

高推重比发动机全权限数字电子控制系统 研究和半物理仿真试验验证

刘爱萍

(南京航空航天大学, 南京 210016)

姚 华

(航空动力控制系统研究所, 无锡 214063)

摘要:以第4代战斗机的动力装置——高推重比发动机为控制对象,攻克了多项全权限数控系统的关键技术,完成了高推重比发动机数控系统总体方案设计和多变量控制技术的工程化研究,适合多变量控制、轻质量、小体积的电子控制器和轻质量、小体积的机械液压装置的研制,以及高推重比发动机全权限数控系统的半物理仿真试验。

关键词:涡扇发动机 全权限数字电子控制 半物理仿真

Investigation and Semi-Physical Simulation of the FADEC System on a High Thrust-Weight Ratio Engine

Liu Aiping

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Yao Hua

(Aviation Motor Control Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: Great progress on key technologies of the full-authority digital electronic control (FADEC) system, such as overall project design of the FADEC system, application of the multivariable control technology, development of the lightweight and compact electronic controller, development of the lightweight and compact hydromechanical control devices, and semi-physical simulation on the FADEC system, have been made for the 4th generation fighter power plant—high thrust-weight ratio engine. The research works are reviewed and summarized.

Key words: turbofan engine; full-authority digital electronic control (FADEC); semi-physical simulation

1 引言

综观现代高性能航空发动机控制系统的发展,由于对飞机超机动性、超声速巡航、高推重比的追求,一方面使得控制变量越来越多,控制功能越来越复杂,另一方面又要求控制系统进一步缩小体积,减轻质量,以适应严峻的环境条件。为此,进行了高推重比发动机全权限数字电子控制系统研究和半物理仿真试验验证。

2 高推重比发动机数控系统总体方案设计

高推重比发动机数控系统是首次研制的涡扇发动机全权限数字电子控制系统,控制变量为10个,控制功能有20余种,其电子控制器为发动机机载。

高推重比发动机数控系统采用双通道结构,一个通道主控,另一通道热备份,当一个通道出现故障时,系统能自动平稳地切换到另一个通道继续工作。

收稿日期: 2002-10-31

第一作者简介:刘爱萍(1965—),女,高级工程师,南京航空航天大学在读博士研究生,从事航空发动机数控系统研究。

为了适应控制变量和控制功能的增多,在总体设计方面采用了综合设计及多变量控制技术,控制器相应地提供了较大的内存空间和较快的计算速度。考虑到先进的多变量控制算法和故障诊断技术需要进行大量的高精度计算,采用了带浮点处理器的双CPU结构。系统取消了液压机械备份,采用了双-双余度(电子控制器双通道,液压机械计量装置双余度)的总体结构,增加了电液转换装置和位移传感器的硬件余度,从而使数字电子控制部分的可靠性提高,并且使系统的质量大大减轻。采用多变量控制技术来实现发动机各种状态的控制规律。另外,在控制系统的方案中,还充分考虑了与飞控系统的通讯接口以及矢量推力控制的信号接口,以适应飞推综合控制的需要。图1示出了高推重比发动机数控系统的组成结构原理。

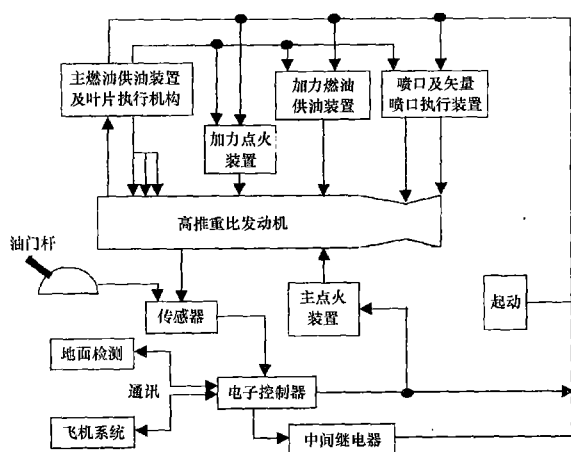


图1 高推重比发动机数控系统的组成结构原理框图

3 多变量控制技术的工程化研究

为了将多变量控制技术应用于高推重比发动机数控系统,在没有准确的高推重比发动机实时非线性数学模型和线性状态空间模型的情况下,对相对成熟的某型涡扇发动机实时非线性数学模型进行改造,得到一个在各重要稳态点的工作参数均与高推重比发动机的设计参数相符合的近似的高推重比发动机实时非线性数学模型,并在此基础上研究适合多变量控制规律研究的发动机线性状态空间模型。

