

文章编号: 1000 8055(2010)05-0987-06

脉冲爆震发动机无阀工作对供给系统影响研究

邱 华, 严传俊, 熊 姹
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 通过测量无阀脉冲爆震发动机非定常工作对供气供油系统影响的压力数据, 对建立的燃油和空气管路数值仿真模型进行了验证, 基于建立的模型研究了供给系统的流量特性。研究表明, 供油供气系统受同一爆震管头部压力作用带来的影响是不同的, 这进一步导致供给系统气动开启初始充填的非定常特性。对于给定的供给系统, 这种非定常特性的持续时间是固定的, 当发动机工作频率增大时, 其占单个周期的比重越来越大, 最终导致脉冲爆震发动机的不稳定工作。

关 键 词: 无阀脉冲爆震发动机; 供给系统; 试验研究; 数值仿真; 匹配特性
中图分类号: V231.22 **文献标识码:** A

Research on the effects of valveless operations of pulse detonation engine on supply system

QIU Hua, YAN Chuan-jun, XIONG Cha
(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Experimental research on the effects of valveless pulse detonation engine on supply system was conducted. The pressures at different positions of pipe were measured, and also used to verify the numerical simulation models of fuel pipe and air pipe. Based on the numerical model, flow characteristics of the supply system were investigated. This showed that the influences of the same head pressure on the air and fuel supplies were different. And it caused unsteady filling when the supply system was opened because of differential pressure. The unsteady filling time was fixed and determined by the given supply system. When the working frequency of the engine became larger, the ratio of this time to one cycle time increased, that is to say, more influences of unsteady feeding were imposed on the operation characteristics of the engine. Therefore, the distribution of fuel concentration was more nonuniform and the working state of pulse detonation engine was instable.

Key words: valveless pulse detonation engine; supply system; experimental research; numerical simulation; matching characteristic

脉冲爆震发动机(pulse detonation engine, PDE)非定常的工作特点决定其燃料和氧化剂供应的非稳态特性, 根据其反应物流入燃烧室的方式, 可分为有阀和无阀两种结构^[1], 无阀脉冲爆震发动机一般特指至少氧化剂供应为无阀结构的发

动机。从现有脉冲爆震发动机结构来看, 当燃料供应为无阀式时, 氧化剂供应也为无阀式^[2-5] (全无阀结构); 当燃油供应为阀门控制时, 氧化剂供应有无阀^[6-8] 和有阀^[9-11] 两种方式。相比于无阀结构, 阀门结构可以有效阻挡爆震室内周期性高压

收稿日期: 2009 04 07; 修订日期: 2009 07 29
基金项目: 国家自然科学基金(50906072); 教育部博士点基金(2009531412005)
作者简介: 邱华(1978-), 男, 江西丰城人, 副教授, 博士, 主要从事脉冲爆震发动机的应用基础研究。

对反应物供应系统的影响, 由于其供给系统压力高, 流量主要由阀门开度和开启时间决定, 故可实现反应物供给流量的精确控制, 但另一方面却带来了结构及控制的复杂性. 对于无阀式结构, 燃料和氧化剂连续供入爆震室, 利用爆震室内周期性高压自适应控制反应物的供给与切断; 实际工作时, 发动机供给系统将受到爆震室内压力强烈影响^[2,5], 这种压力作用对氧化剂和燃料供给系统的影响程度也不同, 从而出现反应物供给是否匹配问题, 同时爆震室内爆震形成的高压气体会流入供给系统, 下一个循环开始的时候最初流入爆震室的是上一个循环流入供给系统的废气, 这段废气排空时间对发动机极限工作频率有很大影响^[2]. 对于供给系统受爆震室压力影响的问题, 特别是燃油供给和供气的匹配问题, 国内外研究甚少, 其主要原因是无阀供给系统供给压力较低, 瞬时流量受外界压力变化影响大, 目前没有现成的技术方法试验测量这种情况下高脉动瞬时流量的变化, 为此本文试验研究了PDE无阀工作对供油供气系统的压力影响, 并利用试验测量的压力数据对建立的无阀供给系统数值仿真模型进行了验证, 基于建立的数值仿真模型对爆震室与供给系统间、燃料与氧化剂间的压力及流量匹配特性进行了研究.

