

同心旋流分层火焰的外激脉动特性统计学分析

张 弛^{1,2}, 王 波^{1,2}, 邹鹏飞^{1,2,3}, 林宇震^{1,2}, 李继保³

- (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. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;
3. 中国航空发动机集团有限公司 商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 为了更深入地理解民用航空发动机低排放燃烧室中的同心旋流分层火焰脉动机制,以丙烷为燃料,在 100 Hz 频率的外激条件下对该类旋流火焰的 CH^{*} 化学发光图像进行高频采样,重点通过本征正交分解法(POD)的统计学分析,提取其时间和空间域内的脉动特征。分析结果表明,旋流火焰中 4 个最主要的脉动模态分别是轴向振荡、径向振荡、火焰脱落和非对称螺旋运动,并且模态 1 轴向振荡和模态 2 径向振荡之间具有显著相关性。POD 分析方法可作为中心分级贫油预混燃烧不稳定性机理探索的有效手段。

关 键 词: 航空发动机; 燃烧室; 低排放; 同心旋流分层火焰; 本征正交分解
中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Statistical analysis on the forced dynamic of internally-staged-swirling stratified flame

ZHANG Chi^{1,2}, WANG Bo^{1,2}, ZOU Pengfei^{1,2,3},
LIN Yuzhen^{1,2}, LI Jibao³

- (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. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;
3. Commercial Aircraft Engine Company Limited,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Shanghai 200241, China)

Abstract: To understand the dynamic mechanism of internally-staged-swirling stratified flame used in civil aero-engine low emissions combustor, high-speed CH^{*} chemiluminescence images of this swirling flame fueled with propane were recorded under the forced condition with 100 Hz frequency. Then the temporal and spatial dynamic features of the flame could be extracted by using statistical analysis of proper orthogonal decomposition (POD). The analysis results indicated that the most important 4 dynamic modes in the swirling flame are axial vibration, radial vibration, flame shedding and asymmetric helical motion, respectively. And the axial vibration of mode 1 and radial vibration of mode 2 have significant correlation. The POD analysis could be an effective method for the mechanism exploration of combustion in-

收稿日期: 2016-05-12
基金项目: 国家自然科学基金(51306010); 北京市自然科学基金(3152020)
作者简介: 张弛(1979—),男,副教授,博士,主要从事航空替代燃料和低污染燃烧研究。

引用格式: 张弛,王波,邹鹏飞,等. 同心旋流分层火焰的外激脉动特性统计学分析[J]. 航空动力学报,2017,32(8):1801-1808.
ZHANG Chi, WANG Bo, ZOU Pengfei, et al. Statistical analysis on the forced dynamic of internally-staged-swirling stratified flame[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1801-1808.

stability in the internally-staged lean premixed combustion.

Key words: aero-engine; combustor; low emissions;

internally-staged-swirling stratified flame; proper orthogonal decomposition

如今,全球航空业正面临能源多元化和减排两大挑战。如何在燃用传统航空燃料和航空替代燃料的条件下均实现污染排放的大幅降低,已成为决定未来航空业发展方向的关键问题之一^[1-2]。而在日益增长的民用航空发动机燃烧室工作压力和温度前提下,氮氧化物(NO_x)排放是目前关注的重点,控制难度也最大^[3]。

在航空发动机中,燃烧温度是决定 NO_x 排放的首要因素,热力型 NO_x 占主要地位,贫油预混燃烧是降低燃烧温度并减少 NO_x 排放最直接的方式^[4],但火焰稳定性变差、燃烧振荡、自燃回火等问题成为限制其发展的瓶颈。

旋流是航空发动机燃烧室中广泛使用的稳定火焰方式,中心分级的贫油预混旋流燃烧可以在大幅降低污染排放的同时保证稳定性,近年来受到国内外的广泛关注。而中心分级的贫油预混流燃烧大多采用扩散燃烧的中心预燃级和预混燃烧的外围主燃级布局^[5-6],主/预燃级的火焰以分区、分层的方式出现,属于同心旋流分层火焰结构,可以保证燃烧稳定性,但两层火焰的相互耦合作用非常复杂^[7]。

在实际流动中,旋流存在旋涡破碎、涡核进动(PVC)、剪切层拟序结构等明显的非定常特性,加之航空燃料雾化、蒸发及混合的脉动,导致了旋流火焰的显著动态变化^[8]。预混旋流火焰动态特性受旋流强度影响很大,PVC在非反应和反应流动下都会引起振荡,在不同的旋流强度下呈现出低频和高频两种不同的不稳定模式^[9]。事实上,旋流火焰的动态响应和非定常释热,是由轴向和切向速度扰动共同决定的^[10],流动与火焰相互作用机理也很复杂,热声振荡和 PVC 流动均会导致火焰动力学失稳^[11-12],传统的测试和分析方法难以对此开展深入研究。

