

燃烧诱发热声不稳定控制的研究进展

李国能, 林江, 李凯
(浙江科技学院 轻工学院, 杭州 310023)

摘要: 针对贫燃预混低 NO_x 燃气轮机的燃烧诱发热声不稳定问题, 说明了燃烧热声不稳定的起源、特点和危害, 详细阐述了当前燃烧热声不稳定控制研究的现状, 分析了热声不稳定的被动控制和主动控制的概念、应用和各自特点。被动控制和主动控制的核心思想是一致的, 通过重新设计或外加干扰解耦火焰热释放脉动与声场的相互作用。

关键词: 热声不稳定; 被动控制; 主动控制

中图分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2010)04-0266-07

Progress of controlling studies on combustion induced thermoacoustic instability

LI Guo-neng, LIN Jiang, LI Kai

(School of Light Industry, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The origin, characteristics and its hazards of thermoacoustic instability induced by combustion inside the lean premixed low NO_x gas turbines are illustrated. The state of art about the controlling studies on thermoacoustic instability is presented, and discussions are made to address the concepts, applications and features of the passive control and the active control. The underling sole spirit of these controlling methods is consistent with each other, i. e. decoupling the oscillating heat release and the sound field through redesign of the combustor or through introducing outside perturbations.

Key words: thermoacoustic instability; passive control; active control

能源与环境是制约人类发展的一个重要问题。能源被视为世界工业化进程的“命脉”和“血液”, 但是开采和利用能源不可避免地产生污染, 从而急剧地威胁到人类的生存和发展。能源的清洁利用已成为当

收稿日期: 2010-01-13

基金项目: 浙江省高校优秀青年教师资助计划(浙教办高科(2009)164号); 浙江省高等学校创新团队资助项目(T200918)

作者简介: 李国能(1981—), 男, 广东从化人, 讲师, 博士, 主要从事燃烧动态诊断研究。

今科技领域的主要研究目标之一。燃气轮机由于其结构紧凑、操作简单、工作可靠和功率输出范围大等优点,被广泛应用在发电、航空、舰船等机械驱动领域。由于污染物排放的标准越来越高,燃气轮机制造商投入大量的资金用于研发低 NO_x 燃气轮机。近年来,贫燃预混低 NO_x 燃气轮机得到大力发展,其工作气氛为贫燃预混条件。贫燃预混燃烧技术能有效地降低燃烧温度水平,从而实现非常低的污染物排放。但是贫燃预混燃烧非常容易导致称为热声不稳定(thermoacoustic instability)的问题^[1],即燃烧过程中火焰的热释放脉动与燃烧室固有声学脉动之间耦合造成的一种燃烧共振现象,其产生的条件为著名的瑞利准则(Rayleigh criterion)^[2-3]:当燃烧热释放脉动与燃烧室声场的相位一致时,燃烧室内的压力振荡被不断加强,最后形成持续的低频大振幅压力振荡,共振频率在 $10\sim 1\,000\text{ Hz}$ 之间,振幅在 $130\sim 180\text{ dB}$ 之间。

热声不稳定将对燃气轮机的工作带来破坏,导致燃气轮机工作点偏离设计值,出现局部熄火或事故熄火,增加污染物排放等。燃气轮机长期工作在热声不稳定条件下,将产生疲劳损伤,降低设备的使用寿命。因此,燃烧热声不稳定的控制技术是开发低 NO_x 燃气轮机的关键技术,近年来受到广泛关注。笔者曾详细地研究了燃烧热声不稳定的起振机理^[4-9],并提出了一种新颖的热声不稳定控制策略^[8],详细可参考文献^[9]。总体而言,燃烧热声不稳定的控制主要包括被动控制和主动控制 2 种途径,2 种控制策略各有利弊。

