

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220660-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220660

涡扇发动机主燃油系统低频脉动问题分析

孙昊博, 李凌汉, 刘晓峰
(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对某型涡扇发动机主燃油系统中存在低频脉动, 影响发动机工作安全性的问题, 对燃油流路中低频脉动的产生机理进行分析, 明确低频脉动的影响因素, 从脉动的影响因素出发, 结合主燃油系统的工作原理和相关附件、管路装配关系, 定位系统中低频脉动大的原因, 并提出一种通过调整活门型孔尺寸抑制低频脉动的改进措施。改进后的活门随发动机开展整机试验验证, 试验结果均表明: 改进措施合理有效, 对低频脉动的抑制效果显著, 随着发动机的工作状态点和脉动基准值的变化, 脉动幅值可降低 5%~84%, 大幅提升了发动机主燃油系统的工作可靠性, 保证了发动机试车安全。

关键词: 涡扇发动机; 主燃油系统; 低频脉动; 活门型孔; 等增益比
中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Analysis of low frequency pulsation of main fuel system on turbofan engine

SUN Haobo, LI Linghan, LIU Xiaofeng

(Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: In view of the problem of low-frequency pulsation in the main fuel system of turbofan engine that could affect the safety of the engine, the mechanism of low-frequency pulsation in the fuel system was analyzed, and the influencing factors of low-frequency pulsation were clarified. Starting from the influencing factors of pulsation, and combined with the working principle of the main fuel system and the relationship between related accessories and pipeline assembly, the reason for the large low-frequency pulsation in the system was pinpointed, and an improvement method to suppress the low-frequency pulsation by adjusting the size of the valve type orifice was proposed. The improved valve was verified with a turbofan engine. The test results showed that the improvement method is reasonable and effective, and the pulsation amplitude can be reduced by 5% to 84%, greatly improving the working reliability of the engine's main fuel system and ensuring the safety of the engine.

Keywords: turbofan engine; main fuel system; low frequency pulsation; valve type orifice; equal gain ratio

在航空发动机上, 主燃油系统主要用于发动机燃油流量控制, 通过系统内各个附件的相互配合, 共同作用, 保证主燃油流量计量的精度满足控制要求, 发动机工作状态稳定。若燃油流量中存在压力脉动, 会与系统内的供油管路、管接头、

弹簧、活门等产生耦合振动, 对发动机的工作安全性产生影响^[1]。此外, 当存在压力脉动的燃油供入燃烧室, 还会引起不稳定燃烧^[2-3], 这种不稳定的燃烧不但会在发动机内产生有害噪声, 导致压气机失速^[4], 还会使得温场释热不均匀, 影响涡

收稿日期: 2022-09-06

作者简介: 孙昊博(1993—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事航空发动机控制系统研究。

引用格式: 孙昊博, 李凌汉, 刘晓峰. 涡扇发动机主燃油系统低频脉动问题分析[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220660. SUN Haobo, LI Linghan, LIU Xiaofeng. Analysis of low frequency pulsation of main fuel system on turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220660.

轮、喷口结构的强度^[5],甚至还会引起发动机的喘振。因此,燃油压力脉动是影响发动机工作安全的重要因素,如何降低主燃油系统中的压力脉动对发动机工作安全的影响是目前研究的关键。

国内外针对压力脉动问题的研究,主要从两方面展开,一方面是从供油系统自身入手,通过在流路中增加消振器、蓄能器等装置,从根源上抑制压力脉动,Mamčič 等人^[6]通过特征线法建立了液压系统的动力学模型,并以该模型为基础,分析了流路内蓄能器数量及蓄能器距离对压力脉动的影响,焦宗夏等人^[7]以飞机液压能源管路系统为基础,提出了采用压电陶瓷作为驱动部件设计消振器的思路,并通过仿真证明了方案的可行性;另一方面则是从燃烧角度入手,主要通过对燃烧室内燃油喷嘴结构的改进优化,增加燃烧稳定性,降低燃油脉动对安全性的影响,Lieuwen 等人^[8]针对发动机振荡燃烧的问题,通过声学特性分析得到燃油喷嘴雾化的脉动特性,并采用更换喷嘴的方式提高了燃烧稳定性,汤冠琼等人^[9]推导了燃油流量脉动与燃烧室喷嘴结构的关系模型,得出了增加节流级数、减小节流面积进而减小流量脉动的方法,并通过试验证明了方法的正确性,为后续解决燃油脉动问题时的喷嘴设计提供了新思路。

