

大推力氢氧补燃发动机调节阀液流压力 闭环控制方法与应用

李宁宁¹, 徐志强¹, 胡慧¹, 许亮²

(1. 北京航天动力研究所, 北京 100076;

2. 天津理工大学 天津市复杂系统控制理论与应用重点实验室, 天津 300384)

摘要: 为了使大推力氢氧发动机运载能力达到最优, 飞行过程中大范围调节推力, 采用了伺服作动系统实现变推力调节; 基于机电伺服控制的发动机推力调节方案, 调节阀闭环控制流量调节技术是发动机变推力调节的核心技术, 调节阀流量控制是采用伺服作动系统调节阀门的横截面积来控制调节阀入口压力; 根据分析液流试验台与伺服作动系统的非线性因素, 通过试验数据方法获取控制系统等价模型的基础上, 进行了控制器算法设计; 在仿真测试中增加扰动验证控制器算法设计的有效性, 同时在调节阀液流试验中进行了应用。

关键词: 大推力氢氧补燃发动机; 伺服作动系统; 控制器; 仿真; 扰动

Closed-Loop Control Method and Application of Hydraulic Pressure of High-Thrust LOX/LH2 Staged Combustion Cycle Engine Regulating Valve

LI Ningning¹, XU Zhiqiang¹, HU Hui¹, XU Liang²

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

2. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to optimize the carrying capacity, the high-thrust LOX/LH2 staged combustion cycle engines adjust the thrust over a wide range during flight, a servo actuation system is used to achieve a variable thrust adjustment. Based on an electro-mechanical servo-controlled engine thrust adjustment scheme, a closed-loop control flow regulation technology of a regulating valve is the core technology of the variable thrust regulation of the engine. The regulating valve of the servo actuation system is used to adjust the cross-sectional area to control the entrance pressure of the regulating valve. By analyzing the nonlinear factors of the liquid flow test bench and servo actuation system, based on an equivalent system model, a controller algorithm obtained by the experimental data is designed. the closed-loop control method verifies the effectiveness by the simulation testing, while it is applied in the closed-loop test of regulating value liquid flow pressure.

Keywords: high-thrust LOX/LH2 staged combustion cycle engines; servo actuation system; controller; simulation; interference

0 引言

运载火箭的可靠安全的回收是发动机重复使用的前提^[1], 国外的 SSME、SpaceX、RD-171M、RD-180 等型号发动机都具备推力与混合比调节, 且采用伺服作动器驱动调节阀控制方案。国内由中国蓝箭航天空间科技

股份有限公司研制的九州龙云发动机等, 采用主级伺服作动器驱动调节方案实现发动机变推力调节。

为了使航天运载火箭系统的运载能力达到最优, 飞行过程中具备大范围调节推力, 采用了伺服作动系统实现变推力调节, 实现发动机的深度变推, 从而使运载火箭具备推力可控、混合比可调等优势, 进一步提高了操

收稿日期:2024-06-18; 修回日期:2024-08-16。

作者简介:李宁宁(1993-),男,硕士,工程师。

通讯作者:许亮(1980-),男,博士后,教授。

引用格式:李宁宁,徐志强,胡慧,等. 大推力氢氧补燃发动机调节阀液流压力闭环控制方法与应用[J]. 计算机测量与控制, 2025,33(10):97-102.

纵控制的灵活性^[2-3]。

液体发动机变推力调节主要通过调节发动机的混合比实现, RD-171M 和 RD-180、RD-191 等多型号火箭发动机在推力调节控制方面选用数字式电液伺服作动器驱动^[4-5]。电液伺服系统能源供应、驱动控制及作动器组成的伺服控制系统是一种比较复杂控制方式, 因为在面向模型不确定性的电液伺服系统在故障判别、故障定位和可靠性等方面表现较差。高能量密度伺服电机及驱动控制器技术的创新和研究逐渐加快, 机电伺服控制方式在多方面逐渐替换电液伺服控制, 在液体发动机变推力调节和混合比控制方面, 机电伺服控制逐渐成为主要趋势^[6-7]。

