

文章编号: 1000-8055 (2008) 03-0401-05

爆震频率对脉冲爆震发动机引射性能影响的实验

黄希桥, 严传俊, 王治武, 范 玮, 蒋 波
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 采用汽油为燃料, 空气为氧化剂, 对多循环脉冲爆震发动机(PDE)加圆直形引射器的增推性能进行了实验研究. 实验采用力传感器法对爆震发动机加引射器前后不同爆震频率以及不同引射器长度下的平均推力进行了测量. 结果表明: 脉冲爆震发动机非稳态引射器可以提高系统的平均推力, 当爆震频率为 25 Hz 时平均推力增益最大, 可达 64.4%. 在一定频率下, 对直径一定的圆直管引射器存在着一个最佳长径比 4.58, 此时对应推力增益性能最好.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机 (PDE); 爆震频率; 推力增益; 实验研究

中图分类号: V231.2; V228.7

文献标识码: A

Effect of operating frequency on performance of pulse detonation engine driven ejector

HUANG Xi-qiao, YAN Chuan-jun, WANG Zhi-wu, FAN Wei, JIANG Bo

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A preliminary experimental investigation of the thrust augmentation performance of a round, straight ejector on a multicycle pulse detonation engine (PDE) was performed while using gasoline as fuel and air as oxidizers. The average thrusts of the PDE with ejector and without ejector were measured with thrust transducer at different detonation frequencies and different length-to-diameter ratios of the ejector. The experimental results indicate that ejector system alone can augment the average thrust obtained from the pulse detonation engine. The maximum value of the average thrust augmentation is found to be about 64.4% when the detonation frequency is 25 Hz. The optimal value of the ejector length-to-diameter ratio is 4.58 when the ejector inner diameter and the operation frequency are constant, which corresponds to the best thrust augmentation performance.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation engine (PDE); detonation frequency; thrust augmentation; experimental study

脉冲爆震发动机是一种利用脉冲式爆震波产生推力的新概念发动机. 由于 PDE 具有热力循环效率高, 结构简单, 单位燃料消耗率低, 推力范围广等潜在的优越性, 日益受到世界各国研究者的重视, 成为当前发动机领域的一大研究热点.

脉冲爆震发动机是一种高度非稳态装置, 如

果在其系统加上引射器将可以非常有效地提高脉冲爆震发动机的推力性能. 因为引射器的增推性能取决于主流和二次流间能量的有效转换. 过去关于引射器的大部分研究都是针对主流为稳态流而言, 然而一些实验研究表明向主流中引入非稳态流会提高能量的有效转换, 实现更好的增推作

收稿日期: 2007-03-12; 修订日期: 2007-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(50336030; 50106012); 教育部优秀青年教师资助计划和新世纪优秀人才计划(NCET-04-0960)

作者简介: 黄希桥(1973), 女, 陕西武功人, 副教授, 博士, 主要从事燃烧学的研究.

用. 这是因为稳态流引射器的能量转换取决于粘性剪切混合, 而非稳态流引射器则可以通过流动的卷吸作用获得一部分能量, 而它实质上是非粘性作用. 另外, 为完成能量转换, 一般来说非稳态流引射器相对于稳态流引射器来说要求的长度更短, 因此非稳态流引射器有可能获得一个更有效的结构设计^[1-3].

但是对于脉冲爆震发动机引射器, 由于其内部包含复杂的气动性能, 共振现象及流体间的相互作用, 所以使其工作过程变得非常复杂. 关于脉冲爆震发动机引射器的气动原理以及相关理论目前还不是很成熟, 这为脉冲爆震发动机引射器结构的合理设计以及实验研究带来一定的阻力. 近来, 虽然有此方面的一些探索性研究, 但大都集中在引射器结构、尺寸以及相对脉冲爆震发动机的位置展开的, 而且推进剂基本上采用的都是气态燃料与氧气, 且结果不尽相同, 甚至出现互相矛盾^[4-7]. 为了对脉冲爆震发动机引射器的增推性能有一个全面而详尽的了解, 本文主要研究了不同爆震频率、不同引射器长度等因素对脉冲爆震发动机引射增推性能的影响, 并获得了第一手实验数据.

