

文章编号: 1000-8055(2010)02-0270-08

加力燃烧室流场形态与振荡燃烧数值模拟

张澄宇, 孙晓峰

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京, 100191)

摘 要: 利用数值方法对发动机加力燃烧室内的流场形态和振荡燃烧进行模拟, 获得流场平均参数及涡系结构, 观察到燃烧室内火焰稳定器唇口附近剪切涡对选择模型的敏感性, 发现火焰稳定器后的涡脱落和回流区的周期性变化是引起加力“蜂鸣”现象和振荡燃烧的重要因素, 证明了 Rayleigh 准则在研究此类问题时的适用性。

关 键 词: 加力燃烧室; 数值模拟; 剪切涡; 涡脱落; 振荡燃烧

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Numerical simulation on vortex shedding and combustion oscillation in aero-engine afterburner

ZHANG Cheng-yu, SUN Xiao-feng

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The flow field and combustion oscillation in the aero-engine afterburner were numerically simulated. The mean parameter and vortex structure were obtained. The combustion model is very important for the shear vortex accreting the flame holder lip. The periodic process of vortex shedding and periodic change of recirculation zone after the flame holders were observed as an important factor for the afterburner buzz and combustion oscillation. The applicability of Rayleigh rule was validated by the harmonious wave in the afterburner.

Key words: afterburner; numerical simulation; shear vortex; vortex shedding; combustion oscillation

为了解决航空发动机在使用过程中出现的振荡燃烧、蜂鸣等现象, 对加力燃烧室中的流场形态和不稳定燃烧一直是工程设计和使用者十分关注的问题。由于加力燃烧室结构复杂, 涉及流动、燃烧、传热等过程, 并且存在众多复杂的涡系结构, 因此要获得准确的流场图景、弄清燃烧不稳定的产生机理是十分困难的。采用数值模拟的方法来研究加力燃烧室内的流动和模拟不稳定燃烧是目前常用的手段之一, 国内外的一些学者在这方面做了大量细致的工作, 如赵坚行^[1-2]、王方^[3-4]等利

用大涡模拟研究了模型燃烧室内火焰稳定器的燃烧过程, 张欣刚^[5]等用计算流体动力学(CFD)方法模拟预混模型燃烧器中的自激振荡, 章诚^[6]等采用两相湍流 EBU(eddy break-up, 简称 EBU)模型模拟了带尾锥和稳定器的加力燃烧室的燃烧, 蔡文祥^[7]模拟了环形燃烧室的燃烧。但针对具有冷热掺混和复杂结构的具体发动机加力燃烧室整体的流动图景和不稳定燃烧过程的分析则极为少见。

本文以某型发动机加力燃烧室整体为研究对

收稿日期: 2009-11-05; 修订日期: 2009-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(50890181)

作者简介: 张澄宇(1972-), 男, 河南三门峡人, 工程师, 博士生, 主要从事非定常流动与气动声学方面的研究。

E-mail: zcy7221@sina.com

象,包括涡轮后的排气混合器、掺混段、加力燃烧室和喷口等结构.研究目的一是通过数值模拟的方法建立燃烧室内的流场图景,二是研究流场内的涡系结构与燃烧不稳定之间的关系,三是为后续工作中发展的热声不稳定理论模型提供流动平均参数,并以此为基础来研究热声振荡的影响因素和控制方法.

本文分别采用单流体 EBU-Arrhenius 模型和有限速率两相湍流 PDF (probability density function) 模型来模拟湍流的燃烧过程,以该型发动机在最大加力工况下的试车数据统计平均结果来验证数值模拟中定常计算结果的准确性.非定常数值计算模拟了发生振荡燃烧时的流场形态,观察到火焰稳定器后的涡系脱落及回流区的周期性变化.发现达到稳定的振荡燃烧频率接近于该发动机实际应用时发生的蜂鸣频率,证明了数值模拟方法对燃烧不稳定现象进行预测是一条有效的途径.

1 模拟对象与数值方法

1.1 数值计算模型

1.1.1 EBU-Arrhenius(E-A) 方法

考虑燃料脉动对于燃烧过程的影响,Spalding^[8]提出化学反应速率取决于未燃气团在紊流作用下破碎成小气团的速率,而破碎速率于紊流脉动动能的衰变速率成正比,则化学反应速率可以写成

$$\bar{R}_{fu} = -C_r g^{1/2} \rho \epsilon / k \quad (1)$$

式中 g 为燃料质量分数的脉动均方值, $g = m_{fu}^2$. g 可以由求解微分方程或者求解代数方程的方法求解^[9].式(1)即为常用的旋涡破碎模型,模型系数 C_r 可根据下式估算:

$$C_r = \left(\frac{\Delta T^\phi}{1000} \right)^2 \frac{g^{1/2}}{g_{\max}^{1/2}} \ln \left(1 + 2 \frac{g_{\max}^{1/2}}{g^{1/2}} \right) \quad (2)$$

本文采用文献[9]的推荐值: $C_r = 3$.

