

多循环脉冲爆震发动机净推力估算^{*}

李建中, 王家骅, 范育新, 张靖国

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 为了研究试车台上脉冲爆震发动机(PDE)净推力的估算方法,在常温常压条件下,进行了大量的多循环爆震试验,在内径为150mm,长度为1800mm的爆震管中,成功地产生充分发展的爆震波。采用了动态和稳态推力计分别测量试车台上PDE的净推力及气动阀开和关时PDE的阻力,建立了试车台上PDE净推力的近似计算模型,同时研究了PDE净推力的主要影响因素。试验结果表明,PDE阻力与模拟飞行速度(或爆震室充填速度)有关;直接测量到的发动机推力与利用模型计算的净推力基本一致。研究结果对工程应用的PDE的优化设计,深入研究具有重要的参考价值。

关键词: 脉冲爆震发动机⁺; 阻力; 推力; 气动阀

中图分类号: V235.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2004)03-0241-05

Net thrust prediction of multi-cycle pulse detonation engine

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

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

Abstract: Investigation on net thrust of multi cycle pulse detonation engine (PDE) with a detonation tube which has inner diameter of 150mm and length of 1800mm, filling liquid gasoline and air into the tube as detonable mixture by aeror valve, was performed. Through a number of tests initially at ambient conditions ($T_1 = 300\text{K}$ and $p_1 = 100\text{kPa}$), fully developed repetitive detonation waves were produced. The net thrust of PDE was obtained by integration of the record of instantaneous thrust by direct measurements. A steady static load cell was used to measure respectively the drag thrust during the periods of close and of open aeror valve. An approximate mathematic model for net thrust of PDE was formulated. Experimental results show that the drag thrust depends on flight speed (or filling speed). The net thrust measured directly agrees well with the calculated result. The conclusion will help to optimize the design of practical PDE.

Key words: Pulse detonation engine⁺; Drag; Thrust; Pneumatic valve

1 引 言

脉冲爆震发动机(PDE)是利用间歇爆震燃烧形成充分发展的脉冲爆震波产生推力的一种新概念发动机。推力的直接测量是工程化PDE重要关键技术之一,近年来国内外专家开展了大量的研究。Wintenberger E^[1]等研究了单循环PDE的推力分析模型,详述了不同初始条件下,不同油气比,不同燃料的可爆混气爆震产生的推力,但是没有考虑到进气装置、扰流装置,喷管及多循环工作等因素对PDE产生推

力的影响。Cooper M^[2]等研究了爆震和爆燃工作过程的直接推力测量方法,利用钟摆原理成功地直接测量了单循环爆震的推力,但是发动机模型仍旧是理想模型,未考虑入口损失,管内可爆混合物不均匀等实际的因素的影响。何立明^[3]等在分析爆震燃烧基本特性和PDE工作原理的基础上,建立了确定PDE推力的计算方法,在爆震管封闭端切向高压进气,没有考虑阀系等部件阻力。本次试验主要研究更接近于工程应用的PDE的净推力计算方法,进气装置采用双旋流气动阀,在常温常压条件下,模拟飞行进气,发

^{*} 收稿日期: 2003-06-13; 修订日期: 2003-11-10。

作者简介: 李建中(1979—),男,博士生,研究领域为燃烧学。E-mail: ljzh0629@yahoo.com.cn

动机内部装有强化燃烧装置, 喷管采用收敛-扩张喷管, 通过大量试验总结出试车台上 PDE 净推力的近似估算方法。研究成果对 PDE 的研制, 技术发展有一定的参考价值。

2 PDE 的净推力计算方法

2.1 PDE 工作过程的时间分配

单次爆震的工作过程包括: 可爆混气充填爆震室时间, 爆燃向爆震转变时间, 爆震波在爆震室传播时间, 膨胀排气时间和注入缓冲气形成隔离层时间。

$$T_{\text{cycle}} = t_{\text{fill}} + t_{\text{DTR}} + t_{\text{detonation}} + t_{\text{exhaust}} + t_{\text{isolate}} \quad (1)$$

