

文章编号:1000-8055(2011)09-1981-05

六管吸气式脉冲爆震发动机试验

袁 成, 范 玮, 彭畅新, 张 群, 陈文娟, 严传俊
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 设计了单管内径为 68 mm 的六管吸气式脉冲爆震发动机试验系统, 以汽油为燃料, 空气为氧化剂, 成功地进行了多循环爆震试验. 结果表明: 六管均能形成多次可重复的爆震波; 各管之间的相互影响小; 共同工作的同步性好; 长时间工作起爆稳定. 研究结果对多管脉冲爆震发动机的工程应用具有较大的参考价值.

关 键 词: 脉冲爆震发动机; 六管; 共同工作; 相互影响; 同步性; 稳定性

中图分类号: V231.22

文献标志码: A

Experimental investigation on a six-tube air-breathing pulse detonation engine

YUAN Cheng, FAN Wei, PENG Chang-xin, ZHANG Qun,
CHEN Wen-juan, YAN Chuan-jun

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A experimental system for six-tube air-breathing pulse detonation engine (PDE) with the single tube's inner diameter of 68 mm was designed. Using gasoline as fuel and air as oxidizer, multi-cycle experimental study was successfully performed. The results show that all of the six tubes can obtain continuous detonation waves. The interaction among the tubes is not obvious and the engine can work synchronously and stably. The research results are very helpful to engineering applications of multi-tube PDE.

Key words: pulse detonation engine (PDE); six-tube; working together; interaction; synchronization; stability

脉冲爆震发动机 (pulse detonation engine, 简称 PDE) 是利用脉冲爆震波产生周期性冲量的非定常推进系统^[1]. 实现脉冲爆震发动机的多管并联工作方式具有重要的工程价值. 尽管可以用增大爆震室的体积、提高工作频率等方法来提高单管吸气式脉冲爆震发动机的平均推力, 但是在实际应用中还是多管并联的脉冲爆震发动机更加可行. 因为这种集成可以减小各个组件的不稳定性, 减弱整个系统的振动. Rasheed 等人^[2-5]致力

于八管脉冲爆震燃烧室驱动涡轮的研究, 试验测得最终可以使涡轮的转速达到 18 500 r/min. 国内李建中等人^[6-7]进行了煤油/空气三管气动阀式脉冲爆震发动机试验, 研究了共用进气道对爆震室充填混气的影响和不同工作频率下三管气动阀式脉冲爆震发动机的爆震波压力特性, 其三管依次按时序点火, 没有实现共同起爆. Ebrahimi 等^[8-9]、刘建文等^[10]、李建中等^[11]、黄玥等^[12]对共用尾喷管的多管脉冲爆震发动机进行了数值仿

收稿日期: 2010-10-23; 修订日期: 2010-12-18

作者简介: 袁成 (1987—), 男, 北京昌平人, 硕士生, 主要从事专业研究方向为燃烧与流动.

真,研究了多个爆震管流场之间的相互影响.由上述研究可总结出实现多管吸气式脉冲爆震发动机的共同工作,需要设计好爆震管的头部结构,减小爆震管之间的相互影响.

关于吸气式脉冲爆震发动机的多管共同工作特性国内鲜见公开报道.本文设计了六管吸气式脉冲爆震发动机,单个爆震管内径为68 mm、长度为1750 mm,头部使用气动阀.通过试验发现六个爆震管工作同步,爆震管之间的影响小,并能长时间稳定工作.研究结果为以后多管吸气式脉冲爆震用于涡扇发动机外涵加力燃烧室或者代替传统燃烧室驱动涡轮奠定了基础.

1 试验装置

六管吸气式脉冲爆震发动机试验是在单管吸气式脉冲爆震发动机成功设计试验的基础上进行的,其试验系统如图1所示,由六管吸气式脉冲爆震发动机、供气系统、供油系统、点火及频率控制系统、压力测量系统和数据采集系统等组成.六管吸气式脉冲爆震发动机由公共进气道、公共进气锥、分流器、六个单管进气道和六个爆震管组成.公共进气道、公共进气锥及分流器如图2所示.单个爆震管分为头部、混合段、点火段、爆震段等几部分,其内径为68 mm,长度为1750 mm.来流经过公共进气道,由公共进气锥整流,这样使来流均匀平稳地进入分流器,再进入六个单管的进气道,保证进入每个爆震管的气量基本相同.来流最后进入混合段与燃油混合,点火后经过由缓燃到爆震的转变(deflagration-to-detonation transition, 简称DDT),形成爆震波.爆震管设计特殊的进气结构,使得进气总压损失较小,并能有效地减小火焰前传,降低共同工作时各个爆震管之间的影响.爆震管的编号规定如下:最上面的爆震管为1号管,从爆震管尾部方向看,2~6号管为顺时针方向排列.供油系统的分油器如图3所示,加压后的燃油经燃油总管进入水平放置的分油器,分油器有一个环形的内部集油腔,燃油在集油腔内被分为六股,而后进入出油管供给每个爆震管.分油器与试验台架水平连接,减小重力对于燃油分配的影响,这样可以保证流出分油器每股的油量相同.实际上,由于分油器和每个爆震管供油接头的位置都是固定的,这使得从分油器出油管到爆震管供油接头的油管长度不一致,这会影响到燃油供给的均匀性.试验采用无阀自适应的方式控制油气的填充.供油、供气由相应的调节阀门控制并由

