

数值模拟研究燃烧室冷态流场结构

张宏达¹, 万 斌¹, 张成凯¹, 林宏军¹, 尚守堂¹, 韩省思², 叶桃红³

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁沈阳 110015; 2. 南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏南京 210016;
3. 中国科学技术大学热科学与能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要: 运用超大涡模拟(VLES)方法对燃烧室冷态流场开展了数值模拟, 研究流场中大尺度涡旋结构. 选取圆管内有旋流动为基准算例开展数值模拟研究, 与实验结果比较验证了 VLES 方法的精度. 计算结果表明, 燃烧室内回流区形状合理. 燃烧室中大孔射流与横向来流的相互作用形成了反向旋转涡对结构, Rothstein 提出的射流迹线公式能够合理预测主燃孔的射流穿透. 进动涡核(PVC)发源于燃烧室头部旋流器装置内部, 基于功率谱密度预测了 PVC 引发流场振荡的特征频率.

关键词: 燃烧室; 超大涡模拟; 旋流; 反向旋转涡对; 进动涡核

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.11.010

引用格式: 张宏达, 万斌, 张成凯, 等. 数值模拟研究燃烧室冷态流场结构[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(11):940-946.

ZHANG Hongda, WAN Bin, ZHANG Chengkai, et al. Numerical simulation of non-reacting flow fields in combustors[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(11):940-946.

Numerical simulation of non-reacting flow fields in combustors

ZHANG Hongda¹, WAN Bin¹, ZHANG Chengkai¹, LIN Hongjun¹,
SHANG Shoutang¹, HAN Xingsi², YE Taohong³

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Very large eddy simulation (VLES) was performed to study non-reacting flow fields in a combustor. Large scale vortex structures were investigated in the flow fields. A benchmark case for turbulent swirling flow in circular tube was studied by numerical simulation. The accuracy of VLES method was verified by a comparison with experimental data. The simulation results show that the shape of the recirculation zone in the combustor is reasonable. The counter-rotating vortex pairs are generated by the interaction between a large hole jet and a crossflow in the combustor. The jet trajectory formula given by Rothstein can reasonably predict the jet penetration of the main combustion hole. The precessing vortex core (PVC) originates from the combustor head swirler. The power spectral density was employed to predict the characteristic frequency of flow oscillation induced by PVC.

Key words: combustor; very large eddy simulation(VLES); swirling flow; counter-rotating vortex pairs; precessing vortex core(PVC)

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(91641205, 51606095)资助.

作者简介: 张宏达, 男, 1988年生, 博士. 研究方向: 湍流燃烧数值模拟和试验研究. E-mail: zhdustc@126.com

通讯作者: 尚守堂, 博士/研究员. E-mail: shtshang@126.com

0 引言

在航空发动机燃烧室中,流动方式异常复杂,包括突扩流动、横侧射流、旋流流动等^[1-2],多种流动方式相结合会产生一系列典型特征现象,如回流区、射流迹线演化、反向旋转涡对(counter-rotating vortex pairs, CVP)和进动涡核(precessing vortex core, PVC)等。回流区内速度较低,同时提高空气与燃料之间的混合效率,有利于稳定燃烧并提高燃烧效率。影响射流迹线演化的因素包括湍流强度、射流管形状、射流角度、动量通量比等^[3]。射流迹线演化决定其穿透深度,影响燃烧室的出口温度场品质。CVP 结构是横侧射流中典型的大尺度涡旋结构,由大孔射流与横向流动的相互作用形成,CVP 结构对湍流输运、混合、不稳定性等有重要影响^[4]。PVC 是旋流流动中一种常见的大尺度涡旋结构,本质上 PVC 具有三维、非对称、不稳定等特性,其能影响附近流体,使之出现振荡现象,PVC 的特征频率受几何结构和旋流强度等影响^[5]。

