

多循环吸气式脉冲爆震发动机推力直接测量^{*}

张义宁, 王家骅, 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: 为了论证直接测量方法在间歇工作的脉冲爆震发动机系统推力测量中的可行性, 试验采用动态压电式力传感器, 对内径为 180mm, 长 2000mm 的吸气式多循环 PDE 原型机的推力进行直接测量, 并获得推力特征曲线。PDE 工作频率分别为 10Hz 和 20Hz 时, 对应的平均推力分别为 605N 和 840N。试验发现系统在一个周期内惯性力积分为零, 证明了用直接测量方法测量 PDE 平均推力的可靠性。

关键词: 脉冲爆震发动机⁺; 推力; 直接测量

中图分类号: V235.22 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2006) 05-0459-05

Impulse of cyclic air-breathing pulse detonation engine

ZHANG Yi-ning WANG Jia-hua ZHANG Jing-zhou

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

Abstract In order to demonstrate the feasibility of thrust direct measurement, a dynamic pressure transducer was used to measure impulse of air-breathing pulse detonation engine directly. The typical impulse time history was obtained by experiment on a PDE prototype with the diameter and the length 180mm and 2000mm, respectively. When the prototype steadily and periodically is operated at the frequency of 10Hz and 20Hz, the average impulse come up to 605N and 840N, respectively. As the integration of the inertia amount to zero in a cycle, the results of direct measurement of PDE average impulse are reliable.

Key words Pulse detonation engine⁺; Thrust; Direct measurement

1 引 言

脉冲爆震发动机 (Pulse Detonation Engine, 简称 PDE) 是利用间歇式爆震波产生的高温高压燃气来产生推力的新概念发动机。其燃烧过程为非定常过程。整个过程是间歇式的、周期性的, 因而产生的推力是脉动的, PDE 产生推力的方式和工作特点决定了其测量推力的方法与一般的涡喷发动机的测量方法不同。PDE 的推力试验研究相对较少^[1], 主要侧重于理论分析研究^[2-4], 间接测量推力可以通过安装在推力壁的传感器采集到的单循环压力数据计算得到^[5], 但所得数据往往大于 PDE 的实际有效推力。Coop M, Wintenberg E^[6-7] 等研究了单循环 PDE 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。Purdue 大学采用系统

中增设阻尼器的方法对多循环预混气式 PDE 的推力进行测量^[8], 但没有考虑自吸气式两相 PDE 多循环工作情况下的推力测量。合理选择测量脉冲爆震发动机推力的方法, 对准确测量脉冲爆震发动机的推力, 评定脉冲爆震发动机的性能具有很重要的意义的。

本文结合实际的 PDE 原型机, 爆震管内径 $D = 180\text{mm}$, 长 $L = 2\text{km}$, 模拟飞行进气状态, 建立独立系统的 PDE 推力直接测量试验台, 采用动态压电式力传感器, 对以汽油为燃料的两相多循环 PDE 进行推力测量。

2 PDE 推力测试系统^[9]

2.1 PDE 推力测试系统的建立

直接测量 PDE 推力的系统如图 1 所示: 脉冲爆震发动机由 4 根细钢丝绳水平悬吊于空中, 并通过两

* 收稿日期: 2005-11-21; 修订日期: 2006-03-30.

作者简介: 张义宁 (1977-), 男, 博士生, 研究领域为燃烧学。Email: Yining_pd@sohu.com

组滚动轴承限制发动机在横向的运动,使其只能沿轴向单自由度运动。发动机工作时所产生的正向推力通过传力顶杆传递到压电式力传感器上,为了获得PDE工作过程中混气充填时段产生的负推力,在传力顶杆后安装受压弹簧,在PDE初始状态时,通过预紧螺杆4给传力顶杆2一个大于预计负推力的预紧力,关于动态压电式力传感器的工作原理将在后面进一步阐述。由于自吸式PDE工作时模拟飞行状态进气,连接爆震管的附件只有供油软管和点火导线,在PDE工作过程中,由于位移较小,认为附件产生的牵制力可以忽略不计,因此图1所示的PDE推力测试系统可以看成是一个独立系统。采用适时的数据采集系统就可以获得脉冲推力的时域波形,即瞬时推力波形。将一定时间内的瞬时推力波形对时间积分并对时间取平均值就可以得到发动机在一定工况下的平均推力值。为了表述方便,定义在此独立系统下直接测量得到的PDE平均推力为发动机的有效推力。

