

某型涡扇发动机数字式综合电子调节器研制

吴勇¹, 谢寿生¹, 彭靖波¹, 唐奇², 武卫¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军驻川西地区代表室, 四川 成都 610100)

摘要:为解决某型涡扇发动机模拟式综合电子调节器普遍存在的使用寿命与发动机使用寿命不相匹配、监控水平不高、虚警不断等问题,以该型综合调节器为研究对象,完成了该型发动机数字式综合电子调节器的软、硬件系统设计。为了提高系统的可靠性,调节器内部设计了双余度硬件系统,并由系统的切换电路选择工作正常的硬件参与工作。工作过程中控制系统采用热备份的工作状态,并接收主控通道的工作信息,使备份通道始终跟随主控通道,从而保证控制系统平稳转换。最后对所设计的数字式综合电子调节器进行了试验,试验结果表明所设计的数字式综合电子调节器合理可靠并满足实际使用中的需求。

关键词: 涡扇发动机; 数字式电子调节器; 试车试验

中图分类号: V233.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)02-0005-05

某型涡扇发动机采用复合控制计划,即由液压-机械控制器和模拟式电子控制器共同实施控制^[1]。然而模拟式电子控制器电子元件漂移较大,对环境因素敏感,使控制精度受到很大的影响,且模拟式电子元件可靠性较差,程序修改受硬件限制;另一方面,此调节器监控水平不高,导致虚警不断,经常出现“减小转速”的虚警故障,已严重影响飞行安全。同时,由于其内部采用模拟电子元件,综合电子调节器与发动机使用寿命不相匹配的问题非常突出^[2]。

数字式电子控制器具有控制精度高、体积小、便于采用多种控制模式(如最大推力模式、最小耗油量模式和最低风扇涡轮进口温度计算模式等)等优点^[3-5],监控水平很高,可以大大提高航空发动机的使用安全性^[6-7],因此发动机数字控制器设计与研究工作势在必行。

1 系统组成

1.1 设计要求

对于控制品质的要求,低压转子转速(n_1)和高压转子转速(n_2)稳态误差不超过0.5%,超调量不超过1.5%;涡轮后燃气温度(T_4^*)稳态误差不超过10℃,超调量不超过30℃;调节时间均不超过5s。信号采集要求频率量精度在2Hz以内,模拟信号精度要求在小数点后1位, T_4^* 信号精度在10℃以内,其它温度信号精确到0.1℃。

1.2 硬件系统组成

数字式综合电子调节器内部是个双余度硬件系统,其中信号采集电路和中央处理机电路包含独立工作的两套电路,由系统的切换电路选择工作正常的信号输入到输出驱动电路,以提高控制器的可靠性。数字控制器能够根据故障性质进行余度切换,对一般性的故障(双余度中的一个传感器故障等)则切换余度,并给出提示;对于严重故障则数字控制器退出工作,转由液压机械控制器对发动机进行控制。为了保证在各种工作状态中能安全、平稳地进行余度切换,控制系统采用了热备份,并接收主控通道的工作信息,使备份通道始

* 收稿日期:2008-08-26

作者简介:吴勇(1982-),男,云南个旧人,博士生,主要从事飞机推进系统控制与状态监控等研究;

E-mail:wuyong0206@tom.com

谢寿生(1959-),男,四川成都人,教授,博士生导师,主要从事飞机推进系统控制与状态监控等研究。

终跟随主控通道,从而保证控制系统平稳转换。

图1给出了数字式综合电子调节器的硬件结构组成,主要包括电源组件、开关量与频率量输入组件、中央处理机组件、模拟量输入组件、模拟量输出组件、开关量输出组件、数据板组件以及自检信号组件。

电源组件把飞机电源系统送来的+28 V直流电源经过滤波后转换成调节器内部工作所需的各种电源,同时产生各种传感器的激励电源。

开关量及频率量输入组件将外部送入的27 V开关量信号转换成TTL电平的状态信号。该组件上的频率信号转换电路首先放大输入的频率信号箱位,然后经光耦隔离后转换成方波信号,再由测频电路对信号进行计数,记录输入信号的2个周期内标准频率的脉冲个数,并把该计数值锁存起来,供CPU读取。

