

外激作用下自激热声系统的非线性动力学响应

吕丽君¹, 林宇震^{1,2}, 韩 啸¹, 王志超¹

(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)

摘 要: 在高温高压燃烧实验台上,以频率 f_i 为 78~716 Hz,幅值 A 为 0.026~0.629 的外激信号激励有自激响应的同心分层旋流部分预混预蒸发火焰热声系统,研究其非线性动力学响应。结果表明:系统的自激频率 f_n 为 366.85 Hz;当外激频率和自激频率的比值为 1.022,幅值 A 为 0.629 时,火焰主要被外激频率其谐波控制,其状态轨迹密集在很窄的封闭带中;当外激频率和自激频率的比值与 A 在其他的范围时,火焰不仅在 f_i 和 f_n 处响应,还在谐频、结合频和分频处响应。说明当外激幅值足够大并且外激频率靠近自激频率时,火焰发生锁相;当火焰未锁相时,出现了谐频、结合频以及分频的非线性响应,火焰准周期振荡。受迫范德波尔振荡器模型能够预测锁相、奇数谐频以及结合频 $2f_n \pm f_i$ 。

关 键 词: 非线性; 部分预混预蒸发火焰; 锁相; 谐频; 结合频; 分频; 受迫范德波尔振荡器
中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Nonlinear dynamic responses of a self-excited thermoacoustic system subjected to acoustic forcing

LÜ Lijun¹, LIN Yuzhen^{1,2}, HAN Xiao¹, WANG Zhichao¹

(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)

Abstract: On the combustion experimental platform of high temperature and pressure, the thermoacoustic system with a concentric stratified swirl-stabilized partially premixed-pre-vaporized flame with self-excited response was excited by external-excited signal with frequency f_i of 78—716 Hz and amplitude A of 0.026—0.629, and its nonlinear dynamic responses were studied. It was found that the system self-excited frequency f_n was 366.85 Hz; when the ratio of external-excited frequency to self-excited frequency was 1.022 and amplitude A was 0.629; the flame was dominated by the harmonic frequency and its state trajectory was dense in a very narrow closed zone. When the ratio of external-excited frequency to self-excited frequency and A was in other ranges, the flame responded not only at f_i and f_n , but also at the harmonic, combining and divided frequencies. It showed that when amplitude A was large enough and external-excited frequency was close to the self-excited frequency,

收稿日期: 2017-05-22

作者简介: 吕丽君(1991—),女,硕士,主要从事燃烧不稳定性研究。E-mail:lequeenfly@qq.com

引用格式: 吕丽君,林宇震,韩啸,等. 外激作用下自激热声系统的非线性动力学响应[J]. 航空动力学报,2018,33(10):2404-2413.
LÜ Lijun, LIN Yuzhen, HAN Xiao, et al. Nonlinear dynamic responses of a self-excited thermoacoustic system subjected to acoustic forcing[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(10): 2404-2413.

the flame was phase-locked. When the flame was not phase-locked, the nonlinear responses of the harmonic, combining and divided frequencies appeared, and the flame oscillated quasi-periodically. Forced van Der Pol oscillator model can predict phase-locked, odd harmonic frequencies and combining frequencies $2f_n \pm f_i$.

Key words: nonlinear; partially premixed-prevaporized flame; phase-locked; harmonic frequency; combining frequency; divided frequency; forced van Der Pol oscillator

贫油预混燃烧旨在降低航空污染物排放,是一种十分有效的燃烧组织方式。同时为了保证安全性,采用了中心分级模式,即主燃级采用部分预混预蒸发燃烧来降低排放,中心采用扩散燃烧来增强整个燃烧的稳定性。从学术上来讲,在火焰筒内形成了所谓的同心分层旋流部分预混预蒸发火焰,如图 1 所示。图中 CRZ 为角涡回流区,LRZ 为台阶回流区,PRZ 为主回流区此种火焰燃烧系统为典型的热声系统,自激振荡是其特性之一,由于此种系统主燃级当量比接近贫油熄火极限,而贫油熄火极限附近微小的当量比脉动就能导致显著的火焰释热脉动,容易引发燃烧不稳定性^[1]。

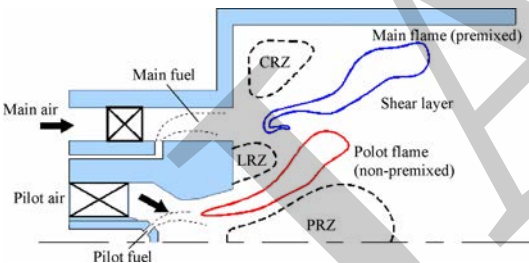


图 1 同心分层旋流部分预混预蒸发火焰示意图
Fig. 1 Schematic of concentric stratified swirl-stabilized partially premixed-prevaporized flame

人们对燃烧室声学以及外激作用下火焰对速度扰动响应的理解是近几十年来分析与预测燃烧不稳定的主要途径。燃烧不稳定的声学特性可以用线化方程分析,但是外激作用下火焰对速度扰动响应存在非线性区,对多种频率下的速度扰动响应更是高度非线性的。国内外许多学者针对外激作用下火焰对速度扰动的非线性响应开展了许多相关研究工作。

Kim 和 Park^[2]以火焰传递函数的形式以天然气和空气为燃料在室温大气压力下研究了无自激的全局稳定的单层贫油预混火焰在外激速度扰动下的线性和非线性响应,结果发现,火焰的非线性响应发生在外激速度扰动幅值较大的区域。

Kim 和 Hochgreb^[3]也以火焰传递函数的形式以甲烷和空气为燃料在室温大气压力下研究了无自激的全局稳定的分层贫油全预混火焰在外激速度扰动下的线性和非线性响应,结果发现,外激频率越高,越容易发生非线性响应。