1 燃烧热声不稳定的被动控制的研究现状

燃烧热声不稳定的被动控制是指通过重新设计燃烧器的结构和配风方式以降低燃烧过程对声扰动的敏感性,或通过增加消声部件来吸收声能,避免热声不稳定的激发。重新设计燃烧器结构是为了改变涡系脱落频率和拟序涡系对火焰面的影响;重新设计配风方式是为了改变燃料和空气的流动组织及火焰稳燃体的布置,以避免燃烧热释放脉动与声扰动的相位一致;增加消声部件来吸收声能,是指利用 Helmholtz 共振管、四分之一波长管、穿孔板和衬垫等部件来构成系统的声壑,从而避免不稳定压力波的增长。燃烧热声不稳定的被动控制对于特定的燃烧器而言,从设计上根本解决了燃烧热声不稳定现象对设备工作的影响。但是被动控制存在 2 个缺点:一是有效范围小,只对特定的设备运行状态起作用,在低频区域往往失去效果,而低频振荡的破坏力是最为严重的;二是被动控制技术的开发必须针对某一具体的燃烧器而言,对不同类型的燃烧器必须进行重新开发,从而造成被动控制技术开发周期长,开发费用昂贵等系列问题。

国外存在大量的燃烧热声不稳定被动控制的研究论文,早期的研究工作可见 Schadow 的综述论文^[10]。Schadow 归纳了大量的研究文献,指出拟序涡导致了火焰面严重褶皱,从而造成化学当量比的剧烈脉动,而化学当量比的脉动使得工作在贫燃条件下的燃烧器产生短暂的局部熄火,进而带来热释放率的周期性脉动,成为燃烧热声不稳定的源头。因此,在控制燃烧热声不稳定时,需要着眼于燃烧火焰面的化学当量比的脉动。

近年来,许多学者进行了大量的研究工作。Steele^[11]采取燃料从侧边喷入改为同心圆环喷口喷入的方法,研究了 Solar 公司 9.4 MW 和 10.5 MW 工业燃气轮机的燃料时间迟延常数与热声不稳定的关系。Schlüter^[12]采用燃料风喷口引入周界风的方法,研究了突扩燃烧器的周界风对拟序涡系和热释放率的影响。Jong^[13-14]引入了中心高动量空气射流,研究了 150 kW 旋流燃烧器采用高动量中心射流控制燃烧热声不稳定的机理,认为低阶热声不稳定(13 Hz)改变了火焰动态特性,并影响到了热释放-压力的相位关系。Paschereit^[15]在燃烧器内部加装微型旋涡发生器,研究了这一方案在 500 kW 旋流燃烧器上的控制效果,发现主导热声不稳定压力脉动降低了 28 dB ,低阶热声不稳定降低了 50% 。Paschereit^[16]还在旋流燃烧器上加装了中心标枪,研究了这一方案在 500 kW 旋流燃烧器上的控制效果,发现其主导热声不稳定的压力脉动降低了 12 dB 。Yi^[17]在旋流风加装了强迫气流射流,并在燃料风中心加装了启动火舌,研究了这两种方案在 80 kW 旋流燃烧器上的控制效果,发现主导热声不稳定的压力脉动降低了 20 dB 。Noiray^[18]改变了燃烧腔长度和喷口形状,研究了这种方案在多孔板平面火焰上的控制作用,发现燃烧腔长度和喷口形状的改变能有效地控制燃烧激发的热声不稳定。Barbosa^[19]引入了旋流的中心氢气射流,研究了这一

方案在旋流燃烧器上的热声不稳定控制效果,发现旋流燃烧器的压力脉动降低了 100 Pa。

综上所述,近年来关于燃烧热声不稳定的被动控制技术的研究可归纳为:针对旋流中心回流区的拟序涡系对燃烧火焰面的影响,通过引入高动量三次风或燃料二次风等不同的方式干预中心回流区的涡系结构,破坏拟序涡系对火焰面的影响,从而干预热释放脉动与声学脉动的相位关系,抑制热声不稳定的发生。图 1 给出了某一旋流燃烧器在引入被动控制技术前后的燃烧火焰热释放率脉动情况^[13]。笔者曾进行了系列旋流燃烧器的热声不稳定控制的试验研究,图 2 是笔者提出的横向射流控制策略在一个旋流燃烧器上应用的控制效果^[8],横向射流能够大幅度降低旋流燃烧器的热声不稳定强度,所占用的空气流率比例小。当横向射流的空气流率比例为 6% 时,热声不稳定的有效压力振幅从 1 712 Pa 降到 185 Pa,降低了 89.2%^[8]。横向射流控制燃烧诱发热声不稳定时,其控制机理与横向射流中丰富的湍流涡系有重要的关系,横向射流的拟序涡结构逆向旋转涡对的脉动显著地影响了火焰的热释放脉动,从而部分控制了热声不稳定。更深入的横向射流控制热声不稳定的机理,需要借助更先进的测试手段以检测整个控制过程的参量变化来确定,如当地瑞利数,组分混合过程,涡系发展及 OH^+ 基团等。

