

## 基于特征线的脉冲爆震发动机性能估算与 结构参数设计

陈永刚<sup>1</sup>, 何立明<sup>1</sup>, 康强<sup>2</sup>, 李明奎<sup>1</sup>

(1.空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038; 2.空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

**摘要:**在  $x-t$  平面建立了脉冲爆震发动机(PDE)爆震室内爆震波传播过程的物理模型, 在此基础上应用特征线算法给出了一种脉冲爆震发动机性能参数估算方法, 确定了 PDE 性能参数与结构参数之间的定量关系, 建立了 PDE 结构参数的设计方法。用算例对不同推力水平的脉冲爆震发动机结构参数进行了设计与分析, 为脉冲爆震发动机设计与应用提供理论依据。

**关键词:**脉冲爆震发动机; 特征线; 性能计算; 结构参数

中图分类号: V23 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)03-0001-03

脉冲爆震发动机是一种利用间歇式或脉冲式爆震波产生推力的新概念动力装置。其性能分析多数以实验和流场数值模拟为基础<sup>[1]</sup>, 过程相对比较复杂。这种发动机热循环效率高, 燃料消耗率低, 经济性好; 结构简单, 可靠性好; 推重比大, 比冲高, 工作范围广, 引起了许多发达国家的广泛重视。脉冲爆震发动机已经被美国 NASA 列为三大革命性航空概念之一, 被认为是新世纪最有前途的推进概念。

### 1 脉冲爆震发动机性能参数估算方法

在研究混合气体燃烧中产生的爆震波传播机理的基础上建立的爆震波传播过程的物理模型见图 1<sup>[2]</sup>。在爆震室封闭端起爆后, 爆震波以速度  $U_{C_1}$  向敞口端传播, 后面紧跟着—束膨胀波。  $t_1$  时刻爆震波恰好到达敞口端, 产生透射激波和接触面, 同时产生第一道从接触面反射的膨胀波, 斜率由接触面特点决定, 即接触面压力和速度相等。穿过右传膨胀波后, 这道反射波将以速度  $c_3$  向封闭端传播。  $t_1$  是爆震波恰好到达敞口端时间,  $t_2$  是第一道反射波到达封闭端所用的时间。在推力壁处压力峰值维持的时间很短, 在  $t_1 + t_2$  时间范围内压力都保持在  $p_3$ , 反射膨胀波使得推力壁压力下降, 最终达到环境压力值, 推力壁上理想压力—时间曲线见图 2。

