

液体冲压发动机数字电子控制系统^{*}

任凤升, 谢光华

(航天科工集团公司 31 所, 北京, 100074)

摘 要: 为某型号整体式液体冲压发动机设计了数字电子-液压机械控制系统, 介绍了该系统的控制方案、工作原理和工作方式。数字电子-液压机械控制系统和冲压发动机与弹体数字仿真器等组成液体冲压发动机、弹体/发动机控制系统半实物仿真系统, 对数字电子-液压机械控制系统的功能及工作协调性进行了检验。半实物仿真试验结果证明, 该系统满足设计要求。

关键词: 冲压喷气发动机; 数字电子-液压机械控制; 控制系统

中图分类号: V235.21 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2002) 01-0008-04

Digital electronic control system of a liquid fuel ramjet engine

REN Feng-sheng, XIE Guang-hua

(The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: A mixed digit electronic-hydraulic control system was designed for an integrated liquid fuel ramjet engine. The control plan, the operating principle and the operating mode of the control system were introduced. A hardware in the loop simulation system was composed of the mixed digit electronic-hydraulic control system and an integrative digit simulator of a liquid fuel ramjet engine and missile body. The control function and the operating harmony of the control system were checked. The results of hardware in the loop experiment verified that the requirement for a control system design was satisfied.

Key words: Ramjet engine; Mixed digit electronic-hydraulic control; Control system

1 引 言

20 世纪后期, 发动机控制系统由液压机械式向数字式电子控制发展, 对发挥发动机的潜能、提高发动机性能和可靠性有着显著的优势。美国早在 20 世纪 70 年代就开展了数字电子发动机控制(DEEC) 和数字电子飞行控制(DEFC) 方面的研究, 并成功应用于 F100 加力涡扇发动机全权限数字电子控制(FADEC), 使发动机控制成本降低了 43%、重量减轻了 25%, 可靠性提高了 13%^[1]。在此基础上, 进一步

开展了发动机性能寻优控制(PSC)^[2]、飞行/推进一体化控制(IFPC)^[3] 等方面的研究, 并且已经在 F-15 飞机上对单个 F100 发动机采用 PSC 进行了亚声速和超声速飞行试验, 亚声速巡航状态油耗降低了 1%~2%, 发动机推力增加了 15%, 超声速巡航状态油耗降低了 8%, 发动机推力增加了 9%^[2]。这一发展趋势对 21 世纪发动机控制技术的发展仍将具有深远的影响。我国发动机数字电子控制方面的研究“七·五”期间刚刚起步, “九·五”期间完成了某型号航空发动机数字电子控制首次飞行试验并获得成功, 发动机性

* 收稿日期: 2001-04-18, 2001 年弹用吸气式发动机技术交流会推荐; 修订日期: 2001-07-17。

作者简介: 任凤升 (1955—), 男, 高级工程师, 研究领域为电子工程与发动机控制。

能有明显改善。为了跟踪国外先进技术的发展,本文针对某型号整体式液体冲压发动机的特点设计的数字电子-液压机械控制系统,对提高我国液体冲压发动机控制系统的整体设计水平具有积极的推动作用。

2 液体冲压发动机控制方案

某型号整体式液体冲压发动机在助推器作用下加速到一定飞行马赫数后转级启动,在加速段按等余气系数(α)控制,加速到巡航马赫数后再按等马赫数(Ma)控制。

在等 α 控制时,控制系统以随动方式进行控制,根据总体设计要求按下式供油:

$$Q_f = 6.0 \times n_a \times p_{t0} (1.2 - 10^{-4} \frac{p_{t0}}{p_w} T_{t0}) \quad (1)$$

其中, Q_f 为燃油流量(kg/s), n_a 为按余气系数燃油流量控制系数, p_{t0} 为进气道正激波后总压(MPa), p_w 为进气道斜激波后楔板壁面静压(MPa), T_{t0} 为空气来流总温(K)。

