

爆震波在爆震燃烧室内传播 过程的数值模拟^①

何 立 明

(空军工程学院航空机械工程系, 西安, 710038)

严传俊 范 玮 王建峰

(西北工业大学航空热力与动力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 在研究混合气体燃烧中产生的爆震波传播机理的基础上, 应用特征线法对爆震波在爆震燃烧室内的传播过程进行了数值模拟, 为分析脉冲爆震发动机的工作原理、性能计算与分析及实验研究提供理论依据。

主题词: 爆震波⁺, 燃烧室, 传播速度, 特征曲线, 数值模拟

分类号: V231.22

NUMERICAL SIMULATION ON PROPAGATION PROCESS OF DETONATION WAVE IN DETONATION COMBUSTION CHAMBER

He Liming

(Dept. of Aeroengine Engineering, Air Force Engineering College, Xi'an, 710038)

Yan Chuanjun Fan Wei Wang Jianfeng

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

Abstract: On the basis of investigating the propagation mechanism of detonation wave produced in combustion of mixing gas, the numerical simulation on propagation process of detonation wave in detonation combustion chamber was made by applying characteristic method. This can provide theoretical base for analyses of operating principle and calculation of performance as well as experimental investigation of pulsed detonation engine.

Subject terms: Detonation wave⁺, Combustion chamber, Propagation velocity, Characteristic curve, Numerical simulation

1 引 言

在绝对坐标系, 爆震波在爆震燃烧室内的传播为一维非定常流动过程, 爆震燃烧室内的流场是与时间有关的^[1]。控制可压缩流体非定常一维流动的方程对于亚声速和超声速流动都是双曲型的, 在流场中每一点的流动性质只取决于上游有限区域中的性质, 而不取决于下游的条件。据此, 本文使用步进型的数值方法研究了爆震波在爆震燃烧室内的传播进程。

^① 收稿日期: 1998-03-02, 修回日期: 1998-06-03, 本课题系国家自然科学基金(编号: 59386027)和“八六三”资助研究项目(编号: 863-2-2-1-4), 获航空工业总公司科技进步二等奖

2 物理模型与特征线方程

假设: (1) 起爆后, 爆震波立刻在爆震室的封闭端形成, 并向右 (敞口端) 传播; (2) 忽略在爆震波中的化学反应过程, 则爆震波可以看作一以爆震波速向右传播的激波; (3) 忽略膨胀波的左传过程, 即随着爆震波右传即刻在爆震室封闭端反射形成一右传膨胀波区。爆震波在爆震室内传播过程的物理模型如图 1 所示。

对绝对一维非定常流动, 由控制方程可得特征线方程和相容性方程:

$$(dt/dx)_0 = \lambda_0 = 1/u, (dt/dx)_{\pm} = \lambda_{\pm} = 1/(u \pm a)$$

$$dp - a^2 d\rho = 0, \quad dp_{\pm} \rho a du_{\pm} = 0$$

其中附在微分项下标中的“+”号和系数 ρa 前面的“+”号与 c_+ 特征线相对应, 而下标中的“-”号和系数前面的“-”号与 c_- 特征线相对应。

可见, 对于非定常一维流动有三条不同的特征线: 轨线 c_0 和两条马赫线 $c_{\pm}$, 在三条特征线每一条上有一个相容性方程成立。

为了利用上面导出的特征线方程和相容性方程, 必须作出三条特征曲线在一个公共点相交的特征线网格, 以便在交点上可以用三个相容性方程联立解该点的三个流动参数 u , p 和 ρ 。

3 数值方法

用逆步进法解积分特征线方程和相容性方程, 其原理如图 2 所示。在逆步进法中, 解点是在逐次排列的求解线上得到的, 一般这些线都是与平均流动方向垂直的, 如图 2 中的 AB 线和 CD 线。在求解线上 (如 AB) 需要被确定流体参数的那些点以某种规定的方式 (如等间距的通过流场) 预定, 然后, 从求解线上的一点处 (如 4 点) 作出向后面伸去的特征线, 并与前面的求解线 CD 相交, 就可得到这个单元过程。在 1 点和 2 点的流体性质可用沿已知的求解线 CD 用插值法得到。为了保证数值稳定性, 插值函数必须包括位于后伸特征线与前一根已知的求解线的交点外面的点, 例如, 求解线 CD 上的 a 点和 c 点。一般来说, 交点 (1 点和 2 点) 的位置是用迭代法确定的。逆步进法在计算逻辑方面的优点是求解点的数目和位置可以预先指定, 但其计算精度比直接步进法低。

