

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220776-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220776

航空发动机燃油计量装置稳态特性仿真

杨世宇, 林远方, 徐向华, 梁新刚
(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 为研究燃油计量装置的稳态工作特性, 提升质量流量调控性能, 基于 Python 语言自主开发了航空发动机燃油系统一维稳态流动仿真程序, 通过建立完善的部件库和高效的求解算法, 实现了含压力控制部件的复杂流路仿真模拟。从系统的角度分析了计量装置的工作特点和各参数对流动的影响规律, 结果表明: 在设计点工况下, 计量活门能够正常工作的开度范围是 0.3~0.85, 过大或过小的开度均不利于质量流量的调控; 仅有预紧力可以改变计量活门的开启边界, 压差活门参数对供油性能的影响程度随计量活门的开度呈现单调变化; 在压差活门的作用下, 燃烧室供油量对各系统参数的敏感性较低, 参数改变范围内的变化不大于 10%, 燃油泵的内泄漏是影响供油量的重要因素之一。

关 键 词: 燃油计量; 计量活门; 压差活门; 航空发动机; 流体网络法; 稳态特性

中图分类号: V233.2

文献标志码: A

Simulation on steady-state characteristics of aero-engine fuel regulation device

YANG Shiyu, LIN Yuanfang, XU Xianghua, LIANG Xingang

(School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to study the steady-state operating characteristics of fuel regulation device and improve the flow control performance, a one-dimensional steady-state flow simulation program for aero-engine fuel system was developed based on Python language. By establishing a complete component library and efficient solution algorithm, the simulation of a fuel flow regulation system with pressure control components was realized. From the view of system, the working characteristics of the regulation device and the influence of parameters on the flow were analyzed. The results showed that under the working condition of the design point, the normal-working opening range of the metering valve was 0.3—0.85, and too large or too small opening was not conducive to the control of fuel flow. Only the preload can change the opening boundary of the metering valve. The influences of differential pressure valve parameters on the oil supply varied monotonically with the opening of the metering valve. Under the function of differential pressure valve, the oil supply to the combustor was less sensitive to the parameters of the system, and the change was less than 10%. It was found that internal leakage of the fuel pump served as an important factor affecting the fuel supply.

Keywords: fuel regulation; metering valve; differential pressure valve; aero-engine; fluid network method; steady-state characteristic

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 国家科技重大专项 (2019-III-0001-0044)

作者简介: 杨世宇 (1997—), 男, 博士生, 主要从事航空发动机燃油系统研究。

引用格式: 杨世宇, 林远方, 徐向华, 等. 航空发动机燃油计量装置稳态特性仿真[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220776. YANG Shiyu, LIN Yuanfang, XU Xianghua, et al. Simulation on steady-state characteristics of aero-engine fuel regulation device[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220776.

燃油系统是航空发动机的重要子系统,其性能的优劣直接决定着发动机能否正常工作。燃油计量装置是燃油系统的核心,其通过各个部件之间的配合,实现燃油质量流量的调控,保证发动机在不同工况下的燃油供给^[1]。随着发动机技术的发展,迫切要求能够对燃油供油量进行精准控制,因此,明确燃油计量装置的工作特性十分必要。

诸多学者对燃油计量装置的工作特性进行了研究。Lee 等^[2]通过对燃油计量单元(FMU)的数学模型进行分析,找出了影响系统性能的主要参数,并通过减小计量活门的恒压降提升了系统的稳定性;Wang 等^[3]对发动机燃油计量单元进行了建模仿真及半物理验证,结果表明在研究发动机性能时考虑燃油计量单元会导致系统性能参数的响应延迟几十毫秒;Yuan 等^[4]对影响燃油控制单元计量特性的参数进行了研究,分析了各参数对控制单元动态性能的影响;陈昭旻等^[5]利用 MATLAB 建立了燃油计量装置的仿真模型,并应用根轨迹法等分析了主要参数对燃油计量装置稳定性的影响;杨永敏和卢前顺^[6]利用 MATLAB/Simulink 搭建了燃油计量装置的动态模型,分析了装置的燃油计量响应、压差控制精度等动态特性;王彬等^[7]基于 AMESim 分析了加力燃油计量装置的供油特性,提出了高性能设计和优化的途径;余玲等^[8]使用 AMESim 建立了发动机燃油计量装置的热液压模型,探究了油温对计量装置特性的影响;周立峰^[9]利用 AMESim 分析了燃油计量装置在典型工况下的工作特点,并提出了减小装置稳态误差的方案;陈波^[10]研究了航空计量活门液压控制系统的稳定性,通过仿真找出了试验过程中装置的故障原因并提出改进方案。

燃油计量装置工作原理复杂,各部件的稳态参数对计量性能影响很大,然而国内相关研究较少,同时大多数研究者仅将燃油计量装置作为一个独立的单元进行分析,并没有考虑系统中其余部件对质量流量的影响,因此,从系统的角度研究燃油计量装置的稳态特性十分重要。

考虑到各部件结构的复杂性和计算模型的可拓展性,本文基于 Python 语言面向对象的编程方式自主开发了航空发动机燃油系统一维稳态流动仿真程序,从系统的角度重点分析了装置的工作特点及部件参数对质量流量调控性能的影响,同时对燃烧室供油量进行了敏感性分析,为燃油计量装置的设计和优化提供了一定的理论指导。

1 工作原理

1.1 燃油质量流量调控原理

本文分析压差式燃油供油系统,其中燃油计量装置主要由计量活门和压差活门所组成,具体结构如图 1 所示。

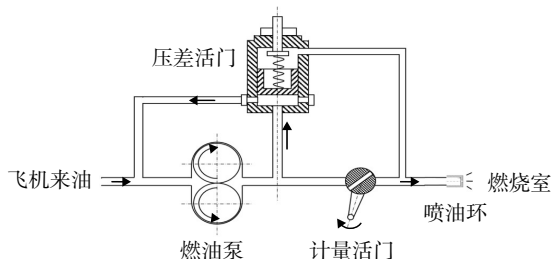


图 1 压差式燃油供油系统^[11]