燃烧室内复杂的流动特性给数值模拟带来了巨大挑战。基于计算成本的考虑,工程上雷诺平均方法(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)的应用最为广泛。诸多学者采用 RANS 方法对航空发动机燃烧室的冷态流场结构分析、综合燃烧性能预测、头部优化设计评估等开展了大量研究^[6-8]。然而,受限于 RANS 模型自身的缺陷,数值计算精度有待提高。大涡模拟(large eddy simulation, LES)适合于研究燃烧室内复杂流场结构。研究者们采用 LES 方法对国际上公开的有旋流动算例开展了数值模拟^[9-11],分析了多种流动不稳定现象,包括 PVC、涡旋破碎泡等。但是,多数算例为非受限空间内的旋流流动,而燃烧室内流动特征为受限空间内旋流流动,由于 LES 方法求解受限空间流动需要很高的网格分辨率,导致 LES 方法难以在航空发动机燃烧室数值模拟中得到广泛应用。以韩省思等^[12-14]发展的超大涡模拟方法(very large eddy simulation, VLES)为代表的联合 RANS/LES 方法很好地结合了 RANS 和 LES 方法的优点,根据局部湍流尺度和计算网格尺度实现在 RANS 和 LES 之间转换,因此 VLES 方法能够以较少的计算网格实现高精度的计算,是航空发动机燃烧室数值模拟中一种极具潜力的方法。

本文采用文献^[12-14]发展的 VLES 方法对航

空发动机燃烧室的冷态流场开展数值模拟,基于计算结果系统分析流场结构,包括回流区、射流迹线演化、CVP 结构、PVC 结构等。本文结构如下:节 1 讲述 VLES 方法;节 2 通过基础算例验证 VLES 方法的精度;节 3 采用 VLES 方法研究航空发动机燃烧室的冷态流场结构;最后给出本文的结论。

1 超大涡模拟方法

1.1 控制方程

流动过程计算采用基于 BSL $k-\omega$ 湍流模型的 VLES 方法,其求解的质量和动量方程如下:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(2\tilde{S}_{ij} - \frac{2}{3}\tilde{S}_{kk}\delta_{ij} \right) \right] \quad (2)$$

式中,上标“-”为空间过滤;“~”表示 Favre 过滤; ρ 为密度; p 为压力; u_i 为 i 方向速度分量; μ 为流体动力黏性; $\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)$ 为应变率张量; δ_{ij} 为单位张量; μ_t 通过分辨率控制函数 Fr 进行调整,公式如下:

$$\mu_t = Fr \bar{\rho} k / \omega \quad (3)$$

上式中湍动能 k 和 ω 的控制方程与 RANS 中 BSL $k-\omega$ 湍流模型中方程一致^[15]。 Fr 是 VLES 方法的核心,其表达式如下^[13-14]:

$$Fr = \min \left(1.0, \left[\frac{1.0 - \exp(-\beta L_c / L_k)}{1.0 - \exp(-\beta L_i / L_k)} \right]^2 \right) \quad (4)$$

式中, β 取值为 0.002; L_i 、 L_c 和 L_k 分别为积分尺度、截断尺度和 Kolmogorov 尺度,计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} L_c &= C_x (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}, \\ L_i &= k^{3/2} / (\beta_1 k \omega), \\ L_k &= (\mu / \rho)^{3/4} / (\beta_1 k \omega)^{1/4} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, C_x 取值为 0.61; β_1 取值为 0.09; Δ_i 表示 i 方向的网格尺度。 Fr 的取值范围为 0 到 1,根据网格空间分辨率的改变而变化,进而确定湍流模化程度,实现在 RANS 和 LES 之间转换。

1.2 离散格式与算法

采用有限体积法对控制方程进行离散,对流域采用有界的二阶中心差分格式,扩散项采用二阶中心差分格式,时间项采用有界二阶中心隐式推进。采用 SIMPLE 算法求解速度和压力的耦合问题。

2 超大涡模拟方法的精度验证

2.1 基准算例计算简介

由于尚未开展燃烧室冷态流场试验,本文选取经典的圆管内有旋流动作为基准算例开展数值模拟研究.Dellenback 等^[16]针对该算例开展了实验研究并提供了定量的速度场实验数据,可以验证 VLES 方法的精度.图 1 给出了基准算例的几何模型和计算网格,图中 D 为上游圆管直径, D_2 为下游突扩段的圆管直径.计算网格为六面体结构网格,在壁面和剪切层附近进行了加密,同时在近壁面处采用增强的壁面函数处理,网格总数约为 9.3×10^5 .入口速度通过实验数据拟合,出口采用自由出流边界条件,固壁处采用无滑移边界条件.计算时间步长为 1 ms ,为确保流场的充分发展,计算 10 个 Flow-time 后进行统计(Flow-time 定义为 L/U_{in} , $L = 12D$, U_{in} 为圆管进口平均速度),进一步统计 10 个 Flow-time.