1 试验装置

1.1 实验装置

带有引射器的脉冲爆震发动机原理性试验模型装置示意图如图 1 所示, 由一个火箭式脉冲爆震发动机和一个引射器组成, 其中火箭式脉冲爆震发动机是一个独立的系统, 它由供油、供气系统, 爆震点火及频率控制系统, 混合室, 点火段, 爆震室, 压力测量系统以及数据采集系统等组成. 模型试验器内径为 60 mm, 总长 1.6 m. 点火系统为一般汽车发动机用磁控高能无触点电子点火器, 点火频率用频率信号发生器控制, 点火能量小于

50 mJ. 实验采用汽油为燃料, 空气为氧化剂. 供气、供油由相应的调节阀控制并由相应的流量计来测定其流量. 在混合室头部, 供油系统采用气动喷嘴, 空气采用对撞轴流式进气, 这有利于燃料的雾化及其与空气的均匀掺混. 在推力壁处(位置 0)放置一压力传感器, 沿轴向(位置 1, 位置 2)分别放置了 2 个压力传感器来测量爆震室内的压力. 压力用压电式压力传感器来测量, 型号为 CY-YD-205, 压力范围为 0~ 30 MPa, 响应时间为 2 ms, 自振频率大于 200 kHz, 测量误差为 $\pm 7.5 \text{ mV}/10^5 \text{ Pa}$. 推力采用力传感器直接测量法, 选用具有零频响应的压电式力测量系统来完成. 压电式力测量系统由压电式力传感器、专用连接电缆和单通道电荷放大器组成. 力传感器的型号为 9331B, 固有频率为 45 kHz, 刚度为 $1 \text{ kN}/\mu\text{m}$. 脉冲爆震发动机和引射器分别通过各自的安装座固定在动架上, 而且在实验中, 发动机与引射器始终保持在同一条中心轴上.

1.2 引射器的设计

研究表明脉冲爆震发动机主排气流与引射二股气流能否完全混合是影响引射器工作性能的一个重要因素. 如果混合不完全, 增推性能就会受到各种损失的影响, 而混合效果则取决于引射器的结构尺寸. 影响非稳态引射器性能的结构参数很多, 其中包括引射器与发动机的直径比, 引射器与发动机出口的相对位置, 引射器入口型面的结构类型以及引射器的长度等参数. 但是当爆震频率一定时, 对于稳定工作的脉冲爆震发动机, 其排气射流的品质是一定的^[8-9].

目前, 有关脉冲爆震发动机引射器还没有形成系统的设计方法, 非稳态引射器的设计方法也很少. 这里根据实验经验设计出的引射器结构如图 2 所示, 它由两大部分组成, 进气唇口段和混合

