

带收敛喷管脉冲爆轰发动机的性能分析

王研艳, 翁春生

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

[摘要] 为了研究带收敛喷管的脉冲爆轰发动机 PDE(Pulse Detonation Engine)的推力性能, 建立了一维欧拉方程, 应用 CE/SE 方法数值求解。计算分析发现, 收敛喷管对脉冲爆轰发动机的内流场产生了重要影响; 当喷管收敛角度小于 8° 时, 带收敛喷管的脉冲爆轰发动机的冲量和平均推力比不带喷管时大; 带小收敛角度喷管的 PDE 其平均推力随喷管长度增加而增大; 带大收敛角度的 PDE 的平均推力随喷管长度增加先增大后减小。研究结果对 PDE 喷管的设计具有理论指导和参考作用。

[关键词] 脉冲爆轰发动机, 收敛喷管, 收敛角度, 喷管长度, 发动机性能

[中图分类号] V231.3 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)04-0035-06

Analysis of Pulse Detonation Engines With Different Convergent Nozzles

Wang Yanyan, Weng Chunsheng

(National Key Lab of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract To evaluate the propulsive performance of Pulse Detonation Engine(PDE) with different convergent nozzles, the Euler equation is built and solved with CE/SE method. The results of numerical simulation of series of nozzles indicate that the convergent nozzles have an significant effect on the internal flow field of PDE, and that compared with PDE without nozzle, the one with convergent nozzle in a angle less than 8° provides higher impulse and average thrust. For a smaller angle convergent nozzle, the increasing length of nozzle leads to an augmentation on the average thrust of PDE, while for a larger one, the average thrust increases first and then reduces with the increasing length. Therefore, all results here provide some helpful theory guide and reference for the nozzle design of PDE.

Key words pulse detonation engine, convergent nozzle, convergent nozzle angle, length of convergent nozzles, the impulse of PDE

脉冲爆轰发动机是一种新概念的发动机。由于爆轰比燃烧的热效率更高, 爆轰推进概念的研究近十几年来得到极大的重视, 并取得了重要进展。而其他发动机一样, 发动机的轮廓尺寸、质量、材料、内部结构以及有效推力等, 在很大程度上由发动机的组合装置的气动方案所确定。因此对发动机喷管的气动研究, 以及其能让发动机增加多少推力, 引起了不少学者的兴趣。一般来说, 喷管是为了将前面装置中排出的气体所包含的热能, 通过在尾喷管中继续膨胀转变为动能, 以便获得尽可能大的推力, 从而提高发动机的推进性能。而在 PDE(Pulse Detonation Engine)中, 由于其脉冲爆轰过程的非定常性, 喷管的设计也就不如其他发动机那样简单。有关 PDE 喷管国内外进行了大量数值模拟和实验研究^[1-5]。Shmuel Eidelman^[1]等人通过数值模拟研究了带收敛、扩张、收敛扩张这 3 类喷管的脉冲爆轰发动机的性能。指出带收敛喷管的 PDE 的冲量比不带喷管的发动机的值要大。分析发现两种不同尺寸的收敛喷管中, 同样面积比(喷管出口面积与入口面积之比)下, 收敛角度较小, 长度较长的收敛喷管提供了更大的冲量值。V. E. Tangirala^[2]等人研究了不同飞行马赫数下带收敛扩张喷管的 PDE 的性能, 指出收敛扩张角度一定时, 扩大进出口面积比可以适当增大发动机的燃料比冲, 但不可能无限增大。王杰^[4]等人考虑了带收敛、扩张、以及收敛扩张喷管的 PDE 模型, 分析了这 3 种不同喷管对发动机性能的影响。指出带一定角度收敛喷管的 PDE 的各性能参数比不带喷管时均有提高。范玮^[5]等人对 3 类 10 种不同类型的 PDE 尾喷管进行了实验研究, 实验中分析

