

## 航空发动机燃油泵调节器计量活门特性分析

蔡惠坤<sup>1</sup>, 李朝阳<sup>1</sup>, 周毅博<sup>1,2</sup>, 徐晨<sup>1</sup>

(1. 厦门大学 萨本栋微米纳米科学技术研究院, 福建 厦门 361102; 2. 中国航发控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

**摘要:** 为提高航空发动机燃油泵调节器系统的控制精度和品质, 构建了基于AMESim的航空发动机计量活门仿真模型和实验测试平台, 解析了发动机出口流量与活门开度之间的线性变化关系。活门前后压力先缓慢增加, 在活门开度达到60%后迅速增大, 但二者的压力差基本维持在0.5 MPa。仿真与实验结果的变化趋势一致, 稳态误差控制在5%以内, 动态误差控制在10%以内。同时研究了系统转速和出口负载对计量活门工作特性的影响, 发现系统转速对计量活门前后压力影响较大, 易引发压力超调和液压冲击现象; 而出口负载对计量活门前后压力影响较小, 虽无超调, 但有轻微的滞后现象。

**关键词:** 航空发动机; 燃油泵调节器; 计量活门; 稳态特性; 动态特性

中图分类号: V 7 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)04-0071-07

## Characteristic Analysis on Metering Valves of Fuel Pump Regulators in Aero Engines

CAI Hui-kun<sup>1</sup>, LI Zhao-yang<sup>1</sup>, ZHOU Yi-bo<sup>1,2</sup>, XU Chen<sup>1</sup>

(1. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. China Aviation Development Control System Research Institute, Wuxi 214063, China. Corresponding author: CAI Hui-kun, E-mail: caihuikun@xmu.edu.cn)

**Abstract:** In order to improve the control accuracy and performance quality of fuel pump regulators for an aero engine, a simulation model and an experimental bench of the metering valve were built based on AMESim, and the linear relationship between the engine outlet flow and the valve's opening degree was analyzed. It was found that the engine outlet flow changes linearly with valve opening, but both the inlet and outlet pressures change slowly initially and then increase greatly when the valve's opening reaches 60%. Meanwhile, the pressure difference of the inlet and outlet is almost at 0.5 MPa. The simulation results agree well with the experimental results, and the differences of the steady and dynamic states are below 5% and 10%, respectively. Furthermore, the effects of the system's rotating speed and outlet load on the metering valve performance were also studied, and it was found that the system's rotating speed plays a large role on the metering valve performance as there can be some pressure overshoot and hydraulic impact when it changes, whereas the outlet load plays a small role on the metering valve performance as there is no pressure overshoot but there is a little lagging.

**Key words:** aero engine; fuel pump regulator; metering valve; steady characteristics; dynamic characteristics

燃油泵调节器作为航空发动机的重要部件, 通过燃油泵将燃油从油箱中抽出并加压, 以维持发动机在多种工作状态下对流量和压力的需求, 保证发动机在加速、减速、均速、停车等各种状态下的正常工作<sup>[1-4]</sup>, 在航空发动机控制系统中起到

重要作用, 也因此受到国内外学者的广泛关注, 围绕其液压性能<sup>[5-6]</sup>、结构特性<sup>[7-9]</sup>、故障分析<sup>[10-12]</sup>和控制规律<sup>[13-14]</sup>等方面开展了大量研究。

随着对燃油泵调节器优化设计和性能要求的日益提高, 对燃油泵调节器的研究逐渐深入到

关键零部件的特性分析上.如 Dasgupta 等<sup>[15]</sup>基于阀体液压特性,探索了不同结构参数对溢流阀动态性能的影响,获取了其变化规律.洪威<sup>[16]</sup>利用 AMESim 软件仿真分析了多种结构参数对溢流阀动态特性的影响,表明主阻尼孔和先导阀阻尼孔的直径大小对其压力动态性能影响很大.Sorli 等<sup>[17]</sup>通过仿真分析研究了主要结构参数对气动压力阀的作用,并进行了实验验证.王华威等<sup>[18]</sup>提出了一种定压活门稳定性的定量分析方法,研究了弹簧刚度、阀芯直径、定压腔容积等结构参数对定压活门稳定裕度的定量影响.

