

火箭发动机随机推力调节 控制驱动器的研制

马兵兵¹, 翟丽婷¹, 孙璐²

(1. 北京航天动力研究所, 北京 100076; 2. 北京航空航天大学, 北京 100083)

摘要: 为满足某型号液体火箭发动机定混合比随机无极变推力工作要求, 研制了基于DSP处理器的随机推力调节控制驱动器。该控制驱动器实时接收随机变推力指令, 在定混合比条件下, 协调控制发动机系统上的燃料及氧化剂路调节阀, 从而控制燃料及氧化剂流量, 完成发动机的随机变推力控制。其参加多次发动机系统冷调试验及地面全程热试车, 工作稳定可靠, 实现了变推力双组元推进剂流量同步控制, 精确控制发动机混合比, 快速响应随机变推力控制要求。

关键词: 随机变推力; 定混合比; 同步控制; 调节阀

中图分类号: V434.2-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 02-0079-04

Research on random thrust adjustable controller of rocket engine

MA Bing-bing¹, ZHAI Li-ting¹, SUN Lu²

(1. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China;

2. Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To meet the thrust control requirements of a liquid rocket engine, a random thrust adjustable controller based on DSP is developed. It receives random variable thrust instructions and varies the engine thrust accordingly by means of controlling the fuel and oxidant valves, while the mixture ratio is fixed. The controller showed good performances during cold-flow tests and full-duration hot firing tests. With the high stability and reliability, the controller achieved the synchronization control of variable thrust bipropellant flows in liquid rocket engine, in which the mixture ratio was precisely controlled, and swift response to random variable thrust control demand was realized.

Keywords: random variable thrust; fixed mixture ratio; synchronization control; adjustable valve

收稿日期: 2011-09-13; 修回日期: 2011-10-26

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目 (2006JY02)

作者简介: 马兵兵 (1982—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机电器设计

0 引言

针对飞行器不同飞行状态的要求,动力系统需采用变推力发动机进行推力控制。武器动力系统采用变推力发动机可以提高武器的机动性,加强突防能力,运载火箭如果采用变推力发动机,可以实现最优推力控制,发挥火箭的最佳运载能力^[1]。因此,变推力火箭发动机的研究一直是火箭发动机研制领域的热点,并已经取得许多成果,其中最成功的代表是阿波罗登月计划登月舱下降发动机(Lunar Module Descent Engine-LMDE)。

国内外大多数液体双组元火箭变推力发动机,采用改变固定的喷注单元上游供应系统的压降(即采用推进剂供应系统控制阀)来调节经过固定几何形状喷注器的推进剂流量。美国 LMDE 发动机采用针阀机械定位喷注器与可变截面的汽蚀文氏管阀,保证在调节范围内进行等混合比的流量控制。20 世纪 80 年代国防科技大学研制出杠杆双调变推力发动机,利用杠杆带动流量调节锥和喷注器的调节针阀实现推力调节。1992 年,国内成功研制了混合比和喷注性能同时可控、多次启动、双组元双调节低压流量定位变推力液体火箭发动机^[2]。

随着变推力技术研究不断发展,国内某研究所研制了某型变推力发动机,系统采用燃料及氧化剂路的调节阀协调控制推进剂流量,两台调节阀用步进电机驱动,为此研制了基于 DSP 处理器的随机推力调节控制驱动器。

1 系统结构及功能

随机变推力控制系统主要由随机推力调节控制驱动器、燃料调节阀、氧化剂调节阀、发动机系统及上位机组成,如图 1 所示。系统工作原理是:随机推力调节控制驱动器接收上位机随机推力指令,在定混合比条件下,协调控制燃料路及氧化剂路上的调节阀,从而控制燃料及氧化剂的流量,实现发动机随机变推力控制。

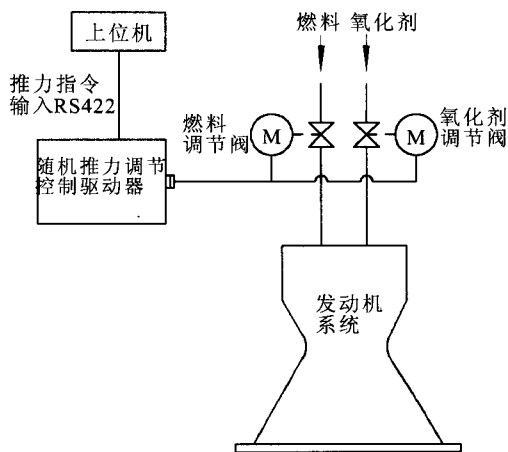


图 1 变推力控制系统示意图

Fig. 1 Diagram of variable thrust control system

2 硬件电路

随机推力调节控制驱动器主要包括两个电路板:主控制器板和隔离驱动板,如图 2 中虚线框内所示。主控制器板接收上位机 RS422 通讯接口下发的目标推力指令,根据发动机系统性能计算输出两台调节阀的控制信号。隔离驱动板将控制信号隔离放大,输出驱动两台调节阀,并采集调节阀位置传感器信号。