中央处理机组件是调节器的核心部件,它负责整个调节器的实时控制以及对系统的监控。中央处理机由微处理器和FLASH程序存储器中的程序控制,连续对采样数据进行数字解算,得到各种控制输出参数,再将这些参数以数码的形式送往其它部件,调制成相应的模拟信号、开关量信号和总线信号。

模拟量输入组件采集各路模拟量信号,将对角位移传感器、温度传感器、喘振压力传感器、振动传感器及火探测器输出的信号均送入多路开关。在CPU发出启动命令后,多路开关输出第一路信号,经延时后采样保持,送入A/D转换器进行转换后产生一个中断信号,通知CPU读取数据,同时该读信号送到计数电路使多路开关进行下一路信号的输出与转换,这样连续完成16路信号转换。A/D转换器使用12位的转换电路,采样电压范围为0 V - 10 V(可扩展为-10 V—+10 V),单路转换时间不超过6 μ s。

模拟量输出组件上有两种功能的电路,对需要由软件计算输出的模拟量,该组件接收A、B机的总线数据,选择当前主机数据、地址总线作为有效数据,在指令控制下,把数据送到D/A转换器的输出寄存器,转换为直流电压,再经过放大器隔离后输出。D/A转换器的输出范围是0 V - 5 V(可扩展为-10 V—+10 V)。对来自传感器的输入监控信号,在该组合上用模拟开关选择A或B机的信号驱动输出电路进行信号输出。

开关量输出组件有2个,其工作原理是相似的,在此结合2个组件的原理和功能进行说明。A、B机的数据总线分别从A、B机的中央处理机送来,经总线隔离器隔离后进行数据锁存,锁存的数据为当前主机的数据,若当前主机故障,则自动切换到另一个中央处理机的数据。锁存的数据经隔离、驱动后输出,其中,小电流信号使用光耦隔离,包括电磁阀的驱动信号在内的大电流信号使用继电器隔离。为减少开关器件动作时产生的瞬态干扰,在每个器件的信号端及电磁阀的输出信号上都设计了瞬态抑制二极管。调节器正常时开关量输出信号有效,当调节器处于故障状态时,断开输出信号电源,所有开关量输出信号无效(低电平),只输出“控制器故障”信号。

数据板组件存储需要记录的数据及传感器的标定数据或程序的限定值,该数据可在试车现场通过RS-232总线下下载到调节器内部,方便用户使用。数据板上的存储器使用非易失的EEPROM,容量为2 M字长。总线数据在进出组件时用总线驱动器进行驱动和隔离。切换电路选择当前主机总线进行数据存储和读出。

自检信号组件可在数字电子调节器处于自检状态时检查调节器内部电路、外接传感器和外接电磁阀。调整量接口板提供了一个地面状态下人工调整参数通道。该板上设置了10个微型拨码开关,对应10个需要现场调整的参数,通过拨动开关改变调整量的值,将其设定为参数的修正值。通过调节器后面板上的窗口可以进行人工操作,设定完成后关闭窗口。A、B机的中央处理机组都可以读取调整量的数值。

1.3 软件系统

开发DSP系统软件可以选用汇编语言和C语言。C语言可以提高DSP的开发速度,也使程序可修改并方便移植^[8]。但是C语言对DSP芯片的某些硬件控制却不如汇编程序方便,有些甚至无法实现。因此,大多数情况下,DSP应用程序需用C语言和汇编语言混合编程,以便最佳地利用DSP芯片软硬件资源。本系统的控制软件主要由C语言编程,硬件接口程序由C语言和汇编语言混合编程。

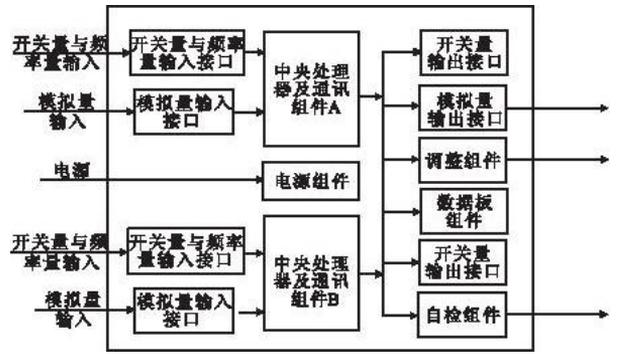


图1 数字式综合电子调节器硬件结构图

Fig. 1 Hardware structure of DEC

数字电子调节器控制流程见图2。软件分为硬件接口程序和控制程序两部分,前者负责采集发动机传感器传递来的模拟信号、开关信号和频率信号,并将这些信号存放在 DSP 芯片的某一存储位置。控制程序从该存储位置读取输入变量,经控制算法计算后输出控制变量和发动机状态信号,并将这些输出变量存储在 DSP 芯片的另一存储位置。硬件接口程序再从该存储位置读取这些变量,将其转换为模拟信号输给执行机构,完成发动机的控制。