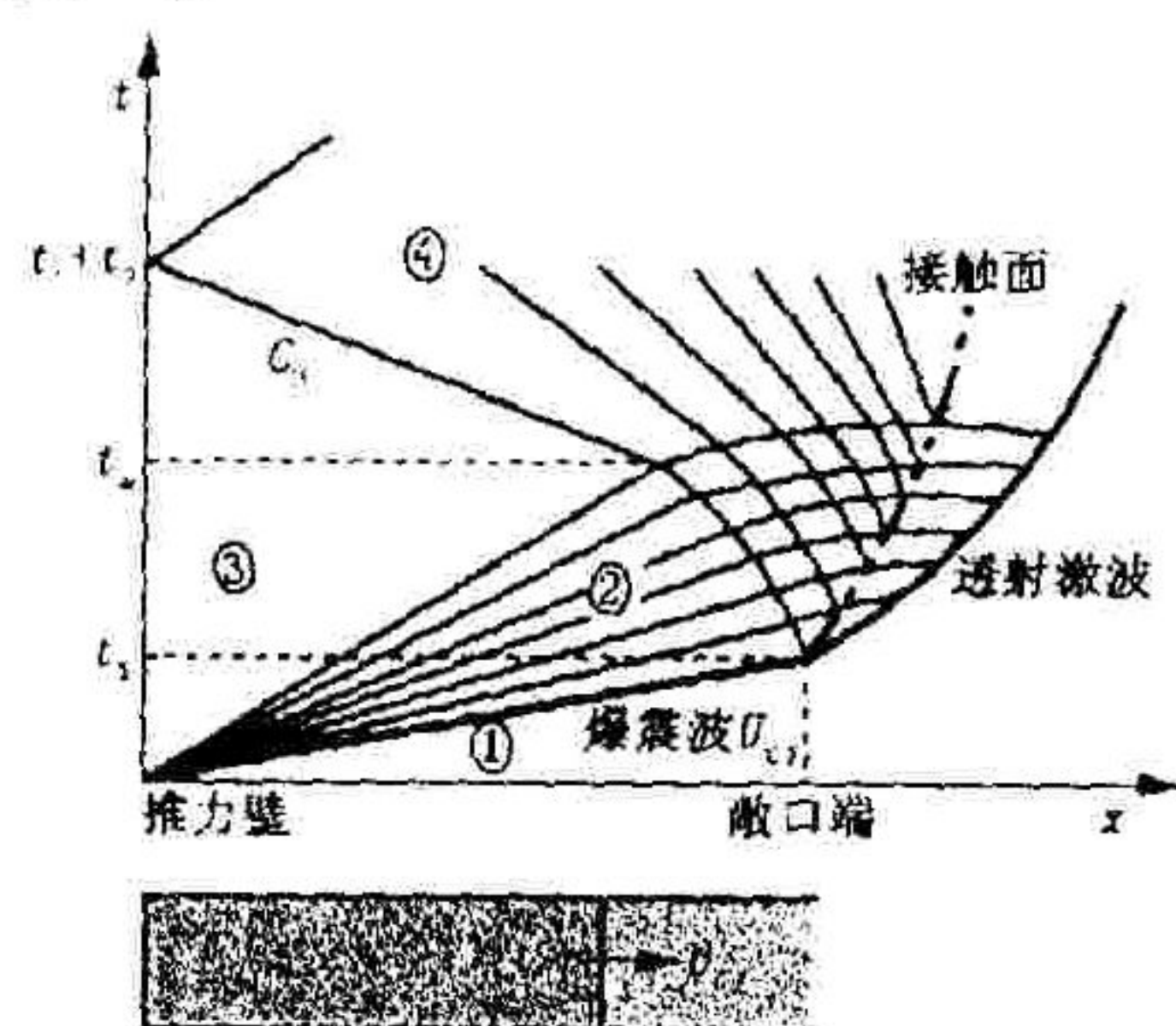


图1 爆震波传播模型

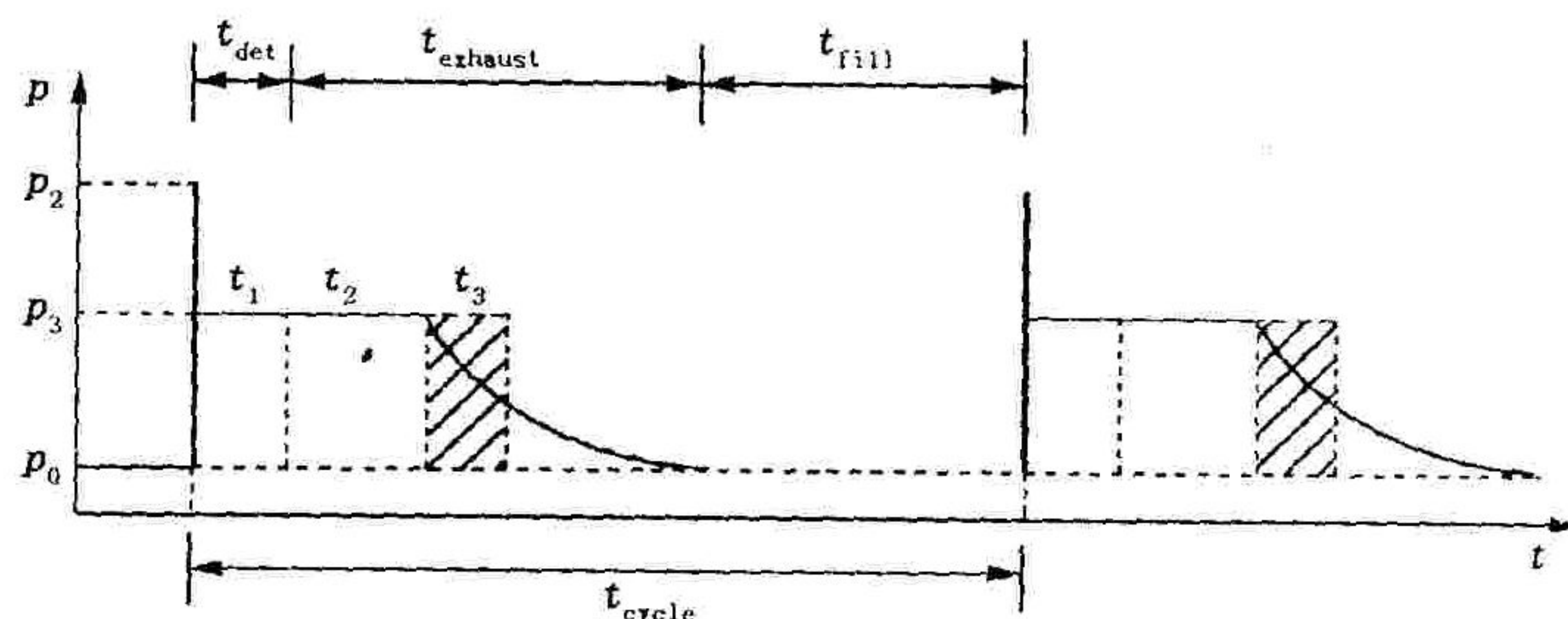


图2 脉冲爆震发动机推力壁处压力—时间曲线

收稿日期: 2004-10-11

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(中博基[2003]03号)

作者简介: 陈永刚(1977-), 男, 甘肃礼县人, 博士生, 主要从事航空宇航推进理论研究;

何立明(1959-), 男, 浙江上虞人, 教授, 主要从事推进系统气动热力理论与工程和脉冲爆震发动机研究。

脉冲爆震发动机单次爆震的推力冲量可表示为  $I = A \int_0^{t_{\text{cycle}}} \Delta p(t) dt$ 。其中  $A$  表示爆震室的横截面积,  $\Delta p$  是推力壁上的压力差。假定点火时间在  $t = 0$ , 根据图 2 的理想  $p-t$  曲线, 推力冲量应该由三部分组成, 即  $I = A[\Delta p_3(t_1 + t_2) + \int_{t_1+t_2}^{t_{\text{cycle}}} \Delta p(t) dt]$  式中,  $t_1$  为爆震波传播到敞口端的时间, 由  $t_1 = L/U_{\text{CJ}}$  确定;  $t_2$  主要由爆震室长度  $L$  和 ③ 区的音速  $c_3$  决定, 引入参数  $\alpha$ , 有  $t_2 = \alpha L/c_3$ 。