然而,火焰传递函数并不能体现外激作用下的自激热声系统的非线性响应。这是因为火焰传递函数只能捕捉火焰在外激频率下的响应,而忽略了其他频率处的响应,尤其是自激频率和由自激模态和外激模态相互作用所激发的其他频率。Li 和 Juniper 等^[4]以甲烷和氮气为燃料研究了全局不稳定的射流火焰在外激作用下各离散频率相互作用引起的非线性响应,主要从波形图、频谱图以及相空间内的状态轨迹来分析其非线性响应,结果推翻了全局不稳定的射流火焰对外激不敏感的理论,实际上此火焰对外激很敏感。

翁方龙等人^[5]在 Rijke 管的单层预混火焰中发现了非线性的自激跳跃现象,这和 Juniper 等在贫油预混燃烧室中发现的准周期非线性现象非常相像。杨甫江等人^[6]采用低阶热声网络加以数值模拟研究了燃烧不稳定性从开始到极限环的非线性演化过程,结果表明热释放响应会随着当量比的增大而呈现典型的非线性激发过程。

综合国内外研究发现,全局稳定的或者不稳定的自激热声系统都能发生非线性响应。以往采用的是气态燃料,并在常温大气压下研究全预混或非预混火焰的非线性响应。与以往的研究不同的是,本文以液态航空煤油为燃料,并在高温高压下对同心分层旋流部分预混预蒸发火焰进行实验研究。主预两种火焰形成的剪切层附近产生了强烈的涡,对整个火焰燃烧不稳定性有重要的影响^[7]。液态航空煤油为燃料,将存在雾化、蒸发以及掺混的过程^[8],整个燃烧方式相比于气态燃料更加复杂。高温高压的实验环境,更接近实际航空发动机燃烧室的工作状态,使结果更具有指导意义。本实验系统为自激热声系统,自激是火焰产生的压力脉动与试验段容腔(加热器出口到

临界喷口之间)的本征声学频率耦合导致的,通过外部激励此自激系统,研究在外激作用下此自激热声系统的非线性动力学响应,并将其和受迫的范德波尔振荡器联系起来,为预测和控制燃烧不稳定性提供一种较为简便的方法。

1 实 验

为了研究外激作用下自激热声系统的非线性动力学响应,实验应用旋笛^[9-10] (Siren)激励自激同心分层旋流部分预混预蒸发火焰,并测得相应的压力脉动。本章主要介绍的燃烧实验系统以及实验工况。主要分为三个部分:稳态参数采集系统以及稳态工况;动态参数采集系统;外激试验件旋笛以及外激实验工况。

外激实验系统平面示意图如图 2 所示,热声系统为双级旋流燃烧室,旋笛上游的节流孔板从声学上将整个系统分成左右两个独立部分,进口空气为高温高压气体。通过安装在匀流段壁面的铠装 K 型热电偶测量空气进口温度 T_{in} ,精度为 0.5%。通过安装在火焰筒前壁面的压力探针测量进口空气压力 p_{in} 。进口温度和进口压力的测量位置不同主要是因为压力经过节流孔板后有压损,所以以火焰筒前压力为进口压力。通过安装在换热器上游的标准 ASME 孔板流量计测量空气进口流量,精度为 1%。燃烧室头部主预燃级分别独立供油,供油方式为挤压式,由型号为 DMF-1-3-A 和 DMF-1-1-A 的科氏流量计分别计量主预燃级油流量,精度均为 1%。分级比为预燃级燃油流量与总燃油流量之比。本实验空气进口温度为 530 K,进口压力为 0.439 MPa,进口流量为 0.5 kg/s,分级比为 30%,总油气比为 0.023。

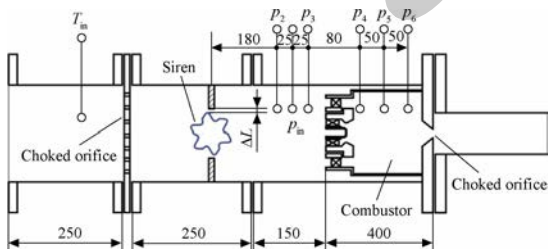


图 2 实验系统示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic of experimental system (unit:mm)

动态参数的采集主要为动态压力的采集。为了测量动态压力,在预燃级和主燃级的油路上布置了两个动态压力传感器,型号为 S112A22,编号为 p_0 、 p_1 (图 2 实验系统示意图中未标注)。在

换热器出口到燃烧室的管道上沿轴向布置了五个动态压力传感器,两个布置在燃烧室入口前,三个布置在燃烧室内,型号为 M112A22,编号分别为 $p_2 \sim p_6$ 。将压力传感器测量的压力信号与采集模块相连,使用 Labview 软件编写的采集程序实现对数据的显示和保存。采用 CH* 基团化学发光强度来表示火焰释热率,用带滤镜(430 ± 10) nm 和相增强器的高速摄像仪拍摄火焰释热的空间分布,图像分辨率为 768 像素 $\times$ 640 像素,每个工况拍摄时间为 0.65 s,共 3882 张。

旋笛主要用于研究热声系统在外激作用下的响应特性,其是产生流量脉动的装置,其核心部分是具有一定形状的转子和挡板。转子和挡板的匹配可以使机匣流通面积按照正弦规律变化,在流量一定的情况下也可使得流速按照正弦规律变化,为热声系统提供速度扰动。通过调节旋笛与挡板间距改变机匣流通面积,从而改变速度扰动的幅值。通过调节电机转速改变转子转动频率,从而改变外激频率。

火焰筒进口流体的平均流速 u 为 7.6 m/s。通过火焰筒进口压力脉动数据 p_2 和 p_3 ,运用双传声器法可求得速度脉动 u' ,进而求得归一化速度扰动 $A = u'/u$,此即外激幅值 A 。实验外激频率范围为 78 ~ 716 Hz,激幅值范围为 0.026 ~ 0.629。外激频率 f_i 和外激 A 的关系如图 3 所示(实点为工况点)。