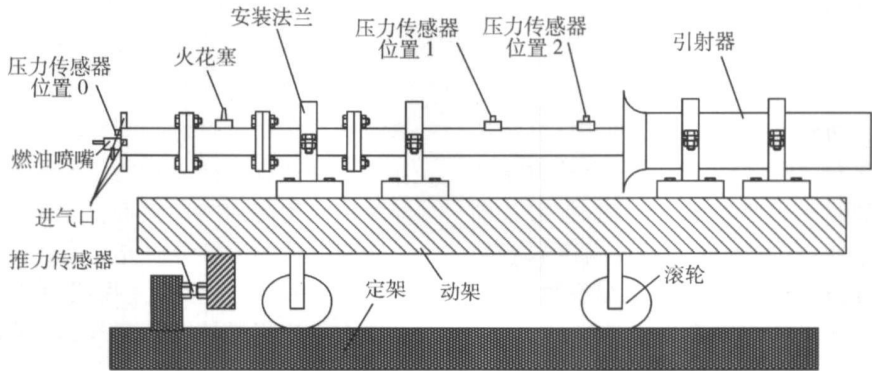


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental arrangement

段. 其中混合段由不同长度的直管通过法兰连接, 以满足引射器不同长径比 L/D 的要求. 引射器的长径比是一个关于引射器长度的无量纲参数, 其中 L 为引射器的长度, D 为引射器的内径. 在进行不同爆震频率实验时, 引射器内径为 170 mm, 长度为 950 mm; 在不同长径比实验中采用的引射器内径为 120 mm, 引射器总长度可变. 在两种实验中, 引射器入口均为一收敛喇叭口形状, 其唇口半径均为 50 mm.



图 2 引射器结构图
Fig. 2 Schematic of the ejector structure

2 实验方法

为了取得有用的, 可比较的数据点, 首先进行 PDE 在加引射器前的基准实验. 这些数据可以作为加引射器后的参考点, 从而和实验所做的各种工况下的圆直形引射器推力增益实验数据相比较. 平均推力的基准实验包括测试不同频率、相同当量比下的推力壁压力波形以及瞬态推力波形, 然后测试相同工况加引射器后的相应参数, 最后比较加引射器后的推力增益. 这里推力增益 θ 的定义为

$$\theta = \frac{F'_{aver} - F_{aver}}{F_{aver}}$$

式中 F'_{aver} 表示脉冲爆震发动机模型机加引射器后的平均推力, F_{aver} 表示未加引射器时的平均推力.

本实验所做的爆震频率包括 15, 20, 25, 30, 35 Hz, 化学当量比均是 1. 2, 填充度为 1. 引射器内径 D 与发动机内径 d 比一定, 为 2. 8. 在进行不同爆震频率的实验时, 引射器的长度及其位置均保持不变, 引射器入口与发动机出口始终位于一个垂直平面上. 推力的测量先测出整个系统的瞬态推力, 然后积分得出系统的平均推力.

在进行脉冲爆震发动机不同长径比引射器性能实验时, 为了剔除其它因素的影响, 爆震频率保持在 25 Hz 不变, 且不管引射器的长度如何变化, 引射器的入口始终位于发动机的出口处. 为了保证实验的可信度, 在进行任何一个工况实验时, 实验均重复至少 4 次, 如果前后平均推力的测量误差在 5 N 以内, 实验停止, 测量值取这 4 次的平均值作为最终的测量值.

3 实验结果与分析

脉冲爆震发动机的基准实验包括测取系统在加引射器前不同爆震频率下的爆震管壁、推力壁压力以及系统的瞬态推力. 结果表明爆震管壁的最大峰值压力接近 4 MPa, 最低压力均高于 1. 5 MPa, 说明实验均已形成充分发展的爆震波, 这也是判断脉冲爆震发动机稳定工作的重要前提之一. 结果发现当爆震发动机的当量比相同时, 系统的平均推力随着爆震频率的增加接近线性增加, 如图 3 所示.

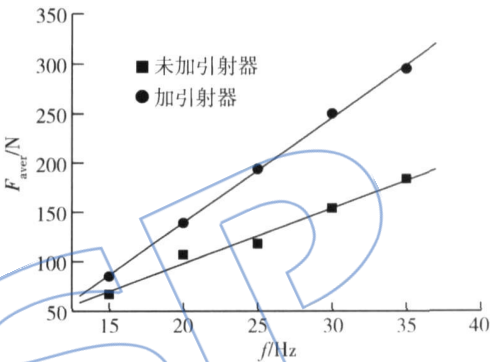


图 3 不同爆震频率下加引射器前后的平均推力
Fig. 3 Averaged thrust of the PDE with ejector and without ejector at different operation frequency

