

文章编号: 1000-8055(2007)02-0228-05

多循环脉冲爆震发动机工作过程中的 延迟时间研究

张义宁¹, 王家骅¹, 刘 鸿^{1,2}, 张靖周¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 江苏工业学院 机械工程系, 常州 213016)

摘 要: 为了提高两相脉冲爆震发动机(PDE)工作的协调性,运用离子传感器、动态压力传感器,对爆震燃烧的几个延迟时间以及供油电磁阀工作性能进行研究.研究表明:以汽油为燃料、空气为氧化剂的气动阀式PDE,点火延迟时间为3.0~4.5 ms,气动阀关闭滞后点火信号发出4.9~6.4 ms,供油电磁阀开、关延迟分别为2.4 ms和3.4 ms左右.缓燃向爆震转捩时间为3.0~3.8 ms. PDE工作频率大于20 Hz时,电磁阀不能按设定时间工作.研究成果对PDE工作过程的协调及有效控制具有参考价值.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机(PED); 延迟时间; 控制; 气动阀

中图分类号: V231.2⁺2

文献标识码: A

Investigation of several delay times in operation process of multi-cycle pulse detonation engine

ZHANG Yi-Ning¹, WANG Jia-Hua¹, LIU Hong^{1,2}, ZHANG Jing-zhou¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

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

2. Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: In order to promote the operating coordination of a two-phase pulse detonation engine (PDE), the delay time of detonation and operating performance of the solenoid valve were experimentally studied by using ion-sensors and pressure transducers of high-frequency response. The detonation tube is of 58mm inner diameter and 1270 mm long. Liquid gasoline/air mixture is filled for the engine multi-cycle operations. According to the research, the mixture ignition delay is 3~4.5 ms, the aero-valve closing delay is 4.9~6.4 ms, and the solenoid electric valve on/off delay time is 2.4 ms and 3.4 ms respectively. The transition time from deflagration to-detonation is about 3.0~3.8 ms. The solenoid electric valve cannot operate orderly when the engine operating frequency is higher than 20 Hz. These data obtained are helpful to coordinate PDE operation process.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation engine (PDE); delay time; control; aero-valve

脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine, Abr. PDE)是利用周期性的爆震燃烧来产生推力

的新概念发动机^[1-3].与传统发动机相比PDE是间歇周期工作的,为了保证PDE各个周期工作协

收稿日期: 2006-01-04; 修订日期: 2006-03-27

基金项目: 国防基础预研项目(K1600060704)

作者简介: 张义宁(1977-),男,江苏连云港人,南京航空航天大学能源与动力学院博士生,主要从事燃烧研究.

调,需要控制器来协调工作过程,控制器必须满足所设定的点火周期与 PDE 实际工作周期相等或相近,并保证在可爆混气形成过程中供油与供气的同步.为了提高 PDE 工作的协调性,达到精确控制的要求,必须定量的掌握 PDE 工作过程时间分配.

关于气动阀式 PDE 协调工作,国外做了大量研究^[4-7],主要针对一个周期内各工作过程时间分配进行研究,对于两相多循环的爆震燃烧存在的一些延迟时间,还没有深入细致的研究,对两相多循环 PDE 缓燃向爆震转捩过程(Deflagration to-Detonation transition 即 DDT 过程)所需时间,还没有进行试验测量,文献[8]较系统的研究了气动阀式 PDE 的协调工作和控制.限于当时条件,有些参数(如 DDT 时间)是假设的.在两相多循环爆震燃烧过程中,一些重要的时间参数的定量测量,对于更好的协调 PDE 工作具有重要的意义.

试验在获得稳定的间歇工作的 PDE 原型机上,以液态汽油/空气为推进剂,PDE 可以在频率 50 Hz 以内稳定的以间歇方式工作^[9],通过离子传感器及 PCB 动态压力传感器,研究了汽油/空气两相混气爆震燃烧的点火延迟时间,气动阀关闭延迟时间,DDT 时间,并对高频供油电磁阀工作特性进行试验研究.

1 PDE 协调工作及控制机理

PDE 的工作周期是由点火周期控制的,点火周期由开环控制器设定,控制器可以同时设定 3 个参数,分别为点火周期 $T_{\text{设}}$,一个周期内供油电磁阀的关闭时间 $\Delta\tau_2$,气动阀和供油电磁阀的关闭时间差 $\Delta\tau_1$.

