

同心分级旋流结构的动态响应特征

秦皓¹, 丁志磊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, 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: 实验探索了 LESS(low emissions with stirred swirls)燃烧室头部出口附近的固有流动特征,及其对外界激励的响应。实验结果表明:预燃级旋流区域存在着周期性流动结构,而主燃级出口区域没有周期性流动结构;当外界激励的频率与流动固有频率耦合时,会引起预燃级流场畸变,并导致周期性流动的流速振荡幅值急剧增大。

关 键 词: 非定常流动; 动态响应; 旋流流动; 燃烧不稳定性; 低排放燃烧室

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Dynamic response characteristic of concentric stage swirling structure

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

(1. 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 natural flow characteristics and their response to outer excitations of a LESS (low emissions with stirred swirls) combustor head exit was studied by experiment. Experimental results shows that periodical flow structures are in the pilot swirling flow zone, while absent in the main outlet zone; the flow distortion in the pilot flow zone will happen when outer excitation frequency coupled with natural flow frequency, and the velocity oscillation amplitude of periodical flow will increase dramatically.

Key words: unsteady flow; dynamic response; swirling flow; combustion instability; low emission combustor

旋涡/声波/非定常释热之间的相互作用是燃烧不稳定性主要机制之一^[1]。对于航空发动机燃烧室而言,通常采用旋流方式稳定火焰,其燃烧区内流动处于强湍流状态,流动本身具有其固有的非定常特征,可能会与由燃烧所产生的声波发生共振式的相互作用,这种耦合通常会导致燃烧室内非定常释热大的振荡^[1-2]。Lee等^[3]通过 OH-PLIF(OH基团平面激光诱导荧光)研究了二维平面火焰前锋的时序演化过程,实验发现湍流和火焰之间的相互作用导致火焰前锋周期性褶皱延

伸,从而引起火焰释热面积的变化,造成释热率的变化。Menon^[4]则总结了在燃气轮机燃烧室中观测到的旋涡/声波/非定常释热之间的相互作用,特别对于含有大尺度相干结构的高湍流流动而言,火焰结构会受到这些相干结构极大的影响,这是由于相干结构本身就具有确定的准周期性的运动方式,从而会极大地促使燃气轮机燃烧室内噪声的产生。Gutmark等^[5]则研究了射流结构的模态特征,实验结果表明,射流模态的主要频率范围在100~1000 Hz之间,恰好落在燃气轮机燃烧室

的自然声模态范围内,因此大尺度相干结构与声模态之间容易发生耦合. Sankaran, Ling 等^[6-7]通过 DNS(直接数值模拟)研究了液滴/旋涡之间的相互作用,当 Stokes 数(Stokes 数为液滴响应时间和流动特征时间的比值)很小时,液滴将随着流体运动,甚至被对流输运至旋涡结构的核心处;当 Stokes 数增大时,液滴开始聚集在涡结构的圆周附近,增强了液滴的分布特征;而当 Stokes 数进一步增大后,有些液滴会直接穿过涡结构的核心. 由于液滴的聚集特征会引起大的混合当量比的空间分布变化,所以液滴/旋涡间的相会作用会改变燃烧的释热性质. 以上的研究都说明了湍流流动/非定常释热之间存在着相互作用.

湍流对外界的声压激励同样会产生响应. Cohen 等^[8]研究了双流道旋流器对 300~600 Hz 外界激励的响应,研究发现双流道之间近壁处的速度对 400~600 Hz 的外界激励极其敏感,这一现象与周期性的涡脱落或者其他机理有关. Anderson 等^[9]测量了带燃料喷射的流动与声波之间的耦合,实验发现其对 350~650 Hz 的外界激励响应强烈. Haile 等^[10-11]的研究则发现在低频的外界激励下,流量具有强的振荡,但流速平均值却减小,而高频的外界激励则不会改变流动平均值. 这些研究都说明了湍流流动对火焰释热所产生的声压会有所响应.