收稿日期: 2010-05-13

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20093219110037)。

通讯联系人: 翁春生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 兵器发射与推进技术。E-mail: weng@njnu.edu.cn

了各种不同尺寸喷管对性能的影响. 指出收敛喷管的收敛角度和长度存在一个对性能提高最有利的值. 但总体来讲, 由于 PDE 脉冲爆轰过程的内在非定常特性, 还没有一个被广泛认可的具有普遍规律性的理论依据和结论. 所以对尾喷管进行系统的研究对 PDE 应用具有重要作用. 本文采用 CE/SE 方法对带收敛喷管的脉冲爆轰发动机进行了数值计算, 分析总结出收敛喷管各参数对 PDE 性能的影响.

1 理论模型

1.1 物理模型

脉冲爆轰发动机的实际流动过程比较复杂, 为了使问题简化进行了如下假设: ①假设发动机内部的工作气体为理想气体, 内部之间无热传导, 且不考虑热辐射及耗散效应; ②假设 PDE 为一步化学反应过程; ③因为是单步循环, 考虑到反应速率很快, 所以假设发动机管壁与外界绝热; ④由于发动机爆轰管的管径远小于管长, 其流场中的轴向效应起主要作用, 假设发动机内的气体流动为变截面一维流动, 只考虑各参数随轴向的变化情况.

1.2 数学方程

由以上假设得到带喷管的 PDE 一维流动欧拉方程如下:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial R}{\partial x} = H,$$

(1)

式中, Q 为求解变量; R 为无粘通量; H 为源项, 具体如下:

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ E \\ \rho Y_f \\ \rho Y_{O_2} \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (\rho E + p)u \\ \rho u Y_f \\ \rho u Y_{O_2} \end{bmatrix}, \quad H = -\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 \\ (\rho E + p)u \\ \rho u Y_f \\ \rho u Y_{O_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ q \\ w Y_f \\ w Y_{O_2} \end{bmatrix}.$$

以上分别为质量、动量、能量和组分浓度守恒方程. 式中 ρ , u , E , Y_k , Y_{O_2} , A , q , w 分别是密度、速度、单位总能、燃料的质量分数、氧气的质量分数、横截面积、反应生成热、组分生成速率.

其中, 单位总能由下式算得:

$$E = C_v T + \frac{u^2}{2} = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} + \frac{u^2}{2}.$$

(2)

另假设化学反应一步完成, 化学反应质量生成率由 Arrhenius 方程来决定, 表达式为:

$$w_k = -K \rho Y_k \exp(-E^+ / RT),$$

(3)

式中, K 是反应速率指前因子; E^+ 是单位质量反应物活化能; Y_k 是质量分数.

1.3 评价参数

在 PDE 性能评价模型中, 通常采用平均推力、冲量、比冲、燃料比冲作为其性能参数来对发动机进行定量评价^[6, 7].

考虑到本文讨论的是带不同结构收敛喷管的 PDE, 在计算过程中喷管形状变化比较大, 不能简单地通过对作用在推力壁上的瞬态力积分来决定冲量. 所以文中只在定性分析时利用推力壁压力变化情况分析带喷管的 PDE 内部的波系情况, 而在定量分析时则根据发动机进出口动量变化以及压力差来确定冲量, 瞬时推力公式如下:

$$F(t) = q_{m,e}(t)u_e(t) - q_{m,i}u_i + (p_e(t) - p_o)A_e,$$

(4)

其中, $q_{m,e}(t)u_e(t)$ 为 t 时刻发动机 (含喷管) 出口截面上气流的动量; $q_{m,i}u_i$ 为发动机入口截面上的流体的动量, 这里取 0 ; $p_e(t)$ 为 t 时刻发动机出口截面处压力; p_o 为环境压力; A_e 则为发动机出口截面积 (即喷管出口截面积).