从  $t_1 + t_2$  到  $t_{\text{cycle}}$  时间内的积分可以用等效时间描述, 引入参数  $\beta$ , 有  $\int_{t_1+t_2}^{t_{\text{cycle}}} \Delta p(t) dt = \Delta p_3 t_3 = \Delta p_3 L \beta / c_3$ 。显然推力冲量可用  $I = A \Delta p_3 [L/U_{\text{CJ}} + (\alpha + \beta)L/c_3]$  表示。通过前面分析, 图 1 中 ③ 区是稳定区域, 且  $u_3 = 0$ , ③ 区的  $C_-$  特征线穿过右传膨胀波束到爆震波后区域, 沿着  $C_-$  特征线有<sup>[3]</sup>  $c_3 - 0 = c_2 - (\gamma_2 - 1)u_2/2$ ;  $p_3 = p_2 (c_3/c_2)^{2\gamma_2/(\gamma_2-1)}$ 。

膨胀波束的贯穿特征线族有<sup>[3]</sup>  $dx/dt = u - c = ((3 - \gamma_2)x/(\gamma_2 + 1)/t) + ((\gamma_2 - 1)u_2/(\gamma_2 + 1) - 2c_2/(\gamma_2 + 1))$ 。解之可得第一条反射特征线穿出右传膨胀波束的位置和时间, 此后它以恒定的速度  $c_3$  传到封闭端, 容易算得  $t_2$ , 从而得到  $\alpha$ , 即  $\alpha = \frac{c_3}{U_{\text{CJ}}} \left( 2 \left( \frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_2 + 1} \left( \frac{c_3 - u_2}{c_2} + \frac{2}{\gamma_2 + 1} \right) \right)^{-(\gamma_2+1)/2(\gamma_2-1)} - 1 \right)$ 。