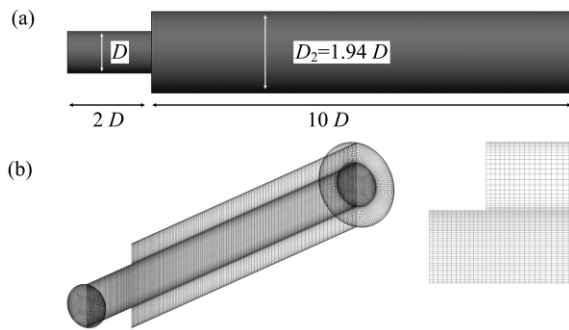


图 1 基准算例的几何模型和计算网格
Fig.1 Computational domain and grid topology of benchmark case

2.2 计算结果精度验证

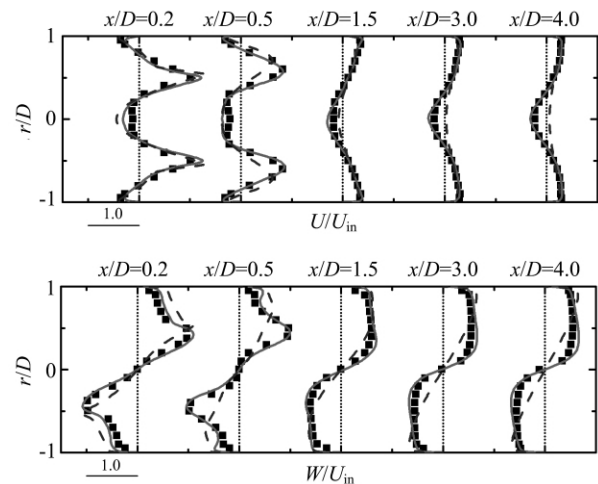
选取强旋流工况(雷诺数为 60 000,旋流数为 1.16)作为数值模拟算例,图 2 给出了 5 个轴向位置处轴向平均速度和周向平均速度的径向分布,分别为 $x/D = 0.2, 0.5, 1.5, 3.0, 4.0$,图中物理量均进行了无量纲处理.本文同时采用 RANS 方法开展数值模拟,以便作为对照.VLES 和 RANS 数值模拟所采用的几何模型、计算网格等均相同,二者区别仅在于湍流黏性中分辨率控制函数的模化,详见表 1.从图中可知,在 $x/D = 0.2$ 和 0.5 截面,中轴线和两侧近壁区域的轴向速度为负值,分别为旋流产生的中心回流区和流体突扩产生的角回流区,VLES 结果很好地预测了轴向平均速度和周向平均速度沿径向的分布,同时 VLES 方法预测的峰值位置和大小均与实验结果符合得很好,然而 RANS 方法预测的轴向平均速度和周向平均速度峰值位置与实验结果存在明

显差异.随着流场向下游发展,VLES 方法的优势更加明显,与 RANS 结果相比,VLES 结果合理预测了下游回流区的存在以及速度沿径向的分布曲线.综上,VLES 方法计算旋流流动是合理的,可用于以有旋流动主导的燃烧室冷态流场结构的计算和分析.

表 1 数值模拟算例

Tab.1 Summary of simulation cases

算例标记	算例描述	分辨率控制函数
VLES	参考算例	公式(4)
RANS	湍流模型比较	$Fr = 1$



黑色方块表示实验结果,实线表示 VLES 计算结果,虚线表示 RANS 计算结果.