平均推力定义为:

$$F_{\text{avg}} = \frac{\int F dt}{t}.$$

(5)

冲量:

$$I = \int F dt. \quad (6)$$

比冲:

$$I_{sp} = \frac{I}{mg} = \frac{I}{\rho Y_i V g}. \quad (7)$$

燃料比冲:

$$I_{spf} = \frac{I}{m_{if} g} = \frac{I}{\rho Y_i V g}. \quad (8)$$

其中, ρ 为初始填充混合物的密度; V 为发动机体积; g 为当地重力加速度.

2 数值计算方法

2.1 CE/SE方法

本文采用 CE/SE方法来求解模拟^[489]. 该方法最早由 NASA 科学家 Chang 提出, 因为这种方法, 计算精度高、捕捉间断能力强; 与其他迎风格式相比, 无需黎曼分解. 所以学者在对爆轰波、激波、声波及多种复杂波系相互作用进行数值模拟时经常采用这种方法. 关于此方法的具体推导, 文献[48-10]中有详细介绍, 这里不再重复说明, 此处只给出计算方程(1)的数值计算格式, 具体如下:

$$(Q)_j^n - (H)_j^{n-1/2} \frac{\Delta t}{2} = [(Q)_{j-1/2}^{n-1/2} + (Q)_{j+1/2}^{n-1/2} + (S)_{j-1/2}^{n-1/2} - (S)_{j+1/2}^{n-1/2}] / 2, \quad (9)$$

其中,

$$(S)_j^n = (\Delta x / 4) (Q_x)_j^n + (\Delta t / \Delta x) (R)_j^n + (\Delta t^2 / (4 \Delta x)) (R_t)_j^n, \quad (10)$$

$$R_t = \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial R}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial t} = A Q, \quad (11)$$

式中, $A = \frac{\partial R}{\partial Q}$ 为雅可比系数矩阵.

由式(1)和式(10)有:

$$Q_t = f(Q_x) = H - A Q_x, \quad (12)$$

而 Q_x 可用中心差分求解, 具体如下:

$$(Q_x)_j^n = [(Q_x^+)_{j-1/2}^n + (Q_x^-)_{j+1/2}^n] / 2, \quad (13)$$

$$(Q_x^\pm)_{j-1/2}^n = \pm [(Q)_{j\pm 1/2}^n - (Q)_j^n] / (\Delta x / 2), \quad (14)$$

$$(Q)_{j\pm 1/2}^n = (Q)_{j\pm 1/2}^{n-1/2} + (\Delta t / 2) (Q_t)_{j\pm 1/2}^{n-1/2}. \quad (15)$$

出现间断流场时, 对(13)进行如下修正^[6]:

$$(Q_x)_j^n = \frac{|(Q_x^+)_{j-1/2}^n|^\alpha |(Q_x^-)_{j+1/2}^n| + |(Q_x^-)_{j-1/2}^n|^\alpha |(Q_x^+)_{j+1/2}^n|}{|(Q_x^+)_{j-1/2}^n|^\alpha + |(Q_x^-)_{j-1/2}^n|^\alpha}, \quad \alpha = 1, 2 \quad (16)$$

2.2 源项处理

方程(1)中出现了化学反应的源项, 考虑到化学反应的特征时间比对流项的特征时间小得多, 方程中源项是刚性的, 因此在 CE/SE方法中须对源项进行特殊处理^[48]. 目前主要采用两种方法, 一种是牛顿迭代法, 另一种是四阶的龙格-库塔法. 这里因为化学反应比较简单, 所以可以采用牛顿迭代法. 具体方法是先不考虑源项, 用 CE/SE方法求解 $(Q)_j^n$, 然后将解得的值作为初值来求解方程组 $\frac{dQ}{dt} = S$, 此方程组的求解运用牛顿迭代法来完成.