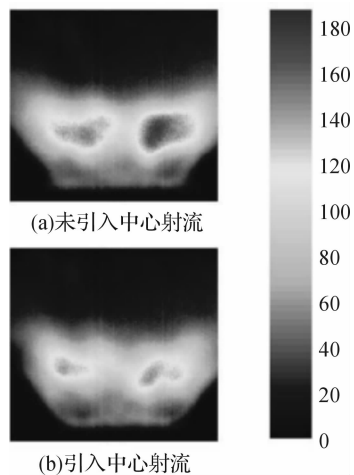


图 1 高动量中心射流对热释放的影响

Fig. 1 Effect of a high momentum central jet on the heat release rate

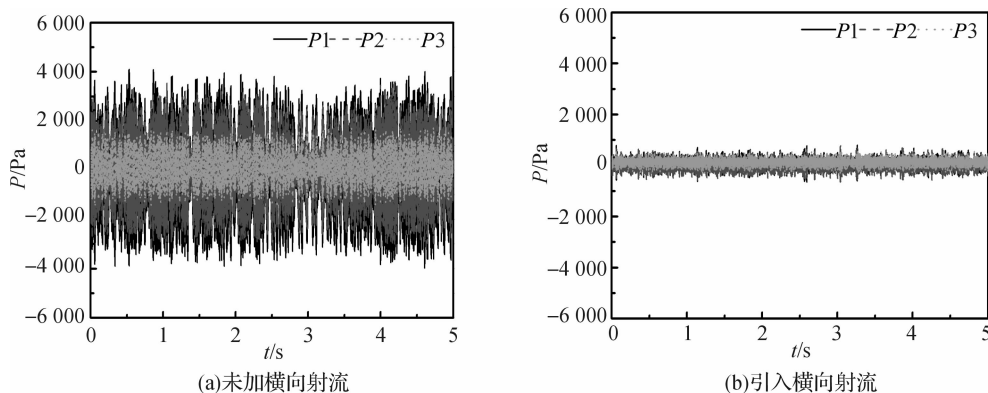


图 2 横向射流控制燃烧热声不稳定的效果

Fig. 2 Effect of a transverse jet on the thermoacoustic instability

2 燃烧热声不稳定的主动控制

2.1 燃烧热声不稳定的主动控制的分类

燃烧热声不稳定的主动控制技术提供了另外一种破坏热释放脉动与声波脉动的耦合过程的方法。这种控制技术通过执行器控制燃烧系统的某些参数,以破坏热释放脉动与声学扰动的耦合。燃烧热声不稳定的主动控制由于其结合了先进的控制理论,因此工作灵活,适用面广,控制效果好,近年来得到广泛的研究。另外,由于燃烧热声不稳定的主动控制涉及燃烧学、流体力学、声学、控制学等学科,其交叉性强,使得热声不稳定的主动控制理论复杂,尚有许多值得研究的地方。

根据 Mcmanus^[20]对燃烧热声不稳定主动控制的分类准则,燃烧热声不稳定的主动控制可分为 4 类:开环固定参数主动控制(open-loop fixed-parameter active control)、闭环固定参数主动控制(closed-loop fixed-parameter active control)、开环自适应参数主动控制(open-loop adaptive active control)和闭环自适应参数主动控制(closed-loop adaptive active control)。其分类准则为:1) 当控制器不需要使用随时间变

化的燃烧系统反馈信号时,控制系统为开环,否则为闭环;2) 当控制器的控制参数(相应特征或传递函数)不需要随时间改变的时候,控制系统为固定参数,否则为自适应参数。

另外,根据控制器的时间响应特性,还可把控制系统分为快速反应主动控制(fast response active control)和配平调节主动控制(trim adjustment active control)。

一般地,主动控制系统需要涉及控制器、信号放大器、执行器,对于闭环主动控制系统还需要涉及传感器、滤波器、数据采集卡、计算机和数模转换器等。从系统的复杂性来看,最复杂的主动控制系统是闭环自适应参数主动控制,最简单的是开环固定参数主动控制系统,其他则位于两者之间。图3给出了主动控制系统的分类及其工作原理图^[20]。

