

脉冲爆震发动机供油自适应控制优化设计^{*}

范育新, 王家骅, 李建中, 张义宁, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 研究了带气动阀 PDE 的供油自适应控制优化设计, 通过在油管中设置单向阀和通过油管自身 (无单向阀), 成功实现 PDE 的供油自适应控制, 在爆震管直径为 180mm, 长度为 2m, 管内流速为 25m/s 的 PDE 中, 可以产生稳定的爆震波, 并获得 2MPa 以上的压力和 1500N 以上的峰值推力。通过对不同油管长度、不同工作频率的压力、推力曲线对比研究, 分析了供油自适应控制的机理, 及供油相对进气滞后时间的长短对 PDE 工作的影响。

关键词: 脉冲爆震发动机⁺; 自适应控制; 气动阀; 供油滞后⁺

中图分类号: V235.22 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2005) 01-0062-06

Mechanism of fuel self-fit control in pulse detonation engine

FAN Yu-xin, WANG Jia-hua, LI Jian-zhong, ZHANG Yi-ning, ZHANG Jing-zhou

(Coll. of Energy and Power, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract The principle of optimized fuel self-fit control in pulse detonation engine with aerovale was investigated. By setting a one-way valve (or without the one-way valve) in the fuel pipe, and adjusting the distance between one-way valve and atomizer (or between supply throttle and atomizer), optimized fuel self-fit control of the PDE was achieved. Successive detonation was obtained with peak value exceeding 2 MPa and 1500N for pressure and net thrust curve respectively in a 180mm diameter and 2m long PDE in which the flow velocity is 25m/s. Based on analysis of variational curves of pressure and thrust with different fuel pipe length and PDE working frequency, the mechanism of fuel self-fit control was studied, and the vital influence of the fuel supply delayed time relative to air entrance to PDE working is discussed.

Key words Pulse detonation engine⁺; Adaptive control; Pneumatic valve; Fuel supply delay⁺

1 引 言

脉冲爆震发动机 (PDE) 是一种利用脉冲爆震波产生的高温、高压燃气来产生推力的新概念发动机。为提高 PDE 的应用前景, 目前国外已有许多关于燃用液体燃料的 PDE 研究工作进行, 如美国海军研究生院最早开始了这方面的研究, 在关于液体燃料的 PDE 性能分析^[1,2]和液雾直径大小对爆震波形成的影响^[3,4]等方面都取得了成就。但如何控制燃油的供给, 使之满足 PDE 的工作过程的研究未见有报道。

在 Brophy 等人的研究中, 燃油的供给都采用电磁阀控制, 通过控制器来设定电磁阀的工作频率, 控制供油时间和供油与点火的延迟时间, 以满足 PDE 的协调工作^[5,6]。由于时间匹配是事先设计好的, 所

以只适用于单工况工作, 且需要一套控制系统。

PDE 供油自适应控制就是利用 PDE 爆震管内的反压, 和喷嘴至单向阀的油管长度, 来控制每个工作循环内的供油, 以保证 PDE 协调工作。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。

PDE 供油自适应控制研究未见报道, 但国内外脉动发动机 (PE) 却广泛采用供油自适应控制^[7,8], 但两者有很大区别。PE 是负压进气, 供油压力很低 (靠油箱油位高度供油), 其供油、停止进油和供气、停止进气基本同步。而 PDE 为常压或正压进气, 供油压力高 (为了改善燃油雾化使爆震波容易产生), 因此, 为保证供油滞后于供气一定时间, 必须采取相应措施。

^{*} 收稿日期: 2004-04-16 修订日期: 2004-08-26

作者简介: 范育新 (1967-), 女, 高级工程师, 博士生, 研究领域为燃烧学。E-mail: fanyuxin@tom.com

本文研究 PDE 供油自适应控制, 利用单向阀和单向阀与喷嘴间距离, 或利用一定长度的油管本身控制供油, 使 PDE 正常工作。对研制小推力 PDE 有较大参考价值。

