

脉冲爆震发动机气动阀阻力特性^{*}

郑殿峰¹, 王家骅², 王 波², 李建中², 范育新², 张会强¹, 林文漪¹

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084; 2. 南京航空航天大学 动力工程系, 江苏 南京 210016)

摘 要: 利用风机出口速度模拟脉冲爆震发动机 (PDE) 的不同飞行状态, 采用力传感器研究不同进气动压 (飞行速度) 下, 气动阀关闭和开启时 PDE 的阻力。试验表明: PDE 阻力随进气动压增加线性增加, 与飞行速度成平方关系。气动阀关闭时阻力最大, 对不同结构型式的气动阀, 在其开启时阻力不同。PDE 爆震室装扰流器时阻力增加, 不同气动阀在装同种扰流器时, 其对 PDE 的阻力影响程度不同, 安装整流栅有利于降低阻力。试验结果在保证 PDE 正常工作和产生一定推力的条件下, 对研究减小 PDE 阻力和提高有效推力及预估高速飞行时的阻力有重要参考价值。

关键词: 脉冲爆震发动机; 阻力; 气动阀; 扰流器

中图分类号: V235.22 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2004) 02-0152-04

Resistance characteristic of aerovalve of pulse detonation engine

ZHENG Dian-feng¹, WANG Jia-hua², WANG Bo², LI Jian-zhong²,
FAN Yu-xin², ZHANG Hui-qiang¹, LIN Wen-yi¹

(1. Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China;

2. Dept. of Power Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The resistance characteristic of pulse detonation engine (PDE) with the aerovalve in opening and closing states is investigated by using force sensor under the conditions of various flow dynamic pressure, which is simulated by the exit velocity of fan. The experimental results show that the resistance increase with the increase of dynamic pressure and fly velocity. The resistances get their maximum value when the aerovalve is in closing state. For the aerovalve with different structure, the resistances of PDE are different, too. The turbulence generator (TG) installed in detonation chamber leads to an increase of resistance. The installed streamlined lattice benefits in reducing the resistance. These results are useful for predicting the PDE's resistance when the PDE works under the high speed and induces some thrust.

Key words: Pulse detonation engine; Drag; Pneumatic valve; Turbulence generator

1 引 言

脉冲爆震发动机(PDE)一般采用旋转阀和气动阀^[1~4]来满足间歇进气的要求。旋转阀可以保证反向流动漏气量降至最小(与旋转阀密封性能有关),但旋转阀外廓尺寸大、结构复杂及重量较重,不宜在小PDE推力样机上使用。而气动阀结构简单、重量轻,是一种有发展前途的间歇进气装置^[5~7]。

对冲压进气间歇工作装气动阀的PDE,在一个周期内,作用在其表面的力是比较复杂的,在进气过程

中,由于PDE存在内部阻力,因而产生和飞行器飞行方向相反的阻力,而在燃烧膨胀过程中气动阀关闭,所以PDE推力壁表面既受到和飞行器飞行方向相同的推力,又受到外表面相当于钝体和飞行器飞行方向相反的阻力,平均有效推力应为平均正向推力减去平均阻力。为了提高有效推力,除了设法提高正向推力外,还应尽量减小进气和气动阀关闭时的阻力。为此,本文在旋流式气动阀成功应用于PDE(即在PDE上产生稳定爆震波和产生一定推力)的基础上研究了PDE在不同进气动压(飞行速度)下,不同气动阀和扰

