

LESS 燃烧室非定常旋流流动

秦 皓¹, 丁志磊¹, 李海涛¹, 林宇震¹, 李继保²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 结合实验和 CFD 数值方法, 研究了 LESS 燃烧室旋流器出口附近的非定常流动特征. 一维热线测试结果表明: 预燃级出口存在着 2249 Hz 周期性速度振荡, 而主燃级出口流动未见明显脉动. 通过瞬态 LES 数值结果检验了在旋流器出口附近采用一维热线测量三维流动速度偏差为 8%. 另外, 数值模拟计算得出预燃级出口速度脉动频率为 2331 Hz, 与热线测试结果偏差为 3.6%. 最后通过频谱分析和相关性分析, 得出周期性速度脉动由预燃级内进动涡核主导.

关 键 词: 速度振荡; 旋涡结构; 旋流流动; 非定常; 燃烧不稳定性

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Unsteady swirling flow in low emissions stirred swirls combustor

QIN Hao¹, DING Zhi-lei¹, LI Hai-tao¹, LIN Yu-zhen¹, LI Ji-bao²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,

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

2. Commercial Aircraft Engine Company Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Shanghai 200241, China)

Abstract: The unsteady flow characteristics of low emissions stirred swirls (LESS) combustor swirlers outlet were studied, in combination with experiments and CFD calculation. One-dimensional hotwire tests results show periodic velocity oscillations of 2249 Hz existed in the flow field of pilot stage outlet, but didn't appear at main stage outlet. Transient large eddy simulation (LES) calculation had been adopted to verify that velocity at swirlers outlet tested by one-dimensional hotwire has a difference of 8% to real three-dimensional flow. And the simulation results show periodic velocity oscillations of 2331 Hz with a difference of 3.6% to experiments. The periodic velocity oscillation phenomenon is dominated by processing vortex core movement in pilot through spectrum analysis and correlation analysis.

Key words: velocity oscillation; vortex structure; swirling flow; unsteady; combustion instability

流动不稳定是燃烧不稳定的主要机制之一, 由流动不稳定造成的非定常释热可能会与燃烧室的固有声模态耦合, 引起强烈的压力振荡^[1-2]. 在

航空燃气轮机燃烧室中, 常采用旋流燃烧模式, 由于旋流数、旋流叶片几何结构、雷诺数等是影响旋流流动的主要因素^[3], 所以在不同的旋流结构以

及在不同的流动边界条件下,旋流流动是有区别的.北京航空航天大学发展了 LESS 低排放燃烧室,其采用了同心分级的多旋流组合结构^[4],该组合结构由预燃级的两级反向径向旋流和主燃级的单级旋流组成.由于火焰的非定常释热与湍流旋流非定常流动有关,因此有必要了解该旋流结构的非定常流动特征及产生原因.

在数值研究方面,Wang 等人^[5]采用了大涡模拟(LES)研究了 CFM56 燃气轮机燃烧室旋流杯的非定常流动特征,该旋流杯采用了轴向和径向组合旋流形式,研究表明旋流杯出口处的非定常流动与进动涡核(PVC)的周期性运动有关.Wang,LU 等人^[6-7]同样采用了大涡模拟研究了三级径向旋流器的非定常流动特征,研究发现在低旋流数下,紧贴着中心体下游处存在着稳定的鼓包状涡破碎(vortex breakdown)结构,而在高旋流数下,涡破碎结构变得复杂,并且在该结构下游出现了环状回流区结构.另外,不论是在两个不同的旋流数流动下,流动剪切层处出现了旋涡结构,并且脱落(vortex shedding)并对流至下游逐渐被耗散.Selle,Roux 等人^[8-9]对 Siemens 预混旋流杯在冷态和热态下的非定常流动特征进行了数值研究,研究发现,进动涡核仅出现在冷态条件下,至于热态下不存在进动涡核的原因,则很可能是由于燃气体积膨胀和黏性增加所导致的.

在实验研究方面,Steinberg 等人^[10-11]采用高速粒子图像测速仪(PIV)和平面激光诱导荧光测量系统(PLIF)研究了不同进口工况条件下旋流燃烧室的冷态和热态流场及火焰结构,实验发现在冷态条件下,燃烧室内存在进动涡核结构,而在热态条件下,进动涡核的存在与否与燃烧工况条件有关.当进动涡核存在的情况下,火焰的卷曲与进动涡核有关.Stopper 等人^[12]采用 PIV 研究了热态条件下的旋流流场,研究发现瞬时流场与时均流场有着极大的差别,瞬时流场中存在着强的周期性流动结构,并且内剪切层由空间尺度为 0.5~2 mm 之间的涡旋结构主导.Stohr 等人^[13]研究了进动涡核与湍流旋流火焰相互作用机制,在 Damkohler 数为 1 时,由于拉伸率较小,对化学反应过程影响小,故进动涡核会增强旋涡附近的释热率;在 Damkohler 数为 0.5 时,由于拉伸率较大,火焰出现局部淬熄,导致释热延迟,火焰往下游移动;当 Damkohler 数为 0.3 时,拉伸率更大,火焰越发往下游移动.

对于国内的研究而言,较为相似的如,邹博文

等人^[14]采用数值方法研究了中心分级燃烧室耦合回流区贫油熄火机理,研究发现贫油熄火比边界由主燃级和预燃级形成的耦合回流区决定.吴宏等人^[15]对旋转通道进行了一维非定常数值研究,利用压力波传播方式对旋转通道进行求解,能够直观地描述旋转通道一维非定常流动及换热特性,计算误差不超过 5%.何敏等人^[16]采用数值方法对两种不同燃料下的环管燃烧室的燃烧流场进行了研究.总的来说,国内目前没有关于 LESS 燃烧室组合旋流器的非定常流动的研究.