1 试验装置及试验方法

两相脉冲爆震发动机试验模型示意图如图1所示, 其由供油系统、供气系统、脉冲爆震发动机模型及压力测量系统组成. 模型试验器内径50 mm, 全长1 250 mm, 供油和供气均采用无阀自适应的控制方式. 试验采用汽油为燃料, 通过挤压方式实现对发动机的供油, 试验中油箱始终以高压氮气加压到 7.07×10^5 Pa (绝压); 油量通过燃油比例控制阀进行控制, 燃油比例控制阀后的油路为高压橡胶管, 流通直径5 mm; 供油系统采用离心式

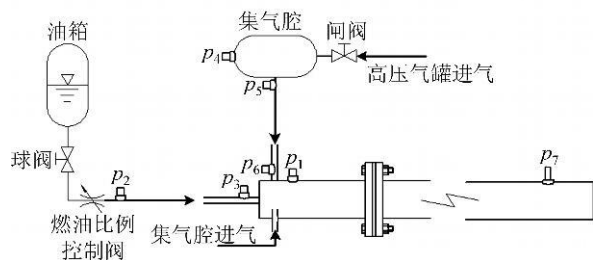


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

喷嘴, 喷嘴出口孔径1.3 mm. 发动机采用多管旋流式进气方式, 具体来说, 高压气罐中的空气首先经闸阀流入集气腔, 集气腔容积为2 020 cm³, 由集气腔引出4根高压橡胶管对发动机供气, 高压橡胶管流通直径8.5 mm, 进气孔紧靠推力壁内侧.

试验过程通过7个高频压力传感器对爆震室压力及管路压力变化进行实时测量, 试验采样频率200 kHz: p_1 测量爆震管头部压力; p_2 位于燃油比例控制阀出口, p_3 位于离心喷嘴前, p_2 与 p_3 间的距离4.2 m; p_4 用于测量集气腔的压力变化; p_5 位于气路高压橡胶管进口, p_6 位于高压橡胶管出口处, p_5 与 p_6 间的距离为1.8 m; p_7 位于PDE尾部, 距离推力壁1.1 m处. 为了便于对系统进行仿真验证及分析发动机工作特性, $p_1 \sim p_6$ 处均为压阻式高频压力传感器, 量程0~2 MPa; p_7 为压电式压力传感器, 用于测量爆震波压力.

2 控制方程及数值方法

2.1 液路仿真模型

对于燃油管路, 试验时图1中的球阀全开, 通过调节燃油比例控制阀来控制燃油流量, 此比例阀为节流孔型, 油箱内加压 7.07×10^5 Pa (绝压), 试验测量表明燃油比例阀上游压力几乎不受发动机工作影响, 其压力值略小于油箱压力, 故液路仿真模型由比例阀节流孔、液路及喷嘴节流孔组成, 比例阀节流孔上游为压力进口, 其值等于油箱压力; 喷嘴节流孔下游为压力出口边界, 其值近似取为爆震管头部压力 p_1 .

比例阀及喷嘴处理为零维节流孔模型, 其流量特性受上下游压差及流量系数决定. 对于燃油管路, 由于爆震室压力存在周期剧烈的压力脉动, 这必然会导致燃油管路内压力的急剧变化, 从而形成液压撞击, 为此液路模型必须采用瞬态液路方程来描述, 这一方法在国内外已很成熟, 广泛用于汽车电喷系统燃油管路.

当不考虑重力效应或管路水平放置时, 液体管路可以用如下一维非定常方程组描述:

连续方程

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{B}{\pi r^2} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\pi r^2}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + F(Q) = 0 \quad (2)$$

式中 p 为管路中某点瞬时压力; Q 为管路中瞬时体积流量($u\rho\pi r^2$); B 为液路有效弹性模量; r 为管路内径; ρ 为燃油密度; $F(Q)$ 为管路摩擦损失项^[12], 其包含稳态摩擦和瞬态摩擦。