3 模拟结果及分析

文中数值模拟采用的发动机是爆轰管长 1.3 m, 直径 0.06 m 的 PDE, 选取的喷管是不同尺寸的一组收敛喷管, 其入口直径都等于爆轰管的直径, 出口直径由收敛角度和喷管长度惟一确定. 首先保持喷管长度一定, 改变喷管的收敛角度从 $1^\circ \sim 15^\circ$; 再保持收敛角度不变, 改变喷管长度从 0.05 ~ 0.2 m. 模型采

用丙烷作为燃料, 氧气作为氧化剂, 填充率为 1

一般对收敛喷管来讲, 决定其形状的参数有 3 个, 喷管的收敛角度、长度、以及 AR (Area Ratio) 值, 但这 3 个值是相互影响的, 确定其中的任意两个, 另一个也就被确定了. 所以本文中分别改变其中两个量—收敛角度和喷管长度, 来研究喷管对 PDE 的性能影响.

3.1 收敛角度对推力壁压力曲线的影响分析

图 1 是保持其他量不变, 改变喷管收敛角度得到的发动机推力壁的压力曲线. 从图上看, 无论带哪个角度的喷管, 发动机推力壁压力值都存在一定的波动, 这与不带喷管的 PDE 情况不同. 出现这种波动的主要原因是带喷管的 PDE 内部 (包括喷管段) 波系很复杂, 爆轰开始后爆轰波从推力壁向开口端传播, 当其到达收敛喷管入口时产生压缩波, 反向向推力壁传播, 与此同时爆轰波继续向喷管出口传播, 当其传出喷管时产生膨胀波, 也向推力壁传播, 之后当一系列波系传播到推力壁后, 又反射成膨胀波或压缩波再次向出口传播, 遇到喷管的收敛部分再次反射, 如此这般相互交替, 也相互作用, 使得推力壁处的压力不断变化. 随着波动衰减, 图上曲线的波动幅度越来越小. 同时比较这 3 幅图, 还可以发现, 收敛角度变大, 推力壁的压力波动幅度和密度都变大了. 这主要是因为收敛角度越大, 管内波系越复杂.

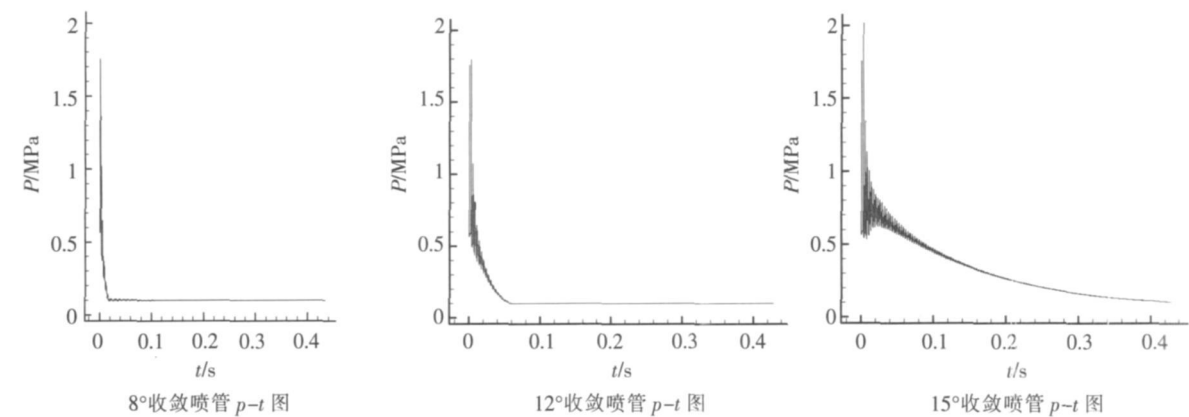


图 1 带不同收敛角度喷管的 PDE 的 $p-t$ 图

Fig.1 Variation of press as a function of temperature in PDE with convergent nozzle of different angles

图 2 是在整个爆轰波传播过程中不同收敛角度喷管在推力壁处所产生的压缩波情况. 首先分析一下图中 2° 收敛角的推力壁压力曲线, 最初时刻图中存在一个压力迅速下降点, 这是爆轰波扫过压力下降所导致; 接着推力壁处压力值保持平台压力, 直到 0.00239 s 时压力又迅速上升, 这是因为当爆轰波从推力壁传播到喷管入口时, 管子截面突然变小, 产生压缩波, 反向向推力壁传播, 在 0.00239 s 时到达推力壁, 导致图中压力迅速上升. 此后从喷管出口反传回来的膨胀波也到达推力壁, 在图中体现为压力下降区.