通过 $x-t$ 平面上每一个点有三条特征线, 即轨线和右行及左行马赫线 c_+ 和 c_- 。在导出特征线法的数值算法时, 应用特征曲线构成的有限差分网格是有好处的, 且作为近似, 用短的直线段来代替相应的特征曲线短线段。

图 3 表示了在 $x-t$ 平面上逆步进法的有限差分网格。其中解点 (4 点) 的位置是预先规定的, 交于 4 点上的三条特征线向后延伸与原先计算的一条线相交, 以确定初始数据点的位置。但初始数据点 (1, 2 和 3 点) 上的流动参数的计算需要用先臆的解点 (5, 6 和 7 点) 进行内插, 内插会降低数值算法所能得到的结果的精确度。

为确保解的稳定性, 必须满足 CFL 稳定性准则^[2]。此准则要求初始数据点 (图 3 中的 1, 2 和 3 点) 落在先前的解点 (5, 6 和 7 点) 之间。

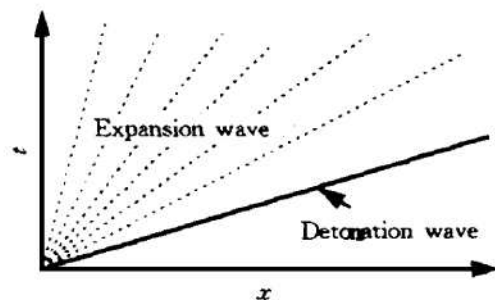


Fig. 1 Physical model of detonation wave propagation in detonation combustion chamber on the $x-t$ plane

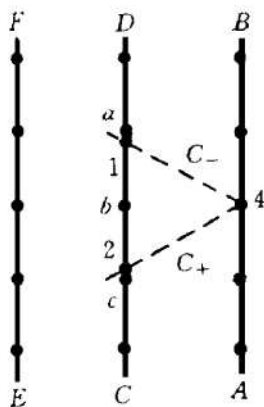


Fig. 2 Principle figure of inverse step-by-step method

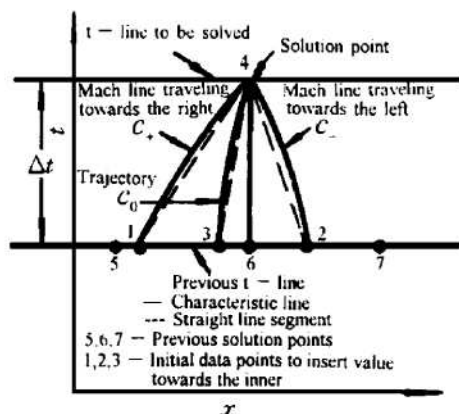


Fig. 3 Finite differential grid of inverse step-by-step method

根据图 3 表示的基于逆步法的内点的有限差分风格 (初始数据点和解点间的特征曲线段用连接这些点的直虚线来近似的), 可写出与特征线方程和相容性方程所对应的有限差分方程:

$\Delta t_0 = \lambda_0 \Delta x_0$ (轨线), $\Delta p_0 - A_0 \Delta \rho_0 = 0$ (沿轨线), $\Delta t_{\pm} = \lambda_{\pm} \Delta x_{\pm}$ (马赫线), $\Delta p_{\pm} + Q_{\pm} \Delta u_{\pm} = 0$ (沿马赫线)