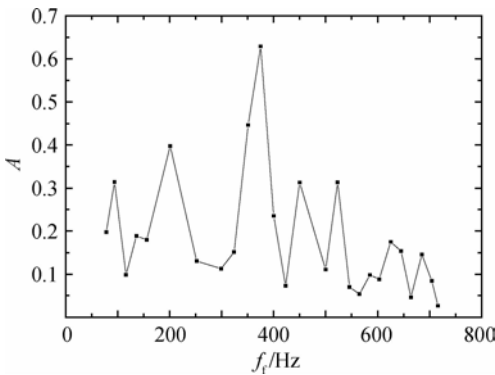


图 3 外激频率和外激幅值的关系

Fig. 3 Relationship between forcing frequency and forcing amplitude

2 实验结果

2.1 压力信号

图 4 分别为 $f_i = 0, 156, 375$ Hz 时 p_4 、 p_5 、 p_6 的频谱图。从中发现 p_4 、 p_5 的振荡幅值稍有区

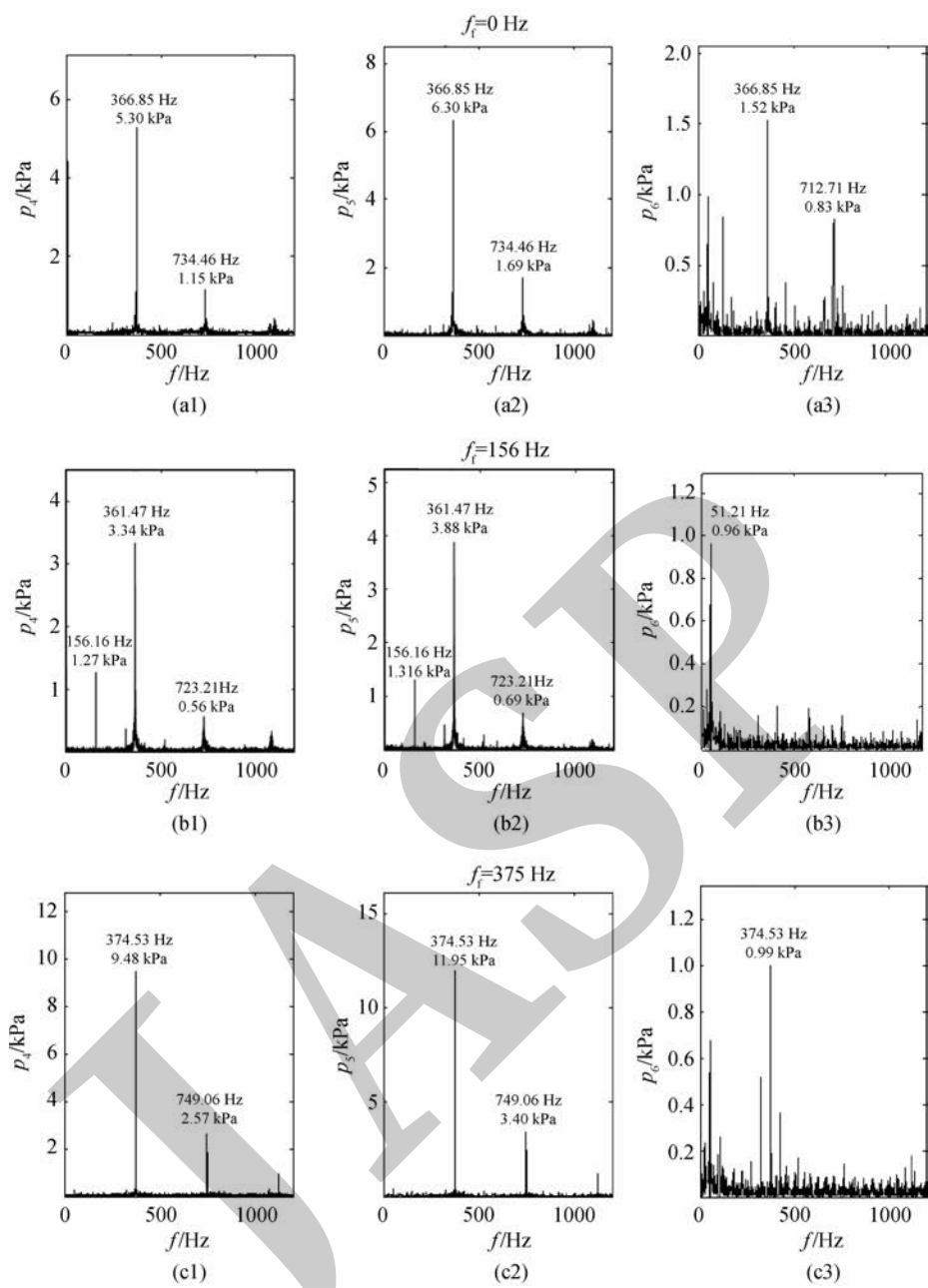


图 4 $f_i=0,156,375$ Hz 时 p_4 、 p_5 、 p_6 的频谱图
Fig. 4 Spectrum of p_4 , p_5 , p_6 when $f_i=0,156,375$ Hz

别,但是振荡频率几乎一致,而 p_6 的频谱图和 p_4 、 p_5 的有较大的不同,这主要是因为 p_6 传感器所在位置距离火焰较远,已不能代表火焰的振荡情况。由于本文主要分析振荡频率,而 p_4 、 p_5 的振荡频率几乎一致,所以选取距离火焰最近的 p_4 信号进行分析,以此来表征火焰的振荡情况。

2.2 锁相

为获得更清晰、信噪比更高的相空间状态轨迹,将压力脉动信号进行背景噪声滤波处理,图 5 为滤波后的不同状态下的 p_4 的波形图、频谱图与相空间图。 f_i 为外激频率, f_n 为自激火焰($A=$

0)的自激频率。综合看来,火焰展现了非常强烈的非线性动力学响应。

1) 当 $f_i/f_n=0$, $A=0$ 时,由图 5(a3)频谱图可知自激火焰在一些离散频率处振荡,其中自激频率 f_n 为 366.85 Hz,振荡幅值为 5.30 kPa,在其它频率处也有相似的但是振幅相对较弱的振荡,这表明自激振荡并不是正弦振荡,对应的波形图也证明了这一点,这主要是由火焰的非线性引起的。从图 5(a4)相空间图中可以看出被中心点排斥的状态轨迹,它总是局限在平衡轨道周围的一个小区域内,和平衡轨道基本没有较大的偏