1.1 PDE 周期的确定

PDE 的一个工作周期包括爆震燃烧室内混气充填时间 t_f ;防止发生连续燃烧的纯空气隔离段充填时间 t_i ;缓燃向爆震转变所需要的时间 t_{DDT} ;爆震波触发到排出爆震管所需时间 t_d ;膨胀波向上游传播至推力壁并反射出爆震燃烧室所用时间 t_r ;记 $t_{\text{DR}} = t_d + t_r$,根据气动阀式 PDE 的试验结果经验公式^[10] $t_{\text{DR}} = 10 \frac{L_f}{u_b}$,PDE 工作周期 T

$$= t_f + t_i + t_{\text{DDT}} + t_{\text{DR}} = \frac{L_f}{u} + \frac{\Delta L_i}{u} + t_{\text{DDT}} + 10 \frac{L_f}{u_b}$$
其中 L_f 为混气充填长度, u 为混气充填速度、 ΔL_i 为隔离段长度, u_b 为爆震波传播速度(汽油/空气的爆震波传播速度在 1 300 m/s 左右^[11]), t_f 、 t_i 、

t_{DR} 可以确定, t_{DDT} 则需由试验确定,试验前可以对 t_{DDT} 预设.根据试验结果不断调整 $T_{\text{设}}$,使得 $T_{\text{设}}$ 逐渐的逼近 PDE 的实际工作周期.

1.2 对 $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$ 的控制,实现供油与供气的同步

为了保证 PDE 正常工作,一个周期内进气过程与进油过程必须同步,气动阀式 PDE 的间歇进气是通过爆震管内自身反压控制的.当爆震管内压力小于进气压力 p_a 时,开始进气;当反压大于 p_a 时,进气停止,气动阀关闭.定义点火器通电至爆震管内压力上升到 p_a 所需时间为气动阀关闭延迟时间,记为 $\Delta\tau_1$.

PDE 低频工作时可以通过控制电磁阀开关来实现间歇供油.供油电磁阀属于常开型的,通电则关闭,但由于阻塞流通截面的顶杆机械运动惯性的存在,预先设定点火器和电磁阀同时通电,电磁阀通电到完全关闭需要一定的时间,记为 $\Delta\tau_c$.为了保证停止供油与停止进气的同步,通过控制器 $\Delta\tau_1$ 来调节,若测得 $\Delta\tau_c > \Delta\tau_1$,说明电磁阀比气动阀后关,就需要设定 $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_c - \Delta\tau_1$,使电磁阀提前 $\Delta\tau_1$ 时间通电;反之,则设定 $\Delta\tau_1 = -|\Delta\tau_1 - \Delta\tau_c|$.为了准确设定两者时间差 $\Delta\tau_1$,必须设法测定 $\Delta\tau_1$ 及 $\Delta\tau_c$.

当 PDE 一个循环结束后,电磁阀在停止 $\Delta\tau_2$ 的时间后继续供油, $\Delta\tau_2 = t_i + t_{\text{DDT}} + t_{\text{DR}}$,停止供油的时间 $\Delta\tau_2$ 通过控制器设定的,如果设定值 $\Delta\tau_2_{\text{设定}} < \Delta\tau_2_{\text{实际}}$,会出现提前供油现象,容易发生连续燃烧;如果 $\Delta\tau_2_{\text{设定}} > \Delta\tau_2_{\text{实际}}$,则会增加隔离段充填长度,缩短了混气充填长度.因此,为了协调 PDE 的工作,必须通过逐步逼近的方法对 进行定量的测定,这样才能为 的设置提供试验依据.