对于 Wang 等人^[5]的研究内容而言,CFM56 旋流杯与 LESS 燃烧室的预燃级旋流杯结构接近,但 LESS 预燃级旋流杯的两级旋流全部采用径向旋流形式,与 CFM56 旋流杯的轴向/径向旋流形式存在差别;另外 LESS 燃烧室的旋流结构还包括主燃级的旋流流动,该旋流流动对整个燃烧室的回流区结构产生影响,从而反馈到预燃级旋流流动.综上所述,对于带主燃级旋流的组合旋流流动而言,有必要对其流动的非定常特征进行研究.

本文的研究目的即是研究 LESS 燃烧室组合旋流器的非定常流动特征,了解相关原因.本文结合实验和 CFD 数值方法来分析流动的非定常特征:首先采用一维热线测量旋流器出口的时均以及非定常速度特征,判断是否存在周期性速度振荡以及振荡频率;然后通过 LES 检验一维热线测量三维流动的恰当性;接着对比热线测量和 LES 计算结果,检验 LES 计算的准确性;最后通过 LES 计算结果,分析非定常流动的特征和产生原因.

1 非定常流动测量实验

1.1 实验系统

实验测量大气压条件下的旋流器出口附近的冷态流动特征,实验主要模拟热态条件下旋流器出口速度,该速度通过控制旋流器上下游压差来实现.旋流器出口处的气流速度通过一维热线探头进行单点测量,热线空间分辨率为 2 mm,速度测量精度 2%.热线测量系统的采集频率为 20 kHz.由于热线只能测量单点位置处的流速,而旋流器出口附近流场的流动特征是研究所关心的内容,因此需要对热线位置进行调节来测量不同空间位置的流速.

图 1 表示的是流场扫面网格,沿着旋流器径向方向的网格分辨率为 2 mm,该分辨率由热线探

头的空间分辨率决定;沿着旋流器轴向方向的网格分辨率为3mm,该分辨率通过权衡热线探头空间分辨率和工作量而定.整个网格含有108个结点,结点位置由大写英文字母和阿拉伯数字表示.坐标原点为 A_1 点,距旋流器出口端面2mm.热线在结点间的转换通过位移机构调节,调节精度为 $2.5\mu\text{m}$.图1中标注的尺寸表示预燃级和主燃级出口处的半径尺寸.

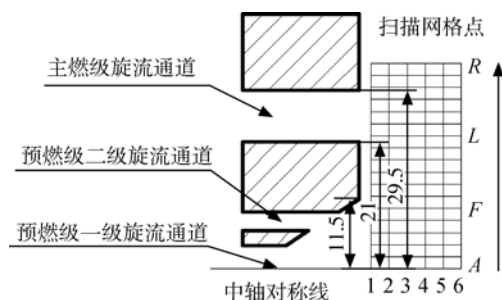


图1 热线扫描网格点(单位:mm)

Fig. 1 Hotwire scanning grids (unit:mm)

由于实际流动是三维流动,而一维热线探头只能测量一个方向.为了能让一维热线所测流速值更加接近三维流动,实验中热线沿径向方向放置,热线所测速度为轴向分量 u_a 和周向分量 u_t 组成的合速度 u_{a-t} .热线的布置如图2所示.

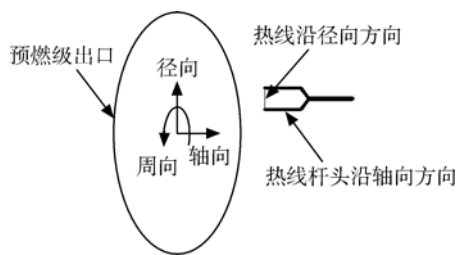


图2 热线布置示意图

Fig. 2 Hotwire arrangement

1.2 实验结果

实验测量了旋流器上下游压差为3.92 kPa条件下的旋流器出口流动特征.主燃级出口旋流数和雷诺数分别为 $S_m = -0.6$, $Re_m = 2.97 \times 10^5$ (特征尺寸取主燃级出口外径);预燃级出口雷诺数为 $Re_p = 1.16 \times 10^5$ (特征尺寸取预燃级二级旋流器出口外径),预燃级一、二级旋流器旋流数分别为 $S_{p,1} = 0.67$, $S_{p,2} = -0.72$.其中旋流数负号代表旋向,从下游往上游看,顺时针为正.图3中的黑点表示实验中周期性速度振荡出现的位置,振荡频率为 $(2249 \pm 20)\text{Hz}$.图3中椭圆曲线则是

显示了速度振荡强度最高的区域.表1中给出了 E_1, F_1, G_2, H_3 共4个结点处的速度振荡信息.为了进一步分析流动速度振荡的原因,后面将采用CFD数值方法来获取相关信息.

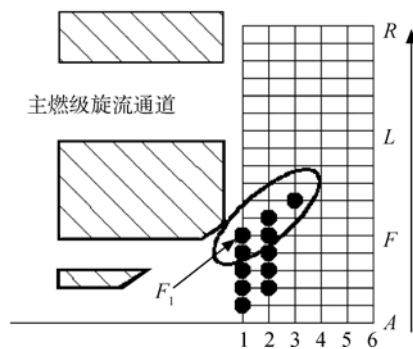


图3 热线测量结果

Fig. 3 Hotwire test results

表1 非定常流动速度振荡特性

Table 1 Velocity oscillation properties of unsteady flow

结点 编号	频率/ Hz	合速度 u_{a-t} / (m/s)	脉动速度 u'_{a-t} / (m/s)
E_1	2256	25.88	2.00
F_1	2244	42.77	3.27
G_2	2232	41.21	2.32
H_3	2262	30.49	1.10

2 大涡模拟方法

采用大涡模拟方法复现文中第1.2节实验结果.LES计算域采用非结构网络划分;由于LES着重观察旋流器内部流道及其出口附近区域流场,根据实验测得的非定常数据,周期性流动频率为2250 Hz,即流动周期为 $4.5 \times 10^{-4}\text{s}$,为了有效捕捉该振荡周期,计划采用50个时间步长来描述一个周期,即时间步长拟定为 10^{-5}s ;而旋流器区域的设计平均流速约为50 m/s,因此,在一个时间步长内,流体质点的运动位移约为0.5 mm;最终,旋流器区域的最大网格大小设置不超过0.5 mm.另外,为确保LES计算过程中,流动充分发展,设置计算总时长为10万时间步长(1 s),即统计约2000个振荡周期^[17].

