

文章编号: 1000-8055(2007)11-1792-06

脉冲爆震发动机供油自适应规律研究

范育新, 王家骅, 曹梦源

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 利用在油路系统的不同位置处设置动态压力传感器来测量 PDE 工作过程中的油管中瞬时油压曲线的方法, 研究 PDE 工作中的供油自适应规律. 研究表明, 在供油自适应控制中, 开始和停止供油取决于 PDE 内的燃气反压和供油压力的共同作用, 燃气反压大于供油压力, 停止供油; 燃气反压小于供油压力, 开始供油. 在保持 PDE 内当量比不变的情况下, 一个循环内的供油时间长短只与供油压力有关, 与油管长度和工作频率无关, 但油管长度越长, 损失越大, 导致泵后压力越高.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机; 供油; 自适应控制; 压力

中图分类号: V231.2⁺2

文献标识码: A

Research on principle of self-fit control for fuel supply in pulse detonation engine

FAN Yu-xin, WANG Jia-hua, CAO Meng-yuan

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The principle of fuel supply self-fit control in pulse detonation engine was studied by measuring the instantaneous oil pressure curve with the dynamic pressure sensors located on different sites of fuel line during the operation of PDE. The results show that, startup and stop of fuel supply, under fuel supply self-fit control, depends upon gas counter-pressure in PDE and fueling pressure. Fuel supply begins with gas counter-pressure less than fuel supply pressure, and stops in reverse conditions. Under the same equivalent proportion within PDE, the fuel supply time is related only to the fueling pressure, independent of the length of fuel line and working frequency of PDE. The longer the fuel line, the larger the pressure loss is, thus leading to a higher pressure at the exit of bump.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation engine (PDE); fuel supply; self-fit control; pressure

脉冲爆震发动机由于其间歇工作的特点^[1], 燃料和氧化剂的供给也应满足间歇供应. 氧化剂的供应控制可通过机械阀门^[2-3]和气动阀^[4]实现, 而燃料的供应通常采用电磁阀控制^[5-6], 但对于高频工作 PDE, 往往电磁阀的频响跟不上, 干扰 PDE 的正常工作^[7], 因此, 高频工作时要采取特殊研制的高频电磁阀或采用供油自适应控制.

PDE 供油自适应控制是利用爆震管中的反压, 来控制各个工作循环内的供油, 以保证 PDE 协调工作. PDE 在一个循环内的工作过程如图 1 所示^[8], 由于油压比进气压力大, 因此, 当推力壁附近燃气压力小于供油压力 p_f 时就开始供油, 而推力壁附近燃气压力等于进气压力 p_a , 开始进气.

收稿日期: 2006-10-16; 修订日期: 2007-01-16

作者简介: 范育新(1967-), 女, 江苏无锡人, 副教授, 博士, 主要从事燃烧学研究.

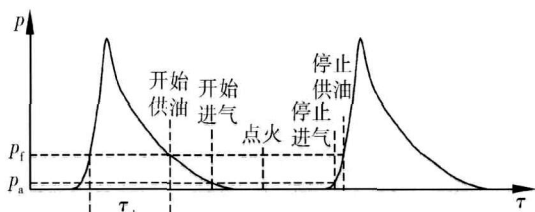


图 1 PDE 在一个循环内的工作过程

Fig. 1 Process of a PDE cycle

如果点火器通电后, PDE 立即燃烧并产生略高于进气压力的压力, 使进气停止, 相应在该时刻应该停止供油. 但由于常压进气条件下, 只要燃烧室内压力略大于环境压力时, 气动阀就关闭, 而供油压力大于大气压, 因此供油关闭会迟于进气关闭.

由此可知, 自适应控制会使供油相对于进气提前并且供油关闭相对于停止进气推迟, 增加油耗. 但自适应控制无需供油控制系统, 结构简单, 成本低, 适用于单工况、小推力 PDE.