由文献分析可知,目前学者们已经对航空发动机液压系统开展了多个关键零部件的研究,但针对计量活门特性的分析仍然较少,缺乏相关的仿真与实验研究.而计量活门作为航空发动机燃油系统的关键元件之一,其液压性能、稳态和动态特性直接关系到发动机的控制性能和计量精度,计量活门的研究与发展对航空发动机控制系统具有重要意义.因此,本文将开展针对燃油泵调节器中计量活门特性的仿真模拟和实验研究,重点分析活门开度、系统转速和出口负载等参数对计量活门性能的影响,以提高燃油泵调节器的设计效率 and 设计水平,为航空发动机机械结构的优化和电控液系统的更新升级以及发动机燃油效率的提高提供坚实基础.

## 1 仿真建模

航空发动机控制系统依靠燃油泵调节器对发动机的供油进行调节,以合理配合发动机的工作状态,是发动机必不可少的元部件.本文首先从计量活门、组合泵、停车活门等的仿真建模入手,进而构建系统的整体仿真模型.

### 1.1 计量活门建模

计量活门的衬套上开有放油窗口,通过调节阀的运动调节放油开度,从而调整燃油流量大小.信号控制台根据发动机工况向电子控制器发送指令.电液伺服阀在接收到电信号后,调整高压与低压油的流动方向,进而改变控制腔的压力,影响阀芯左右运动.同时,安装在阀芯上的位移传感器会将阀芯的位移信息反馈给电子控制器,实现对阀芯位移的闭环控制,最终确保信号控制台能够精确控制燃油流量供给发动机.其结构示意图和仿真模型如图 1 所示,主要结构参数如表 1 所示.

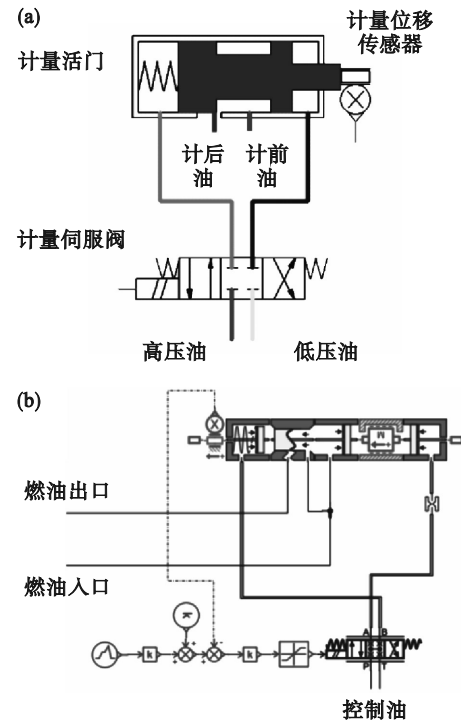


图 1 计量活门

Fig. 1 Metering valve

(a)—结构示意图; (b)—仿真模型图.

表 1 计量活门参数

Table 1 Parameters of the metering valve

参数名称	参数值
腔直径/mm	16
杆直径/mm	8
最小开度/mm	0
最大开度/mm	11
过流面积/mm <sup>2</sup>	$(0.9 \times x) / 1\ 000$
水力直径/mm	$1.8 \times x / (0.9 + 1\ 000 \times x)$
预紧力/N	15
弹簧刚度/(N·s <sup>-1</sup> )	2.381

注:  $x$  为开口部分长度.

计量活门的流量由  $Q = C_d A \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$  获得(其

中,  $C_d$  为流量系数,  $A$  代表活门阀芯打开部分的面积,  $\Delta p$  为计量活门腔室压差,  $\rho$  为燃油密度). 在温度变化不大的工况下, 当密度恒定时, 流量系数可以视为不变. 如果保持计量活门前后的压差恒定, 则流量只与阀孔面积相关, 即流量取决于计量活门的阀芯位移. 这里引入计量活门开度来表征计量活门阀芯位移, 将其定义为窗口流通面积与溢流孔总面积之比. 如图 2 所示, 溢流孔形状为矩形, 最大位移为  $b$ , 孔宽为  $h$ , 开口部分长度为  $x$ . 液压油流通面积  $A = xh$ , 因此, 计量活门开度定义为开口部分长度  $x$  与最大位移  $b$  的比值.