近年来国际上利用高频非接触光学诊断技术,如化学发光信号高速摄像、高速 PLIF(planar laser-induced fluorescence)、高速 PIV (particle image velocimetry)等,对非定常的火焰基团发光图像和流场进行高频采集,并通过本征正交分解(POD)、动态模式分解(DMD)等统计学方法分析火焰的动态脉动特性和非定常释热结构^[13-15],提取火焰动态频率和统计信息,进而分析旋流火焰

中流动与火焰之间的复杂耦合关系^[16-17]或者临界状态火焰脉动特征变化^[18-19]。

POD 最初用于湍流研究,可以根据试验或者数值模拟结果获取湍流流动的拟序结构^[20-21]。对于燃烧光学诊断所获得的大量动态火焰图像数据,也可利用统计学数据挖掘技术分析出火焰的动态特征和脉动机制。POD 包括主成分分析(PCA)和奇异值分解(SVD)等算法^[22],在机器学习领域属于非监督型聚类分析方法。总体上来说,POD 将原始图像数据转换成更高层级的模态数据,据此自动将火焰脉动形式进行分类,进而实施降维处理,分析出火焰图像中的主导性脉动特性,包括主要的脉动模态及其时序变化。

在对火焰图像的分析中,一般采用 OH 和 CH 等反应基团的化学发光或诱导荧光作为燃烧反应和释热的示踪信号。而火焰中的 OH^{*} 和 CH^{*} 等化学发光与燃烧释热率、温度等参数都有关系,化学发光信号强弱与释热率之间的关系较复杂^[23-25],特别是对于非完全预混火焰而言。但总体上来看,化学发光信号与燃烧反应以及释热率之间仍然存在定量关系,可用于火焰的稳态和动态分析。

本文针对民用航空发动机低排放燃烧室的中心分级预混燃烧旋流结构,利用高速摄像机采集在一定的激条件下以丙烷为燃料的同心旋流分层火焰 CH^{*} 化学发光信号图像,运用 POD 方法分析该旋流火焰的脉动特性,以获得主要的火焰脉动模态空间分布及其频谱特性,探索复杂旋流火焰脉动的本质特征和驱动机制。

1 试验系统与方法

1.1 试验系统

图 1 所示的试验系统主要包括:空气供给系统,燃料供给系统,光学测试系统以及数据采集系统。

空气供给系统包括气源、旋笛 Siren 脉动发生器以及气路测试系统。为了产生低频外激条件,采用 Siren 作为流量脉动发生器,其原理是通过转动盘造成流通面积的周期性变化,从而产生一定频率的气流脉动^[26]。本文脉动发生器 Siren

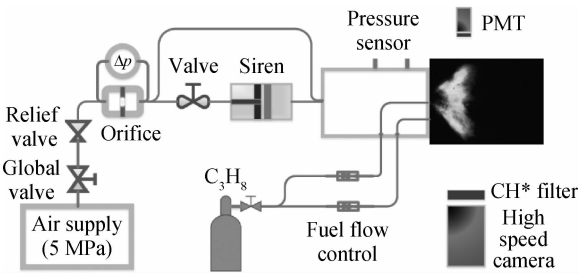


图 1 试验系统示意图
Fig.1 Schematic of the test system

可产生 100 Hz 的外激励。气源为 5 MPa 的高压储气罐,减压阀调节临界孔板前总压,从而控制空气流量,之后通过主路阀门改变流经 Siren 的空气流量,从而改变进入旋流器的气流速度脉动幅值。

试验中主/预燃级均使用纯度为 99.9% 的丙烷作为燃料,采用两个流量控制器分别调节并测量主/预燃级的燃料流量,流量误差为 $\pm 1.0\% \text{ SP}$ ($\% \text{ SP}$ 为设定值误差) ($\geq 35\% \text{ FS}$) ($\% \text{ FS}$ 为全量程误差) 或者 $\pm 0.35\% \text{ FS}$ ($< 35\% \text{ FS}$)。