相应的流量计来测定其流量.在单个爆震管混合段出口安装火花塞,由点火及频率控制系统控制起爆.混合段、点火段及爆震段分别装有不同尺寸的 Shchelkin 螺旋增爆器.每个爆震管在距点火位置1350 mm的地方安装压力传感器,监测爆震形成的同步性.试验台包括定架和动架,定架上安装有一对线性滑轨,滑轨上的滑块可以沿轴向自由移动,滑块上安装动架用于固定发动机.

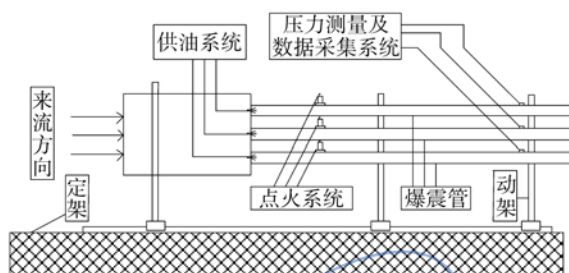


图1 六管吸气式脉冲爆震发动机试验系统示意图
Fig.1 Schematic of experimental system for six-tube air-breathing pulse detonation engine

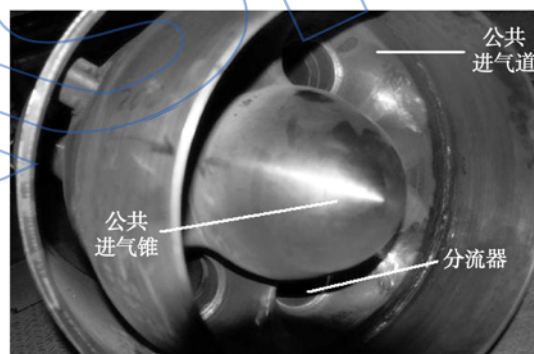


图2 公共进气道、公共进气锥和分流器示意图
Fig.2 Configuration of common inlet, common spinner and splitter

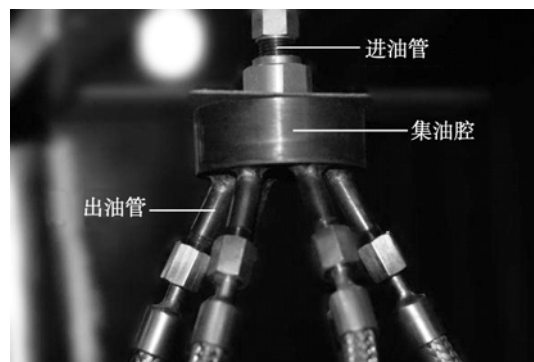


图3 分油器示意图
Fig.3 Configuration of oil distributor

2 试验方法

参考先前单管吸气式脉冲爆震发动机试验的气量与油量,设定六管共同工作时的气量与油量.由于试验室供气系统气量有限,而六管共同工作时需要的气量很大,试验室的气源难以匹配在更高频率工作时所需的气量,所以六管共同工作的频率定为 6 Hz. 为了实现多管的共同工作,调节点火及频率控制系统,保证每个火花塞同时按同一频率点火.在试验结束后用数据采集系统分析由压力测量系统得到的压力数据,分析爆震波的形成和多管共同工作的同步性与稳定性.

3 试验结果与分析

图 4 为六管共同工作 1 s 的压力波形图, $p_1 \sim p_6$ 依次表示 1~6 号爆震管的压力波形.图 5 为图 4 中第一个压力波形在时间方向的展开图.结合图 4 和图 5 可以看出每个爆震管在 1 s 内的平均峰值压力均超过了 2 MPa,压力上升沿时间为微秒量级,压力上升时间极短.由于六管吸气式脉冲爆震发动机是在单管吸气式脉冲爆震发动机大量试验成功的基础上设计的,所以在六管试验中每个管只安装了一个压力测量点,此测量位置为单管试验中爆震波形成的位置.在单管 6 Hz 试验中,爆震峰值压力相似的情况下,平均爆震波速为 1 250.5 m/s.这些说明每个爆震管都形成了充分发展的爆震波.