图 2 不同轴向位置的轴向平均速度(U)和周向平均速度(W)的径向分布

Fig.2 Radial distributions of axial mean velocity (U) and tangential mean velocity (W) at different axial locations

3 燃烧室冷态流场计算与分析

3.1 燃烧室模型简介

图 3 为燃烧室模型示意图.为了兼顾慢车状态下值班火焰的燃烧稳定性和大状态下主级火焰的燃烧效率,燃烧室采用了三级旋流器和双油路喷嘴组成的火焰筒头部结构.多级旋流器的出口旋流相互作用形成的流场结构更加复杂,本文采用 VLES 数值模拟研究燃烧室的冷态流场结构,所有入口均通入空气.

3.2 数值方法

采用四面体非结构网格对燃烧室进行网格划分,在旋流器装置、扩压器装置、气膜冷却孔等流动参数变化剧烈的区域进行加密,同时在近壁面处采用增强的壁面函数处理.最大网格尺度 4 mm ,最小

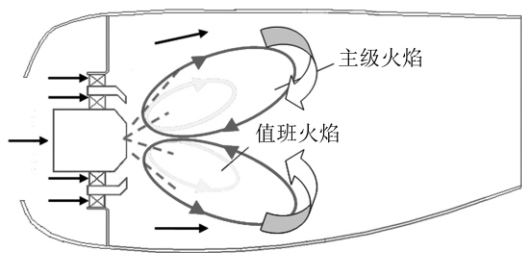


图 3 燃烧室示意图

Fig.3 Sketch of the combustor

网格尺度 0.2 mm, 网格总数约为 1.5×10^7 . 选择发动机热力循环设计点燃烧室工作参数作为数值模拟状态点. 计算入口采用质量流量边界条件, 出口采用自由出流边界条件, 固壁处采用无滑移边界条件. 计算时间步长为 0.04 ms, 为确保流场的充分发展, 计算 10 个 flow-time 后进行统计 (flow-time 定义为

L/U , L 为燃烧室的轴向长度, U 为燃烧室进口的平均速度), 进一步统计 10 个 flow-time.

3.3 冷态流场结构分析

3.3.1 回流区

图 4 显示了中心截面瞬时和平均速度分布情况, 图中黑色线为轴向速度等于零的等值线, 用来表示回流区的大小. 从图中可以看到由火焰筒头部旋流器出口的旋流产生的中心回流区 a, 同时在火焰筒壁面与头部转接段的夹角处形成了角回流区 b. 火焰筒大孔射流对中心回流区 a 起到了截止作用, 防止回流区轴向过长 (x 方向) 导致的火焰外伸和燃烧室出口温度场品质变差等问题; 同时中心回流区 a 的径向尺寸 (y 方向) 合理, 避免出现回流区径向尺寸过长导致燃烧区靠近火焰筒壁面, 破坏近壁区域气膜等现象. 稳定且尺寸合理的回流区有助于空气与燃料之间的掺混, 能够驻定火焰并提高燃烧效率.

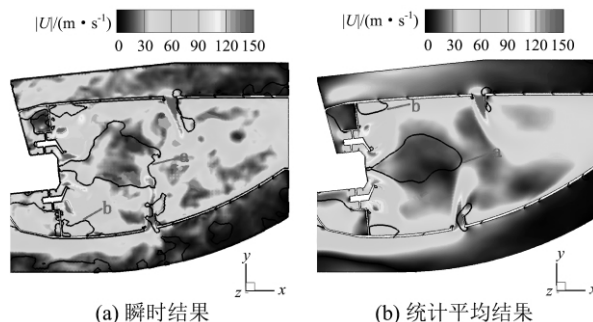


图 4 中心截面瞬时和平均速度分布 ($z=0$)

Fig.4 Distribution of instantaneous and mean velocity magnitude in the central plane ($z=0$)

3.3.2 横侧射流穿透

图 5 给出了中心截面 ($z=0$) 和横截面 ($x=282$ mm) 平均速度分布和平均速度场流线. 从中心截面上流场结构可知, 一方面火焰筒大孔射流对上游回流区起到了截止作用, 另一方面大孔射流与横向来流发生掺混. 从横截面上流线分布可以明显看到反向旋转涡对 CVP 的存在. CVP 结构是横侧射流中主要的大尺度结构, 由大孔射流与横向来流的相互作用形成, 大孔射流受到横向气流的影响发生偏转, 同时受大孔射流流体的影响, 横向气流发生类似“绕流”, 两者相互作用产生 CVP 结构^[17]. CVP 结构有助于大孔射流与横向气流之间的掺混. 在燃烧室设计中大孔结构得到广泛应用, 采用大孔结构能够提高高温燃气与空气之间的混合效率, 调节燃烧室出口温度场品质.