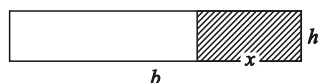


图2 溢流孔

Fig. 2 Overflow orifice

### 1.2 燃油组合泵建模

如图3所示,燃油组合泵包括离心泵与齿轮泵.离心泵吸入飞机油箱中的燃油后,流经齿轮泵吸油口或低压腔;主轴转动将油液进一步压缩成高压油,排入齿轮泵的出口.此时流出的燃油称为计前高压油,其压力受活门出口载荷和活门结构参数的影响,仿真计算过程中,离心泵的参数由实际结构尺寸确定;齿轮泵设定为排量3.453 mL/r,转速12 129 r/min.

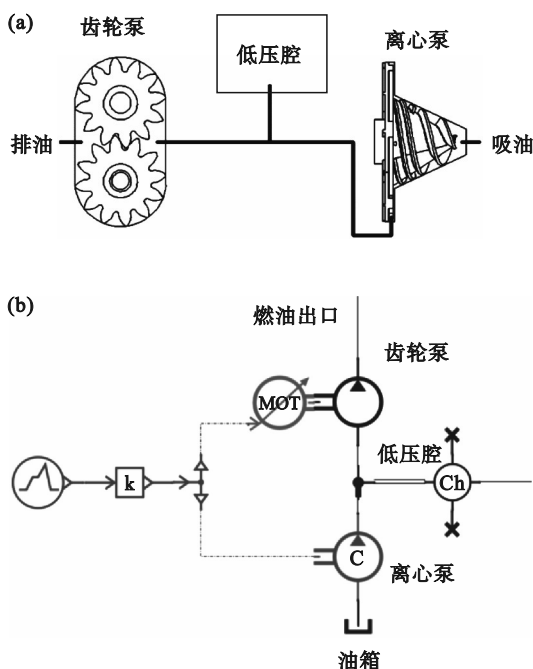


图3 燃油组合泵

Fig. 3 Fuel combination pump

(a)—结构示意图; (b)—仿真模型图.

### 1.3 停车活门建模

停车活门在AMESim仿真中采用液压元件库中的二位三通电磁阀模块进行简化仿真,如图4所示.设定在前7 s内,系统于第3 s时开始停车,停车电磁阀的启动时间持续2 s,之后直接关闭.

### 1.4 燃油泵系统整体模型

燃油泵调节器一般由离心齿轮组合泵、安全活门、计量活门、压差活门、增压活门、停车活门等部件构成.其余部件的建模可参考文献[8].飞机油箱中的燃油由离心泵吸入低压腔,经过齿轮

泵进一步增压后进入发动机燃烧室,此过程需由计量活门和增压活门精确控制,以确保燃油供应符合发动机的燃烧需求.多余的燃油则在压差活门的调节下回流至低压腔,以维持系统的压力平衡.当发动机发出停车信号后,系统中的燃油在停车电磁阀的控制下流回低压腔,从而切断燃油供应,确保系统安全停机.基于AMESim仿真软件,在对计量活门进行建模的基础上,同时构建齿轮泵、停车活门、安全活门、压差活门等其他部件的仿真模型,依据燃油泵的工作原理连接各部件,即可建立燃油泵调节器的系统模型,如图5所示.

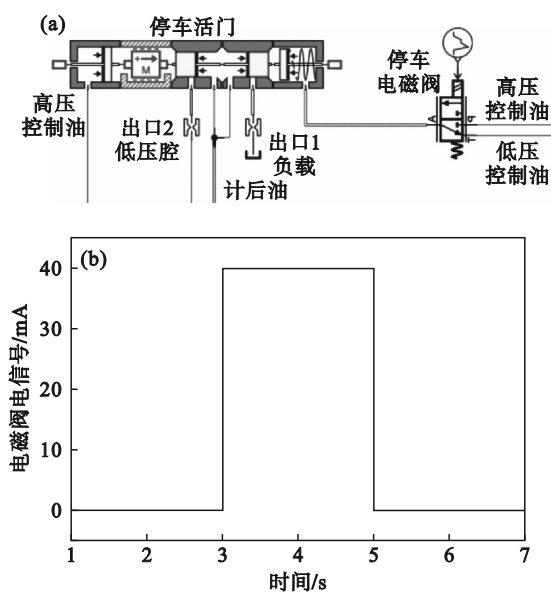


图4 停车活门

Fig. 4 Braking valve

(a)—仿真模型图; (b)—停车活门模拟电信号.