由于 EBU 模型并没有考虑到温度对于化学反应速率的影响,Mason^[10]等提出 EBU-Arrhenius(E-A)模型,在快速反应速率假设的前提下,化学反应速率可以写成

$$\bar{R}_{fu} = \min \left(\bar{R}_{fu,EBU}, \bar{R}_{fu,Arrhenius} \right) \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{R}_{fu,EBU} &= C_r g^{1/2} \rho \epsilon / k; \\ \bar{R}_{fu,Arrhenius} &= -A_0 \bar{\rho} m_{fu} m_{ox} \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \end{aligned}$$

1.1.2 有限速率两相湍流 PDF 模型

两相流场中气相控制方程可以统一写为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_g \rho u_g \Phi \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_g \rho v_g \Phi \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_g \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_g \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + S_\Phi \quad (4)$$

式中 Φ 是通用变量, Γ_Φ 是湍流有效扩散系数, S_Φ 是源项, u_g 和 v_g 对应气流微团在 x, y 方向上的速度. Φ , Γ_Φ 和 S_Φ 的具体内容详见文献[11].当 $\Phi = 1$, $\Gamma_\Phi = 0$ 时为气相容积分数 α_g 的连续方程.

颗粒轨道模型^[12-15]在 Lagrange 坐标系下处理颗粒相,把颗粒看成与流体之间有滑移、沿轨道运动的分散群,忽略颗粒群间的相互扩散.

在颗粒和气相之间存在相互作用.平面坐标系下的颗粒运动方程为

$$du_p/dt = \left(\frac{18\mu_g}{\rho_l d_p^2} \right) \left(\frac{C_d Re}{24} \right) (u_p - u_g) \quad (5)$$

$$dv_p/dt = \left(\frac{18\mu_g}{\rho_l d_p^2} \right) \left(\frac{C_d Re}{24} \right) (v_p - v_g) \quad (6)$$

式中 u_p 和 v_p 分别为液相速度分量, μ_g 为气相黏度, d_p 为油珠直径, ρ_l 为油珠密度, Re 为颗粒的相对运动雷诺数, C_d 为油珠阻力系数.

当已确定液滴速度变化规律后,液滴轨迹可以采用下述方程进行求解

$$x_p = \int u_p dt, \quad y_p = \int v_p dt \quad (7)$$

考察液滴的加热和蒸发,求得出液滴尺寸、速度和温度,可求得每个控制容积中液滴与气体相互作用源项.

质量源项

$$M_1 = \sum_L^N (m_{do} - m_{di})_L \quad (8)$$

式中 m_{di} 和 m_{do} 分别为控制容积进口和出口处液滴质量流量, N 代表油雾中液滴尺寸组总数.

动量方程源项

$$\begin{aligned} F_x &= \sum_L^N (mu_{do} - mu_{di})_L \\ F_y &= \sum_L^N (mv_{do} - mv_{di})_L \end{aligned} \quad (9)$$

焓方程源项

$$S_{ph} = \sum_L^N (m_{di} - m_{do}) \left(H_{fu} - L \right) - Q_d c_{pg} \left(T_p - T_{p0} \right) \quad (10)$$

式中 Q_d 表示液束破裂形成油雾尺寸为分组油滴

尺寸的油珠质量流量.

把以上所得的气液相互作用源项加入气相守恒方程中表示液滴相和气相之间质量、动量和能量交换的耦合.

加力燃烧室内喷嘴喷出的液雾滴径很小,一般为 $60\mu\text{m}$ 左右,本文采用了统一液滴尺寸的双流体模型来进行计算.

1.2 模拟对象与数值方法

本文采用二维网格来模拟加力燃烧室的流场和不稳定燃烧,对研究对象按照一定规则进行了简化.考虑了内外涵冷热两股气流的混合,包括燃油总管、催化点火器、三圈火焰稳定器以及加力隔热屏等结构,喷管面积为最大加力状态时的尺寸.

图 1 为简化后的加力燃烧室几何结构.

本文采用 SIMPL E 算法求解计算域,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 方程模型,差分格式采用二阶迎风格式.网格采用非结构自适应加密网格.

边界条件由发动机在最大加力状态时的统计数据给出进出口截面参数,内中外圈燃油流量的分布也按照发动机设计手册给定.即在进口截面的内涵总压 $p_1^* = 286\,752.93\text{ Pa}$,总温 $T_1^* = 933.8\text{ K}$,外涵总压 $p_2^* = 272\,466.99\text{ Pa}$,总温 $T_2^* = 406.3\text{ K}$;尾喷管出口接近临界状态,出口总温设定 $T_3^* = 2013\text{ K}$;燃油流量给定为 4.246 kg/s ;将隔热屏简化为等温壁面,各段温度由该发动机设计手册给出.