2 带气动阀 PDE 自适应控制机理

带气动阀 PDE 的工作过程分为进气、点火燃烧并产生爆震波、爆震波的传播、燃气的膨胀并排出这几个过程。PDE 工作频率由点火频率控制, 间歇进气由工作时燃烧室内压力控制^[9]。由于油压远比进气压力大, 如图 1 所示, a 点处推力壁附近燃气压力等于供油压力 p_b , 就开始供油, 而 b 点推力壁附近燃气压力等于进气压力 p_m , 开始进气。为了使 PDE 工作过程协调, 要采取措施使供油比供气滞后, 即应在 $\tau = \tau_d$ 时刻供油, $\Delta\tau_{bd}$ 为隔离段时间, $\Delta\tau_{ad}$ 为供油滞后时间。

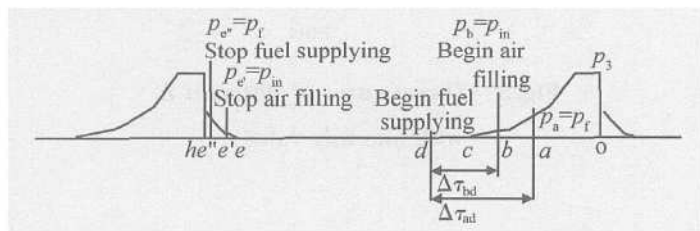


Fig 1 Model of self-aligned control PDE with aerovalve

如果点火器通电后, 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, 而供油压力远大于大气压, 因此供油关闭会迟于进气关闭, 即如图 1 所示, e 为点火时间, e' 为停止进气, e'' 为停止供油时间, $P_{e''} > P_f$ 时, 供油停止。 e'' 点落后于 e' 点。

油压越高, 供油比进气提前越多, 同时点火后停止供油越晚。提前供油使在燃气膨胀过程中供油, 不但会使 PDE 油耗增加, 还会干扰 PDE 正常工作。PDE 可以通过两种方法, 即利用油管中单向阀和油管本身(无单向阀), 实现供油自适应控制。

PDE 工作时, 在燃气膨胀阶段, 推力壁附近燃气压力 P_g 下降, 当燃气压力小于供油压力 P_f 时, 压力波经过喷嘴向油管上游传播, 经过 L/C_e 时间 (C_e 为液体中声速, 本文取 1 km/s) 传至单向阀并打开。单向阀打开后, 又经过 L/C_e 时间, 燃油压力波传至喷嘴开始供油, 因此, 推力壁附近燃气压力 $P_g \leq P_f$ 时, 经过 $2L/C_e$ 的时间滞后开始供油。

利用单向阀至喷嘴油管长度 L_1 , 控制供油滞后, 保证形成隔离段, 使新鲜混气和上循环高温燃气隔离, 防止混气和燃气直接接触产生自燃。

由于单向阀运动元件存在惯性, 单向阀打开和关闭存在滞后时间 $\Delta\tau_{delay}$, 因此, 实际供油滞后时间 $\Delta\tau_{bd} = 2L_1/C_e + \Delta\tau_{delay}$, 但由于 $\Delta\tau_{delay}$ 的确定比较困难, 在阀门频响较高时 ($< 3\text{ ms}$), 对供油延迟时间影响不大, 本文暂不考虑 $\Delta\tau_{delay}$ 的影响。