* 收稿日期: 2003-04-28; 修订日期: 2003-08-15。

作者简介: 郑殿峰 (1966—), 男, 高级工程师, 博士生, 研究领域为工业与航空动力燃烧。

流器产生的阻力。旨在满足 PDE 产生稳定爆震波的基础上,为减小 PDE 阻力,提高有效推力提供依据。

2 试验设备和方法

试车台如图 1 所示,由推力架和平台支架组成。平台支架上有导轨,推力架上装有滑轮,滑轮可沿导轨轴向自由移动,PDE 通过法兰固定在推力架上。气源由鼓风机提供,其动压头约为 1000mm(9800Pa)水柱,流量约为 1.5kg/s。鼓风机出口和 PDE 进口有一定距离,利用调节该距离和鼓风机风门不同开度,调节进气气流流量。用压电式推力计测量 PDE 的阻力。推力计安装在平台支架上,推力通过安装在推力架上的顶杆,作用在力传感器上,用数字推力表读数。利用调节顶杆和推力计之间距离调节风机出口和 PDE 进口之间的间隙,由于测量截面流场比较均匀,PDE 进口和出口动压和速度由单点皮托管测量,通过水柱压力计读数。

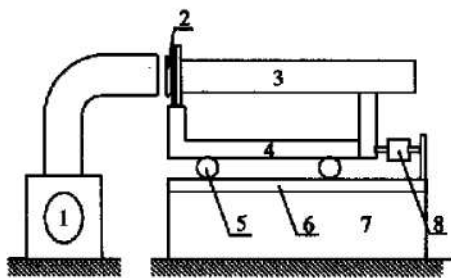


Fig. 1 Experiment setup on PDE resistance

1. Fan; 2. Aerovavle; 3. PDE; 4. Thrust shelf;

5. Pulley; 6. Guide rail; 7. Test rig; 8. Thrust sensor

爆震室内径 150mm,长 2.2m,内部可装扰流器和整流栅。爆震室头部为气动阀,研究采用的三种结构如图 2 所示,其进口直径为 200mm,出口直径为 150mm。A 件为内环双级轴向旋流和外环直流式气动阀,一级叶片出口角为 50°,二级为 30°;B 件为双级径向旋流式气动阀,一、二级叶片出口角均为 60°;C 件为单级轴向旋流式气动阀,叶片出口角为 60°。三种气动阀进口面积相同,出口面积不同。以上轴向旋流出口角定义为叶片出口和轴线夹角,径向旋流出口角定义为叶片出口和径向夹角。

整流栅轴向长度 25mm,外径为 148mm,采取正方形交叉网格形式,放置在气动阀后方。扰流器为圆环形,长 450mm,扰流片数为 10 片,堵塞比为 42%,扰流片间距 50mm。

试验在常温,常压下进行,进入 PDE 内的空气流量为 0.2~1.3g/s。试验中,通过调节风机风门开度

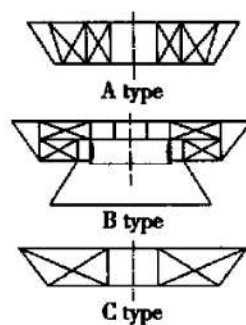


Fig. 2 Structure of various aerovalves

和风机出口与 PDE 气动阀的间距,使一部分空气绕流排出,从而改变进入爆震室内的气流流量。

3 试验结果与分析

3.1 PDE 安装 A 件时的阻力

图 3 为安装 A 件及装与不装扰流器的 PDE 在气动阀开启时,其阻力 R 与进口动压 Δp 之间的关系曲线。从图可知:改变风机出口与气动阀进口间距 δ ,所测得数据散布在很窄的范围内,说明用此方法半定性半定量地模拟 PDE 实际飞行状态的负推力是可行的。还可看出:(1) PDE 阻力随来流动压增加而增加,并呈现很好的线性关系,(2) PDE 装与不装扰流器时,阻力随 Δp 增加而增加,阻力增加程度相应扩大,(3) 装扰流器 PDE 阻力比不装扰流器的大,(4) 对图 3 曲线进行线性回归得出 PDE 阻力与进口动压方程式:

$$\text{不装扰流器时: } R = 23.74 \Delta p - 13.65 \quad (1)$$

$$\text{装扰流器时: } R = 26.98 \Delta p - 16.74 \quad (2)$$

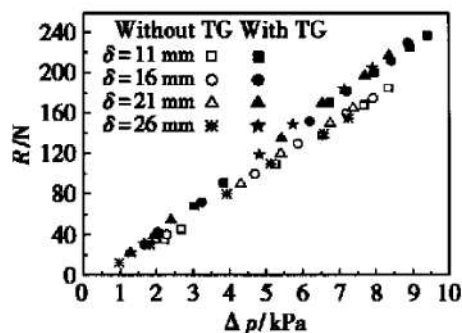


Fig. 3 PDE resistances for A type aerovalve with or without turbulent generator versus the flow dynamic pressure