综上可知旋流条件下湍流流动状态对火焰释热来说是非常重要的,因此,了解旋流器出口的非定常流动特征及其对外界激励的响应特征,有利于研究非定常流动对火焰释热的影响. 而影响旋流的主要参数包括旋流数 n_s 、旋流叶片几何结构、雷诺数 Re 、旋流器进口速度(平均值和扰动值)等^[4],这就是说,实际的旋流流动与其所在的具体环境有关,反过来说,即便燃烧室的进口条件相同,但对于不同的旋流器,燃烧室内的流动是不一样的,所以须分别对待. LESS 燃烧室^[12-13]头部结构采用的是同心分级的多旋流组合结构,在非定常流动方面,目前还没有给出关于该旋流器的研究,因此本文的目标即是探索该旋流结构是否存在周期性流动结构,以及该流动结构对外界激励的响应特征.

本文通过实验获取 LESS 燃烧室头部旋流器出口附近流动的固有特征及其影响区域,再对特征区域中个别位置处的流动进行外界激励,从而获得流动的非定常响应特征.

1 旋流流动结构

对于常规的单级旋流流动而言,其流场具有 3 种突出的结构:①在喷嘴下游处由涡破碎诱发的中心回流区;②围绕中心回流区的进动涡核层;③始发于喷嘴唇口外沿的剪切层^[1],如图 1.

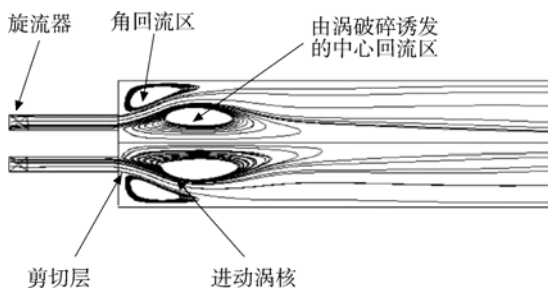


图1 典型燃烧室旋流流动结构^[1]

Fig. 1 Swirling flow structure in typical combustor^[1]

从现象上说,旋流射流中涡破碎是细长的涡核发生突变,并在下游发展成具有回流流动方式的鼓包状结构或者螺旋流动方式的结构. 鼓包状结构多数发生在高旋流数,而螺旋流动方式的结构多数发生在低旋流数. 涡破碎的区域具有内部流动驻点和转向点特征. 旋流数增高,则涡破碎驻点位置向上游移动.

进动涡核是一种三维非定常非对称的流动结构. 当中心涡核开始绕着对称轴以一个清晰的运动频率开始进动时,则进动涡核开始发展. 进动涡核一般与涡破碎和高雷诺数下的回流区有关. 进动涡核一般位于零轴向速度线上. 进动运动的频率依赖于旋流数和燃烧室结构,并且随着流速的增加而增加. 进动涡核可能会与燃烧室内的低频压力振荡发生共振,也可能会因火焰释热所导致的体积膨胀和燃烧产物黏性增加而消失.

随着流动从出口处扩张并且向下游发展,由于射流与周围环境之间存在着巨大的速度差,因此强剪切层发展起来. 由于 Kelvin-Helmholtz 的不稳定性,大尺度相干结构在强剪切层区域形成,进而向下游发生脱落. 剪切层处的涡脱落是具有周期性的,涡脱落频率同样与流动速度成正比.

综上涡破碎、进动涡核以及涡脱落 3 种涡结构是有序的周期性结构,与无序的随机的湍流结构相比,从信号的角度上讲,前者在某个或某几个频率上具有明显的峰值,而后者是一种带宽噪声,没有明显的峰值. 这是本文在分析流动结构上将

采用的重要原理,即在外界激励的情况下,倘若测量的流速频谱中出现了明显峰值,那么该峰值频率很可能对应于某一种周期性结构,倘若该峰值频率在空间上具有一定的分布,那么该周期性结构具有对流特征。