## 2 实验系统

如图6所示,搭建实验台开展对燃油泵调节器的实验研究.该实验台主要由燃油泵调节器、实验油箱、传动装置、传动转接、模拟负载、测试系统等组成.实验台具备以下核心功能:①为燃油泵调节器进口提供精确控制的燃油供应,并设定系统的温度、压力和流量;②采用当量喷嘴阀门模拟发动机的不同供油时刻,以重现实际运行条件;③实时记录流量 $Q$ 、压力 $p$ 、温度 $T$ 等关键参数,确保数据的完整性.实验中,计量活门的前端压力为 $p_{jq}$ ,后端压力为 $p_{jh}$ ,出口流量为 $Q_c$ .实验环境条件包括:①环境温度控制在15~35℃;②室内相对湿度控制在20%~80%;③压力为当地大气

压,燃油型号为大庆 RP-3,燃油泵调节器进口燃油的压力要求为(0.1±0.05) MPa,额定转速为

12 129 r/min,燃油泵调节器最大计量流量为 590 kg/h.

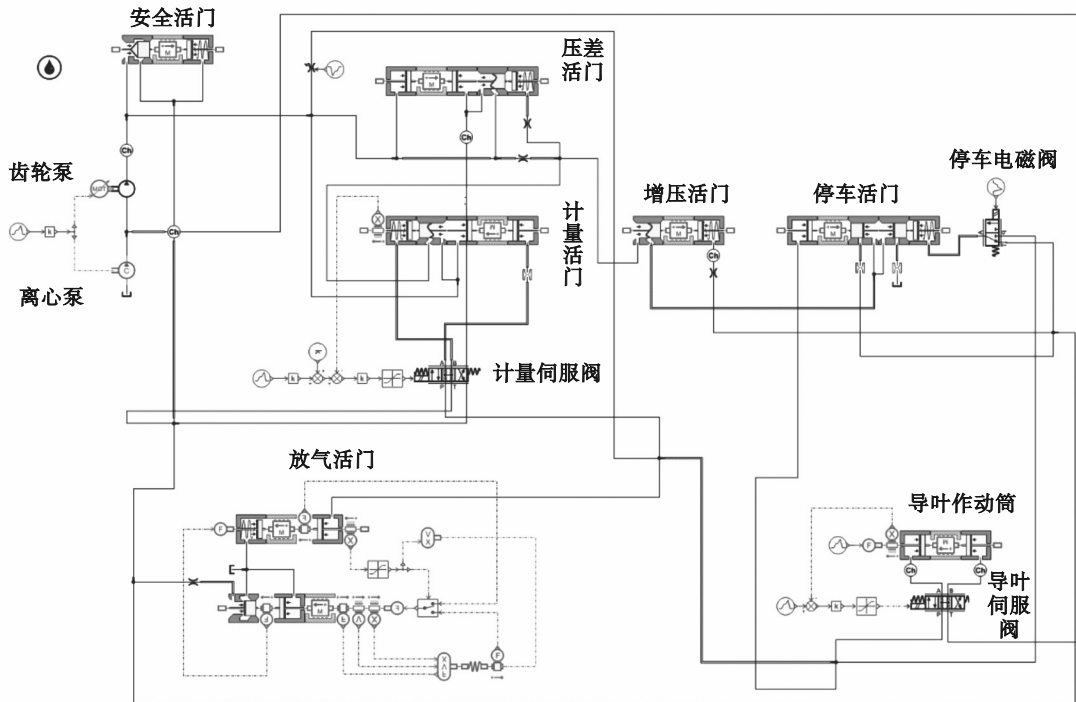
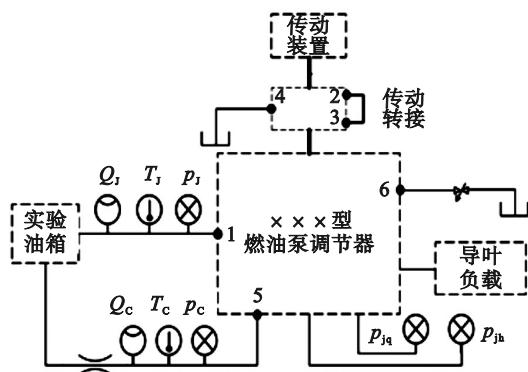


图5 燃油泵调节器系统仿真模型图

Fig. 5 Simulation model diagram of the fuel pump regulator system



- 1—燃油泵调节器进口; 2—低压泵出口到燃油滤;
- 3—燃油滤出口到高压泵; 4—滤油口;
- 5—计量出口; 6—放气口.