在加速过程中,控制器根据测得的大气来流参数计算出飞行马赫数,并与设定巡航马赫数进行比较,若飞行马赫数小于设定巡航马赫数,仍按加速规律供油,若飞行马赫数大于设定巡航马赫数时,则先少量减油,随即转入等马赫数调节。

在等马赫数控制时,液体冲压发动机实行 PID 控制加最小油量限制。PID 控制算法如下:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

$$\Delta u(k) = K \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right]$$

其中 K 为比例系数, $e(k)$ 为设定值与实际值构成的控制误差, T 为采样周期, T_i 为积分时间, T_d 为微分时间, $u(k)$ 为控制油量。

3 液体冲压发动机数字电子-液压机械控制系统

某型号整体式液体冲压发动机数字电子-液压机械控制系统如图 1。主要由进气道总压传感器、进气道静压传感器、空气来流总温传感器、数字电子控制

器、燃油调节器、三通阀、涡轮泵和油箱组成。三通阀为燃油的分配机构,在助推器分离前通过助推器顶杆压住三通阀门使燃油流回油箱,当助推器分离时,三通阀在自身弹簧压力作用下关闭油箱通路,同时打开通向发动机的阀门,向发动机喷油环供油。用涡轮泵给燃油增压。

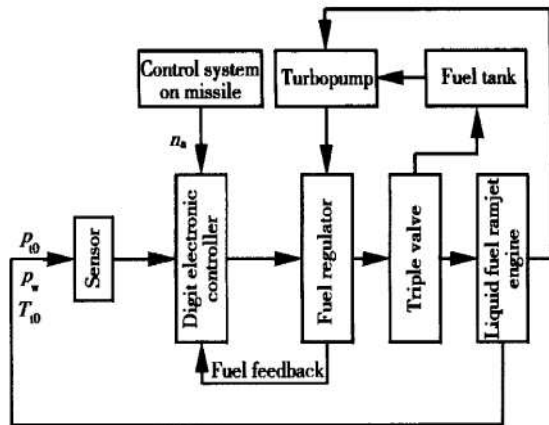


Fig. 1 A liquid fuel ramjet engine control system

3.1 数字电子控制器

数字电子控制器是数字电子-液压机械控制系统的核心部件,主要完成发动机控制规律的运算任务。本文数字电子控制器原理如图 2 所示,按其功能划分

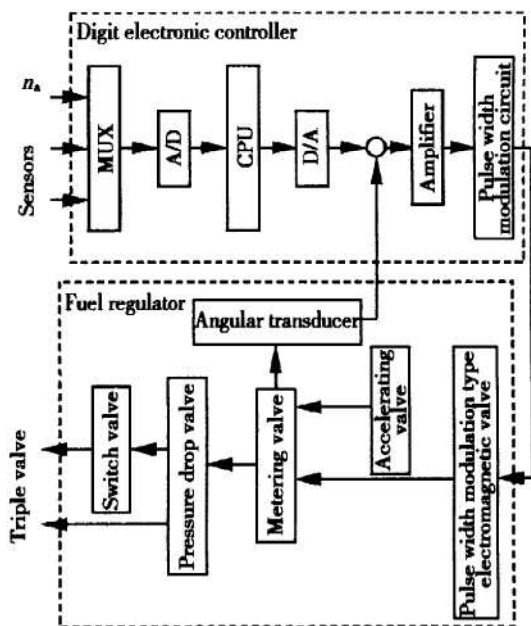


Fig. 2 Principle chart of the digit electronic controller and fuel regulator

为输入模块、控制模块、输出模块和电源模块。输入模块的作用是接收传感器信号,完成对系统中所有输入量的采集和预处理,包括多路选择开关、传感器信号调理电路、流量反馈电路和模拟量/数字量转换(A/D)电路等,A/D转换采用的是1674芯片。控制模块根据输入信号按照控制算法计算发动机的控制输出,主要由中央处理器(CPU)、存储器、看门狗电路和接口电路等组成。其中CPU采用MCS-51单片机系列的8031芯片,控制程序采用汇编语言编程执行浮点运算,数字电子控制器扩展了32 KB只读存储器(ROM)和8 KB随机存取存储器(RAM),ROM采用的是Intel 27256芯片,用来存储控制程序,RAM采用的是Intel 6264芯片,用来存储外部数据。输出模块的作用是将控制模块计算得到的控制作用量输出到燃油调节器,主要由数字量/模拟量转换(D/A)电路、放大器、脉宽调制电路、加速电磁阀驱动电路和喷嘴环转换电磁阀驱动电路等组成。D/A转换采用的是1210芯片。电源模块的作用是为数字电子控制器的其它模块提供直流电源,采取输入与输出完全隔离设计,可以避免外电路和大功率器件对电源的干扰影响到控制电路。