本文利用动态压力传感器来测量油管中不同位置处的油压, 获得不同工况、不同油路结构下的供油曲线, 研究在一个 PDE 工作循环中供油自适

应规律. 为 PDE 自适应控制的进一步优化提供依据.

1 试验设备及工况

试验系统如图 2 所示.

(1) 模拟冲压进气, 气源为两台罗茨风机, 压头 7 000 Pa, 气流量为 3 kg/s. PDE 样机由钢丝悬挂, 调整钢丝长度可以调节 PDE 高度, 台架允许 PDE 作轴向运动, 四个轴承确保 PDE 样机与气源之间的同轴度, 顶杆通过弹簧预紧将 PDE 顶紧在地面台架座上.

(2) 供油采用汽油泵, 压力可达 5 MPa, 最大流量为 200 g/s 左右. 泵出口燃油至三通接头后分两路, 一路通过回油阀回到油箱. 另一路通过进油阀和油滤至喷嘴, 回油阀前和进油阀后各安装一个压力表监测回流和进油压力, 通过调节回油阀和进油阀来控制喷嘴前油压和流量.

(3) PDE 结构同文献[9], PDE 有两个喷嘴, 侧喷和中心喷射. 侧喷喷嘴安装在气动阀喉道前, 中心喷嘴安装在气动阀喉道附近.

(4) PDE 试验频率为 15 Hz, 20 Hz.

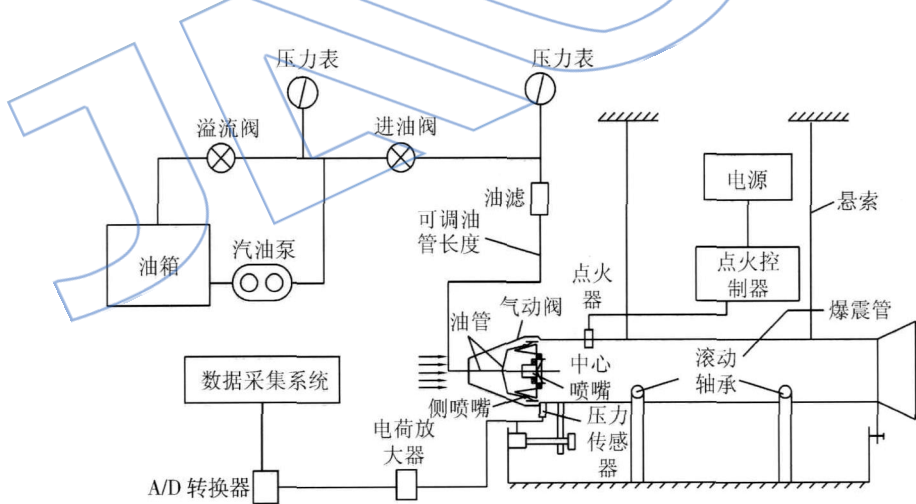


图 2 PDE 自适应供油试验系统

Fig. 2 Self-fit fuel control test system of PDE

2 试验结果

2.1 油路中加 6 m 长铜管

在图 2 所示的可调油管长度部分加 6 m 长铜管, 并在图 3 所示的位置安装三个压力传感器, 测量在喷嘴和油滤之间油管不同长度处供油压力曲线, 在 PDE 推力壁附近安装压力传感器, 测量 PDE 燃气压力. 试验分别在 15 Hz 和 20 Hz 频率

下进行, 每个频率下记录多组试验结果, 图 4 是 20 Hz 时测得的各压力传感器典型压力曲线.