1.4 中央处理器算法设计

在实际调节过程中, n_1 、 n_2 、 T_4^* 3 个调节通道的失调信号经开关电路(有故障的通道,开关电路切断该通道失调信号的输入)输入到最小值选择器。为保证发动机最大状态和加力状态控制计划的实现,最大值选择器选择其中的最小失调信号作为控制信号。虽然发动机是参数强耦合的大系统,但是 3 个通道在控制前要对失调信号进行最小值选择,然后才进行脉宽调制,然后调节输出。这就是说当 1 个通道被选择参与调节时,其它通道则被屏蔽掉了。调节器中参数并没有耦合关系,这等价于在物理上只存在 1 个通道。因此我们分别根据 3 个通道的控制规律和动态模型,设计 PID 控制器,分别控制 n_1 、 n_2 和 T_4^* 。最后将 3 个通道的 PID 控制器整合到一起得到图3 的 PID 控制器结构图。

图3 中的 n_1 、 n_2 、 T_4^* 3 个通道的失调信号经最大值选择器后确定进入 1 个 PID 控制器,各 PID 控制器输出均为占空比(S_i)信号(0 - 100%), S_i 信号经硬件程序调制后输出至电磁活门,控制供油量,完成发动机的 n_1 、 n_2 和 T_4^* 的控制。

2 试验与结果分析

数字式综合电子调节器的试验是在某修理厂的试车台上进行的,目的是检验状态控制逻辑的有效性、模拟参数控制通道调节参数的稳定性和准确性、发动机在特殊状态时数字电子控制器的控制和保护能力及控制参数的合理性和可靠性^[9]。

由于试车需逐一验证数字电子调节器的各个通道,而这些相互关联的通道增加了试车难度,同时由于试车难于模拟使用过程中的各种故障,因此试车试验必须分阶段进行。目前仅初步验证数字电子调节器的基本功能,如低压压气机进口导流叶片角度(α_1)调节通道的跟随性试验、接通加力试验等等,其他各个通道的功能试验正在进行中。限于篇幅本文仅给出了 α_1 通道的跟随性和接通加力 2 个试验的情况。文中的试验数据均作了归一化处理。

2.1 通道的试验情况

使用过程中, α_1 角度是根据发动机低压转子换算转速($n_{1.cor}$)来调整的^[10],所以 α_1 试验主要是验证 α_1 的角度是否能随 $n_{1.cor}$ 的不断变化而变化,以及角度值是否在允许使用边界内。试验的结果见图4 和图5。

图4 说明当 $n_{1.cor}$ 达到 0.8 时 α_1 通道开始对 α_1 角度进行调节。随 $n_{1.cor}$ 的不断增大,角度也随之不断增大;当 $n_{1.cor}$ 达到 0.86 时,由于受涡轮冷却接通的影响, $n_{1.cor}$ 受到一个小扰动突然增大,同时 α_1 角度也随之迅速增大,跟随性较好。从整个调节过程来看, S_8 调节变化较为平稳,说明所选用的 α_1 通道的 PID 控制器参数是合理的,基本上能满足实际系统的控制要求。在整个调节过程中,“ α_1 故障”信号一直为低电平,说明 α_1 角度未超出允许边界,图5 也充分说明了这一点。图5 是实际试验过程中不同 $n_{1.cor}$ 对应的 α_1 的测量值,可以看出, α_1 角度在使用允许边界内。上述结果证明 α_1 通道的设计是合理的,能满足发动机控制的要求。