式中 $t_{\text{fill}} = L / U_{\text{fill}}$, $t_{\text{isolate}} = \Delta L / U_{\text{fill}}$, ΔL 为隔离段长度, 它的大小主要取决于气动阀的结构、出口流动状况及紊流强度等因素, 经过试验验证, 对本文研究 PDE 取 $\Delta L = 104\text{mm}$ 可以达到隔离新鲜混气与炽热燃气的目的, 其长度还有待进一步优化。

t_{DTR} 指爆燃向爆震转变的时间, 它的过程分为 4 个部分^[4]: (1) 点火产生起始火焰, 火焰扩展, 释放热量形成爆燃波, (2) 火焰加速, 增强能量释放和形成强冲击波, (3) 形成和扩展爆炸中心, 爆炸中心产生微小的爆震波, 爆震波迅速向周围混气中传播、扩散, (4) 形成充分发展的爆震波。经过大量的试验, 在爆震室不同位置安装压力传感器, 根据试验测到的爆震室压力曲线, 从点火信号到 CJ 爆震压力峰值经历的时间可以非常近似计算 t_{DTR} , 计算结果为 $t_{\text{DTR}} = 14 \sim 15\text{ms}$ 。在 t_{DTR} 时间内也产生部分推力, 但是相对于爆震时产生推力, 它可以忽略不计。文献[5]中, $t_{\text{thrust}} = (9 \sim 10) t_{\text{CJ}}$ ^[5], $t_{\text{CJ}} = L / U_{\text{CJ}}$ 本次试验测到的爆震波速度为 1240.77m/s 。根据推力壁附近压力曲线图选取:

$$t_{\text{thrust}} = 9 t_{\text{CJ}} = 9 L / U_{\text{CJ}} \quad (2)$$

因此, PDE 的工作频率为

$$f = \frac{1}{T_{\text{cycle}}} = \frac{1}{\frac{L}{U_{\text{fill}}} + t_{\text{DTR}} + 9 \frac{L}{U_{\text{CJ}}} + \frac{\Delta L}{U_{\text{fill}}}} \quad (3)$$

2.2 PDE 阻力的估算方法

在常温常压条件下, 利用鼓风机提供高压、高速气流, 双旋流气动阀模拟飞行进气, 试车台上 PDE 的阻力主要包括气动阀关闭和打开时的阻力, 内部强化燃烧装置阻力, 试车台的导轨摩擦力等。没有考虑爆震过程中的循环损失, 气动阀倒流损失等。

气动阀打开时, 可爆混气充填爆震室, 发动机内部流体存在内流阻力。因此, 它的大小主要取决于发

动机的内部结构, 如气动阀的结构, 强化燃烧装置的结构等。文献[6]通过试验, 归纳出计算公式为: $R_1 = \Psi_1 \cdot U_{\text{fly}}^2$, 式中 U_{fly} 为模拟飞行速度, Ψ_1 为气动阀打开时阻力经验系数, 它主要取决于气动阀的结构, 迎风面积, 阻力系数, 爆震管内部的结构等因素。气动阀的打开时间包括: 充填爆震室时间 t_{fill} , 隔离段时间 t_{isolate} 。

当 PDE 爆震燃烧时, 气动阀关闭, 气动阀相当于钝体, 气动阀头部投影截面为滞止区, 产生一定阻力, 同样通过试验, 归纳出计算公式为: $R_2 = \Psi_2 \cdot U_{\text{fly}}^2$, 式中 Ψ_2 指气动阀关闭时的阻力经验系数, 它主要与气动阀的迎风面积有关。气动阀关闭时间包括: 爆燃向爆震转变时间 t_{DTR} , 爆震波在爆震管内传播时间 $t_{\text{detonation}}$, 膨胀排气时间 t_{exhaust} 。

模拟飞行速度与爆震管充填速度之间存在线性关系, 即 $U_{\text{fly}} = \lambda \cdot U_{\text{fill}}$, 其中, λ 取决于气动阀的结构、爆震室结构等。因此, PDE 的阻力也可以用爆震室充填速度来表示。PDE 总体阻力计算公式为

$$\begin{aligned} \bar{R}_{\text{drag}} &= \frac{R_1 t_{\text{open}} + R_2 t_{\text{close}}}{t_{\text{cycle}}} \\ &= \frac{\Psi_1 (t_{\text{fill}} + t_{\text{isolate}}) + \Psi_2 (t_{\text{DTR}} + t_{\text{detonation}} + t_{\text{exhaust}})}{T_{\text{cycle}}} U_{\text{fly}}^2 \\ &= \frac{K_1 (t_{\text{fill}} + t_{\text{isolate}}) + K_2 (t_{\text{DTR}} + t_{\text{detonation}} + t_{\text{exhaust}})}{T_{\text{cycle}}} U_{\text{fill}}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出, 试车台上 PDE 阻力与模拟飞行速度的二次方, 爆震室充填速度的二次方都成线性增加的关系, 其中 K_1, K_2 指相对于爆震室充填速度的气动阀开关时的阻力经验系数, 且 $K_1 = \Psi_1 \cdot \lambda^2$, $K_2 = \Psi_2 \cdot \lambda^2$ 。