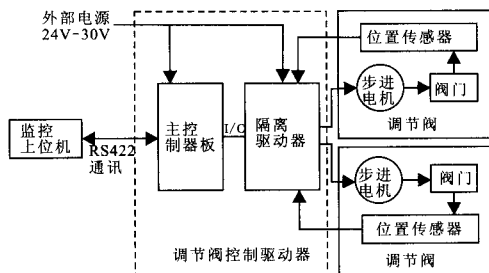


图 2 控制驱动器硬件原理框图

Fig. 2 Functional block diagram of controller

主控制器板以美国 TI 公司 DSP 中的 TMS320LF2407A 为核心器件、外部扩展 RS422 通讯模块及 I/O 驱动电路等组成。主控制芯片功耗低, 40MIPS 的执行速度, 片内 32 K 字节的 Flash 程序存储器^[3]。该芯片的指令执行速度、储存空间、IO 端口均满足步进电机控制的要求。

步进电机控制驱动的技术关键是防丢步。步进电机驱动电路性能好坏直接影响步进电机系统性能的优劣,一个匹配的步进电机驱动可以避免丢步的发生。本设计采用硬件斩波恒流电路驱动两相混合式步进电机,在绕组通电的开始用高压供电,使绕组中电流迅速上升,驱动电流达到标称值后,自动斩波控制,使绕组电流在额定值上下成锯齿波形波动。这种驱动方式通过快速提升电机绕组电流,其电流前沿越陡越有利于绕组磁场的快速建立,有利于防止电机丢步,同时极大地改善了驱动电流波形,使电流输出基本恒定,且系统功耗低,电源效率高^[4-5]。

以驱动步进电机的一相电路为例,如图3所示。Q1, Q2, Q5及Q6为大功率场效应管, Q3和Q4为大功率开关晶体管, U12A为差分比较器, U11A为放大器, D3和D4用于放电回路。当控制信号端A为高、C为低时,晶体管Q3打开, Q4关断,此时电流采样电阻R27上没有电压,比较器U12A输出高电平,通过与门打开Q6和Q2,形成通过Q2、电机线圈、Q3和取样电阻R27的通路。通路打开后,电流迅速上升,采样电阻R27上的电压经阻容滤波、线性放大电路与给定电压比较,当其大于给定电压,则U12A输出低电平,关断Q2,此时通过电机绕组、Q3、R27及D4回路放电。当电流降到给定值以下,比较器又输出高电平,回路通电。如此反复循环,实现恒流斩波控制。

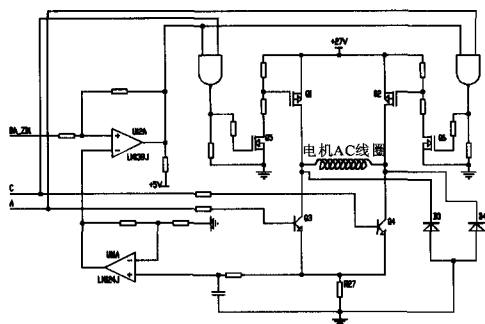


图3 驱动电路原理图

Fig. 3 Principle diagram of driver circuit

该硬件斩波恒流驱动电路可在较宽的电源电压范围内正常工作,可适应飞行电源系统电池电

压范围大的特点。

3 软件设计

变推力双组元推进剂流量同步调节技术是变推力发动机研制的关键技术。由于变推力发动机系统的两台调节阀流阻与开度的特性为非线性,且燃料比氧化剂的流量要小得多,流量控制特性完全不同,在一定混合比范围下,协调控制两台调节阀动作是一个难点。

本设计采用查表法,根据发动机各组合件的流阻及调节阀流阻性能参数,计算各推力点的调节阀开度。经计算分析,以推力变化100 N为单位,两台调节阀需要调整的开度均较小,两台步进电机需要动作的步数偏差只有一两步。先以相同的频率同时控制两台步进电机电作,当其中一个阀门动作到位,然后单独控制另一个阀门动作到位。该控制方法下发动机混合比变化很小,且100 N推力变化小于该型变推力发动机总推力的1%,满足随机变推力系统要求,因此以100 N为单位设置推力与两台调节阀开度对应表。

随机变推力程序模块流程图见图4,程序先判读串口是否有新指令输入,若有新指令,3选2判读,确认新的目标推力指令;若无新指令则目标推力不变。接着程序判断目标推力与目前推力的大小。