2 试验设备、测试仪器、试验件及工况

2.1 点火延迟时间研究试验设备、测试仪器、试验件及工况

2.1.1 点火延迟时间研究试验设备及测试仪器

试验在悬挂式 PDE 试车台上进行,如图 1 所示,气源为压头 7×10^4 Pa,流量 $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 的罗茨风机,燃油泵为涡喷 6 加力泵改装,油压最高达 5.0 MPa,最大流量为 200 g/s.自主开发计算机数据采集系统,采集卡为 NI 公司的 6135 型高频数据卡,有四个采样通道,每个通道的采样频率为 2.5 MHz.高频可调点火器来控制高能电嘴,点火能量 0.5~1J.爆震管内燃气压力由 PCB 动态压

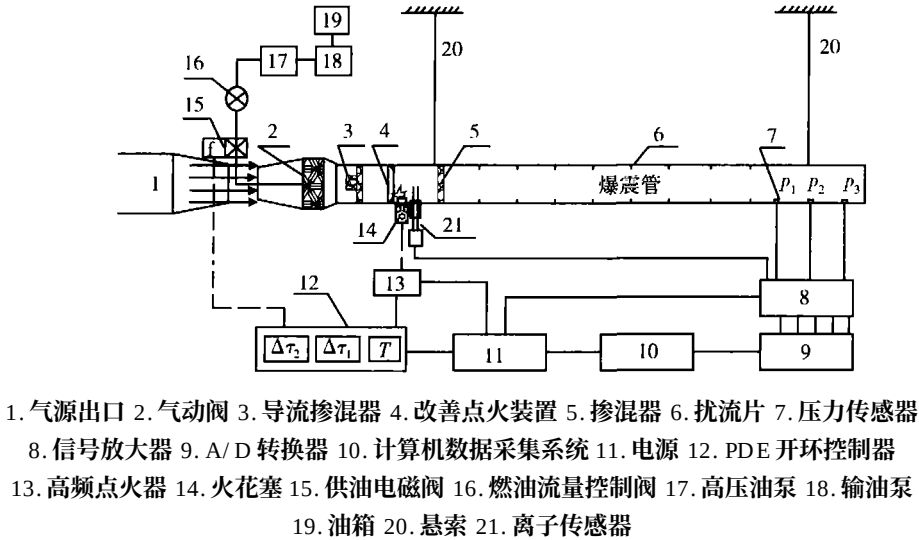


图 1 试验装置和测试系统示意图

Fig.1 Sketch map of experimental setup and measurement system

力传感器(M113A26,频响 500 kHz)测量,压力信号通过放大后经转换器输入计算机并显示.不同压头对应的混气充填速度在冷态下用皮托管在 PDE 出口处测量,燃油流量由浮子流量计测量.

2.1.2 试验件

PDE 试验件包括:旋流与锥形体相结合的气动阀,在高速气流下的点火装置,促进均匀混气形成的掺混器,起强化燃烧作用的扰流片.

测量点火延迟时间的离子探针由两根直径为 1 mm 的硬质合金丝穿过双孔陶瓷管制成,离子感应端伸出陶瓷管约 3 mm,两丝间距小于 0.5 mm.输出端通过屏蔽线接到信号放大器.

2.1.3 试验工况

常温,常压,燃料为汽油,空气为氧化剂,油气比为 1 左右,地面冲压进气,根据工作频率调节风机出口总压,为了测得不同工况下的点火延迟时间,取 PDE 工作频率 $f = 10 \sim 50$ Hz 进行试验.

2.2 电磁阀性能研究试验设备、测试仪器、试验件及工况

供油电磁阀工作性能研究试验设备及测试仪器如图 2 所示.

试验选用高频电磁阀,型号 HSV-305055,最大的工作频率为 100 Hz.通过控制器设定参数 $\Delta \tau$ 控制一个周期停止供油的时间.电磁阀前安装压力表,以保证给定的供油压力.靠近电磁阀的下游安装 PCB 动态压力传感器.试验通过供油压力特征曲线对不同频率下电磁阀的工作特性进行研究.