理论上方程直线应通过坐标原点,方程的常数项是由于推力架和导轨摩擦力造成的,方程适用于 0~120m/s 飞行速度。由式(1)和式(2)还可以看出,在试验动压变化范围内,安装扰流器时 PDE 阻力总是大于相同动压下不安装扰流器时的阻力,且随来流动压的增

加, 安装扰流器所引起的阻力增加的程度也随之增大。即随着来流速度的增加, PDE 阻力呈平方关系增加, 因此阻力随 PDE 的飞行速度的增加有非线性的快速增加。

图 4 为安装 A 件的 PDE 在气动阀开启时, R 与爆震管出口速度 V_2 之间的关系曲线。从图可知: 在 PDE 相同出口速度下, 不装扰流器的阻力比安装的小, 随出口速度的增加, 减小的程度也随之增加。由于来流动压和速度的平方具有线性关系, 爆震管内的进气速度和飞行速度具有线性关系, 因此, 通过对图 4 曲线进行指数回归得出 PDE 阻力与爆震管出口气流速度方程式:

$$\text{不装扰流器时: } R = 0.024969 V_2^{2.093} \quad (3)$$

$$\text{装扰流器时: } R = 0.063998 V_2^{2.159} \quad (4)$$

从式(3), (4)可以看出: 阻力与出口速度都成近似的平方关系。安装扰流器时, 阻力与出口速度之间的关系, 不仅 V_2 具有较大的常数系数, 而且 V_2 的指数值也大。说明安装扰流器后, 阻力随出口速度的增加而增加的更快。

由于 PDE 进气时间和工作频率有关, 对于计算 PDE 推力 $R \sim V_2$ 曲线更为方便。

图 5 为安装 A 件的 PDE 在气动阀开启并安装和未安装扰流器及气动阀关闭时, R 与 Δp 的关系曲线。从图可知: 气动阀全关时阻力最大, 气动阀开启并安装扰流器时次之, 气动阀开启及不装扰流器时最小。如在进气动压为 9.4 kPa 时, 气动阀全关时的阻力为 270 N, 气动阀开启并安装扰流器时的阻力为 240 N, 而气动阀开启并不安装扰流器时阻力为 190 N。可见扰流器是产生阻力的一个主要因数。阻力特性研究表明: PDE 安装扰流器会使阻力系数大幅度增加, 从而使 PDE 阻力增加。

气动阀和扰流器阻力是为了实现气动阀的功能

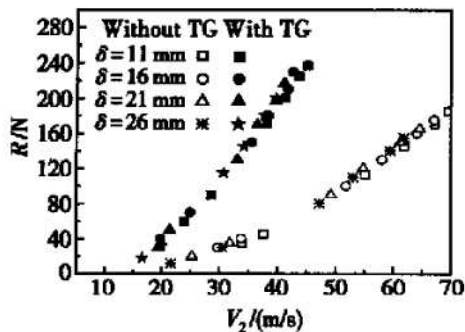


Fig. 4 PDE resistances for A type aerovalve with or without turbulent generator versus the exit velocities V_2

