

气动阀式脉冲爆震发动机推力因数

郑殿峰¹, 杨义勇², 王家骅³

(1. 北京大学 能源与资源工程系, 100871 北京; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 100083 北京, yanggy@cugb.edu.cn; 3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 210016 南京)

摘 要: 为了进一步研究脉冲爆震发动机(PDE)的有效推力, 对影响有效推力的因数进行了研究. 采用旋流式气动阀, 在爆震管直径 60 mm 内成功实现了吸气式汽油/空气 PDE 的连续爆震燃烧. 冷态状态下研究了 PDE 阻力和爆震管填充速度与冲压来流速度的关系, 热态状态下研究了气动阀推力壁压力. 对一个工作周期正反向推力和阻力的计算结果表明, PDE 在频率 10 Hz 时就能产生连续有效推力, 但实际很难测得冲压进气时的有效推力. 对 PDE 获得连续有效推力因数的复杂技术系统进行研究, 结果表明, PDE 的工作频率、爆震强度、内外阻力是获得有效推力的决定因素, 其中扰流器阻力是关键.

关键词: 脉冲爆震发动机; 气动阀; 爆震波; 有效推力

中图分类号: V235.22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)01-0130-04

Influence coefficient of thrust for aero-valve pulse detonation engine

ZHENG Dian-feng¹, YANG Yi-yong², WANG Jia-hua³

(1. Department of Energy and Resources Engineering, Beijing University, 100871 Beijing, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences(Beijing), 100083 Beijing, China, yanggy@cugb.edu.cn; 3. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 210016 Nanjing, China)

Abstract: A study about the influence factors on effective thrust of pulse detonation engine (PDE) is carried out to obtain effective thrust. The continuous detonation combustion of air-breathing/gasoline-air PDE is achieved by using the cyclone-type aero-valves in a detonation tube with diameter of 60 mm. The effects of the filling speed of detonation tube and the stamping flow speed on the drag of PDE are analyzed based on the cold-state experiments, while the pressure p_3 of the aero-valve is studied in the thermal-state experiments. The results of calculation for the thrust and drag in a period show that PDE can output effective thrust at the frequency of 10 Hz, but this effective thrust is difficult to be measured under actual working conditions. The research on the continuous effective thrust for PDE indicates that the operating frequency, detonation intensity, internal and external drag are the decision factors, while reducing the spoiler drag is the key to obtain the effective thrust.

Key words: pulse detonation engine; aero-valve; detonation wave; effective thrust

PDE 是一种新概念发动机, 呈周期性工作, 其关键是如何获得有效推力. 对于液体燃料气动阀式 PDE, 研究的难点是在最短距离和时间内形成可燃混气, 因此, 必须解决好燃油雾化、蒸发、掺混问题^[1]. 国外 PDE 使用液体燃料 JP-10 和氧

气能够产生爆震波, 频率为 5 Hz, 而采用 JP-10 和空气未能获得爆震波^[2-3]. PDE 主爆震室内的混气为 JP-10 和空气, 预爆管内为 JP-10 和氧气, 其最大工作频率为 30 Hz, 将进口温度提高到 735 K, 油珠的 SMD 约 3 μm , 且燃油蒸发率达到 70% 时才能得到良好的爆震波^[4-6]. Matsuoka 等^[7]发展了计算冲量的半分析表达式, 但没有考虑 PDE 内阻问题. 文献[8]中采用了自带氧化剂, 在爆震管内径为 56 mm, 成功实现了频率 30 Hz

收稿日期: 2009-05-26.

基金项目: 国防基础预研项目(K1600060704).

作者简介: 郑殿峰(1966—), 男, 博士, 助理研究员.

杨义勇(1966—), 男, 教授, 博士生导师.

爆震燃烧,并测得 94.2 N 的平均推力.文献[9]对内径 180 mm、长 2 m 的液体燃料气动阀式 PDE,采用压力传感器对推力进行了测量,在工作频率 10 Hz 时获得了 605 N 的平均推力,这些结果直接与测量手段有关.对于有效推力的测量和如何获得有效推力一直是研究的难点.而证明 PDE 产生连续有效推力的直观办法是工作的 PDE 在高速气流中能够推动滑动小车前行,但目前还没有得到实验验证,瞬时有效推力已由实验证实.