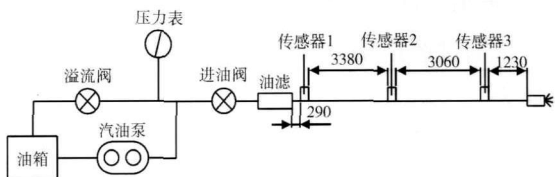


图 3 压力传感器在 6 m 长油管中的位置

Fig. 3 Situations of sensors in the 6 m fuel pipe

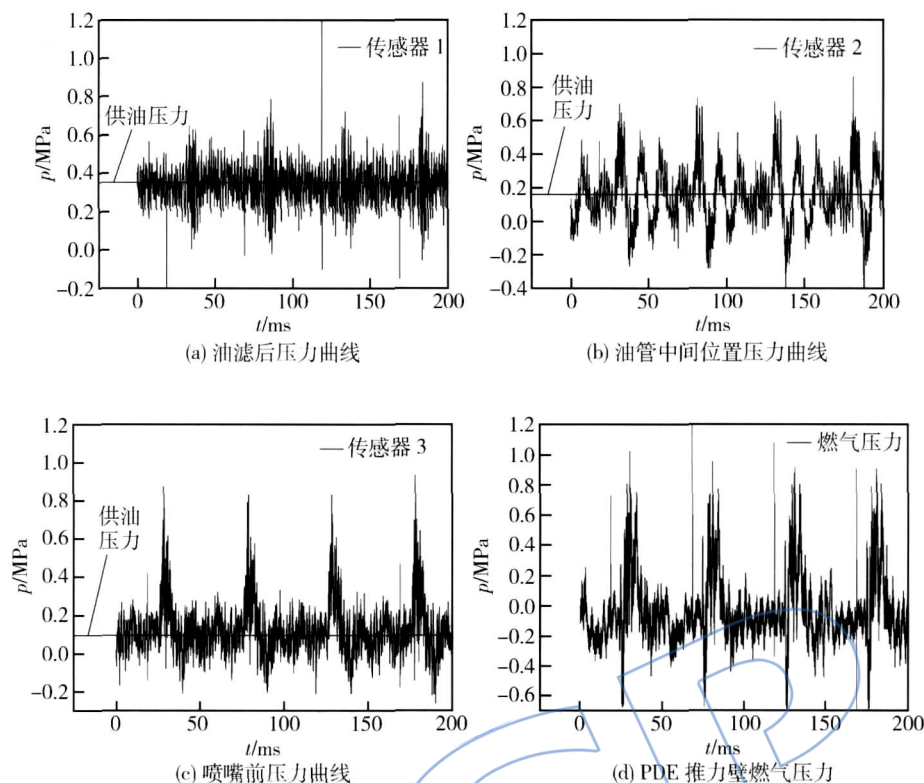


图 4 油管中不同位置处及 PDE 内燃气的压力曲线($t = 50\text{ ms}$)
Fig. 4 Pressure of various sensors in fuel line and PDE

2.2 油路中无 6 m 长铜管

去掉 6 m 长铜管,分别安装压力传感器测量阀门后、油滤前、油滤后油管不同位置处供油压力(如图 5 所示),并测 PDE 推力壁附近的燃气压力.测得的压力曲线如图 6 所示.

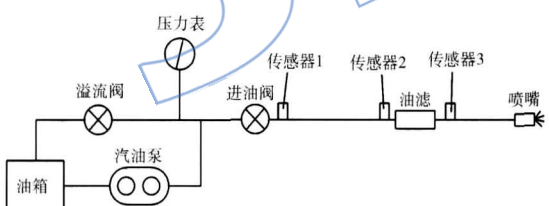


图 5 无 6 m 长油管的油路中压力传感器的位置
Fig. 5 Situations of sensors in the fuel line without 6 m fuel pipe

3 试验结果分析

3.1 喷嘴前油压随时间变化

根据试验结果,将喷嘴前油压曲线的有关参数如表 1.

由图 5 及表 1 可知:

(1) 喷嘴前油压按 PDE 工作频率脉动,出现的油压峰值(p_m 为 0.7~0.8 MPa 左右),接近推力壁处的峰值压力(p_{PDE} 为 1.0~1.2 MPa),油压

峰值远比供油压力高.这说明喷嘴前油压是由供油压力和 PDE 的反压共同影响造成的.当 $p_{PDE} < p_f$ 时,供油压力即为油泵供油压力.当 $p_{PDE} > p_f$ 时,停止供油,喷嘴前压力和 PDE 内燃气压力相关.