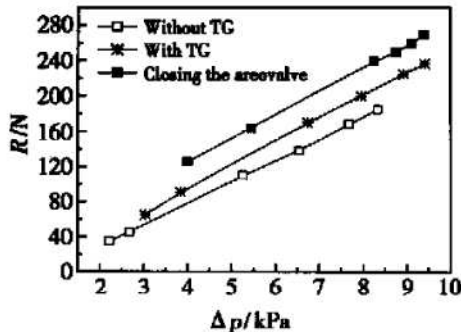


Fig. 5 PDE resistances for A type aerovalve versus the flow dynamics pressure

和强化燃烧所付出的代价, 气动阀和扰流器阻力由有效阻力和无效阻力构成, 设计中应尽量减少无效阻力, 以提高 PDE 净推力。

3.2 PDE 安装 B 件时的阻力

图 6 为安装 B 件时 R 和 Δp 的关系曲线。从图可知: 气动阀关闭时阻力最大, 气动阀开启且不装扰流器时阻力最小。与 A 件气动阀不同, 安装扰流器后, 且气动阀开启时 PDE 阻力与气动阀关闭的阻力接近。而不安装扰流器时, 同样条件下与安装扰流器相比阻力有明显下降。安装扰流器和整流栅时的阻力比同样条件下只安装扰流器的阻力还要小, 因此整流栅具有降低阻力的作用。

3.3 PDE 分别安装 A, B, C 件时阻力的比较

图 7 为安装 A 件和 B 件时 R 与 Δp 关系曲线, 从图可知: 在相同进口动压下, 气动阀关闭时 PDE 阻力最大, 安装 B 件的 PDE 在气动阀开启且不安装扰流器时的阻力比同样条件下安装 A 件时的阻力大。说明 A 件阻力比 B 件小。

图 8 为安装 A, B, C 件及扰流器的 PDE 在气动阀开启时的 R 与 Δp 关系曲线。从图可知: 在相同进气动压下, 气动阀关闭时阻力最大, 装扰流器后, 气动阀开启时 B 件和 C 件阻力值接近, 比气动阀全关时略小, 而 A 件阻力比 B 件和 C 件小的多些。

图 9 为安装 A, B, C 件和扰流器时 R 和 V_2 的关系曲线。从图可知: 在相同出口速度下, 安装 B 件的 PDE 阻力很大, C 件次之, A 件最小。爆震管内气流速度高, PDE 的工作频率相应提高, 使 PDE 的有效推力增加。显然, 要达到同样 PDE 工作频率, B 件和 C 件的阻力很大, 使 PDE 有效推力下降, 甚至不能产生有效推力。所以, 在同样进口动压下, 对不同的气动阀, 如果爆震管内气流速度高, 则提高了 PDE 的工作

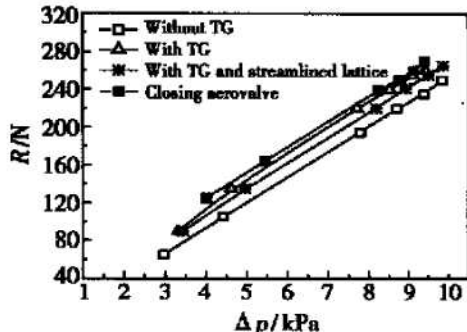


Fig. 6 PDE resistances for B type aerovalve versus the flow dynamics pressure

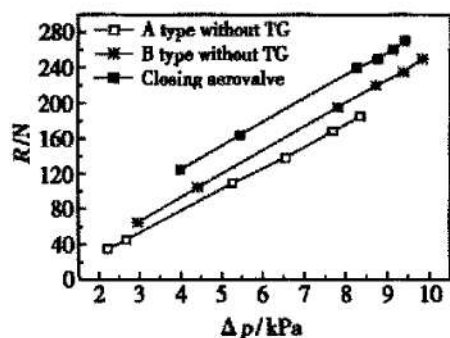


Fig. 7 PDE resistances for A and B type aerovalves versus the flow dynamics pressure