图6 燃油泵调节器实验台管路连接示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the fuel pump regulator test bench piping connections

### 3 仿真与实验结果分析

#### 3.1 稳态特性分析

在飞机速度提升工况下,发动机急需更多的燃油流量,计量活门通过控制台给出的信号,加大活门开度,实现大流量燃油的供给,以确保燃油流量适应发动机功率的提升.在仿真模型中,

输入信号设置为0~100 s的位移变化,模拟了计量活门阀芯逐步响应的过程.在此过程中,活门开度比例从0平滑上升至100%,再现了计量活门在给定工况下接收到加速信号后逐步增大开度的情况.此仿真方法有效地捕捉了加速条件下燃油需求的动态响应,增强了对计量系统性能的理解.

在组合泵转速比 $N_g=100\%$ 条件下,计量活门的出口初始压力保持在2.5 MPa.当计量活门从完全关闭到完全打开时,选取其中10个稳态工况,分析系统出口燃油变化随计量活门开度的改变.如表2所示,实验结果与仿真结果的变化趋势基本一致.然而,在开度较小时,数值误差较为显著,随着开度增大,误差逐渐减小,最大相对误差达4.7%.进一步分析发现:在实验条件下,当计量活门较小时,短时间内燃油无法正常释放,多余的燃油被挤压在活门内部,温度随之升高,导致油液密度降低和出口质量流量变化.而在仿真模型中,油液密度被假设为常数,忽略了温度变化对流量的潜在影响.此现象揭示了在高精度燃油流量控制中考虑温度效应的重要性,为进一步优化仿真模型提供了有力依据.

图7为计量活门开度与计量活门进出口压力

表 2 计量活门开度与发动机出口流量关系  
Table 2 Relationship between engine outlet flow and metering valve opening ratio

活门开度/%	实验流量	仿真流量	相对误差/%
	kg·h <sup>-1</sup>	kg·h <sup>-1</sup>	
10	66.4	62.4	4.5
20	130.1	134.9	0.7
30	189.5	198.3	4.7
40	248.4	257.2	0.5
50	310.1	320.3	0.3
60	371.9	384.8	0.5
70	430.6	440.9	0.4
80	496.4	495.9	0.1
90	554.8	554.1	0.1
100	591.3	590.2	0.2

注:相对误差=(实验流量-仿真流量)/实验流量.

和压差的关系.当计量活门开度从 0 至 60% 时,压力增长缓慢,这主要是由计量活门本身的结构特性决定的,该活门的特性属于后增大类型.而当活门开度超过 60%,计量活门前后压力迅速增加.这主要是由于燃油组合泵转速恒定,总燃油量不变,在计量活门开度逐渐增大的过程中,计量活门前后压力同步变化.然而,在活门开度逐渐增大的过程中,计量活门前后压力差基本稳定在 0.5 MPa,仿真与实验的最大相对误差约为 3.8%.

### 3.2 动态特性分析

实验中,计量伺服阀收到系统控制信号后,通过调整计量活门前后腔室的压力差来控制活门阀芯的移动,直到线位移传感器发出位移信号后停止调整.由于模型中信号的响应是没有延时的,因此仿真时通过对每个连续阶跃信号施加 0.2 s 的响应时间来表示活门开度变化.仿真过程中,在组合泵转速比  $N_g=100\%$  条件下,活门从初始状态开始,以每次 10% 的开度逐渐递增至完全打开,然后再以相同的规律递减回初始状态.

图 8 为出口流量随计量活门开度阶跃变化的实验曲线和仿真曲线.实验过程中,出口流量的最大响应调节时间为 0.22 s,且在部分阶跃中出现了轻微超调现象.仿真分析中由于边界条件较为理想,没有出现超调现象,其最大响应时间为 0.25 s.实验与仿真的结果变化趋势保持了良好的一致性,数值上的最大相对误差为 5.5%,主要是因为仿真和实验中阀芯移动对控制信号的响应无法完全一致所造成的.该差异揭示了仿真系统在动态响应同步方面的局限性,并表明未来研究

需优化信号同步机制,以提高仿真精度和实验的可比性.

