

文章编号: 1000-8055(2005)04-0641-04

特征线法在脉冲爆震发动机性能 计算中的应用

陈永刚, 何立明, 刘建勋
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 在 $x-t$ 平面建立爆震波在爆震室内传播过程的物理模型, 应用特征线算法对脉冲爆震发动机(PDE)一维非定常流进行了数值计算, 在此基础上给出了脉冲爆震发动机的性能参数的计算方法。并举算例进行了计算和分析, 结果表明应用特征线算法计算 PDE 性能是可行而且准确的。

关键词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机; 特征线法; 发动机性能

中图分类号: V 235.22

文献标识码: A

Application of Characteristic Method to the Performance Calculation of the Pulse Detonation Engine

CHEN Yong-gang, HE Li-ming, LIU Jian-xun

(The institute of Engineering,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: A physical model of the detonation wave propagation process in the detonation combustion chamber was developed on the $x-t$ diagram, and one-dimensional numerical simulation of the unsteady flow in a pulse detonation engine was conducted by applying characteristic method. With that an engine performance calculation method was deduced. The PDE performance calculation result shows that characteristic method is feasible and accurate.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation engine; characteristic method; engine performance

脉冲爆震发动机(简称 PDE)是一种新概念的
的动力装置, 它通过脉冲式爆震波产生的高温、高
压燃气提供推力。由于爆震波传播的速度极快, 爆
震燃烧可按等容过程处理, 因此与传统发动机比
较, 脉冲爆震发动机具有许多明显的性能优势: 循
环热效率高, 单位燃料消耗率 SFC 低, 推重比高,
单位体积推力大等, 正是这些特点使脉冲爆震发
动机作为高性能动力装置的研究日益受到重视,
近几年来脉冲爆震发动机的研究已经取得了一些

重要成果。

脉冲爆震发动机的工作过程是非定常的, 其
性能分析多数以实验和流场数值模拟为基础^[1],
文献[2, 3]给出了 PDE 性能参数的简化算法, 文
献[2]假设爆震波传到敞口端后膨胀波以状态 2
的音速返回, 忽略了膨胀波的相互作用, 文献[3]
推导了稳态部分的计算公式, 非简单波区域部分
采用以实验为基础的经验系数进行计算。由脉冲
爆震发动机流场数值模拟和实验结果分析可知,

收稿日期: 2004-06-08; 修订日期: 2004-10-30

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, 空军工程大学工程学院博士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究

在爆震燃烧室内流动基本保持一维状态^[4],而仅仅在出口端附近多维特点比较明显,因此在出口端边界条件选择合理的条件下可以对脉冲爆震发动机按照一维非定常流处理,这样就可以把特征线法应用于脉冲爆震发动机一维非定常流计算。特征线算法的物理概念和数学处理过程非常清楚,基本思想是通过引入特征表面(或特征方向)来减少独立变量的个数,一直以来都是计算二维超音速流和一维非定常流的重要方法。本文应用特征线算法对脉冲爆震发动机一维非定常流进行了数值计算,在此基础上给出了脉冲爆震发动机性能参数的计算方法,结果说明应用特征线算法计算脉冲爆震发动机性能参数是可行的。

1 一维非定常流的特征线计算方法

设 A 和 U 分别为无量纲音速和速度^[5], γ 为气体比热比,定义黎曼变量 λ 和 β 分别为:

$$\lambda = A + (\gamma - 1)U/2 \quad (1)$$

$$\beta = A - (\gamma - 1)U/2 \quad (2)$$

$$\lambda_R = \lambda_S + \frac{\Delta t}{|ST|} (\lambda_P - \lambda_S) \quad (6)$$

通过 r 时刻已知的 λ 和 β 值,可以容易计算 $r+1$ 时刻的 λ 和 β 。引入 λ_i 和 λ_e ^[5], 容易计算 $r+1$ 时刻的 λ_i 和 λ_e 为:

$$\begin{aligned} (\lambda_i)_{r+1,s} &= (\lambda_i)_{r,s} + \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \\ &[b(\lambda_i)_{r,s-1} - a(\lambda_e)_{r,s-1}][(\lambda_i)_{r,s-1} - (\lambda_i)_{r,s}] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} (\lambda_e)_{r+1,s} &= (\lambda_e)_{r,s} + \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \\ &[b(\lambda_e)_{r,s+1} - a(\lambda_i)_{r,s+1}][(\lambda_e)_{r,s+1} - (\lambda_e)_{r,s}] \end{aligned} \quad (8)$$