综合国内外现有的研究成果来看,无论是从供油系统角度还是从燃烧角度解决脉动问题,多着重于理论分析,从原理上说明压力脉动产生的原因及其影响因素^[10-14]。在改进措施的可行性验证上,也是以建模仿真或子系统试验为主^[15-16]。目前研究较多的消振器、蓄能器等脉动抑制方案,其相关的研究成果多以飞机、船舶领域为基础,在航空发动机领域,尤其是小涵道比发动机中,其工作环境更为恶劣、复杂,对温度、压力、振动等指标的要求更高,受发动机上可靠性、维护性的要求,想要应用消振器、蓄能器的方案尚且存在一定的困难。

本文以某型涡扇发动机的主燃油系统为例,针对主燃油系统中低频脉动大,影响发动机试车安全的问题,通过对主燃油系统的工作原理和低频脉动的产生、放大机理进行分析,明确导致低频脉动大的原因,定位相关附件,并以该附件为问题导入,依据等增益比定理,提出一种能够抑制低频脉动的结构改进措施,改进后的产品经过整机试验验证,证明改进措施合理有效,能够大

幅降低压力脉动幅值,满足发动机的使用需求。

1 机理分析

1.1 主燃油系统工作原理

某型涡扇发动机上主燃油系统由主燃油泵、调节器、增压阀和控制器构成,在发动机正常工作时,飞机来油由主燃油泵增压后供给调节器,由电子控制器发出电子控制指令,通过调节器上的电液伺服阀将接收到的电信号转换为液压信号,控制主燃油计量活门的位置,并通过线位移传感器形成闭环控制回路,计量后的燃油通过增压阀、主燃油喷嘴最终进入主燃烧室。主燃油系统的工作原理见图 1,图中 p_1 表示主燃油泵后压力, p_2 表示增压阀后压力。

在主燃油泵正常工作的情况下,发动机的供油准确性主要是由调节器和增压阀上的各个活门组件相互配合决定的,其中调节器内包含压差活门、回油活门和计量活门,压差活门用于感受计量活门前燃油压力,并根据压差实时调整回油活门开度,将多余的计量前燃油返回飞机油箱,保证计量活门前燃油压差恒定。同时,根据发动机状态的不同,通过控制器和电液伺服阀调整计量活门上型孔开度,在两者的共同作用下,保证燃油流量计量准确;增压阀内包含一型执行活门,其主要作用为,在发动机正常工作时,将计量后的燃油供给主燃烧室并维持增压阀前的燃油压力,保证系统工作的最小压力,增压阀为纯机械式结构。

1.2 低频脉动产生机理

机械结构系统在受到外界激励产生运动时,将按特定频率发生自然振动,该特定的频率被称为结构的固有频率。对于无阻尼自由的弹簧-质量自由系统固有频率计算公式见式(1)。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{k}{m}} \Leftrightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