通过采用特征线法将液路偏微分控制方程 (1) 和 (2) 变换成全微分方程, 然后对全微分方程积分得到便于处理的有限差分方程进行求解。

2.2 气路仿真模型

对于空气管路, 试验时通过调节图 1 中闸阀开度来控制空气流量, 试验测量表明, 集气腔压力 p_4 会略微受到发动机工作影响. 因此气路仿真模型由集气腔单元及空气管路组成, 以发动机冷态充填时 p_4 处的压力为集气腔单元初压及空气管路压力进口, 当由于管路空气回流导致集气腔内压力大于初始 p_4 压力时, 以集气腔单元压力作为管路压力进口边界; 当集气腔单元压力低于初始 p_4 压力时, 重新设初始 p_4 处压力为集气腔单元初压及空气管路压力进口. 空气管路出口为压力出口边界, 其值近似取为爆震管头部压力 p_1 .

与燃油管路相同, 空气管路也会受到爆震室内压力的剧烈影响, 故必须考虑管路中空气的压缩性。

因此模型所用的气路准一维质量、动量和能量守恒方程如下所示:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = H \tag{3}$$

其中 U 为求解变量, E 为无黏通量, H 为管路摩擦源项。

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho e_t \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ u(\rho e_t + p) \end{bmatrix}$$
$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\rho u^2}{2} \cdot \frac{4f}{D} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 e_t 代表单位总能; D 为气路的水力半径; f 为范宁系数. 对于气路控制方程, 其摩擦源项仅考虑管壁稳态摩擦, 即其仅是当地雷诺数和壁面粗糙度的函数^[13].

在有限体积单元上离散一维无黏 Euler 方程, 无黏通量采用 AUSM (advection upstream splitting method) 格式求解^[11], 非刚性摩擦源项采用三阶 TVD (total variation diminishing) Runge-Kutta 方法来离散^[14].

3 试验及仿真结果分析

3.1 试验及仿真工况

发动机试验工况如表 1 所示, 即平均当量比 1.27, 工作频率 20 Hz. 为获得供给系统仿真流场的压力边界及初值, 在同样工况条件下(空气及燃油流量相同), 发动机不点火供油冷吹获得了各测量位置处绝对静压, 如表 1 中冷态管路压力所示。

表 1 试验工况
Table 1 Experimental conditions

试验工况		冷态管路压力(绝压)	
平均当量比	1.27	p_2/MPa	0.260
空气流量/(kg/h)	258	p_3/MPa	0.258
工作频率/Hz	20	p_4/MPa	0.262
燃油流量/(ml/s)	8	p_5/MPa	0.228
		p_6/MPa	0.156

气路、油路仿真模型流场初始化时, 油路模型比例阀节流孔上游压力进口边界等于油箱压力 ($7.07 \times 10^5 \text{ Pa}$), 喷嘴节流孔下游压力出口边界为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$; 气路模型中集气腔压力为保持为表 1 中 p_4 压力值, 气路压力出口边界为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$. 边界取定后进行模型热态模拟前的冷态初场(不点火)求解, 并以表 1 中测量的试验压力及流量数据为参考, 对模型中的有关参数进行修正, 如管壁粗糙度、节流孔流量系数等, 直到仿真模型初场与试验冷态工况基本相同; 以热态试验下测量的扰动在液路中的传播速度确定液路有效弹性模量。

燃油喷嘴出口在 4 个气路出口围成的直径 50 mm 圆面中心, p_1 位置紧靠气路出口, 故在当仿真模型初始流场确定后, 以热态试验下测量的爆震管头部压力(图 1 中 p_1 压力)作为仿真模型油路和气路的公共出口边界, 进而获得仿真模型的热态模拟结果。

3.2 试验及仿真结果分析

3.2.1 PDE 非定常工作对供给系统的压力影响

在表 1 工作条件下测得图 1 中各位置处 ($p_1 \sim p_6$) 绝对压力曲线如图 2 所示. 当发动机点火后, 对于燃油管路, 爆震管头部压力脉动(W) 首先传播到 p_3 位置(A1), 经过 0.0058 s 左右, p_2 位置传感器测到此压力脉动(A2), 根据 p_2 与 p_3 位