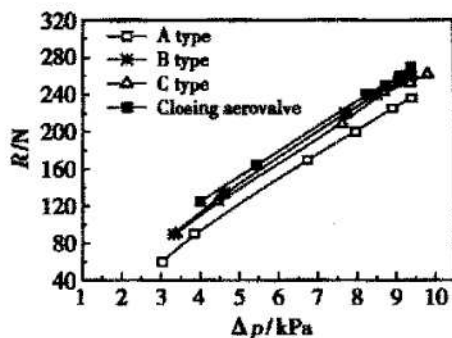


Fig. 8 PDE resistances for A, B and C type aerovalves with turbulent generator versus the flow dynamics pressure

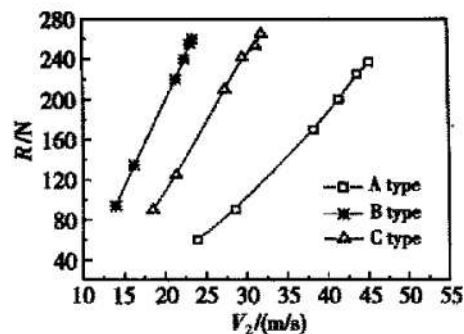


Fig. 9 PDE resistances for A, B and C type aerovalves with turbulent generator versus the exit velocities V_2

频率,同时又具有较小的阻力,那么就会获得更大的有效推力。

图10为PDE安装A, B, C件和装扰流器时, PDE飞行速度 V_1 与出口速度 V_2 的关系曲线。从图可知:在相同的PDE飞行速度下,安装A件时爆震管内速度最大, C件次之, B件最小。安装A件时爆震管内速度近似为 $V_1 \approx 5.3V_2$, 而C件为 $V_1 \approx 4V_2$, B件为 $V_1 \approx 2.7V_2$ 。说明安装A件比B件有利于提高爆震工作频率,其更适合PDE高速飞行和高爆震频率的工作状态。

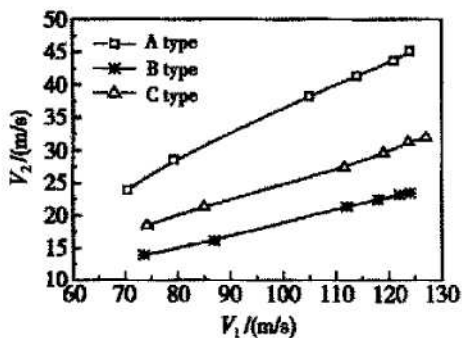


Fig. 10 Fly velocity V_1 for A, B and C type aerovalves with turbulent generators versus exit velocity V_2

4 结论

(1) PDE气动阀和扰流器阻力和飞行速度或爆震管内进气速度是平方关系, 这为计算有效推力提供依据。

(2) 气动阀阻力是其性能指标之一, 气动阀最主要

性能指标之一是冷态进气阻力小, 燃烧时反向漏气量小, 实现单向阀的功能。PDE外阻为无效阻力应尽量减少。

(3) 扰流器主要功能是强化燃烧, 加快火焰传播速度, 但是以增加PDE阻力和减小爆震管内的气流速度为代价的, 应减小无效阻力, 控制有效阻力和爆震管内的气流速度。

(4) PDE气动阀和扰流器设计应在满足PDE稳定工作产生理想毛推力的条件下减小阻力, 以达到PDE有效推力最大。

参考文献:

- [1] Hinkey J B. Rotary-valved multiple cycle pulse detonation engine experimental demonstration[R]. AIAA 97-2746.
- [2] Bussing T R A. A rotary valve multiple pulse detonation engine (RVMPDE) [R]. AIAA 95-2577.
- [3] Hinkey J B. Operation of a flight-scale rotary-Valve multiple combustor pulse detonation engine[R]. AIAA 98-3881.
- [4] Bertin J. Aerodynamic valve[P]. U. S Patent No. 2, 670, 011 (1954).
- [5] Joseph V Foa. Elements of flight propulsion[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1960.
- [6] Kentfield J A C. The potential of valveless pulsejets for small UAV Propulsion Applications[R]. AIAA 98-3879.
- [7] Bussing T RA. Pulse detonation engine preliminary design considerations [R]. AIAA 94-3220.

(编辑: 朱立影)