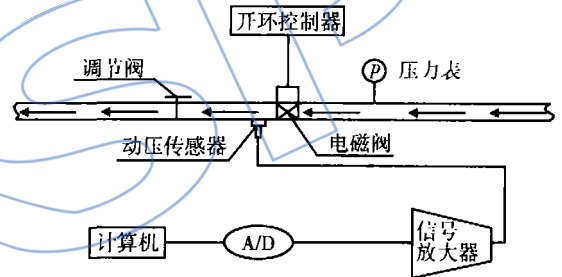


图 2 电磁阀性能研究系统图

Fig. 2 Sketch map of research system of solenoid valve performance

3 试验结果及讨论

3.1 点火延迟时间的测定

3.1.1 典型点火延迟时间及爆震波压力特性

以频率 $f = 40$ Hz 为例,爆震管内压力信号与离子传感器导通信号同步测得,典型点火延迟时间及爆震波压力特性如图 3 所示:

图 3 为 PDE 多循环工作测得的压力曲线和离子探针信号曲线.可以看出,在 PDE 每一次工作循环过程中,点火器通电后,都有一个脉冲信号被传感器捕捉到,如图 4 中点 1 处所示,对应的时刻记为 t_1 ,点 2 处表示电嘴附近混气着火,产生大量离子,离子探针导通,曲线斜率最大,信号输出电压随着离子浓度的增加而迅速下降,点 2 对应的 t_2 时刻混气经过感应期后着火,点 3 为爆震管内压力迅速升高,形成爆震波对应的时刻,记为 t_3 .混气的点火延迟时间为 $t_2 - t_1$,记为 $\Delta \tau_{\text{点}}$;缓燃

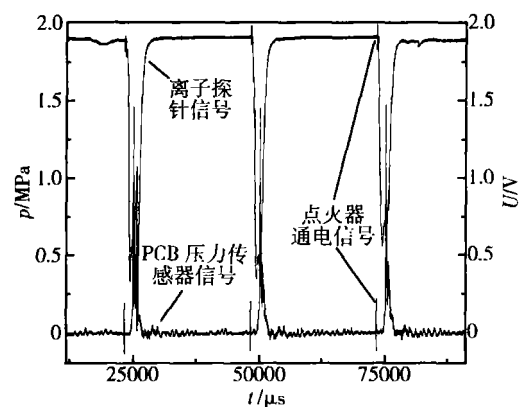


图 3 压力/时间和电压/时间曲线

Fig. 3 Pressure/ time and voltage/ time curve

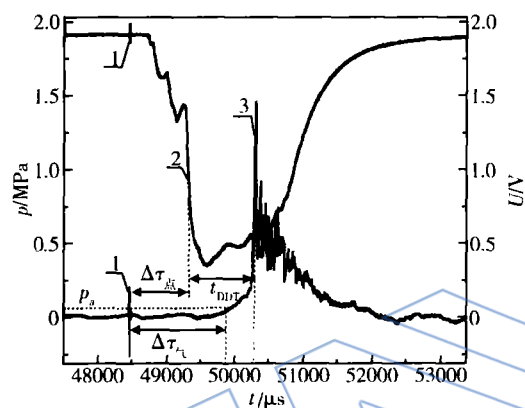


图 4 图 3 局部放大图

Fig. 4 Magnify of part of Fig. 3

向爆震转变,所需进间为 $t_3 - t_2$ 记为 t_{DDT} . 气动阀关闭过程所需时间如图 4 中 $\Delta\tau_{\text{气}}$ 所示, t_{DDT} 的测定对 PDE 一定周期内的时间分配提供了一定的依据.

3.1.2 不同工作频率下 $\Delta\tau_{\text{点}}$, t_{DDT} , $\Delta\tau_{\text{气}}$ 的测定

试验在不同的工作频率下,对 $\Delta\tau_{\text{点}}$, t_{DDT} , $\Delta\tau_{\text{气}}$ 进行测量,所有结果都是在 PDE 稳定的间歇工作时测得,且对于一定的频率进行多次重复试验,测得数据为多次测量的平均值. 见表 1:

表 1 不同工作频率下 $\Delta\tau_{\text{点}}$, t_{DDT} , $\Delta\tau_{\text{气}}$

Table 1 Data of experiment at different frequency

测试参数	多次试验所得的平均值								
频率 f/Hz	10	20	25	30	35	40	45	50	
$\Delta\tau_{\text{点}}/\text{ms}$	4.5	4.2	4.0	3.8	3.6	3.5	3.3	3.0	
t_{DDT}/ms	3.8	3.7	3.4	3.3	3.1	3.0	3.2	3.1	
$\Delta\tau_{\text{气}}/\text{ms}$	6.4	6.0	5.4	5.1	5.0	5.0	4.9	4.9	