2 实验系统

由于火焰的非定常释热产生的压力波传播至燃烧室头部时,会引起燃烧室头部背压发生变化,从而引起燃烧室头部的空气流量发生改变,因此,通过建立空气流量脉动来模拟声压对燃烧室头部流动的作用符合物理过程。由于流动平均速度对湍流流动结构的影响很大,而流动平均速度与燃烧室头部压差和流体密度有关,另外,整个实验在常温常压冷态条件下进行,流体介质特征与燃烧态条件不同,因此,在实验之前,对常温常压冷态条件下的压差和流速之间的关系进行了相关标定。实验测试管道系统如图2所示。实验采用 Siren 激励器方法来生成流量脉动^[14-18],空气流量的脉动强度 P_u 通过调节分阀 V1 和 V2 的开度获得,脉动频率通过调节 Siren 激励器的频率获得,频率范围为 100~450 Hz。 P_u 的大小与总阀 V0,分阀 V1 和分阀 V2 之间的关系已标定。LESS 燃烧室头部各级出口处的气流速度通过一维热线探头进行单点测量,空间分辨率为 2 mm,速度测量精度为 2%,采集频率为 20 kHz。测点间的转换通过位移机构调节,调节精度为 2.5 μm 。另外,实验还采用了动态压力传感器 PCB M111A24 同步测量 LESS 燃烧室头部上游流道中的压力脉动。

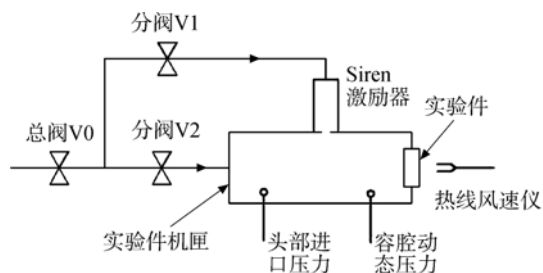


图2 实验测试管道系统

Fig. 2 Experimental pipe system

由于所测对象具有三维旋流流场特征,而一维热线探头只能表征一维速度或二维合速度,不过,在旋流器的出口附近,径向流动分量对合速度的影响较小,因此,采用一维热线探头测量旋流器出口附近流速具有一定的参考性。

3 实验结果

3.1 非定常流场结构

3.1.1 流场扫描与特征点选取

图3表示的是流场扫描网格点,沿着 LESS 燃烧室头部径向有 A, B, C, ..., R 共 18 个点,每个点之间的距离为 2 mm,该点间距是考虑到一维热线探头的分辨率而定;沿轴向方向有 6 个点,点间距为 3 mm,该点间距是权衡位移机构调节精度和工作量而定。整个网格含有 108 个结点,坐标原点为 A1 点,距旋流器出口端面 2 mm。一维热线探头首先从 A1 点沿径向逐步(非连续)扫描至 R1 点,然后移至 R2 点,再沿径向扫描至 A2 点……,如此以 S 型路径扫描全流场。为保证流场稳定,一维热线探头在每一个结点上停留 1 min 时间之后再进行采集。采集频率为 20 kHz。在采集过程中,LESS 燃烧室头部上下游压差控制在 3.92 kPa,控制精度为 1%,本文定义该压差条件为流动条件 I。

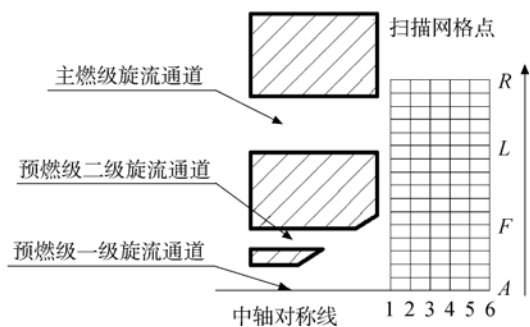


图3 流场扫描网格点

Fig. 3 Scanning grid in flow field

在流动条件 I 下,主燃级出口旋流数和雷诺数分别为 -0.6 和 2.97×10^5 ;预燃级出口雷诺数为 1.16×10^5 ,预燃级一/二级旋流器旋流数分别为 0.67 和 -0.72。其中旋流数正负号代表旋向。

图4给出了 F1 点的速度脉动的频谱图,图中在 2244 Hz 处存在一个非常明显的峰值,即表明 F1 点处存在明显的周期性流动结构。表1中给出了实验中周期性结构出现的结点及其在该结点处的速度脉动强度。可以发现,流场中的周期性结构有两类,150 Hz 以及 2250 Hz,而 2250 Hz 的周期性结构占有绝对份额。为了获取流场的特征区域,图5中的黑点“●”即为 2250 Hz 周期性结构出现的位置,图中绿色区域则是该结构的影响