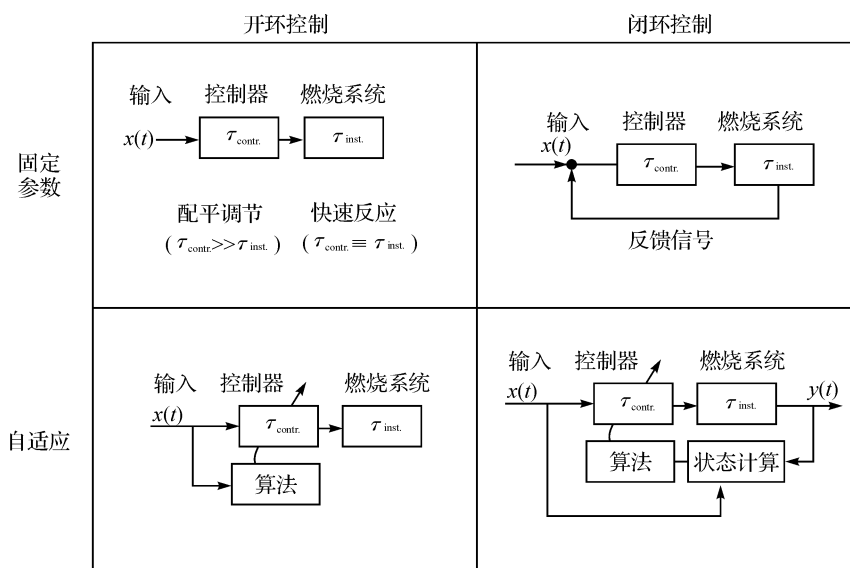


图3 主动控制系统的原理

Fig. 3 Principle of active control system

2.2 燃烧热声不稳定的主动控制的研究现状

国外从事燃烧热声不稳定主动控制的研究文献见综述论文^[20-21]。根据笔者的文献检索,国内研究燃烧热声不稳定主动控制的文献不多,仅见韩飞^[22]采用电加热丝作为热源研究热声不稳定的主动控制,除此之外尚未找到相近的研究文献。

近年来,国内外开始出现研究燃烧热声不稳定主动控制的文献,研究尚属于起步阶段,将主动控制方法应用于工业燃气轮机上的研究文献不多见,这些研究主要是基于闭环自适应参数主动控制的研究工作,另外还有一些新颖的开环主动控制研究工作。Annaswamy, Fleifil, Hathout 和 Rumsey 小组^[23-28]采用二次线性高斯(LQG)、带反馈二次线性高斯(LQG-LTR)、 H_{∞} 和移相控制方法研究了这些方案在 Rijke 型燃烧器热声不稳定上的控制作用,基于线性理论发展了适用于层流平面火焰的闭环自适应参数的主动控制,比较了不同控制策略与传统移相控制的区别。Paschereit, Schuermans 小组^[29-31]采用移相控制、开环燃料控制、 H_{∞} 控制和状态-空间识别控制等方案,研究了一台 500 kW 旋流燃烧器的轴向不稳定模式和螺旋不稳定模式的热声不稳定控制机理,发展了旋流燃烧器的闭环主动控制和开环燃料调节控制理论,并对这些方法进行了比较和分析讨论。Campos-Delgado^[32-34]采用 LQG, LQG-LTR, H_{∞} 和移相等控制策略,研究了这些方案在一台 125 kW 旋流燃烧器上应用,首次成功地实现了 H_{∞} 控制策略在大功率旋流燃烧器的热声不稳定控制。Auer^[35]采用二次燃料射流开环主动控制,研究了一台 380 kW 旋流燃烧器的二次燃料射流的安装位置对燃料的混合效果和时间迟延常数的影响。Sattinger^[36]采用中心燃料风的状态检测闭环自适应主动控制研究了一台 60 kW 旋流燃烧器的热声不稳定的控制效果,其热声不稳定的压力脉动可降低 60%。Cohen^[37]采用启动火舌的开环固定参数主动控制策略,研究了该策略在一台 4 MW 级工业燃气