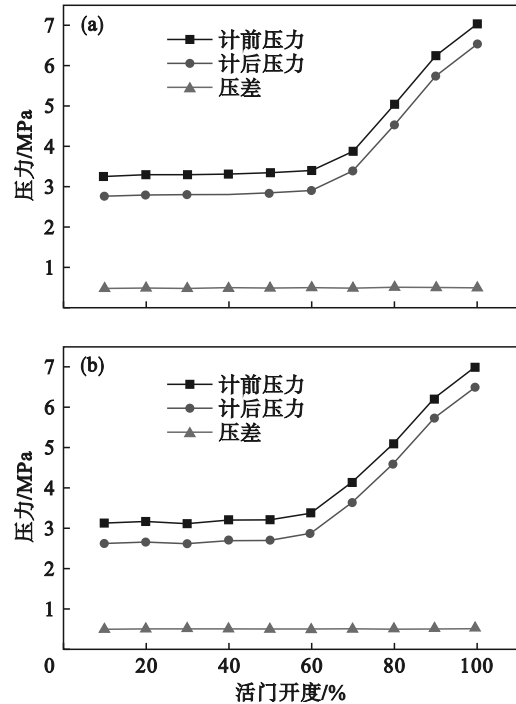


图 7 计量活门进出口压力、压差随开度变化曲线  
Fig. 7 Inlet and outlet pressure and pressure difference of the metering valve vs. its opening ratio  
(a)—实验结果; (b)—仿真结果.

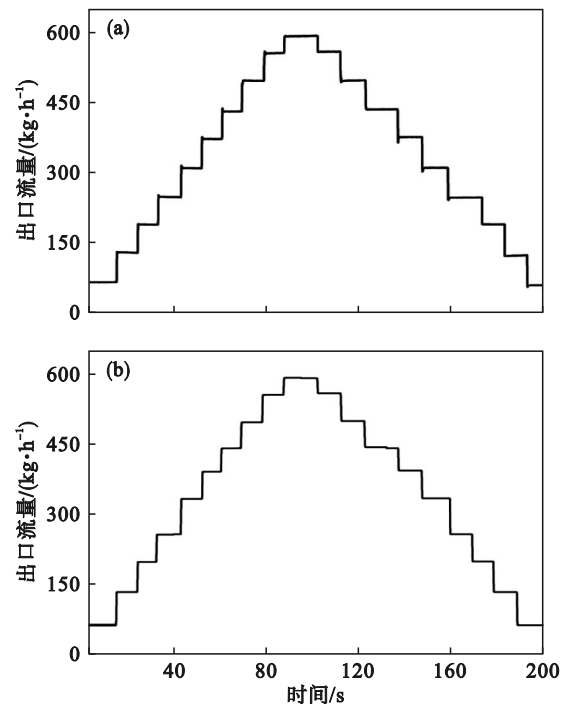


图 8 装置出口流量与计量活门开度的关系  
Fig. 8 Outlet flow rate of the device vs. metering valve opening ratio  
(a)—实验结果; (b)—仿真结果.

图9为活门进出口压力的响应特性.与出口流量类似,实验中的最大响应调节时间也是0.22 s,在部分阶跃时刻也出现了轻微超调现象;仿真结果仍然较为理想,无超调出现,响应时间为0.25 s.实验结果与仿真结果的最大相对误差达7.1%,这主要是由于仿真建模过程中忽略了管路振动、压力波动等因素所致.

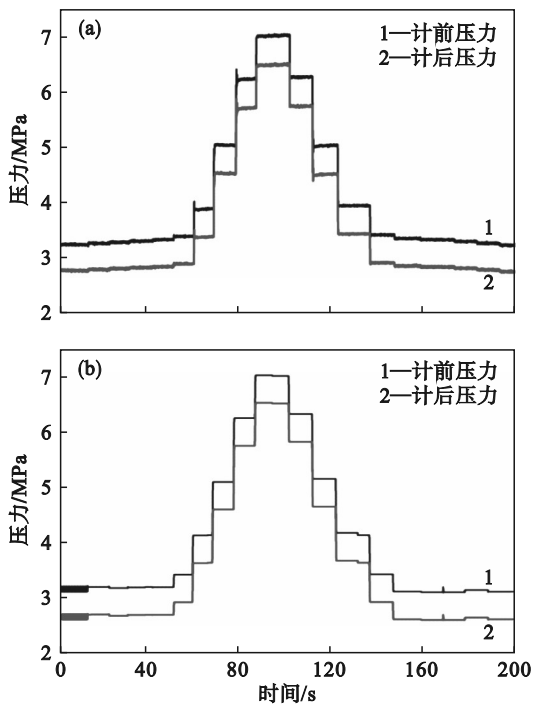


图9 活门进出口压力响应曲线

Fig. 9 Inlet and outlet pressure curves of the metering valve

(a)—实验结果;(b)—仿真结果.