图 1 中 ④ 区是非简单波区域, 通过分析方法得到  $\beta$  相对比较困难, 文献[2] 给出了  $\beta$  的经验值为 0.53。这样就可计算脉冲爆震发动机的性能参数, 设  $V$  为爆震室体积,  $L$  为爆震室长度,  $D$  为爆震室直径,  $f$  为爆震频率, 则脉冲爆震发动机的单位体积推力冲量  $I_v$  和平均推力  $F_{\text{avg}}$  分别为  $I_v = I/V$ ;  $F_{\text{avg}} = I_v V f = I_v \pi L d^2 f / 4$

## 2 脉冲爆震发动机结构参数的确定原则

进行脉冲爆震发动机结构参数设计时应应对爆震室长度、直径和爆震频率进行相应的限制。爆震室长度应该大于爆燃向爆震转变的距离, 即  $L < L_{\text{DDT}}$ , 同时要考虑工程应用的实际需要, 因而发动机长度不能过长。同样爆震室直径的选择也有一定的限制条件, 直径要大于所选择的燃料的胞格尺寸<sup>[4]</sup>, 直径过大则需要较大的点火能量, 对点火系统的要求比较高, 一定程度上增加了发动机的体积和重量。脉冲爆震发动机的最高爆震频率取决于单循环爆震的最小循环周期, 一个周期包括爆震波在爆震管中的传播时间  $t_{\text{det}}$ 、爆震燃烧产物排出爆震室的时间  $t_{\text{exhaust}}$  和混合气体填充爆震室的时间  $t_{\text{fill}}$ , 即  $t_{\text{cycle}} = t_{\text{det}} + t_{\text{exhaust}} + t_{\text{fill}}$ 。其中  $t_{\text{exhaust}} \approx 10t_{\text{det}}$ ,  $t_{\text{fill}} = L/U_{\text{fill}}$ , 当混合物填充速度确定时,  $f_{\text{max}}$  和  $L$  成反比, 即  $f_{\text{max}} = 1/L(10/U_{\text{CJ}} + 1/U_{\text{fill}})$ 。

## 3 设计实例及结果分析

以汽油为燃料, 空气为氧化剂的脉冲爆震发动机为算例, 爆震波特征参数的计算方法可参考文献[6]。  $T_0 = 300 \text{ K}$ , 余气系数  $\alpha = 1$ ,  $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ pa}$ , 爆震波的特征参数如表 1<sup>[5]</sup>。设计推力  $F_{\text{avg}}$  分别为 100 N、500 N 和 1 000 N, 脉冲爆震发动机的设计参数如表 2, 对脉冲爆震发动机的结构参数进行了设计和计算。图 4 是当频率为 50 Hz, PDE 的平均推力随发动机结构尺寸变化关系曲面, 图 4~图 6 分别是平均推力分别为 100 N、500 N 和 1000 N 时 PDE 结构参数的关系曲面。

表 1 汽油/空气混合物爆震波特征参数

$\gamma$	$p_{\text{CJ}}/\text{atm}$	$U_{\text{CJ}}/(\text{m/s})$	$p_3/\text{atm}$	$c_3/(\text{m/s})$	$I_v/(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^3)$
1.2367	19.83	1898.2	6.93	949.13	1354.22

表 2 PDE 设计参数

$F_{\text{avg}}/\text{N}$	$L/\text{m}$	$D/\text{mm}$	$U_{\text{fill}}/(\text{m/s})$
100, 500, 1000	0.5~1.5	20~200	200