表 1 喷嘴前油压曲线参数
Tabel 1 Parameter of fuel pressure curve ahead of atomizer

$f/$ Hz	$p_{PDE}/$ MPa	$p_m/$ MPa	$\Delta p_f/$ MPa	$\tau_{\text{峰}}/$ ms	$\tau_{AB}/$ ms
20	1.0	0.85	0.22	12.3	10.1
15	1.2	0.75	0.22	12.8	9.8

p_{PDE} 表示 PDE 推力壁处峰值压力, p_m 表示油压曲线峰值压力, Δp_f 表示供油压力脉动幅值, $\tau_{\text{峰}}$ 表示油管峰值压力离点火信号时间, τ_{AB} 表示停止供油时间.

(2) 平均供油的油压和 PDE 反压曲线交点 A、B 为停止供油和开始供油的时刻, τ_{AB} 为停止供油时间(如图 7 所示). τ_{AB} 决定于供油油压 p_f 的高低, p_f 越高, τ_{AB} 越小,当 p_f 大于 PDE 反压时, $\tau_{AB} = 0$,即全周期都在供油.因此宜采用低压供油.

(3) 停止供油时间为 10 ms 左右和工作频率

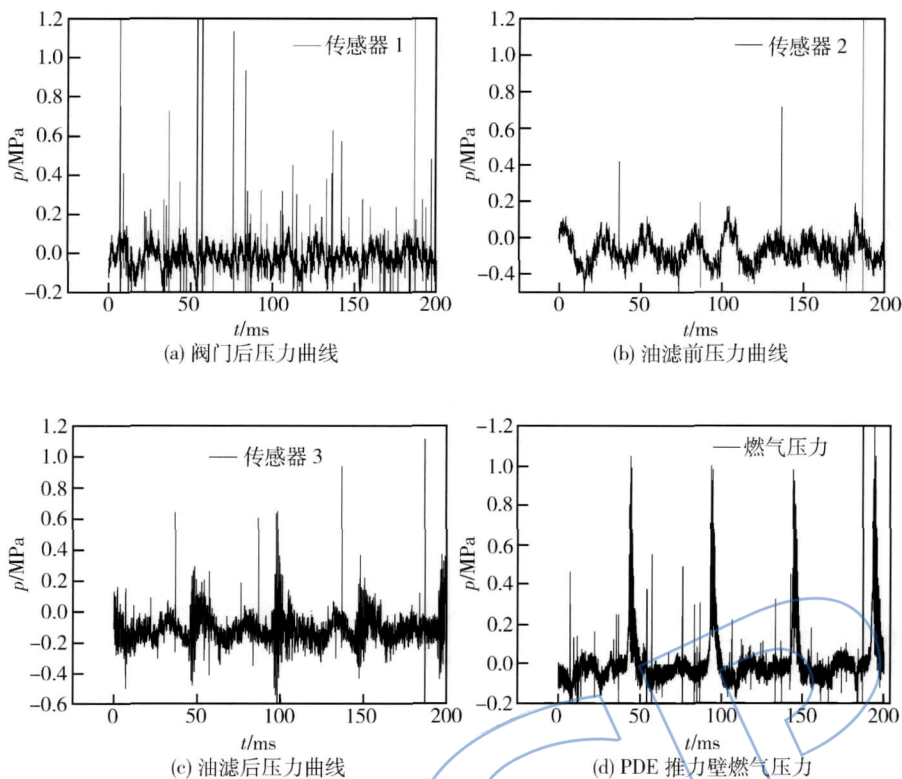


图 6 不加 6 m 长油管时,油路中不同位置处压力

Fig. 6 Pressure of various sensors in fuel line and PDE(without 6 m fuel pipe)

无关.由于本文采用 7 000 Pa 水柱的气源,当 PDE 结构及其与气源间距不变时,PDE 内充填速度不变,都为 80 m/s,当 PDE 工作频率变化时,充填时间并不变.当保持 PDE 内混气当量比 $\phi=1$ 不变(即供油量不变)时,可认为 PDE 内 DDT 时间和超燃膨胀时间都不变,因而 τ_{AB} 和工作频率无关.当然,由于频率降低,导致混气过度充填,从而增加油耗.