由于LESS燃烧室主燃级的结构设计复杂,为了减少网格数,主燃级流道的计算域做了相当的简化,因此主燃级进口最终采用了质量流量进口边界条件,质量流大小及方向根据气动设计反

推. 相比之下, 由于预燃级流道的计算域没有做简化处理, 因此预燃级进口采用压力进口边界条件, 进口压力则与实验值相同. LESS 燃烧室计算域出口边界采用压力出口边界, 设置为大气压力.

为了让 LES 计算收敛性更好, 首先采用稳态 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) 计算形成流动特征, 当残差满足要求后, 再在 RANS 的数据基础上, 转为 LES 计算. 图 4 给出的是 RANS 计算所得的旋流器流域速度云图, 图中的黑点为参考结点 F_1 .

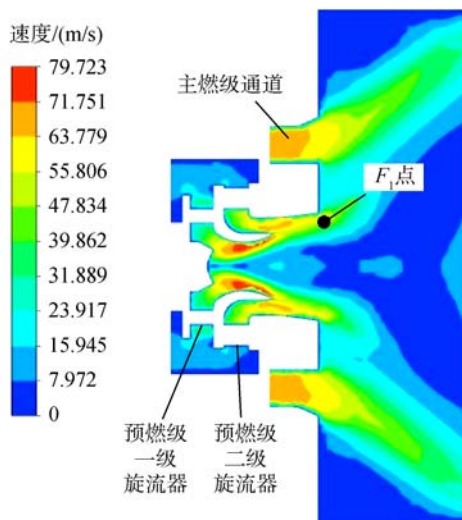


图 4 旋流器流域速度云图(RANS)

Fig. 4 Velocity contour of flow field in swirlers (RANS)

表 2 给出了由 LES 计算得出的 E_1 , F_1 , G_2 , H_3 共 4 个位置处的速度 u 及其 3 个速度分量 u_a (轴向)、 u_r (径向)、 u_t (周向). 合速度 u_{a-t} 由 u_a 与 u_t 构成, 通过后处理获取. ϵ_1 为 u_{a-t} 与 u 之间的偏差, 用于评价一维热线测量三维流动速度大小的适用性. 从表 2 中可以看出, 接近预燃级出口处的 E_1 , F_1 和 G_2 结点的 ϵ_1 小于 10%, 并且随着流动向下游的发展, ϵ_1 值越来越大, 如 H_3 处的 ϵ_1 值高达近 20%. 这表明在距预燃级出口不超过 5 mm ($x < 5$ mm, x 轴零点位于预燃级旋流器出口截面中心位置) 的范围内, 可以采用一维热线测量三维流动速度, 偏差不超过 10%. 而由于热线的采集频率 (20 kHz) 远大于周期性流速振荡频率, 故仍可以采用热线测量离预燃级出口较远区域的周期性流速的振荡频率.

表 3 给出了 E_1 , F_1 , G_2 共 3 个位置处合速度的实验值和 LES 计算值对比, 偏差用 ϵ_2 表示. 可以看出, LES 计算值与实验值基本接近 (约 $\epsilon_2 <$

8%), 表明 LES 流场计算具有可参考性.

表 2 LES 计算结果

Table 2 LES calculation results

参数	结点编号			
	E_1	F_1	G_2	G_3
$u_a/(m/s)$	25.78	45.2	34.39	14.37
$u_r/(m/s)$	6.48	7.61	20.88	22.49
$u_t/(m/s)$	11.54	16.42	-8.78	-26.33
$u/(m/s)$	28.98	48.69	45.44	32.56
$u_{a-t}/(m/s)$	26.58	45.83	40.23	26.69
$\epsilon_1/\%$	-8.27	-5.86	-8.29	-18.03

表 3 实验与 LES 合速度对比

Table 3 Resultant velocity comparison between tests and LES

结点编号	$u_{a-t}/(m/s)$		$\epsilon_2/\%$
	实验	LES	
E_1	25.88	26.58	2.70
F_1	42.77	45.83	7.15
G_2	41.21	40.23	2.43

3 LESS 非定常流动分析

为了确认 LES 方法是否能捕捉 LESS 旋流器流场的周期性流动, 在 LES 计算过程中, 对 F_1 , G_2 , E_1 共 3 个位置处的每一步的速度进行了记录, 记录时长为 1 s (步长的 10 万倍), 然后对该速度信号做快速傅里叶变换 (FFT) 分析. 图 5 给出 LES 模型计算所得的 E_1 , F_1 和 G_2 的速度频谱, 频率和幅值的统计如表 4 所示. 可以发现, 该 3 个点均在 2331 Hz 处具有明显的振荡峰值, 与实验测得的振荡频率相比, 偏差小于 4%. 另外, LES 计算所得的 E_1 和 F_1 点的振荡幅值与实验值偏差较小, 约 10%, 而 G_2 点的偏差较大. 不过 F_1 , G_2 , E_1 三个点位置处的脉动速度 (u'_{a-t}) 逐渐减小的趋势, 与实验观察到的现象相同. 频率和幅值的对比结果进一步表明瞬态 LES 计算具有可参考性.

