

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.007

文氏管结构对旋流杯流动点火特性的影响研究

姚尚军

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为了探究文氏管结构变化对某旋流杯燃烧室流动及点火过程火焰传播特性的影响,搭建单头部回流燃烧室试验平台,开展文氏管喉道位置与直径对冷态头部流场结构及点火过程火焰传播特性影响规律的试验研究。结果表明:文氏管喉道距旋流杯出口的距离增加,燃烧室头部低速回流区范围有所扩大,但流动结构基本不变;文氏管喉道直径缩小,燃烧室头部下回流区范围增幅明显,流动结构变化明显;点火过程中火焰存在明显阶段性变化,初始火焰往上游传播对点火成功有重要作用。在燃烧室总压损失 3% 的条件下,文氏管喉道距旋流杯出口的距离增加,点火延迟时间有所增加,但增幅不大,文氏管喉道直径缩小,点火延迟时间大大增加,增幅超 118%。

关键词:文氏管;旋流杯;PIV;流场;电火花点火;点火延迟时间

中图分类号:V233.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0030-05

Influence of Venturi Tube Structure on Flow and Ignition Characteristics of Swirl Cup

YAO Shangjun

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:In order to explore the influence of Venturi tube structure change on the flow and flame propagation characteristics of a swirl cup combustor during ignition, a single-head reverse combustor test platform was built, and the experimental research on the influence of Venturi tube throat position and diameter on the cold head flow field structure and flame propagation characteristics during ignition was carried out. The results show that the distance between the Venturi tube throat and the swirl cup outlet is increased, and the range of low-speed recirculation zone in the combustor head is expanded, but the flow structure remains basically unchanged. The throat diameter of the Venturi tube is reduced, the range of the recirculation zone under the head of the combustion chamber is increased significantly, and the flow structure changes greatly. There is a significant staged change in the flame during the ignition process, and the initial flame propagation upstream plays an important role in the success of ignition. Under the condition of a total pressure loss of 3% in the combustion chamber, the distance between the Venturi tube throat and the swirl cup outlet is increased, and the ignition delay time is increased, but with no significant increase, and as diameter of the Venturi tube throat is decreased, and the ignition delay time is increased remarkably with an increase of over 118%.

Keywords:Venturi tube; swirl cup; PIV; flow field; spark ignition; ignition delay time

0 引言

在先进航空发动机研制过程中,如何实现燃烧室高效稳定运行和满足宽广范围工作需求是要考虑的重要内容,因此燃烧室必须具备快速可靠的点火性能^[1]。点火过程火焰传播与冷态流场及燃油分布有着直接的联系^[2],而旋流器作为燃烧室头部流动组织与燃油雾化的核心部件^[3],其结构会对火焰传播产生显著影响。因此探究不同结构旋流器对燃烧室点火过程火焰传播的影响,对

优化点火性能、拓宽点火边界具有重要的工程应用价值。

旋流杯是旋流器中的一种独特构型,主要由文氏管、斜切孔、叶片等组成^[4],工作时由文氏管控制内外旋流空气的掺混时机,因此文氏管结构与燃烧室头部冷态流场有着密切联系,从而对点火过程火焰传播产生重要影响。目前,关于旋流杯文氏管对流动影响的相关研究工作取得了许多成果。吴施志等^[5]基于 PIV 技术分析了文氏管扩张角对流动的影响。郑耀等^[6]分析了文氏管喉道

基金项目:南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划项目(xcxjh20210210)

作者简介:姚尚军(1997—),男,安徽寿县人,硕士研究生,研究方向为燃烧室流动燃烧,3112814083@qq.com。

直径对流动的影响。关于旋流杯点火过程火焰传播的相关研究主要通过试验手段来开展,基于高速摄影将三维火焰投影到二维平面,以时间分辨分析火焰传播路径^[7-8]。小型回流燃烧室结构复杂,尺寸效应明显^[9],文氏管结构变化对其内的流动及点火性能的影响尚不明确。因此,本文搭建了单头部回流燃烧室试验平台,通过试验对比分析了不同文氏管结构旋流杯流动和点火性能,为后续的优化设计提供参考。

1 研究对象及试验系统

1.1 研究对象

二级旋流杯由斜切孔、文氏管、叶片及套筒等组成,如图 1 所示。从斜切孔进入的内旋流空气参与燃油初次雾化,从叶片通道进入的外旋流空气负责在燃烧室头部形成回流区稳定火焰及进一步提高雾化效果。以旋流杯出口中心为原点建立坐标系。