范围. 而从文献[12]中关于 LESS 燃烧室头部出口流场的 CFD 计算结果来看: 边缘 $a \sim b$ 靠近 LESS 燃烧室头部出口剪切层. 图 5 中蓝色的椭圆曲线则是显示了 2250 Hz 周期性结构强度最高的区域. 为了研究流动的非定常响应特征以及适当减少工作量, 实验选取了 A1, E1, F1, G2, H3 和 N1 共 6 个结点(图中蓝色“×”所示), 并在该位置处进行了不同外界激励频率下的响应测试. 对于 N1 点而言, 虽然没有明显的周期性流动结构, 但由于其对应于主燃级的流道出口, 所以同样需要将其作为一个特征点来进行测试.

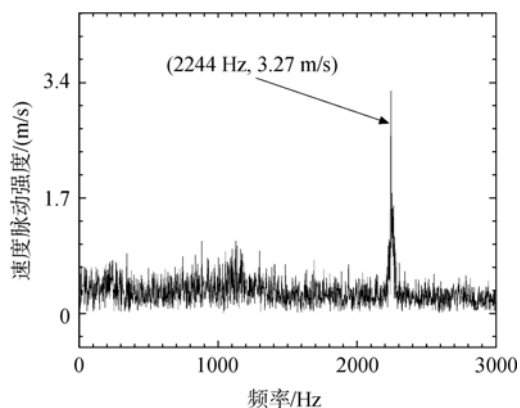


图 4 F1 点速度脉动频谱图

Fig. 4 Velocity fluctuation spectrum at point F1

表 1 周期性流动结构流经结点统计

Table 1 Statistics of nodes passed by periodical flow structure

结点 编号	频率/Hz	流动平均 速度/(m/s)	速度脉动 强度/(m/s)
A1	152	12.51	0.68
B1	2252	12.14	0.64
C1	2240	12.16	0.81
C2	2272	10.20	0.43
D1	2252	15.64	1.00
D2	2230	11.61	0.64
E1	2256	25.88	2.00
E2	2236	16.73	1.20
F1	2244	42.77	3.27
F2	2230	27.63	1.80
G2	2232	41.21	2.32
H3	2262	30.49	1.10

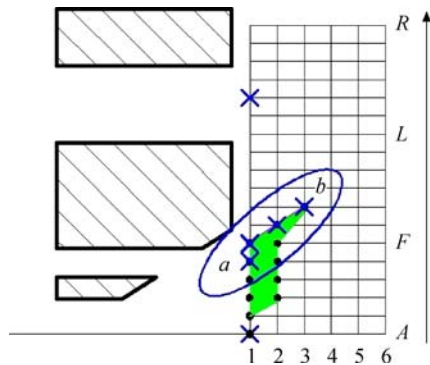


图 5 LESS 燃烧室旋流器出口流场

Fig. 5 Flow field at outlet of LESS combustor swirlers

3.1.2 周期性流动结构的性质

为了更好地了解非定常流动对外界激励的影响, 本文在外界激励响应实验之前, 还对 A1, E1, F1, G2, H3 进行了另一个流动条件 II 下 (LESS 燃烧室头部压差为 7.84 kPa, 控制精度为 1%) 的非定常速度扫描, 以初步了解周期性流动结构的类型, 一维热线探头扫描结果如表 2 所示.

表 2 不同流动条件下关键结点处非定常流动特征

Table 2 Unsteady flow characteristics at key nodes under different flow conditions

结点 编号	流动条件 I		流动条件 II		α
	频率/ Hz	流动平均 速度/(m/s)	频率/ Hz	流动平均 速度/(m/s)	
A1	152	12.51	150	19.72	1.60
E1	2256	25.88	3250	49.51	1.33
F1	2244	42.77	3246	74.64	1.21
G2	2232	41.21	3266	62.69	1.04
H3	2262	30.49	3266	45.41	1.03