周期性速度振荡产生的具体原因可以通过压力场和流线的时演变来了解^[5]. 图 6 给出了 F_1 点速度在一个振荡周期内的演变, 在该振荡周期中等时间间隔选出了 10 个状态点 ($U_1 \sim U_{10}$), 分析各个状态点对应的压力场和流线, 如图 7 所示. 从图 7 中可以观察到, 预燃级一级旋流器文氏管

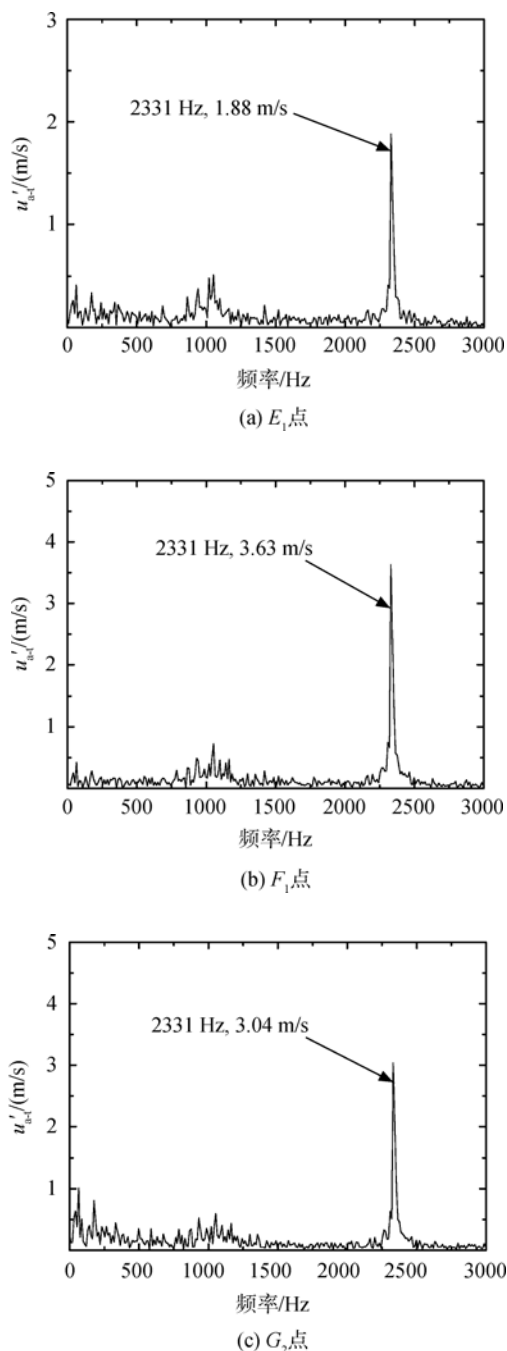


图5 LES计算速度频谱

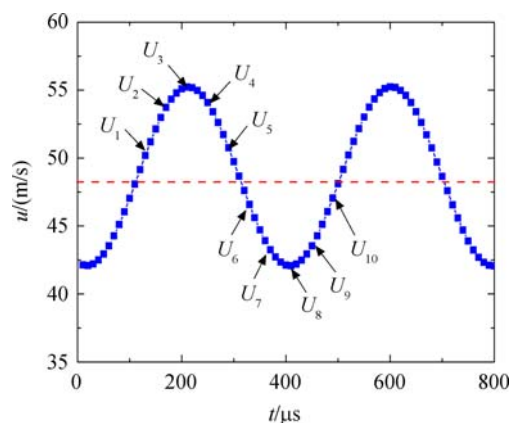
Fig. 5 Velocity spectra calculated by LES

表4 实验与LES脉动速度对比

Table 4 Fluctuating velocity comparison between tests and LES

结点 编号	实验		LES		频率 偏差/ %	u'_{a-1} 偏差/ %
	频率/ Hz	$u'_{a-1}/$ (m/s)	频率/ Hz	$u'_{a-1}/$ (m/s)		
E ₁	2256	2.00	2331	1.88	3.3	-6
F ₁	2244	3.27	2331	3.63	3.9	11
G ₂	2232	2.32	2331	3.04	4.4	31

出口处,二级旋流器出口扩张段内,存在着明显的旋涡结构,这些旋涡结构恰巧坐落在零轴向速度线之上. Syred 等人^[18]曾指出进动涡核一般位于零轴向速度线和零流线之间的折流区边界上. Wang 等人^[5]对 CFM56 燃烧室旋流杯旋流流动的大涡模拟研究,也具有类似的流动结构. 为此,可以认为图7中位于零轴向速度线上的旋涡结构属于进动涡核. 图7中紧贴中心喷嘴处的蓝色区域为低压核区,旋涡在低压核的推动作用下,与文氏管出口处的剪切层发生作用,随着文氏管内的螺旋旋绕着中轴线做旋转运动,旋涡结构从螺旋涡上剥离出来,并对流至下游.