开环控制调节系统和闭环控制调节系统为调节控制发动机流量的两种主要方式。常采用在发动机管路中安装节流圈或汽蚀管的方式, 实现对发动机推力的控制和调节。但该方法只能实现对发动机的推力进行小范围调节, 且只能依据节流圈或汽蚀管的尺寸, 调节精度偏低, 常用于固定推力的发动机^[8-9]。

面对 SpaceX 等航天科技公司实现的火箭可重复使用, 开环控制系统已经满足不了当前发展的需求^[10], 闭环控制系统能够消除各类干扰因素对推力的影响, 调节精度高, 能够实现发动机的大范围变推调节。开展调节阀液流压力闭环控制方法的研究和应用, 为氢氧补燃发动机的闭环控制奠定一定的基础。

1 系统结构及原理

分析与设计发动机调节阀液流压力闭环控制系统, 必须建立系统的数学模型。数学模型建立的合理性, 是关系调节阀液流闭环控制系统的最重要的环节。

1.1 作动系统工作原理

作动系统由伺服电机、传动机构、伺服控制单元及角度传感器等 4 大模块构成。伺服系统通过总线通信接收控制计算机下发的调节信息, 依据转换协议将目标信息解算为用于外环位置环计算获得数字量, 同时伺服系统实时采集当前控制对象电机位置进行实时采集, 获取目标位置和当前位置的偏差, 依据位置偏差大小调节被控对象旋转, 被控对象采用先加速、匀速、后减速逐渐逼近目标位置, 电机带动减速机构驱动作动系统向目标位置靠近。位置传感器采用高可靠的旋转变压器, 电机工作原理是借助反映转子位置的位置传感器的输出信号, 通过驱动器驱动与电枢绕组连接的相应的功率开关器件, 使电枢绕组依次馈电, 从而在定子上产生跳跃式的旋转磁场, 驱动永磁转子旋转, 随着转子的转动, 位置传感器不断地送出信号, 以改变电枢绕组的通电状态, 使得在某一磁极下导体中的电流方向始终保持不变。

伺服控制系统实时更新被控对象的位置偏差信息,

实时控制调节电机转速和电流的大小, 当被控对象的位置偏差较大时, 要求电机加速的方式转速运行; 当对象的位置偏差逐渐逼近目标位置时, 伺服控制系统控制电机逐渐降速, 达到要求的稳态精度带宽范围后, 电机开始进入伺服平稳状态, 保持当前位置闭环控制, 作动器系统采用先加速、再匀速、后减速的方式控制电机动作。

1.2 数学模型构建

建立调节阀系统的数学模型的方法主要包括解析法和试验数据方法。其中解析法建立数学模型必须对调节阀及试验台各部件的物理过程有详尽的了解, 同时在实际系统工程中, 由于存在一些未知的因素, 往往很难获得精确的数学方法描述。基于试验数据构建数学模型的方法的主要是, 通过对系统进行试验测试获取试验数据, 然后根据获取的试验数据进行模型系统辨识和处理, 使得隐含在运行数据内的控制性能的信息得以体现出来。因此, 通过调节阀的液流试验方法构建整个系统的数学模型构建。

液流压力控制试验平台如图 1 所示, 控制系统主要包括伺服作动系统、控制器仿真机、上位机、调节阀压力传感器等构成, 控制器。试验数据法通过作动系统调节阀门动作角度变化, 获取当前调节阀入口压力变化值, 通过对系统进行试验测试获取试验数据, 从而运用系统辨识获得该试验台的数学模型。