由于高频工作时, 供油电磁阀工作规律紊乱, 因此上表中频率 20 Hz 以上的数值为采用自适应

供油^[10]测得的结果. 从上表我们可以看出,不同工作频率下, PDE 的点火延迟时间值在 3.0~4.5 ms 之间. 缓燃向爆震转捩时间在 3.0~3.8 ms 之间. 随着 PDE 工作频率的提高, $\Delta\tau_{\text{点}}$ 和 t_{DDT} 都呈下降趋势, 气动阀关闭所需要的时间可以从爆震管内压力曲线得到, 关闭在点火器通电后的 4.9~6.4 ms, 关闭过程所需时间随着 PDE 工作频率的提高逐渐缩短.

两相混气爆震燃烧是一个复杂的物理化学过程, 可爆混气形成包括燃油雾化、蒸发和掺混. 试验测得的 $\Delta\tau_{\text{点}}$ 、 t_{DDT} 、 $\Delta\tau_{\text{气}}$ 随着 PDE 工作频率提高, 逐渐减小是因为: PDE 频率提高是以混气充填速度提高为前提的, 气动阀和气动雾化喷嘴的一体化设计^[9]在进气速度提高后可以改善了燃油的雾化, 合理的在爆震管内设置掺混及扰流装置在气流速度提高后可以促进均匀混气的形成. 而且随着 PDE 工作频率的提高, 爆震管及其内部试验件的壁温升高, 带有燃料液滴的混气可以借助上循环的热量强化蒸发. 随着进气速度的提高, 电嘴附近局部速度和紊流强度提高, 对点火不利, 但可以通过半“V”型改善点火装置提高点火的可靠性.

3.2 电磁阀特性研究

3.2.1 典型电磁阀工作特性分析

周期 $T = 200\text{ ms}$ 典型电磁阀工作特性分析如下:

电磁阀在 PDE 的每个工作周期内都要经历一个开和关的过程, 下游的油压随着电磁阀的动作而周期性的变化, 在电磁阀影响下, 供油压力随时间的变化如图 5 所示:

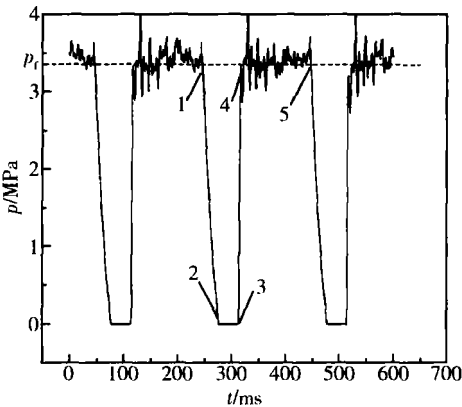


图 5 典型的电磁阀下游油压特征曲线

Fig. 5 Representative pressure curve at solenoid valve backward position

以周期 T 为 200 ms, $\Delta\tau$ 设定为 60 ms 的电磁阀供油特征曲线为例. 点 1、点 2 在 T 轴上投影的

距离为:关延迟时间 $\Delta\tau_c$;点 2、点 3 在 T 轴上投影的距离为:全关时间 $\Delta\tau_{\text{实际}}$;点 3、点 4 在 T 轴上投影的距离为:开延迟时间 $\Delta\tau_o$;点 4、点 5 在 T 轴上投影的距离为:全开时间.由图 5 可知,电磁阀通电或断电后立刻开始动作,但关闭和开启都存在延迟时间;从电磁阀通电到断电的 $\Delta\tau$ 时间内,油压从

p_c 下降到 0,又从 0 上升到 p_c .一个周期内 $\Delta\tau$ 的设置,使得电磁阀存在全开时间和全关时间.