2.3 PDE 净推力的定义和估算方法

作为动力装置, 脉冲爆震发动机的推力是最重要的基本参数之一。关于发动机推力的定义众说纷纭, 它的直接测量、估算对于发动机的研究有很重要的意义。对于试车台上 PDE, 推力有两种意义:

(1) 是发动机本身发出的推力 $\bar{R}_{\text{gross}}$, 通常以推力壁附近传感器在单个循环周期内收集到的压力数据为基础计算的推力, 即毛推力^[7]。文献[7]中, 在初始压力 $p_1 = 100\text{kPa}$, 初始温度 $T_1 = 300\text{K}$ 时, 恰当油气比 JP-10/air 的单位体积推力为 $1372.5\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^3$, 本次实验根据推力壁附近压力曲线对推力壁面积积分可以

近似得到 $I_v = 1356.8 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^3$ 。

$$\bar{R}_{\text{gross}} = I_v \cdot V \cdot f \quad (5)$$

(2) PDE 净推力 $\bar{R}_{\text{net}}$ ^[8], 指发动机发出推力除掉阻力的部分, 它可以直接用推力传感器测量得到, 是 PDE 关键性能参数之一。它的计算方法为

$$\bar{R}_{\text{net}} = I_v V f -$$

$$\frac{\Psi_1(t_{\text{fill}} + t_{\text{isolate}}) + \Psi_2(t_{\text{DDT}} + t_{\text{detonation}} + t_{\text{exhaust}})}{T_{\text{cycle}}} U_{\text{fly}}^2 \quad (6)$$

综合以上式(1)~(6)整理得到

$$\bar{R}_{\text{net}} = \frac{\frac{\pi}{4} I_v D^2 L - \left| \frac{K_1(L + \frac{\Delta L}{U_{\text{fill}}})}{U_{\text{fill}}} + K_2(t_{\text{DDT}} + \frac{10L}{U_{\text{CJ}}}) \right|^2 \cdot U_{\text{fill}}^2}{t_{\text{DDT}} + \frac{\Delta L}{U_{\text{fill}}} + \left| \frac{1}{U_{\text{fill}}} + \frac{10}{U_{\text{CJ}}} \right| \cdot L} \cdot U_{\text{fill}}^2 \quad (7)$$

3 试验装置、测试仪器、试验件及试验工况

脉冲爆震发动机的整体试验装置如图 1 所示, 主要部件包括试车台, 爆震管, 供油、供气系统, 点火系统等。测试仪器包括开环控制系统(控制周期、电磁阀关闭与点火的时间差及电磁阀打开时间), 稳态推力计, 动态推力传感器及数据采集系统, 皮托管测速系统等。试验件包括双旋流气动阀, 多种强化燃烧装置等。试验工况: 在常温、常压条件下, 采用鼓风机模拟飞行进气, 模拟飞行速度在 30m/s~120m/s 之间可调, 充填爆震室速度为 8m/s~30m/s, 工作频率为 10Hz, 燃料为汽油, 供油压力在 0.1MPa~0.3MPa。