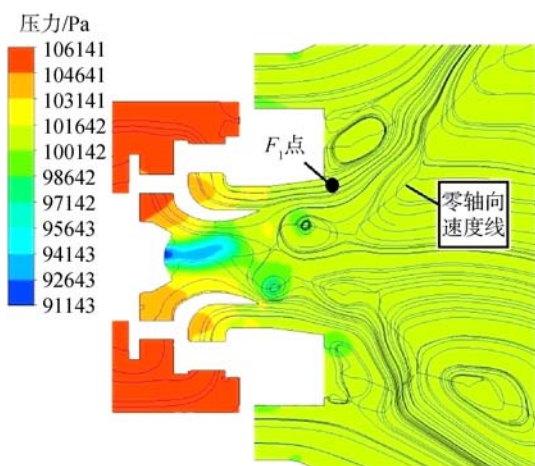
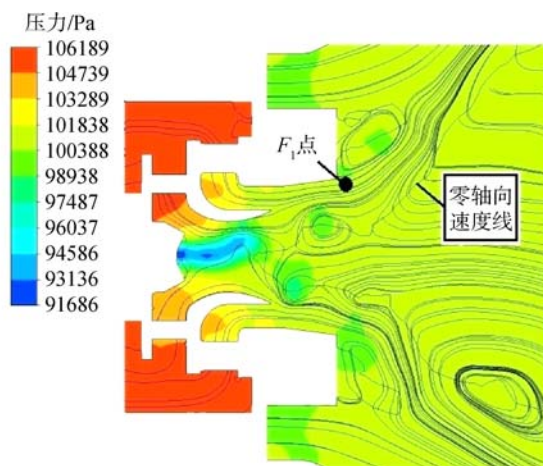
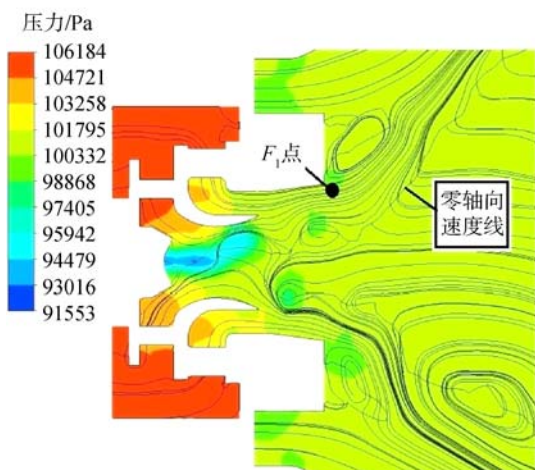
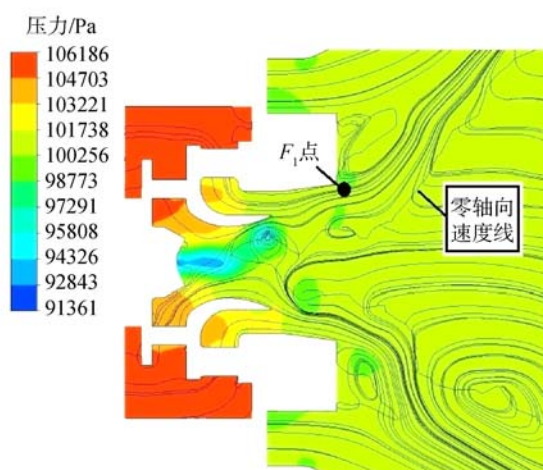
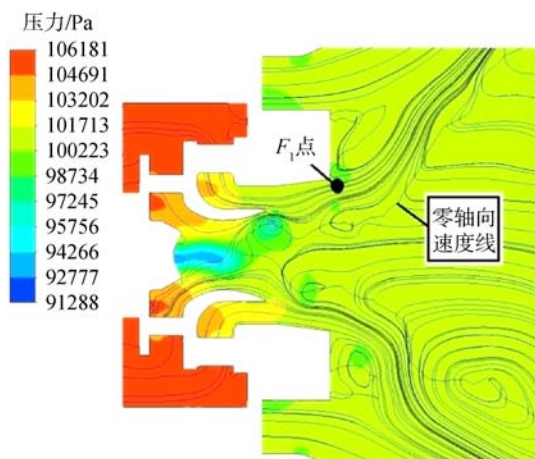
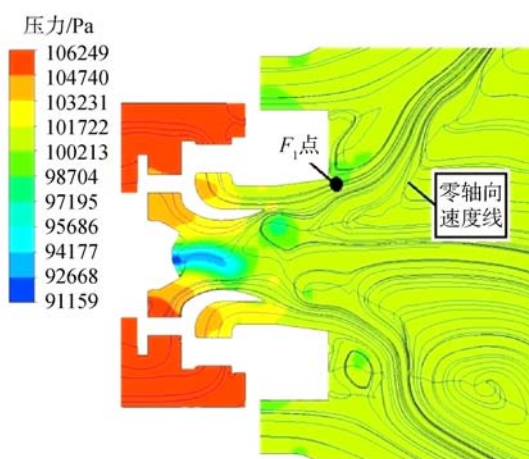
图6 F₁点速度周期演变图Fig. 6 Periodic evolution of velocity at F₁ position

从图7中可以看到,旋涡与低压核相伴. 从旋转的进动涡上剥离下来的旋涡结构向下游对流,同时也伴随着低压核向下游运动,那么低压核所经过的区域的流速也会发生变化,由于旋涡结构是周期性的,所以局部流速的变化也是周期性的. 图7中标明了F₁点的位置. 从图6中可以看到F₁点处的速度随时间的变化,在U₃时刻,速度达到最大;在U₉时刻,速度最小. 对比图7中的(U₂, U₃, U₄)和(U₈, U₉, U₁₀)两组图片,可以发现, U₂~U₄时间段内, F₁点附近受到两个低压区的作用;而在U₈~U₁₀时间段,两个低压区离F₁点较远. 虽然其他时刻, F₁点只收到一个低压区的作用,但F₁点几乎紧贴在低压区边缘,因此其速度要比U₈~U₁₀时间段的稍高一些. 这就是说, F₁点处的周期性速度变化与低压核(或旋涡运动)的周期性演变有关.

为了进一步确认引起F₁点处速度振荡的旋涡运动是由预燃级一级旋流器文氏管内的进动涡核和文氏管出口剪切流的相互作用引起,本文在

LES 计算过程中,另外记录了 S_1, S_2, S_3 三个点的非定常速度值.通过对 $(S_1, F_1), (S_2, F_1), (S_3, F_1), (S_1, S_3), (S_1, S_2), (S_2, S_3)$ 该 6 组数做互相关分析,了解 F_1 处速度振荡的相关性,从而判断速度振荡产生的原因.图 8 给出了 S_1, S_2, S_3 三个

点的位置, S_1 位于预燃级一级旋流器文氏管通道内, S_2 位于预燃级二级旋流器通道内, S_3 位于文氏管出口处.图 9 给出的是上述 6 个数据组的互相关频谱图.