Fig. 1 Differential pressure fuel supply system^[11]

供向发动机的燃油由燃油泵进一步增压,随后进入计量活门,压差活门的作用是保证计量活门前后压差 Δp_m 基本不变,从而方便供油量的调节。多余的燃油经溢流路返回燃油泵前,计量活门通过开度 S_m 的变化调节供向燃烧室的燃油体积流量,供油量的计算公式为:

$$\dot{Q} = \beta A_m \sqrt{\frac{2\Delta p_m}{\rho}} \quad (1)$$

式中 $\dot{Q}$ 为流经计量活门的燃油体积流量, β 为计量活门的流量系数(与雷诺数和结构有关), A_m 为计量活门流通截面积,归一化后即得计量活门开度 S_m (变化范围为 $0 \sim 1$, 0 表示全关, 1 表示全开), ρ 为燃油密度。

1.2 压差活门调节原理

压差活门是燃油计量装置的重要组成部件,主要通过弹簧压缩量的改变保证所控压差在某一范围内基本不变,其工作原理如图 2 所示。

活门由弹簧与上腔室壁相连,上表面所受力有总弹簧力 F_s 和计量活门下游压力 p_{m2} ,下表面受

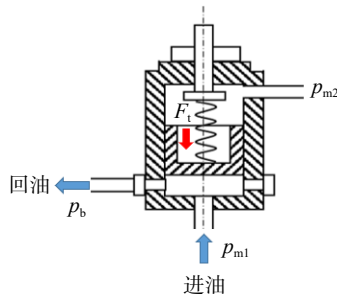


图 2 压差活门工作原理^[12]

Fig. 2 Working principle of differential pressure valve^[12]

计量活门上游压力 p_{m1} 作用, 其中 F_0 包含预紧力 F_0 和由活门移动引起的弹簧压缩量 Δx 导致的弹簧压缩力 F_s , 稳定时有受力平衡方程:

$$(p_{m1} - p_{m2})A_d - F_0 - k\Delta x = 0 \quad (2)$$

式中 A_d 为压差活门受力面积, k 为弹簧的弹性系数, 将式(2)移项可得:

$$\Delta p_m = p_{m1} - p_{m2} = \frac{F_0 + k\Delta x}{A_d} \quad (3)$$

若忽略由于活门移动引起的弹簧力, 化简式(3)可得:

$$\Delta p_m = \frac{F_0}{A_d} \quad (4)$$

由式(4)可知, 稳定时计量活门前后压差 Δp_m 仅和预紧力 F_0 有关, 只要保证压差活门在工作过程中预紧力不变, 即可实现对压差的控制。实际上, 由于压差活门移动的影响, 当回油量较大时, 活门移动所产生的弹簧压缩力 F_s 将会引起所控压差的升高, 但通常不会太大。

当发动机瞬态工作时, 如果由于燃油泵转速的改变或燃烧室压力的变化等引起活门压差 Δp_m 大于稳态值, 根据受力, 弹簧将被进一步压缩, 此时回油孔面积变大, 更多的燃油将会通过溢流路返回燃油泵前, 经过计量活门的燃油体积流量减少, 导致 Δp_m 下降, 从而保证了计量活门前后压差基本不变, 重新稳定后, 活门将停留在弹簧压缩量 Δx 略大的位置, 反之亦然。

2 计算方法

2.1 基本控制方程组

航空发动机燃油系统可简化为由节点与支路构成的一维流体网络^[13], 求解稳态流动时所需的方程有支路的动量方程及节点的质量守恒方程。

对于支路 i , 有动量方程:

$$f_i(\dot{m}, p_u, p_d, p_{c1}, p_{c2}) = 0 \quad (5)$$

式中 $\dot{m}$ 为支路 i 的质量流量, p_u 为支路上游节点的压力, p_d 为支路下游节点的压力, p_{c1} 和 p_{c2} 为支路控制压力, 含调压活门的支路有一个控制压力, 含压差活门的支路有两个控制压力, 其余支路没有控制压力。

对于节点 j , 有质量守恒方程:

$$\sum_{k=1}^{n_j} \dot{m}_{kj} = 0 \quad (6)$$

式中 n_j 为与节点 j 相连的支路数, $\dot{m}_{kj}$ 为与节点 j 相连的第 k 条支路的质量流量, 流入节点为正, 流出节点为负。

2.2 部件稳态流动模型

燃油系统部件按流动特性可分为驱动部件、阻力部件和控制部件, 建立正确的流动模型对系统流动的计算是至关重要的。

计算所用到的驱动部件有增压泵和燃油泵, 按泵种类来分, 前者属于离心泵, 而后者为齿轮泵, 针对两种类型的泵在部件库中建立了相应的流动模型。

离心泵可视为线性泵, 其供油量 $\dot{m}_e$ 和进出口压差 Δp_e 存在关系^[14]:

$$\dot{m}_e = a\Delta p_e + b \quad (7)$$

式中 a 和 b 为离心泵的流动特性系数, 与转速和流体介质的黏度有关。

对于齿轮泵, 采用文献^[15]提供的计算公式:

$$\eta_v = 1 - C_s \frac{\Delta p_v}{\mu n_v} \quad (8)$$

式中 η_v 为齿轮泵的容积效率, C_s 为泄漏系数, Δp_v 为齿轮泵进出口压差, μ 为流体介质的动力黏度, n_v 为齿轮泵的转速。

燃油系统中的管道、喷油环、油滤等均为阻力部件, 其对流动的影响用阻力系数 ξ 进行表征, 由于这些部件的结构固定, 阻力系数仅是雷诺数的函数^[16-17], 相应的计算表达式为:

$$\Delta p_f = \xi(Re) \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (9)$$