若不用单向阀, 则通过控制进油阀和喷嘴间距离 L_2 来控制供油滞后。

3 试验设备、测试仪器、试验件、工况

试验设备及测试系统如图 2 所示。

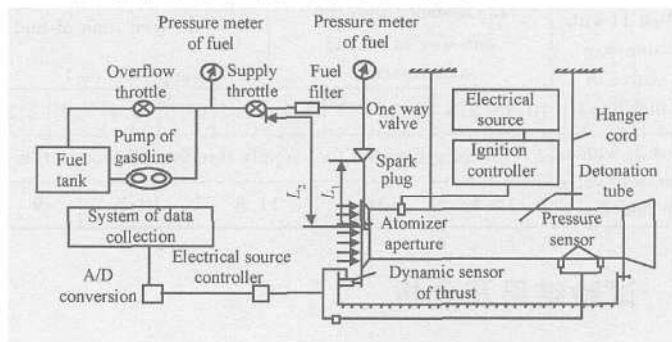


Fig 2 Scheme of multi-cycle PDE testing apparatus and system

3.1 试验设备

(1) PDE 采用悬挂式系统, 模拟冲压进气, 气源为鼓风机, 压头 950 mm 水柱, 流量 $= 1.5\text{ kg/s}$

(2) 供油采用汽油泵 (D10ILCN SFEHA), 压力可达 6.9 MPa 最大流量为 200 g/s 左右;

(3) 点火用高能、高频、可控点火器, 点火能量 1 J

(4) 喷嘴用涡喷 7 主燃烧室喷嘴。

3.2 测试仪器

(1) 推力由 PCB 动态推力传感器 (200B05) 及其系统组成;

(2) 动态压力用 PCB 压力传感器 (M113A26 SN12910), 在引出管上测量, 传感器头部加一段润滑油并外加冷却水套保护, 并进行读数校准;

(3) 计算机数据采集系统。

3.3 试验件

试验件为直径 180 mm , 长度 2 m 的 PDE, 安装径向双旋流气动阀, 强化燃烧装置, 扩张形喷管, 如图 3 所示。

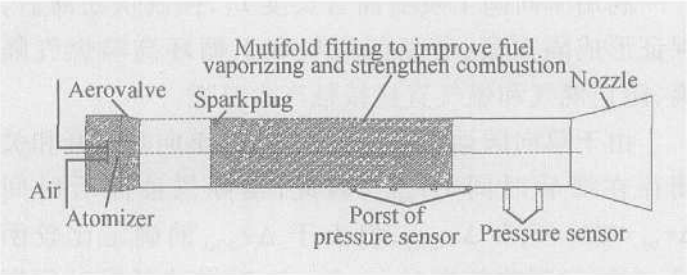


Fig 3 Structure of testing PDE

3 4 工况

常温、常压，PDE 管内气流速度为 25m/s 左右，试验中油管长度变化见表 1。

Table 1 Test condition of optimum-fuel-control												
Test 1 (with oneway valve in fuel line)	L_1 (distance between oneway valve and atom izer/m)						$\frac{2L_1}{C_e}$ (delayed time of fuel supplying /m s)					
	10	75	8	8	6	2	3	7	1	1	21	5
Test 2 (w ithout oneway valve in fuel line)	L_2 (distance between fuel supply throttle and atom izer/m)											
	16			5			14			11		
	8			10			7			9		

4 试验结果及分析

4 1 装单向阀自适应控制

距单向阀不同油管长度的 PDE 管内压力、推力随时间变化曲线如图 4 图 5 所示，压力测点距推力壁距离 (L_c) 为 1.54m。

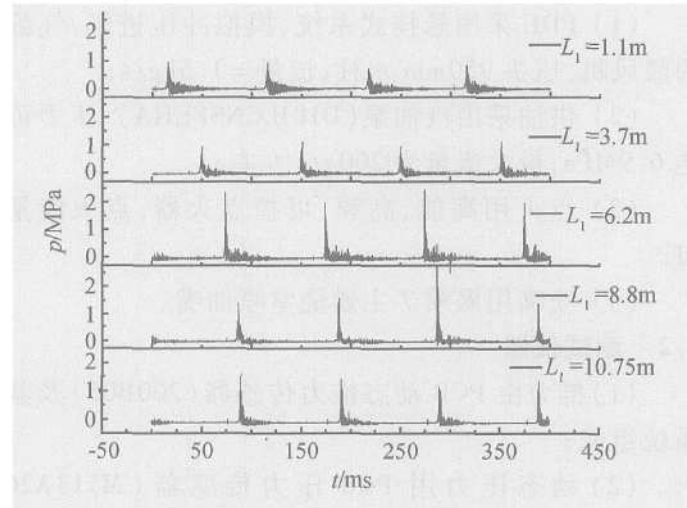


Fig 4 Pressure curve of different L_1
(with one way valve)