置间距离知,压力脉动在燃油管路中的平均传播速度为 720 m/s 左右,此值要低于汽油中声波的传播速度(1 100 m/s 左右),根据管路中液体声速方程可知,这主要是由燃油管路受压膨胀而引起的;压力脉动继续向上游传播,当传到燃油比例阀节流孔时,由于节流孔面积远小于管路通径,压缩波在此回传,如果放大图 2 中 p_2 位置 A2 后的第一个压力脉动,此压缩波穿过 p_2 位置继续向下游传播,经过 0.006 s 左右压缩波传到 p_3 位置(A3),当此压缩波继续向下传播到喷嘴时,由于喷嘴节流孔作用,喷嘴将向上游反射压缩波,一段时间后 p_2 位置传感器也测出了这一脉动(A4),此后压缩波仍将在管路中来回振荡,直至管路摩擦将其衰减至尽.

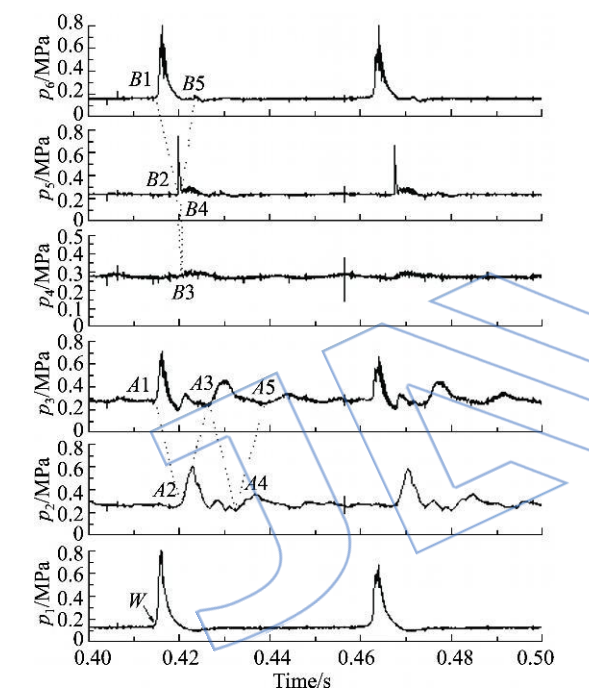


图 2 试验测量获得的各位置处压力曲线(绝压)

Fig. 2 Experimental pressure histories at $p_1 \sim p_6$

对于空气管路,爆震管头部压力脉动(W)首先传播到 p_6 位置(B1),管路中空气经此压缩波后压力升高,压缩波的传播速度也将连续增加,波头传播速度低,波尾传播速度高,最终在管路某处此压缩波将形成运动激波,从压力曲线可以看到,经过 0.0047 s 左右,一道运动激波通过 p_5 位置(B2),此压缩波在管路中的平均传播速度为 380 m/s 左右;当空气管路进口空气开始向集气腔回流时,集气腔压力略微上升(B3),当空气回流停止时,集气腔内压力高于冷态充填时的压力,重新充填开始,从 p_5 位置压力曲线可以看到这一变化

(B4),这一变化最终影响到 p_6 位置(B5).比较波在两种管路中的传播可以看到,由于燃油在管路中的平均流速远低于空气管路中空气流速,其受到的摩擦损失相应较小,同时燃油管路两端节流孔的存在,使得燃油管路中压力脉动影响时间要远长于空气管路.

图 3 也给出了同样工况下以试验测量 p_1 处压力为管路出口背压仿真计算的管路压力曲线.从图中可以看到:仿真计算的压力波峰值要略低于试验测量结果;波与波间发动机重新充填时(如 0.4, 0.45 s 处)各位置的绝对静压与试验测量结果基本一致;在波形特征上,如 p_2 和 p_3 处压缩波在管路的来回振荡及集气腔对 p_5 处压力影响,仿真结果也与试验测量结果吻合.进一步仿真表明,管路材料的杨氏弹性模量对压力波的传播速度、管路粗糙度对压力波在管路振荡时间及集气腔体积对 p_5 位置 B4 后波形都是有影响的.