由图 4 中可以看出六管在每一工作循环几乎同时起爆,同步性好.在毫秒量级的压力波形展开

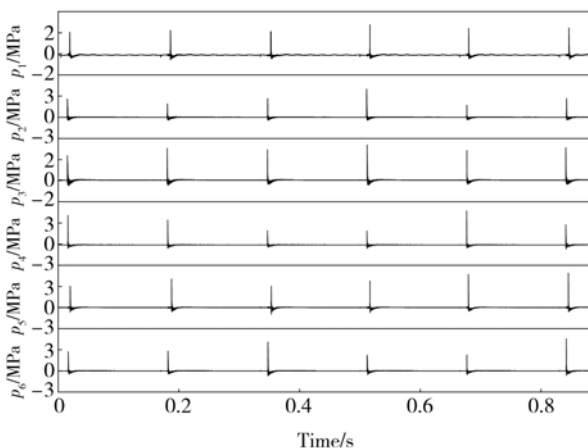


图 4 六管共同工作 1 s 的压力波形图

Fig. 4 Pressure history of six-tube working together within 1 second

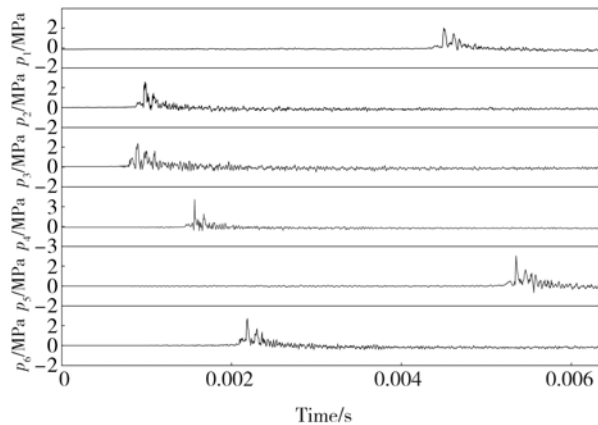


图 5 图 4 中第一个压力波形展开图

Fig. 5 First amplified pressure history of Fig. 4

图(图 5)中可以观察到六管共同工作时同步性的具体情况. 2, 3, 4, 6 号管先起爆, 而 1, 5 号管后起爆. 3 号管最先起爆, 而 5 号管最后起爆, 两者间隔约 4 ms. 造成此结果的原因可能是: 分油器不水平、各个油管长度不一, 导致进入每个爆震管的油量不会完全一致; 由于加工精度的原因, 由分流器进入六个爆震管的气量也会有微小差别; 各管 Shchelkin 螺旋增爆器的结构和安装精度也会有所不同, 这会导致 DDT 时间的差异. 图 6 为图 4 中最后一个压力波形在时间方向的展开图, 对比图 5 和图 6, 发现两图都是 2, 3, 4, 6 号管先起爆, 而 1, 5 号管后起爆. 最先起爆和最后起爆的两管相差的时间间隔相似. 虽然由于各种原因导致了各管起爆的同步性会有差别, 但是在整个工作时间范围内这种差别的变化却不大, 也就是六管共同工作的同步性变化不大. 这说明了爆震管头部

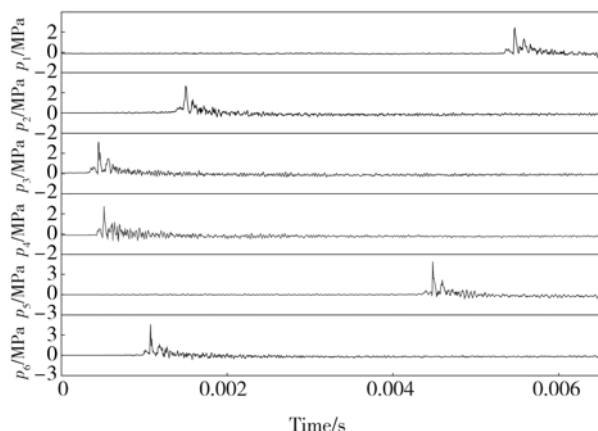


图 6 图 4 中最后一个压力波形展开图

Fig. 6 Last amplified pressure history of Fig. 4

设计合理,火焰反传对相邻爆震管的稳定工作影响小.在本试验的工作频率下,一个爆震循环有100多ms的时间,虽然有几毫秒的差异,但是可以认为六个爆震管共同工作的同步性是很好的.