#### 4 系统转速和出口负载变化对计量活门的影响分析

上述实验验证了仿真模型的准确性和可靠性.因此,基于该仿真模型,模拟分析了3种典型工况下燃油泵调节器的工作性能:①在飞机速度提升等阶段,通过增大调节计量活门开度来提供更多的燃油供给发动机;②当发动机转速发生变化时,燃油泵的转速随之改变,相应的计量活门也跟着调整以适应转速变化;③因发动机工况载荷变化引起的系统出口压力变化.基于上文对第1种情况的仿真分析与实验对比,验证了数值模型的准确性和可靠性,系统转速和出口负载变化对计量活门影响的分析将主要基于仿真模型展开.

##### 4.1 系统转速对计量活门的影响分析

为模拟系统转速的动态变化,在仿真时设定计量活门开度保持在50%,转速从 $N_g=50\%$ 阶跃增大到70%,再阶跃减小到50%,阶跃时间为0.2 s.图10为系统转速变化过程中计量活门进出口压力的动态响应曲线.从图中可以看出,随着系统转速的提升,计量活门前后的压力同步小幅上升,但二者之间的压力差基本保持恒定.这一压力增加主要是由于燃油泵的出口流量随转速的增大而增大,进而压力差模块的流量和计前腔室的压力也随之增大.当系统转速阶跃上升时,计量活门前后压力的调节时间约为0.21 s,最大超调量为7%;在转速阶跃下降时,调节时间约为0.22 s,超调量为5%,均在系统允许范围之内.值得注意的是,燃油泵转速的阶跃调整过大可能产生系统管路中的冲击载荷和瞬时液压波峰,进而引起设备振动和潜在的磨损.为避免压力冲击带来的不利影响,在实际操作中应尽量控制系统转速的平缓变化,以减少冲击对设备的影响,从而延长系统的使用寿命并提高运行的平稳性.

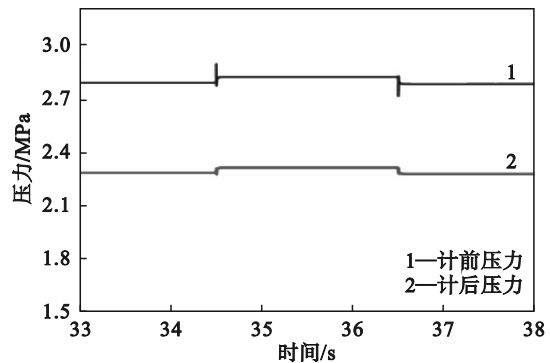


图10 计量活门进出口压力、压差随系统转速的变化曲线

Fig. 10 Inlet and outlet pressure and pressure difference of the metering valve vs. system rotating speed

##### 4.2 出口负载对计量活门的影响分析

为模拟出口负载的动态变化,在仿真中设定泵转速比为 $N_g=100\%$ ,活门开度为100%,出口压力从3.4 MPa阶跃增加到6.5 MPa,阶跃时间为0.2 s.图11为出口负载变化过程中计量活门进出口压力的变化曲线.从图中可以看到,由于计量活门前后压差维持在0.5 MPa,随着出口压力的阶跃变化,计前压力也随之阶跃到7.0 MPa,其上阶跃调节时间约为0.3 s,有轻微的滞后,但无超调;下阶跃阶段,计前压力同时回落到3.9 MPa,调节时间约为0.2 s,无滞后延时,也无超调.