(a) U_1 (b) U_2 (c) U_3 (d) U_4 (e) U_5 (f) U_6

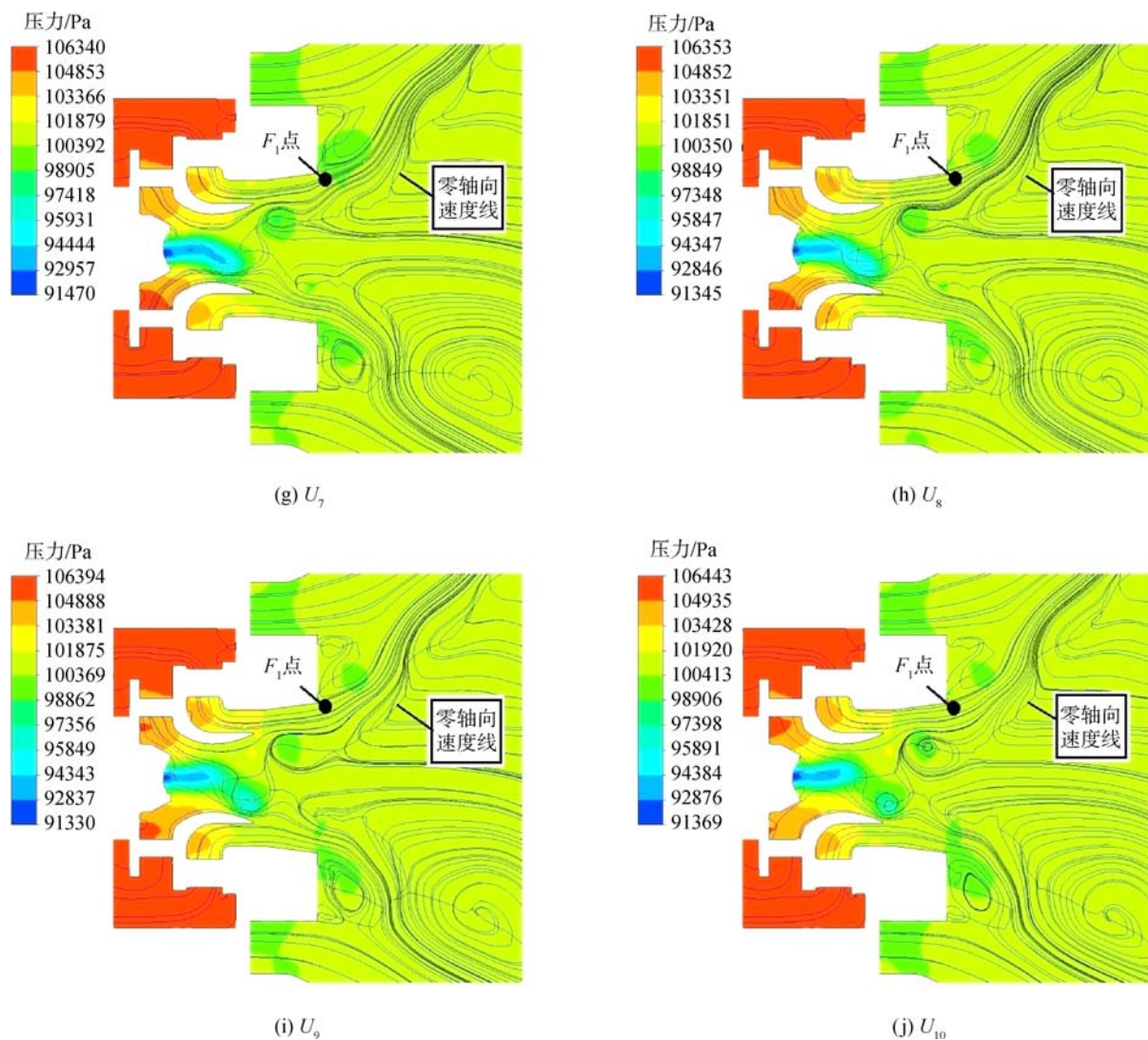


图7 压力场和流线的时演变过程

Fig. 7 Pressure field and Streamlines evolution in time domain

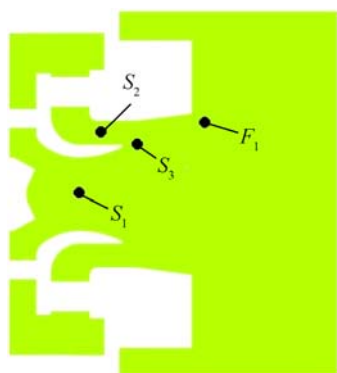


图8 监控点

Fig. 8 Monitor point

从 S_1 , S_2 , S_3 与 F_1 的非定常速度互相关频谱来看,似乎预燃级一级旋流器内通道和二级旋流器内通道的流动对 F_1 点处 2343 Hz 速度振荡具有极强的关联,相关系数达到 0.98 以上.至于相

关频谱中 2343 Hz 与前面的 2331 Hz 之间的差别是由于相关频谱求取过程中频率分辨率较为粗糙造成的.而不同的是, S_1 , S_2 , S_3 对 F_1 的影响在 500~1500 Hz 范围内不一样,相关系数 $R_{x,y}$ 也在 0.15~0.75 之间变化.从图 5 也可以看到, S_1 , S_2 , S_3 使 F_1 在 1150 Hz 处发生着小幅值的振荡运动.