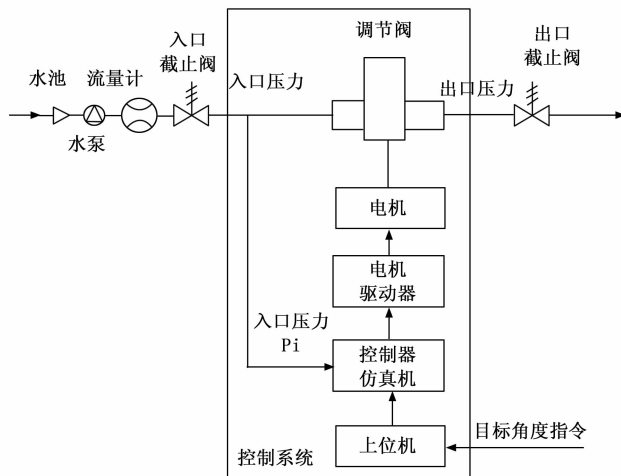


图 1 液流压力控制试验平台框图

1.3 经典 PID 控制原理

液流压力闭环调节采用伺服系统进行闭环控制, 伺服控制系统的性能评价指标主要包括对稳定性、抗扰动能力和动态响应等方面, 其中系统的稳定型是指在给定的目标指令与外部的扰动等复杂环境下, 通过控制系统的自身调整与过渡后, 控制系统达到新的平衡状态, 或者控制系统能够在原来的平衡状态保持; 在抗扰动能力主要是指系统在外界有扰动作用时, 控制系统重新达到

的稳定回复时间短，振荡次数少或能达到无明显振荡；系统的动态响应是要求系统给定的跟随目标的时间与超调量足够小，或无超调。

针对液流压力控制系统，如何让控制系统克服外界扰动而将干扰的影响控制到一个相当小的程度，从而提高控制系统的可靠性。在控制的过程中会普遍地不可避免地受到外部干扰的影响，根据干扰的性质可以将系统受到的干扰分为广义和狭义的解释，狭义的扰动是指系统外部给予的干扰，且这些干扰是未知。广义的扰动是指可以包含外部扰动，也可以包含在建立控制系统模型时的未构建模动态以及参数变动。根据液流压力闭环控制系统中的扰动进行分析，设计相应的扰动处理措施，提高液流压力闭环控制系统的鲁棒性。

为了增强控制系统的稳定性和鲁棒性，针对调节阀液流压力闭环控制系统的控制器设计中，采用了经典传统的比例、积分、微分（PID）设计控制器。但随着自动控制工业技术的研究和发展中，PID 控制器并不能完全适用于自动控制工业发展的需求，因此在面对控制系统中的扰动影响，也发展了一些其他的控制思想。例如滑模控制、 H_{∞} 控制、自抗扰控制、基于观测器控制等方法。可以将这些控制的处理方式分为主动手段与被动手段，对于控制系统中存在的干扰问题，通过反馈镇定来处理

和 PID 控制器一样，是一种被动的处理方式。PID 控制器在控制工程中的应用中有着悠久的历史，由于其结构的简单、可靠性高、易于实现等优势。PID 控制器不需要知道系统所受扰动的模型，具有较大的保守性和鲁棒性，控制稳定性较高。

PID 控制器的系统结构如图 2 所示，调节阀液流压力闭环控制系统的控制器采用经典控制方法，主要由比例、积分、微分 3 个环节组成，其中数学表达式为：

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{k_i} \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