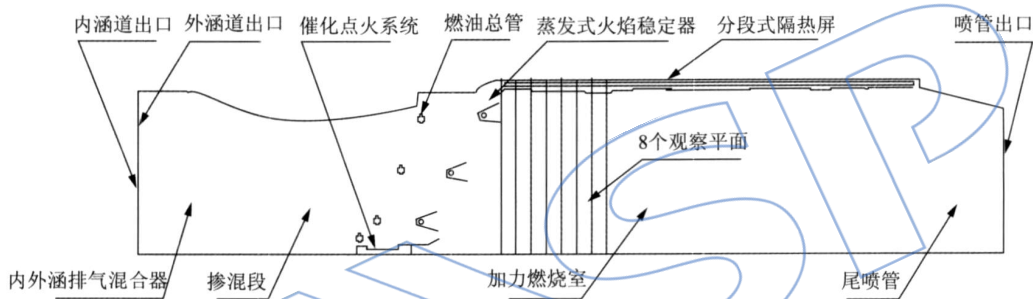


图 1 加力燃烧室简化示意图

Fig. 1 Configuration of the aero-engine afterburner

2 计算结果的分析讨论

2.1 定常流动的模拟结果

首先计算了定常情况下的平均流场,将其作为模拟不稳定燃烧以及后续工作中热声振荡理论模型计算的基础.从计算所得的各截面平均参数与试车数据统计平均结果吻合的较好.表 1 中将进出口截面参数计算结果与试车数据进行了对比.

