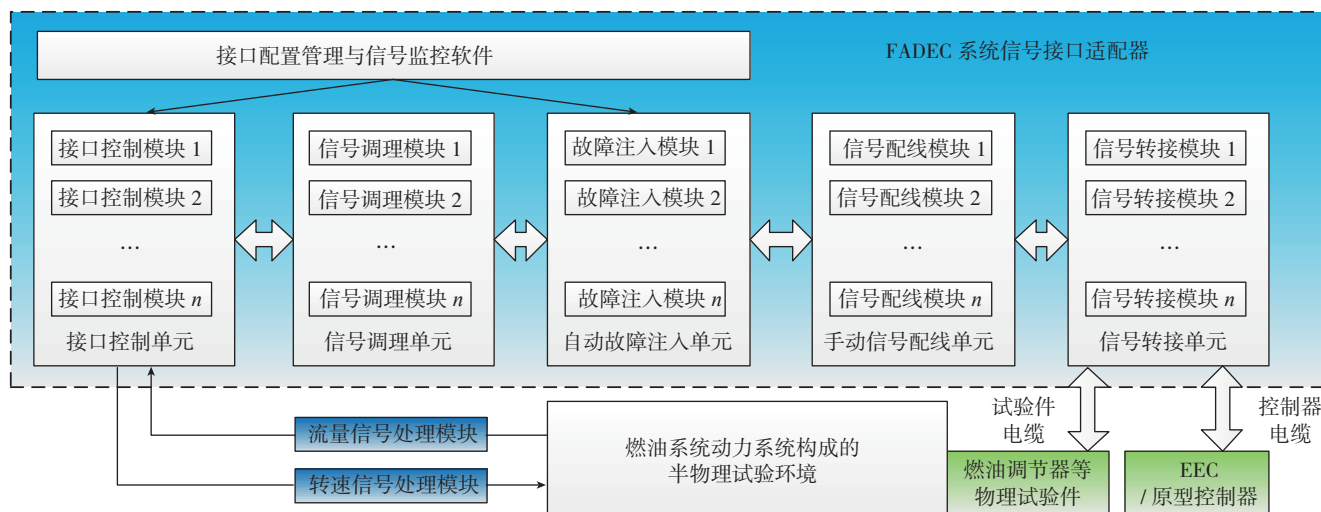


图4 开放式、模块化的仿真接口设备总体架构

为不同节点采用的仿真步长不一致,应采取插值补偿措施以保证仿真系统的精度。

2 实时仿真平台技术要点

纵观国外各种先进的实时仿真平台,它们共同的技术特点如下:(1)拥有先进的实时计算平台,一方面具备带浮点处理能力的高性能处理器,最好采用与目标应用一致的嵌入式控制器;另一方面具备多任务实时调度管理能力的实时操作系统,从而便于进行多任务实时仿真控制。(2)拥有配套的开发平台,方便开展模型开发以及C代码或目标代码自动生成,一般借助MATLAB的软件资源加以实现。(3)拥有丰富的接口适配能力,提供与控制器或控制对象之间的信号接口。(4)提供试验管理软件,便于试验过程的管理、监视与数据处理,有的还提供基于脚本的试验过程自动化能力。

3 总体架构

在分析国外先进仿真平台体系结构的基础上,本文给出一种开放式、模块化的仿真接口设备总体架构,如图4所示^[5]。该架构将接口控制、信号调理、故障注入、信号配线和信号转接单元相互分离,而且每个单元也采取群组化、模块化组织结构。这种架构既适用于控制器的HIL仿

真试验,也适用于控制系统的半物理仿真试验。

相对于dSPACE的基于专用硬件平台或者ADI的基于PCI总线的板卡结构形式,本项目的体系架构显著增强了扩展性和维护性。由于接口控制单元与信号调理单元的相互分离,接口控制单元允许采用基于PCI总线、PXI总线、VXI总线的板卡或者是基于SPI总线的CRIO模块架构,甚至可以采用独立的嵌入式系统模块,开放性好,便于升级。而信号调理、故障注入、信号配线和信号转接单元的相互分离,又使仿真接口的扩展配置更加灵活,使用维护也更加方便。

航空发动机控制系统实时仿真关键技术问题

1 接口模拟技术

由图2可见,开展HIL仿真的重要环节是FADEC系统信号接口适配器,它提供发动机模型程序和电子控制器之间的接口界面。FADEC系统信号接口适配器的核心是接口模拟电路,主要包括发动机转速、温度、压力以及执行机构的位置传感器的接口模拟电路以及执行机构伺服阀或电磁阀线圈特性的模拟电路。接口模拟的关键在于模拟的逼真度,包

括模拟的精度、实时性、负载特性、故障特性。以压阻传感器接口模拟为例,不仅仅要能产生0~100mV的信号输出,而且要提供四端口的压阻模拟桥路,桥路阻抗与实际传感器要保持一致,可以接受电子控制器的电压激励,激励电压的大小对输出信号的影响规律要和实际传感器一致。通过逼真的接口模拟,一方面要满足电子控制器的正常信号采集和控制需求,另一方面能保证电子控制器的自检电路和程序工作正常,同时通过接口模拟电路对不同故障模式的模拟,可检测电子控制器的故障处置能力。

由于不同发动机所配置的传感器和执行机构的特性有差异,电子控制器的信号调理、驱动以及自检电路也有差异,在接口模拟时应根据实际情况对接口模拟电路的增益、滤波带宽、内阻抗、接地特性、参考电平等进行适应性调整,做到与被测电子控制器的最佳匹配。目前还难以设计一种通用的接口模拟电路满足各种控制系统的需求,根据具体的电子控制器和测试需求自主设计有针对性的接口模拟电路,在实际使用时会更加得心应手。