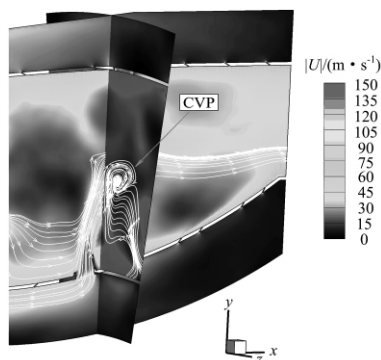


图 5 局部平均流场结构

Fig.5 Local mean flow field structure

大孔的几何中心, 横、纵坐标分别为沿燃烧室进口气流方向和垂直于燃烧室进口气流方向. 图中 VLES 结果为起源于大孔几何中心的射流流线, 同时 Rothstein 等^[18] 和 Gruber 等^[19] 给出的射流迹线拟合公式如下:

$$\frac{y}{D} = 2.173J^{0.276} \left(\frac{x}{D}\right)^{0.281} \quad (6)$$

大孔射流穿透深度是燃烧室设计需要关注的一个重要指标, 而射流迹线演化决定其穿透深度. 图 6 给出了中心截面火焰筒大孔射流穿透, 坐标原点为

$$\frac{y}{JD} = 1.2 \left(\frac{x}{JD} \right)^{0.344} \quad (7)$$

式中, D 为大孔横截面直径, J 为动量通量比, 二者均为燃烧室设计参数. 从图中可知, 公式(6)预测的主燃孔射流迹线与 VLES 结果基本一致, 而公式(7)预测的射流穿透明显高于 VLES 结果, 表明 Rothstein^[18] 等给出的射流迹线拟合公式能够合理预测燃烧室中主燃孔的射流穿透. 公式(6)和(7)预测的掺混孔射流穿透均比 VLES 结果偏高, 这是由于射流穿透不仅与动量通量比有关, 上游大孔射流与横向流体的相互作用形成的复杂涡结构也会影响下游掺混孔的射流迹线演化.

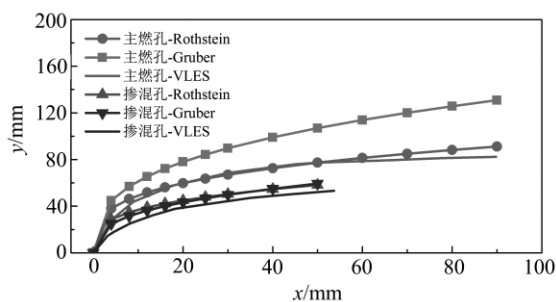


图 6 中心截面火焰筒大孔射流穿透 ($z=0$)

Fig.6 Jet penetration of flame tube holes in the central plane ($z=0$)

3.3.3 进动涡核

图 7 为瞬时压强等值面 ($p = p_0 - 120000 \text{ Pa}$, p_0 为燃烧室进口压强) 显示的 4 个连续时刻的进动涡 PVC 结构, 时间间隔为 4 ms. PVC 结构是旋流流

动中典型的大尺度结构, 从图中可知, PVC 结构发源于火焰筒头部旋流器装置内部, 随着流场向下游发展, PVC 以一定旋转速度绕着中轴线作螺旋式进动运动, 不同时刻 PVC 结构呈现差异, 表明 PVC 结构是三维且不稳定的大尺度涡旋结构. 图 8 给出了横截面 $x=200 \text{ mm}$ 处瞬时压强和瞬时流线分布, 横截面相对位置如图 7 所示. 从图中可知, 不同时刻的瞬时压强分布图中均存在局部低压区, 且局部低压区偏离横截面的几何中心, 从瞬时流线分布图中可以看到周围流体绕涡旋轴做旋转运动, 涡旋所在区域与局部低压区重合, 上述流动特征与 PVC 特征吻合^[20], 进一步表明图 7 中所示的三维非稳定涡旋结构是 PVC 结构.