对图 1(c) 所示的网格,在已知 r 时刻每个网格点上的 λ_i 和 λ_e 的情况下,可以计算在 $r+1$ 时刻 λ_i 和 λ_e 的新值。除 $s=1$ 处,所有网格点上的 $(\lambda_i)_{r+1,s}$ 可以计算得到,同样除 $s=m+1$ 处,所有网格点上的 $(\lambda_e)_{r+1,s}$ 可以计算得到。要计算 $(\lambda_i)_{r+1,1}$ 和 $(\lambda_e)_{r+1,m+1}$ 的值需要给定相应的边界条件。

2 爆震波传播模型和 PDE 性能参数计算方法

脉冲爆震发动机的工作过程由 4 部分组成^[2]: 燃料/空气混合物填充爆震室; 闭口端起爆震波; 爆燃波转变为爆震波并向敞口端传播; 爆震燃烧产物从爆震室排出。假设在闭口端起爆后立即产生爆震波,建立爆震波传播过程的物理模型如图 2 所示。爆震波以速度 U_{cr} 向敞口端传播,后面紧跟着一束膨胀波。 t_1 时刻爆震波到达敞口端后,在敞口端反射形成左传膨胀波从而保证敞口端音速出流,同样右传膨胀波在敞口端反射产生膨胀波从而保持音速出流。第一道反射膨胀波在 t_2 时刻到达闭口端,此前闭口端处于稳定状态,速度为零,流场参数可根据等熵方程解算得到。膨胀波相互作用产生非简单波区域, t_3 时刻敞口端压力下降到外界压力时,膨胀波会以压缩波的形式反射保证出口端压力为环境压力,压缩波聚合形成激波并向闭口端传播。①、③区是稳定区域,②是简单波区域,④、⑤区是非简单波区域。敞口端标出了计算中使用的边界条件,实线部分 MN 表示音速出流,虚线部分 NP 表示亚音速出流。闭口端($s=1$)边界条件是速度为零,即 $(\lambda_i)_{s=1} = (\lambda_e)_{s=1}$,而敞口端($s=m+1$)分音速和亚音速两种情况确定边界条件,具体过程参考文献[5]。应

图 1 一维非定常流特征线法计算网格

Fig 1 Characteristic method calculation mesh of one-dimensional unsteady flow

考虑图 1(a) 中的网格 $PQRS$, P 和 S 点的 λ 和 β 已知,求解 R 点的 λ 值。通过 P 点的特征线 PT 的斜率可由 P 点的 λ 和 β 确定,即:

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_\lambda = b\lambda_P - a\beta_P \quad (3)$$

$$a = \frac{3 - \gamma}{2(\gamma - 1)} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)} \quad (5)$$

显然 $|ST| = \left| \frac{\Delta x}{\left(\frac{dx}{dt} \right)_\lambda} \right|$, 用插值法得 λ_R , 即:

用特征线算法就可以计算任意时刻每个网格点的 λ_1 和 λ_2 ,从而得到任意时刻闭口端($s=1$)处的压力值,当其下降到环境压力时,可认为一个新的循环开始。

$$I_{sp} = \frac{I}{\rho V g} = \frac{I_V}{\rho_1 g}$$

(12)

$$I_{spf} = \frac{I_V}{\rho_1 g X_f}$$

(13)

其中: V 是爆震室容积, ρ_1 是混合物密度, g 是重力加速度, X_f 是燃油质量比例。

3 算例及结果分析

选择氢气 H_2 、乙烯 C_2H_4 和丙烷 C_3H_8 为燃料,爆震波特征参数可用逐次逼近法计算得到。爆震燃烧室长 1.35 米,对乙烯/氧气混合物产生的爆震波,在当量比 $\Phi=1$ 时,应用特征线算法计算的爆震燃烧室闭口端压力和文献[6]的实验数据对比如图 3 所示,敞口端边界处的压力和马赫数随时间变化关系如图 4 所示。对以氢气、乙烯和丙烷为燃料,空气为氧化剂产生的爆震波,在化学当量比 $\Phi=1$ 时计算的闭口端压力和单位面积冲量随时间变化关系如图 5 所示,对不同当量比条件下的单循环性能参数进行计算,得到单位体积冲量 I_V ,混合物比冲 I_{sp} 和以燃油为基础的比冲 I_{spf} 随当量比 Φ 的变化规律分别如图 6~ 图 8 所示。