图 2 从整体来看, 收敛喷管的收敛角度越大, 第一个压缩波越早到达推力壁, 而且压力上升的幅度也越大. 从图上可以看出 5° 收敛角压力的上升幅度是 2° 收敛角的 1.5 倍; 8° 则是 2° 上升幅度的 3 倍, 依此 10° 和 12° 则更大. 说明收敛喷管对发动机管内波系有一定影响, 它使发动机内部压力比无喷管时高, 为增加发动机推力提供了条件, 但因为收敛角度越大, 喷管对发动机管内波系的影响越大, 因而发动机内部的波系过于复杂, 尾气排放时间则增长, 这样在一定进气压力下, 过多地增加收敛喷管的收敛角度会降低发动机的频率.

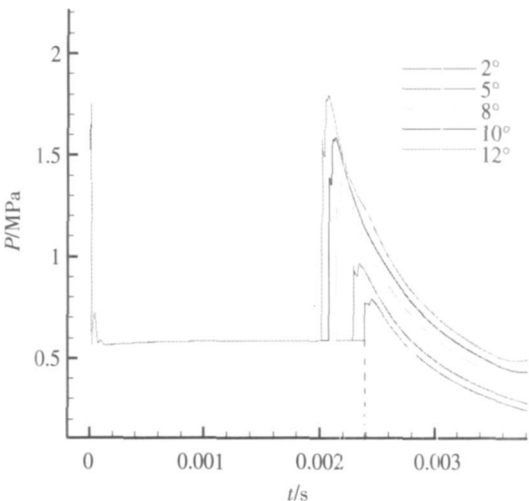


图 2 带不同角度收敛喷管 PDE 的推力壁压力变化
Fig.2 Compression waves in PDE with convergent nozzle of different angle

3.2 喷管长度对推力壁压力曲线影响分析

图 3是保持喷管的收敛角度为 3°不变, 改变喷管长度而得到的 PDE 推力壁的压力曲线图. 从图中看到, 最初时刻爆轰波扫过, 压力急剧下降, 然后到达平台压力并保持至 0.002 36 s 这一过程各长度的收敛喷管曲线一样. 此后从喷管入口反向传来的第一个压缩波到达推力壁, 体现在图上推力壁压力值在 0.002 36 s 时急剧上升, 且从图中看出喷管长度越长, 压力上升幅度越大, 因为长度越长导致管内的波系越复杂, 这样为推动增加提供条件. 但同样不能过度增加喷管长度, 因为当喷管收敛角度达到一定值时, 喷管的长度过大, 喷管的出口面积也就会过小, 这样虽然管内压力值和出口速度有所增加, 但是其增量小于面积的减小量, 这样使得通过发动机的气体流量减小, 发动机的推力增量减小, 甚至会对发动机的推力产生负面影响.

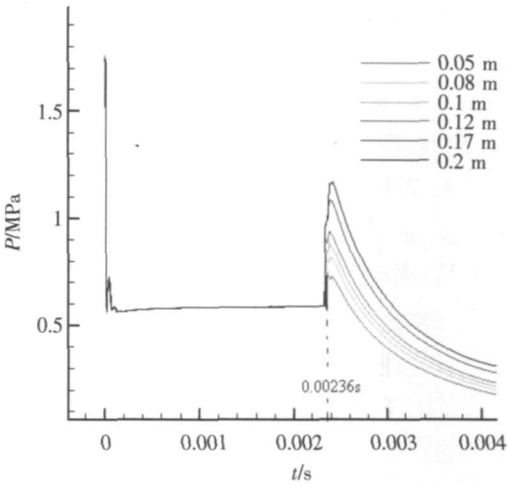


图 3 带不同长度收敛喷管 PDE 的推力壁压力变化
Fig.3 Compression waves in PDE with convergent nozzle of different length