式中， $u(t)$ 为控制器的输出； $e(t)$ 为输出量与给定量的差值； k_p 、 k_i 、 k_d 分别是 PID 控制器的比例、积分、微分参数。

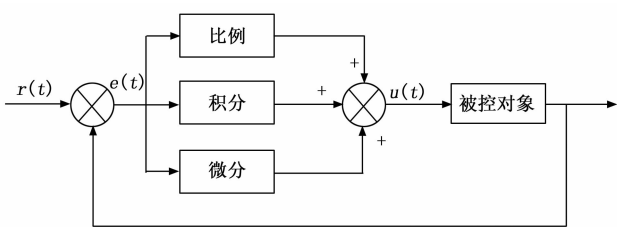


图 2 PID 控制系统结构图

2 液流压力闭环控制方法与应用技术

大推力氢氧补燃发动机调节阀液流压力闭环控制需要满足稳定性、准确性、快速性等指标，这要求对调节

阀闭环控制设计的控制器算法，从设计之初的仿真分析到系统设计再到最后的试验验证，每一步都需要经过科学的迭代和验证环节，其详细标准规范设计流程如图 3 所示。

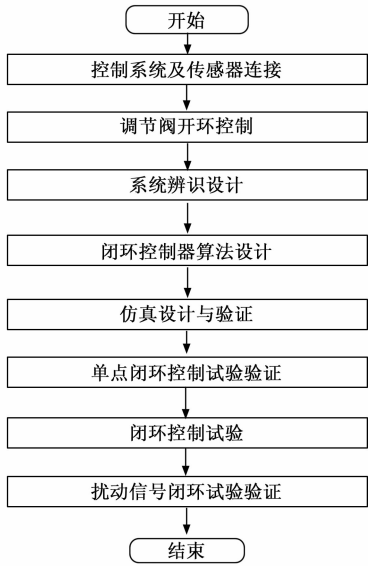


图 3 发动机调节阀闭环控制规范框架

2.1 闭环控制系统架构

为了验证发动机调节阀闭环控制方法，构建了基于分布式以太网总线架构的地面试验用阀门闭环控制系统，其架构如图 4 所示。快速地验证模型及控制算法的有效性，实时调整相关参数和数据采集，选用采用控制器仿真机代替传统的控制器，控制器仿真机为 QNX 实时操作系统，保证处理信号实时性，同时也支持 MATLAB/Simulink 搭建控制模型，快速原型建模与搭载试验过程中，根据调用的不同仿真模型，可以灵活构建出多种实验构型以满足不同测试、仿真需求。

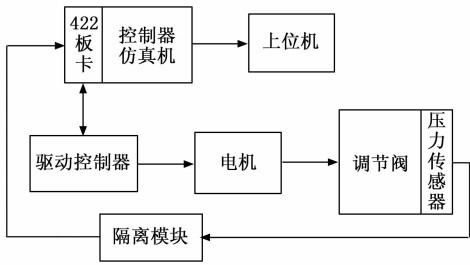


图 4 阀门闭环控制试验系统架构

闭环控制系统架构中传感器的电压信号进行滤波和模数转换处理后，传输到控制器仿真机。驱动控制器与控制器仿真机通过 RS422 进行信息交互，实现作动器的实时监测与调节，控制作动器动作角度。

2.2 信号采集及处理模块设计

压力传感器输出的信号，由于不同设备之间存在共地问题，同时由于试验场地环境较为负载，变频器、电

磁阀、现场信号及不明脉冲等设备在运行过程中都会产生不同频段的电磁信号,对压力传感器信号造成不同程度的干扰,导致控制仿真机采集到的压力传感器信号出现有较大的毛刺,最终导致信号输入偏差错乱,导致程序混乱,指令与监测信号异常,需要对系统中的信号采集进行处理。

对复杂系统中存在的干扰,干扰源来源于内部与外部两个方面。其中,内部干扰主要来源于系统天线之间的相互辐射和单线制供电方式、电机的电压负载与调节瞬间发生变化、低频磁场通过电源线耦合等;外部干扰主要包括一些人为干扰和自然干扰等。对干扰的抑制主

要采用对干扰传播途径进行抑制和提升抗干扰能力、干扰源抑制等 3 种方法,在作动系统的作动器功率供电为强电,其他设备相比均为弱电设备,作动系统与其他独立平台存在电位差,通过空间电磁场传送,进而影响传感器采集信号波动。在闭环控制实验前,应做好各类接地等电位联接与测试,通过对作动系统采取“等电位联结”的方式,实现对作动系统的电压压差进行释放,降低对测量设备的电磁干扰,同时在传感器信号在进入控制器设备之前,通过滤波的方式去噪处理。