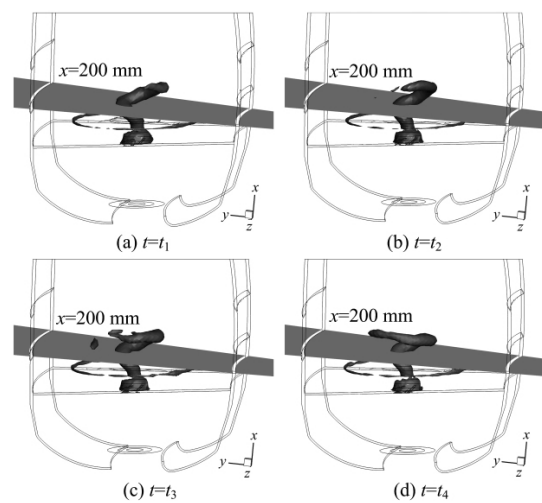


图 7 进动涡结构

Fig.7 PVC structure

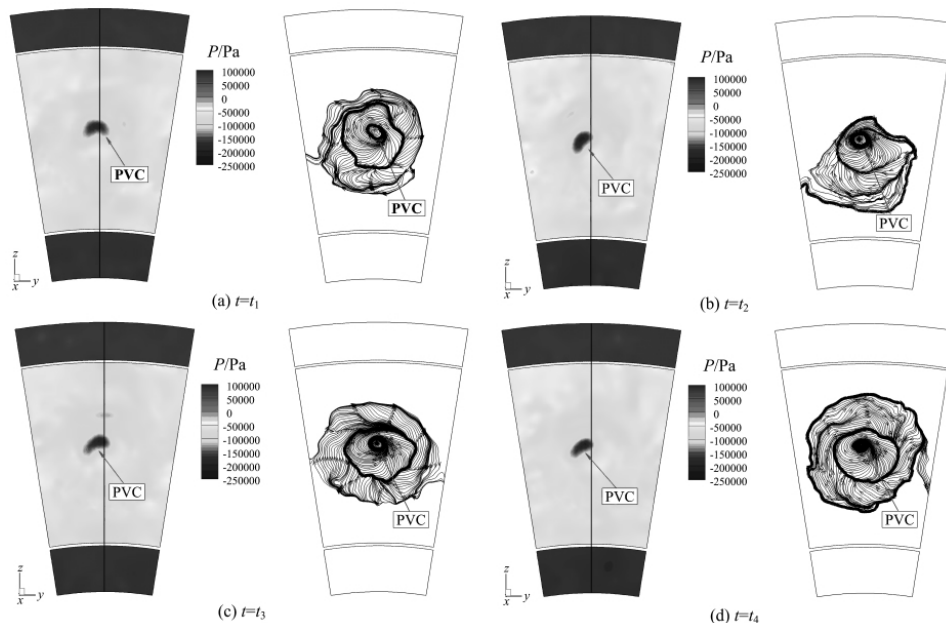


图 8 横截面上的瞬时压强和瞬时流线分布 ($x=200 \text{ mm}$)

Fig.8 Distribution of instantaneous pressure and streamlines on the cross-section ($x=200 \text{ mm}$)

PVC 是具有不稳定性的大尺度结构,其会影响附近的流体,使之出现振荡现象.本文沿气流方向设置一系列监测点,监测点的空间分布如图 9 所示,所有监测点的空间坐标总结在表 2 中.然后对所有监测点的瞬时周向速度采用快速傅里叶变换,得到图 10 中相应监测点的功率谱密度(power spectral

density, PSD).从图 10 中可知,所有监测点的 PSD 结果均出现明显的特征峰,并且特征峰对应的特征频率保持不变,均为 1 003 Hz,表明流场受到不稳定大尺度结构的影响,即进动涡引发了流场振荡.随着流场向下游发展,特征峰逐渐衰弱,表明沿流向 PVC 的进动特征逐渐减弱.