本文通过冷态与热态实验及计算证明,一定频率的 PDE 可以产生连续有效推力.在大量爆震燃烧研究的基础上,分析了 PDE 获得连续有效推力的诸多因数,为 PDE 进一步研究提供参考依据.

1 试验设备

图 1 为 PDE 实验系统,由 PDE 样机、推力架、供气系统、供油系统、点火系统、采集系统组成. PDE 长 1.8 m,爆震管内径 $d=60\text{ mm}$,采用冲压进气,爆震管内的冷态填充速度可为 $15\sim35\text{ m/s}$,爆震波峰值压力由 Kilite 动态压力传感器(XTE-190-50)测量.爆震管内主要由气动阀、燃烧强化装置和堵塞比为 44.5% 的圆环型扰流器组成.通过滑动小车,由静态推力仪测量 PDE 的冲压进气阻力.

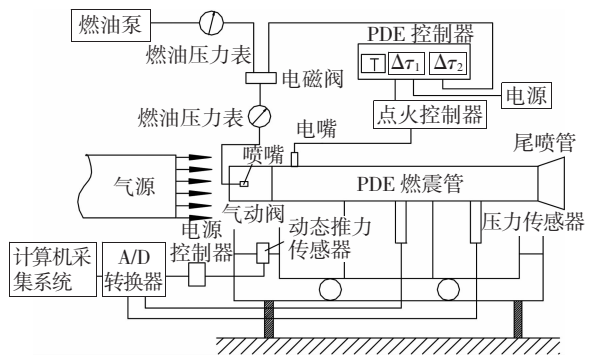


图 1 PDE 爆震燃烧试验系统

2 试验结果

2.1 PDE 冲压进气状态的冷态参数

图 2 为冲压进气状态时 PDE 来流速度 v_1 与爆震管冷态填充速度 v_2 的关系曲线.由图 2 可知,PDE 装旋流式气动阀和圆环型扰流器时,在不同数目扰流片时, v_2 与 v_1 成线性关系,且 $v_2/v_1\approx0.22$,随扰流片数目增加, v_2 相应减小.因为气动阀堵塞比大,使进入气流旋转、收缩、变形,阻力系数大,而扰流器只是局部改变气流方向,阻力系数小.因此,气动阀是决定 v_2 与 v_1 比值的关键因数.

图 3 为 PDE 阻力 R 与来流速度 v_1 关系曲线,

标识 a、b 分别为气动阀关闭和开启状态.由图 3 可知,随来流速度的提高,PDE 阻力增加,气动阀关闭比开启时阻力大.从图 2 可知,当爆震管填充速度 $v_2=20\text{ m/s}$ 时,由于 $v_2/v_1\approx0.22$,对应于 $v_1=91\text{ m/s}$,此时 PDE 工作频率可为 10 Hz.由图 3 可知,在 $v_1=91\text{ m/s}$ 时,PDE 气动阀关闭状态的阻力为 17.3 N,即为爆震管内膨胀波作用在气动阀推力壁上的压力高于冲压进气气流总压时的阻力;开启状态的阻力为 14.8 N,即为爆震管冷态填充过程时的阻力.