3.2.2 电磁阀工作特性试验结果

PDE 工作周期改变条件下,设定停止供油时间 $\Delta\tau_c$,电磁阀关、开延迟时间 $\Delta\tau_c/\Delta\tau_o$ 、实际全开时间、实际全关 $\Delta\tau_{\text{实际}}$ 时间见表 2:

表 2 电磁阀不同工况下相关参数测量
Table 2 Parameter measurement of solenoid valve at different operation condition

参数	设定的周期 T 得到的试验数据					
	$T = 200\text{ ms}$	$T = 100\text{ ms}$	$T = 50\text{ ms}$	$T = 40\text{ ms}$	$T = 34\text{ ms}$	$T = 25\text{ ms}$
$\Delta\tau_{\text{设定}}/\text{ms}$	60	30	15	12	10	8
$(\Delta\tau_c/\Delta\tau_o)/\text{ms}$	3.5/2.3	3.4/2.4	3.3/2.4	3.4/2.5	3.2/2.6	3.4/2.4
电磁阀实际全开时间/ ms	129	60.8	23.1	16.3	12.4	趋于零
$\Delta\tau_{\text{实际}}/\text{ms}$	65.2	33.4	21.2	17.8	15.8	19.1

由表 2 数据可知,实际的电磁阀关闭时间比设定的关闭时间长,通过公式 $(\Delta\tau_{\text{实际}} - \Delta\tau_{\text{设定}})/\Delta\tau_{\text{设定}} \times 100\%$ 可以得到:电磁阀关闭误差随着周期的缩短以及设定关闭时间的缩短呈增加趋势,当 $T = 200\text{ ms}$ 时,误差为 8.7%, $T = 100\text{ ms}$ 时,误差为 11.3%,在这两种情况下,PDE 可以正常工作,当周期缩短到 50 ms 以后,随着误差的增大,PDE 不能正常工作,需要采用自适应供油.

4 结 论

(1) 利用离子传感器成功测得以液态汽油为燃料的两相 PDE 点火延迟时间约为 3.0~4.5 ms,DTT 时间约为 3.0~3.8 ms,气动阀关闭滞后点火信号发出 4.9~6.4 ms;

(2) 通过动态压力传感器测得供油电磁阀开、关延迟分别为 2.4 ms 和 3.4 ms,发现当 PDE 频率大于 20 Hz 时,电磁阀不能按设定的时间参数工作,PDE 需采用自适应控制供油;

(3) 几个重要的延迟时间测定,对 PDE 工作过程中的时间控制及协调工作提供了参考依据.

参考文献:

[1] Goracke D B,Levack D J H. Tripropellant engine drive cycle considerations for the SSTO application[R]. AIAA95-2950.

[2] Manski D,Goertz C,Sassnick H,et al. Cycles for earth-to-orbit propulsion[J]. Journal of Propulsion and Power. 1998, 14(5):588-604.

[3] Colasurdo G, Pastrone D,Casalino L. Optimal performance of a dual-fuel single-stage rocket[J]. Journal of Spacecraft

and Rockets,1998,35(5):667-671.

[4] Chao T W, Wintenberger E, Shepherd J E. On the design of pulse detonation engines[R]. GALCIT Report FM00-7, 2001.

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

[6] Kentfield J A C. The potential of valveless pulsejets for small UAV propulsion applications[R]. AIAA 98-3879

[7] Cooper M, Jackson S, shepherd J E. Effect of deflagration-to-detonation transition on pulse detonation engine impulse [R]. CALCIT Report FM00-3, 2000.

[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 working process of pulse detonation engine (PDE)[J]. Journal of Propulsion Technology,2004, 25(6):538-542.

[9] 张义宁,王家骅,张靖周. 频率 30~50 Hz 两相脉冲爆震发动机研究. 航空学报 2006,27(6):993-997.

ZHANG Yining, WANG Jiahua, ZHANG Jingzhou, In-vestigation on two phase pulse detonation engine at the frequency 30~50 Hz[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2006,27(6):993-997.

[10] 范育新,王家骅,李建中,等. 脉冲爆震发动机供油自适应控制优化设计研究[J]. 推进技术,2005,26(1):62-67.

FAN Yuxin, WANG Jiahua, LI Jianzhong, et al. Mechan-ism of fuel self-fit control in pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology,2005,26(1):62-67.

[11] 张义宁,王家骅,张靖周. 两相多循环爆震波特性研究[J]. 航空动力学报,2006,21(5):789-794.

ZHANG Yining, WANG Jiahua, ZHANG Jingzhou. In-vestigation on two-phase and multi-cycle detonation[J]. Journal of Aerospace Power,2006,21(5):789-794.