多变量控制技术应用于发动机数控系统在国内还属首次,因而控制算法的选择、应用范围的确定均是值得研究的问题。经过认真探讨,认为线性二次型最优控制算法工程性强,易于实现,是多变量控制理论中最成熟的部分,可用于发动机从慢车至中间状态

的主状态控制。为了达到无差控制目的,在线性二次型最优控制的基础上,建立了带积分器的最佳控制器。选取高压压气机转速和风扇转速为状态变量,选取主燃烧室供油量和喷口面积为控制变量,选取高压压气机转速、涡轮落压比、推力和风扇转速为输出变量。为了使该控制算法适应发动机大偏差、非线性、时变系统,采取分段线性化的方法,从发动机模型慢车到中间状态共选择了8个稳态工作点进行线性化,各稳态点之间的模型则用线性插值法得到。

在MATRIXx环境下进行了多变量控制器的离线设计和数字仿真,得到8组反馈增益阵。将设计结果在控制软件中加以实现,编码调试,然后在具有发动机实时非线性模型的综合仿真台上进行全数字仿真及含电子控制器实物的数字仿真。最后在涡扇发动机数控系统半物理仿真试验台上进行了试验。试验表明,采用多变量控制可以改善发动机数控系统的动态和稳态品质,并且有利于进一步挖掘发动机的潜力。

4 适合多变量控制、轻质量、小体积的电子控制器研制

提高电子控制器的性能和可靠性,减轻质量,减小体积,增强耐恶劣环境的能力,并使其适应系统多变量控制的需要,是电子控制器设计的主要目标。

为了提高控制器的性能,CPU采用了INTEL386EX嵌入式数字微处理器和INTEL387协处理器支持浮点运算,存储器采用256KEPROM、2M的RAM和2M的flash RAM。控制器采用对称双通道的结构,2个通道有通讯联系,以便互相交换数据。控制器与飞机计算机通过RS422A通讯口联系。每个通道中关键传感器和输出驱动电路均采用双余度的电路。设计完善的BIT电路结合故障诊断软件可使故障检测覆盖率达95%以上。在电子控制器的设计、工艺、元器件的选用中充分考虑了可靠性的要求,采用了降额设计、抗干扰设计、电磁兼容性设计、热设计等措施。在电子控制器小型化设计中,采用了大规模集成电路、表面贴装器件、二次集成电路等技术。共研制了3类2次集成电路,分别为用于伺服位置反馈闭环和V/I转换驱动及故障隔离等功能的电路,用于发动机转速信号滤波、隔离、信号转换功能的电路,以及用于开关量输入信号的滤波、隔离、电平匹配和信号转换功能的电路。研制了用于防电压跌落、高电压尖峰抑制等的功能模块电

路。通过合理地分割功能模块改善了结构设计。通过机箱结构的小型化设计,使带燃油冷却机箱的电子控制器的尺寸、质量均能满足总体要求。

利用热设计技术设计了全封闭的电子控制器油冷机箱。采用薄壁、高强度、轻质铝合金材料攻克了高强度铝合金焊接性差、双层薄壁结构加工难度大的工艺难题,研制出轻质量的燃油冷却机箱,并且研制了三维同效减振器。试验表明,控制器能抵御215℃的高温、20g的高强度机械振动等恶劣环境的影响,保证了电子控制器的正常工作。

5 轻质量、小体积的机械液压装置的研制

高推重比发动机的主燃油流量比现役发动机增加1倍以上,加之增加了矢量推力控制,使得执行机构更加复杂。而高推重比又要求大幅度减轻液压机械装置的质量,因此,液压机械装置的设计是一项难度较大的关键技术。