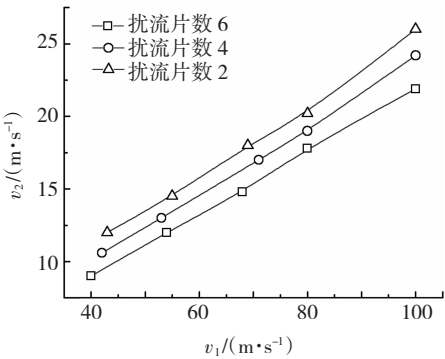


图 2 PDE 不同扰流器的 v_2 与 v_1 曲线

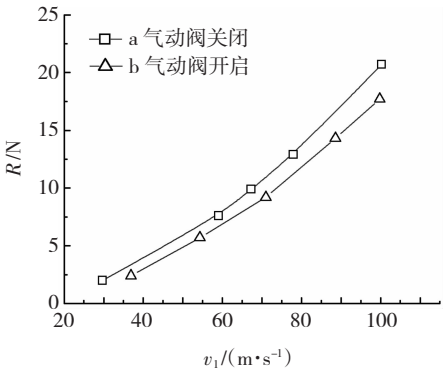


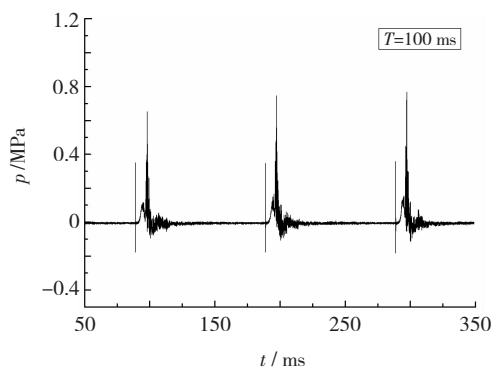
图 3 PDE 阻力 R 与飞行速度 v_1 曲线

2.2 PDE 推力壁 p_3 压力测量及推力计算

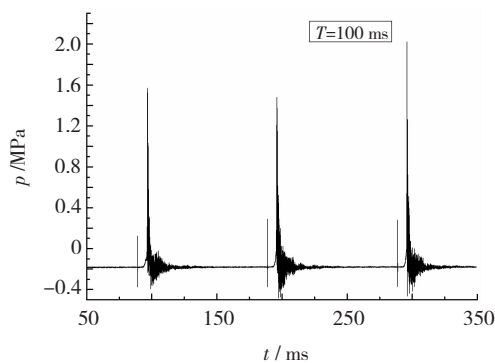
图 4 为离心喷嘴和旋流式气动阀匹配的爆震波特性曲线.由图 4 可知,PDE 工作周期 100 ms,频率 10 Hz,压力传感器 b 在气动阀下游 0.92 m 处测得的压力波峰值压力为 2.0 MPa,说明此处已经产生爆震波,PDE 实现了连续的爆震燃烧.压力传感器 a 在气动阀下游 0.02 m 处,测得的膨胀波峰值压力为 0.72 MPa,即为气动阀推力壁处压力 p_3 .

旋流式气动阀出口为多个旋转气流通道的,其喉道面积是爆震管面积的 56%,叶片遮盖度为 1.3.从爆震管出口方向观察,气动阀出口是由叶片组成的“封闭”平面,但爆震燃烧时气动阀仍存在反向漏气;因此,用推力壁压力 p_3 与气动阀出

口面积(爆震管面积) A 的乘积得到的PDE正向瞬时推力比实际正向推力大。



(a)压力传感器距离推力壁 0.02 m



(b)压力传感器距离推力壁 0.92 m

图4 离心喷嘴和旋流气动阀匹配的爆震波特性曲线

- 1) 正向瞬时推力 $F_t = p_3 A = 1\,994\text{ N}$.
- 2) 反向瞬时阻力: 关闭状态时, $R_1 = 17.3\text{ N}$; 开启状态时, $R_2 = 14.8\text{ N}$.
- 3) 一个周期正向冲量: $I_1 = F_t T_1 = 5.98\text{ Ns}$ (假设 p_3 的作用时间 T_1 为 3 ms).
- 4) 一个周期反向冲量: $I_2 = R_1 T_1 + R_2 (T - T_1) = 1.49\text{ Ns}$.

- 5) 平均有效推力: $\bar{F} = (I_1 - I_2) / T = 44.9\text{ N}$.