从图 3~ 图 5 可以看出,应用一维特征线法计算的闭口端压力和实验值非常接近。开始时敞口端边界处马赫数保持为 $Ma_{exit}=1.0$,压力逐渐减小,敞口端边界保持音速出流,在某一时刻达到环境压力时,马赫数开始减小,敞口端边界变为亚音速出流。当爆震波起爆后闭口端压力是稳定值,单位面积冲量随时间线性增加,反射膨胀波到达闭口端使其压力下降,当达到环境压力时可认为一个循环结束,这时单位面积冲量达到最大值。

从图 6~ 图 8 可知,初始状态 T_1 和 P_1 一定时,随着当量比的增加,脉冲爆发动机的单位体积

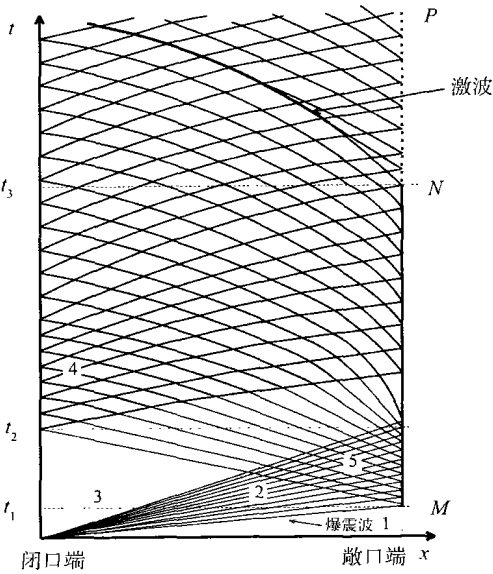


图 2 爆震波传播过程的物理模型
Fig 2 Physical model of detonation wave propagation process

脉冲爆震发动机瞬时推力可表示为^[2]:

$$F(t) \approx A [P(t) - P_0]$$

(9)

其中 A 表示爆震室横截面积, $P(t)$ 是闭口端瞬时压力,在一个循环时间内冲量 I 为:

$$I = \int F(t) dt$$

(10)

单位体积冲量 I_V , 混合物比冲 I_{sp} 和以燃油为基础的比冲 I_{spf} 分别为:

$$I_V = I/V$$

(11)

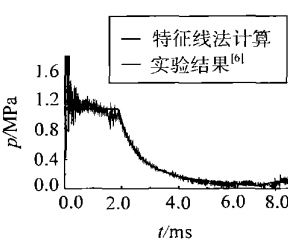


图 3 闭口端压力特征线计算值和实验值^[6]比较

Fig 3 Comparison of the pressure at closed end from characteristic calculation and experiment^[6]