光学测试系统主要包括波长范围 $(430 \pm 5) \text{ nm}$ 的 CH^* 滤镜、高速摄像机和像增强器,可对火焰 CH^* 化学发光信号进行高速拍摄,获得三维旋流火焰在摄像机方向上的积分投影。严格来讲,在 $(430 \pm 5) \text{ nm}$ 波长范围内获得的化学发光信号是 CH^* 叠加 C_2^* 和 CO_2^* 等背景辐射的信号,但由于常压下 C_2^* 和 CO_2^* 发光信号较弱,该波长范围内其强度不到 CH^* 的一半^[24,27],因此在本文工况条件下可将其视为 CH^* 化学发光信号进行分析。高速摄像机拍摄图像区域尺寸为 $112 \text{ mm} \times 102 \text{ mm}$,对应 704 像素 $\times$ 640 像素,每幅图像曝光时间为 199 ns,像增强器光强增益为 65%,图像采集频率 5000 Hz,连续拍摄了 3000 幅图像。

1.2 试验对象

以民用航空发动机低排放燃烧室的中心分级旋流器为研究对象^[5-6],包括中心双旋流杯预燃级,以及外围单旋流主燃级,两级同心布置,具体结构如图 2 所示。预燃级与主燃级空气流量比例为 2 : 8,预燃级内、外两级旋流的旋流数分别为 0.64 和 0.67,旋向分别为顺时针和逆时针;主燃级旋流数为 0.6,旋向为逆时针。与实际航空发动机不同,为了更好地模拟流动条件对火焰脉动的影响,忽略燃油雾化和蒸发,本文采用丙烷气作为燃料开展试验。预燃级燃料喷嘴为 6 个均布的小孔,喷向文氏管,燃料与内、外两级旋流空气混合燃烧,但混合程度远未达到预混效果,属于扩散

燃烧。主燃级喷嘴为 8 个周向均布的小孔,位于主燃级旋流叶片下游,燃料与空气在预混段中混合后燃烧,但也达不到完全预混的程度,严格来讲属于部分预混燃烧。在中心分级旋流器出口下游放置内径为 100 mm、长度为 240 mm 的 S1 级石英玻璃圆管作为火焰限制和观察区域。

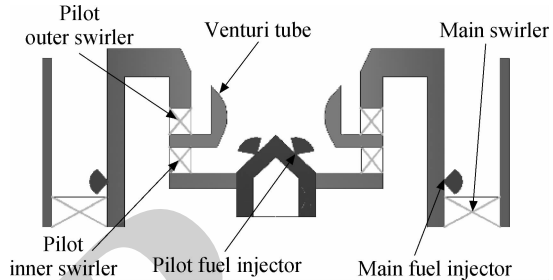


图 2 中心分级旋流器结构示意图
Fig.2 Schematic of the internally dual-staged swirler

1.3 试验工况

在常温常压下开展试验,中心分级旋流器下游圆管内平均流速为 3.2 m/s,对应的雷诺数约为 18800。通过旋流器的丙烷和空气总当量比为 0.6,预燃级和主燃级的燃料分配比例为 1 : 3,因此预燃级和主燃级的局部当量比分别为 0.75 和 0.56。正是这两级不同当量比和预混/非预混条件的火焰构成了同心旋流分层火焰结构。

2 本征正交分解法 (POD)

POD 分解的核心思想是假设连续变化的火焰图像可以由多个相互正交的模态线性叠加而成,即

$$A(x, t) = \sum_{i=0}^M \alpha_i(t) \varphi_i(x) \tag{1}$$

其中 x 表示空间坐标(像素点), t 表示时间坐标, α_i 表示模态 i 的时间系数, φ_i 表示模态 i 的空间分布特征, M 表示模态数。

为了求解以上图像的正交构造,首先需要对时间连续的 n 幅图像进行数据转化,实际上每张图像为 $m = R \times C$ 像素的矩阵, R 表示图像每行的像素, C 表示图像每列的像素。因此 n 幅图像的所有像素点可以表示为一个 $m \times n$ 的数据矩阵 $\mathbf{A}$, 并且可以利用奇异值 SVD 分解为 3 个矩阵的乘积

$$\mathbf{A}_{m \times n} = \mathbf{U}_{m \times m} \mathbf{S}_{m \times n} \mathbf{V}_{n \times n}^T \tag{2}$$

其中正交矩阵 $\mathbf{U}$ 代表了不同模态的空间分布,反映了其周期性的拟序结构; 对角矩阵 $\mathbf{S}$ 代表了数

据的奇异值,反映了不同模态的脉动能量;正交矩阵 $\mathbf{V}$ 代表了不同模态的时间分布,反映了不同模态随时间的变化规律。

为了求解矩阵 $\mathbf{U}$, $\mathbf{S}$ 和 $\mathbf{V}$,可采用计算量较小的 snapshots 方法^[20-21]。对式(2)做适当变换,左乘矩阵 $\mathbf{A}$ 的转置矩阵