从表 1 中看出尾喷口出口截面的计算结果与实际对比存在差异,说明使用的数值模型还不能十分精准地刻画加力燃烧室内的流动情形.但误

差控制在 5% 范围以内,已能够说明数值模拟具有一定的准确度,可以用来反映平均流场的特性.

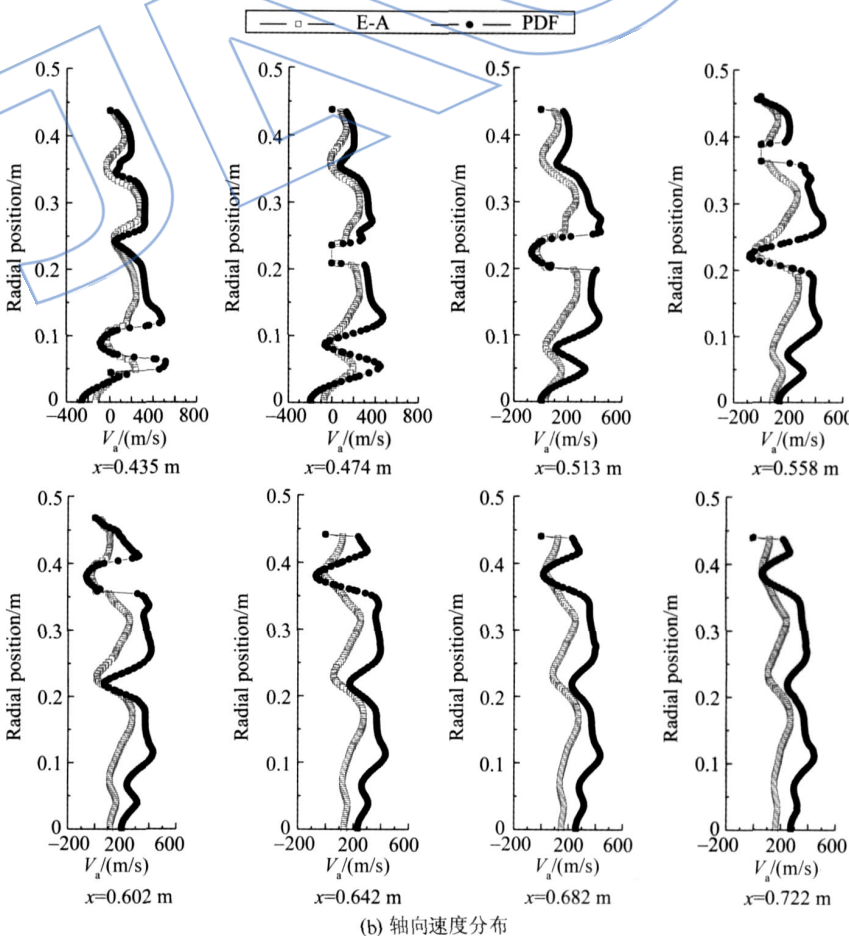
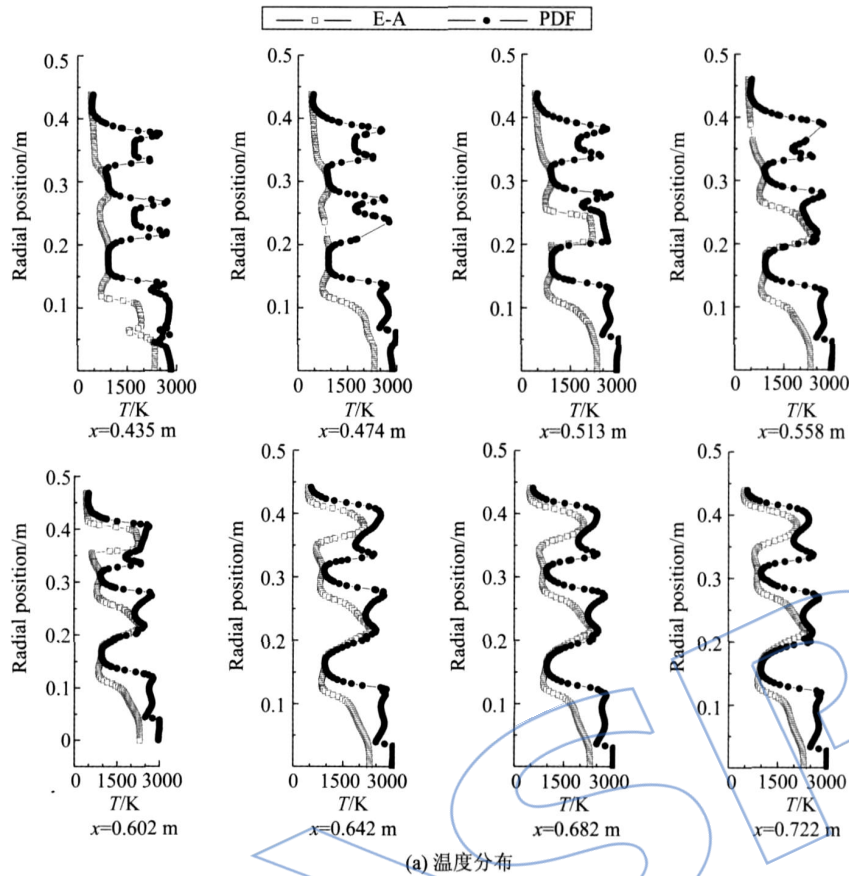
由于加力燃烧室内部的流动没有直接的实验数据,因此将 E-A 模型和两相湍流 PDF 模型的两组计算结果进行对比.结果显示出在几个关心的截面上的平均流动参数比较接近,但在局部的流场形态上仍有一些差异.