式中 Δp_f 为部件产生的压降, Re 为雷诺数, u 为流动截面的平均速度。

在燃油计量装置中存在控制压力的部件, 如调压活门和压差活门。由于活门开度与控制压力有关, 其压降计算式为:

$$\Delta p_f = \xi(Re, S) \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (10)$$

式中 S 为活门开度 (是控制压力的函数)。

2.3 求解方法

由于燃油系统部件众多, 对每一个部件建立流动方程将会使方程组过于庞大, 计算量增多。为此, 对存在部件串联关系的支路采用串联约化的方法^[18] (将串联部件简化为一个部件) 进行计算, 约化后对存在 n 条未知质量流量支路和 m 个未知压力节点的系统而言, 其解向量为:

$$\boldsymbol{x} = [\dot{m}_1, \dot{m}_2, \cdots, \dot{m}_n, p_1, p_2, \cdots, p_m]^T \quad (11)$$

式中 $\dot{m}_i$ 为第*i*条未知支路的质量流量, p_j 为第*j*个未知节点的压力。

此时燃油系统的流动控制方程组可表示为:

$$F(\boldsymbol{x}) = 0 \quad (12)$$

为保证计算的收敛性, 采用阻尼牛顿法进行方程组的求解^[19], 保证每一步迭代步长满足:

$$\max |F(\boldsymbol{x}_{n+1})| < \max |F(\boldsymbol{x}_n)| \quad (13)$$

式中 $\boldsymbol{x}_n$ 为第*n*步迭代后的解向量, $\boldsymbol{x}_{n+1}$ 为第*n*+1步迭代后的解向量。

计算收敛后便可得到各支路和节点的流动参数, 支路内部件的进出口参数由支路方法自动更新, 进一步提高了计算效率。

3 计算模型

3.1 燃油系统

本文基于发动机燃油系统整体流路进行研究, 考虑了燃油计量装置与系统其余部件之间的流动耦合关系, 具体结构如图 3 所示。

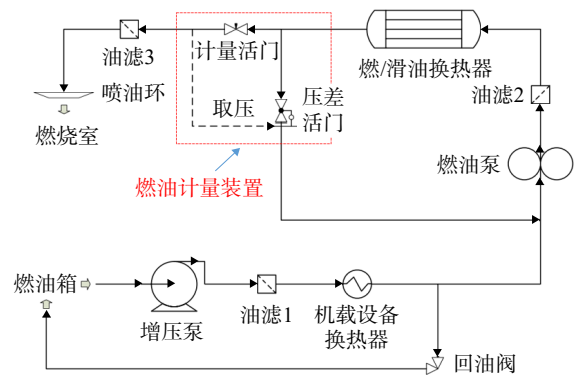


图 3 航空发动机燃油系统结构
Fig. 3 Construction of aero-engine fuel system

燃油被增压泵从燃油箱抽出后, 先经过用于冷却机载设备的换热器, 随后一部分燃油进入发动机, 多余的燃油经回油阀返回飞机油箱。进入发动机的燃油被燃油泵进一步增压后, 流经燃/滑油换热器对滑油进行冷却, 被加热的燃油最终进入燃油计量装置, 一部分经过喷油环供向燃烧室, 另一部分通过压差活门返回燃油泵前。

3.2 仿真参数

燃油系统的流动工质采用 RP-3 航空煤油, 燃油系统设计点工况的主要参数如表 1 所示。

表 1 设计点工况的主要参数	
Table 1 Main parameters on design point	
参数	数值
燃油箱压力/MPa	0.1
油温/K	293.15
燃油泵排量/ $10^{-6}(\text{m}^3/\text{r})$	5
燃油泵泄漏系数/ 10^{-8}	1
压差活门面积/ 10^{-4}m^2	3.14
弹簧弹性系数/(N/mm)	15
喷油环阻力系数	50
回油阀阻力系数	800
机载设备换热器阻力系数	$44.28Re^{-0.227}$
计量活门阻力系数	$80\left(1+\frac{1}{S_d^2}\right)$
燃烧室压力/MPa	2
管道内径/m	0.02
管段长度/m	0.2
燃油泵转速/(r/min)	8 000
增压泵转速/(r/min)	12 000
压差活门行程/mm	2.1
压差活门预紧力/N	94
油滤阻力系数	5
燃/滑油换热器阻力系数	$45.09Re^{-0.254}$
压差活门阻力系数	$200\left(1+\frac{1}{S_d^2}\right)$

注: 表中 S_d 为压差活门开度。

4 计算分析

4.1 计量活门工作特性

在设计点工况下, 当其他参数保持不变时, 供向燃烧室的燃油质量流量 $\dot{m}_c$ 由计量活门的开度 S_m 唯一确定, 将活门开度 S_m 从 0 变化至 1, 分析供油量 $\dot{m}_c$ 和计量活门前后压差 Δp_m 的变化, 计算结果如图 4 所示。

从仿真结果可以看出, 在计量活门逐渐打开的过程中, 根据供油量 $\dot{m}_c$ 变化的快慢可以将计量活门的开度范围分成 3 个区间, 导致区间划分的原因是压差活门的工作状态。由于总弹簧力 F_t 的作用, 压差活门对应的开启和完全打开压差分别是 0.3 MPa 和 0.4 MPa (分别对应图 4 中的 $\Delta p_{\min}$ 和 $\Delta p_{\max}$), 相应的计量活门临界开度处于边界 2 和边界 1。区间 1 对应计量活门的小开度范围($S_m \in [0, 0.3)$), 此时由于下游阻力过大, 压差活门被完全顶开, 导致计量活门前后压差 Δp_m 较大, 从而供油量 $\dot{m}_c$ 随计量活门开度 S_m 变大迅速升高;