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{V} \mathbf{S}^2 \mathbf{V}^T \tag{3}$$

再右乘矩阵 $\mathbf{V}$ 的转置矩阵,同时令 $\mathbf{S} = \sqrt{\lambda}$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{V} = \mathbf{V} \mathbf{S}^2 = \mathbf{V} \lambda \tag{4}$$

可通过求解 $n \times n$ 矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的特征向量和特征值得矩阵 $\mathbf{V}$ 和 $\mathbf{S}$ 。进而通过下式求解矩阵 $\mathbf{U}$:

$$\mathbf{U} \mathbf{S} = \mathbf{A} \mathbf{V} \tag{5}$$

矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 i 列则是模态 i 的空间分布 φ_i , 矩阵 $\mathbf{V}$ 的第 i 列乘以对角矩阵 $\mathbf{S}$ 的第 i 个值则是模态 i 的时间系数 α_i 。

将特征值 λ 或者对角矩阵 $\mathbf{S}$ 按照从大到小的顺序排列,则排序越靠前的模态其脉动能量越大,即在火焰脉动模态中占主导地位,在进一步分析时应主要关注这些模态。

3 火焰图像总体分析

采用 3 000 幅连续 CH^* 图像的平均图像 $\bar{A}$ 和图像标准差 σ 来分析火焰的总体特性,其计算方法如下:

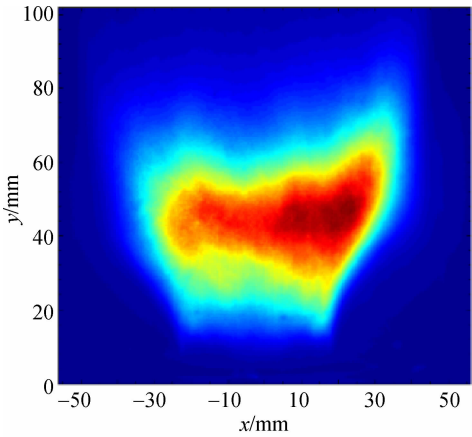
$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n A_k \tag{6}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (A_k - \bar{A})^2} \tag{7}$$

其中 n 表示图像数量(3 000 幅), k 表示图像序列号, A_k 表示第 k 幅图像。

火焰 CH^* 发光信号的平均图像和图像标准差如图 3 所示,横纵坐标代表火焰图像的真实尺寸。

从图 3(a)旋流火焰 CH^* 的平均图像可以看



(b) 图像标准差

图 3 火焰 CH^* 平均图像与图像标准差

Fig. 3 CH^* average and standard deviation images of flame

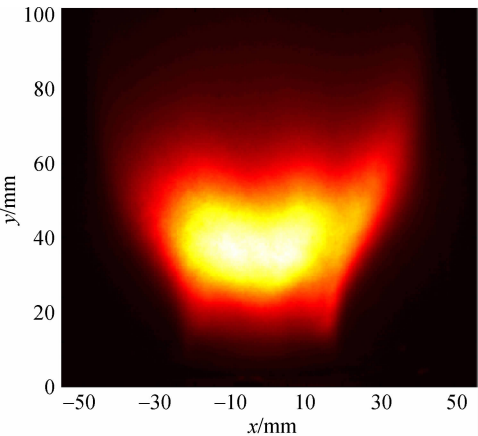
出,空气由下往上流动,火焰由下往上整体呈 V 字扩张型,发光信号最强的区域位于旋流中心回流区内,这里应该是火焰的主要反应区。根据中心预燃级出口尺寸(直径为 42 mm),及其局部当量比为 0.75 的扩散燃烧特征,可以判断该平均图像中预燃级的火焰 CH^* 发光很强,外围局部当量比 0.56 的部分预混燃烧主燃级(出口直径为 76 mm)的 CH^* 发光很弱。而图 3(b)旋流火焰 CH^* 的图像标准差显示出预燃级下游的中心回流区内也是脉动最强烈的区域,回流区以外的脉动看起来很小。

但需要注意的是,图像标准差只能反映总体的脉动情况,由于中心回流区本身的发光很强,这个区域局部相对微弱的脉动就足以“掩盖”周围的脉动特征,因此仅依靠图像标准差来分析火焰的脉动特性是不够的,需要更深入的分析方法,比如 POD。