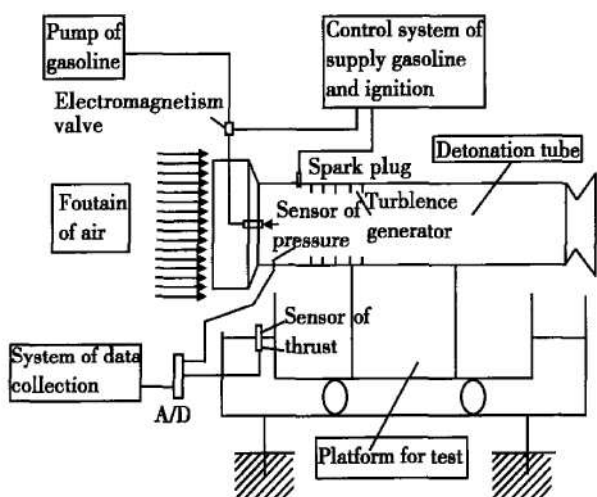


Fig. 1 Schematic of apparatus of PDE

4 试验结果及分析

4.1 PDE 的阻力试验

(1) 选择双旋流气动阀, 安装强化燃烧装置, 使用稳态推力计测量在气动阀打开时的阻力和在关闭时的阻力, 同时测量对应的爆震室充填速度和模拟飞行速度, 得到 PDE 阻力与爆震室充填速度之间关系曲线, 如图 2 所示, PDE 的阻力与爆震管充填速度的二次方近似成正比。

(2) 选择双旋流气动阀作为试验件, 当气动阀打开时, 可以通过试验测定, 风机模拟飞行速度与充填爆震室速度之间关系如图 3。从图 3 可以看到对于本次试验的双旋流气动阀, 风机模拟飞行进气速度与充填爆震室速度近似成线性关系。因此, 当气动阀打开时的阻力与风机模拟飞行进气速度的二次方也近似成线性关系, 如图 4 所示。从图 4 中可看出气动阀在关闭和打开时的阻力与风机模拟飞行进气速度的二次方成线性增加关系, 并且气动阀关闭时的阻力经验系数比打开时阻力经验系数大。

4.2 PDE 燃烧室的压力测定及相关参数的计算

图 5 为推力壁附近的压力曲线, 在爆震管内产生稳定的充分发展的爆震波时, 推力壁附近压力曲线的峰值和波形基本稳定。根据推力壁附近压力对推力壁面积积分可以近似计算出理论上 PDE 能够产生的推力, 即毛推力, 计算结果取 $I_v = 1356.8 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^3$ 。

图 6 为一个循环内两个传感器在不同位置测到的爆震室压力曲线, 图 6(a) 为前面传感器 2 获得的爆震室压力曲线, 图 6(b) 为后面传感器 3 获得的爆震室压力曲线。从图 6 上可以分别计算出从点火信号到 CJ 爆震压力峰值经历的时间, 取平均值可以近似得出爆燃到爆震转变时间, 即 $t_{\text{DDT}} = 14.3585 \text{ ms}$ 。同时, 根据图 6 计算出前后两个传感器达到 CJ 爆震压力峰值的时间差 $\Delta \tau_1, \Delta \tau_2$, 已知两传感器之间距离为 280mm, 从而得到爆震波速度分别为:

$$U_{\text{CJ}} = \frac{280}{\Delta \tau_1 \times 1000} = 1201.72 \text{ m/s}$$

$$U_{\text{CJ}}' = \frac{280}{\Delta \tau_2 \times 1000} = 1278.54 \text{ m/s}$$

取平均得到 $U_{\text{CJ}} = 1240.77 \text{ m/s}$ 。

4.3 PDE 净推力的测定

在爆震管的头部推力架上安装高频响动态推力传感器, 利用数据采集系统记录试验数据, 进气装置选用双旋流气动阀, 爆震管内部装有多种强化燃烧装置。

图 7(a) 为 PDE 连续工作的推力曲线, 图 7(b) 是两个循环的推力曲线, 从图上可以看出试车台上 PDE

在气动阀打开时, 存在阻力(即负推力), 当气动阀关闭时, 试车台 PDE 阻力抵消了一部分 PDE 本身发出的毛推力, 降低了 PDE 推力曲线的峰值。从图 7 中 (b) 上可以计算出试车台上 PDE 每个循环的净推力为 272. 64N。比较图 5, 图 7 可以看出, 直接测量到的 PDE 推力时间历程与推力壁附近压力曲线时间历程不完全一致, 推力的峰值不仅比压力峰值滞后,