在进行完基准实验之后, 为脉冲爆震发动机系统加装引射器. 从引射实验现象发现, 发动机工作在 15 Hz 以下时, 从发动机周围的流场可以发现其引射量较小. 工作频率上升到 20 Hz 时, 引射器开始稳定工作, 引射量随频率的上升而明显上升. 尤其发动机工作在 30 Hz 和 35 Hz 高频时, 发动机的工作接近准稳态, 此时引射量稳定, 引射效果也相当明显. 实验结果说明脉冲爆震发动机引射器可以产生引射, 而且可以产生推力增益. 图 3 给出了加引射器前后平均推力随爆震频率的变化趋势. 从图中可以看出, 加引射器后, 系统的平均推力也是随着工作频率的提高接近线性增大, 但是推力增益增加的速率不同. 当爆震频率较低时, 引射器可以产生推力增益, 但是幅度较小, 比如在爆震频率 $f = 15, 20$ Hz 时, 它的推力增益只有 30% 左右; 随着爆震频率的增大, 它的引射增推效果逐渐变得明显, 当频率达到 30 Hz 时引射器的推力增益趋于稳定, 基本都在 60% 到 65% 之间. 实验结果发现脉冲爆震发动机引射器的工作过程可以分为三个阶段: (1) 当爆震波从 PDE 排出之

后,完全堵住引射器入口,在引射器入口处有一个剧烈的反向流;(2)引射器入口产生正引射;(3)稳定引射.在第一个阶段,爆震管中高速排出的高温高压气体急速膨胀,完全堵塞了二次流通道,引射器中没有可爆混合物时爆震管出口爆震波迅速衰减为一道强激波,随着激波的向后传播,原来混合段中的空气和部分上一循环排出的废气被压缩并加速向后运动,激波传出混合段以后,原来在混合段的气体都得到压缩并且获得了很高的速度,向后排;同时从爆震管排出的激波在引射器内壁反射前传,在引射器入口处出现剧烈的反流,如图 4 中的(a),之后引射进入第二个阶段,靠近引射壁面的高温气体形成一个涡环,涡环前面的气体从涡环和爆震管射流之间向后流动.引射器入口处的气体开始向后流动;在第三个阶段,稳定引射阶段,爆震管出口处的涡环向后移动并减弱,新鲜空气逐渐填满引射器,如图 4 中的(b).三个阶段作用的机理大不相同,第一阶段主要是激波反射前传,完全堵住二次流,在引射器入口处出现反流.第二阶段以射流的卷吸作用为主.第三阶段,在引射器内涡环逐渐减弱,外涵来流是在惯性和压差作用下继续向后推进.关于脉冲爆震发动机引射器工作过程数值模拟的结果也验证了上述现象^[8].

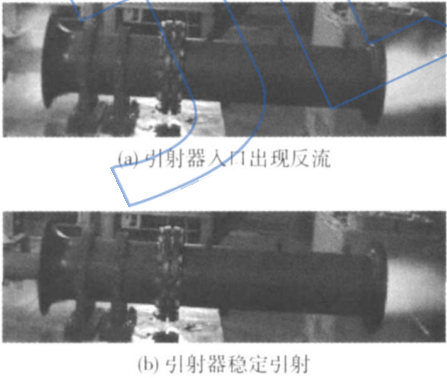


图 4 引射器工作时的两个明显阶段
Fig. 4 Two obvious phases of PDE operation

图 5 给出了当引射器的直径和进气口结构不变的情况下五种不同长径比引射器的增推性能.图中 5 种引射器的长度分别为 350, 450, 550, 750, 950 mm.因为实验采用的引射器的直径为 120 mm,所以它们对应的长径比 L/D 分别为 2.92, 3.75, 4.58, 6.25, 7.92.从图 3 可以看出,当引射器的长径比小于 4.58 时,引射器的推力增益是随着引射器长度的增加而增加,但是当引射器的长径比增大到 4.58 以后,引射器的推力增益幅度

不大,基本上保持在 57% 左右.这说明当引射器的直径一定时,存在着一个最佳长径比,当引射器的长度低于这个值时,推力增益随着长径比的增加而增加,但是当引射器的长径比大于这个值时,它的增推性能不会再有大的提高,相反此时反倒会增加引射器系统的重量.这些结果说明主流为非稳态的脉冲爆震发动机引射器可以有望在保证高性能的情况下进一步地缩短长度.