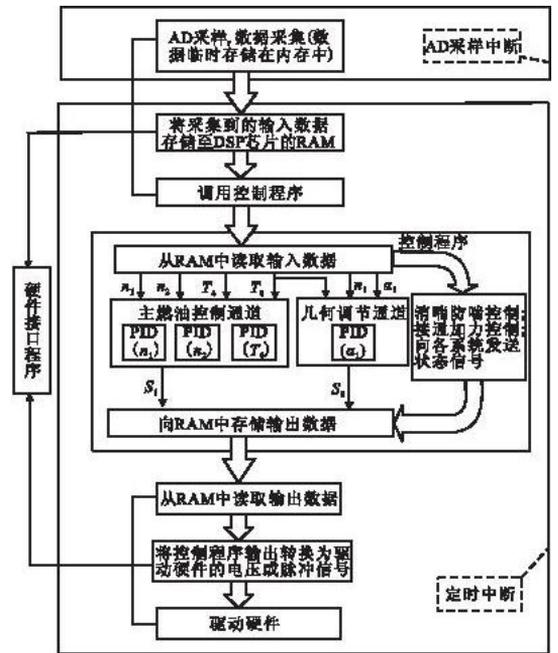


图2 数字式综合电子调节器控制流程图

Fig. 2 Software structure of DEC

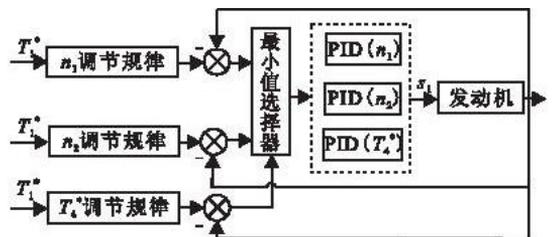
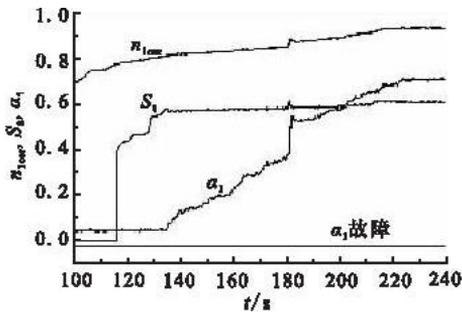
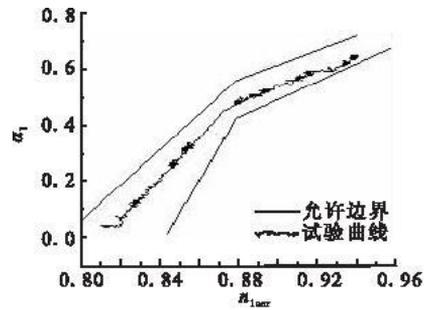


图3 PID控制器结构图

Fig. 3 Structure of PID controller

图4 α_1 通道的跟随性试验Fig. 4 Test result of channel α_1 图5 不同 n_{1cor} 下对应的 α_1 角度Fig. 5 The different value of α_1 in different n_{1cor}

2.2 加力通道试验情况

试验主要进行了加力能否接通以及加力接通过程中对发动机的 n_1 、 n_2 、 α_1 等参数的影响。试验是在“训练-战斗”状态下进行的,结果见图6。

从图6中可以看出,从发出“接通加力(ВФ)”信号到加力燃烧室点燃时,“加力”信号灯燃亮,2个信号之间有大约2.5 s的延时,符合文献[10]中“不得大于3 s”的规定。当加力燃烧室点燃时, n_1 、 α_1 有小波动, n_2 、 α_2 无明显波动,而且 n_1 波动比较明显,波动幅度也相对较大,说明接通加力的过程对发动机参数有影响。但是,调节器可在1.5 s内将发动机参数调整到平衡位置,说明所设计PID控制器抗干扰能力较强。

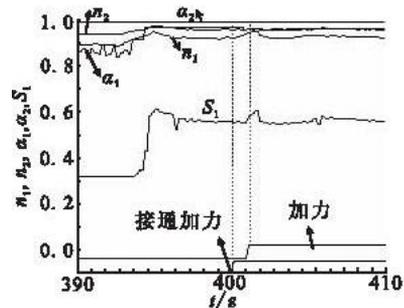


图6 接通加力对发动机参数的影响

fig. 6 The influence of after burning condition

3 结束语

以某型涡扇发动机的综合电子调节器为研究对象,完成了该型发动机数字式综合电子调节器的软、硬件系统设计。为了提高数字式综合电子调节器的可靠性,调节器内部设计了双余度硬件系统,其中信号采集电路和中央处理机电路包含独立工作的两套电路,并由系统的切换电路选择工作正常的信号输出到输出驱动电路。对所设计的数字式综合电子调节器进行了初步试验,试验结果表明,所设计的数字式综合电子调节器是合理的、可靠的,满足实际使用中的需求。