轮机上的应用,其热声不稳定的压力脉动可降低 60%,氮氧化物降低了 27%,一氧化碳降低了 54%。Kablur^[38]采用理论研究方法,研究了闭环自适应参数主动控制的机理,发展了一种基于非线性理论的并适用于旋流燃烧器的自适应控制策略。Lubarsky^[39]采用移相控制和开环固定参数燃料调节主动控制 2 种方案,研究了天然气流率为 12 g/s 的旋流燃烧器的热声不稳定控制特性,发现移相控制能降低压力脉动 20%,而开环主动控制能降低 50%。Fichera^[40]采用神经网络寻优闭环自适应主动控制方法,研究了一台 250 kW 旋流燃烧器的热声不稳定控制效果,发现该方案基本上能完全控制热声不稳定,但是试验样本数据过少,仍需进一步研究。Morgans^[41]采用 Nyquist 闭环自适应主动控制策略分别研究了该策略在 Rijke 型燃烧器和旋流燃烧器上的应用,发现 Rijke 型燃烧器能降低压力脉动 80 dB,旋流燃烧器能降低 40 dB。Tachibana^[42]采用混合 H^2/H_∞ 控制策略,研究了不同二次燃料风的喷口直径、扩角和不同伸出长度对热声不稳定控制效果的影响。

综上所述,燃烧热声不稳定主动控制的研究现状可归纳为:针对不同功率的试验室规模的 Rijke 型燃烧器或旋流燃烧器,以及一些兆瓦级的工业燃气轮机的燃烧热声不稳定,结合较为成熟的控制算法,如 LQG 算法、LQG-LTR 算法、 H_∞ 算法、Nyquist 算法及混合 H^2/H_∞ 算法等进行闭环自适应参数主动控制,并将这些控制效果与传统的移相控制进行比较。主动控制方法算法复杂,维护困难,只对特定的燃烧器起作用,仍缺乏通用性。另外,还出现了一些新颖的主动控制方法,这种方法结合了被动控制和主动控制的优点,一方面引入了被动控制的理念,如加装燃料二次射流、三次风、启动火舌和氢气二次燃料射流等,这些被动控制策略的加入本身就可以部分控制燃烧热声不稳定;另一方面结合主动控制策略,采用开环固定参数控制或闭环自适应参数控制方法,从而进一步降低燃烧热声不稳定的压力脉动。图 4 给出了 Morgans^[41]采用 Nyquist 闭环自适应主动控制的研究情况,由此可见,实现稳定控制后,执行器需要不断按要求进行动作,对执行器的工作性能有较高的要求。

燃烧热声不稳定的控制是开发新一代低 NO_x 固定式燃气轮机和航空燃气轮机所必须掌握的技术。在一个成功设计付诸生产之前,必须经过热声不稳定的计算和试验,以及安装必要的控制设备。被动控制能对某一型号的设备起到根本上的控制;主动控制使用范围广,但需要大量的维护工作及增加系统的复杂性。对于航空燃气轮机,当主动控制失效时将带来严重事故,所以更适合采用被动控制策略;对于固定式燃气轮机,可以采用被动控制和主动控制之一或者两者的结合。值得注意的是,不管是被动控制还是主动控制,中国的研究工作都相当少^[22],所以需要投入更多的人力和物力进行基础研究工作;特别是随着人类对环境要求的提高,以及整体煤气化联合循环在中国的发展,中国工业中将大量使用到燃气轮机,如果进行自主开发工作,则必须攻克热声不稳定控制的技术难题。

3 结 语

通过阐述燃烧诱发的热声不稳定控制研究的现状,分析了热声不稳定的被动控制和主动控制的概念、应用和各自特点,可为将来的研究工作提供参考。

1) 被动控制主要是通过引入高动量三次风或燃料二次风等不同的方式,干预中心回流区的涡系结构,破坏拟序涡系对火焰面的影响,从而干预热释放脉动与声学脉动的相位关系,抑制热声不稳定的发生。

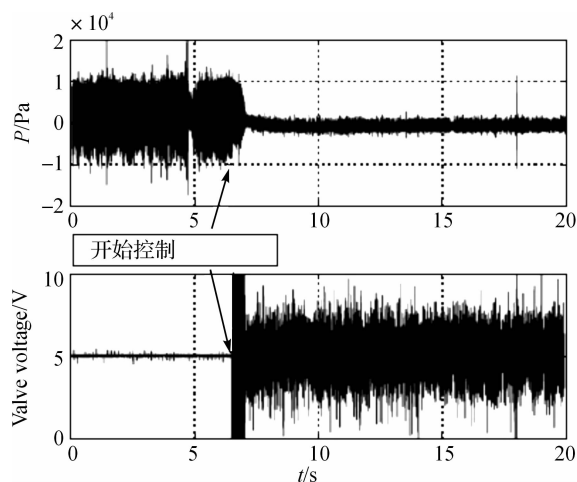


图 4 Nyquist 闭环自适应主动控制在旋流燃烧器上的应用

Fig. 4 Application of Nyquist closed-loop adaptive active control on a swirl combustor