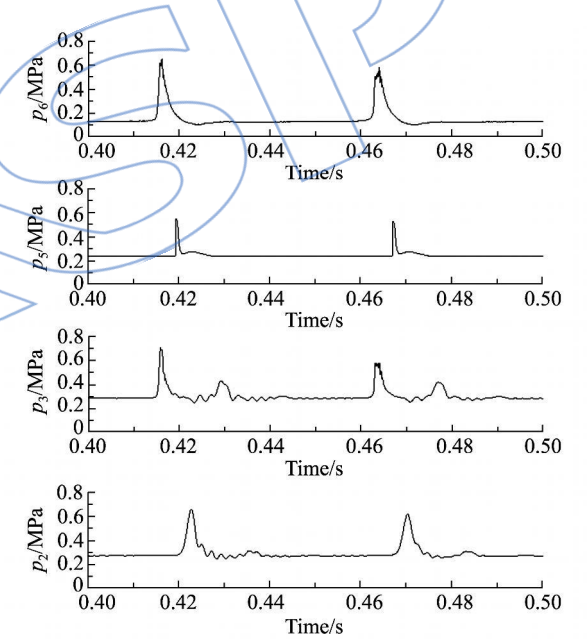


图 3 数值仿真得到的各管路位置处压力曲线(绝压)

Fig. 3 Simulated pressure histories at different positions

3.2.2 压力脉动影响下供给系统的流量特性

脉冲爆震发动机非正常工作会对供给系统产生压力脉动影响,在压力脉动影响下,供给系统的流量就会发生变化,非稳态流量的测量可以根据节流孔或出口上下游压力差,并利用准稳态假设来获得,从前面试验与仿真结果对比分析可以看到,针对本试验系统建立的数值仿真模型可以较准确的反应供给系统的工作特性,因此这里以该模型为基础来研究发动机工作对供给系统流量特

性的影响。

在仿真计算图 3 所示的压力曲线时, 模型也计算了空气和燃油管路出口的瞬时流量, 以表 1 中测量的空气流量 258 kg/h、燃油流量 8 ml/s 分别对其无量纲化, 可以得到图 4 所示同一时间段比流量为 m'_{air} 和 m'_{fuel} 随时间的变化特性, 对比流量从 0.4 s 开始积分可以得到图 5 比流量积分 m'_{air} 和 m'_{fuel} 随时间变化曲线。若设供给系统流量开始受爆震管头部高压脉动影响的时刻为 A 点, 由于爆震管头部压力升高, 流量开始减小, 0.001 2 s 后(图 5 中 O 点)发动机头部的燃烧废气开始回流入供给系统, 由于液体的流动惯性要远强于气体, 相比于气路, 燃烧产物在燃油管路内的回流量较小; 当 p_1 压力低于管路压力时, 燃烧废气回流停止, 由于管路中已有回流的燃烧废气, 供给系统初始充填的是燃烧废气, 距 A 时刻 0.005 s 后(B), 空气管路出口流量值达到平均流量大小 (258 kg/h), 根据图 5 的比流量积分可以看到, 此时空气管路流出的仍为燃烧废气, 空气管路中废气排空过程将持续到 E 时刻, 此后由于空气管路

中膨胀波的影响, 空气流量仍有一次脉动, 最终在 C 时刻空气流量趋于稳定。对于燃油管路, 由于压力脉动在管路中振荡时间要长于空气管路, 故直到 D 时刻, 燃油流量才趋于稳定, 各特征时间如表 2 所示。

表 2 特征时间
Table 2 Characteristic time

τ_{AO} / s	τ_{AB} / s	τ_{AE} / s	τ_{AC} / s	τ_{AD} / s
0.001 2	0.005	0.007	0.0013	0.001 8