式中 k 为弹簧刚度(N/mm); m 为质量块质量(kg); ω_n 为无阻尼固有频率。

无阻尼固有频率与有阻尼固有频率关系见式(2)。

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2)$$

式中 ω_d 为有阻尼固有频率; ξ 为阻尼比。

由式(2)可知,假设阻尼比为 10%,则 $\omega_d = 0.99499\omega_n$,因此阻尼对结构的固有频率影响不大,

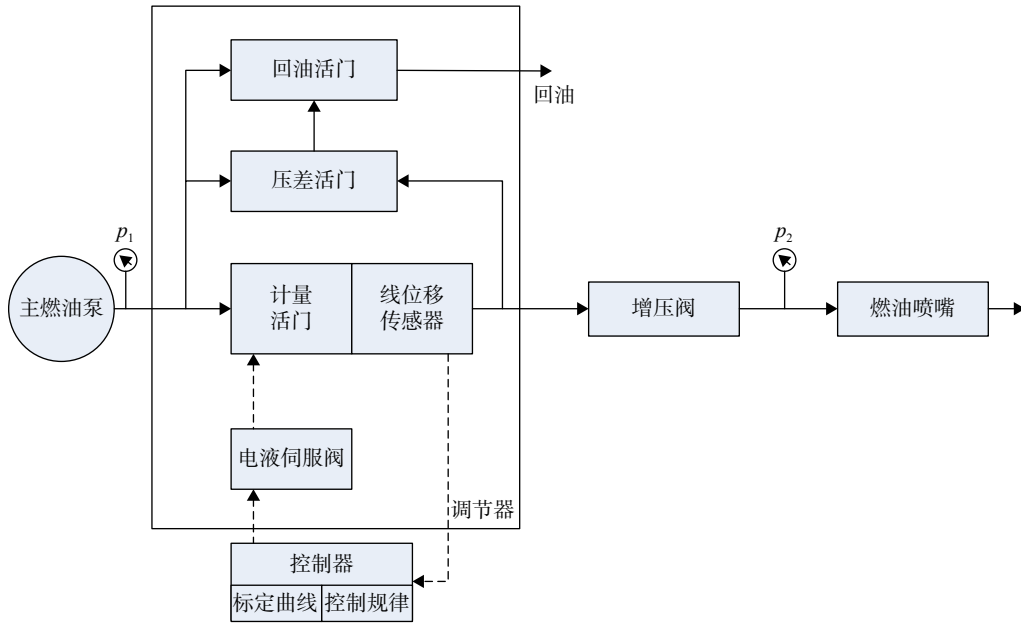


图 1 主燃油系统工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of main fuel system

而且实际活门-弹簧系统的阻尼比小于 10%。综上所述,对于活门组件(质量-弹簧系统)来说,影响其固有频率的主要因素是活门质量和弹簧刚度。

根据主燃油系统的工作原理可知,主燃油泵作为流场的源头,当主燃油泵后的流场中存在扰动、射流等现象时,会使得系统内的燃油流动呈现出湍流特性,燃油流经各个活门组件后,受活门内弹簧、型孔等因素的影响,使得活门在工作点附近产生微小的位移,这又加速了流场的不稳定性,主要体现在两方面:第一,系统内的扰动从初始的正弦波形逐渐演变成复杂的波形;第二,不同频率的扰动波之间会出现相互叠加^[17]。因此,活门微小位移对流场的扰动是产生低频压力脉动的原因。

某型涡扇发动机上主燃油供油油路上的核心部件为调节器和增压阀,这其中包含的四型活门组件都可以看作质量-弹簧系统,都存在各自的固有频率,每个活门对流经的燃油产生一个特定频率的扰动。根据上述分析可知,燃油流经各个活门组件后,各个活门的微小位移对流场的扰动相互耦合,使得最终流向主燃烧室的燃油压力波形经过调制,形成了 22 Hz 的固有低频脉动。

1.3 低频脉动放大机理

活门作为弹簧-质量系统,在欠阻尼或临界阻尼条件下,活门存在微小位移,在较大位移-面积变化区域内时,结合小孔流量计算式(3)分析,会导致流量波动增大。

$$q_m = C_d \times A \times \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

式中 q_m 为燃油流量(kg/s); C_d 为流量系数; A 为孔口面积(m^2); Δp 为孔口前后压差(Pa); ρ 为流体密度(kg/m^3)。

根据流量式(3)可知,流量与流量系数、活门型孔面积、介质密度、活门前后压差有关。在发动机稳态工作时,由于主燃油泵供油油压存在一定的波动,导致活门在工作位置会存在一定的微动,造成过油面积变化,若该微动位置的活门型孔面积增益大,则会导致过油面积剧烈变化,油路中的压力脉动幅值相应地增加。

2 改进方案

2.1 原因定位

根据上文中低频脉动的产生和放大机理可知,低频脉动大的原因为活门型孔中存在增益较大的扩张段,对比主燃油系统中四型活门的型孔尺寸,仅增压阀上执行活门的型孔尺寸存在该问题。

执行活门型孔结构示意图如图 2 所示。型孔的起始段为小尺寸等宽度,保证小流量段的控制精度;后段为大尺寸等宽度,保证适应最大流量下流阻要求。在两矩形段间采用斜坡扩张段连接设计。

