

脉冲爆震发动机的推力计算方法*

何立明

(空军工程学院航空机械工程系, 西安, 710038)

严传俊 范 玮

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 在分析爆震燃烧基本特性和脉冲爆震发动机工作原理的基础上, 建立了确定脉冲爆震发动机推力的计算方法。用自行设计的脉冲爆震发动机原理性试验模型作为算例, 并与推力的实测值进行了比较, 结果两者基本吻合。

主题词: 脉冲爆震发动机⁺, 推力, 试验模型, 计算方法

分类号: V235.22

A METHOD OF CALCULATING THRUST OF PULSED DETONATION ENGINES

He Liming

(Dept. of Aeromechanical Engineering, Air Force Engineering Coll., Xi'an, 710038)

Yan chuanjun Fan wei

(Dept. of Aeroengine, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: Based on analysis of basical properties of detonation combustion and operation principles of pulsed detonation engines, a calculation method for determining the thrust of pulsed detonation engine has been established in this paper. The principal test model of pulsed detonation engine designed by authors is used as an example for calculating thrust of pulsed detonation engines, and the calculation result is in good agreement on experimental data.

Subject terms: Pulsed detonation engine⁺, Thrust, Breadboard model, Calculation method

1 引 言

脉冲爆震发动机利用间歇式或脉冲式爆震波产生的高温、高压燃气作用在推力壁上来产生推力。脉冲爆震发动机中的爆震燃烧是等容非稳态燃烧, 整个工作过程是间歇的、周期性的, 因而产生的推力是脉动的。但当爆震频率大于 100Hz 时, 可以近似地认为其工作过程是连续的, 则产生的推力也可近似地认为是连续的^[1]。本文在分析爆震燃烧基本特性和脉冲爆震发动机工作原理^[2,3]的基础上, 建立确定脉冲爆震发动机推力的计算方法, 并用自行设计的脉冲爆震发动机原理性试验模型作为算例, 然后与其推力实验值进行比较, 加以验证。

* 收稿日期: 19961010, 修回日期: 19970401, 本课题属国家自然科学基金和“八六三”计划资助项目

2 爆震燃烧的基本特性

爆震波传统上被看作为继之以燃烧的激波。爆震波传播过程中的基本关系式及脉冲爆震发动机的过程已在文献 [2, 3] 中叙述。爆震室内的压力分布见文献 [2]。考虑一个在等截面管中传播的爆震波, 其传播过程为一维非定常流动过程, 但如取与爆震波相同速度运动的相对坐标系, 则可看成是稳态爆震波。根据流体动力学知识, 在等截面管中的稳态爆震波, 仅仅是有化学反应 (加入热量) 的一维流问题, 可容易地用公式来表示 (参见文献 [3]), 引入马赫数得:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1 + \gamma_1 Ma_1^2}{1 + \gamma_2 Ma_2^2} \quad (1)$$

对于 C-J 爆震波, $Ma_2=1$, 于是爆震波前后压力比可写为:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1 + \gamma_1 Ma_1^2}{1 + \gamma_2} \quad (2)$$

同样, 可容易地得到爆震波前后温度比, 即:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cdot \frac{1}{Ma_1^2} \left[\frac{1 + \gamma_1 Ma_1^2}{1 + \gamma_2} \right]^2 \quad (3)$$

式中, γ 为比热比, m 为气体混合物的相对分子质量。

对于 C-J 爆震^[2], 爆震波相对于已燃气体的马赫数 $Ma_2=1.0$, 建立爆震波后已燃气体的速度和爆震波速的关系, 并考虑由于燃料/空气喷射的初始速度量 V_0 , 可得到爆震管内已燃气体相对于爆震室壁的速度 V_{2c} 或马赫数 Ma_{2c} , 即:

$$Ma_{2c} = (Ma_0 + Ma_1) \left[\frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \cdot \frac{T_1}{T_2} \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (4)$$