4 1 1 改变油管长度对压力的影响

由表 1 可知，油管长度 L_1 从 10.75m 降到 1.1m 时，相应的从油管感知供油信号（即油管出口处燃气压力小于供油压力 P_f ）到喷嘴开始喷油的滞后时间

由 21.5ms 降至 2.2ms，其压力峰值经历了先升高后降低的过程（图 6），在 $L_1 = 6.2m$ 时，压力曲线峰值最高达 2~2.5MPa 形成充分发展的爆震波（图 4）。此时混气已基本充满整个爆震管，并且有一段隔离段，即供油发生在进气之后，与 PDE 的各工作过程相适应。

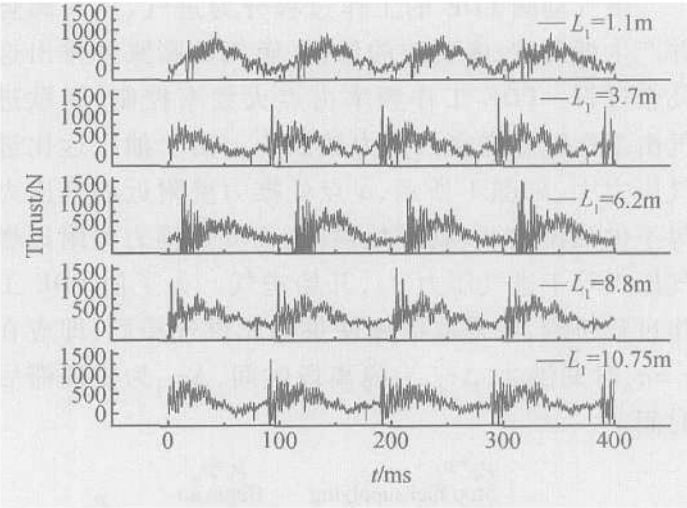


Fig 5 Thrust curve of different L_1
(with one way valve)

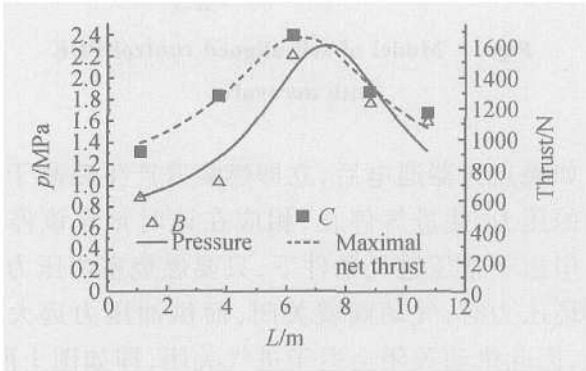


Fig 6 Maximal pressure and thrust
change with fuel pipe length

增加油管长度 L_1 ，使供油时间滞后加长，也即进纯空气的时间加长，进油的时间缩短，使混气充填长度 L_{ch} 缩短，出现以下三种情况：

(1) $L_{ch} > L_c > L_{DDT}$ ：并不影响爆震波的形成，理论上爆震波的压力峰值也应差不多。 L_{DDT} 是指 PDE 的 DDT 距离。但由于本文采用的是气、液两相爆震，燃油的雾化、掺混和蒸发都对爆震波的形成产生影响。当进油时间缩短时，由于较多的冷空气对壁温的降低作用影响燃油的蒸发，对爆震波的形成不利，使得在油管长度 $L_1 = 8.8m$ 和 $10.75m$ 时，虽满足能测到爆震波的条件，但爆震波压力随 L_1 的增加逐渐降低，并