图 2 为内、中、外三圈火焰稳定器唇口后方 8 个观察面上(8 个观察面位置如图 1 所示)沿径向方向上的温度和速度分布情况,以此来观察火焰稳定器后的流动和涡系特征.

表 1 数值模拟与通流计算结果

Table 1 Comparison of numerical results and test

	外涵出口 流量/ (kg/ s)	内涵出口 流量/ (kg/ s)	尾喷管出口 流量/ (kg/ s)	尾喷管出口 总压/ Pa	尾喷管出口 总温/ K
试车数据	36.048	57.885	98.715	238484.12	2013
E-A 模型	35.413	58.844	98.509	245773.95	1929
PDF 模型	34.583	58.679	97.185	233826.71	2020



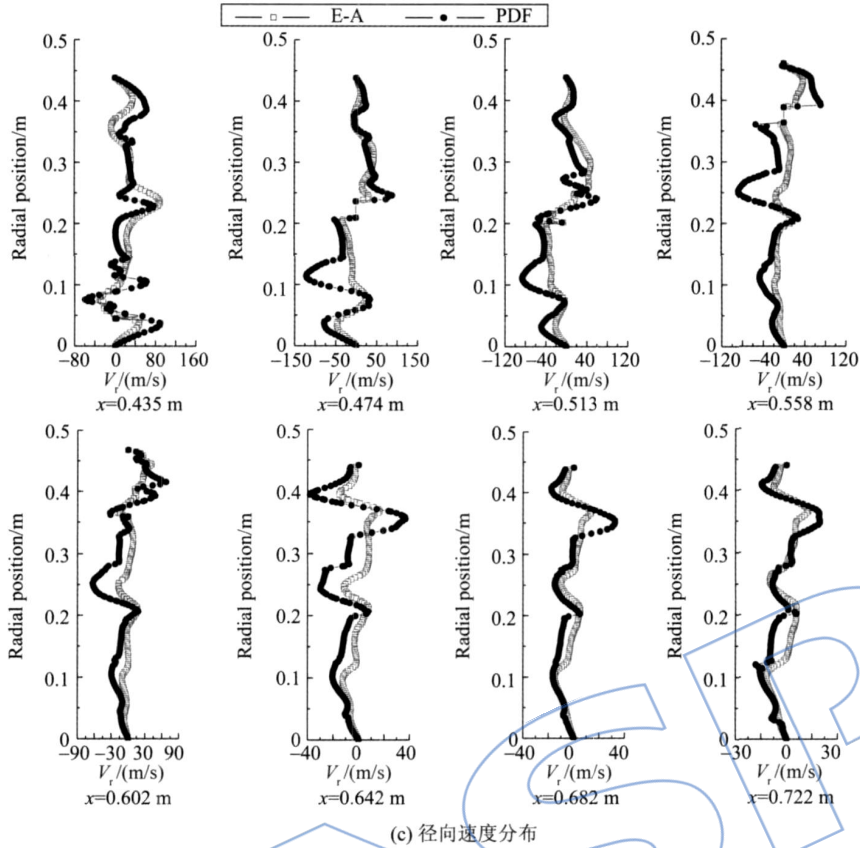


图 2 火焰稳定器后方 8 个截面参数沿径向分布

Fig. 2 Radial distributions of parameters after the flame holders

图 2 中显示火焰稳定器唇口位置附近的参数差异比较大,说明燃油的蒸发过程、燃油分布以及运动轨迹对于唇口后缘产生的剪切涡形态有重要的影响,选择的模型对计算结果十分敏感.要准确地反映这些位置的流动状态,需要对化学反应和燃烧过程做进一步的分析和研究. PDF 模型模拟出的火焰面结构比较复杂,图中显示温度在唇口附近的变化比较剧烈.沿着流动方向,参数沿径向分布的差异逐渐减小,说明剪切层的作用逐渐减小.

图 3 显示的是利用 E-A 模型模拟得到的燃烧室流场图景.图 3(a)是定常情况下的总温分布,可以看出主要的燃烧反应区都出现在火焰稳定器的后方,并且中外圈火焰稳定器的燃烧反应区在加力室中后位置发生融合现象,这也是符合实际观察情形的.内外涵冷热两股气流并未充分掺混,与实际情况有一定差异.图 3(b)是定常情况下的总压分布,由于燃油总管、火焰稳定器以及催化点火系统的堵塞比设置为 30%,总压在气流流经这些部件时发生较大的压力损失.可以看到火焰稳定器唇口后方火焰区附近形成明显的剪切

层.图 3(c)是定常情况下的轴向速度分布,在火焰稳定器唇口附近形成速度分布梯度很大的剪切层,也可以看出三圈火焰稳定器对流动形态的影响.

图 4 显示了定常情况下燃油总管、火焰稳定器以及催化点火器后的涡量分布和速度矢量图.在稳定器和催化点火器唇口附近形成了稳定的回流区,使火焰能够保持在稳定器后而不被气流吹走.在燃油总管后面也存在剪切涡,但显然不够稳定,因此火焰不能保持在那里.

2.2 非定常情况下的涡运动与燃烧振荡

基于 E-A 模型的非定常计算的时间步长 $\Delta t = 0.1 \text{ ms}$.经历 0.35 s 后,加力燃烧室内火焰稳定器附近形成一种十分规则的振荡燃烧.

观察燃油总管、催化点火器和火焰稳定器后的涡运动,发现涡的产生、脱落和破碎呈现周期性的变化,火焰稳定器后缘的主回流区的长度也呈现周期性的变化规律.图 5 以达到稳定的振荡燃烧的时刻为 0 点,演示接近一个周期的涡变化情况.