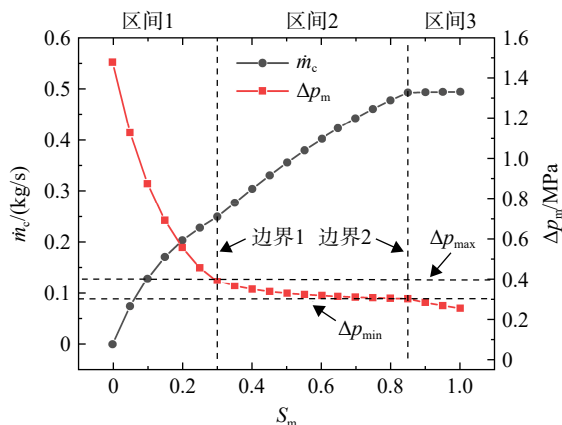


图 4 计量活门全开度范围工作特性

Fig. 4 Characteristics of metering valve in full opening range

并且随着开度 S_m 的增加, 下游阻力迅速降低, 压差 Δp_m 迅速下降, 使得供油量 $\dot{m}_c$ 升高的速率逐渐变缓。区间 2 对应计量活门的中间开度范围 ($S_m \in [0.3, 0.85]$), 此时压差活门处于正常工作状态, 随着开度 S_m 的增大, 压差 Δp_m 略有下降但都处于压差活门的控制范围内, 供油量 $\dot{m}_c$ 随开度 S_m 的增大均匀升高。区间 3 对应计量活门的大开度范围 ($S_m \in (0.85, 1]$), 此时由于下游阻力过小, 导致压差活门关闭, 回油量为 0, 供油量 $\dot{m}_c$ 随开度 S_m 的增大基本不变。由此可见, 计量活门存在正常工作区(区间 2), 过大或过小的计量活门开度均会导致压差活门处于异常状态, 从而影响计量装置对燃烧室供油量的调控性能。

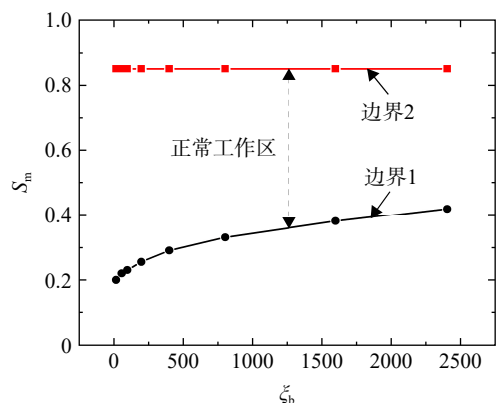
4.2 压差活门参数影响

作为燃油计量装置中的主要控制部件, 压差活门的参数对质量流量调控性能的影响十分重要, 本文将从压差活门的回油孔阻力、弹簧刚度和预紧力 3 个参数进行分析。这里回油孔阻力是指压差活门完全打开时回油孔的阻力系数 ξ_b , 可以用来表征回油孔的大小, 同时弹簧刚度的大小以弹簧的弹性系数 k 来衡量。

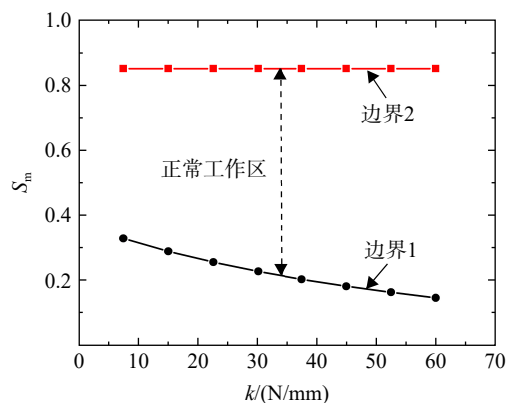
首先分析压差活门参数对计量活门正常工作区的影响, 在设计点工况下, 通过改变压差活门各参数的值, 仿真计算计量活门的临界开度(边界 2 和边界 1), 可得不同参数值下计量活门的正常工作区, 结果如图 5 所示。

从计算结果来看, 改变回油孔阻力对计量活门正常工作区的边界 2 没有影响, 这是因为回油孔阻力并不会影响压差活门的开启压差; 而随着回油孔阻力的增大, 边界 1 逐渐升高, 这是因为回油阻力变大, 使得压差活门开度增大, 导致活门

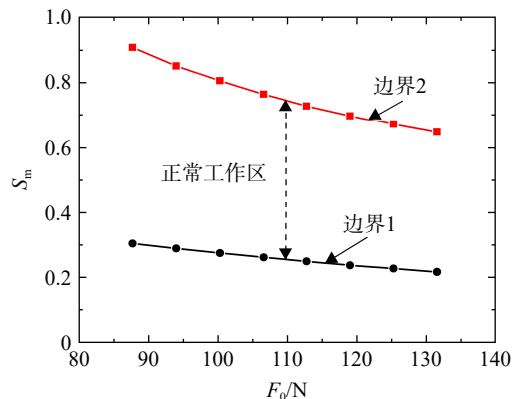
更易完全打开。改变弹簧刚度同样不会影响边界 2, 但随着弹簧刚度的增加, 边界 1 逐渐变小, 这是因为压差活门完全开启时克服弹簧压缩所需的力变大, 导致活门完全打开变得困难。改变预紧力对边界 1 和边界 2 均有影响, 随着预紧力变大, 活门开启的临界压差变大, 使得边界 2 下降; 同时预紧力的增加还会导致活门完全打开时需要克服的总弹簧力 F_t 变大, 从而导致边界 1 也下降。从计量活门正常工作区范围的大小来看, 提高回



(a) 回油孔阻力影响



(b) 弹簧刚度影响



(c) 预紧力影响

图 5 压差活门参数对正常工作区的影响

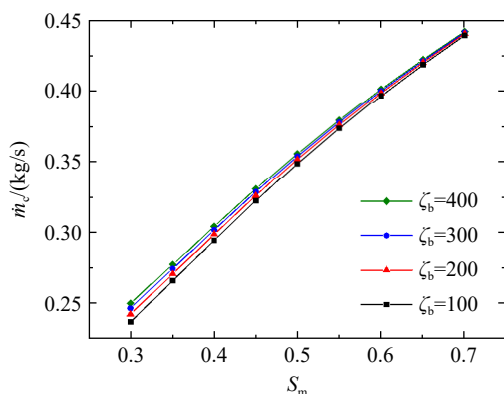
Fig. 5 Influence of differential pressure valve parameters on normal working zone