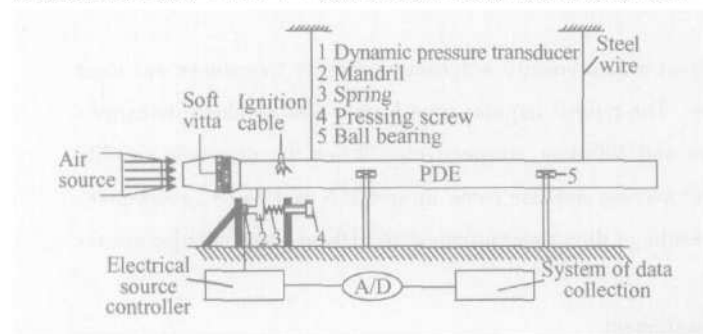


Fig 1 Scheme of PDE thrust direct testing system

2.2 动态压电式力传感器测试原理

压电式力传感器对于压力改变具有快速响应的能力,试验选用PCB公司的M203B型动态压电式力传感器,频响为60kHz,测量范围为0~111.2kN,测量误差为1%。压电式力传感器简化模型如图2所示:它是由顶部、底部和石英压电晶体片组成,并通过中心螺钉将晶体片夹紧在顶部与底部之间。晶体片受到力作用时具有释放电荷的特性,晶体片两表面积累的正负电荷产生的电压差的大小表征传感器受力的大小。当作用力保持恒定时,晶体片的电压输出为零。因此,在初始状态下,施加给传力顶杆的定值的预紧力,在测试系统的终端电压输出为零,当PDE产生正向推力时,压电晶体片与初始状态相比受到动态压力作用,传感器电压输出大于零;当PDE受到向后的气动力作用时,压电晶体片在初始电压输出为零的平衡位置向右膨胀,传感器电压输出为负值,即发动机受到向后的作用力。

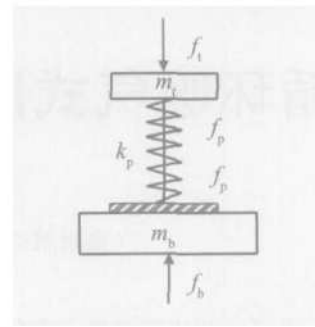


Fig 2 Inner structure of piezoelectric pressure transducer

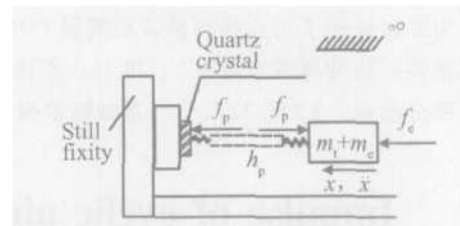


Fig 3 Sketch map of theory for thrust direct measurement of PDE system

图2中, m_t 、 m_b 分别为顶部及底部的质量; k_p 为晶体片的当量弹性刚度系数; f_t 为作用在顶部的被测力; f_b 为作用在底部的支承力; f_p 为晶体片所受的动态力。显然,传感器的输出电荷是与 f_p 成正比的。