时间步长 Δt 取值的原则是它使得向后延伸的马赫线 14 和 24 与 t 线的交点落在先前的解点 (5 和 7 点) 之间, 时间步长 Δt 由下式给出: $\Delta t_{\pm} = \lambda_{\pm} \Delta x = \Delta x / (u \pm a)$ 。当 $u \pm a$ 是最大值时, $\Delta t_{\pm}$ 达到最小值, 逆步进法 Δx 是常数。于是 $\Delta t_{\min} = \Delta x / (|u| + a)_{\max}$ 。

用有限差分方程的数值算法是以改进的欧拉预估-校正法为基础的。在预估步骤中, 有限差分方程中的所有系数都由已知的初始数据点计算。校正步骤采用三个基本因变量 u , p 和 ρ 对每一条特征线的平均值, 而有限差分方程的系数用此平均流动参数值进行计算。

4 算例与分析

根据文献 [1] 计算的结果, 对于在汽油-空气混气燃烧中产生的爆震波, 当混气余气系数 $\alpha = 1.0$ 时, 爆震波后已燃气流参数 $p_2 = 21.27 \times 10^5 \text{ Pa}$, $\rho_2 = 2.42 \text{ kg/m}^3$, $T_2 = 3081.56 \text{ K}$, $U_s = 1898.47 \text{ m/s}$ (爆震波速), $u_2 = 857.40 \text{ m/s}$, $\gamma_2 = 1.2367$, $R_2 = 287.93 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; 未燃气体参数为 $p_1 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_1 = 298.15 \text{ K}$, $\rho_1 = 1.247 \text{ kg/m}^3$, $\gamma_1 = 1.332$, $R_1 = 272.439 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, $u_1 = 0$, 爆震燃烧室长度为 1 m 。模拟此工况下爆震波在爆震燃烧室内的传播过程, 计算结果如图 4~7 所示。

上述结果可随着时间的增长, 爆震波向敞口端传播, 爆震燃烧室内的压力、密度、温度、速度逐渐减小, 当最后一道膨胀波排出爆震室时, 其室内压力、密度、温度、速度降低到封闭端的值, 其后, 随着反射膨胀波的传入, 爆震室内的压力、密度逐渐降低到外界压力、密

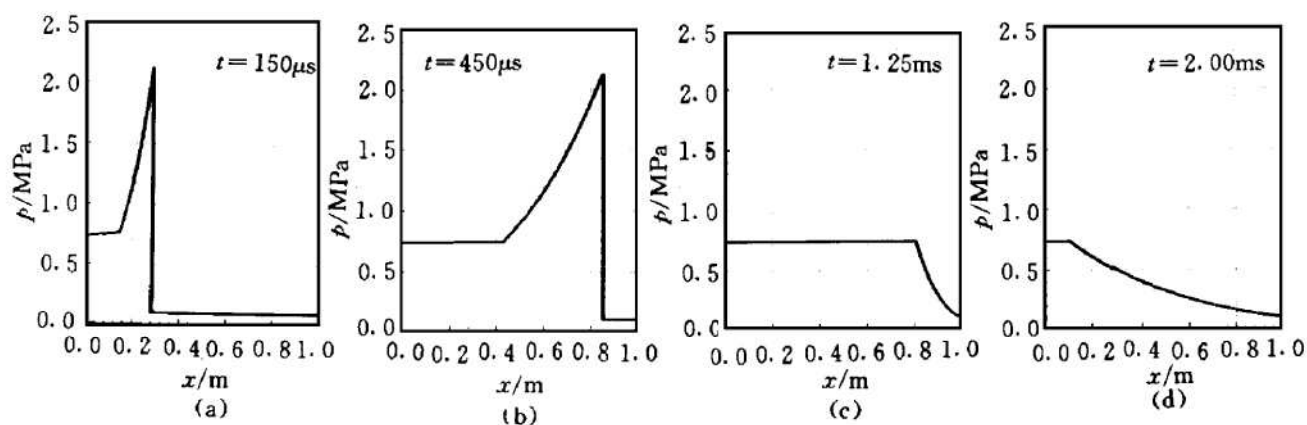


Fig. 4 Axial distribution of pressure in detonation combustion chamber in the process of detonation wave propagation