3 闭环控制系统算法设计

调节阀闭环液流压力控制系统,是一个含控制器算法设计经过仿真测试到单点闭环试验及扰动连续闭环试验。

3.1 闭环控制原理

闭环控制由控制器仿真机、调节阀、作动器、调节阀压力传感器构成,控制器仿真机通过压力目标值与调节阀压力传感器差值得到 ΔP ,然后根据设计的被控对象的数学模型反算得到作动器应该动作的角度偏差,由位置—速度—电流三闭环级联控制算法处理得到控制量,使作动器带动调节阀到达指令位置,实现调节元件位置的精确控制,实现目标压力调节。相比苏联/俄罗斯 RD-170、RD-180 和 RD-191 等多型号发动机采用的电液伺服方案,该机电液伺服控制系统相比气液控制系统设计简化和可靠,进而提高了发动机的混合比调节和变推力控制性能和精度。

闭环控制器根据压力目标值与调压阀后压力传感器差值实时调节阀芯位置,改变阀芯受控流体的压差,实现调节阀压力精确控制调节阀液流压力闭环控制模式如图 5 所示。

根据发动机调节阀实验要求,阀门入口压力达到稳定压力 5.5 MPa 后,对调节阀进行连续闭环调节,闭环调节的压力目标信号为方波和斜波如图 6 所示。

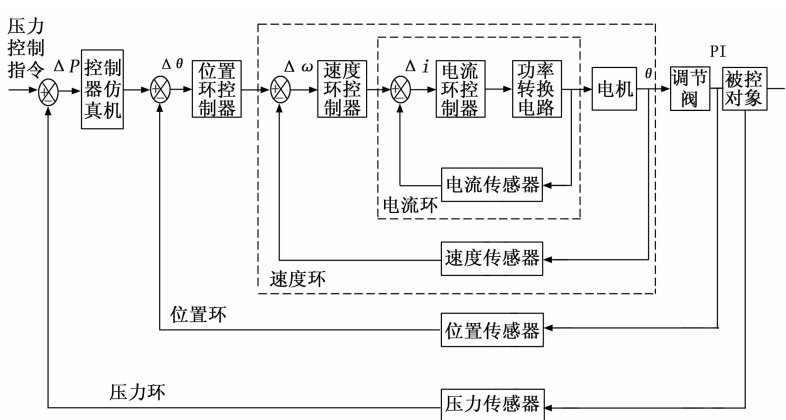


图 5 调节阀液流压力闭环控制模式框图

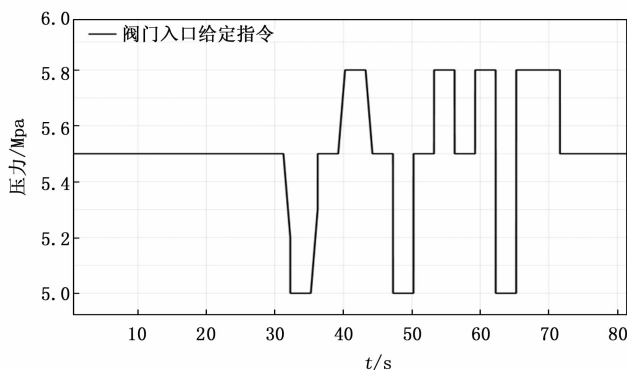


图 6 调节阀入口压力给定曲线

通过阀门的开环控制,根据阀门进行相应的阶跃指令调节获得调节阀实验要求的压力曲线,从而获取被控对象的阀门特性,同时根据开环数据对被控对象进行辨识,获得被控对象的线性化模型。

3.2 闭环控制器算法设计

对于不同的试验台,调节阀液流闭环试验的控制算法的设计参数和设计思路是不同的,如何设计一个鲁棒的控制算法,是控制器设计的核心。

调节阀液流压力闭环控制系统结构,由控制对象分析可知,该控制对象为单输入单输出的系统,因此,选择采用根轨迹法来进行控制算法设计。采用根轨迹法是能够从开环的零点和极点推断出闭环极点的位置,是一种预测闭环传递函数特征方程的跟随控制增益增加的运动轨迹的图解方法^[11]。在 S 平面内,使用一套法则构造所有闭环极点随开环增益变化的轨迹,从中分析得到的轨迹为根轨迹的分支。同时,根轨迹的分支数是由开环传递函数多项式的分子、分母的次数决定^[12]。