式中, Ma_0 为未燃气体相对于爆震室壁的马赫数, Ma_1 为爆震波相对于未燃气体的马赫数。

Ma_{2c} 的值对于在爆震管中充满静态燃料/空气混合物起爆的爆震波而言为高亚音速范围, 如果未燃气体的速度不为零, 那么 Ma_{2c} 可能大于 1。于是 p_3 可由下式得到

$$\frac{p_3}{p_1} = \frac{p_2}{p_1} \left[1 - \frac{\gamma_2 - 1}{2} Ma_{2c}^2 \right]^{\frac{2\gamma_2}{\gamma_2 - 1}} \quad (5)$$

3 脉冲爆震发动机推力计算方法

假设: (1) 在爆震室的封闭端立即建立起 Chapman-Jouguet 爆震; (2) 忽略脉冲爆震波之间的相互作用; (3) 膨胀波以断续的形式并与状态 2 相应的声速返回; (4) 初始的膨胀波减小室内的压力到大气压力, 因此, 所有后继的反射波都可忽略; (5) 在大气压力下引入新鲜混合物; (6) 不考虑阀系或摩擦损失。

脉冲爆震发动机的推力通常指平均推力, 可用下式计算:

$$F_{avg} = \left(\int_0^{t_c} F(t) dt \right) / t_c = \frac{F}{t_c / (t_0 + t_r)} \quad (6)$$

式中, $F(t)$ 为瞬时或非稳态推力, F 为在爆震和膨胀时间内作用的有效峰值推力, t_c 为一个爆震循环的时间, 可用下式表示

$$t_c = t_d + t_r + t_i \quad (7)$$

式中, $t_d (=L / (V_1 + V_0))$ 为爆震波在爆震室中的传播时间, $t_r (=L / a_2)$ 为膨胀波的传播时

间, $t_t (=L/V_0)$ 为新鲜可爆混合物充填爆震室的时间。

对于等截面的脉冲爆震发动机, F 可在爆震和膨胀时间内对脉冲爆震发动机取控制体, 并列动量方程得到

$$F = A(p_3 - p_1) + \dot{m}_g V_{2c} - F_{\text{drag}} \quad (8)$$

式中, A 为爆震室横截面积, F_{drag} 为阻力, 包括所有与发动机内外流动有关的无粘性和有粘性力, $\dot{m}_g$ 为爆震产物质量流率, 由于脉冲爆震发动机尺寸与涡喷发动机相比小得多, $\dot{m}_g V_{2c}$ 可忽略, 在地面台架, $F_{\text{drag}} \approx 0$, 于是:

$$F \approx A(p_3 - p_1) = Ap_1 \left(\frac{p_3}{p_1} - 1 \right) \quad (9)$$

将式 (5), (9) 代入式 (6) 得:

$$F_{\text{avg}} = Ap_1 \left\{ \frac{1 + \gamma_1 Ma_1^2}{1 + \gamma_2} \left[1 - \frac{\gamma_2 - 1}{2} Ma_{2c}^2 \right]^{2\gamma_2/(\gamma_2 - 1)} - 1 \right\} \left(\frac{t_d + t_r}{t_c} \right) \quad (10)$$

4 算例及结果分析

以自行设计的脉冲爆震发动机原理性试验模型 (图 1) 作为算例。它由供气、供油系统, 爆震管, 爆震起爆及频率控制系统, 推力测试系统等组成。爆震管由混合段和爆震室组成, 混合段长 25cm, 爆震室长 90cm, 其内、外径均分别为 2cm, 2.5cm。试验装置采用汽油作燃料, 空气作氧化剂。计算平均推力 F_{avg} 所需爆震波特性参数值由文献 [4] 得到, 具体见下表, 其中还给出了 Ma_0 的实验测定值。