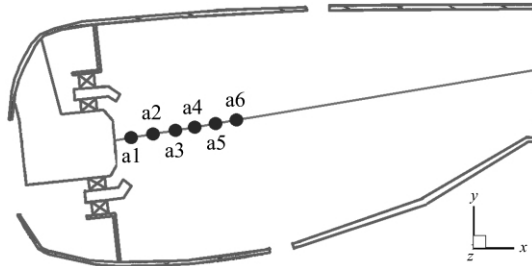


图 9 监测点的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of monitoring points

表 2 监测点的空间坐标

Tab.2 Spatial coordinate of monitoring points

监测点	空间坐标 (x, y, z)
a1	(109 mm, 258.21 mm, 0)
a2	(113 mm, 258.63 mm, 0)
a3	(117 mm, 259.05 mm, 0)
a4	(121 mm, 259.47 mm, 0)
a5	(126 mm, 259.99 mm, 0)
a6	(130 mm, 260.42 mm, 0)

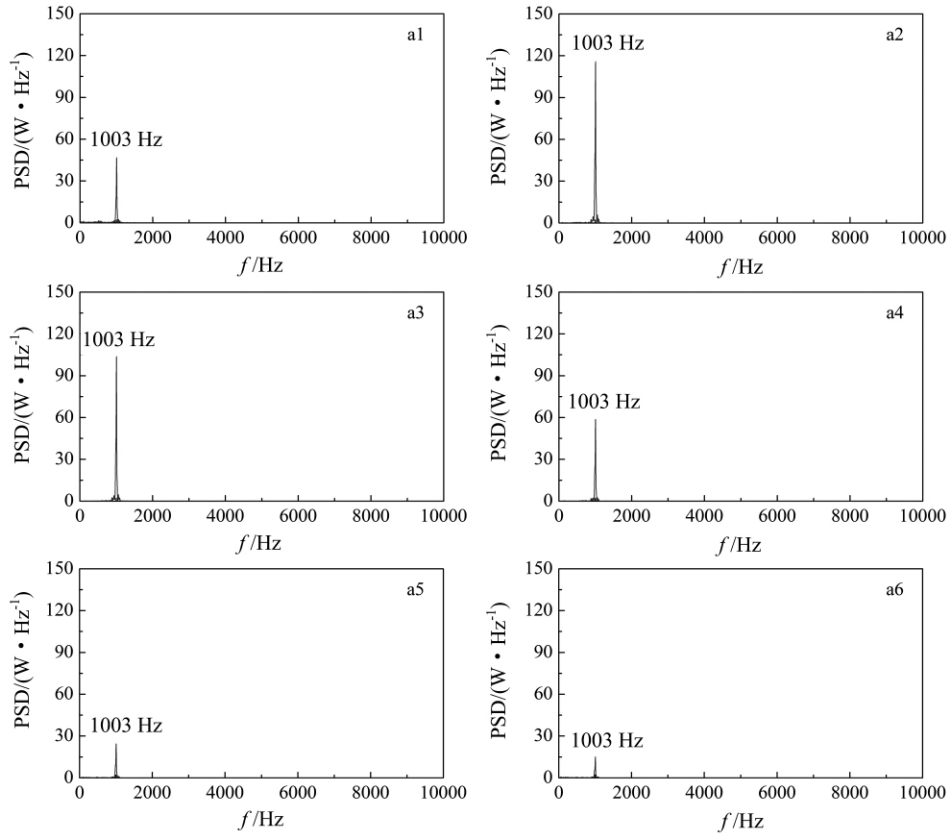


图 10 瞬时周向速度的功率谱密度

Fig.10 PSD of instantaneous tangential velocity

4 结论

本文运用 VLES 方法对燃烧室冷态流场开展数值模拟,研究了流场中大尺度涡旋结构,得到以下结论:

(I) 选取圆管内有旋流动为基准算例,通过与

实验结果的定量对比,表明 VLES 方法计算旋流流动的合理性,可用于以有旋流动主导的燃烧室冷态流场结构的计算和分析.

(II) 燃烧室中大孔射流与横向来流的相互作用形成了 CVP 结构,Rothstein 提出的射流迹线公式能够合理预测燃烧室中主燃孔的射流穿透.

(Ⅲ)PVC 发源于火焰筒头部旋流器装置内部, 基于功率谱密度预测了 PVC 引发流场振荡的特征频率.