差^[11]，这表明压力振荡已经发展成周期性的极限环振荡^[12]。如果是理想的无噪声信号，其状态轨迹将是完美的孤立的封闭曲线，此封闭曲线由于非线性作用不再是标准的圆曲线。

2) 当 $f_i/f_n=0.815$ ， $A=0.133$ 时，对应的波形图和自激火焰的波形图有较大的区别，主要表现为压力脉动一直在较大范围内跳跃，这种看似周期实际却是非周期的振荡为准周期振荡。如图 5(b3) 频谱图所示，火焰自激频率为 361.73 Hz，相对于自激火焰发生轻微的改变。火焰不仅在自激频率 361.73 Hz 和外激频率 299.01 Hz 处响应，还在其他频率处响应，这主要是由于自激频率和外激频率的非线性相互作用引起的。相对于自激火焰，其火焰状态轨迹密布在一个很宽的封闭带中，与平衡轨道的偏差较大，这意味着火焰通过一个 Neimark-Sacker 分叉已变为准周期振荡火焰，这种表现类似于锁相之前的受迫振荡器^[4]。

3) 当 $f_i/f_n=1.022$ ， $A=0.629$ 时，图 5(c1) 波形图呈周期性波动，这表明火焰振荡为周期性振荡。图 5(c3) 频谱图中自激频率消失，火焰主

要被外激频率 375 Hz 及其谐波控制。其状态轨迹接近封闭的曲线，密集在很窄的封闭带中，表明火焰已锁相并发展为周期性的极限环振荡。当自激时，如图 5(a3) 所示，自激振荡幅值为 5.30 kPa。当 $f_i/f_n=1.02$ ， $A=0.629$ 时，如图 5(c3) 所示，振荡幅值达到 9.48 kPa，远大于无自激火焰的振荡幅值，在此工况下外激频率非常接近自激频率，并且外激幅值特别强，将会导致自激频率靠向外激频率，自激振幅突然消失，最终导致自激模态突然消失，只剩下外激模态^[13]。

锁相火焰和自激火焰非常相似，除了锁相火焰的控制频率为外激频率。锁相振荡幅值远大于自激振荡幅值，这和文献[4]的实验现象不符。文献[4]的主要研究对象为全局不稳定的射流扩散火焰，当外激频率大于自激频率时，火焰锁相时的振荡幅值小于自激火焰振荡幅值，并得出锁相对热声系统不一定全然有害的结论。对比本文和文献[4]的实验现象，说明不同性质的火焰锁相时所表现出的特性并不相同，锁相是否有害对不同的热声系统来说也有不同的结论。

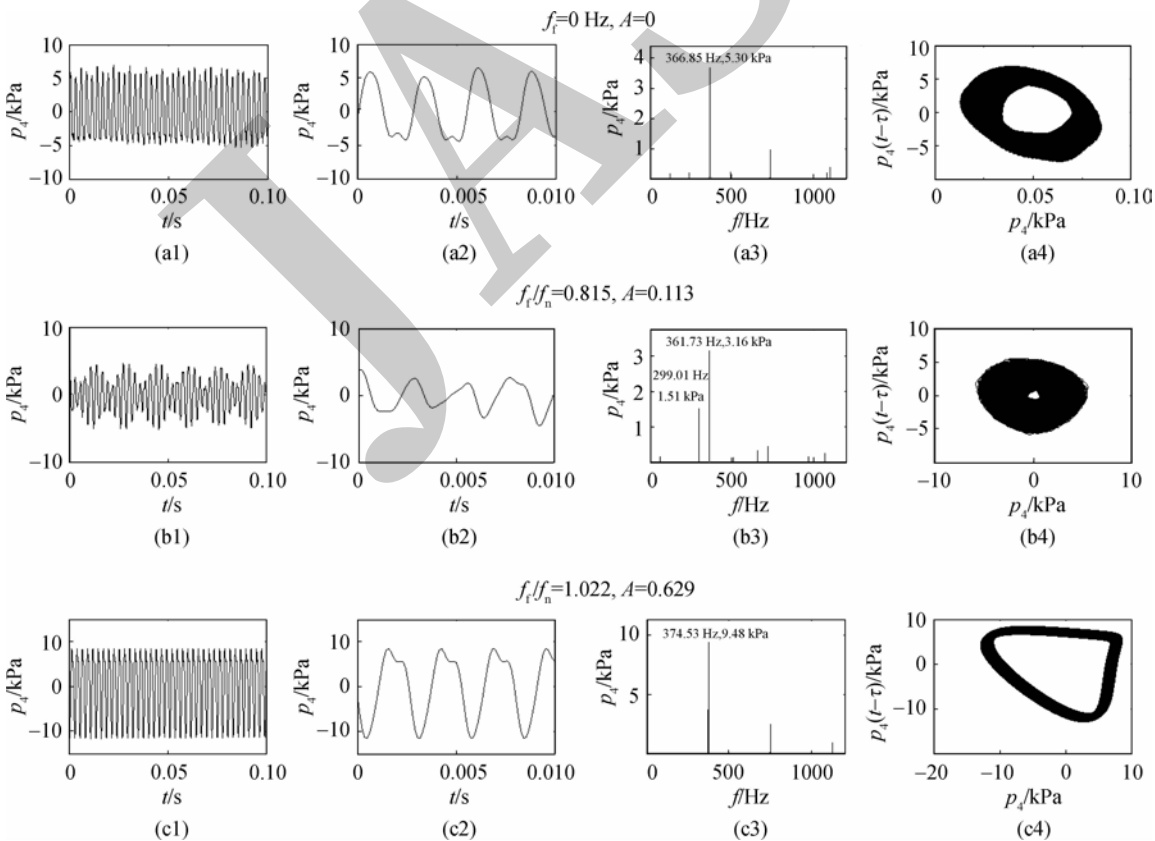


图 5 自激 $f_i=0$ Hz， $A=0$ ； $f_i/f_n=0.815$ ， $A=0.113$ ； $f_i/f_n=1.022$ ， $A=0.629$ 时

p_4 的波形图、细节波形图、频谱图和相空间图

Fig. 5 Waveform, spectrum and phase space of p_4 when self-excited $f_i=0$ Hz， $A=0$ ； $f_i/f_n=0.815$ ， $A=0.113$ ； $f_i/f_n=1.022$ ， $A=0.629$