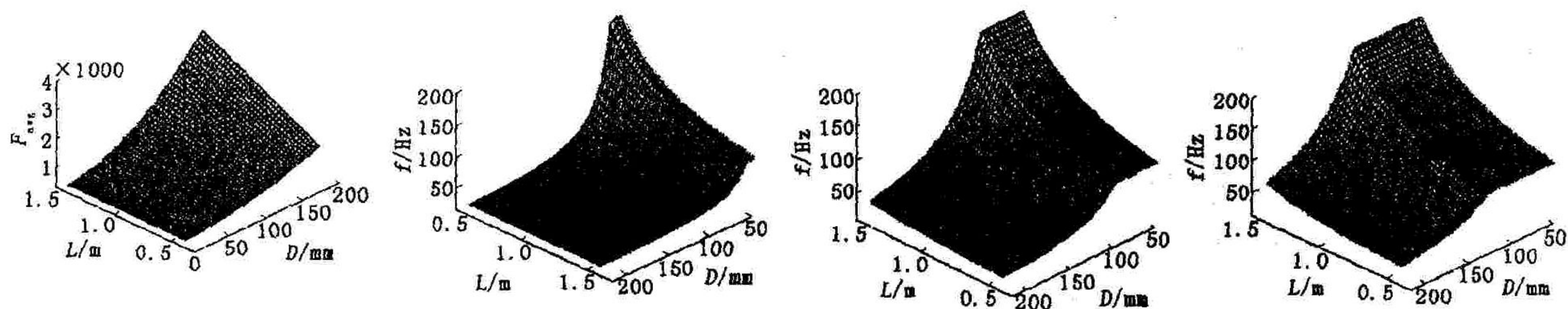


图 3 PDE 平均推力随尺寸变化曲面 图 4 100N PDE 参数设计曲面 图 5 500N PDE 参数设计曲面 图 6 1000N PDE 参数设计曲面

从计算结果可知,发动机的平均推力随发动机尺寸的增加显著增大,相比较 PDE 爆震燃烧室长度而言,爆震燃烧室直径的增大推力效果更加显著。根据一定的推力要求设计 PDE,结构参数是确定的,图中去面存在明显的分界线,其中较低的部分为设计面,较高的部分为频率限制面。在爆震燃烧室长度和直径一定的情况下,增加爆震频率能显著提高发动机平均推力,但爆震频率不能无限增大,而是必须低于频率限制面,即当结构尺寸一定时存在一个最大推力值。当设计曲面距离频率极限较远时,爆震频率选择范围较宽,推力范围也大,相反当设计曲面距离频率极限较近时,推力增大范围不大。

## 4 结论

应用特征线法对脉冲爆震发动机性能参数进行估算,给出了 PDE 性能参数与结构参数的定量关系,通过对不同推力水平的发动机进行设计和分析,可以得出下面结论:①发动机的平均推力随发动机尺寸的增加显著增大,在一定的设计平均推力下,PDE 各参数之间存在最佳的匹配关系;②在爆震燃烧室长度和直径一定的前提下,爆震频率增大可以增加平均推力。爆震频率极限随爆震燃烧室长度呈反比例关系减小,爆震频率要低于频率极限面,当发动机结构尺寸一定时,存在一个最大的推力值;③建立脉冲爆震发动机结构参数设计方法,通过对爆震燃烧室长度和直径以及爆震频率之间的关系进行定量分析,为脉冲爆震发动机的结构设计提供了重要的理论依据。

### 参考文献:

- [1] Lailasanath K, Patnaik G, Li V. Computation studies of Pulse Detonation Engine; a Status Report[R]. AIAA 1999-2634.
- [2] Wintenberger E, Austin J M. An Analytical Model for the Impulse of a Single-Cycle Pulse Detonation Engine[R]. AIAA 2001-3811.
- [3] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [4] Chao T, Wintenberger E, Shepherd E. On the Design of Pulse Detonation Engines[R]. GALCIT Report FM 00-7 CA 91125.
- [5] Bussing T, Pappas G. An Introduction to Pulse Detonation Engine[R]. AIAA 94-0263.
- [6] 袁 泉,祝雪平,何立明,等. 混合气压力对爆震波特征参数的影响规律[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2003,4(4):1-4.

(编辑:姚树峰)

### Characteristic -Based Performance Calculation and Structural Parameters Design of Pulse Detonation Engine

CHEN Yong - gang<sup>1</sup>, HE Li - ruing<sup>1</sup>, KANG Qing<sup>2</sup>, LI Ming - kui<sup>1</sup>

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China ;2. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract : A physical model of detonation wave propagation process in the detonation combustion chamber is developed on the diagram, based on this a performance parameter calculation method of the pulse detonation engine is made by applying characteristic method, the quantitative relation between performance parameters and structural parameters of the pulse detonation engine is obtained, and structural parameters design method of the pulse detonation engine is established. The calculation examples are used in the design and analysis of the structural parameters of PDE with different thrust levels, this provides theoretical bases for the design and application of pulse detonation engine.

Key words : pulse detonation engine ; characteristic ; performance calculation ; structural parameter