4 火焰图像 POD 分析

本文直接对原始图像数据进行 POD 分解,没有进行消除平均图像 $\bar{A}$ 的预处理。

一般认为,式(1)中的模态 0 就代表了平均图像,因此将平均图像消除后再进行 POD 分解可以直接得到余下的脉动模态。本文作者却认为,平均图像确实可以代表模态 0,但两者并不完全相等,因为模态 0 的时间系数 $\alpha_0(t)$ 并不总是等于 1,如果在原始图像数据中直接减去平均图像数据,可能还会残留平均图像的部分信息,最终在 POD 分解后仍然有所体现,进而误导对主要脉动模态的分析。



(a) 平均图像

事实上,在不消除平均图像 $\bar{A}$ 的前提下经过 POD 分解得到的模态 0,与平均图像 $\bar{A}$ 作归一化比较,两幅图像相差很小,它们的均方差仅为 0.000264。再看图 4 所展示的 POD 模态 0 和模态 1 时间系数的时序变化对比,可以发现:与模态 1 的正负交替不同,模态 0 随时间的变化均是正向的,表现为一种整体性的“扰动”,反映了火焰释热的整体增强或者减弱,不存在空间分布上的差异。因此,为了分析旋流火焰的流动及释热脉动特性,我们更关注除模态 0 以外的具有空间分布特征周期性变化的脉动模态。

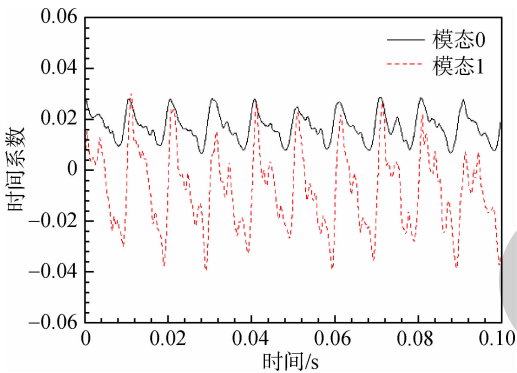


图 4 火焰 CH* 的 POD 模态 0 和 1 的时间系数分布
Fig. 4 Temporal coefficient distribution of flame CH* POD mode 0 and mode 1

4.1 POD 模态脉动能量

每个 POD 模态的特征值 λ 都代表了该模态的相对脉动能量,采用能量比例 E_i 表示第 i 个模态的脉动能量对火焰总体脉动能量的贡献率:

$$E_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^M \lambda_j \tag{8}$$

利用 POD 计算得到的旋流火焰脉动模态能量比例分布如图 5 所示。图中包含了按脉动能量排序的前 10 个模态(模态 0 除外),随着模态数的增加,其脉动能量比例急剧降低。第 1 个模态所占的能量比例最大,达到 25.3%,该模态代表了本文外激条件下同心分层火焰的主要脉动特性。前 4 个模态的脉动能量之和占了 50%,其余模态的各自能量比例均不足 2.5%。因此接下来主要通过模态 1 到模态 4 来分析外激条件下同心分层火焰的脉动特性。

4.2 POD 模态的空间分布

图 6 展示了同心旋流分层火焰 POD 脉动模态 1 到模态 4 的空间分布结构,进行了归一化处理,其中红色和蓝色分别代表脉动幅值为 +1 和

-1,都代表了脉动最剧烈的区域。在同一幅模态图中,红色区域代表某一时刻该区域的 CH* 化学发光信号增强,蓝色区域代表同一时刻此处的 CH* 化学发光信号减弱,两者在数值上分别为正值和负值,而介于红色与蓝色之间的颜色深浅代表了脉动幅值的相对强弱,颜色越深脉动越强。

前面已提到,POD 属于聚类分析方法,它只能按照提取出来的脉动特征将火焰的脉动形式区分开来,并以“模态”的名义聚类,本身却不能表达脉动形式的具体意义,因此需要研究者结合旋流燃烧的相关领域知识和经验对 POD 脉动模态进行分析和分类。

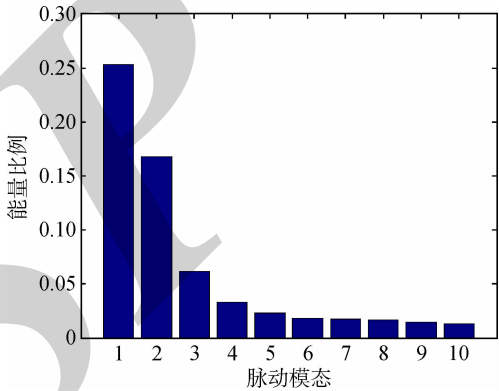


图 5 火焰 CH* 的 POD 脉动模态能量分布
Fig. 5 Dynamic energy distribution of flame CH* POD modes