根据式(3)可知,斜坡扩张段的流量可写作

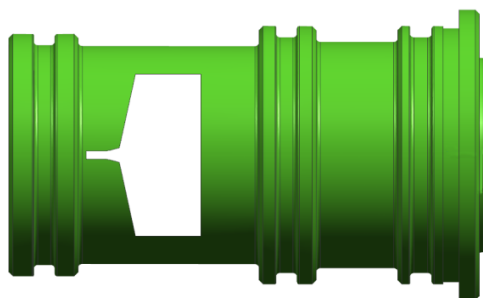


图 2 改进前活门型孔结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the improved valve type orifice before improvement

$$q_m = C_d \times \frac{(Y_1 + Y_2) X}{2} \times \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

式中 X 为型孔斜坡扩张段开度(mm); Y_1 为扩张段流通区域起始位置的型孔宽度(mm); Y_2 为扩张段流通区域终止位置的型孔宽度(mm)。

定义型孔流量增益比 A_q 为型孔开度的一个微小扰动量 ΔX 引起的流量变化量 Δq_m 与型孔当前流量 q_m 的比值, 在孔口前后压差 Δp 、流体密度 ρ 不变的前提下, A_q 可写作

$$A_q = \frac{\Delta q_m}{q_m} = \frac{(Y_2 + Y_3) \Delta X}{(Y_1 + Y_2) X} \quad (5)$$

式中 Y_3 为型孔开度微小扰动 ΔX 后的型孔宽度(mm)。

由图 2 可知, 相比于 Y_2 和 Y_3 , Y_1 尺寸可忽略不计, 而扰动量 ΔX 在无法完全消除且基本不变的情况下, 可视为一个常数, 因此式(5)可简化为

$$A_q = \frac{\left(1 + \frac{Y_3}{Y_2}\right) \Delta X}{X} \quad (6)$$

根据式(6)可知, 目前状态的型孔扩张段增益比是随着型孔开度的变化而实时变化的, 开度越小, Y_3/Y_2 越大, 增益比越大, 即越接近小流量段, 系统抗干扰能力越弱, 越有可能导致系统内的燃油脉动增大。

发动机在巡航状态时的燃油流量对应的型孔开度正好处于扩张段内, 若在该过程中若产生过高的燃油脉动, 对发动机的工作安全影响更大^[18]。执行活门型孔流通面积随型孔开度的变化如图 3 所示。

对该型孔开展仿真分析, 模拟发动机上低频脉动大的试验状态点, 给定高压转子转速 70%, 主燃油泵后压力 $p_1=3.5$ MPa, 增压阀后压力 $p_2=1.3$ MPa, 燃油流量 1.65(归一化后), 通过仿真计算得

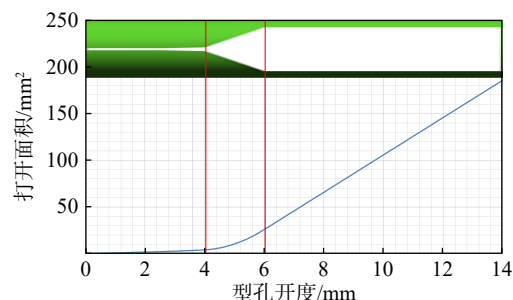


图 3 型孔开度与打开面积对应关系

Fig. 3 Corresponding relationship between the opening of orifice and opening area

到增压阀执行活门行程为 7.9 mm, 因为执行活门前端遮蔽量为 3 mm, 所以执行活门开度在 4.9 mm 位置, 根据图 3 可知, 正好处于型孔面积增益较大的扩张段内。