(4) 供油压力峰值离点火信号时间为 12~13 ms,比 PDE 内压力信号滞后 5~6 ms.这段时间即是 PDE 内反压经过喷嘴上传到传感器位置的时间.

(5) 供油时,出现一定幅值的油压脉动,供油压力脉动为 0.2 MPa 左右,脉动频率为 60 Hz 左右,这是由于油泵工作频率引起的,和 PDE 工作频率无关.

(6) 由于油压表上测量到的平均油压 $\left[\int p_t d\tau T \right]$ 包含了停止供油 AB 段的压力值,因此远大于实际平均油压(不包含 AB 段的压力值)(如图 7 所示).

3.2 油管长度对油压曲线参数的影响

由图 4 和图 6 可知,供油和不供油的油压有

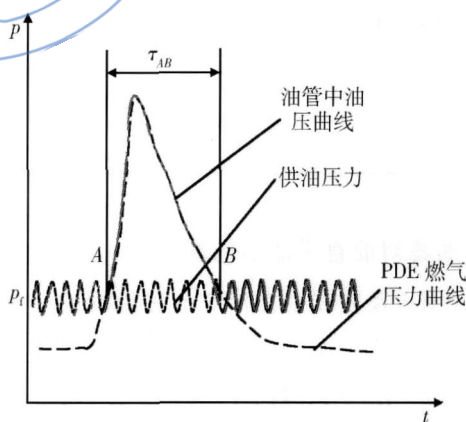


图 7 供油压力与 PDE 内燃气压力的关系

Fig. 7 Relation of fuel supply pressure and gas pressure in PDE

明显界限,供油时油压小于不供油时油压,供油压力曲线随油路中的位置变化而变.比较去掉 6 m 长油管前后不同测量位置处油压曲线得到表 2 中的有关参数.

由表 2 可知:

(1) 油压峰值随远离喷嘴逐渐降低,但降低幅度不大,同时,由油压曲线图可发现,喷嘴前的供油压力曲线脉动频率与 PDE 内燃气压力脉动一致,随着远离喷嘴,供油压力曲线脉动频率改变.油压曲线的峰值压力也随着远离喷嘴而变小.

这说明,离喷嘴距离小,供油压力主要受 PDE 反压影响,随着距离增加,PDE 反压影响逐渐减弱,离喷嘴距离大,供油压力主要受泵后压力影响.并且,油管长度增加使油管内流动总压损失增大,为了维持混气 $\phi=1$ 不变,喷嘴前压力应保持不变,从而使泵后压力有所增加,这点从图 5 中可以看出.图 5 中离喷嘴越远,供油压力线越高.

(2) 供油压力脉动幅值随着油管长度变化基

本不变,这种脉动来源可能是油泵的供油过程.

(3) 油管长度对停止供油延续时间 τ_{AB} 影响不大, τ_{AB} 在 10~11 ms 之间.油管长度变化对 $\tau_{峰}$ 的影响从表 2 中看不出明显的规律,由于传感器 2 的油压曲线脉动频率较低,因此确定 $\tau_{峰}$ 值比较困难,与另两个传感器测得的曲线相比误差较大,从传感器 1 和传感器 3 的曲线上认为 $\tau_{峰}$ 随油管长度的变化也应不大, $\tau_{峰}$ 在 12 ms 左右.