高推重比发动机数控系统的液压机械装置由离心式燃油增压泵、带导叶执行机构的主泵-计量装置、加力燃油泵、加力燃油计量装置、加力燃油分布器、喷口油源泵(含矢量喷口控制油泵)、喷口喉道面积控制和矢量喷口控制执行机构等附件组成。

(1) 带导叶执行机构的主泵-计量装置由主泵、主燃油计量装置、风扇导叶控制执行机构、压气机导叶控制执行机构、防喘控制执行机构等部件组成,将其中的大流量主燃油泵作为一个单元体单独研制,其余机构则作为另一个单元体(主燃油供油装置)进行研制。

(2) 主燃油供油装置集主燃油计量、风扇导叶控制机构、压气机导叶控制机构、防喘控制机构4种功能于一体。主燃油计量装置采用的是压差回油计量方式,与齿轮泵相适应。控制油压使用了定压油和1/2定压油,使得计量平稳可靠、双向动态特性一致。计量窗口采用旋转活门,并与控制活门分离。采用双余度的电液伺服阀作为电液转换装置来控制计量活门,当一个电液伺服阀失效时,能通过转换电磁阀自动切换到另一个电液伺服阀进行控制。计量活门的位置用双余度的LVDT测量。这些措施保证了计量装置具有较高的可靠性。风扇导叶和压气机导叶控制执行机构具有简洁的结构形式,当数控发生故障时,能保证导叶回到安全位置。防喘机构能保证高速可靠地完成防喘切油,同时在数控故障恢复时能自动恢复切油前的状态。

(3) 加力燃油供油装置共有3路计量。每一路计量采用的都是压差节流式的计量方式,与离心式加力泵相适应;直接采用高压油作为控制油,使其结构简单;侧向进油方式避免了进油的瞬间对计量活门冲击造成的失控;通过一系列的连锁活门解决了加力1区至3区的顺序供油和逆序切油的同步问题。紧凑的结构设计降低了加力供油装置的质量。从原理图到工程图各阶段全部采用CAD设计,壳体的加工采用了CAM技术。

主燃油泵采用高转速、高压力的齿轮泵,加力燃油泵采用高转速、高压力的离心泵,来达到提高供油量、减轻质量的目的,喷口油源泵采用柱塞泵以提高供油压力。

按照传感器小型化以及高可靠性的要求,研制了用于主燃油计量活门位移以及加力0区、1区、2区计量活门位移的双余度LVDT位移传感器。

总之,在执行机构和计量装置的研制过程中,采用了新型结构,以减轻质量、缩小体积、提高控制精度;取消了机械液压备份,同时采用了双余度的电液转换装置和位移传感器,以增加可靠性。

6 控制系统含实物数字仿真及半物理仿真

电子控制器研制出来之后,先在涡扇、涡喷发动机综合数字仿真台上进行了含电子控制器实物的数字仿真,对控制方案进行了初步验证。当控制系统其他各部件研制出来后,先进行部件性能试验,然后进行系统总成,电子控制器、机械液压装置以及部分传感器都采用实物,发动机以发动机数学模型代替,在半物理仿真试验台上进行了试验验证。

在高推重比发动机数控系统全状态的含实物数字仿真中,对系统从起动→慢车→中间状态→加力的全过程进行了试验,并且对控制参数及控制逻辑进行了不断改进和调整,达到了比较满意的稳态及加、减速性能。

高推重比发动机数控系统的半物理仿真试验在涡扇发动机数控系统半物理仿真试验台上进行,试验项目为:

(1) 主燃油控制回路分系统试验,包括静态试验、阶跃试验、斜坡试验和应急试验;

(2) 加力供油控制回路分系统试验,包括静态试验、阶跃试验、斜坡试验和应急试验;

(3) 喷口控制回路分系统试验,包括静态试验、阶跃试验和斜坡试验;