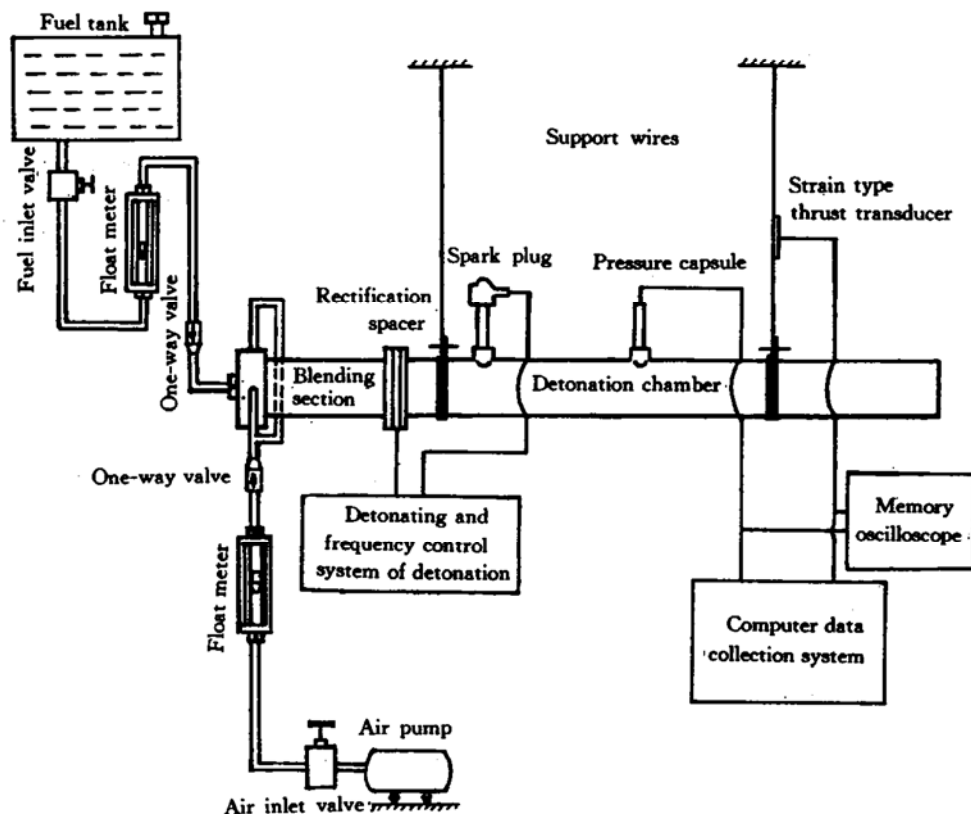


Fig. 1 Schematic of principal test model of pulsed detonation engine

**Table 1 Parametric values of detonation wave properties demanded
for calculating average thrust of pulsed detonation engine**

α	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
Ma_1	5.49495	5.60308	5.6940	5.77098	5.5718	5.396294
γ_1	1.31028	1.31890	1.32599	1.33192	1.33695	1.341275
γ_2	1.21377	1.22261	1.230156	1.23665	1.241228	1.24539
m_1	31.17675	30.9035	30.68976	30.51797	30.37687	30.25889
m_2	29.5109	29.24708	29.040597	28.87478	28.88019	28.88475
Ma_0	0.03749	0.04427	0.04767	0.05016	0.05268	0.054603
p_1/p_1	17.8716	18.6298	19.2771	19.83	18.5193	17.395
a_2	972.4465	1002.5048	1027.8896	1049.554	1019.249	992.14
V_1	1773.6257	1822.47	1863.47	1898.2	1840.407	1788.79
T_2	2765.37	2891.63	2999.94	3093.54	2907.258	2745.9

计算所得的脉冲爆震发动机的平均推力 F_{av} 随混气余气系数的变化曲线和在混气化学恰当比的条件下, F_{av} 随爆震频率 f 的变化关系曲线分别如图 2、图 3 所示, 图 4 中还与实验值进行了比较。