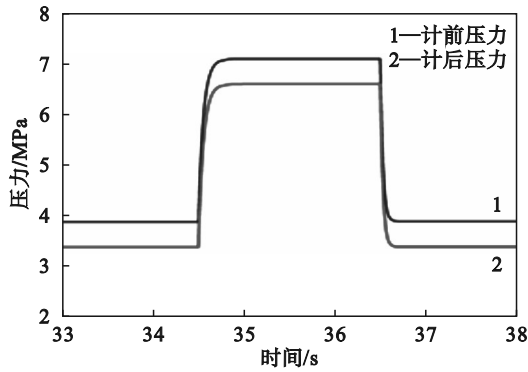


图11 计量活门进出口压力随出口负载的变化曲线

Fig. 11 Inlet and outlet pressures of the metering valve vs. outlet load

## 5 结 论

1) 通过仿真解析了发动机出口流量与活门开度之间的线性变化关系. 计量活门前后压力在活门开度从0至60%时增长缓慢; 当开度超过60%后, 压力迅速增加, 但二者的压差基本维持在0.5 MPa.

2) 搭建了燃油泵调节器实验测试台架, 仿真与实验结果的变化趋势一致, 稳态误差控制在5%以内, 动态误差控制在10%以内, 验证了仿真模型的准确性和可靠性.

3) 在实验验证的基础上, 研究了系统转速和出口负载对计量活门工作特性的影响. 研究结果表明, 系统转速对计量活门前后压力的影响较大, 容易引发压力超调和液压冲击现象; 出口负载对计量活门前后压力的影响较小, 压力无超调, 但有轻微滞后.

### 参考文献:

- [1] Nian F Q, Ma H J, Yang G H. Aero-engine main fuel control loop modeling and identification [C]//2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Guiyang, 2013: 5032-5037.
- [2] Gimadiev A G, Kluev N I, Stadnikv D M. Calculation of static and dynamic characteristics for fuel consumption regulator in aircraft engines, taking into account the hydrodynamic force[J]. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, 8(1): 431-435.
- [3] Mojallal A S, Pirkandi J, Mahmoodi M, et al. Optimum design, simulation and test of a new flow control valve with an electronic actuator for turbine engine fuel control system [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, 65: 65-77.
- [4] Lyu L T, Chen Z, Yao B. Development of pump and valves

combined hydraulic system for both high tracking precision and high energy efficiency [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(9): 7189-7198.

- [5] Yang G C, Yao J Y. Nonlinear adaptive output feedback robust control of hydraulic actuators with largely unknown modeling uncertainties [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 79: 824-842.
- [6] Zhao X A, Huang B, Chen T R, et al. Numerical simulations and surrogate-based optimization of cavitation performance for an aviation fuel pump [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(2): 705-716.
- [7] 徐晨. 航空发动机燃油泵调节器特性分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.  
(Xu Chen. Characteristic analysis of aero-engine fuel pump regulator[D]. Xiamen: Xiamen University, 2021.)
- [8] Kuhn K D. Using structural topic modeling to identify latent topics and trends in aviation incident reports [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 87: 105-122.
- [9] Tudosie A N. Hydro-mechanical fuel flow controller for aircraft jet engines [C]//2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC). Sinaia, 2017: 343-348.
- [10] Atkinson G J, Mecrow B C, Jack A G, et al. The analysis of losses in high-power fault-tolerant machines of aerospace applications [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, 42(5): 1162-1170.
- [11] Wang K, Du X, Sun X M, et al. Fault simulation and diagnosis of the aero-engine fuel regulator [C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC). Wuhan, 2018: 5783-5789.
- [12] Bae B Y, Lee J, Byun Y. Reliability design using FMEA for pressure control regulator of aircraft fuel system [J]. *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 2009, 17(1): 24-28.
- [13] Ma S, Tan J G, Ning Y Q, et al. Modeling and simulation of gas turbine starter and fuel control system [C]//2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, 2017: 2149-2154.
- [14] Tudosie A N. Jet engine's rotation speed control based on the fuel's injection differential pressure's control [J]. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series*, 2008(32): 231-238.
- [15] Dasgupta K, Karmakar R. Dynamic analysis of pilot operated pressure relief valve [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2002, 10: 35-49.
- [16] 洪威. 无压力超调溢流阀设计与特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
(Hong Wei. Design and characteristics of pressure-free overshoot relief valve [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.)
- [17] Sorli M, Figliolini G, Pastorelli S. Dynamic model and experimental investigation of a pneumatic proportional pressure valve [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(1): 78-86.
- [18] 王华威, 王曦, 李志鹏, 等. 定压活门稳定性定量分析 [J]. *航空动力学报*, 2015, 30(3): 754-761.  
(Wang Hua-wei, Wang Xi, Li Zhi-peng, et al. Quantitative analysis on constant pressure valve stability [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(3): 754-761.)