本文数字电子控制器感受弹上指令 n_a, p_{00}, p_w 和 T_{00} ,按控制规律计算出理论燃油流量,转换为输出电压 G_m ,并与角位移传感器反馈信号 G_f 比较,得出失调电压信号。失调电压信号再经过放大器并通过脉冲宽度调制器变换为脉宽调制信号,以此来驱动燃油调节器的脉宽调制快速电磁阀(MKT)。脉宽调制信号以一定的周期 T 与持续时间 t 的电压脉冲形式输出,信号特性参数是由下式确定的脉冲占空比系数

$$q = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (2)$$

3.2 燃油调节器

燃油调节器根据脉宽调制的数字电子控制器指令信号来计量和分配燃油,是发动机控制规律的执行单元。本文燃油调节器原理参见图2,主要由等压差机构、脉宽调制快速电磁阀、计量活门、加速电磁阀、角位移传感器、喷嘴环转换电磁阀等组成。

在助推器壳体抛出的瞬间,燃油调节器开始工作,并以最大燃油流量向燃烧室供油,同时计量油针

加速电磁阀接通,计量油针加速移动以减小燃油流量,当计量油针越过由数字电子控制器决定的设定位置瞬间,加速电磁阀断开。在平衡状态,数字电子控制器输出的脉冲占空比系数为50%,当发动机燃油流量偏离数字电子控制器的给定值或控制指令信号改变时,数字电子控制器输出到脉宽调制快速电磁阀的脉冲占空比系数不等于50%,其差值与失调值成正比。脉宽调制信号输入燃油调节器的脉宽调制快速电磁阀,该阀调节计量活门油腔内的油压,控制计量油针的移动,从而实现燃油的计量。计量油针的移动速度正比于脉冲占空比系数与平衡点的占空比系数 $q=50\%$ 的偏离值,燃油流量大小由计量油针的位置确定。计量油针一直移动到燃油流量恢复给定值,或发动机进入新的工况,此时数字电子控制器输出到脉宽调制快速电磁阀的占空比信号又恢复到50%。计量油针行程的两端有最大和最小燃油流量可调限位器。当燃油流量小于等于1.2 kg/s时,第二喷嘴环切换电磁阀通电,第二喷嘴环断开,其它情况下,第二喷嘴环切换电磁阀断电,第二喷嘴环接通。

4 试验结果及结论

为了检验本文设计的某型号液体冲压发动机数字式电子控制系统的控制规律和控制功能以及数字电子控制器和燃油调节器联合工作的协调性,本文参照文献[4~6]的建模方法建立了发动机和弹体的数学模型,进行了液体冲压发动机控制系统半实物仿真试验,半实物仿真系统见文献[7]。

本文按冲压发动机从加速到巡航全过程进行了数字电子-液压机械控制系统半实物动态性能试验。图3为冲压发动机加速段半实物仿真试验供油量曲线,其中虚线为按式(1)计算的理论供油量,实线为控制系统实际供油量。其他试验结果见文献[7]。

从试验结果可以看出,实际供油量与理论供油量能很好地吻合,控制效果比较理想。在液体冲压发动机巡航工作状态,控制系统通过PID调节控制冲压发动机飞行马赫数稳定在设计巡航马赫数2.3。因此,控制系统半实物仿真试验结果说明,本文设计的数字电子-液压机械控制系统满足设计要求。