依据上面的分析,图1所示的推力测试系统在忽略滚动轴承摩擦力的情况下可以表示为图3所示的测力系统。图中, f_e 为发动机的推力, $m_t + m_e$ 为力传感器顶部质量和发动机的质量之和。因此有 $(m_t + m_e)x = f_e - f_p = f_e - k_p x$,由于 m_t 远小于 m_e ,可以忽略不计,则有

$$m_e \ddot{x} = f_e - f_p = f_e - k_p x \quad (1)$$

式中 x 和 $\ddot{x}$ 分别为位移和加速度。

3 试验装置及试验结果

3.1 试验装置

试验在内径为180mm,长2000mm的PDE原型样机上进行,自吸式进气方式,空气为氧化剂,燃料为液态汽油。采用两台罗茨风机供气,气源出口表压力可达70kPa,流量为3.0kg/s左右;燃油泵为WP6加力泵改装,供油最高压力达5MPa。燃料及氧化剂非预混式供给,即混气的形成过程包括液体燃油的雾化、蒸发、掺混过程。采用高频高能点火装置,每次点火能量为0.5J。PDE工作周期,供油时段及点火时刻通过开环控制器设定。PDE头部安装了气动阀,爆震管内有提高点火性能装置,促进形成均匀混气的掺混器以及促进燃烧装置(圆环型扰流片,堵塞比

44.5%^[10])。试验系统如图 4 所示。

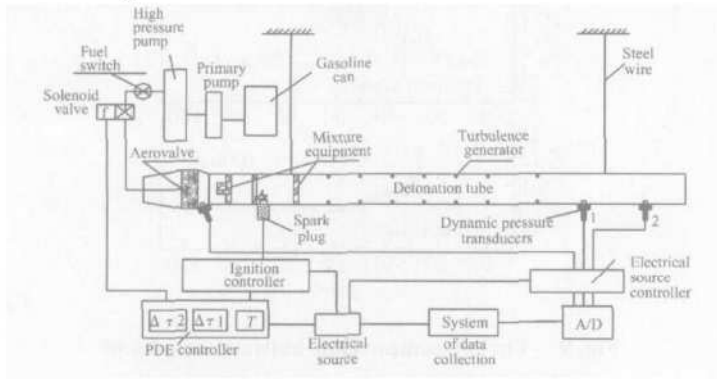


Fig 4 Experimental setup for PDE

3.2 试验结果

试验分别设定 PDE 工作频率为 10Hz、20Hz，油气比近似为 1。在 PDE 能够稳定地以间歇方式工作的前提下，爆震管内燃烧波压力通过 PCB 动态压力传感器测得，试验测得爆震波峰值压力 (1.6MPa 左右) 及传播速度 (u 大约 1400m/s)。与美国海军研究生院两相 PDE 试验数据比较^[11]，认为爆震管内形成了稳定传播的爆震波。图 5 图 6 分别为 10Hz、20Hz 工况下测得的脉冲推力时域波形。

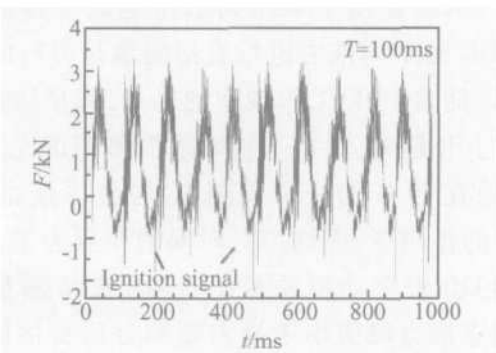


Fig 5 Thrust time history ($f=10\text{Hz}$)

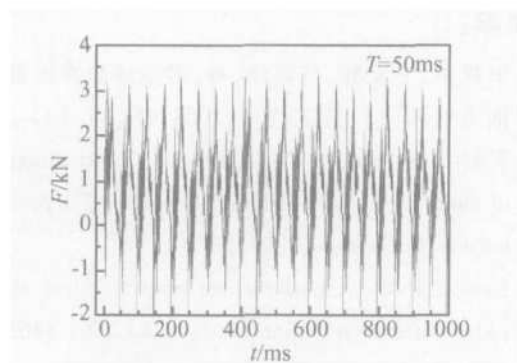


Fig 6 Thrust time history ($f=20\text{Hz}$)