对比图 2和图 3 发现第一个压缩波到达推力壁的时间与喷管收敛角度有关, 而与喷管长度无关. 喷管收敛角度越大, 产生的压缩波的传播速度越大, 到达推力的时间也就越早.

3.3 收敛角度和喷管长度对发动机性能的影响

上面分析了不同收敛角度和不同喷管长度的 PDE 的推力壁处压力曲线, 分析了发动机内部的波系, 定性地分析了收敛角度和喷管长度对 PDE 性能的影响, 这里通过分析其性能参数值做定量的研究.

表 1 带不同尺寸喷管的脉冲爆轰发动机的性能参数值

Tab 1 The perform ance of PDE with different convergent nozzles

收敛角度	喷管长度 /m	AR	$I/(N \cdot s)$	F_{avg}/N	I_{sp}/s	I_{spf}/s
0°	0	1	5.148	11.972	98.485	456.583
1°	0.1	0.89	5.418	12.600	96.644	448.050
3°		0.68	5.290	12.302	95.094	440.861
6°		0.42	5.197	12.086	94.410	437.692
8°		0.28	5.153	11.984	94.201	436.724
10°		0.17	5.062	11.772	93.066	431.462
12°		0.08	4.949	11.509	91.452	423.979
15°		0.01	4.648	10.809	86.442	400.753
3°	0.05	0.83	5.116	11.898	94.547	438.325
	0.08	0.74	5.280	12.279	95.898	444.590
	0.1	0.68	5.290	12.302	95.094	440.861
	0.12	0.62	5.342	12.423	95.131	441.035
	0.17	0.49	5.377	12.505	93.880	435.233
	0.2	0.42	5.438	12.647	94.038	435.965
8°	0.05	0.59	5.118	11.902	95.046	440.642
	0.07	0.45	5.124	11.916	94.428	437.777
	0.1	0.28	5.153	11.984	94.201	436.724
	0.13	0.15	5.036	11.712	91.630	424.801
	0.16	0.063	4.932	11.470	89.532	415.077
	0.2	0.004	3.349	7.788	60.747	281.626

表 1是对脉冲爆轰发动机带不同尺寸收敛喷管时的性能统计. 表格第一行是不带喷管时 1.3 m 的 PDE 的各性能参数, 接下来各行是在 1.3 m 的发动机上加上了不同尺寸的喷管后的性能参数值.

分析表格中长度为 0.1 m 的收敛喷管, 由冲量 I 和平均推力 F 这两列的数据发现, 收敛角度小于 8°时各收敛喷管与不带喷管的发动机相比, 其平均推力和冲量都有一定的增加; 当收敛角度大于 8°时, 由于收敛角度过大, 发动机的平均推力比没有喷管时要小. 这是因为太大的收敛角度会导致喷管出口尺寸过小,

由公式(3)进一步简化有: $F(t) = \rho_{m,e}(t)u_e^2(t)A_e + (p_e(t) - p_0)A_e$, 可以看出过小的出口截面积, 即使有很大的压力差和速度方差, 如果他们不足以抵消面积的减少量, 就会使得平均推力和冲量值比不带喷管的发动机小; 而后两列数据显示, 带喷管的发动机的比冲和燃料比冲要比不带喷管的发动机小, 这也说明增加了喷管就增加了发动机体积, 增加了燃料消耗量。