主动控制则是引入一些成熟的控制算法,如 LQG 算法、LQG-LTR 算法、 H_∞ 算法、Nyquist 算法及混合 H^2/H_∞ 算法等进行闭环自适应参数主动控制,不断调节控制信号来动态干预热声不稳定的激发。

2) 被动控制和主动控制的核心思想是一致的,通过重新设计或外加干扰解耦火焰热释放脉动与声场的相互作用。

3) 被动控制强调在设计开发时即考虑燃烧热声不稳定的抑制问题,但是由于实际使用时情况复杂,往往激发起其他模式的热声不稳定。目前的主动控制方法有效可行,适用面广,但是算法复杂,维护困难。因此,将来的工作应该强调主动控制的研究开发,同时降低主动控制的复杂程度,从而获得简单可靠和广泛适用的燃烧热声不稳定控制方法。

参考文献:

- [1] DOWLING A P. The challenges of lean premixed combustion[C]//Proceedings of the International Gas Turbine Congress. Tokyo: GTSJ, 2003.
- [2] RAYLEIGH J W S. The theory of sound[M]. New York: Dover Press, 1945.
- [3] RAYLEIGH L. The explanation of certain acoustical phenomena[J]. Nature, 1878, 18: 319-321.
- [4] LI G N, ZHOU H, CEN K F. Characteristics of acoustic behavior, combustion completeness and emissions in a Rijke-type combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(17-18): 2144-2149.
- [5] LI G N, ZHOU H, CEN K F. Emission characteristics and combustion instabilities in an oxy-fuel swirl-stabilized combustor[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2008, 9(11): 1582-1589.
- [6] 李国能, 周昊, 尤鸿燕, 等. 黎开管自激热声不稳定的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 50-54.
- [7] 李国能, 周昊, 尤鸿燕, 等. 变功率下 Rijke 预混燃烧器的热声不稳定[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(4): 361-366.
- [8] 周昊, 李国能, 岑可法. 基于横向射流的旋流燃烧器热声不稳定控制[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(3): 1-6.
- [9] 李国能. 燃烧诱发热声不稳定特性及控制研究[D]. 杭州: 浙江大学机械与能源工程学院, 2009.
- [10] SCHADOW K C, GUTMARK E. Combustion instability related to vortex shedding in dump combustors and their passive control[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1992, 18: 117-132.
- [11] STEELE R C, COWELL L H, CANNON S M, et al. Passive control of combustion instability in lean premixed combustors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122: 412-419.
- [12] SCHLÜTER J U. Static control of combustion oscillations by coaxial flows: A large-eddy simulations investigation [J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(3): 460-467.
- [13] JONG H U, ACHARYA S. Control of combustion instability with a high-momentum air-jet[J]. Combustion and Flame, 2004, 139: 106-125.
- [14] JONG H U, ACHARYA S. Role of low-bandwidth open-loop control of combustion instability using a high-momentum air jet—mechanistic details[J]. Combustion and Flame, 2005, 147: 22-31.
- [15] PASCHEREIT C O, GUTMARK E J. Control of high-frequency thermoacoustic pulsations by distributed vortex generators[J]. AIAA Journal, 2006, 44(3): 550-557.
- [16] PASCHEREIT C O, FLOHR P, GUTMARK E J. Combustion control by vortex breakdown stabilization[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128: 679-688.
- [17] YI T, GUTMARK E J. Combustion instabilities and control of a multiswirl atmospheric combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129: 31-37.
- [18] NOIRAY N, DUROX D, SCHULLER T, et al. Passive control of combustion instabilities involving premixed flames anchored on perforated plates[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 1283-1290.
- [19] BARBOSA S, GARCIA M D L C, DUCRUIX S, et al. Control of combustion instabilities by local injection of hydrogen[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 3207-3214.
- [20] MCMANUS K R, POINSOT T, CANDEL S M. A review of active control of combustion instabilities[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1993, 19: 1-29.
- [21] DOWLING A P, MORGANS A S. Feedback control of combustion oscillations[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2005, 37(1): 151-182.