由图 5 图 6 可知，压电晶体受到周期性的作用力，且力的作用周期与设定的 PDE 工作周期相吻合。由压电晶体受力分析以及测得的时域波形可知，在 PDE 工作过程中，任意时刻 t 与 $T+t$ (T 为设定的

PDE 工作周期) 时刻，压电晶体片受力相同，由此可以认为发动机在工作过程中，在 t 与 $T+t$ 时刻，其位移，速度及加速度是相等的，所以有

$$\int_t^{T+t} m_e \ddot{x} d\tau = 0 \quad (2)$$

对式 (1) 两边由 t 到 $T+t$ 积分，即 $\int_t^{T+t} m_e \dot{x} d\tau = \int_t^{T+t} (f_e - f_p) d\tau$ 由式 (2) 可知等号左边为零，可以得到

$$\int_t^{T+t} f_e d\tau = \int_t^{T+t} f_p d\tau \quad (3)$$

由式 (1) 可知，利用压电式传感器测得的力 f_p 与发动机实际推力 f_e 之间存在 $m_e \dot{x}$ 的差值，但经过一个周期的积分，惯性力冲量为零。由式 (3) 可知，发动机实际推力 f_e 在一个周期内对时间积分得到的冲量等于 f_p 在一个周期内对时间的积分。

运用 Origin 软件分别对图 5 和图 6 曲线积分，通

过公式 $F = \frac{\int_{t_1}^{t_2} f_e d\tau}{t_2 - t_1}$ 计算可得 ($t_2 = nT + t_1$)，PDE 以 10Hz 工作时，平均推力达 605N，以 20Hz 工作时，平均推力达 840N。

为了验证直接测量法取得的 PDE 推力的可靠性，在 PDE 的推力壁后 10mm 的周向安装多个动态压力传感器 (如图 4 所示)，对发动机推力壁处测得的多组动态压力数据进行平均后得到 $p(t)$ ， $p(t)$ 乘以推力壁面积 A ，得到 PDE 推力壁处瞬态推力曲线，如图 7 所示。对时间积分并取时间平均值，即 $F_{\text{wall}} = \frac{\int_t^{T+t} p(t) A d\tau}{T}$ ，得到 PDE 在 10Hz 工况下，平均推力达到 1150N。

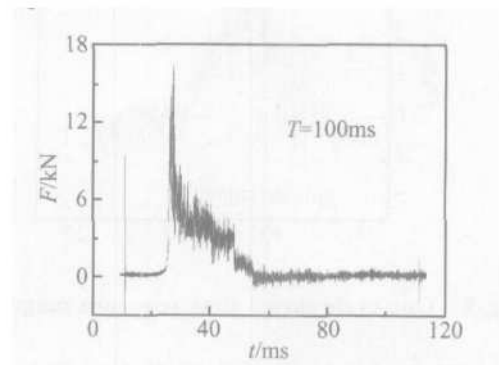


Fig 7 Thrust time history of thrust wall pressure integral

4 试验结果讨论

试验结果表明，随着 PDE 工作频率的提高，直接

测量所得的平均推力有一定的提高。对于定长的 PDE 爆震管,爆震波触发后在爆震管内传播的时间以及排出尾喷管后燃气膨胀所需要的时间基本相等,

简称为超燃和膨胀时间^[12],即 $t_{dr} \approx \frac{10L_{fill}}{v_d} = \frac{10 \times 2}{1400} \times$

1000 = 14.3ms,理论上平均推力的增加与频率提高成正比关系,但是由于气动阻力与气流速度的平方成正比,随着进气速度的提高,发动机所受到的气动阻力也进一步增大,因此 PDE 在 20Hz 工况下获得的平均推力并非是 10Hz 工况下的两倍关系,吸气式 PDE 平均推力与频率之间的内在关系^[13],有待于进一步研究。