分析表格中收敛角度为 3° 的收敛喷管发现, 增加喷管长度, 冲量和平均推力增大, 比冲和燃料比冲变化则较不规律, 但在喷管长度为 0.08 m 处取得比冲和燃料比冲最大值。收敛角度为 8° 的收敛喷管, 增加喷管长度, 冲量和平均推力先增大后减小, 比冲和燃料比冲则随着喷管长度的增加而减小。出现上述现象的原因是: 当收敛角度较小的时候, 喷管长度增加, 一方面发动机内部燃料增加, 另一方面从 3.2 章节的分析看出发动机内部的波系也变得复杂了, 所以最终导致发动机的平均推力增大了。而对于收敛角度较大的喷管, 当长度超过一定值时, 其喷管出口面积要比小收敛角度的喷管小的多, 上述燃料增加量以及波系复杂所导致的平均推力增量都不足以抵消喷管出口面积减少所带来的平均推力减量, 所以也就会导致大角度收敛喷管长度增加时平均推力先增大后减小, 比冲一直减小。

4 结论

研究了带不同尺寸收敛喷管的脉冲爆轰发动机的性能变化情况。主要针对喷管收敛角度和喷管长度对 PDE 性能影响展开了研究。

数值计算结果表明, 带收敛喷管的 PDE 内部流场比直管发动机的要复杂; 当收敛角度不大时, 带收敛喷管的 PDE 的平均推力要比不带喷管时大; 对于小收敛角度的收敛喷管, 增加喷管长度, 发动机的冲量和平均推力增加; 对于较大收敛角度的收敛喷管, 增加喷管长度, 发动机的冲量和平均推力先增大后减小。本文的数值计算结果对 PDE 的试验研究有着参考和理论指导作用。

[参考文献] (References)

- [1] Shmuel Eilehan Yang Xiaobang Analysis of the pulse detonation engine efficiency AIAA 1998-3877[R]. McLean Science 1998
- [2] Tangirala V E, Dean A J Performance estimations of a pulse detonation engine with exit nozzle AIAA 2006-4792[R]. California GE Global Research 2006
- [3] Daniel E Paxson Optimal area profiles for ideal single nozzle air-breathing pulse detonation engines AIAA 2003-4512[R]. Cleveland Glenn Research Center 2003
- [4] 王杰, 翁春生. 不同喷管形状对 PDE 性能影响分析[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(2): 177-180
Wang Ji, Weng Chunsheng Analysis of different Nozzles' effect on PDE performance[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance 2007, 27(2): 177-180 (in Chinese)
- [5] 范玮, 严传俊, 李强, 等. 脉冲爆轰发动机尾喷管的实验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 869-872
Fan Wei, Yan Chuanjun, Li Qiang, et al Experimental investigation on pulse detonation engine nozzles[J]. Journal of Aerospace Power 2007, 22(6): 869-872 (in Chinese)
- [6] He X, Karagozian A R Reactive flow phenomena in pulse detonation engines AIAA 2003-1171[R]. Angeles University of California Los 2003
- [7] 严传俊, 范玮. 脉冲爆轰发动机原理及关键技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005
Yan Chuanjun, Fan Wei The Theory and Key Technology of Pulse Detonation Engine[M]. Xi'an Northwest Polytechnical University Press 2005 (in Chinese)
- [8] 翁春生, 王浩. 计算内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006 85-94
Weng Chunsheng, Wang Hao Computational Interior Ballistics[M]. Beijing National Defense Industry Press 2006 85-94 (in Chinese)
- [9] 马丹花, 翁春生. 一维 CE/SE 方法在气液两相爆轰计算中的应用[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2008, 8(3): 25-29
Ma Danhua, Weng Chunsheng Application of one-dimension CE/SE method to simulate gas-droplets two phase detonation [J]. Journal of Nanjing Normal University Engineering and Technology Edition 2008 8(3): 25-29 (in Chinese)
- [10] Chang S C The method of space-time conservation element and solution element—a new approach for solving the Navier-Stokes and Euler equations[J]. Journal of Computational Physics 1995(119): 295-324

[责任编辑: 刘健]