参考文献:

- [1] 张生良. 某涡扇发动机综合电子调节器控制规律研究[D]. 西安:空军工程大学,2003.
ZHANG Shengliang. The Control Rules of A Certain Turbofan Engine Controller[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2003. (in Chinese)
- [2] 李 剑. 某型涡扇发动机综合调节器燃油控制通道数学模型研究[D]. 西安:空军工程大学,2002.
LI Jian. The Model of the Fuel Control Channel of A Certain Turbofan Engine Controller[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2002. (in Chinese)
- [3] Barrett W J, Rembold E. Flight Test of A Full Authority Digital Electronic Engine Control System in An F-15 Aircraft [R]. AIAA 81-1501.
- [4] Tempelman W G, Gallops G W. Performance Benefits of Adaptive In-flight Propulsion System Optimization [R]. AIAA 92-3749.
- [5] Smith R H, Chisholm J D, Stewart J F. Optimizing Aircraft Performance with Adaptive, Integrated Flight/Propulsion Control [R]. ASME 90-GT-252.
- [6] Friedrich Schwamm. Advanced Fuel Metering for Aero-engine[R]. ASME 2005-GT-0041.
- [7] Shaffer P L. Distributed Control System for Turbine Engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1999, 12

(1):102 - 107.

- [8] 刘和平. TMS320LF240xDSP 结构、原理及运用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
LIU Heping. The Structure, Theory and Application of TMS320LF240xDSP[M]. Beijing: Publishing House of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)
- [9] 吴 勇. 某型发动机综合电子调节器数字化研究与试验[D]. 西安:空军工程大学,2007.
WU Yong. The Digital Controller of A Certain Turbofan Engine[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [10] 谢寿生. 某型加力涡扇发动机[M]. 西安:空军工程大学工程学院,2002.
XIE Shousheng. A Certain Turbofan Engine[M]. Xi'an: Engineering Institute of Air Force Engineering University, 2002. (in Chinese)

(编辑:姚树峰,徐敏)

A Digital Electronic Controller of A Certain Turbofan Engine

WU Yong¹, XIE Shou - sheng¹, PENG Jing - bo¹, TANG Qi², WU Wei¹

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China; 2. Air force Deputy Office, Chengdu 610100, Sichuan, China)

Abstract: The analog controller of a certain turbofan engine generally exists the defects, in practice, such as that it doesn't match the engine in life - span, is poor in monitoring faults, gives the wrong alarm and so on. In order to solve these problems, taking the Digital Electronic Controller (DEC) as a studying object, we designed the hardware and software structure of the DEC. And also we designed two hardware systems to enhance the reliability of the DEC. The two hardware systems worked at the same time and the backup system received the main system's information every moment, thus keeping the switch process stable. Finally the experiment result of the DEC is given. The result indicates that the research and argumentation for the design of the DEC is reliable and reasonable.

Key words: turbofan engine; digital electronic controller; test - bed trial

本刊声明

近日,本刊部分作者(读者)收到以“空军工程大学学报”名义索取作者(读者)详细信息并代为征稿的邮件。对此,本刊声明如下:

一、本刊从未委托任何网站、团体代为征稿,对本刊名义进行有偿征稿,毁坏本刊声誉的网站、团体,我刊保留在法律上提起诉讼的权利。

二、对已经进入排版校对环节待发表的稿件,文章的责任编辑会与作者通过电话或 E-mail(kgdbjb@163.com)联系,核实相关信息。

三、本刊有严格的审稿程序,来稿需经责任编辑初审,两位专家复审,编辑部会审,副主编、主编终审后,才能刊发。

四、本刊只接受作者直接投稿,不接受任何中介投稿。

五、作者投稿时请附详细联系信息,对联系信息为非论文作者的,均视为中介投稿。

六、本刊的具体联系方式见封三《征稿简则》。