2.3 谐频、结合频和分频

图 6(a)为外激频率 156 Hz 时 p_4 的频谱图。图中①~⑥为火焰的振荡频率,分别为外激频率 f_i 及其倍频 $2f_i$ 、自激频率 f_n 、外激频率和自激频率之和 f_i+f_n 以及自激倍频 $2f_n$ 和 $3f_n$ 。图 6(b)为外激频率 704 Hz 时 p_4 的频谱图。火焰的振荡频率除了出现和以上相似规律的频率外,还出现了外激分频 $1/3f_i$ 以及外激频率和自激频率的差频 f_i-f_n ,而 $1/3$ 分频是本系统的特性,在以往的自激热声系统中并没有出现过。倍频就是通常所谓的谐频^[14];和频、差频为结合频的一种;分频或者说分谐振,当外激频率大于自激频率较多时才出现,在外激频率小于自激频率时并没有出现。以上频率的出现说明系统除了基频外,还出现了谐频、结合频和分频。谐频的存在是线性系统和非线性系统的共性,但是结合频与分频的存在,则意味着系统一定是非线性的。在对非线性系统进行频谱分析时,必须考虑结合频和分频的存在,否则可能要出错误。

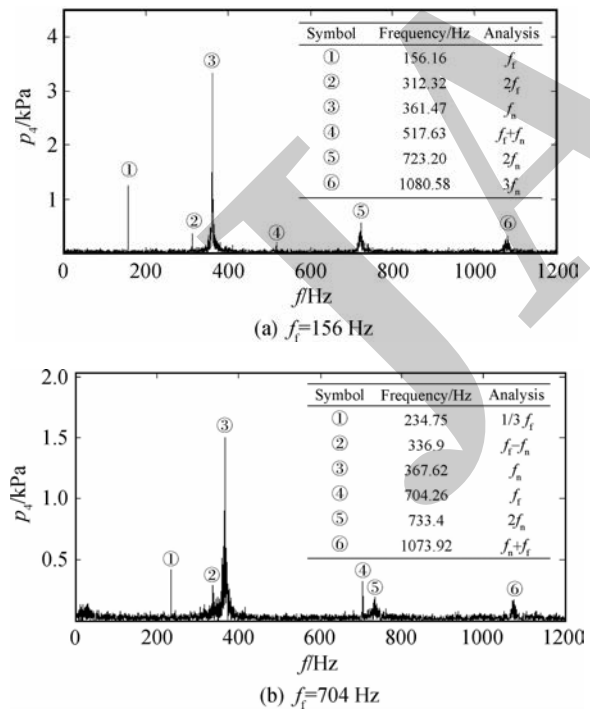


图 6 $f_i=156,704$ Hz 时 p_4 的频谱图
Fig. 6 Spectrum of p_4 when $f_i=156,704$ Hz

图 7 为不同工况下外激频率和振荡频率的关系图,图中只显示振荡幅值大于 0.16 kPa 并且符合所研究的非线性规律的振荡频率,其他的规律有待后续研究。图 7 中同时展示了谐频、结合频、分频与锁相这一系列非线性现象。横坐标为火焰

的振荡频率,纵坐标为外激频率,离散点为不同工况下的实验数据,直线标记为不同直线所代表的振荡频率。从此图中也可以清晰地看出外激作用下自激热声系统产生了谐振、结合振以及分谐振,竖直线 $x=f_n$ 代表振荡频率为自激频率,它贯穿所有工况下的自激频率值,除了图中虚线所在的区域(外激频率靠近自激频率),在 f_n 的倍频 $x=2f_n, x=3f_n$ 处也发现了同样的现象,说明外激频率在自激频率附近时火焰发生锁相。锁相时,系统的自激频率及其谐频已不存在,振荡频率分别为 $f_i, 2f_i, 3f_i$,说明此时外激控制火焰响应。

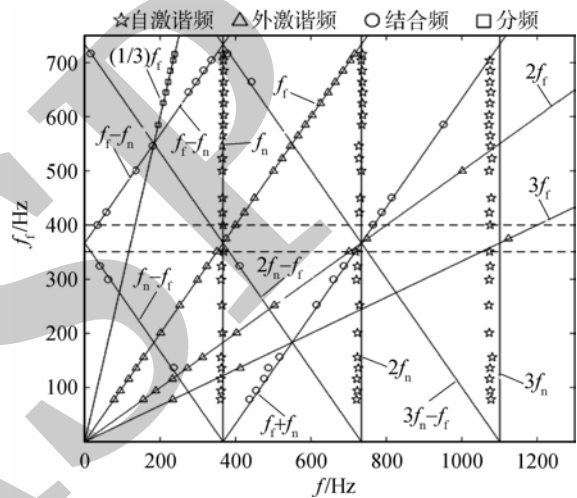


图 7 外激频率和振荡频率的关系
Fig. 7 Relationship between forcing frequency and oscillation frequency

2.4 火焰图像

鉴于以上发现了火焰锁相的现象,我们再次实验并用高速摄像机分别拍摄了火焰。图 8 为不同工况下释热率脉动的频谱图。从图 8(a)和图 8(c)可知自激火焰和锁相火焰的基频同为 372.49 Hz,与本文的压力脉动信号有一定的区别,这主要是因为不是同一次实验并且用化学发光表征火焰脉动本身存在一定的误差;锁相火焰的释热率脉动远高于自激火焰的释热率脉动,与压力脉动信号一致。图 8(b)的释热脉动频率和压力脉动一致。