依据根轨迹法可以对模型进行动态特性分析,明确主导动态特性,分析和设计 PI 经典控制算法相应的参数,同时根据分析零点的位置对闭环系统根轨迹的影响,以及开环增益对闭环极点位置的影响,进而确定研究对象设计的控制器具体参数^[13]。

3.3 闭环控制仿真测试验证

3.3.1 单点闭环控制仿真测试

基于试验数据方法获得的系统数学模型，同时根据设计的控制器算法，进行设计闭环系统仿真，设计的闭环系统模型如图 7 所示。

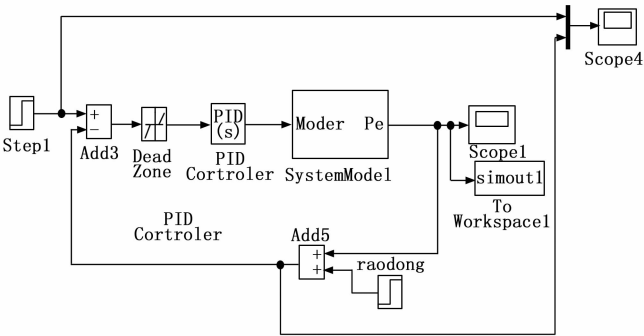


图 7 单点闭环控制仿真模型

依据系统对调节阀进行给定的压力连续闭环指令，起始压力在 5.5 MPa，通过单点闭环控制，稳定后给出压力指令 5 MPa，经过仿真试验验证结果如图 8 所示。

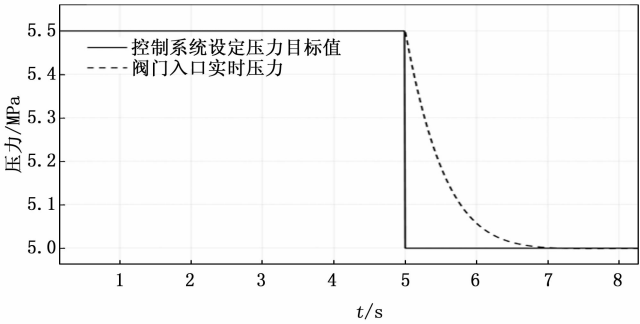


图 8 单点闭环控制仿真试验验证

3.3.2 单点加扰动闭环控制仿真测试

在控制系统的实现过程中，即便设计较优的控制器算法，在单点液流闭环控制试验初期具有良好的性能，但进行连续闭环控制过程中可能会由于传感器和执行器等的故障、时变扰动和非线性过程以及实际运行状况的改变等原因，对控制系统产生干扰；因此，在仿真测试过程中，引入扰动信号对控制器算法进行验证。