对频率 10Hz 推力时域波形的一个周期放大,如图 8 所示,从直接测量的有效推力结果显示, PDE 在一定的时间内推力存在负值(曲线的一部分在零线以下),其原因在于 PDE 产生正向推力的时间是周期性的,且 10Hz 工作频率下,混气充填时间(或冷态时间)比较长,大约有 80ms 左右,但图 8 中,一个周期内,推力大于零的区域占 60% 左右,这是由于脉冲瞬态作用力施加在具有一定质量的 PDE 上,在 t_{dr} 时间内,给了 PDE 一个惯性力,当高温高压燃气膨胀完毕, PDE 由于惯性力的作用,继续对传感器有压缩作用,这就使得直接测量的峰值小于推力壁积分的峰值且在时间存在滞后,如图 9 所示, PDE 的脉冲推力作用在具有一定质量的发动机上,虽然惯性力在一个周期内对时间积分为零,但是,发动机质量的存在起到了力的缓冲作用。

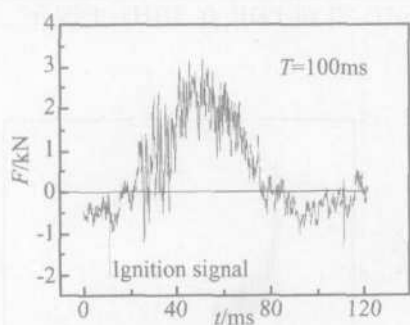


Fig 8 One cycle thrust time sequence magnifying

直接测量的平均推力小于推力壁积分法得到的平均推力,是由于推力壁积分法测出的推力是 PDE 热力过程所产生的直接结果,是一个理论推力;而直接测量的结果是发动机实在的有效推力,传感器的改变,只会改变瞬态力的波幅大小,但对时间的积分是不变的,也就是说,推力的平均值与晶体片的弹性系数无关。有效推力是理论推力除去众多的推力损失

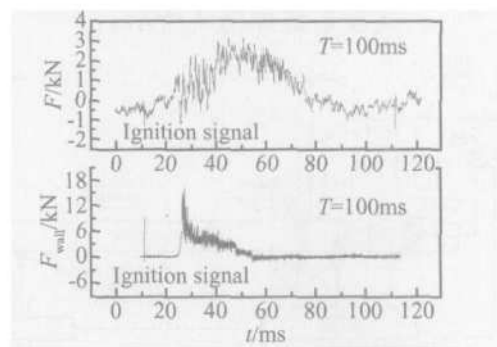


Fig 9 Thrust comparison between results of direct measurement and wall pressure integral

得到的,这些损失包括:为了改善 PDE 点火性能及强化燃烧,在爆震管内安装一定数量的钝体(如图 4 所示)引起的推力损失; PDE 气动阀为一个不完善的单向阀, PDE 在燃烧及膨胀过程存在漏气,产生负推力; PDE 进气过程中,由于 PDE 的内阻,产生负推力;燃烧和膨胀时, PDE 气动阀关闭,来流气体产生的负推力等。

5 结 论

- (1) 试验证明了采用动态压电式力传感器对吸气式 PDE 的平均推力进行直接测量是可行的;
- (2) 随着 PDE 工作频率的提高,其平均推力具有明显的上升趋势,但不与频率成简单的正比关系;
- (3) 在 PDE 的一个周期内,独立系统的 PDE 在脉动力的作用下,惯性力对时间的积分为零;
- (4) 由于发动机质量的存在,直接测量得到的 PDE 瞬态推力峰值小于推力壁积分所得的瞬态推力峰值,且峰值在时间上存在滞后。

参考文献:

- [1] 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 multi-cycle pulse detonation engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(3).)
- [2] Paxson D E. A performance map for ideal air breathing pulse detonation engines[R]. AIAA 2001-3465.
- [3] Endo T, Fujiwara T. A simplified analysis on a pulse detonation engine model[J]. *Trans Japan Soc Aera Space Sci*, 2002, 44(146).
- [4] Yan Chuanjun, Fan Wei, Huang Xiqiao, et al. Exploratory study on new pulse detonation engines[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(2).