从 S_1 , S_2 , S_3 两两互相关频谱来看,似乎 S_3 对 S_2 处在 500~1500 Hz 之间存在的额外的影响. S_2 的存在对 S_1 与 S_3 之间的互相关性却没有影响.这种现象意味着,二级旋流器对一级旋流器内部流动没有影响,而二级旋流器对一级旋流器文氏管出口剪切层流动有影响.图 10 则是 S_1 , S_2 , S_3 三个点处的非定常速度频谱.可以发现, S_1 和 S_2 处在 2331 Hz 处具有明显的振荡, S_3 在 1150 Hz 和 2331 Hz 处均具明显的振荡,而 S_2 在

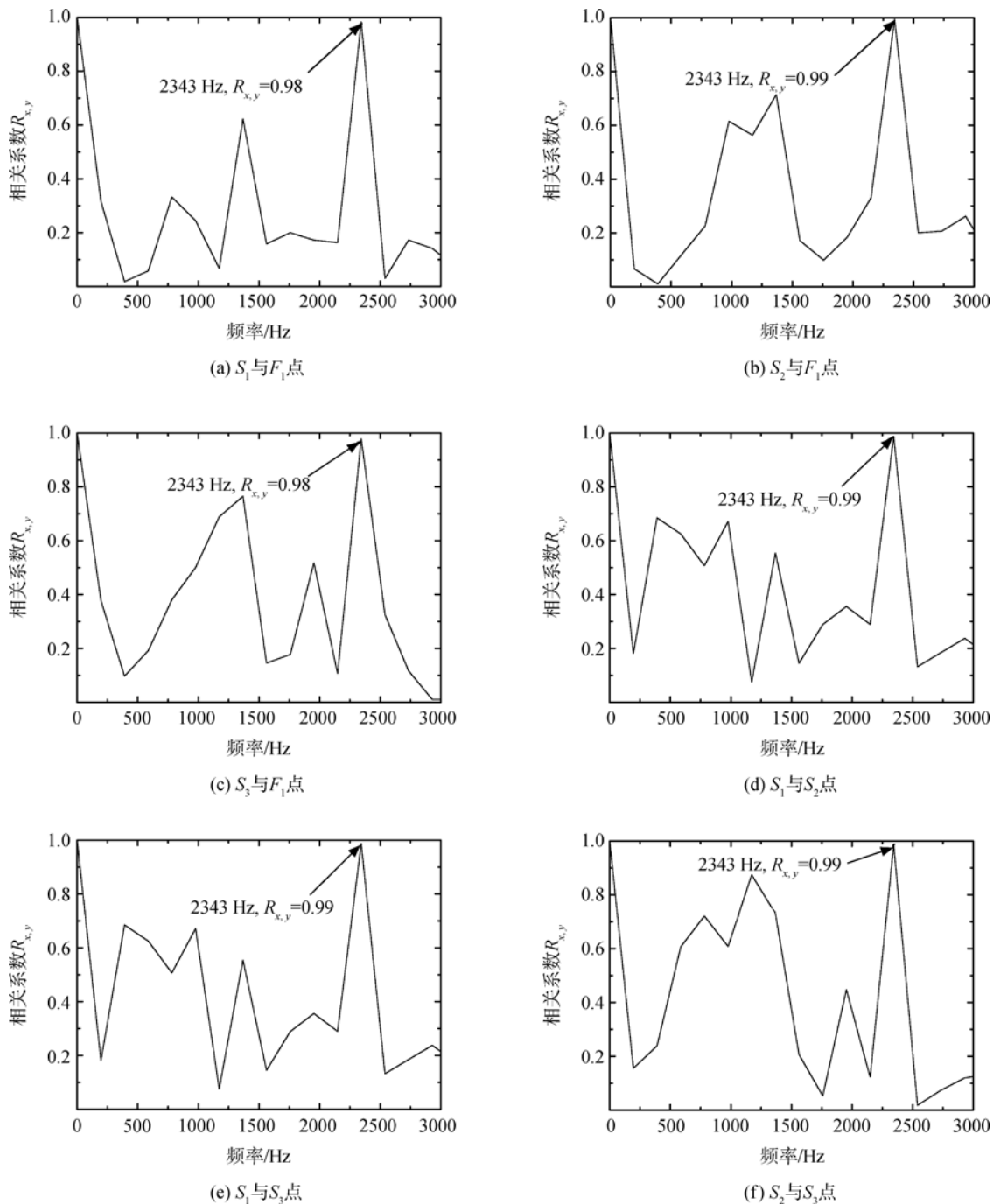


图 9 监测点非定常速度的互相关性

Fig. 9 Cross-correlation of unsteady velocity at monitor points

1150 Hz处的振荡比较微弱。

从 S_1 , S_2 , S_3 的互相关频谱以及速度频谱图综合分析可知,预燃级一级旋流器内的进动涡运动是预燃级出口 2331 Hz 周期性运动的来源,该运动会回馈给二级旋流器出口,使得二级旋流器内的流动也具有 2331 Hz 的周期性。而二级旋流器内同时也存在着 1150 Hz 周期性流动,该流动对流至一级文氏管出口剪切层,与一级文氏管内进动涡尾部的涡脱落运动相互作用,使得文氏管

出口剪切层在 2331 Hz 处的运动放大(S_2 点的振荡幅值几乎是 S_1 点的 10 倍),而 1150 Hz 的振荡放大率不到 2 倍,这说明 LESS 燃烧室预燃级一级旋流器文氏管出口处的剪切层对高频激励更为敏感。而至于二级旋流器中会出现 1150 Hz 的运动,则很有可能是由于进动涡尾部脱落运动与其脱落的临界 Strouhal 数有关,从图 4 来看,一、二级旋流器在文氏管边缘处的流速相当,而二级旋流器的外直径几乎是一级旋流器文氏管厚道的 2