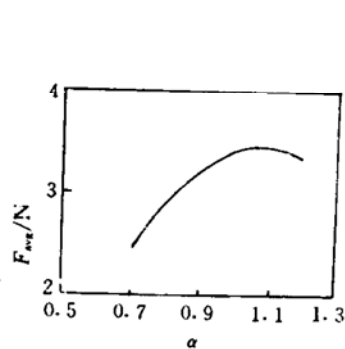


Fig. 2 Average thrust of pulsed detonation engine vs. excess air coefficient

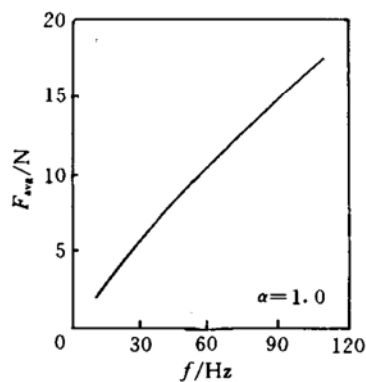


Fig. 3 Average thrust of pulsed detonation engine vs. detonative frequency

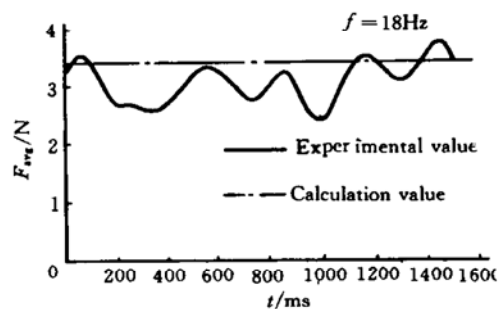


Fig. 4 Comparison between calculation value and experimental value

由图 2 可见, 随着混气余气系数的增大, 脉冲爆震发动机的平均推力 F_{av} 呈出先增大后减小的规律。当 $\alpha=1.0$ 时, F_{av} 达最大值。这是因为当混气为化学恰当比时, 爆震波强度最强,

爆震波后压力最高^[5], 因而 $(p_3 - p_1)$ 最大, 故 F_{avg} 达最大值。当余气系数偏离 1.0 时, 都会因爆震波强度减弱而使 F_{avg} 减小。

由图 3 可知, 在一定的混气余气系数下, 随着爆震频率的增大, 脉冲爆震发动机的平均推力 F_{avg} 是一直增大的。这是由于爆震频率增大, 意味着一个爆震循环的时间减小, 即在单位时间内能产生更多的脉冲推力, 故平均推力 F_{avg} 增大。而由式 (7) 知, 对于一定的脉冲爆震发动机 (L 一定), 在一定的混气余气系数下, V_1 和 a_2 一定, 则一个爆震循环的时间 (即爆震频率 $f = 1/t_c$) 主要取决于新鲜混气的充填速度, 所以新鲜混气充填速度越大, 爆震频率也就越高。

比较在混气化学恰当比下平均推力的计算值与实验值可知 (图 4), 计算值比实验值稍大。主要原因是在求解爆震波特性参数时, 没有考虑混气的两相流特点, 而作为均相流处理, 并忽略了爆震产物的离解, 再根据假设 (1), 在封闭端立即形成 C-J 爆震, 然而, 由实验知, 在封闭端点火后, 由爆燃过渡到爆震有一个过程^[5]。但总的来说计算值与实验值的吻合程度是比较好的, 达到工程计算要求, 因而本算法是可信的。

5 结 论

(1) 通过计算值与实测值的比较可知, 两者基本吻合。

(2) 随着混气余气系数的增大, 脉冲爆震发动机的平均推力 F_{avg} 是先增大后减小, 在混气化学恰当比下, 其平均推力达最大值。

(3) 脉冲爆震发动机的平均推力随爆震频率增大而增大。可见增大爆震频率是增大该种发动机推力的一种重要方法, 并且爆震频率越高, 发动机产生的推力也就越平稳。

(4) 脉冲爆震发动机的工作频率主要取决于新鲜可爆混气向充填速度, 新鲜可爆混气的充填速度大, 爆震频率越高。

参 考 文 献

- 1 严传俊, 何立明, 范 玮 等. 一种新概念脉冲爆震发动机. 西安: 西北工业大学, 1996
- 2 严传俊, 刘 军, 范 玮 等. 脉冲爆震发动机工作原理与循环分析. 推进技术, 1996, 17(3)
- 3 何立明, 严传俊, 范 玮 等. 混合气体燃烧中爆震波传播机理的研究. 推进技术, 1997, 18(2)
- 4 Bussing T, Pappas G. An introduction to pulse detonation engines. AIAA 94-0263
- 5 严传俊, 何立明, 范 玮 等. 脉冲爆震发动机燃烧室初步原理性模型试验研究报告. 西北工业大学, 1995