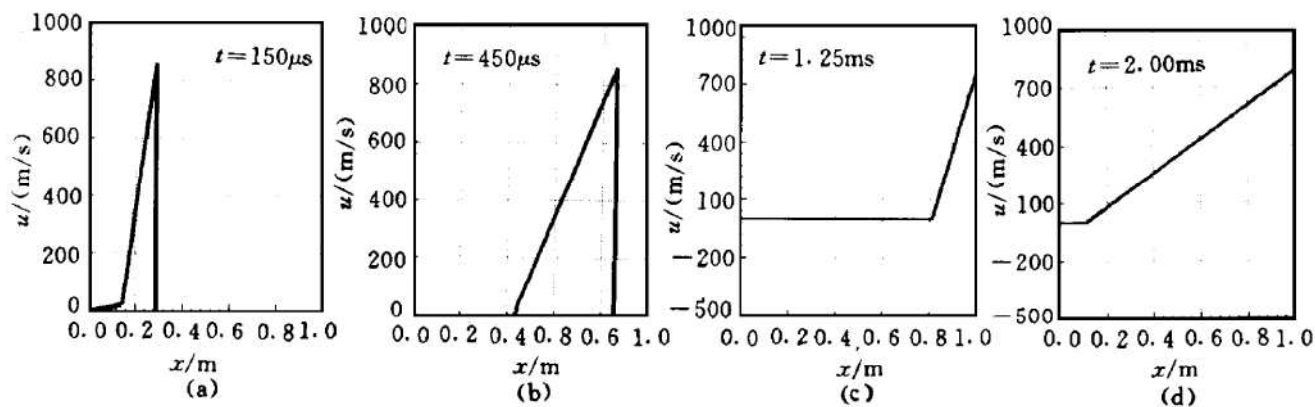


Fig. 5 Axial distribution of velocity in detonation combustion chamber in the process of detonation wave propagation

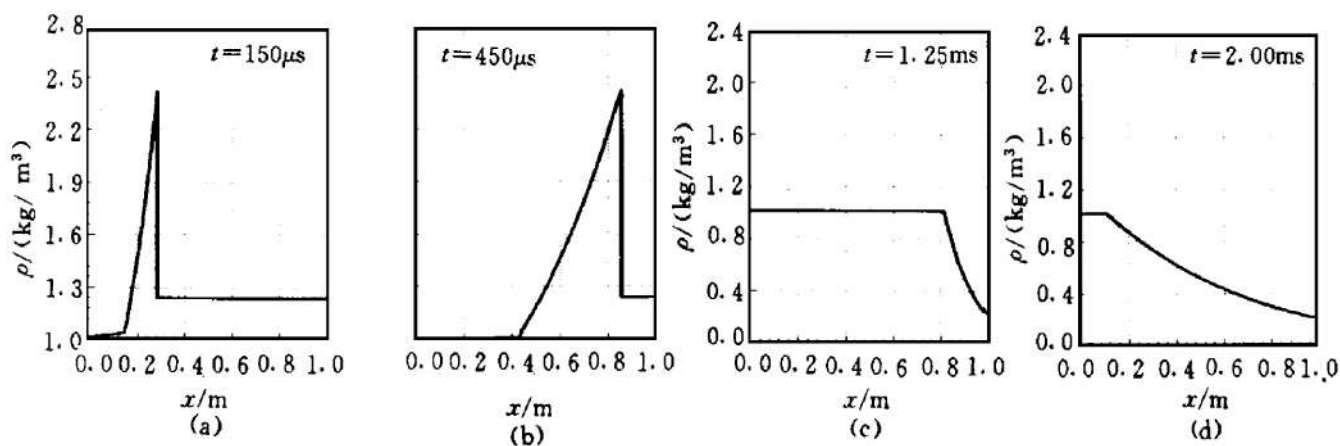


Fig. 6 Axial distribution of density in detonation combustion chamber in the process of detonation wave propagation