图 9 为不同工况下火焰的瞬态图,由于高速摄像采集频率为 6 000 Hz,所以三种工况下一个周期内都大约有 16 张火焰图片,这里取了 8 张,从火焰发光强度最大的图像为起点,其中图 8(a)和图 8(c)每张相隔 0.34 ms,图 8(b)每张相隔大约 0.35 ms。虽然火焰瞬态图的随机性较大,并不

能准确的代表火焰扰动状态,但是也能清晰地呈现火焰随时间的动态变化。从图 9(a)~图 9(c)中都可以看出,火焰长度沿轴向不断增加,然后火焰前端部分脱离,燃烧直至熄灭,最后火焰根部重

新点燃燃烧。通过图 9(a)和图 9(c)的对比发现,锁相火焰释热率远低于自激火焰,这是因为锁相火焰振荡强烈,火焰极度不稳定,甚至长时间处在几乎振熄的状态。

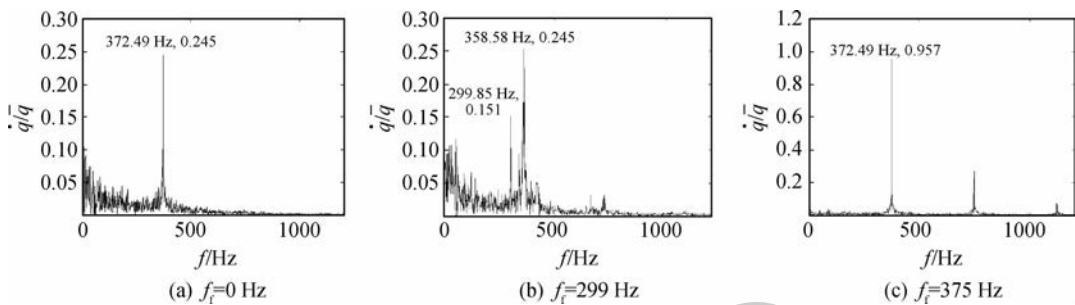


图 8 $f_i=0,299,375$ Hz 时的释热脉动频谱图
Fig. 8 Spectrum of flame heat release rate when $f_i=0,299,375$ Hz

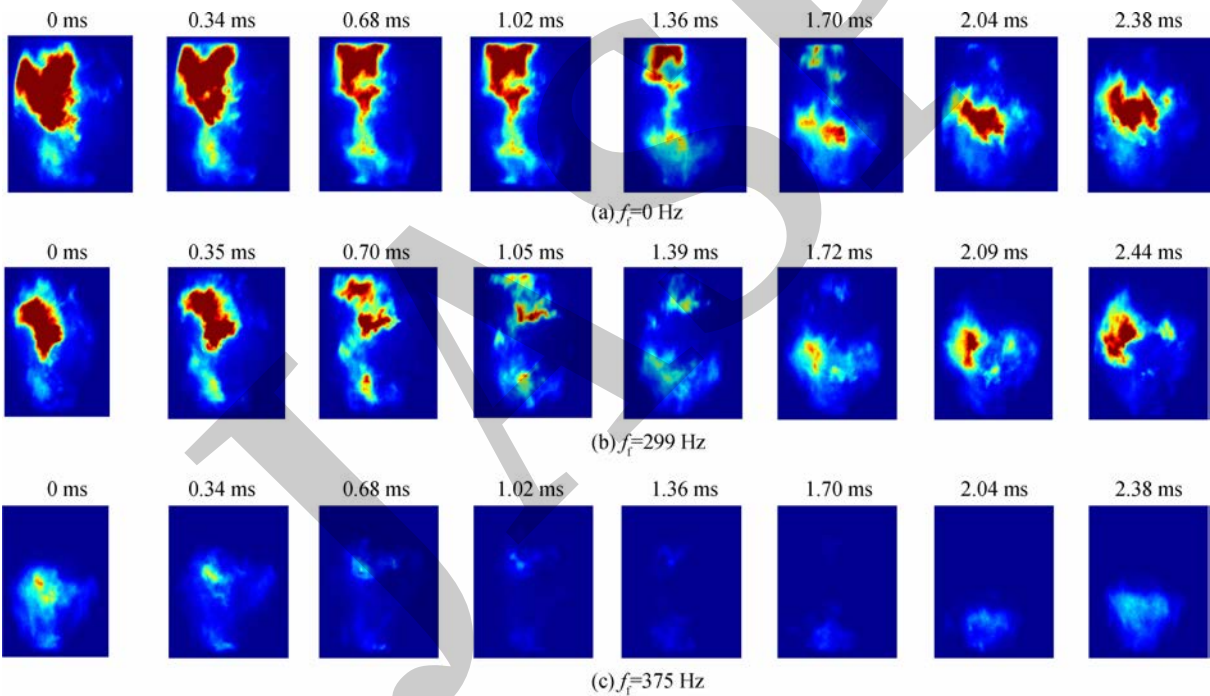


图 9 $f_i=0,299,375$ Hz 时火焰的瞬态图
Fig. 9 Transient diagram of flame when $f_i=0,299,375$ Hz

3 理论建模

一种常见的非线性系统是由于非线性阻尼作用引起的,其中最简单而又具有典型意义的就是范德波尔方程^[14-16],它是 20 世纪 20 年代由范德波尔在研究电子管振荡和模拟人的心脏搏动的基础上提出的。范德波尔方程的解代表着一种典型的非正弦形式的振荡,称为极限环振荡。经研究发现,范德波尔振荡器受迫时的非线性动力学响应与实验中出现的非线性响应非常相像,因此选

择受迫范德波尔振荡器作为此受迫自激热声系统的模型。在本实验中,外激速度扰动是正弦的,因此受迫范德波尔方程为以下的形式:

$$\ddot{x} - \epsilon(1 - x^2)\dot{x} + \omega_n x = A \sin(\omega_f t) \quad (1)$$