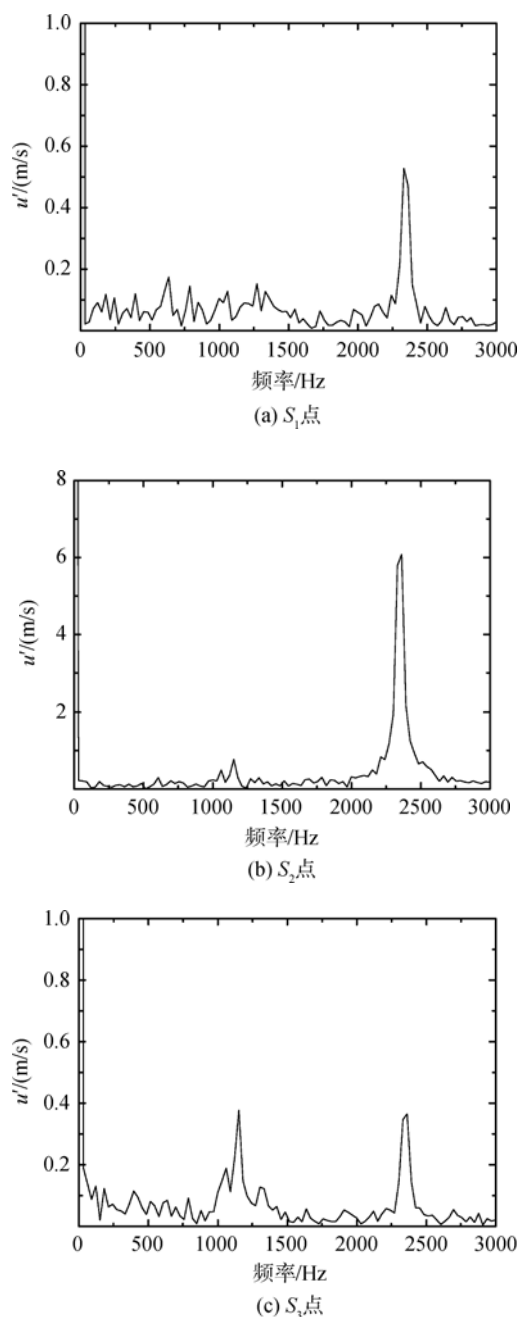


图10 监测点速度频谱

Fig. 10 Velocity spectra of monitor points

倍,因此,二级旋流器中会出现 1150 Hz 的周期性运动。

4 结 论

本文联合实验和 CFD 数值方法研究了 LESS 燃烧室头部出口非定常流动特征。一维热线测试结果表明预燃级出口存在着 2249 Hz 周期性速度振荡,而主燃级出口流动未见明显脉动。通过瞬态 LES 数值结果检验了在旋流器出口附近采用一维热线测量三维流动速度偏差为 8%。另外,数值模拟计算得出预燃级出口速度脉动频率

为 2331 Hz,与热线测试结果偏差为 3.6%。最后通过频谱分析和相关性分析,得出周期性速度脉动由预燃级内进动涡核主导。

致谢

感谢中国航空工业集团公司商用航空发动机有限责任公司对燃烧不稳定性的支持。

参考文献:

- [1] Huang Y, Yang V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(4): 293-364.
- [2] Huang Y, Yang V. Bifurcation of flame structure in a lean-premixed swirl-stabilized combustor: transition from stable to unstable flame[J]. Combustion and Flame, 2004, 136(3): 383-389.
- [3] Lieuwen T C, Yang V. Combustion instabilities in gas turbine engines: operational experience, fundamental mechanisms, and modeling[M]. Reston: AIAA, 2005.
- [4] FU Zhenbo, LI Jibao, LIN Yuzhen. Experimental investigation on ignition performance of LESS combustor[R]. ASME Paper GT2011-45786, 2011.
- [5] Wang S, Yang V, Hsia G, et al. Large eddy simulation of gas turbine swirl injector flow dynamics[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 583(1): 99-122.
- [6] Wang S, Hsieh S Y, Yang V. Unsteady flow evolution in swirl injector with radial entry at stationary condition[J]. Physics of Fluids, 2005, 17(1): 1045-1066.
- [7] LU Xiyun, WANG Shanwu, Sung H G, et al. Large-eddy simulations of turbulent swirling flows injected into a dump chamber[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 527(1): 171-196.
- [8] Selle L, Lartigue G, Poinso T, et al. Compressible large eddy simulation of turbulent combustion in complex geometry on unstructured meshes[J]. Combustion and Flame, 2004, 137(4): 489-505.
- [9] Roux S, Lartigue G, Poinso T, et al. Studies of mean and unsteady flow in a swirled combustor using experiments, acoustic analysis, and large eddy simulations[J]. Combustion and Flame, 2005, 141(1/2): 40-54.
- [10] Steinberg A M, Arndt C M, Meier W. Parametric study of vortex structures and their dynamics in swirl-stabilized combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3117-3125.
- [11] Steinberg A M, Boxx I, Stohr M, et al. Flow-flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-acoustically unstable gas turbine model combustor[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(12): 2250-2266.
- [12] Stopper U, Aigner M, Ax H, et al. PIV, 2D-LIF and 1D-Raman measurements of flow field, composition and temperature in premixed gas turbine flames[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(3): 396-403.

- [13] Stohr M, Arndt C M, Meier W. Effects of damkoher number on vortex-flame interaction in a gas turbine model combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3107-3115.
- [14] 邹博文, 许全宏, 曹文宇, 等. 中心分级燃烧室耦合回流区贫油熄火机理[J]. 航空动力学报, 2013, 28(8): 1759-1763.
ZOU Bowen, XU Quanhong, CAO Wenyu, et al. Lean blowout mechanism of coupled recirculation zone[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(8): 1759-1763. (in Chinese)
- [15] 吴宏, 李澎, 刘冬冬, 等. 旋转通道一维非定常计算模型[J]. 航空动力学报, 2013, 28(8): 1681-1688.
WU Hong, LI Peng, LIU Dongdong, et al. One-dimensional unsteady analytical model of rotating passage[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(8): 1681-1688. (in Chinese)
- [16] 何敏, 蔡文祥, 赵坚行, 等. 数值研究低热值燃料环管燃烧室燃烧流场[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2): 324-330.
HE Min, CAI Wenxiang, ZHAO Jianxing, et al. Numerical investigation of combustion flow fields in low heating value fuel annular combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 324-330. (in Chinese)
- [17] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [18] Syred N, Beér J M. The damping of processing vortex cores by combustion in swirl generators[J]. Acta Astronautica, 1972, 17(4/5): 783-801.

(编辑: 叶 青)