根据供给系统瞬时出口流量可以获得出口瞬时当量比随时间的变化曲线, 如图 6 所示, 它直接反应了供给系统供油和供气的匹配特性。由前面分析可知, O 到 E 时间段没有空气流入发动机, 故当量比趋于无穷; E 时刻后空气开始充填发动机, 当量比稳定在 1.1 处极短时间, 随后由于空气管路中膨胀波的影响, 空气流量突然降低, 如图 4 中 C 点前空气流量的波谷, 而燃油流量基本稳定, 故当量比突然升高到 4; 其后空气流量趋于稳定, 而由于燃油管路中压力脉动的回传使得燃油流量突然升高, 从而出现当量比的第三次脉动, 当量比达到 2; 直到 D 时刻供给当量比趋于稳定, 即供给系统对发动机稳定的充填从 D 时刻才正式开始, 供给系统从受到出口压力扰动到再次稳定充填经历的时间为 0.001 8 s (τ_{AD}), 这个时间段的长短主要决定于压力脉动在管路中的传播速度、管路长度及摩擦阻力, 对于给定的供给系统, 这个时间段是固定的, 可以推知, 当发动机工作频率增大时, τ_{AD} 占单个周期的比重越来越大, 即供给的不稳定对发动机工作特性的影响也越来越大, 从而加大燃油分布的不均匀性, 最终导致脉冲爆震

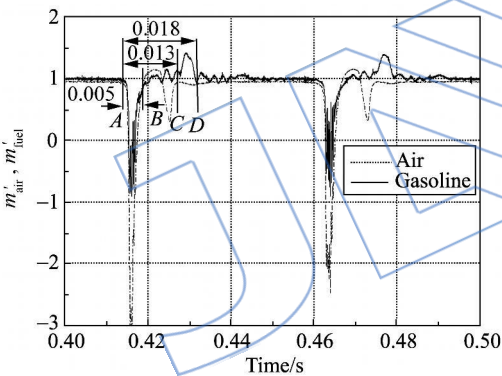


图 4 供给系统出口比流量随时间变化曲线
Fig.4 Specific flux histories at the exit of supply system

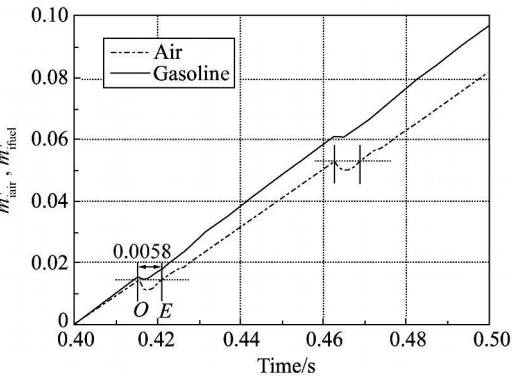


图 5 比流量积分随时间变化曲线
Fig.5 Integration histories of specific flux

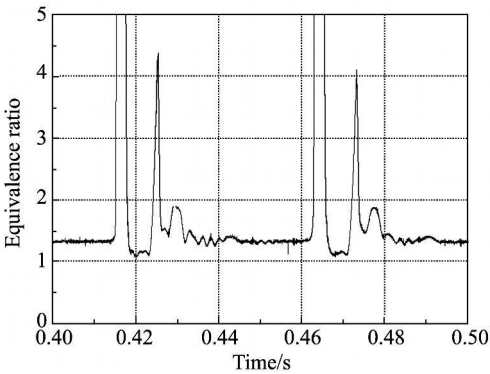


图 6 供给系统出口瞬时当量比随时间变化曲线
Fig.6 Transient equivalence ratio history at the exit of supply system

发动机的不稳定工作^[15], 缩短发动机 τ_{AD} 时间可以增大发动机最大工作频率。

4 结 论

无阀脉冲爆震发动机的稳定工作有耐于供给系统依于出口爆震室头部压力脉动自适应的开闭, 然而其开闭的时间取决于供给系统硬件及流体质。对于空气管路, 其受头部压力影响时间要小于燃油管路, 但燃烧废气回流量要远高于燃油管路, 从而推后空气供给的开始时刻; 燃油供给的开始时刻虽早于空气供给, 但由于压力脉动在燃油管路内的多次振荡, 使得初始燃油流量并不稳定, 供给系统的这种工作特性与数值仿真结果相一致。需要指出的是, 当供给系统受爆震室压力影响时, 由于节流孔流量系数的选取, 数值模型计算的瞬时流量在大小上可能与实际流量有些许差异, 但在变化趋势上完全反应了试验供给系统的气动特性。供给系统从受到出口压力扰动到再次稳定充填经历的时间长短主要决定于压力脉动在管路中的传播速度、管路长度及摩擦阻力, 对于给定的供给系统, 这个时间段是固定的, 当发动机工作频率增大时, 其占单个周期的比重越来越大, 最终导致脉冲爆震发动机的不稳定工作, 缩短发动机该时间段可以增大发动机最大工作频率。