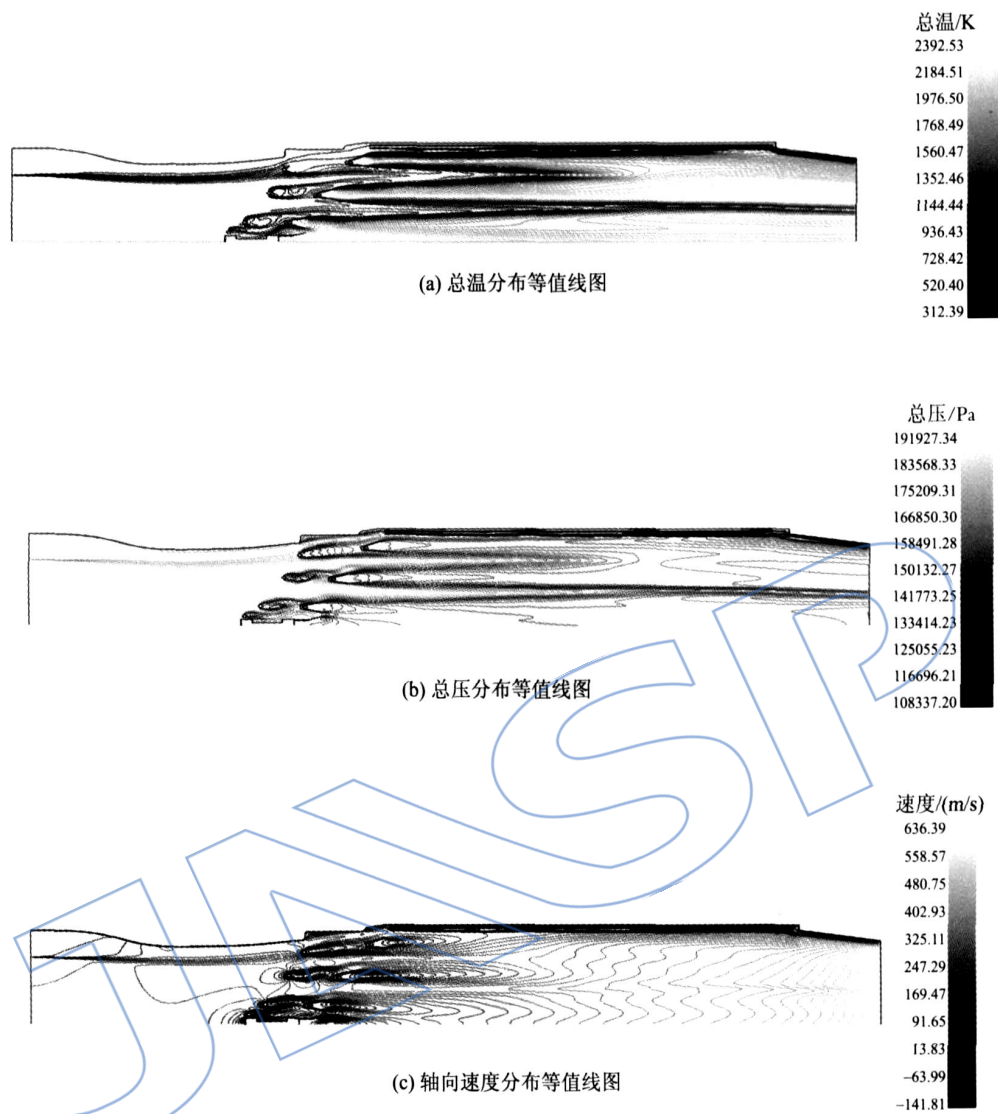


图 3 定常总温、总压及轴向速度等值线图

Fig. 3 Contours of total temperature, total pressure and axial velocity

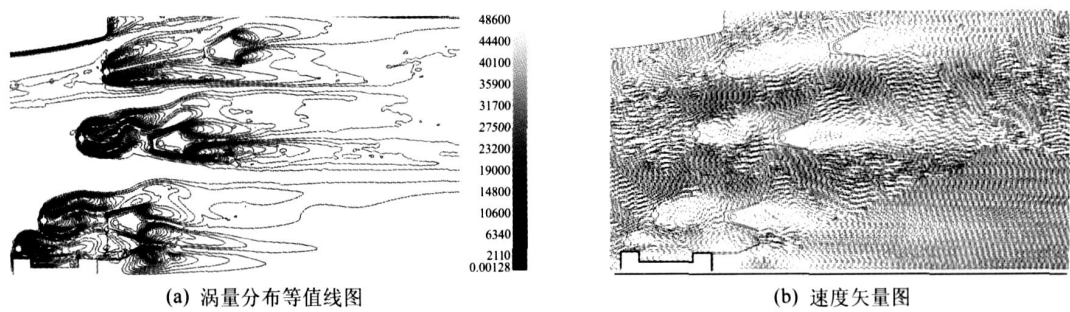


图 4 燃油总管及火焰稳定器后的涡分布和速度矢量图

Fig. 4 Contours of vorticity magnitude and vectors after the fuel supplies and the flame holders