从表 2 可以看出: 当 LESS 燃烧室头部的压降增大后, A1 点的频率基本保持在 150 Hz 左右, 而 E1 至 H3 四个点的频率均增大至 3250 Hz 左右, 这说明 150 Hz 周期性流动结构与 2250 Hz (或 3250 Hz) 结构的类型是不一样的. 为了更深地了解该周期性流动的性质, 根据 Strouhal 数定义, 有量纲一参数 α 如下:

$$\alpha = \left(\frac{f}{U} \right)_1 / \left(\frac{f}{U} \right)_2 \quad (1)$$

其中 f 和 U 分别为结点处的频率和流动平均速度, 下标 1 和 2 指流动条件 I 和流动条件 II. 当 α 为 1 时, 则周期性流动频率仅与流动平均速度有关, 且成正比. 从表 2 中的 α 值可以看出, 由于

2250 Hz周期性流动结构的频率与流动平均速度成正比,因此可以初步认为该流动结构可能属于涡脱落或进动涡核.至于 E1 和 F1 的 α 值偏离 1 较大可能是由于该处的流动平均速度受中心回流区的影响较大而造成的^[12].而对于 A1 点而言,由于 150 Hz 的周期性流动结构不满足式(1)的比例性质,所以 A1 点处的周期性流动结构不可能是进动涡核和涡脱落.

3.2 外界激励响应特征

对于一个系统而言,外界激励会对该系统的动态特征造成影响,因此,本文研究了不同外界激励频率对 LESS 燃烧室头部出口附近流场的影响.本文采用量纲一传递函数 $H(f_e)$ 来描述上述动态响应问题

$$H(f_e) = \frac{\hat{u}}{\hat{U}} / \frac{\hat{p}}{\bar{p}} \quad (2)$$

其中 f_e 为外界激励频率, $\hat{p}$ 和 $\bar{p}$ 分别为 LESS 燃烧室头部上游压力脉动和平均静压, $\hat{u}$ 为结点处的速度脉动强度.为了更加靠近 LESS 燃烧室的真实工况,本节采用流动条件 II 作为实验条件.另外,当外界激励频率远离燃烧室管道系统的共振频率时,可以认为外界激励对系统的动态特征影响较小乃至忽略^[18].由于本文实验采用的 Siren 激励器频范围为 100~450 Hz,所以该激励对 2250 Hz 周期性运动的动态特征的影响很小,故本节实验主要考察的是 150 Hz 周期性流动结构的动态响应特征,另外,外界激励对 2250 Hz 流动结构静态特征的影响则作为一个参考.

3.2.1 外界激励对流动平均速度的影响

为了了解外界激励引起流动平均速度发生改变的程,定义量纲一参数 β 为

$$\beta = \frac{U_{i,f_e}}{U_i} \quad (3)$$

其中下标 i 为结点 A1, E1, ..., N1 的标示符.当 β 为 1 时,则外界激励对流动平均速度没有影响.从图 6 中可以看出,外界激励对流动平均速度的影响,100~450 Hz 之间的扰动对 E1, F1, ..., N1 五个结点处流动平均速度几乎没有影响,而对于 A1 点而言,其流动平均速度对 150 Hz 扰动产生了极强的响应,流动平均速度增大了 2.51 倍.这种现象是由于 A1 点处流动固有频率为 150 Hz,而 150 Hz 的外界激励频率恰好与固有频率发生共振耦合,从而导致该处的流动发生畸变.流场的畸变,则意味着对流延迟时间的变化,这也暗示着,150 Hz 周期性流动是燃烧不稳定性的潜在驱动

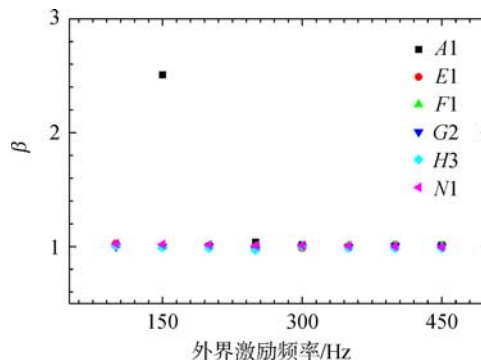


图6 外界激励对流动平均速度的影响

Fig. 6 Influence of outer excitation on mean flow velocity

机制之一.