在单点闭环控制系统模型中引入阶跃扰动信号，仿真模型如图 9 所示。

闭环控制条件下，仿真中添加扰动信号值为 0.3，周期为 4 s，阀门压力变化曲线如图 10 所示。

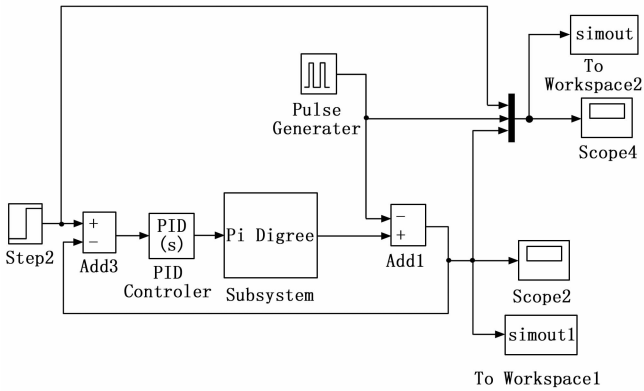


图 9 闭环控制算法加扰动仿真分析模式

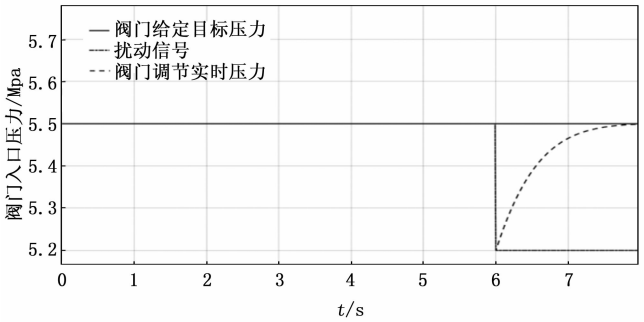


图 10 闭环控制施加扰动阀门压力变化曲线

使阀门入口的压力达到目标值，调节阀入口压力实时调节曲线如图 11 所示。

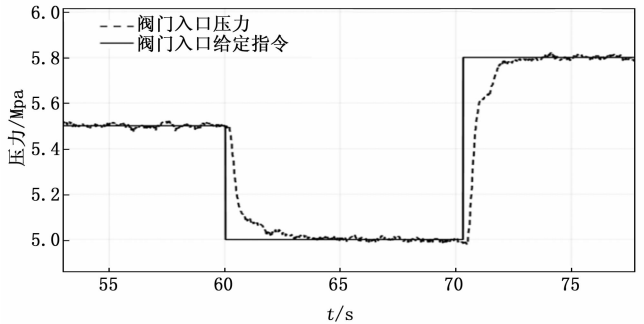


图 11 单点闭环调节阀压力变化曲线

4 闭环控制方法试验验证

4.1 调节阀液流压力闭环控制试验验证

依据系统对调节阀进行给定的压力连续闭环指令，根据调节阀入口压力达到稳定 5.5 MPa 后，对调节阀进行单点闭环调节，控制器仿真机自动调节动作角度，

通过对调节阀进行单点闭环控制测试，与仿真测试结果相同，验证了设计的控制算法有效性，满足调节阀液流压力控制要求。因此，逐步通过连续闭环验证控制算法准确性，对调节阀进行连续闭环控制，调节阀液流压力闭环试验的调节阀入口压力实时调节曲线如图 12 所示。

4.2 含扰动调节阀液流压力闭环试验

为了验证设计的闭环控制算法有效性和鲁棒性，验证整个伺服控制系统设计的兼容性，在液流试验过程中不对调节阀进行闭环控制，同时在试验台施加周期为 4 s 大小为 0.3 MPa 的扰动，实时监测调节阀入口的压力

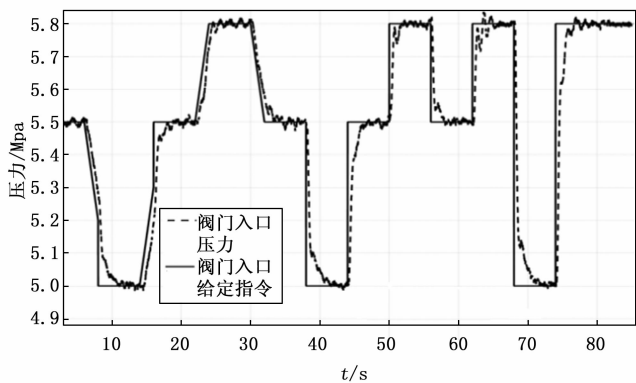


图 12 闭环调节阀压力闭环控制方法验证变化曲线

值, 液流试验过程中调节阀入口施加压力变化曲线如图 13 所示, 调节阀入口压力随着扰动的出现实时的改变。

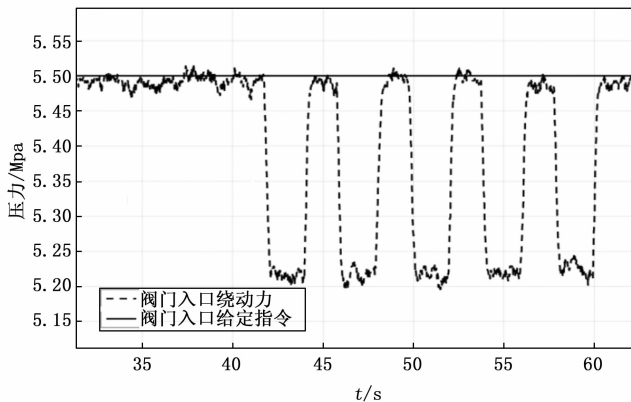


图 13 施加扰动变化曲线

依据系统对调节阀进行给定的压力连续闭环指令, 调节阀入口压力达到稳定压力 5.5 MPa 后, 对调节阀进行连续闭环调节, 同时在试验台持续施加周期为 4 s, 大小为 0.3 MPa 的扰动信号, 入口压力设定值与入口调节压力测量的变化曲线如图 14 所示。