油孔阻力会引起区间变小,增大弹簧刚度会使得区间变大,加大预紧力会导致区间变小,且此时区间整体向计量活门小开度方向偏移。

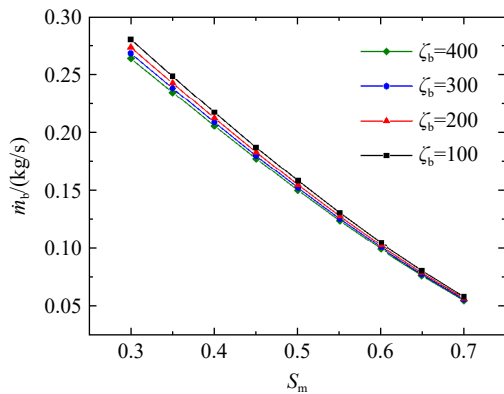
接下来分析压差活门参数对燃油计量装置供油性能的影响,通过改变压差活门的参数,研究燃烧室供油量 $\dot{m}_c$ 、压差活门回油量 $\dot{m}_b$ 、压差活门开度 S_d 及计量活门前后压差 Δp_m 在正常工作区间内随计量活门开度 S_m 的变化。

在设计点工况下,分别取压差活门回油孔阻力系数 ζ_b 为 400、300、200 和 100 进行计算,可以得到不同回油孔阻力下燃油计量装置的供油性能,仿真结果如图 6 所示。

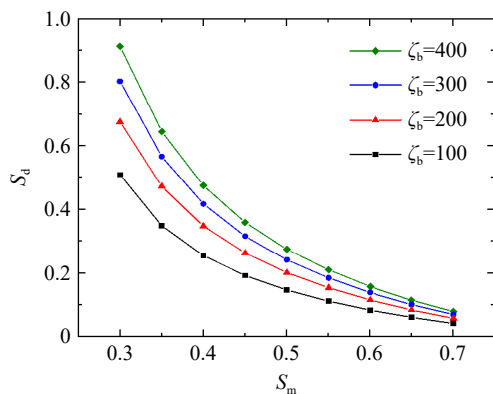
由计算结果可知,当计量活门开度 S_m 一定时,



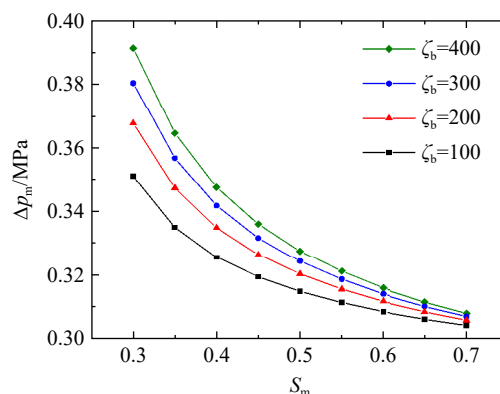
(a) 供油量 $\dot{m}_c$ 随开度 S_m 变化



(b) 回油量 $\dot{m}_b$ 随开度 S_m 变化



(c) 开度 S_d 随开度 S_m 变化



(d) 压差 Δp_m 随开度 S_m 变化

图 6 回油孔阻力对供油性能的影响

Fig. 6 Influence of returning hole resistance on oil supply performance

回油孔阻力系数 ζ_b 越大,压差活门开度 S_d 越大,此时由活门移动引起的弹簧压缩量 Δx 增大,导致计量活门前后压差 Δp_m 变大,使得供油量 $\dot{m}_c$ 增多。对压差活门回油路而言,尽管活门开度 S_d 变大,但由于 ζ_b 的增加,回油路的总阻力依旧变大,使得回油困难,从而引起回油量 $\dot{m}_b$ 下降。同时从结果可以看出,回油孔阻力对供油性能的影响在计量活门处于小开度时较为明显,且影响程度随开度 S_m 的增大逐渐减弱。

在设计点工况下,取压差活门弹簧的弹性系数 k 分别为 15.0、22.5、30.0、37.5 N/mm 进行计算,可得不同弹簧刚度下燃油计量装置的供油性能,仿真结果如图 7 所示。

根据计算结果,在相同的计量活门开度 S_m 下,随着弹簧刚度的增加,压差活门开度 S_d 变小,导致弹簧压缩量 Δx 减小,但由于弹簧刚度的变大,弹簧压缩力 F_s 依旧变大,使得计量活门前后压差 Δp_m 变大,引起供油量 $\dot{m}_c$ 增多。对回油路而言,由于开度 S_d 变小,回油阻力变大,导致回油量 $\dot{m}_b$ 下降。同样由结果可知,弹簧刚度对供油性能的影响主要体现在计量活门处于小开度时,并且随着开度 S_m 的增加,弹簧刚度对流动的影响被逐渐削弱。