上述数据表明:PDE工作频率10 Hz时就能产生有效推力,正向瞬时推力远大于反向瞬时阻力,一个工作周期的正向冲量大于反向冲量.随PDE频率的提高,正向冲量会越大于反向冲量,因为一个工作周期内正向冲量基本不变,反向冲量却减小,单位时间内总的正向冲量增加,反向冲量不变.而在PDE推力实验中较难测到有效推力,因此,要使气动阀式PDE产生连续有效推力是非常困难的。

3 影响PDE获得有效推力的因数

本文的PDE样机实现了爆震频率20 Hz,扰流器最佳堵塞比约为44.5%^[10].试验发现,用螺钉固定在爆震管内壁上3 mm厚的钢制扰流片在

钢丝穿过的小孔处被撕裂或撕断,说明扰流器是爆震燃烧过程PDE强力内阻,极大地削弱了PDE的正向瞬时推力.图5为液体燃料气动阀式PDE有效推力影响因数关联图。

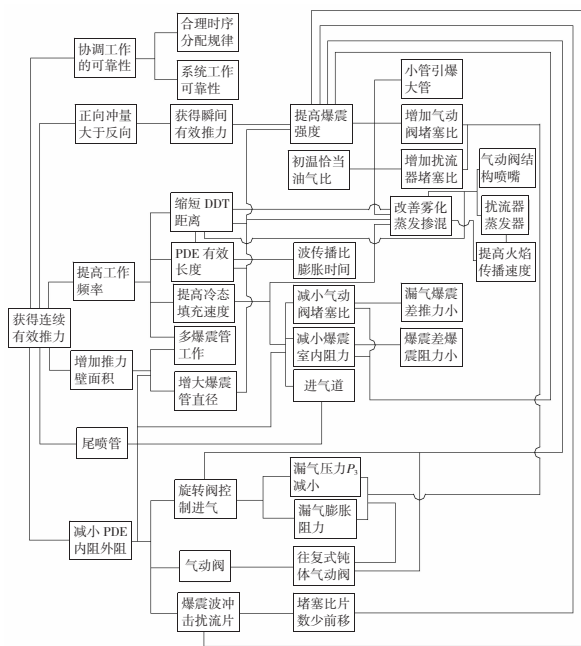


图5 液体燃料气动阀式PDE推力影响因数

3.1 PDE协调工作的稳定性

要达到PDE协调工作的可靠性要求,首先是合理时序分配,PDE采用了开环控制系统按时序协调各个工作过程,其工作频率由点火频率控制,间歇进气由爆震室内的压力控制,燃油供给由电磁阀控制.为使供油和进气时间协调,必须保证空气隔离段填充后开始进油,停止进气时停止供油.其次,系统工作的可靠性,随外界环境的变化,控制系统有适应和自我调节能力,能产生动态频率的爆震燃烧过程。

3.2 保证一个工作周期内正向冲量大于反向冲量

一个工作周期内正向冲量大于反向冲量是获得连续有效推力的充分条件.正向冲量是推力壁压力、推力壁面积和气动阀关闭时间乘积积分,作用时间很短;反向冲量是阻力和工作周期时间乘积的积分,作用时间较长.为保证正向冲量大于反向冲量,要求正向瞬时推力要比反向阻力大得多,因此,必须提高爆震强度,提高推力壁压力 p_3 .其方法有:①小管起爆大管,利用在小管内产生爆震波来触发大管油气混合物,从而加速爆震波的形成;②增加气动阀堵塞比,减少气动阀反向漏气,有利于爆震波的强化;③增加扰流器堵塞比,扰流器与气动阀构成一个有缝腔室,这个腔室的密闭性越好(气动阀和扰流器的堵塞比越大),越

有利于激波的叠加和强爆震波的形成;④改善燃油雾化蒸发和掺混性能,通过合理的喷嘴、气动阀、蒸发器、扰流器的设计改善起爆的混气质量;⑤初温和恰当油气比,空气预热改善燃油的蒸发性能.恰当油气比能够产生最强的爆震波,贫油和富油都会削弱爆震波强度.

3.3 PDE 的工作频率

提高频率的方法有:①缩短 DDT 距离和 DDT 时间,必须改善燃油的雾化蒸发和掺混性能,在最短的距离内形成可燃混气;②合理的 PDE 有效长度;③提高冷态填充速度,可改善燃油的雾化掺混性能,但对点火和起爆不利.提高填充速度的方法有:①减小气动阀堵塞比,缺点是气动阀反向漏气严重,爆震效果变差;②减小爆震室内阻力,主要是减小扰流器堵塞比,缺点是爆震效果差,甚至不能产生爆震波,但冲击内阻减小;③采用渐缩进气道集气,缺点是对提高填充速度作用不明显,阻力大;④采用多爆震管同时工作,缺点是增加了系统的复杂性.