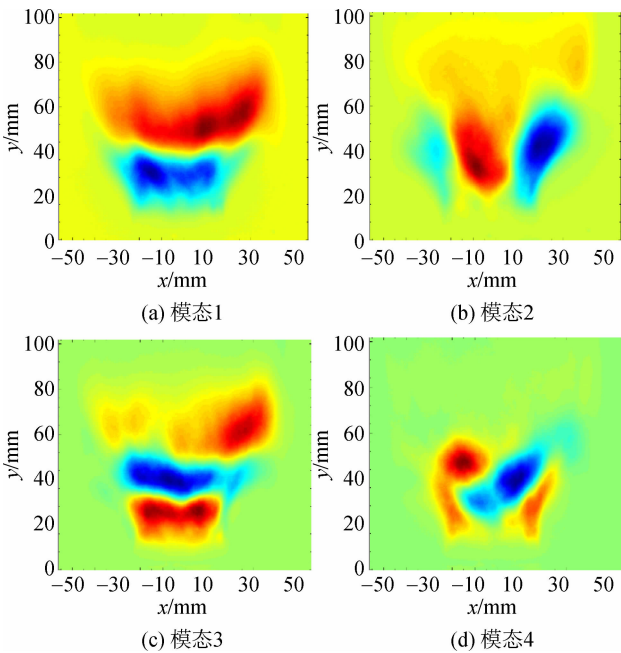


图 6 火焰 CH* 的 POD 前 4 个脉动模态空间分布
Fig. 6 Dynamic spatial distribution of flame CH* first four POD modes

从图 6(a)可以看出,模态 1 的强烈反应区域上下交替出现,在空间上燃烧反应属于轴向振荡模态,表明轴向振荡是该旋流火焰外激运动的主要脉动形式。图 6(b)中模态 2 则显示出旋转射流与中心回流区域的反应强度差异,反应强烈区域将在中心和外环之间交替出现,属于径向振荡形式,而且旋转射流的直径较大,这与主燃级部分预混火焰的关系更大。图 6(c)模态 3 的反应强烈区域则在上、中、下个轴向位置交替,反映了高阶轴向运动模态,这与旋流火焰在轴向上的脱落和传播有关。图 6(d)的模态 4 总体上呈现内外旋流的燃烧反应差异,但内旋流沿着轴向还有左右交替非对称式的螺旋运动,这主要受预燃级旋流的影响,符合预燃级强旋流涡核进动(PVC)特征。

由此可见,外激条件下同心旋流分层火焰的脉动是以轴向振荡为主,但受当量比 0.75 中心预燃级和当量比 0.56 外围主燃级复杂旋流分层火焰的耦合影响,同时复合了径向交替、火焰脱落、螺旋上升等脉动特征。不过,总体上该火焰属于较稳定的 V 型火焰,脉动强度并不剧烈。

4.3 POD 模态的时间变化

其实对于 POD 分析而言,只需要有足够多的图像数量就可以分析出脉动模态的空间分布,并不要求图像按照一定的频率连续高速采集。但是,高频连续采集的图像数据可为 POD 分析提供时间系数数据,进一步分析脉动模态的时间序列特征。

对旋流火焰每一个脉动模态的时间系数作快速傅里叶变换(FFT),可以获得如图 7 所示的脉动模态功率谱密度分布。可以发现,按照脉动能量分类的每个 POD 模态均含有多个脉动频率,在

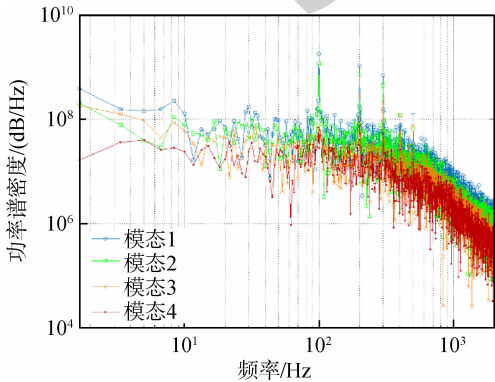


图 7 火焰 CH* 的 POD 前 4 个脉动模态功率谱密度
Fig. 7 Power spectral density distribution of flame CH* first four POD modes