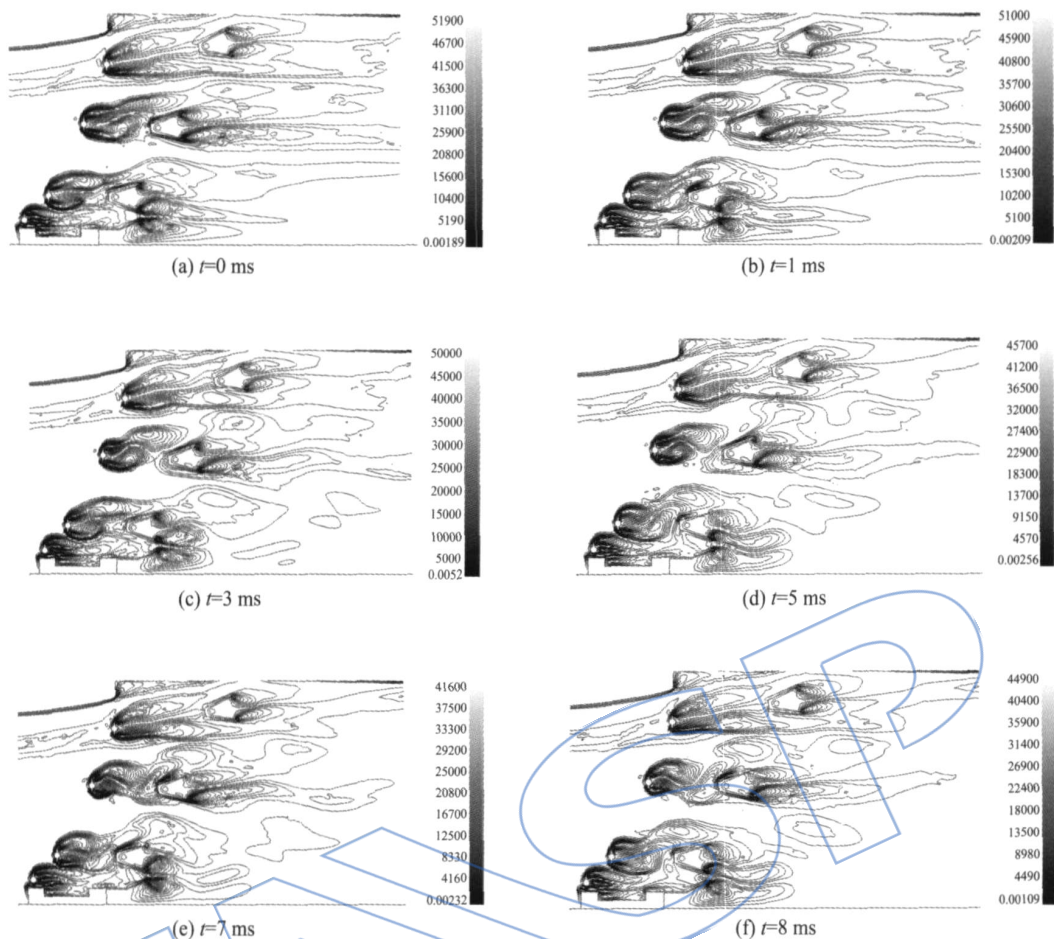


图 5 燃油总管及火焰稳定器后的涡量变化

Fig.5 Periodicity of vorticity magnitude after the fuel supplies and the flame holders

在外圈火焰稳定器唇口位置(距催化点火器唇口 168 mm 处)设置观察平面,将该平面的压力、温度进行积分平均,得到如图 6 所示的振荡波形.

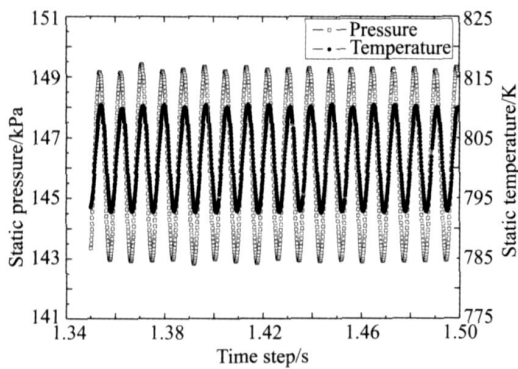


图 6 观察面处的温度和压力波动

Fig. 6 Perturbations of temperature and pressure

通过对振荡频率的计算,得到压力和温度波动的频率为 117.18 Hz,这个频率落在发动机使

用过程中发生“蜂鸣”100~120 Hz 的频率范围内,说明燃烧室内的涡脱落是引起加力“蜂鸣”和振荡燃烧的重要因素.

根据 Rayleigh 关于维持振荡的判据 $\int \rho(x,t) Q(x,t) dx \geq 0$, Q 与 p 的相位差应满足 $0 \leq \phi \leq 90^\circ$.从图 7 中可以看出温度脉动比压力脉动落后 21° 左右,能够保持自激振荡的稳定.

从图中可以得到压力波动量仅为平均值的 4.3%,温度波动量为平均值的 2.2%,这样的能量波动并不足以引起象“蜂鸣”那样大的能量脉动而造成破坏,因此涡脱落应是产生加力蜂鸣现象的诱发因素之一,它必须与其他过程耦合起来才能引起蜂鸣.