有波峰不稳定现象。在图 4 中油管长度 $L_1 = 8.8\text{m}$ 和 10.75m 时就属此情况。

(2) $L_{\text{ch}} < L_{\text{DDT}}$: 若进油的时间进一步缩短, 使混气充填长度小于 DDT 距离时, 就不能形成爆震波, 此时测得的压力只是压缩波的压力。

(3) $L_{\text{DDT}} < L_{\text{ch}} < L_c$: 混气充填长度虽大于 DDT 距离, 能形成爆震波, 但由于混气充填段长度小于压力测点位置, 爆震波传播到纯空气中时, 燃烧波与激波分离, 激波得不到能量补充, 强度下降, 测得的也非爆震波, 而是压力较低的激波。

当 L_1 从 6.2m 开始缩短时, 从图 4 上看到压力波峰值很快降低。在 $L_1 = 1.1\text{m}$ 时, 测得的压力波已不是爆震波, 但还存在一个与点火信号一致的工作频率。

这是由于随着 L_1 缩短, 进油时间的提前, 隔离空气段缩短, 直至完全没有, 使下一个循环进入 PDE 内的空气和燃油边掺混边蒸发边直接与上一个循环的热燃气接触, 并向下游运动, 经过一段点火的滞后时间, 在 PDE 的下游某个区域, 直接与燃气接触的混气首先被点燃, 虽点燃但气动阀出口处反压低, 仍处于充填阶段的混气具有向下游运动的速度, 火焰面向上游传播较慢。直到点火器点火, 又在推力壁附近点燃 PDE 头部的混气, 此时头部压力很快升高, 气动阀关闭, 空气和燃油相继停止供给, 头部火焰面才向两边传播, 下游火焰也很快向头部传播并烧掉一部分混气, 使得头部火焰在新鲜混气中运动的距离大为缩短, 没有足够的能量形成爆震波, 只能形成压力较低的压缩波。头部火焰起主要作用, 测得的压力是头部和下游两部分火焰共同作用的压力, 而工作频率由点火频率决定。

4.1.2 改变油管长度对推力的影响

图 5 是不同油管长度下的推力曲线。由图 6 看到随着油管长度 L_1 从 10.75m 缩短到 1.1m , 推力曲线的峰值也经历了先升高再降低的过程, 峰值最大值 1500N 发生在 $L_1 = 6.2\text{m}$ 时。推力曲线与压力曲线相比有以下三个特点: (1) 最大推力和最大压力相对应, 当压力曲线的峰值较高时, 推力曲线也较高; (2) 推力曲线中存在推力的时间范围大, 在一部分的进气过程中仍有推力; (3) 测得的最大推力远小于理论值, 而推力曲线的平均值与扣除负推力后的理论计算值 (按压力曲线积分计算出) 基本相等。其中, (2), (3) 点都是由于发动机的惯性造成的^{[10][11]}。

4.2 利用油管本身的供油自适应控制

利用油管本身的供油自适应控制的压力、推力随油管至喷嘴的距离变化曲线如图 7~9 所示。图 7, 图 8 是点火周期为 100ms 、 200ms 不同 L_2 的压力变化曲线, 图 9 是 $L_2 = 6\text{m}$ 时点火周期为 100ms 和 200ms 的推力对比曲线。