图7为六管吸气式脉冲爆震发动机共同工作

20s的压力波形图.从图中可以看出发动机在6Hz工作时每个爆震管的压力波形连续稳定,平均峰值压力均超过了2MPa,压力上升沿为微秒量级,压力上升时间极短,说明在这20s内每个爆震管都形成了多次重复的爆震波.

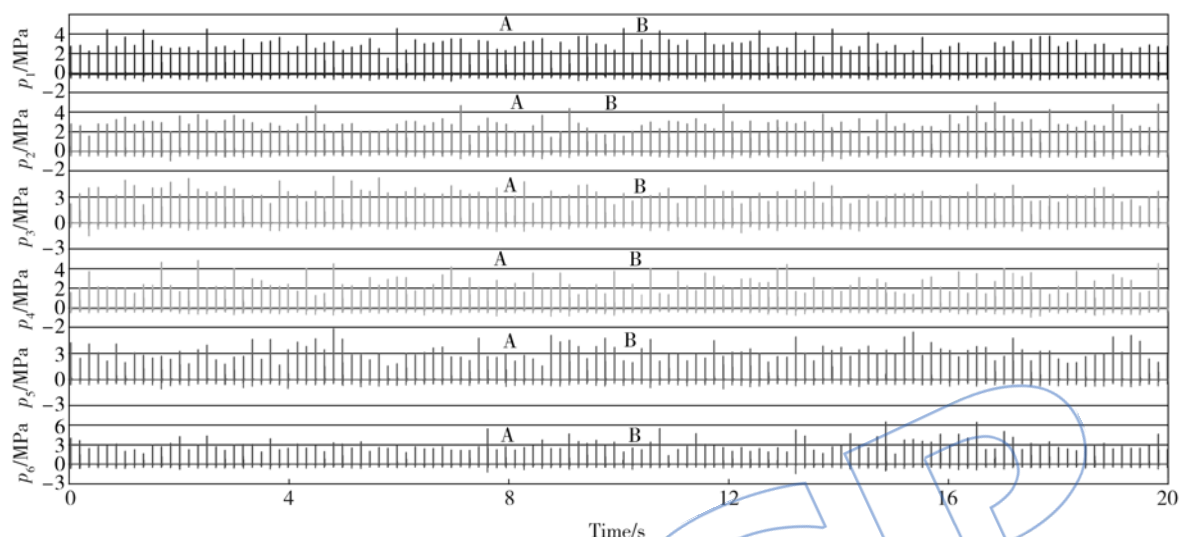


图7 六管共同工作20s的压力波形图

Fig.7 Pressure history of six-tube working together within 20 seconds

试验结果表明本文设计的六管吸气式脉冲爆震发动机长时间工作稳定.从图7中可看到,由于各管的油气配比和爆震管结构的差异,不同爆震管的平均峰值压力不同,但各管的峰值压力随时间变化却相对不大,这说明在六管共同工作时各管工作相对独立稳定,各管之间的相互影响较小.仔细观察图7可看到在长时间工作时六个爆震管压力波形每隔2~3s就会有一次起伏,例如图7中A,B列所示.这是因为供气系统气量有限,工作一段时间后供气压力降低,进入六管的气量会减小,而进入每个爆震管的油量却基本不变,这使油气配比发生变化,从而引起爆震波压力减小,在调整气量后爆震波压力恢复到减小前的状态.这说明了单个爆震管的工作范围宽,六管共同工作稳定,在气量有变化时还可稳定地形成爆震波.

图8为六管吸气式脉冲爆震发动机共同工作20s某一时刻的试验照片.由以上对压力的分析及图8可看出在这一时刻六管均有尾焰传出,爆震尾焰的颜色及形状相似,说明六管吸气式脉冲爆震发动机共同工作良好.