在此需要指出的是:通过数值模拟得到的加力燃烧室中后部的振荡情况十分复杂,并不像火焰稳定器唇口附近那么规则,并且包含多种频率成分,振荡的强度也远远大于稳定器唇口的强度,压力振荡的幅度甚至达到平均值的 20%以上.这些现象说明对振荡燃烧的发生机制仍需做进一步

的研究和探讨。

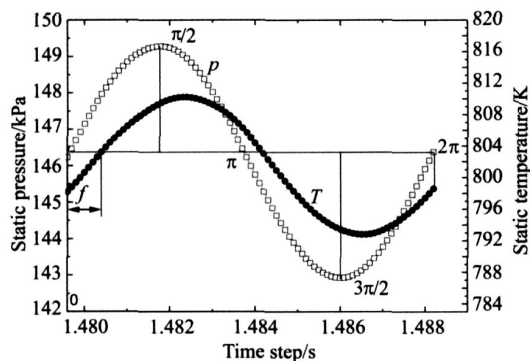


图7 温度和压力波动的相位关系

Fig. 7 Phase relations of temperature and pressure perturbations

3 结 论

1) 本文的数值模拟结果能够较好地反映发动机加力燃烧室内的平均流动特性,为后续的热声振荡理论数值计算提供一个可信的基础。

2) 火焰稳定器唇口附近形成的涡系结构与燃油的蒸发和分布等因素密切相关,选用的模型对模拟结果十分敏感。

3) 燃油总管和火焰稳定器后缘的涡脱落和回流区长度变化能够引起流动和燃烧的周期性脉动,它是引起加力“蜂鸣”现象的重要诱发因素。

4) 观察到的振荡燃烧现象证明 Rayleigh 准则在研究加力燃烧室自激振荡时的适用性。

参考文献:

- [1] 赵坚行, 颜应文. 加力燃烧室热态流场的大涡模拟[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(增): 237-239.
ZHAO Jianxing, YAN Yingwen. Large-eddy simulation of turbulent reacting flows for the afterburner[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(Suppl): 237-239. (in Chinese)
- [2] 邵茂敏, 颜应文, 刘勇. 模型加力室大涡模拟的并行计算[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 497-501.
SHAO Maomin, YAN Yingwen, LIU Yong. Parallel computation for large-eddy simulation of a model afterburner[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 497-501. (in Chinese)
- [3] 王方, 周力行, 许春晓. 预混燃烧大涡模拟和燃烧模型的检验[J]. 推进技术, 2008, 29(1): 33-36.
WANG Fang, ZHOU Lixing, XU Chunxiao. Large-eddy simulation of premixed combustion and validation of the combustion model[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(1): 33-36. (in Chinese)
- [4] 王方, 许春晓, 王家骅. 稳定器流动、燃烧实验及冷态大涡模拟研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 502-506.
WANG Fang, XU Chunxiao, WANG Jiahua. Experimental studies of flow and combustion with a flame-holder and LES of the flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 502-506. (in Chinese)
- [5] 张欣刚, 田淑青, 徐治皋. 预混燃烧室热声不稳定性数值分析[J]. 中国电力, 2007, 40(12): 72-76.
ZHANG Xingang, TIAN Shuqing, XU Zhigao. Numerical simulation of thermoacoustic instabilities in premixed combustion[J]. Electric Power, 2007, 40(12): 72-76. (in Chinese)
- [6] 章诚, 叶桃红, 陈义良. 三维加力燃烧室两相湍流燃烧的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2000, 15(4): 397-400.
ZHANG Cheng, YE Taohong, CHEN Yiliang. Numerical simulation of two-phase turbulent combustion in the three-dimension afterburner[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(4): 397-400. (in Chinese)
- [7] 蔡文祥. 环形燃烧室两相燃烧流场与燃烧性能数值研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
CAI Wenxiang. Research on numerical simulation of two-phase reacting flow field and combustion performance of annular combustors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [8] Spalding D B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames[R]. USA: 13th Symposium (Int.) on Combustion, AIAA, 1971: 649-657.
- [9] 赵坚行, 易勇. 紊流燃烧模型数值研究[J]. 推进技术, 1993, 3(1): 8-15.
ZHAO Jianxing, YI Yong. Numerical model for turbulent combustion[J]. Journal of Propulsion Technology, 1993, 3(1): 8-15. (in Chinese)
- [10] Mason H B, Spalding D B. Prediction of reaction rates in turbulent premixed boundary layer flows[R]. Sheffield, England: 4th Proc. European Symposium on Combustion, 1973: 601-603.
- [11] 叶桃红. 加力燃烧室内湍流两相燃烧的数值模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1998.
YE Taohong. Numerical simulation of two-phase turbulent combustion in afterburner[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1998. (in Chinese)
- [12] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [13] 郑楚光, 周向阳. 湍流反应流的 PDF 模拟[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [14] 徐江荣, 周俊虎. 两相湍流流动 PDF 理论与数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] Chan S H, Abour-Elail M. A density-weighted reacting model for multiphase turbulent diffusion flames[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1994, 37(1): 81-90.