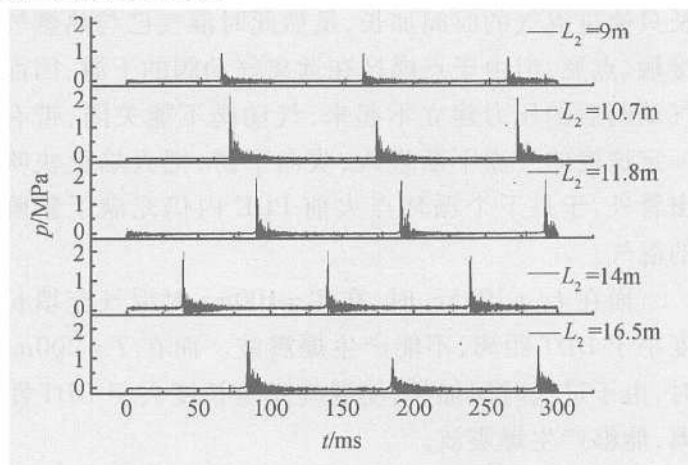


Fig 7 Pressure curve of different L_2
(without one way valve $T = 100\text{ms}$)

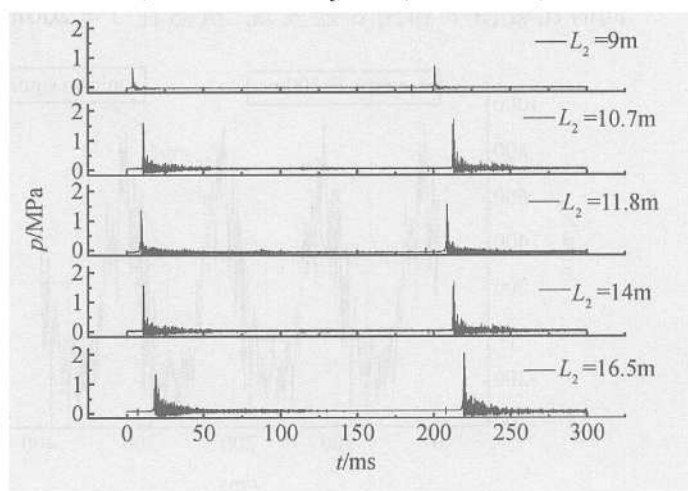


Fig 8 Pressure curve of different L_2
(without one way valve $T = 200\text{ms}$)

4.2.1 不同工作频率压力变化分析

改变油管长度 L_2 , 压力曲线的变化与带单向阀的自适应控制一致。

当油管长度 L_2 不变而频率改变, 比较图 7 和图 8 点火周期为 200ms 的 PDE 工作优于点火周期 100ms 的。

在点火周期 $T = 100\text{ms}$ 时, $L_2 = 6\text{m}$ 和 8m 的压力波峰值最高, 而且工作稳定, 随着油管长度的增加和缩短, 爆震波的压力峰值降低且不稳定。而在点火周期为 $T = 200\text{ms}$ 时, 在油管长度 $L_2 = 4.7 \sim 10.5\text{m}$,

PDE 都能产生连续稳定的爆震波。

当油管长度缩短到 4.7m 时,在 $T = 100\text{ms}$ 时不能产生稳定爆震波却在 $T = 200\text{ms}$ 时仍能稳定爆震,原因在于 $T = 100\text{ms}$ 时 PDE 内混气已与热燃气接触被点燃,因而不能形成爆震波;而在 $T = 200\text{ms}$ 时,由于在 PDE 结构和进气条件不变的情况下,周期的加长只使进混气的时间加长,虽然此时混气已与热燃气接触、点燃,但由于点燃区在远离气动阀的下游,因而气动阀后的压力建立不起来,气动阀不能关闭,带有一定速度的气流不断进入,吹向下游,把火焰很快吹出管外,于是下个循环点火前 PDE 内仍充满了新鲜的混气。

而在 $L_2 = 10.5\text{m}$ 时,在 $T = 100\text{ms}$ 时混气充填长度小于 DDT 距离,不能产生爆震波。而在 $T = 200\text{ms}$ 时,由于进气时间加长,使混气充填长度大于 DDT 距离,能够产生爆震波。