1) 若目标推力指令等于实际推力,则不进行动作。

2) 若目标推力指令大于实际推力,进行正向查表,读取实际推力点到下一推力点的两台调节阀需要动作的步数;然后协调控制两台阀门正向动作(一步一步地正向控制两台调节阀动作,直到其中一个调节阀到位,再控制另一台阀门动作);两调节阀均控制到下一推力点后,将实际推力加100 N,返回随机变推力子程序循环,重新判断目标推力指令与目前推力的大小。

3) 若目标推力指令小于实际推力,则向反向查表,程序流程与正向类似。

该查表控制方法程序结构简单,计算量小。对于不同的发动机系统,不同的调节阀特性,不

同的变推力要求,随机推力调节控制驱动器只需在线下载新的推力-阀门开度对应表到 DSP 处理器,即可实现系统随机变推力控制要求。

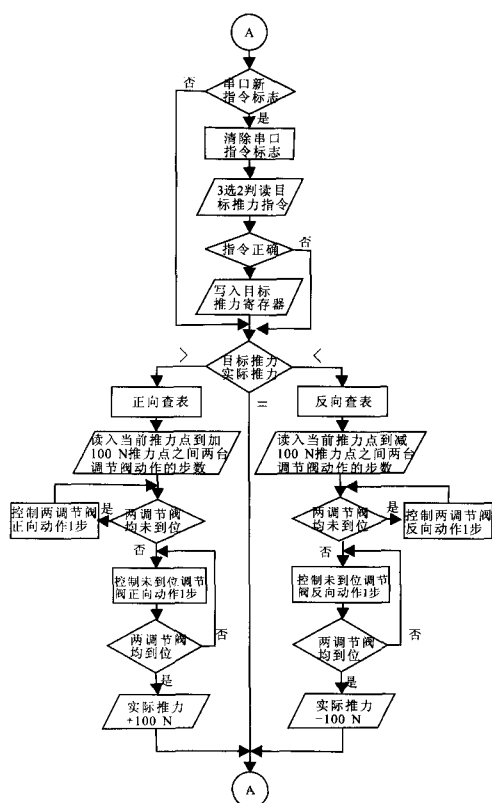


图4 随机变推力程序流程图

Fig. 4 Flow chart of random variable thrust program

4 试验

随机变推力控制驱动器参加了多次发动机系统地面冷调及动力系统热试考核,其工作稳定可靠,随机推力调节响应快速,两台调节阀协调控制准确,实现了发动机在一定混合比下随机变推力工作。

变推力发动机试车时,推力监控数据曲线如图5所示。当大推力变化时,调节阀需要调整的步数大,实际推力线需要一定的控制时间才达到目标推力线,如图5左侧的曲线所示。当小推力变化时,调节阀需要调整的步数少,实际推力与目标推力线基本重叠,如图5中间的曲线所示;当在推力调整过程中,收到新推力指令,立即响

应该目标推力指令,如图5右侧的曲线所示。该控制驱动器最小推力变化响应时间约为10 ms,最大推力变化响应时间小于1.5 s;

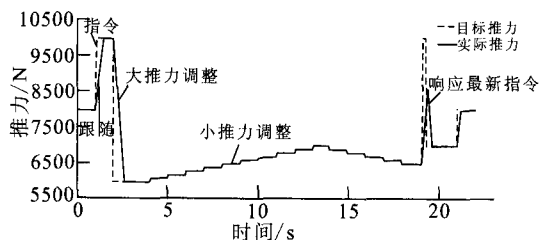


图5 推力监测数据曲线

Fig. 5 Curves of thrust measurement data

5 结论

该随机推力调节控制驱动器,硬件电路结构简单,斩波驱动电路驱动能力强,有利于防止步进电机丢步,对电源的适应性强,软件控制算法简单且容易实现,数据查表模式便于修改及调整,实现了变推力双组元推进剂流量同步调节,满足了变推力发动机高精度、快响应的控制要求。

参考文献:

- [1] 张育林. 变推力液体火箭发动机及其控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 岳春国, 李进贤, 侯晓, 等. 变推力液体火箭发动机综述[J]. 中国科学(E 辑: 技术科学), 2009, 39(3): 464-468.
- [3] 刘和平. TMS320LF240x DSP C 语言开发应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [4] 周明安, 朱光忠, 宋晓华, 等. 步进电机驱动技术发展及现状. 机电工程技术, 2005, 34(2): 16-17.
- [5] 尤婷, 冯军民, 吕梅蕾. 步进电机驱动电路研究[J]. 电气开关, 2005 (5): 50-53.
- [6] 刘宝廷, 程树康. 步进电动机及其驱动控制系统[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
- [7] 陈振生, 张玉林, 孙德芬, 等. 一种高精度微电流测量放大器的研制[J]. 电子设计工程, 2011, 19(20): 72-75.
- [8] 吴玉彬, 张合新, 吕永佳. 基于层次故障树的地面电源诊断优化方法研究[J]. 电子设计工程, 2011, 19(17): 175-178.

(编辑: 马杰)