(下转第14页)

进程, 客户端为数据接收进程, 一个服务器进程可以和多个客户进程通信, 操作步骤如下。

服务端:

- (1) 调用 `CreatNamedPipe` 函数创建命名管道;
- (2) 调用 `ConnectNamePipe` 函数等待客户连接;
- (3) 若连接成功, 调用 `ReadFile`, `WriteFile` 函数进行管道读写操作;
- (4) 调用 `CloseHandle` 函数关闭管道。

客户端:

- (1) 调用 `CreatFile` 函数, 建立同服务端的连接;
- (2) 若连接成功, 调用 `ReadFile`, `WriteFile` 函数进行管道读写操作;
- (3) 调用 `CloseHandle` 函数, 关闭管道。

5 结 论

原型系统是在 Windows NT 环境下, 利用 Visual C++ 语言实现的, 通过仿真数据测试表明:

- (1) 面向时态的故障检测和诊断方法能够适应推进系统的时变性特点, 方法实用、有效;

(2) 用命名管道实现网络进程间实时数据通信, 保证了推进系统故障检测和诊断的实时性;

(3) 原型系统功能丰富, 人机界面友好, 诊断快速、准确, 经过进一步修改和完善, 可应用于推进系统的地面试验和飞行试验。

参考文献:

- [1] 宋政吉, 姜兴渭, 黄文虎. 载人航天器推进系统健康监测的组件技术研究[J]. 推进技术, 2000, 21(5).
- [2] Duyar A, Merrill W. A failure diagnosis system based on a neural network classifier for the space shuttle main engine[R]. N90-28659.
- [3] 纪常伟, 荣吉利, 黄文虎. 航天器智能诊断系统开发研究[J]. 航空学报, 1999, 20(3).
- [4] 宝音贺喜格, 姜兴渭. 基于模型的故障诊断方法在飞船推进系统中的应用[J]. 推进技术, 1999, 20(4).
- [5] 杨尔辅, 张振鹏, 徐用懋. 一种火箭推进系统非线性动态神经网络模型[J]. 推进技术, 2001, 22(1).

(编辑: 王居信)

(上接第 10 页)

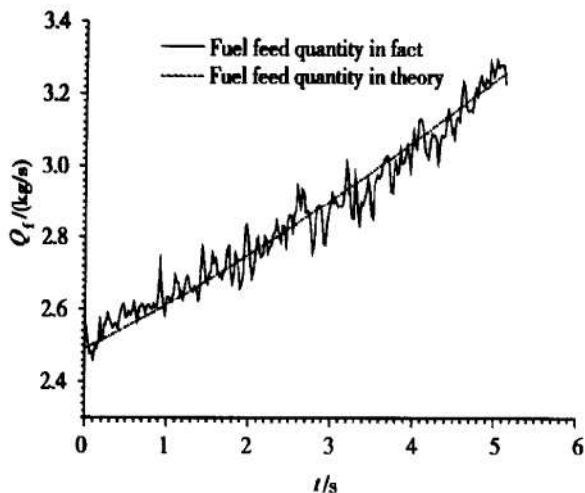


Fig. 3 Time curve of fuel feed quantity in hardware in-the-loop simulation experiment

参考文献:

- [1] 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.

- [2] Tempelman W G, Gallops G W. Performance benefits of adaptive in-flight propulsion system optimization[R]. AIAA 92-3749.
- [3] Smith R H, Chisholm J D, Stewart J F. Optimizing aircraft performance with adaptive, integrated flight/propulsion control[R]. ASME 90-GT-252.
- [4] 钱柏顺. 超音速冲压发动机的数学模型、数字仿真与进气道的实时仿真[D]. 西安: 西北工业大学, 1988.
- [5] 文仲辉. 导弹系统分析与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989.
- [6] 刘兴洲, 等. 飞航导弹动力装置(上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
- [7] 谢光华, 孟 丽, 薛 恩, 等. 液体冲压发动机控制系统半实物仿真[J]. 推进技术, 2001, 22(6).

(编辑: 王居信)