3.4 推力壁面积

有 2 种途径可增加推力壁面积:①多爆震管同时工作;②增大爆震管直径,即气动阀和爆震管面积同时相应增加,缺点是容易造成燃油的雾化蒸发,掺混性能差,爆震强度减弱,使 DDT 距离和 PDE 有效长度增加.

3.5 尾喷管的设计

喷管的型式可以是渐扩、渐缩和拉瓦尔 3 种,哪种型式对提高有效推力的效果更好,还需要实验验证,难度较大.

3.6 PDE 的内部和外部阻力

减小 PDE 的内外阻力是提高有效推力的常规方法.主要方法有:①避免使用旋转阀,旋转阀控制的 PDE 系统复杂,质量大,阻力增加,好处是反向漏气最小.②使用气动阀,结构简单,质量轻,缺点是存在反向漏气.为提高压力 p_3 ,设计单钝体气动阀,其推力壁面改为凹平面,设置周向进气气流通道.希望发展往复式气动阀,其按 PDE 工作频率上下往复运动.在爆震燃烧时,气动阀向上游运动,反向漏气减小;在填充状态时,在气动力的作用下,气动阀向下游运动,其关键是电嘴点火频率与气动阀往复运动频率的耦合.③减小爆震波和热高速气流对扰流片的冲击力.这种冲击力造成 PDE 强力内阻,但能够提高爆震强度.方法是减小扰流片堵塞比和扰流片前移动,缺点是爆震强度下降,甚至不能产生爆震波,这一矛盾构成 PDE 获得有效推力的核心问题.④合理的爆震

管直径、爆震管数目、进气道型式、尾喷管型式、气动阀和扰流器堵塞比也是减小阻力的方法,它们与提高爆震强度等又是矛盾的.

4 结 论

1)通过冷态测量 PDE 来流速度与填充速度的关系以及冲压阻力与来流速度的关系,热态测量了气动阀推力壁压力 p_3 ,计算得到正向瞬时推力比冲压阻力大得多,PDE 工作频率在 10 Hz 以上就应产生有效推力,而实际较难得到有效推力.

2)影响 PDE 产生连续有效推力因数是复杂的技术系统.要获得连续有效推力,必须满足下列条件:协调工作的稳定性,保证一个工作周期内正向冲量大于反向冲量,提高工作频率,增加推力壁面积,使用高效尾喷管,减小 PDE 内部和外部阻力.

参考文献:

- [1] KAILASANATH K. A review of PDE research-performance estimates[J]. AIAA 2001 - 0474.
- [2] BROPHY C, MONTEREY C. Detonation studies of JP-10 with oxygen and air for pulse detonation engine development[J]. AIAA 98 - 4003.
- [3] BROPHY C M, NETZER D W. Effect of ignition characteristics and geometry on the performance of a JP - 10/O₂ fueled pulse detonation engine[J]. AIAA 99 - 2635.
- [4] BROPHY C M, SINIBALDI J O, NETZER D W, *et al.* Operation of a JP-10/air pulse detonation engine[J]. AIAA 2000 - 3591.
- [5] BROPHY C M, WERNERT L S, SINIBALDI J O. Performance characterization of a valveless pulse detonation engine[J]. AIAA 2003 - 1344.
- [6] BROPHY C M. Detonation studies of JP-10 with oxygen and air for pulse detonation engine development[J]. AIAA 1999 - 3213.
- [7] MATSUOKA K, YAGETA J, YAMAGUCHI H. Study on an autonomous-drive valve system of pulse detonation engines[J]. AIAA 2008 - 4881.
- [8] 范 玮, 严传俊, 黄希桥, 等. 新概念脉冲爆震发动机研究的最新进展[J]. 飞机设计, 2003(2): 55 - 61.
- [9] 张义宁, 王家骅, 张靖周. 多循环吸气式脉冲爆震发动机推力直接测量[J]. 推进技术, 2006, 27(5): 459 - 462.
- [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): 549 - 552.