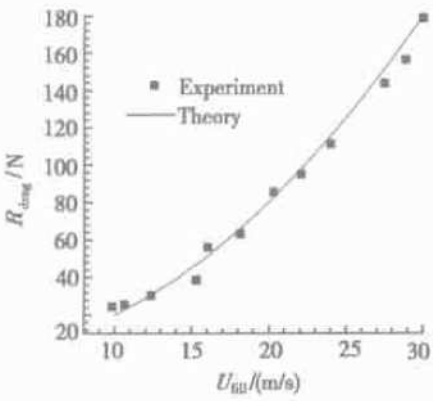


Fig.2 Drag of PDE versus filling velocity

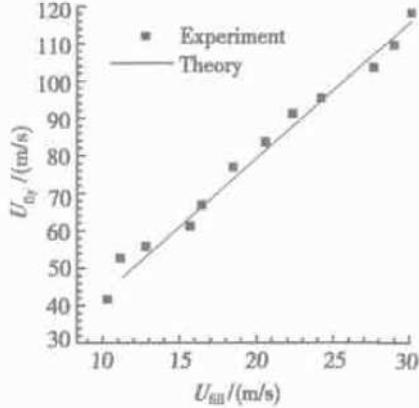


Fig.3 Relation between simulated flight speed and filling velocity

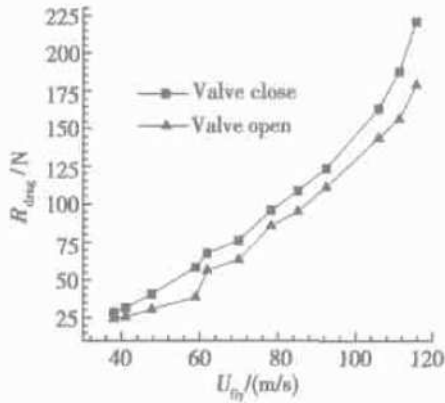


Fig.4 Comparison of variations of engine drag with simulated flight speed

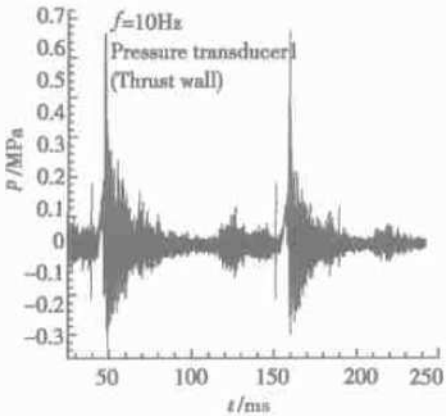


Fig.5 Pressure time history at thrust surface

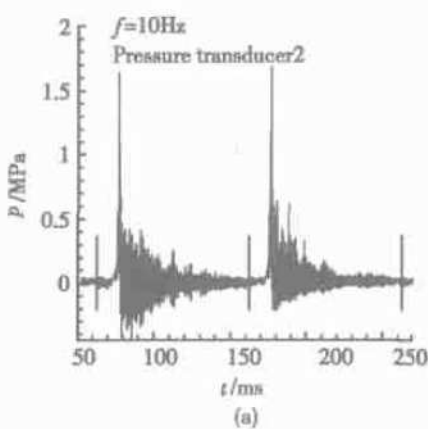
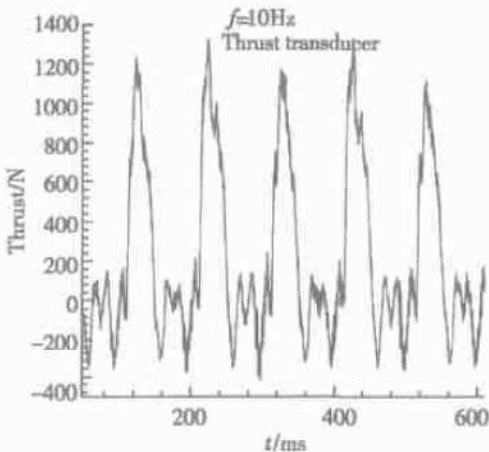
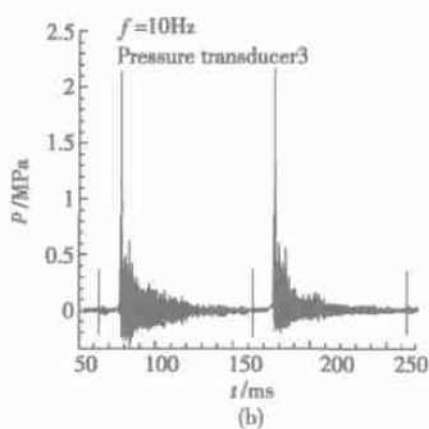
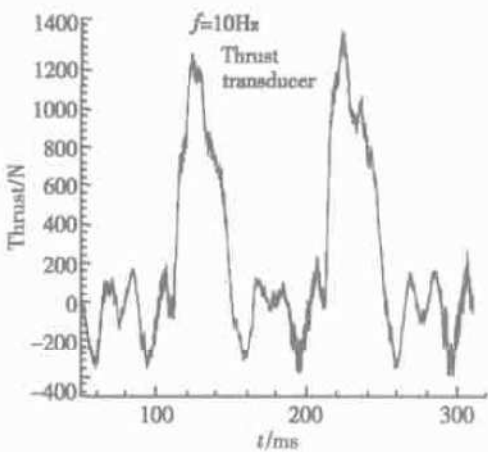