外激条件下它们的脉动频率基本相同,其基频与 100 Hz 的外激频率一致,还包括 200,300,400 Hz 和 500 Hz 的倍频,超过 500 Hz 后所有模态的脉动幅值显著降低。相对于模态 1 轴向振荡和模态 2 径向振荡,在 100 Hz 频率下模态 3 火焰脱落和模态 4 螺旋运动的振幅明显更小,200 Hz 与 300 Hz 是模态 3 和模态 4 脉动更剧烈的频率。同时,从模态 1 到模态 4,尽管不同的频率下幅值大小会有些差异,但总体上来看其脉动幅值依次减小。

在确定了各模态的脉动频率后,对于相同频率的两个脉动模态可以通过计算其时间系数的互相关函数获知它们之间的相关性以及相位关系。

通过对旋流火焰的 POD 前 4 个模态中任意两个的时间系数进行互相关函数计算,可知:只有模态 1 和模态 2 之间存在显著相关性,且在时间序列上模态 2 比模态 1 延迟 1.4 ms,或者说相位角落后了 50.4°。正如图 8 所示,模态 1 和模态 2 时间系数所组成的相位图介于理想 ±45° 和 ±90° 相位差之间,根据瑞利准则,这两个模态的振荡脉动同相,因此它们的反应释热将相互增强。

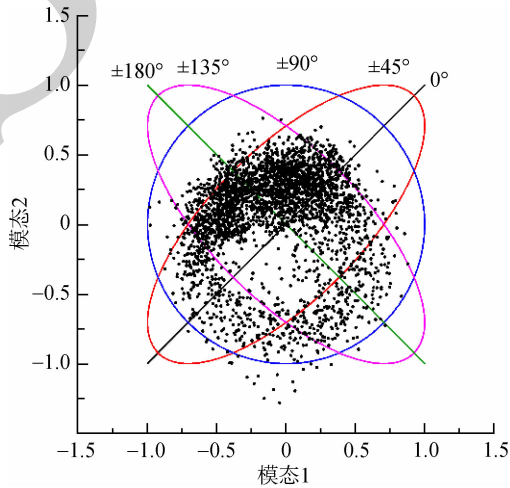


图 8 火焰 CH* 的 POD 模态 1 和模态 2 相位关系
Fig. 8 Phase correlation between flame CH* POD mode 1 and mode 2

5 结 论

为了理解并掌握航空发动机低排放燃烧室中复杂旋流火焰的燃烧反应及释热规律,本文对 100 Hz 外激条件下同心旋流分层火焰的 CH* 化学发光图像进行高速采集,重点是运用图像平均值、标准差、POD 等统计学方法获得了火焰的总体结构以及主要脉动模态的空间分布和时间变化特征。

本文的中心分级旋流器燃用丙烷气所产生的同心旋流分层火焰整体上呈 V 型结构,预燃级下游的中心回流区是燃烧反应和释热的主要区域,而 POD 前 4 个最主要的脉动模态分别对应轴向振荡、径向振荡、火焰脱落和非对称螺旋运动,它们的脉动能量达到了所有脉动模态总和的 50%。而前 4 个脉动模态的基频都为 100 Hz,对外激条件的响应是显著的,特别是模态 1 轴向振荡和模态 2 径向振荡,并且这两个模态之间具有显著相关性,相位差为 50.4° ,反应释热相互增强。

将本征正交分解(POD)等统计学方法应用于高频非接触光学燃烧诊断数据的分析,有助于高效提取复杂旋流火焰的脉动特征,获得中心分级贫油预混燃烧的脉动规律及其控制因素,为民用航空发动机低排放燃烧室的研制与发展提供支持。

参考文献:

- [1] LEE D S, Pitari G, Grewe V, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: aviation[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(37): 4678-4734.
- [2] BLAKEY S, RYE L, WILSON C W. Aviation gas turbine alternative fuels: a review[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2863-2885.
- [3] International Civil Aviation Organization. ICAO environmental reoport 2013: aviation and climate change[R]. Montreal QC: Canada, International Civil Aviation Organization (ICAO), 2013.
- [4] 张弛, 林宇震, 徐华胜, 等. 民用航空发动机低排放燃烧室技术发展现状及水平[J]. *航空学报*, 2014, 35(2): 332-350.
ZHANG Chi, LIN Yuzhen, XU Huasheng, et al. Development status and level of low emissions combustor technologies for civil aero-engine[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(2): 332-350. (in Chinese)
- [5] FU Zhenbo, LIN Yuzhen, LI Lin, et al. Experimental and numerical studies of a lean-burn internally-staged combustor[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(3): 488-496.
- [6] 付镇柏, 林宇震, 张弛, 等. 中心分级燃烧室进场工况燃油分级方式试验研究[J]. *推进技术*, 2014, 35(1): 77-86.
FU Zhenbo, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experimental investigation on fuel-staging mode of internally-staged combustor under approach condition[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(1): 77-86. (in Chinese)
- [7] DHANUKA S K, TEMME J E, DRIACOLL J, et al. Unsteady aspects of lean premixed-prevaporized (LPP) gas turbine combustors: flame-flame interactions[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(3): 631-641.
- [8] 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.
- [9] DUROX D, MOECK J P, BOURGOUIN J F, et al. Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(9): 1729-1742.
- [10] PALIES P, DUROX D, SCHULLER T, et al. The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(9): 1698-1717.
- [11] 刘联胜, 林博颖, 包婕, 等. 贫燃预混旋流火焰动力学失稳过程分析[J]. *燃烧科学与技术*, 2011(6): 491-498.
LIU Liansheng, LIN Boying, BAO Jie, et al. Dynamics instability of lean premixed swirl flames[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2011(6): 491-498. (in Chinese)
- [12] OBERLEITHNER K, STÖHR M, IM S H, et al. Formation and flame-induced suppression of the precessing vortex core in a swirl combustor: experiments and linear stability analysis[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(8): 3100-3114.
- [13] SICK V. High speed imaging in fundamental and applied combustion research[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 3509-3530.
- [14] IUDICIANI P, DUWIG C, HUSSEINI S M, et al. Proper orthogonal decomposition for experimental investigation of flame instabilities[J]. *AIAA Journal*, 2012, 50(9): 1843-1854.
- [15] KYPRAIOU A M, DOWLING A, MASTORAKOS E, et al. Proper orthogonal decomposition analysis of a turbulent swirling self-excited premixed flame [R]. *AIAA-2015-0425*, 2015.
- [16] STEINBERG A M, BOXX I, STÖHR 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.
- [17] STÖHR M, BOXX I, CARTER C D, et al. Experimental study of vortex-flame interaction in a gas turbine model combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(8): 2636-2649.
- [18] ZHU Shengrong, ACHARYA S. Flame dynamics with hydrogen addition at lean blowout limits[R]. *ASME Paper GT2013-95822*, 2013.
- [19] ZHANG Chi, ZOU Pengfei, WANG Bosen, et al. Comparison of flame dynamics at stable and near-LBO conditions for swirl-stabilized kerosene spray combustion[R]. *ASME Paper GT2015-42596*, 2015.
- [20] CHATTERJEE A. An introduction to the proper orthogonal decomposition[J]. *Current Science*, 2000, 78(7): 808-817.
- [21] ALLERY C, BEGHEIN C, HAMDOUNI A. Applying proper orthogonal decomposition to the computation of

particle dispersion in a two-dimensional ventilated cavity [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2005, 10(8): 907-920.

[22] WU C G, LIANG Y C, LIN W Z, et al. A note on equivalence of proper orthogonal decomposition methods [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 265(5): 1103-1110.

[23] DOLAN B, GOMEZ R V, MUNDAY D, et al. OH* chemiluminescence in a multipoint combustion system: steady state and limit cycle behavior[R]. AIAA-2013-0560, 2013.

[24] TAUTSCHNIG G, HAMPEL B, HIRSCH C, et al. Experimental investigation of OH* and CH* chemiluminescence under varying operating conditions[R]. ASME Paper GT2013-95850, 2013.

[25] PROVIDAKIS T, ZIMMER L, SCOUFLAIRE P, et al. Characterization of the coherent structures in swirling flames stabilized in a two-staged multi-injection burner; influence of the staging factor[J]. Comptes Rendus Mécanique, 2013, 341(1/2): 4-14.

[26] 丁志磊, 林宇震, 秦皓, 等. Siren(旋笛式)激励系统设计与输出特性研究[J]. 推进技术, 2015, 36(5): 745-751.

DING Zhilei, LIN Yuzhen, QIN Hao, et al. Design and output characteristic of siren incentive system[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(5): 745-751. (in Chinese)

[27] GIASSI D, CAO S, BENNETT B A V, et al. Analysis of CH* concentration and flame heat release rate in laminar coflow diffusion flames under microgravity and normal gravity[J]. Combustion and Flame, 2016, 167: 198-206.

(编辑:王碧珺)