2.2 改进措施

针对该问题, 对执行活门的型孔结构进行改进设计, 采用等增益比指数型孔替代现有梯形型孔, 保证扩张段的流量增益比为一个较小的常数, 增强系统的抗干扰能力。

根据面积、流量和流阻要求, 型孔起始段和大流量段的尺寸设计与改进前型孔保持一致。根据发动机在对应状态下的燃油流量、压力、压差要求, 扩张段型孔宽度随型孔开度的变化曲线可写作

$$Y = 0.45e^{0.7X} \quad (7)$$

按照式(7)重新设计型孔扩张段结构, 改进后的型孔结构示意图如图 4 所示。

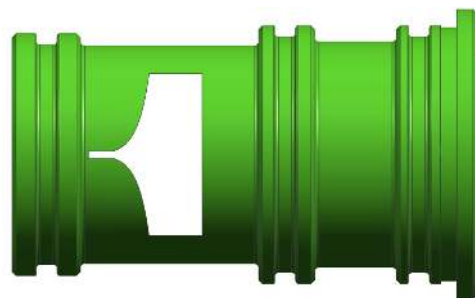


图 4 改进后活门型孔结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the improved valve type orifice after improvement

对比原型孔和改进型孔, 在不同开度下的型孔面积变化情况见表 1。更改为指数型孔后, 在型孔开度 4~6 mm 的区间, 型孔面积的变化率大幅降低, 型孔打开面积的增加量由 21.7 mm² 减小为 7.9 mm²。根据上文中的机理分析可知, 在相同

表 1 型孔打开面积对比

Table 1 Comparison of orifice opening area

型孔开度/mm	打开面积/mm ²	
	改进前	改进后
0	0	0
1	0.9	0.9
2	1.8	1.8
3	2.8	2.7
4	4.2	4
5	10.5	6.6
6	25.9	11.9

的燃油波动下, 型孔面积的增益降低, 则必然会使脉动幅值降低。

3 试验验证情况

在某型涡扇发动机上开展改进后执行活门型孔的整机验证工作, 选取两台发动机, 对比更换型孔前后, 主燃油泵后压力 p_1 和增压阀后压力 p_2 测点中 22 Hz 低频脉动幅值的变化趋势。第 1 台发动机脉动幅值的对比情况见图 5~图 6。图中横坐标为主燃油流量(归一化后), 纵坐标为在该流量对应的稳态台阶下, 采集到的 22 Hz 低频脉动的最大幅值。

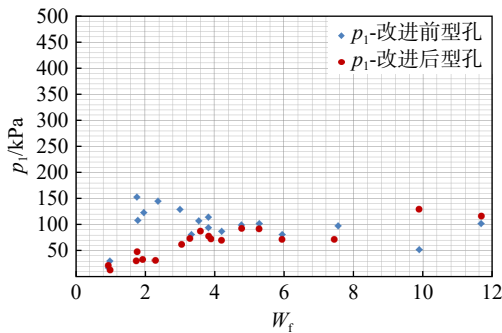


图 5 主燃油泵后脉动幅值对比 1

Fig. 5 Comparison of pulsation amplitude after main fuel pump 1

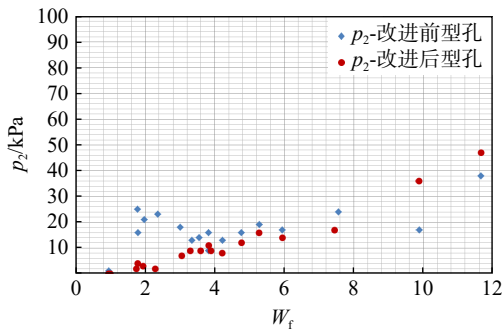


图 6 增压阀后脉动幅值对比 1

Fig. 6 Comparison of pulsation amplitude after booster valve 1

在发动机正常工作时, 随着发动机状态的升高, 燃油流量增加, 燃油波动量及其中各个频率的脉动应随之呈现出线性增大的趋势。但由图 5~图 6 可知, 在主燃油流量 1.4~5.6(归一化后)的区间内, 改进前型孔的 22 Hz 低频脉动幅值明显过高, 不符合正常的变化趋势, 该流量段对应的型孔开度为 4~6 mm。对比型孔改进前后的试验数据, 改进前的型孔 p_1 脉动幅值最大 154 kPa, p_2 脉动幅值最大 25 kPa, 改进后的型孔 p_1 脉动幅值最大 93 kPa, p_2 脉动幅值最大 16 kPa, p_1 和 p_2 测点中的 22 Hz 脉动幅值整体降低约 15%~84%。