(4) 系统半物理仿真试验,包括稳态试验、动态试验、应急试验以及防喘与消喘试验。

试验表明,高推重比发动机数控系统的所有试验件之间具有良好的工作匹配性,各个控制回路的动、静态特性满足了系统要求,联合工作时具有较好的控制品质;数控系统逻辑控制准确,在故障出现或应急状态时能按给定的工作逻辑自动切换到相应的控制方式。根据发动机调节计划,控制主燃油流量、加力燃油流量、喷口面积和可调叶片角度等控制量,完成了发动机在慢车、额定状态、中间状态、最大加力等各种状态下的稳态控制,以及加速、减速、接通加力、断开加力等过渡过程的控制,稳态精度高,跟踪性能好,过渡过程平稳、快速,达到了设计要求。图2示出了系统半物理仿真试验曲线(局部)。

7 结论

通过对该项目的研究,设计和研制出了一套高性能的涡扇发动机全权限数字控制系统,突破了多项关键技术,积累了许多宝贵经验,为高推重比发动

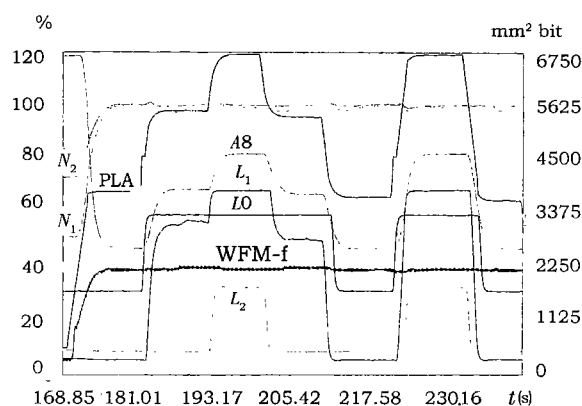


图2 系统半物理仿真试验曲线(局部)

机全权限数控系统的进一步工程化应用打下了坚实的基础。同时,其总体设计技术、多变量控制技术、电子控制器及机械液压装置的轻质量、小型化技术也可推广应用到其他型号的发动机上,从而提高我国发动机数控系统的研究水平。

参考文献(略)

(责任编辑 索德军)

(上接第4页)

4.3 试验参数

线速度:10~30m/s;

密封压差:0.01~0.10MPa;

试验腔温度:80~160℃。

4.4 试验结果与讨论

由 AlNiCo5 材料作为永磁材料的磁力端面密封装置在 50h 性能试验和 150h 耐久试验中发生滑油泄漏。分解检查密封装置,发现在磁性静环摩擦表面有明显磨损,并有犁沟状周向划痕。该密封装置在发动机的随机试车、试飞考核中也有多次泄漏,磁性静环摩擦面的磨损状态与试验器上的试验件相类似。为改善动、静环之间的摩擦、磨损性能,采取了在磁性静环表面镀铬的措施。磁性静环表面镀铬的密封装置在 50h 性能试验中由于铬层局部脱落也发生了滑油泄漏,该种密封装置没有装在发动机上进行随机考核。针对磁性静环表面镀铬产生铬层局部脱落现象,改用在磁性静环表面喷涂碳化钨涂层。磁性静环表面喷涂碳化钨涂层的密封装置在 50h 性能试验、150h 耐久试验、500h 寿命试验中表现出优

异的密封性和耐磨性,没有任何滑油泄漏,摩擦面磨损甚微,状态优异,在发动机上的随机试车、试飞考核中,多件分别经过数十乃至上百小时的运转也从未发生任何故障。

5 结论

对磁力端面密封装置的结构设计、材料性能要求及制造工艺、基本的理论计算、试验件的试验室试验和随发动机的各种考核试车、试飞等方面进行了广泛、深入的研究工作,从而基本掌握了磁力端面密封装置的设计、制造技术,并为发动机附件传动密封提供了一种新的性能优良的密封装置。

致谢

陈聪慧、张振波、赵宗坚等对本项研究给予了大力支持,在此表示感谢。

参考文献(略)

(责任编辑 刘静娟)