式中固有角频率 ω_n 取为 $1^{[4,13]}$ 。 ϵ 为非线性项系数,表示非线性阻尼,在 0.1~2.0 区间内模型响应的趋势和实验结果都是比较接近的,本文取 0.1 进行分析阐述。由于非线性作用,实际的自激振荡角频率 ω 微小于固有频率 ω_n ,然而对 $\epsilon=0.1$ (弱非线性)来说,这种差异可以忽略,自激振

荡角频率和固有角频率非常接近^[4]。 A 、 ω_f 分别为外激振幅和外激角频率。运用 Matlab 编程,组合的 4/5 阶龙格-库塔^[17]算法求解此方程。

4 理论建模结果

4.1 锁相

不同外激作用下范德波尔振荡器的波形图、频谱图和相空间图如图 10 所示。 ω_f/ω_n 以及 A 与实验工况保持一致,在此情况下受迫范德波尔振荡器也展现了非常强烈的非线性动力学响应。

1) 如图 10(a3)所示,当无外激作用时($A=0$),范德波尔振荡器自激振荡角频率为 0.999,和给定的固有角频率 $\omega_n=1$ 非常接近。与实验结果不同的是,在频谱图中并没有发现偶数倍频,只有奇数倍频,并且奇数倍频的振荡幅值特别微弱,比如其 3 倍频的振荡幅值才 0.02,在频谱图的坐标系下都没有体现出来。由于奇数倍频振荡幅值非常微弱,导致波形图看起来非常接近正弦曲线,主

要是因为范德波尔方程的非线性项系数较小,导致非线性现象不明显。其状态迹为非常标准的极限环,揭示无迫的范德波尔振荡为周期振荡。

2) 如图 10(b3)所示,当 $\omega_f/\omega_n=0.815$, $A=0.113$ 时,受迫范德波尔振荡器不仅在 ω_n 、 ω_f 处响应,还在其它离散角频率处响应。但在其他离散角频率处的振荡幅值很微弱,在当下坐标系的频谱图中表现不明显。从波形图和状态轨迹都可以看出当下范德波尔振荡为准周期振荡,和锁相前的火焰非常相似。

3) 如图 10(c3)所示,当 $\omega_f/\omega_n=1.022$, $A=0.629$ 时,范德波尔振荡器锁相于 ω_f 。波形图、频谱图以及状态轨迹都表明范德波尔振荡器已由准周期振荡又转变为周期的极限环振荡。之所以发生锁相是因为随着 ω_f 和 A 的改变,范德波尔振荡器的稳定平衡点发生了改变^[4,18]。锁相时的振荡幅值为 3.06,强于无迫范德波尔振荡幅值,和实验现象一致。

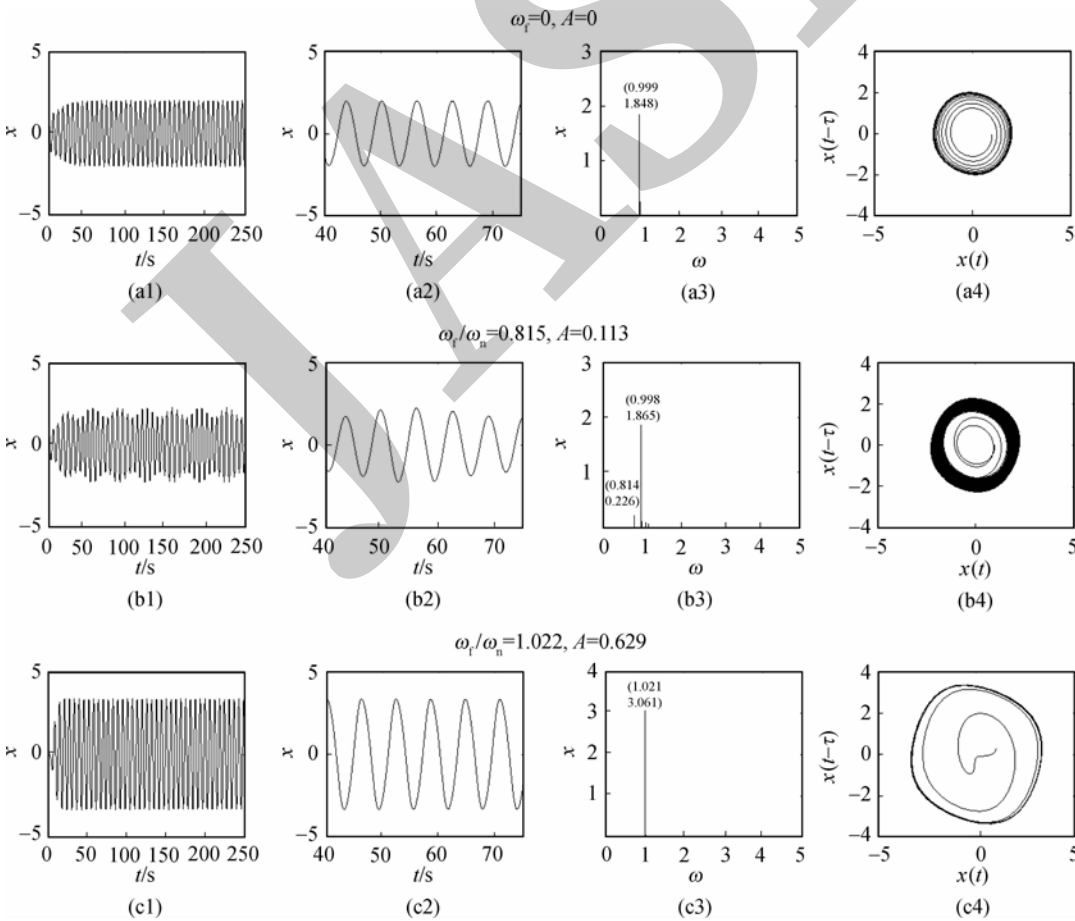


图 10 自激 $\omega_f=0$, $A=0$; $\omega_f/\omega_n=0.815$, $A=0.113$; $\omega_f/\omega_n=1.022$, $A=0.629$ 时
受迫范德波尔振荡器的波形图、细节波形图、频谱图和相空间图