(下转第 468 页)

以下结论:

(1)在粒子模拟中采用链式存储结构存储粒子信息,可自适应粒子总数的变化,无需预先指定最大粒子总数,可显著提高程序的存储效率与计算效率。基于该方法的粒子模拟程序得到了正确的计算结果,因此该方法可用于离子发动机栅极粒子模拟中。

(2)引出的离子束存在明显的束边界,并且引出的离子束距离栅极的距离越远,离子数密度越小,离子束变得越来越稀薄。

(3)在本文中的工作参数下,离子束能够顺利的通过加速栅极孔,而不会直接撞在孔壁上,说明工作参数选取合理。

参考文献:

- [1] Okawa Y. Numerical analysis of ion beam extraction phenomena in an ion thruster[A]. International Electric Propulsion Conference[C]. Pasadena, California October 14-19, 2001.
- [2] Inanaga Y, Ozaki T. Particle simulation for ion thruster grid design[A]. International Electric Propulsion Conference[C]. Pasadena, California October 14-19, 2001.

- [3] Wang J, Polk J, Brophy J, et al. Three-dimensional particle simulations of ion-optics plasma flow and grid erosion [J]. *Journal of Propulsion and Power* 2003, 19(6) 1192 ~ 1199.
- [4] Wang J, Anderson J, Polk J. Three-dimensional particle simulations of ion optics plasma flow [R]. *AAA* 98-3799.
- [5] Birdsall C K, Langdon A B. Plasma physics via computer simulation[M]. *McGraw Hill*, 1985.
- [6] Okawa Y, Takegahara H. Numerical study of beam extraction phenomena in an ion thruster[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2001, 40 314~ 321.
- [7] 熊家贵,王德武. 离子引出的二维 PIC-MCC 模拟 [J]. *物理学报*, 2000, 12.
- [8] 沈 青. 稀薄气体动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [9] 朱战立,刘天时. 数据结构 (第 2 版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.

(编辑: 朱立影)

(上接第 462 页)

- [5] Eidehman S, Grossmann W, Lottati I. Propulsion applications of the pulsed detonation engine concept[R]. *SAIC Report Number* 89/1684, 12/31, 1989.
- [6] Cooper M, Jackson S, Austin J, et al. Direct experimental impulse measurement for detonation and deflagration[R]. *AAA* 2001-3812.
- [7] Wintenberger E, Austin J M, Cooper M, et al. An analytical model for the impulse of a single-cycle pulse detonation tube[J]. *Preprint of Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(1).
- [8] Matsunoy Y, Meyer S E, Heister S D. Impulse measurements and analytical studies on a cyclic pulse detonation engine[R]. *AAA* 2003-4824.
- [9] 严传俊, 范 玮, 郑龙席, 等. 脉冲爆震发动机原理及关键技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [10] 郑殿峰, 王家骅, 张会强, 等. 扰流片对汽油/空气脉冲爆震发动机爆震波压力的影响 [J]. *推进技术*, 2004, 25 (6). (ZHENG Dian-feng, WANG Jia-hua, ZHANG Hui-qiang, et al. Effects of parameters of turbulence generator on the detonation wave in air-breathing gasoline-air pulse

detonation engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(6).)

- [11] Brophy Christopher M, Netzer Dave, Forster Dave LT. Detonation studies of JP-10 with oxygen and air for pulse detonation engine development[R]. *AAA* 98-4003.
- [12] 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). (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).)
- [13] 李建中, 王家骅, 范育新, 等. 脉冲爆震发动机最大净推力和最佳工作频率 [J]. *推进技术*, 2004, 25(6). (LI Jian-zhong, WANG Jia-hua, FAN Yu-xin, et al. Maximal net thrust and optimal frequency of pulse detonation engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25 (6).)

(编辑: 梅 瑛)