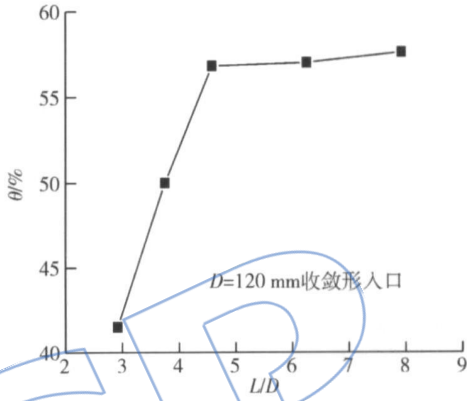


图 5 不同长径比引射器下的推力增益
Fig. 5 Thrust augmentations of the ejectors with different L/D

4 结 论

由于非稳态引射器和稳态引射器的引射原理不同,使得其引射性能存在较大差异.稳态引射器的能量转换取决于粘性剪切混合,而非稳态引射器中主流的引射原理实质上是非粘性的,其引射原理很复杂,引射器内的气流情况很难描述,但显然它也利用了流速增加后的次流动量.由于卷吸作用的影响,非稳态引射器的引射量一般要大于稳态引射器的引射量.另外,从能量转换的角度来说,非稳态引射器相对于稳态引射器来说要求的长度更短.这里对内径一定的直管引射器在不同爆震频率下的增推性能以及爆震频率一定不同长度的引射器进行了实验研究,得出以下结论:

- (1) 当爆震频率较低时,推力增益幅度较小,引射量也较小;可是随着爆震频率的增大,引射增推效果较明显,当频率达到 30 Hz 时引射器的推力增益趋于稳定,基本都在 60% 到 65% 之间;工作频率过低不能产生稳定的引射,低于 15 Hz 时引射量几乎没有;
- (2) 引射器的直径一定时,存在着一个最佳长径比 4.58,当引射器的长径比低于这个值时,推力增益随着长径比的增加而增加,但是当引射

器的长径比大于这个值时, 推力增益趋于稳定.

参考文献:

[1] Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines[R]. AIAA Paper, 2002-0470.

[2] Porter J L. A summary/overview of ejector augmentor theory and performance[R]. ATC Report No. R 91100/9CR-47A, Sept, 1979.

[3] Lockwood R. Interim summary report on investigation of the process of energy transfer from an intermittent jet to secondary fluid in an ejector type thrust augmenter[R]. Hiller Aircraft Report No. ARD-286, March 1961.

[4] Paxson D E, Wilson J, Dougherty K T. Unsteady ejector performance: An experimental investigation using a pulse jet driver[R]. AIAA Paper 2002-3915, July, 2002.

[5] Shehadeh R, Sarretto S, Lee S Y, et al. Experimental study of a pulse detonation engine driven ejector[R]. AIAA Paper, 2003-4972, July 2003.

[6] Luis G, Robert J, George L, et al. Experimental study of rounded ejector inlets for pulse detonation engines[R]. AIAA Paper, 2004-14342.

[7] Shehadeh R, Sarretto S, Lee S Y, et al. Thrust augmentation measurements for a pulse detonation engine driven ejector[R]. AIAA Paper, 2004-3398, July 2004.

[8] 黄希桥. 改善脉冲爆震发动机性能的实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

[9] HUANG Xiqiao. Exploratory investigation on improving the performance of pulse detonation engine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

[9] 李牧, 严传俊, 郑龙席, 等. 脉冲爆震发动机喷管实验研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(3): 13-17.

[9] LI Mu, YAN Chuanjun, ZHENG Longxi, et al. Experimental investigation on pulse detonation engine nozzles[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(3): 13-17.