第 2 台发动机更换执行活门型孔前后 p_1 和 p_2 测点中 22 Hz 脉动幅值的变化趋势见图 7~图 8。

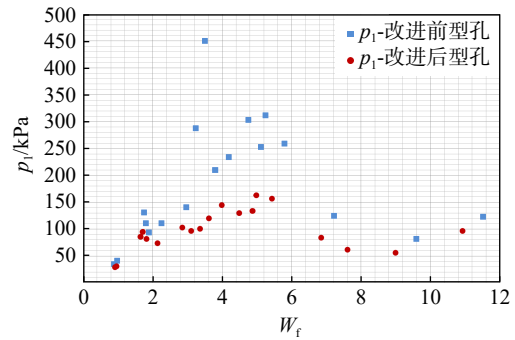


图 7 主燃油泵后脉动幅值对比 2

Fig. 7 Comparison of pulsation amplitude after main fuel pump 2

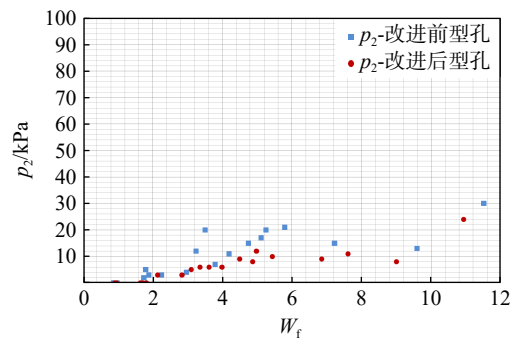


图 8 增压阀后脉动幅值对比 2

Fig. 8 Comparison of pulsation amplitude after booster valve 2

由试验数据可知, 在主燃油流量 1.4~5.6 的范围内, 改进前的型孔 p_1 脉动幅值最大 450 kPa, p_2 脉动幅值最大 20 kPa, 改进后的型孔 p_1 脉动幅值最大 250 kPa, p_2 脉动幅值最大 12 kPa, 本台发动机的 22 Hz 低频脉动幅值整体来说高于第 1 台发动机, 该差异主要是由于主燃油系统内各附件自身的特异性以及附件间的系统匹配性所致, 但总体来看, 改进后的型孔对扩张段脉动幅值的抑制作用依旧十分明显, p_1 和 p_2 中的 22 Hz 脉动幅

值整体降低约 5%~48%。

综合对比两台发动机的整机试验结果来看,改进后的型孔对低频脉动有很好的抑制作用,改进措施合理有效。

4 结 论

本文针对某型涡扇发动机主燃油系统中低频脉动大,影响发动机工作安全的问题,通过机理分析定位原因,提出一种通过调整活门型孔尺寸抑制低频脉动的优化措施,并随发动机整机试验验证了改进效果。依据机理分析和试验结果,可以得到以下一些结论:

1) 主燃油供油系统中存在 22 Hz 低频脉动的原因是,调节器内部压差活门、回油活门、计量活门和增压阀内部执行活门之间存在相互耦合的效应,同时受执行活门型孔扩张段结构的影响,导致脉动幅值增大;

2) 本文提出的将增压阀执行活门型孔由梯形型孔改为指数形型孔的措施,经过整机试验验证有效,根据发动机工作状态点和脉动基准值的不同,22 Hz 低频脉动幅值最高可降低 84%,提升了主燃油系统的可靠性,保证了发动机试车的安全性;