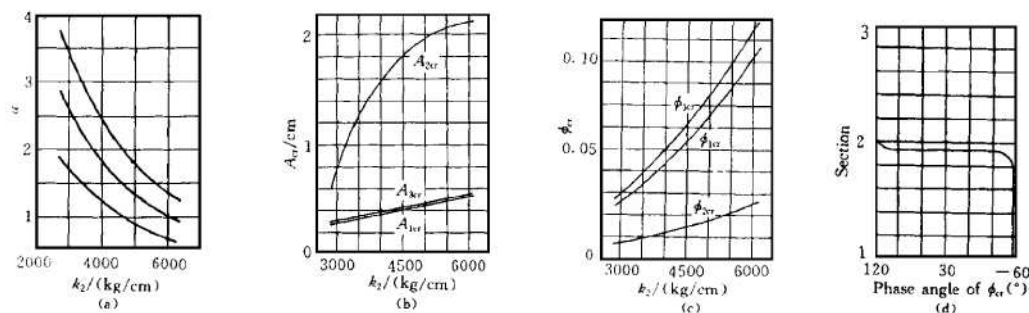


Fig. 3 Curves of calculated results

a. Damping coefficient versus support stiffness when rotor free vibration b. Line amplitude versus support stiffness when forced vibration c. Angle amplitude versus support stiffness when forced vibration d. Phase change of angle amplitude

参 考 文 献

- 1 岸本健治, 吉田裕宣. 改良型 LE-7 I ソ (Development of improved LE-7). 三菱重工技报, 1996, 33 (3): 194~197
- 2 Ishii T, Kirk. R G. Transient response technique applied to active magnetic bearing machinery during rotor drop. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 1996, 118: 154~163
- 3 钟一谔, 何衍宗, 王 正, 等. 转子动力学. 北京: 清华大学出版社, 1987.

(上接第 73 页)

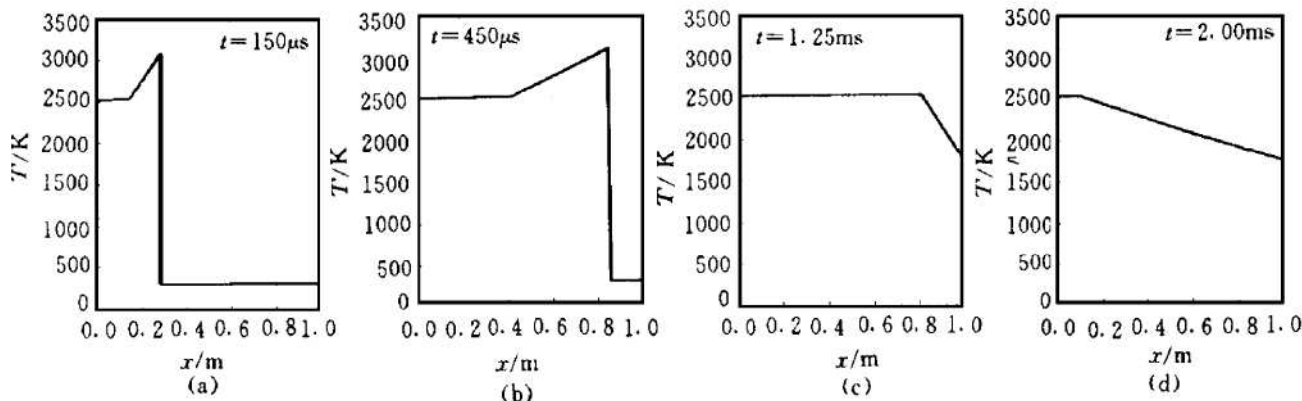


Fig. 7 Axial distribution of temperature in detonation combustion chamber in the process of detonation wave propagation

度, 温度进一步降低, 而爆震产物流向敞口端, 其流速逐渐增大, 以利于排出爆震产物和再次充填新鲜可燃混气, 开始下一个循环。算例结果与文献 [3] 基本一致。

参 考 文 献

- 1 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)
- 2 左克罗 M J, 霍夫曼 J D. 气体动力学(下册). 北京: 国防工业出版社, 1984.
- 3 Bussing T, Pappas G. An introduction to pulse detonation engines. AIAA 94-0263