参考文献(References)

- [1] 林宇震, 许全宏, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 勒菲沃 A H, 鲍拉尔 D R. 燃气涡轮发动机燃烧[M]. 刘永泉等, 译. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [3] MUPPIDI S, MAHESH K. Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulations [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 530: 81-100.
- [4] FRIC T F, ROSHKO A. Vortical structure in the wake of a transverse jet [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 279: 1-47.
- [5] HUANG Y, YANG V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35: 293-364.
- [6] 程明, 林宏军, 李锋. 旋流杯设计参数对燃烧性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(10): 2355-2361. CHENG Ming, LIN Hongjun, LI Feng. Effect of swirl cup design parameters on combustion performance [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(10): 2355-2361.
- [7] 尚守堂, 高贤智, 郭瑞卿, 等. 基于中心分级的高温升燃烧室性能预估 [J]. *航空动力学报*, 2014, 29(5): 1001-1007. SHANG Shoutang, GAO Xianzhi, GUO Ruiqing, et al. Capability prediction of high temperature rise center-staged combustor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(5): 1001-1007.
- [8] 李锋, 郭瑞卿, 尚守堂, 等. 高温升三旋流燃烧室与双旋流燃烧室的性能对比 [J]. *航空动力学报*, 2015, 30(1): 10-15. LI Feng, GUO Ruiqing, SHANG Shoutang, et al. Performance comparison between high temperature rise triple-swirler combustor and double-swirler combustor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(1): 10-15.
- [9] 张宏达, 张济民, 韩超, 等. 大涡模拟研究钝体有旋流流场的拟序结构 [J]. *航空学报*, 2014, 35(7): 1854-1864. ZHANG Hongda, ZHANG Jimin, HAN Chao, et al. Coherent structures of flow fields in swirling flow around a bluff-body using large eddy simulation [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(7): 1854-1864.
- [10] 张济民, 张宏达, 韩超, 等. 分层旋流燃烧器冷态流场的大涡模拟 [J]. *航空动力学报*, 2014, 29(10): 2369-2376. ZHANG Jimin, ZHANG Hongda, HAN Chao, et al. Large eddy simulation of non-reacting flow fields in stratified swirl combustor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(10): 2369-2376.
- [11] 张济民, 韩超, 叶桃红. 自由旋流冷态流场中涡旋破碎泡的大涡模拟 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2013, 43(8): 671-678. ZHANG Jimin, HAN Chao, YE Taohong. Large eddy simulation of vortex breakdown bubble in the unconfined non-reactive swirling flow [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2013, 43(8): 671-678.
- [12] HAN X, KRAJNOVIĆ S. Very-large-eddy simulation based on $k-\omega$ model [J]. *AIAA Journal*, 2015, 53(4): 1103-1108.
- [13] HAN X, KRAJNOVIĆ S. An efficient very large eddy simulation model for simulation of turbulent flow [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2013, 71: 1341-1360.
- [14] HAN X, KRAJNOVIĆ S. Validation of a novel very large eddy simulation method for simulation of turbulent separated flow [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2013, 73: 436-461.
- [15] M ENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32: 1598-1605.
- [16] DELLENBACK P A, METZGER D E, NEITZEL G P. Measurements in turbulent swirling flow through an abrupt axisymmetric expansion [J]. *AIAA Journal*, 1988, 26: 669-681.
- [17] 赵马杰, 曹长敏, 张宏达, 等. 高雷诺数湍流横侧射流的大涡模拟 [J]. *推进技术*, 2016, 37(5): 834-843. ZHAO Majie, CAO Changmin, ZHANG Hongda, et al. Large eddy simulation of a high reynolds number turbulent jet in crossflow [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(5): 834-843.
- [18] ROTHSTEIN A D, WANTUCK P J. A study of the normal injection of hydrogen into a heated supersonic flow using planar laser-induced fluorescence [D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [19] GRUBER M R, NEJAD A S, CHEN T H, et al. Transverse injection from circular and elliptic nozzles into a supersonic crossflow [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(3): 449-457.
- [20] SYRED N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, 32(2): 93-161.