3.2.2 外界激励对非定常流动的影响

由于外界激励频率范围(100~450 Hz)没有覆盖 2250 Hz 流动结构的固有频率,因此关于非定常流动对外界激励的响应需要包含两个方面:一个是固有非定常流动对外界激励的响应(简称为问题 1);另一个是在外界激励的影响下,非定常流动相比于无外界激励的条件下,有着怎样的变化(简称为问题 2).对于前者,采用式(2),即量纲一传递函数 $H(f_e)$ 来描述.由于流动系统的固有频率不会因为外界激励而发生改变,因此,对于后面一个问题的描述则采用式(4)来描述,式中 ψ 值反映的是外界激励对系统固有振荡强度的影响.

$$\psi = \left[\frac{\hat{u}}{\bar{U}} \right]_{\text{forced}} / \left[\frac{\hat{u}}{\bar{U}} \right]_{\text{nature}} \quad (4)$$

问题 1 根据式(2),图 7 给出了 6 个结点(A1, ..., N1)非定常流动对低频范围外界激励的响应示意,图中的纵坐标 $H(f_e)$ 即为量纲一的响

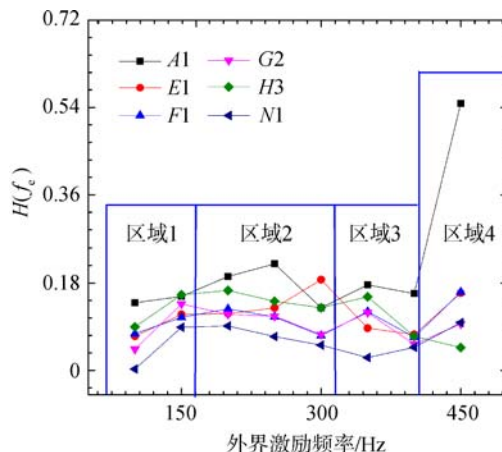


图7 非定常流动对低频外界激励的响应

Fig. 7 Response of unsteady flow to low frequency outer excitation

应函数. 图中用蓝色实线划分出了4个区域, 区域1反映了 $H(f_e)$ 函数的上扬趋势, 到了区域2时, $H(f_e)$ 函数达到极大值, 并随着外界激励频率增大, 开始下沉, 在区域3处沉至极小, 在区域4又显示出上扬的趋势(结点 H3 除外). 这种具有周期性特点的变化是由于实验件上游管道的声学共振引起的, 由于上游管道的长度为 0.72 m, 其在大气条件下的声学轴向共振基频为 236.11 Hz, 第1阶谐振频率为 472.22 Hz, 恰好与图7中曲线的极大值位置相对应. 这说明了一个问题, 倘若 LESS 燃烧室中发生燃烧不稳定性, 那么 LESS 燃烧室头部上游管道容腔的振荡可能会对该旋流器出口的非定常流动产生影响.

另外, 从 $H(f_e)$ 函数的值来看, 在 100~450 Hz 范围内, LESS 燃烧室头部上游的声学激励对速度扰动的影响并不大, 即 1% 的压力脉动仅造成 LESS 燃烧室出口不到 0.5% 的速度脉动. 而对于图7中 450 Hz 处 A1 点的响应函数值, 可能是个坏点, 不过该值仍能反映响应函数的发展趋势.

问题2 根据前面所述, 认为非共振频率下的外界激励对系统共振频率下的动态运动的影响很小, 所以只研究 A1 点的强度响应特征. 另外, 由于 F1 点最接近出口边缘, 剪切层特征明显, 因此本节增加 F1 点, 以作为一个参考. 图8则给出了 A1 和 F1 的振荡强度对外界激励的响应. 从图上来看, 和理论所述一般, 低频外界激励对 F1 点处的周期性流动运动几乎不产生影响, 因为 F1 点的强度响应函数几乎保持在 1 附近. 而对于 A1 点, 其强度在 150 Hz 处具有极大的响应, 这是由于固有振荡与外界激励共振所引起的, 并且一个