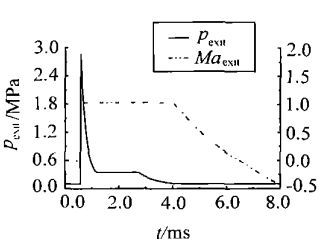


图 4 敞口端边界压力和马赫数变化曲线

Fig 4 Pressure and mach number at the open end boundary

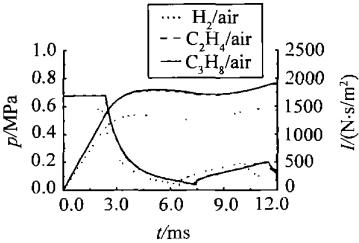


图 5 闭口端压力和单位面积冲量变化曲线

Fig 5 Pressure at the closed end and impulse per unit area varying with time

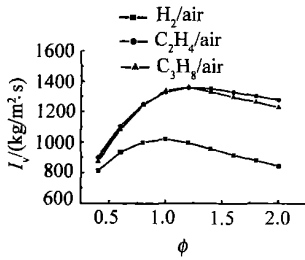


图 6 单位体积冲量随当量比变化曲线

Fig 6 Impulse per unit volume varying with equivalence ratio

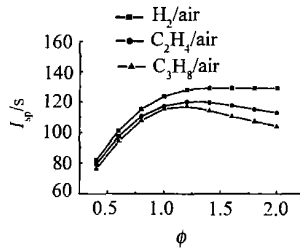


图 7 混合物比冲随当量比变化曲线

Fig 7 Mixture-based specific impulse varying with equivalence ratio

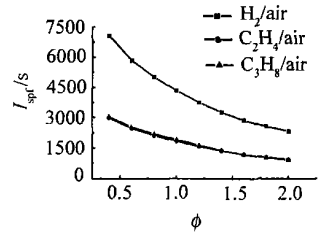


图 8 以燃油为基础的比冲随当量比变化曲线

Fig 8 Fuel-based specific impulse varying with equivalence ratio

冲量呈现先增大后减小的规律,由氢气计算的 I_v 在化学恰当比 $\phi=1$ 附近达到最大值,由乙烯和丙烷计算的 I_v 最大值稍微偏向富油区。与 I_v 相似,由乙烯和丙烷计算的混合物比冲 I_{sp} 随化学当量比呈现先增大后减小的规律,而由氢气计算的混合物比冲则基本上呈现单调上升的趋势,主要原因是混合物比冲受混合物密度的影响较大,碳氢燃料与氧化剂混合物的密度随当量比的变化不大,但对氢气而言,混合物密度随当量比的增加而有较大的减小,从而使得混合物比冲单调增加。以燃油为基础的比冲 I_{spf} 随当量比呈现单调减小的规律,而由于氢气分子量太小,因而由氢气计算得到的 PDE I_{spf} 明显高于碳氢化合物的计算值。

4 结 论

根据建立的爆震波传播模型,应用特征线算法对脉冲爆震发动机一维非定常流进行了数值计算,通过对以氢气、乙烯和丙烷作为燃料,空气为氧化剂的脉冲爆震发动机性能的计算和分析,可以得出以下结论:

(1) 特征线算法可以很好地应用于脉冲爆震发动机一维非定常流的数值计算,计算过程简单,容易实现。但不足是由于敞口端边界多维现象明显,边界条件需要进一步优化,必要时应该应用多维数值结果或实验值对一维结果进行校正。

(2) 在给定的初始条件下,随着当量比 ϕ 的增大,采用氢气、乙烯和丙烷作为燃料,空气为氧化剂的脉冲爆震发动机单位体积冲量和混合物比冲都基本呈现先增大后减小的规律,而以燃油为

基础的比冲则呈现单调减小的规律。

(3) 本文计算的脉冲爆震发动机性能参数与文献[7]结果比较,两者吻合较好,说明应用特征线算法计算的脉冲爆震发动机性能参数是可信的,基本能达到工程计算的要求。

参考文献

- [1] Lailasanath K, Patnaik G, Li C. Computation Studies of Pulse Detonation Engine: a Status Report[R]. AIAA Paper 1999-2634, June 1999.
- [2] 何立明,严传俊,范玮,等.脉冲爆震发动机的推力计算方法[J].推进技术,1997,18(5): 22~26.
He L in ing, Yan Chuanjun, Fan wei etc Method of Calculating Thrust of Pulsed Detonation Engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(5): 22~26.
- [3] Wintenberger E, Austin J M, Cooper M, Jackson S, Shepherd J E. An Analytical Model for the Impulse of a Single-Cycle Pulse Detonation Engine[R]. AIAA Paper, 2001-3811, July 2001.
- [4] Ebrahim i H B, Mohanraj R, Merkle C L. Multi-Level Analysis of Pulse Detonation Engine[R]. AIAA Paper, 2000-3589, July 2000.
- [5] 本森 R S. 内燃机热力学和空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [6] Sanders T, Jenkins P, Hanson K. Diode Laser Sensor System for Multi-Parameter Measurements in Pulse Detonation Engine Flows[R]. AIAA Paper 2000-3592, July 2000.
- [7] Schauer F, Stutrud J, Bradley R. Detonation initiation Studies and Performance Results for Pulse Detonation Engines[R]. AIAA Paper 2001-1129, January 2001.