3) 根据低频脉动的产生及放大机理可知,除活门微动对脉动幅值有明显的影响外,弹簧刚度也是重要的影响因素,后续可从此角度入手开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] 欧阳平超,刘红梅,焦宗夏.基于旁路溢流原理的流体脉动主动控制[J]. *航空学报*, 2007, 28(6): 1302-1306.
OUYANG Pingchao, LIU Hongmei, JIAO Zongxia. Active control of fluid pulsation based on bypass overflow principle[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(6): 1302-1306. (in Chinese)
- [2] LEE D, ANDERSON T. Measurements of fuel/air-acoustic coupling in lean premixed combustion systems: AIAA 1999-450 [R]. Reston, US: AIAA, 1999.
- [3] MONGIA R, DIBBLE R, LOVETT J. Measurement of air-fuel ratio fluctuations caused by combustor driven oscillations[R]. ASME Paper 98-GT-304, 1998.
- [4] 吴鹏龙.进气畸变和燃油脉动对燃烧室内燃烧流场的影响研究[D].南京:南京航空航天大学, 2012.
WU Penglong. Research on influences of inlet distortion and fuel injection pulse on combustor combustion flow field[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [5] 朱冬清,吴鹏龙,金仁瀚,等.燃油脉动对温度场影响的数值研究[J]. *航空发动机*, 2015, 41(4): 51-56.
ZHU Dongqing, WU Penglong, JIN Renhan, et al. Numerical simulation for influences of fuel injection pulse on temperature profile [J]. *Aeroengine*, 2015, 41(4): 51-56. (in Chinese)
- [6] MAMČIĆ S, BOGDEVIČIUS M. Simulation of dynamic processes in hydraulic accumulators[J]. *Transport*, 2010, 25(2): 215-221.
- [7] 焦宗夏,陈平,华清,等.液压能源管路系统振动主动控制的理论研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2002, 28(4): 465-469.
JIAO Zongxia, CHEN Ping, HUA Qing, et al. Theoretical study on vibration active control of power supply and pipeline systems[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, 28(4): 465-469. (in Chinese)
- [8] LIEUWEN T C, YANG V. Combustion instabilities in gas turbine engines: operational experience, fundamental mechanisms, and modeling[M]. Reston, US: AIAA, 2006.
- [9] 汤冠琼,秦皓,李林,等.非定常条件下喷嘴结构对燃油流量脉动的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(4): 831-837.
TANG Guanjiong, QIN Hao, LI Lin, et al. Nozzle structure's influence on fuel flow oscillation in unsteady conditions[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(4): 831-837. (in Chinese)
- [10] YOKOTA S, SOMADA H, YAMAGUCHI H. Study on an active accumulator. (active control of high-frequency pulsation of flow rate in hydraulic systems)[J]. *JSME International Journal Series B*, 1996, 39(1): 119-124.
- [11] BRENNAN M J, ELLIOTT S J, PINNINGTON R J. A non-intrusive fluid-wave actuator and sensor pair for the active control of fluid-borne vibrations in a pipe[J]. *Smart Material Structures*, 1996, 5(3): 281-296.
- [12] 邢科礼.液压系统压力脉动的衰减理论及方法研究[D].西安:西安交通大学, 1998.
XING Keli. Study on attenuation theory and method of pressure pulsation in hydraulic system[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1998. (in Chinese)
- [13] 张东方,李应红,陈东林.基于 PSO 算法的航空发动机启动燃油控制[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(6): 923-927.
ZHANG Dongfang, LI Yinghong, CHEN Donglin. A new method to control fuel flow of aircraft engine's starting process based on PSO Algorithm[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(6): 923-927. (in Chinese)
- [14] 杨孙圣,孔繁余,成军,等.液力透平蜗壳内非定常压力脉动的研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(2): 388-393.
YANG Sunsheng, KONG Fanyu, CHENG Jun, et al. Research on unsteady pressure field within a hydraulic turbine volute[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2): 388-393. (in Chinese)
- [15] 王铮,高红霞,刘思远.航空发动机主供油路压力脉动仿真分析[J]. *液压与气动*, 2018(3): 67-73.
WANG Zheng, GAO Hongxia, LIU Siyuan. Analysis of pressure pulsation in main fuel supply road for aeroengine[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2018(3): 67-73. (in Chinese)
- [16] 史广泰,杨军虎,苗森春,等.不同进口截面下液力透平非定常压力脉动计算[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(3): 659-668.
SHI Guangtai, YANG Junhu, MIAO Senchun, et al. Unsteady calculation of pressure pulsations within hydraulic turbine under different entrance sections[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(3): 659-668. (in Chinese)
- [17] 张克危.流体机械原理-上册[M].北京:机械工业出版社, 2000.

- ZHANG Kewei. Principles of fluid machinery: Volume I [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. (in Chinese)
- [18] 鲍文, 闫志刚, 于达仁, 等. 某涡喷发动机燃油压力高频脉动现象的分析及解决[J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 109-112.
- BAO Wen, YAN Zhigang, YU Daren, et al. Analysis of fuel pressure high-frequency pulsation in a turbo jet[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1): 109-112. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)