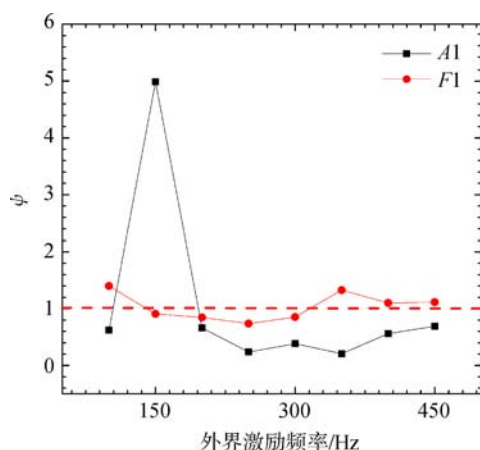


图8 外界激励下非定常流动的变化

Fig. 8 Changes of unsteady flow under outer excitation

小的外界激励频率则会造成较大的速度强度变化. 这一点进一步说明了 150 Hz 的周期性流动结构是燃烧不稳定性的较强扰动源, 也反应了当外界激励频率与管道系统的共振频率接近或相同时, 系统运动会发生共振放大.

4 结 论

本文通过实验探索了 LESS 燃烧室头部出口附近的固有流动特征, 及其对外界激励的响应. 实验结果表明:

1) 在实验流动条件下, 预燃级旋流区域存在着周期性流动结构, 而主燃级出口区域没有周期性流动结构.

2) 当外界激励频率与流动固有频率耦合时, 会引起预燃级流场畸变, 并导致周期性流动的流速振荡幅值急剧增大.

未来将会对该周期性流动产生原因进行相关研究.

致谢:

感谢中航商用发动机有限责任公司对本文燃烧不稳定性研究的支持.

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] Lee J G, Santavica D A. Experimental diagnostics for the study of combustion instability in a lean premixed combustion[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(5): 735-750.
- [4] Menon S. Acoustic-vortex-flame interactions in gas turbines[R]. New York: Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling, 2005.
- [5] Gutmark E, Ho C M. Preferred modes and the spreading rate of jets[J]. Physics of Fluids, 1983, 26(10): 2932-2938.
- [6] Sankaran V, Menon S. LES of spray combustion in swirling flows[J]. Journal of Turbulence, 2002, 3(11): 1-23.
- [7] Ling W, Trout J N, Crowe C T. Direct numerical simulation of a three-dimensional temporal mixing layer with particle dispersion[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 358(3): 61-85.
- [8] Cohen J, Hibshman J. An experimental study of combustor air swirler acoustic and fluid dynamic sensitivities[R].

- Cleveland, US; PERC 9th Symposium on Propulsion, 1997.
- [9] Anderson T J, Kendrick D W, Cohen J W. Measurement of spray/acoustic coupling in gas turbine fuel injectors[R]. AIAA 98-0718, 1998.
- [10] Haile E, Lasca P, Desrayaud C, et al. Characterization of a liquid fuel injector under continuous and modulated flow conditions[J]. Particle and Particle Systems Characterization, 1998, 15(3): 135-144.
- [11] Haile E, Delabroy O, Lacas F, et al. Structure of an acoustically forced turbulent spray flame[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2006, 26(1): 1663-1670.
- [12] FU Zhenbo, LI Jibao, LIN Yuzhen. Experimental investigation on ignition performance of LESS combustor[R]. ASME Paper GT2011-45786, 2011.
- [13] 林宇震, 许全宏, 张弛. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [14] Peluso S, Quay B D, Lee J G, et al. Comparison between self-excitation and forced flame response of an industrial lean premixed gas turbine injector [R]. ASME Paper GT2011-46115, 2011.
- [15] Kim V D, Lee J G, Quay B D, et al. Effect of flame structure on the flame transfer function in a premixed gas turbine combustor[R]. ASME Paper GT2008-51014, 2008.
- [16] Schuermans B, Guyot D, Paschereit C O, et al. Thermoacoustic modeling of a gas turbine using transfer functions measured at full engine pressure[R]. ASME Paper GT2009-59605, 2009.
- [17] Scheel F, Gashi S, Kaminski C, et al. Investigation of self-excited and acoustically forced combustion instabilities with laser diagnostics[R]. AIAA-2007-560, 2007.
- [18] 吴麒, 王诗宓. 自动控制原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.