Fig.6 Pressure time history at different position



(a)



(b)

Fig.7 Engine thrust time history

而且推力峰值比按照压力峰值计算的值要小得多, 主要因为试车台上 PDE 及附件的笨重, 存在较大的惯性, 需要较长的响应时间, 但由于动量守恒, 不影响总的净推力输出。因此, 要提高试车台上 PDE 的净推力不仅要提高发动机的工作频率, 还要降低 PDE 的阻力, 优化设计试车台上 PDE 的结构是至关重要的。

5 计算结果与试验比较

选择安装双旋流气动阀的 PDE 作为算例, 爆震管长度 $L = 1800\text{mm}$, 内径 $D = 150\text{mm}$, 爆震管充填速度 $U_{\text{fill}} = 26.23\text{m/s}$, 工作频率按照试验时的频率即 $f = 10\text{Hz}$, $t_{\text{DDT}} = 14.3585\text{ms}$, 隔离段长度取 $\Delta L = 104\text{mm}$, $t_{\text{isolate}} = 3.965\text{ms}$ 。根据式(7)可以计算出本次试验的 PDE 模型的净推力为 286.4N 。计算的结果比试验直接测到的净推力稍大, 误差在 5% 以内, 主要是由于试车台架过于笨重, 影响了推力传感器响应时间, 进而影响测量精度, 另外爆震管内可爆混气分布不均, 降低了 PDE 净推力的输出。试验结果和计算基本一致, 说明了净推力计算模型是正确的, 对优化设计 PDE 及其附件有重要的指导意义。

6 结 论

(1) 建立了试车台上 PDE 的净推力近似计算模型, 试验验证了计算模型是可行的, 正确的。

(2) 根据爆震室压力曲线计算出了爆燃到爆震时间, 爆震波在爆震室的传播速度。

(3) 通过计算模型计算结果与试验结果比较, 发现爆震室可爆混气不够均匀, 降低了 PDE 的净推力的输出, 降低 PDE 的性能。

(4) 本次试验选用的双旋流气动阀的阻力经验系

数比较大, 需要进一步优化设计气动阀, 减小其阻力经验系数, 提高 PDE 的性能。

参考文献:

- [1] Wintenberger E, Austin J M, Cooper M, et al. An analytical model for the impulse of a single cycle pulse detonation engine [R]. *AIAA* 2001-3811.
- [2] Cooper M, Jackson S, Austin J, et al. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations [R]. *AIAA* 2001-3812.
- [3] 何立明, 严传俊, 范 玮. 脉冲爆震发动机的推力计算方法[J]. 推进技术, 1997, 18(5). (HE Liming, YAN Chuanjun, FAN Wei. A method of calculating thrust of pulsed detonation engines [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, 18(5).)
- [4] Schultz E, Wintenberger E, Shepherd J. Investigation of deflagration to detonation transition for application to pulse detonation engine ignition [R]. *California Institute of Technology Pasadena, CA* 91125 USA.
- [5] Zitoun R, Desbordes D. Propulsive performances of pulsed detonations [J]. *Combustion Science and Technology*, 1999, 114(1-6): 93~114.
- [6] 郑殿峰, 王家骅, 王 波, 等. 脉冲爆震发动机阻力研究 [J]. 推进技术, 2004, 25(2). (ZHENG Dianfeng, WANG Jiahua, WANG Bo, et al. Resistance characteristic of aerovalve of pulse detonation engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(2).)
- [7] Chao T W, Wintenberger E, Shepherd J E. On the design of pulse detonation engines [R]. *Graduate Aeronautical Laboratories California Institute of Technology Pasadena, CA* 91125 USA.
- [8] Foa Joseph V. Elements of flight propulsion [M]. *John Wiley & Sons, Inc. New York and London*.

(编辑: 王居信)