在设计点工况下,分别取压差活门预紧力 F_0 为 94、100、106、112 N 进行计算,得到不同预紧力下燃油计量装置的供油性能,仿真结果如图 8 所示。

从计算结果可以看出,对于一定的计量活门开度 S_m ,随着预紧力的增加,压差活门开度 S_d 变小,从而由于活门移动引起的弹簧压缩量 Δx 减小,

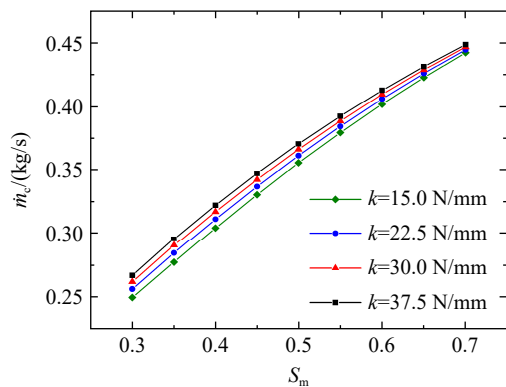
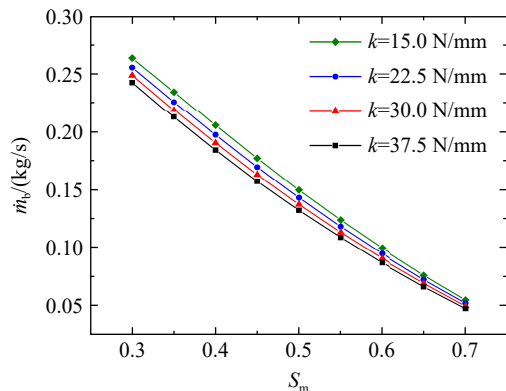
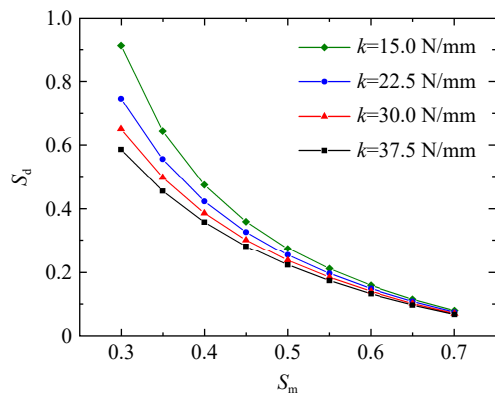
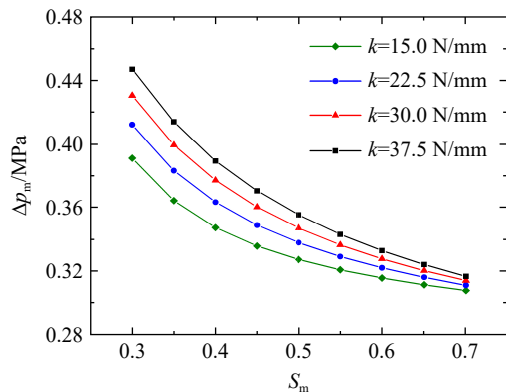
(a) 供油量 $\dot{m}_c$ 随开度 S_m 变化(b) 回油量 $\dot{m}_b$ 随开度 S_m 变化(c) 开度 S_d 随开度 S_m 变化(d) 压差 Δp_m 随开度 S_m 变化

图 7 弹簧刚度对供油性能的影响
Fig. 7 Influence of spring stiffness on oil supply performance

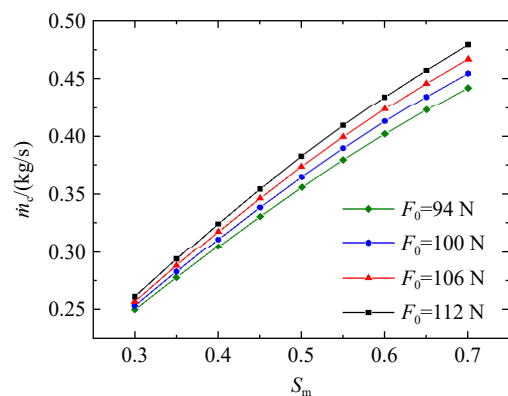
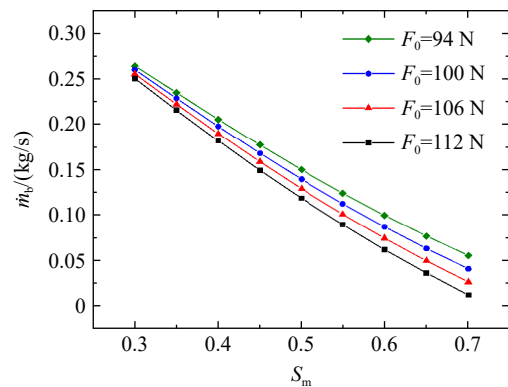
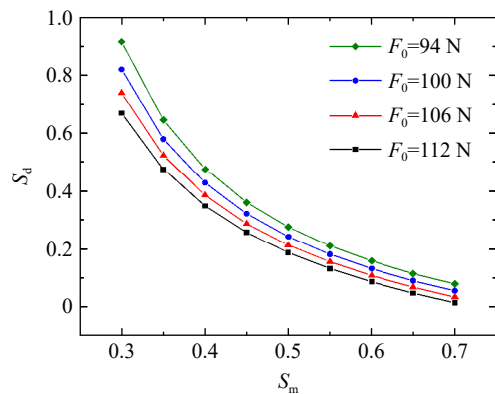
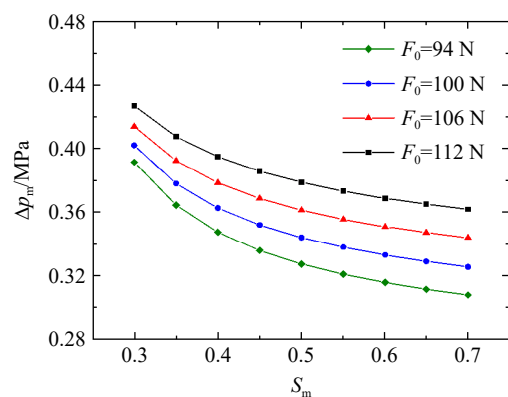
(a) 供油量 $\dot{m}_c$ 随开度 S_m 变化(b) 回油量 $\dot{m}_b$ 随开度 S_m 变化(c) 开度 S_d 随开度 S_m 变化(d) 压差 Δp_m 随开度 S_m 变化