Fig. 10 Waveform, spectrum and phase space of forced van Der Pol oscillator when self-excited $\omega_f=0$, $A=0$;
 $\omega_f/\omega_n=0.815$, $A=0.113$; $\omega_f/\omega_n=1.022$, $A=0.629$

根据以上分析,受迫范德波尔振荡器所体现的趋势和受迫火焰接近,以此证明了此模型的适用性。

4.2 谐频、结合频

在建模的结果中将不再单独分析谐频和结合频,而是以图 11 的形式同时展现谐频、结合频以及锁相,图中锁相所在区域为虚线所在的区域。其含义和图 7 的分析类似,在此就不再多加阐述。通过图 11 和图 7 的对比,我们发现受迫范德波尔振荡器的响应角频率中只出现了奇数倍频,部分结合频,没有出现分频,说明以范德波尔振荡器预测本文的实验现象依然有缺陷,有待改进。

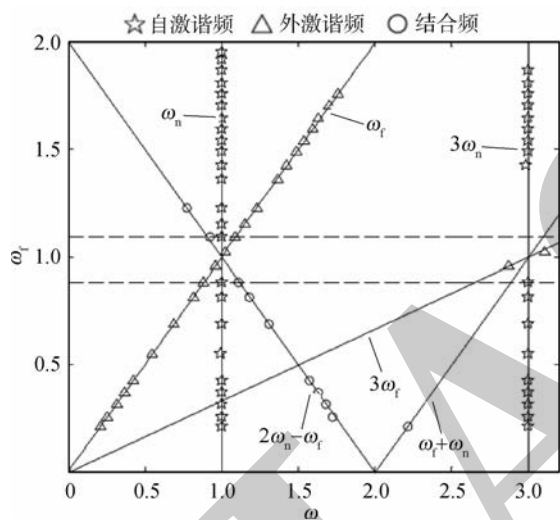


图 11 外激角频率和振荡角频率的关系

Fig. 11 Relationship between forcing angular frequency and oscillation angular frequency

在受迫的全局动力不稳定的射流火焰^[4]以及受迫范德波尔振荡器中都发现了和本文类似的一系列非线性动力学响应,这表明此非线性响应并不局限于某个系统,而是受迫非线性系统的共性。

5 结 论

本文对外激作用下同心分层旋流部分预混预蒸发火焰的非线性进行研究,得到了以下结论:

1) 当外激幅值足够大并且外激频率靠近自激频率时,火焰发生锁相且振荡幅值高于自激时的振荡幅值,此时火焰做周期性的极限环振荡。

2) 火焰未锁相时,受迫火焰的振荡频率除了自激和外激频率外,还出现了谐频、结合频和分频,并且火焰做准周期振荡。

受迫范德波尔振荡器模型能够预测准周期、

锁相、奇数谐频和部分结合频,但是还不能够预测偶数谐频、部分结合频以及分频,我们下一步的工作就是修正传统的范德波尔方程使其能够预测这些非线性响应。

参考文献:

- [1] LIEUWEN T C, YANG V. Combustion instability in gas turbine engines: operational, experience, fundamental mechanisms and modeling[M]. Reston, VA: AIAA, 2005.
- [2] KIM D, PARK S W. Forced and self-excited oscillations in a natural gas fired lean premixed combustor[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(11): 1670-1677.
- [3] KIM K T, HOCHGREB S. The nonlinear heat release response of stratified lean-premixed flames to acoustic velocity oscillations[J]. Combustion and Flame, 2011, 158(12): 2482-2499.
- [4] LI L K B, JUNIPER M P. Lock-in and quasiperiodicity in hydrodynamically self-excited flames: experiments and modelling[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(3): 947-954.
- [5] WENG Fanglong, ZHU Min, JING Liyue. Beat: a nonlinear thermoacoustic instability in Rijke burners[J]. International Journal of Spray and Combustion Dynamics, 2014, 6(3): 247-266.
- [6] 杨甫江, 郭志辉, 曾宇晖. 贫燃预混旋流火焰热声特性研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2854-2861.
YANG Pujiang, GUO Zhihui, ZENG Yuhui. Study on thermoacoustic characteristic of lean premixed swirling flames[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2854-2861. (in Chinese)
- [7] DHANUKA S K, TEMME J E. 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] SÁNCHEZ A L, URZAY J, LIÑÁN A. The role of separation of scales in the description of spray combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 1549-1577.
- [9] 丁志磊, 林宇震, 秦皓, 等. Siren(旋笛式)激励系统的气动声学特性[J]. 航空动力学报, 2015, 30(7): 1599-1604.
DING Zhilei, LIN Yuzhen, QIN Hao, et al. Aeroacoustic characteristic of siren incentive system[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7): 1599-1604. (in Chinese)
- [10] 邹鹏飞. 外激条件下同心旋流分层火焰的释热响应[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015.
ZOU Pengfei. The forced response of swirl stratified flame[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [11] FU Xiao, GUO Zhihui, YANG Pujiang. Combustion instability mode transition in a pilot bluff-body stabilized combustor[J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 32(1): 1-12.

[12]

LIEUWEN T C. Experimental investigation of limit-cycle oscillations in an unstable gas turbine combustor[J]. Journal of Propulsion and Power,2002,18(1):61-67.

[13]

LI L K B,JUNIPER M P. Phase trapping and slipping in a forced hydrodynamically self-excited jet[J]. Journal of Fluid Mechanics,2013,735(6):957-966.

[14]

刘秉正,彭建华. 非线性动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2013.

[15]

MARK J V D. Frequency demultiplication[J]. Nature,1927,120(3019):363-364.

[16]

LI L K B. Forcing of globally unstable jets and flames[D]. Cambridge:University of Cambridge,2011.

[17]

WRIGHT W M. Explicit general linear methods with inherent runge-kutta stability[J]. Numerical Algorithms,2002,31(1):381-399.

[18]

JORDAN D W,SMITH P. Nonlinear ordinary differential equations:an introduction for scientists and engineers[J]. Politics,2007,72(460):351-357.

(编辑:叶 青)