本文认为要想实现多管吸气式脉冲爆震发动机稳定同步的共同工作,每个爆震管的气量、油

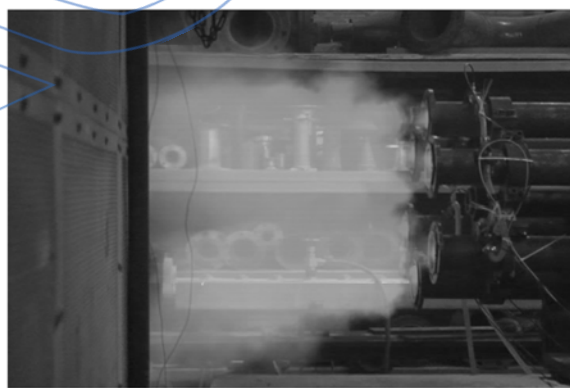


图8 六管吸气式脉冲爆震发动机共同工作20s某一时刻的试验照片

Fig.8 Experimental photo of six-tube air-breathing pulse detonation engine working together at one moment within 20 seconds

量、结构必须一致,并降低爆震管之间的相互影响.而且在多管工作频率提高后实现同步稳定工作会更加困难.所以在以后多管的设计过程中要注意以下几点:①通过设计新型共同进气结构,优化公共进气道、进气锥和分油器,使各管进气量一致;②优化供油系统的结构设计,保证每个爆震管获得的油量一致;③设计新型爆震管头部结构,尽

可能降低火焰的回传,减小爆震管之间的相互影响;④优化单管结构,缩短DDT距离,减小多管吸气式脉冲爆震发动机的质量。

4 结 论

1) 设计了单管内径为68 mm,长度为1750 mm的六管吸气式脉冲爆震发动机试验系统,以汽油为燃料,空气为氧化剂,成功地进行了多循环爆震试验。研究结果对于多管吸气式脉冲爆震用于涡扇发动机外涵加力燃烧室和代替传统燃烧室驱动涡轮具有一定的参考价值。

2) 在频率为6 Hz下对六管吸气式脉冲爆震发动机进行了长时间的试验,发现六管共同工作的同步性好;每个爆震管均能形成连续稳定的爆震波;各管之间的相互影响小;发动机长时间工作起爆稳定。

3) 为了保证多管共同工作良好,要优化进气结构,保证每个管的油气配比一致,降低共同工作时各管之间的相互影响。

参考文献:

- [1] 严传俊,范玮. 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.
- [2] Rasheed A, Furman A, Dean A J. Wave attenuation and interactions in a pulsed detonation combustor-turbine hybrid system[R]. AIAA 2006-1235, 2006.
- [3] Rasheed A, Furman A, Dean A J. Experimental investigations of an axial turbine driven by a multi-tube pulsed detonation combustor system[R]. AIAA 2005-4209, 2005.
- [4] Rasheed A, Furman A, Dean A J. Wave interactions in a multi-tube pulsed detonation combustor-turbine hybrid system[R]. AIAA 2006-4447, 2006.
- [5] Rasheed A, Furman A, Dean A J. Pressure measurements and attenuation in a hybrid multi-tube pulse detonation turbine system[R]. AIAA 2006-1235, 2006.
- [6] 李建中,王家骅,唐豪,等. 煤油/空气三管气动阀式脉冲爆震发动机[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2052-2058.
LI Jianzhong, WANG Jiahua, TANG Hao, et al. Kerosene/air triple-tube aero-valve pulse detonation engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2052-2058. (in Chinese)
- [7] 李建中,王家骅,唐豪,等. 煤油/空气三管脉冲爆震发动机共用尾喷管研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(5): 840-844.
LI Jianzhong, WANG Jiahua, TANG Hao, et al. Investigation on common nozzle of triple-tube pulse detonation engine with kerosene/air[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(5): 840-844. (in Chinese)
- [8] Ebrahimi H B, Malo-Molina F J, Merkle C L. Numerical investigation of multi-tube pulse detonation[R]. AIAA 2003-718, 2003.
- [9] Ebrahimi H B. Multidimensional analysis of multitube pulse detonation[R]. AIAA 2003-6975, 2003.
- [10] 刘建文,钟诚文,赵书苗. 多管脉冲爆震发动机流场数值研究[J]. 推进技术, 2007, 28(6): 674-678.
LIU Jianwen, ZHONG Chengwen, ZHAO Shumiao. Numerical investigation of multi-tube pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(6): 674-678. (in Chinese)
- [11] 李建中,王家骅,王春,等. 共用尾喷管多管脉冲爆震发动机数值模拟研究[J]. 空气动力学报, 2008, 26(1): 96-100.
LI Jianzhong, WANG Jiahua, WANG Chun, et al. Numerical investigation of multi-tube pulse detonation engine with common nozzle[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(1): 96-100. (in Chinese)
- [12] 黄玥,唐豪,李建中,等. 多管脉冲爆震发动机共用喷管特性的数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(4): 432-438.
HUANG Yue, TANG Hao, LI Jianzhong, et al. Numerical investigation on characteristic of multi-tube pulse detonation engines with different common nozzles[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(4): 432-438. (in Chinese)