图 8 预紧力对供油性能的影响
Fig. 8 Influence of preload on oil supply performance

但由于预紧力的增大,活门所受的总弹簧力 F_t 依然变大,使得计量活门前后压差 Δp_m 变大,导致供油量 $\dot{m}_c$ 增多。对回油路而言,开度 S_d 的变小使得回油阻力变大,使得回油量 $\dot{m}_b$ 降低。从对供油性能的影响程度来看,预紧力的改变主要对计量活门处于大开度时影响较大,并且随着开度 S_m 的增大,预紧力对流动的影响程度逐渐变大。

4.3 供油量敏感性分析

燃油计量装置的主要作用是在一定工况下,对燃烧室进行精准供油,因此,在特定条件下保证供油的稳定十分重要。除计量活门和压差活门自身结构参数的影响外,燃油系统的边界条件和其余部件的工作参数也会影响供油量,为此,对供油量进行各系统参数的敏感性分析,找出影响供油稳定性的主要因素及作用机制。

在设计点工况下,对燃油计量装置的燃烧室供油量 $\dot{m}_c$ 进行燃油温度 T_f 、燃油泵转速 n_r 、喷油环阻力系数 ξ_n 和燃烧室压力 p_{co} 的敏感性分析计算,得到燃烧室供油量 $\dot{m}_c$ 和燃油泵质量流量 $\dot{m}_f$ 随各系统参数的变化情况,结果如图9所示。

由仿真结果可以看出,燃油温度 T_f 升高时,供油量 $\dot{m}_c$ 有所下降,这是因为 T_f 越高,燃油黏度越低,使得燃油泵的内泄漏增加,引起燃油泵质量

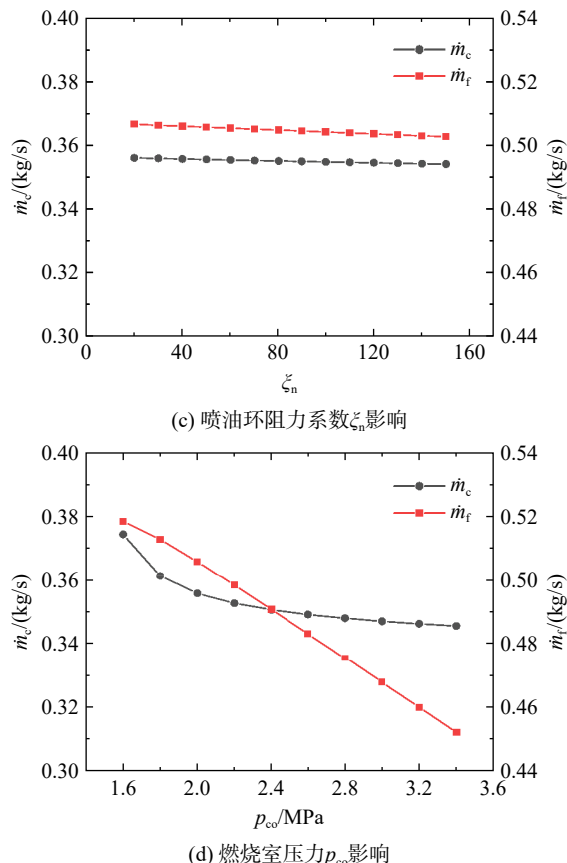
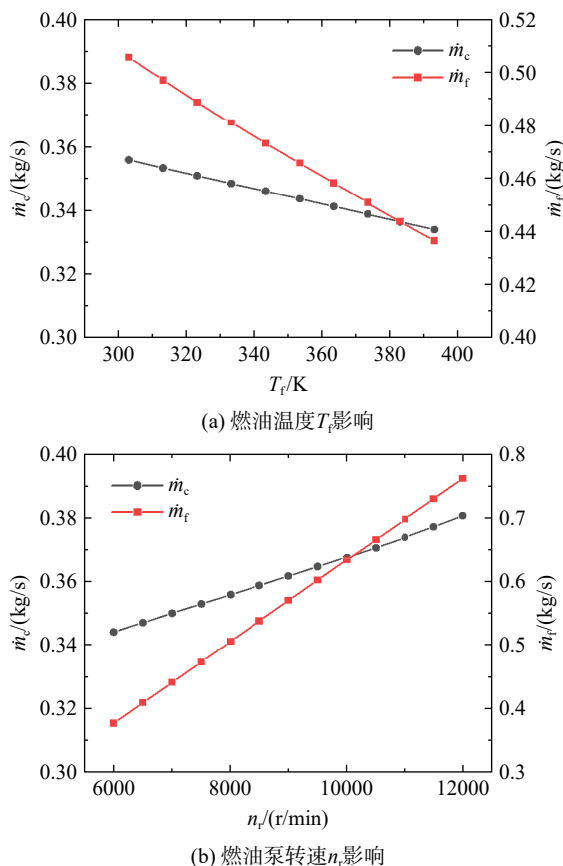


图9 供油量系统参数敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of system parameters to oil supply



流量 $\dot{m}_f$ 的下降(图9(a)中 $\dot{m}_f$ 减小14%),从而导致 $\dot{m}_c$ 的下降,这说明系统中其余部件的性能也会影响燃油计量装置的供油量,体现出系统级仿真的必要性;燃油泵转速 n_r 增大时,燃油泵质量流量 $\dot{m}_f$ 增大,使得回油引起的压差活门开度 S_d 变大,从而导致计量活门前后压差 Δp_m 变大,故供油量 $\dot{m}_c$ 越多;供油量 $\dot{m}_c$ 对喷油环阻力系数 ξ_n 的敏感性不强,这是因为 ξ_n 的增大对系统压力的影响较小,仅使得燃油泵质量流量 $\dot{m}_f$ 略有下降(图9(c)中 $\dot{m}_f$ 仅减小1%),在压差活门的作用下,供油量 $\dot{m}_c$ 变化不大;随着燃烧室压力 p_{co} 的升高,供油路的阻力变大,供油量 $\dot{m}_c$ 逐渐下降,同时出口压力的升高使得燃油泵质量流量 $\dot{m}_f$ 逐渐减小(图9(d)中 $\dot{m}_f$ 减小13%),加剧了供油量 $\dot{m}_c$ 下降的程度,但随着 p_{co} 的升高,供油量 $\dot{m}_c$ 对 p_{co} 的敏感程度逐渐降低。