由上述分析可知,提高工作频率后要使 PDE 正常工作,对供油的控制要求提高了。

同时比较图 7 和图 8 还发现,虽然在 $T = 200\text{ms}$

时稳定工作的范围大于 $T = 100\text{ms}$ 但一旦产生了爆震波, $T = 100\text{ms}$ 时的压力峰值高于 $T = 200\text{ms}$ 时的。分析认为这是由于频率提高后壁面温度升高,对燃油的蒸发有利,形成的油雾更细,使爆震波更强。

4.2.2 不同工作频率推力变化分析

改变油管长度 L_2 , 推力曲线的变化也与带单向阀的自适应控制一致。

从图 9 看到,改变工作周期后推力曲线发生变化。 $T = 100\text{ms}$ 的推力图上一个周期内一个波峰,而 $T = 200\text{ms}$ 的推力图上一个周期内有两个波峰,且两个波峰的最大值小于 $T = 100\text{ms}$ 时的波峰值。分析认为较大的波峰是由爆震波产生的,而较小的波峰是由于 $T = 200\text{ms}$ 时混气过度充填,在进气过程中,混气经过 PDE 内热部件的加热后膨胀排出管外,产生了额外的推力,而用于形成爆震波的那部分混气,由于后进入 PDE 内,此时壁温已降低,燃油的蒸发作用下降,使爆震波峰值降低,因而其相应的最大推力也减小。

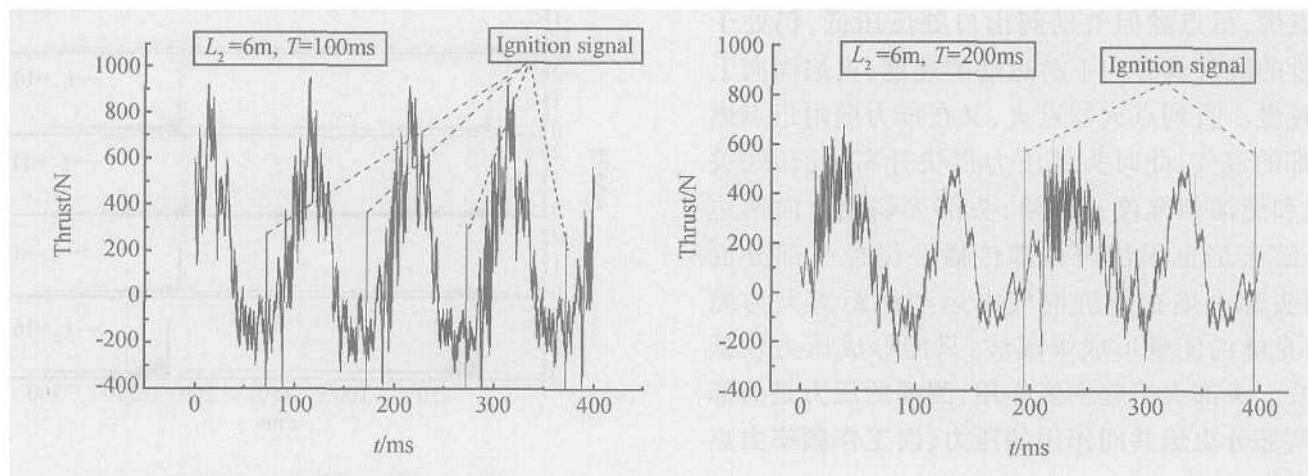


Fig 9 Thrust curve of different frequency at same fuel pipe length

5 结 论

(1) 利用单向阀和油管自身可以在 PDE 工作中实现供油自适应控制,只要控制好供油滞后于进空气的时间,就能形成稳定的爆震波。通过调节油管长度可以获得 2MPa 以上的爆震波压力和 1500N 以上的瞬时最大净推力。

(2) 由于热的壁面作用,混气在 PDE 管内的充填距离加长对爆震波的形成有利,而空气隔离段的长度则影响爆震波的形成。

(3) 爆震波压力信号变化与推力信号相对应,但

推力由于 PDE 质量的惯性作用,会比压力信号有滞后。过度充填混气虽能在进气阶段产生额外推力,但会降低 PDE 的瞬时最大推力和平均推力。

参考文献:

- [1] Brophy CM, Sinibaldi JO, Netzer DW. Operation of a JP-10/air pulse detonation engine[R]. AIAA 2000-3591.
- [2] Akbar R, Thibault P A, Harris P G, et al Detonation properties of unsensitized and JP-10 and Jet-A fuels in air for pulse detonation engines[R]. AIAA 2000-3592.
- [3] Brophy CM, Netzer DW, Forster D. Detonation studies of JP-10 with oxygen and air for pulse detonation engine

- development[R]. *AAA* 98- 4003
- [4] Lasheras J Varatharajan B Varga C, et al Studies of fuel distribution and detonation chemistry for pulse detonation engines[R]. *ISABE - 2001 - 1174 Bangalore, India, 2001*
- [5] Hofstedt T A. Propagation of a two-phase detonation across a geometric diffraction with compositional discontinuity [D]. *ADA 381096*
- [6] Forster D L. Evaluation of a liquid-fueled pulse detonation engine combustor[D]. *ADA 359179*
- [7] 程显辰. 脉动燃烧 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994
- [8] Lockwood R M. Patterson W G. Summary report on investigation of miniature valveless pulsejets[R]. *Published as Hiller aircraft company report NO. ARD - 307*
- [9] 范育新, 王家骅, 李建中, 等. 脉冲爆震发动机 (PDE) 工作过程控制和协调试验 [J]. 推进技术, 2004, 25(6). (FAN Yu-xin, WANG Jia-hua, LI Jian-zhong et al Experimental investigation on working process of pulse detonation engine(PDE) [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(6).)
- [10] 郑殿峰, 王家骅, 王波, 等. 脉冲爆震发动机气动阀阻力特性 [J]. 推进技术, 2004, 25(2). (ZHENG Dian-feng, WANG Jia-hua, WANG Bo et al Resistance characteristic of aerovalve of pulse detonation engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(2).)
- [11] 李建中, 王家骅, 范育新, 等. 多循环脉冲爆震发动机净推力估算 [J]. 推进技术, 2004, 25(3). (LI Jian-zhong, WANG Jia-hua, FAN Yu-xin et al Net thrust prediction of multicycle pulse detonation engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(3).)

(编辑: 梅 瑛)

(上接第 61 页)

学规划领域最新的研究成果, 今后应进一步开展关于计算效率方面的研究以提高控制算法的实时性。

参考文献:

- [1] Comparison of multivariable control design techniques for a turbofan engine control[R]. *NASA-TM-107060* 1996
- [2] 孙健国. 面向 21 世纪的航空动力控制展望 [J]. 航空动力学报, 2001, 16(2).
- [3] 樊丁, 赵庆荣. 航空发动机全程滑态变结构控制研究 [J]. 推进技术, 2002, 23(6). (FAN Ding, ZHAO Qing-rong Application of global variable structure control method in aeroengine control system[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(6).)
- [4] 吴沧浦. 最优控制的理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [5] Christof B. skens, Hehnut Mauner. SQP methods for solving optimal control problems with control and state constraints adjoint variables sensitivity analysis and real-time control[J]. *Journal of computational and applied mathematics* 2000 120(1).
- [6] Ravindran S S. Optimal control of solid fuel ignition model using SQP method[C]. *41st IEEE conference on decision and control* 2002, 3, 3288~ 3293
- [7] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] Boggs P T, Tolle J W. Sequential quadratic programming [J]. *Acta Numerica*, 1995, 45, 1~ 51
- [9] Lawrence C T, Tits A L. A computationally efficient feasible sequential quadratic programming algorithm [J]. *SIAM J. OPTM.*, 2001, 11(4).
- [10] 胡毓达. 实用多目标最优化 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990

(编辑: 梅 瑛)