参考文献:

- [1] Roy G D, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30: 545-672.
- [2] Baklanov D I, Gvozdeva L G, Scherbak N B. High speed deflagration and detonation: fundamentals and control [M]. Moscow: Elex KM Publish, 2001.
- [3] 李牧, 严传俊, 王治武, 等. 无阀两相脉冲爆震发动机循环工程试验分析[J]. 推进技术, 2007, 28(1): 97-102.
LI Mu, YAN Chuanjun, WANG Zhiwu, et al. Experimental analysis on cycle processes of two phase valveless pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(1): 97-102. (in Chinese)
- [4] 王治武, 严传俊, 李牧, 等. 吸气式无阀脉冲爆震发动机试验研究[J]. 试验流体力学, 2007, 21(1): 87-92.
WANG Zhiwu, YAN Chuanjun, LI Mu, et al. Experimental investigation of air breathing valveless pulse detonation engine[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007, 21(1): 87-92. (in Chinese)
- [5] 范育新, 王家骅, 曹梦源. 脉冲爆震发动机供油自适应规律研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1792-1797.
FAN Yuxin, WANG Jiahua, CAO Mengyuan. Research on principle of self fit control for fuel supply in pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1792-1797. (in Chinese)
- [6] Brophy C M, Werner S, Sinibaldi J O. Performance characterization of a valveless pulse detonation engine[R]. AIAA 2003-1344, 2003.
- [7] Dominique P, Alban P, Laurent S. Performance of a valveless air breathing pulse detonation engine[R]. AIAA 2004-3749, 2004.
- [8] 李建中, 王家骅, 范育新, 等. 煤油/空气气动阀式脉冲爆震发动机试验[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 802-806.
LI Jianzhong, WANG Jiahua, FAN Yuxin, et al. Experimental investigation on kerosene/air pneumatic valve pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 802-806. (in Chinese)
- [9] Anderson S D, Tonouchi J H, Lidstone G L, et al. Performance trends for a product scale pulse detonation engine[R]. AIAA 2004-3402, 2004.
- [10] Frankey B, Schauer F, Bradley R, et al. Evaluation of a hybrid piston pulsed detonation engine[R]. AIAA 2002-0474, 2002.
- [11] 邱华, 严传俊, 熊焱, 等. 脉冲爆震发动机多循环工作过程仿真及性能分析[J]. 推进技术, 2007, 28(3): 296-301.
QIU Hua, YAN Chuanjun, XIONG Cha, et al. Numerical simulation and performance analysis of multi cycle pulsed detonation rocket engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(3): 296-301. (in Chinese)
- [12] 蒋丹, 李松晶, 包钢. 伴随气泡和气穴低压管路瞬态的建模与分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2062-2067.
JIANG Dan, LI Songjing, BAO Gang. Modeling and analysis of low pressure pipeline transients accompanying gas bubbles and cavitation[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(12): 2062-2067. (in Chinese)
- [13] 左克罗 M J, 霍夫曼 J D. 气体动力学(上册)[M]. 王汝涌, 吴宗真, 吴宗善, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1984.
Zucrow M J, Hoffman J D. Gas dynamics: v. 1[M]. Translated by WANG Ruyong, WU Zongzhen, WU Zongshan, et al. Beijing: Defense Industry Press, 1984. (in Chinese)
- [14] Shu C W, Osher S. Efficient implementation of essentially non oscillatory shock capturing[J]. Journal of Computational Physics, 1988, 77(2): 429-471.
- [15] 黄希桥, 严传俊, 王治武, 等. 脉冲爆震发动机稳定工作性能的实验研究[J]. 推进技术, 2007, 28(6): 683-687.
HUANG Xiqiao, YAN Chuanjun, WANG Zhiwu, et al. Experimental study for stable operation performance of pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(6): 683-687. (in Chinese)