2 动力系统的小惯量电机驱动系统及动态特性的补偿

在开展半物理仿真试验时,燃油调节器一般由发动机的转子驱动,而燃油流量又用于调节发动机的转速,作为发动机控制系统中的重要控制回路,其仿真回路中额外的动态环节必然影响仿真试验的置信度甚至仿真系统的稳定性,因此必须选用小惯量电机来模拟发动机转子的运行。考虑到转速对燃油流量响应的最小时间常数在 0.4s 左右,小惯量电机的机电时间常数应尽量低于 0.1s。这种小惯量电机一般采用调速性能优良的直流电机或交流永磁同步伺服电机,它们的转子直径较小,因此具有较小的转动惯量。

但是,小惯量电机总是存在一定的机电时间惯性的,这个动态环节必然导致转速控制回路响应特性的滞后。为了进一步提高仿真置信度,有必要对发动机模型的动态特性进行修正,比如适当减小模型的时间常数,以补偿因为小惯量电机带来的滞后效应。

3 流量信号的高精度实时采集

精确快速地测量燃油调节器输出的燃油流量是发动机控制系统半物理仿真试验的一项关键技术。燃油流量是发动机仿真模型的关键输入参数,直接参与发动机控制系统的闭环仿真,流量测量的实时性和精确性直接影响仿真系统的有效性和置信度。

目前一般使用涡轮流量计来测量燃油流量,流量计输出的脉冲信号频率代表流量大小。常规的处理方法是在一定的时间间隔内对脉冲计数,从而得到信号频率,即测频法。由于涡轮流量计信号的频率一般只有几十至几千赫兹,为了保证测量精度往往需要较长的测量时间才能得到测量结果,因此实时性差。如采用测周法,可以保证实时性,但由于涡轮叶片制造公差的原因,信号周期不稳定,从而导致测量误差。如采用 F/V 变换的方法,似乎可以

避开测频或测周的实时性问题,但实际上 F/V 电路的动态特性并不理想。也有人采取信号倍频的方法试图来提高测频法的实时性,但是基于锁相环技术的倍频电路的动态特性也不理想。

基于循环周期数的动态流量测量法可以最大限度地保证流量测量的实时性和精确性^[6],其原理是:先通过连续脉冲周期采集并经对比分析可得循环周期数,该循环周期数与涡轮流量计叶片数量相同;将包含循环周期数个连续脉冲信号定义为脉冲群,每个新的脉冲到达时重新构建脉冲群,滚动采集脉冲群周期,并计算当前脉冲群的平均周期;由当前平均周期计算流量计的当前频率,从而得到当前流量。基于循环周期数的动态流量测量法,解决了现有技术中涡轮流量计信号处理的实时性与精确性之间的矛盾,可获得在有限频率下最快速和最准确的测量结果。

4 计量装置的背压模拟

半物理仿真试验中燃油调节器的计量流量与当量喷嘴的背压关系密切。背压不同,相同流量下喷嘴前的压力也不同,从而导致燃油调节的效果有差异,影响了仿真试验的置信度,因此要尽量根据发动机的实际工况进行背压的模拟。在实际发动机上,喷嘴后的背压就是压气机后的压力,因此要根据发动机模型计算出的压气机出口压力实时调节当量喷嘴后的背压。一种办法是通过在当量喷嘴后的管路上增加一个自动背压调节阀,通过模型计算机对背压调节阀的开度控制保证背压与压气机出口压力一致。另一种方法是模拟燃烧室的雾化喷射环境,即通过对喷嘴后的气压腔的压力控制,更加逼真地模拟喷嘴背压,因此仿真试验的结果与实际发动机的运行情况更逼近,但配套的试验设备更加复杂,要解决好气压模拟

腔内的气体压力和燃油液位的控制问题,成本也高。

结束语

MBD 设计理念可有效应对航空发动机控制系统的复杂研制需求,而 MBD 的核心工作内容是实时仿真分析。实时仿真技术将控制器及控制算法和逻辑程序提前纳入到复杂控制回路中,并可以模拟各种故障模式及极限工作场景,充分验证和评估控制器的接口能力、处理能力以及控制算法和逻辑程序的正确性,非常适合面向航空发动机的复杂嵌入式控制系统的前期开发研究,可有效缩短开发周期,降低研制费用和试验风险。鉴于航空发动机控制系统的复杂性及行业特殊性,采用成品实时仿真平台进行控制系统开发时需要进行适应性改造,以保证仿真的便利性和置信度。在充分掌握实时仿真机理、领会仿真意图的前提下,自主开发针对航空发动机控制系统的专业仿真接口适配器,甚至全套实时仿真平台,无疑将是一种非常有效的技术途径。

参考文献

- [1] Bélanger J, Venne P, Paquin J N. The What, where and why of real-time simulation. Opal-RT Technologies Technical Paper, 2010:37-49.
- [2] Dufour C, Andrade C, Bélanger J. Real-time simulation technologies in education: A link to modern engineering methods and practices// INTERTECH 2010 Ilhéus, Bahia, Brazil, 2010:1-5.
- [3] 张天宏. 航空发动机数字电子控制器的 BIT 技术. 航空制造技术, 2009(18):42-45.
- [4] 姚华. 航空发动机全权限数字电子控制系统. 北京:航空工业出版社, 2014.
- [5] 林忠麟. 高置信度 FADEC 接口模拟技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [6] 王松, 张天宏, 云建峰. 基于涡轮流量计的动态流量测量方法研究. 测控技术, 2012,31(11):24-27.

(责编 春早)