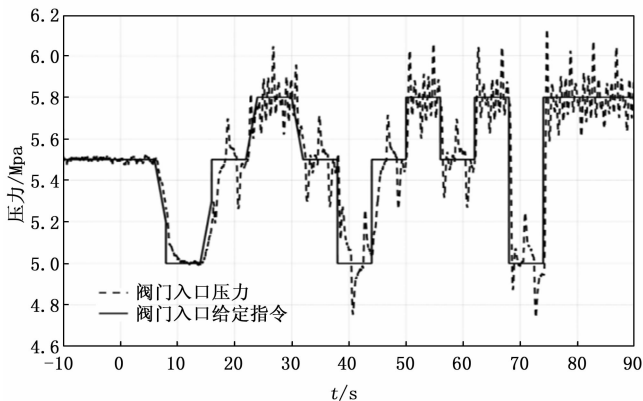


图 14 扰动加连续闭环调节阀压力变化曲线

由于调节阀控制系统存在各类干扰因素, 例如外部的干扰信号和控制系统自身的电磁告饶, 往往会影响

控制器算法的控制性能, 针对调节阀控制系统的稳定性, 提出了在算法验证过程中增加干扰信号, 通过仿真研究与实体调节阀液流实验, 实现了控制算法的快速性、稳定性与抗干扰性, 验证了其控制性能的有效性。

5 结束语

通过调节阀入口压力作为调节控制变量, 同时在实验中增加扰动信号, 依据仿真设计了闭环控制算法, 采用位置-速度-电流三闭环控制模式的作动系统调节阀门的开度, 实现了液流压力闭环控制, 为指导发动机的系统精准变推力调节方案实现奠定基础。

参考文献:

- [1] 范瑞祥, 郑立伟, 宋强, 等. 发动机推力调节能力对系列构型运载火箭总体性能影响研究 [J]. 载人航天. 2014, 20 (5): 395-398.
- [2] 朱宁昌, 刘国球, 章本立, 等. 液体火箭发动机设计 [M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] WILSON R, LIMAGE C, HEWITT P. The evolution of Ram-jet missile propulsion in the U. S. and where we are [R]. AIAA 96-3148.
- [6] BAUER C, DAVENNE F, HOPFE N, et al. Modeling of a throttleable ducted rocket propulsion system [R]. AIAA 2011-5610.
- [7] PINTO P C, KURTH G. Robust propulsion control in all flight stages of a throttleable ducted rocket [R]. AIAA 2011-5611.
- [8] 唐虎, 张涛, 刘昌波. 变推力发动机仿真计算分析 [J]. 火箭推进, 2008, 34 (5): 1-5.
- [9] 张思远, 孙慧娟, 周利民. 变推力液氧/甲烷膨胀循环发动机系统方案研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2015, 5 (4): 16-19.
- [10] GIULIANO V J, LEONARD T, LYDA R T. CECE: expanding the envelope of deep throttling technology in liquid oxygen/liquid hydrogen rocket engines for NASA exploration missions [M]. 46th AIAA/ASME/SAE/AS-EE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010.
- [11] 李家文, 张黎辉, 张振鹏. 液体火箭发动机数值模拟的计算模型建立方法 [J]. 推进技术, 2002, 23 (5): 363-365.
- [12] 吕鹏翔. 液体火箭发动机工作过程数值仿真 [J]. 火箭推进, 2004, 30 (5): 10-17.
- [13] 白晓瑞. 液体火箭推进系统动态特性仿真研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.