- [22] 韩飞,杨军,沙家正. Rijke 热声不稳定性的有源控制[J]. 声学学报,1997,22(5):421-429.
- [23] ANNASWAMY A M, RUMSEY J W, PRASANTH R. Thermoacoustic instability: Model-based optimal control designs and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2000,8(6):905-918.
- [24] ANNASWAMY A M, ELRIFAI O M, FLEIFIL M, et al. A model-based active-adaptive controller for thermoacoustic instability[C]//Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications. Hartford, CT: IEEE,1997:842-847.
- [25] FLEIFIL M, ANNASWAMY A M, GHONIEM Z, et al. Active control of thermoacoustic instability in combustion systems[C]//Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Control Applications, Monterey, CA: IEEE,1995:685-690.
- [26] HATHOUT J P, FLEIFIL M, ANNASWAMY A M, et al. Combustion instability active control using periodic fuel injection[J]. Journal of Propulsion and Power,2002,18(2):390-399.
- [27] HATHOUT J P, FLEIFIL M, RUMSEY J W, et al. Model-based analysis and design of active control of thermoacoustic instability[C]//Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications. Hartford, CT: IEEE,1997:830-835.
- [28] RUMSEY J W, FLEIFIL M, ANNASWAMY A M, et al. The role of active control in suppressing thermoacoustic instability[C]//Proceedings of the American Control Conference. Albuquerque, New Mexico: IEEE,1997:2697-2702.
- [29] PASCHEREIT C O, GUTMARK E, WEISENSTEIN W. Coherent structures in swirling flows and the role in acoustic combustion control[J]. Physics of Fluids,1999,11(9):2667-2678.
- [30] PASCHEREIT C O, GUTMARK E, WEISENSTEIN W. Control of thermoacoustic instabilities in a premixed combustor by fuel modulation[C]//37th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit. Reno, NV: AIAA,1999.
- [31] SCHUERMANS B, BELLUCCI V, PASCHEREIT C O. Thermoacoustic modeling and control of multi-burner combustion systems[C]//Proceedings of ASME Turbo EXPO. Atlanta, Georgia, USA: ASME,2003.
- [32] CAMPOS-DELGADO D U, ZHOU K, ALLGOOD D. Active control of combustion instabilities using model-based controllers[J]. Combustion Science and Technology,2003,175:27-53.
- [33] CAMPOS-DELGADO D U. Active control of thermoacoustical instabilities[D]. Louisiana: The Louisiana State University,2001.
- [34] CAMPOS-DELGADO D U, SCHUERMANS B B H, ZHOU K, et al. Thermoacoustic instabilities: Modeling and control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2003,11(4):429-447.
- [35] AUER M P, GEBAUER C, MOSL K G, et al. Active instability control: Feedback of combustion instabilities on the injection of gaseous fuel[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2005,127:748-754.
- [36] SATTINGER S S, NEUMEIER Y, NABI A, et al. Sub-scale demonstration of the active feedback control of gas-turbine combustion instabilities[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2000,122:262-268.
- [37] COHEN J M, STUFFLEBEAM J H, PROSCIA W. The effect of fuel/air mixing on actuation authority in a active combustion instability control system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2001,123:537-542.
- [38] KABLAR N A, HAYAKAWA T, HADDAD W M. Adaptive control for thermoacoustic combustion instabilities [C]//Proceedings of the American Control Conference. Arlington, VA: AIAA,2001:25-27.
- [39] LUBARSKY E, SHCHERBIK D, BIBIK A, et al. Active control of combustion oscillations by non-coherent fuel flow modulation[C]//9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit. Hilton Head, South Carolina AIAA/CEAS,2003.
- [40] FICHERA A, PAGANO A. Application of neural dynamic optimization to combustion-instability control[J]. Applied Energy,2005,83:253-264.
- [41] MORGANS A S, DOWLING A P. Model-based control of combustion instabilities[J]. Journal of Sound and Vibration,2007,299:261-282.
- [42] TACHIBANA S, ZIMMER L, KUROSAWA Y, et al. Active control of combustion oscillations in a lean premixed combustor by secondary fuel injection coupling with chemiluminescence imaging technique[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2007,31:3225-3233.