表 2 不同测量位置处油压曲线参数
Table 2 Parameters of fuel pressure curve at various position

工况		f/Hz	p_m/MPa	$\Delta p_t/\text{MPa}$	$\tau_{峰}/\text{ms}$	τ_{AB}/ms
去掉 6m 长油管前	传感器 1	20	0.55	0.27	12.1	10.3
		15	0.5	0.26	无法确定	10.6
	传感器 2	20	0.78	0.25	13.5	无法确定
		15	0.6	0.23	15.3	无法确定
	传感器 3	20	0.85	0.22	12.3	10.2
		15	0.75	0.23	12.5	9.8
去掉 6m 长油管后	传感器 1	20	0.25	0.23	无法确定	无法确定
		15	0.23	0.24	无法确定	无法确定
	传感器 2	20	0.27	0.25	17.5	无法确定
		15	0.25	0.21	16.3	无法确定
	传感器 3	20	0.46	0.24	11.4	10.6
		15	0.45	0.24	12.1	10.4

3.3 油滤对油管中油压的影响

由图 6 及表 2 中去掉 6 m 长油管的油压曲线结果可知:

传感器 1 和传感器 2 的油压曲线峰值接近,都为 0.25 MPa 左右,而在油滤后的传感器 3 的油压曲线峰值为 0.45 左右,很明显,经过油滤后压力峰值衰减了很多.并且从传感器 3 的压力曲线上能明显看出与 PDE 工作一致的脉动频率,而在油滤前的传感器 1 和 2 的压力曲线上看不到与 PDE 一致的脉动频率,只有油泵的固有脉动频率.由此可知,PDE 反压向燃油流动上游传播时,通过油滤后减小,而供油压力向燃油流动方向下游传播时,通过油滤后减小,油滤在供油管路中起阻尼作用.

4 结 论

(1) 油压曲线出现和 PDE 内压力曲线相对应的常值 p_m ,供油压力大于 PDE 内反压时,供

油,反之停止供油.

(2) PDE 自适应停止供油持续时间和油压有关,和油管长度及频率无关,供油压力越高,停止供油时间越短.

(3) 油管长度影响油压曲线的峰值,从而影响油压表的读数,但并不影响实际的供油压力和供油时间.

(4) 油滤在管路中起阻尼作用.

参考文献:

[1] Bussing T R A ,Bratkovich T E ,Hinkey Jr J B. Practical implementation of pulse detonation engines [R]. AIAA 97-2748 ,1997.

[2] Bussing T R. A rotary valve multiple pulse detonation engine (RVMPDE) [R]. AIAA 95-2577 ,1995.

[3] Bratkovich T E. An introduction to pulse detonation rocket engines (PDRES) [R]. AIAA 97-2742 ,1997.

[4] Brophy C M ,Netzer D W. Effect of ignition characteristics and geometry on the performance of a JP-10/O₂ fueled pulse detonation engine [R]. AIAA 99-2635 ,1999.

- [5] Hofstedt T A. Propagation of a two-phase detonation across a geometric diffraction with compositional discontinuity [R]. ADA381096, 2000.
- [6] Forster D L. Evaluation of a liquid -fueled pulse detonation engine combustor[R]. ADA359179, 1998.
- [7] 张义宁,王家骅,范育新,等. 多循环脉冲爆震发动机工作过程中的延迟时间研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(2): 228-232.
ZHANG Yining, WANG Jiahua, FAN Yuxin, et al. Investigation of several delay times in operation process of multi-cycle pulse detonation engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(2): 228-232.
- [8] 范育新,王家骅,李建中,等. 脉冲爆震发动机工作过程控制和协调试验[J]. 推进技术, 2004, 25(6): 538-542.
FAN Yuxin, WANG Jiahua, LI Jianzhong, et al. Experimental investigation on cooperation process of pulse detonation engine (PDE) [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 25(6): 538-542.
- [9] 范育新,王家骅,曹梦源. 模拟冲压进气条件对 PDE 推力测量影响[C] //中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集(下册). 武汉:中国工程热物理学会, 2006: 1228-1233.
FAN Yuxin, WANG Jiahua, CAO Mengyuan. Influence of simulative flight condition on thrust measurement of pulse detonation engine[C] //Volume of Chinese Academy of Engineering Thermophysics of Combustion meeting, Vol. 2, Wu Han: Chinese Academy of Engineering Thermophysics, 2006: 1228-1233.