压差活门对提升供油量的稳定性起到了非常重要的作用,从敏感性分析的计算结果可以看出,在仿真工况下,尽管各参数发生了较大的变化,引起供油量 $\dot{m}_c$ 变化的相对百分比均不超过10%,说明压差式燃油计量装置具有良好的供油稳定性。

5 结 论

本文从燃油系统整体的角度分析了燃油计量装置的稳态工作特性, 得出如下结论:

1) 基于 Python 语言面向对象的编程方式自主开发了航空发动机燃油系统一维稳态流动仿真程序, 建立了各类部件的稳态流动模型, 并采用节点-支路法建立控制方程组, 应用串联约化和阻尼牛顿法进行计算, 可以高效地求解含压力控制部件的复杂流动系统。

2) 对计量活门的工作特性进行了全开度范围内的分析, 结果表明: 计量活门的开度可根据压差活门的工作状态划分成 3 个区间, 在设计工况下, 计量活门的开度存在正常工作区 ($S_m \in [0.3, 0.85]$), 计量活门处于过大或过小的开度均不利于计量装置对供油量的调控。

3) 通过改变压差活门的参数, 研究了回油孔阻力、弹簧刚度和预紧力对计量活门正常工作区及供油性能的影响, 结果表明: 压差活门参数会影响正常工作区的大小且仅有预紧力可以改变计量活门的开启边界; 当计量活门处于不同的开度时, 各参数对供油性能的影响程度不同, 并且随计量活门开度的变化呈现单调特征。

4) 针对燃烧室供油量进行了系统参数敏感性分析, 阐明供油量受燃油温度、燃油泵转速、喷油环阻力和燃烧室压力影响的变化特征及作用机制, 研究发现: 由于压差活门的作用, 供油量对各系统参数的敏感程度均较低, 在大范围系统参数的变化下, 供油量的相对变化不大于 10%; 燃油泵的内泄漏是造成供油量变化的另一重要因素, 体现出各部件之间流动的耦合作用及从系统的角度研究燃油计量装置稳态特性的重要性。

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 控制及燃油系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [2] LEE D Y, CHOI H Y, PARK J S, et al. A study on stability improvement of fuel metering unit for air breathing engine[J]. Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 2006, 34(9): 76-81.
- [3] WANG Bin, JI Hengyu, YE Zhifeng. Simulation and semi-physical verification of fuel metering unit model for turboshaft aero-engine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2020, 234(12): 1866-1882.
- [4] YUAN Yuan, ZHANG Tianhong, LIN Zhonglin, et al. An investigation into factors determining the metering performance of a fuel control unit in an aero engine[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 71: 101672.
- [5] 陈昭畅, 肖玲斐, 叶志锋, 等. 航空发动机燃油计量装置稳定性分析[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(2): 52-56.
CHEN Zhaoyang, XIAO Lingfei, YE Zhifeng, et al. Stability analysis of aeroengine fuel metering device[J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(2): 52-56. (in Chinese)
- [6] 杨永敏, 卢前顺. 商用航空发动机燃油计量装置动态建模分析研究[J]. 制造业自动化, 2016, 38(6): 106-110, 130.
YANG Yongmin, LU Qianshun. The research of dynamic modeling and analysis of commercial engine fuel-metering unit[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(6): 106-110, 130. (in Chinese)
- [7] 王彬, 赵皓岑, 叶志锋. 加力燃油计量装置的 AMESim 仿真研究[J]. 航空发动机, 2014, 40(5): 62-66.
WANG Bin, ZHAO Haocen, YE Zhifeng. AMESim simulation of afterburning metering unit for fuel system[J]. Aeroengine, 2014, 40(5): 62-66. (in Chinese)
- [8] 余玲, 叶志锋, 王彬. 航空发动机燃油计量装置特性仿真与试验研究[J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 85-88.
YU Ling, YE Zhifeng, WANG Bin. Simulation and experimental study of characteristics for aeroengine fuel metering device[J]. Aeroengine, 2015, 41(2): 85-88. (in Chinese)
- [9] 周立峰. 发动机燃油计量装置特性仿真与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
ZHOU Lifeng. Simulation and experiment study for characteristics of engine fuel measurement equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [10] 陈波. 航空计量活门的液压控制系统的研究与分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
CHEN Bo. Research and analysis of hydraulic control system of aeronautical metering valve[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021. (in Chinese)
- [11] 王彬. 航空发动机液压控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [12] 杨峰, 王曦, 程涛, 等. 某型压差活门的动态特性分析[J]. 航空发动机, 2015, 41(3): 44-50.
YANG Feng, WANG Xi, CHENG Tao, et al. Dynamic characteristics analysis of a pressure differential valve[J]. Aeroengine, 2015, 41(3): 44-50. (in Chinese)
- [13] 徐志英, 庄达民. 飞机燃油系统热管理研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1833-1837.
XU Zhiying, ZHUANG Damin. Research of heat management for aircraft fuel system[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1833-1837. (in Chinese)
- [14] 陈乃祥, 吴玉林. 离心泵[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [15] 樊思齐, 李华聪, 樊丁, 等. 航空发动机控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [16] IDELCHIK I E. Handbook of hydraulic resistance[M]. New York, US: Begell House, 2007.
- [17] MILLER D S. Internal flow systems[M]. 2nd edition. Cranfield, UK: British Hydromechanics Research Association, 1990.
- [18] HAN Rubing, XU Xianghua, LIANG Xingang. Simplification method of thermal-fluid network with circulation reflux based on matrix operation[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(7): 1202-1211.
- [19] 李庆扬, 莫孜中, 祁力群. 非线性方程组的数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

(编辑: 秦理曼)