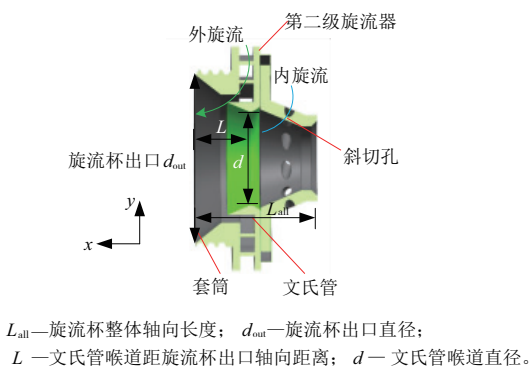


图 1 旋流杯结构

保持旋流杯设计方案中其余设计参数不变,通过调整文氏管喉道直径和喉道位置的参数,设

计加工了 3 个旋流杯,如图 2 所示。具体参数如表 1 所示,引入无量纲数 L/L_{all} 及 d/L_{all} 便于分析。

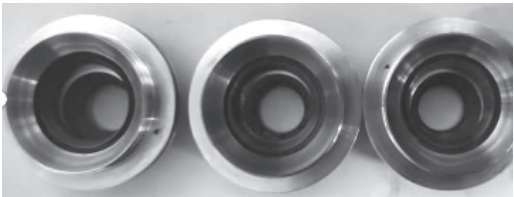


图 2 旋流杯实物图

表 1 旋流杯设计参数

参数	旋流杯 1	旋流杯 2	旋流杯 3
L/L_{all}	0.46	0.48	0.48
d/L_{all}	0.73	0.73	0.68

1.2 试验系统

试验系统包括供气系统、供油系统、测量系统、点火系统以及废气处理系统。燃烧室的左侧及前侧开设观察窗实现光学测量。流场测量采用 PIV 系统,如图 3 所示。采用喷涂黑色亚光漆的方法将拍摄背景亚光处理。示踪粒子采用平均粒径 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的玻璃微珠。时均速度云图采用商业软件从原始粒子图像计算得出,基于互相关算法对 100 张瞬态图像进行处理。选用 Phantom v.2012 型高速摄影记录点火过程,试验系统如图 4 所示。基于 Matlab 编写图像处理算法,对原始火焰图像进行后处理获得火焰投影面积随时间变化曲线。图像后处理流程:首先基于 Otsu 算法将瞬态火焰图像二值化,统计白色像素数目,定义像素与实际距离的转换比例,获得火焰实际投影面积。火焰空间分辨率为 9.6 pixel/mm 。点火位置见图 4 中十字星位置。

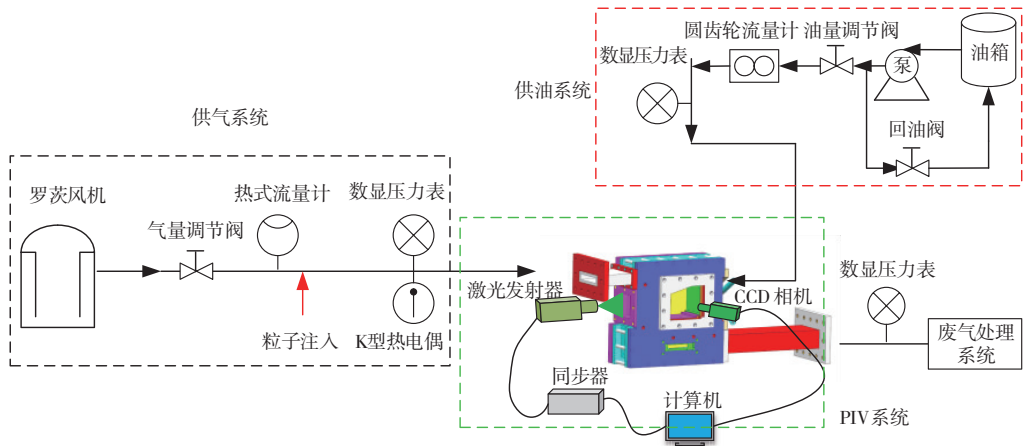


图 3 PIV 系统示意

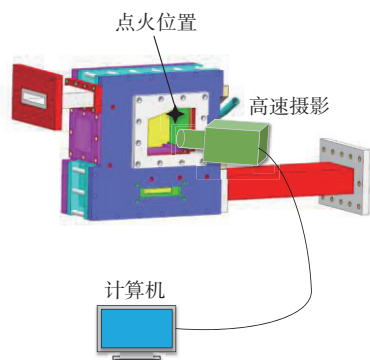


图4 高速摄影系统示意

2 试验结果分析

2.1 文氏管结构对头部冷态流场结构的影响

图5为不同文氏管结构旋流杯在总压损失3%的工况下燃烧室头部PIV冷态试验结果。试验结果表明:主燃区回流区的轴向长度和涡心位置取决于主燃孔射流,由于上、下主燃孔交错排列,燃烧室内部流场上下不对称;从回流区数目看,装有旋流杯1后,回流燃烧室内总共存在4个回流区,旋流杯2有4个回流区,旋流杯3有3个回流区;从回流区的形状和范围看,旋流杯1回流区为纵向涡,流动方向为逆时针,回流区2流动方向为横向涡,流动方向为顺时针,旋流杯2上、下回流区形状和流动方向没有发生变化,但回流区范围有所增大,低速区域变得更宽广;旋流杯3回流区1为狭长的横向涡,回流区2也为横向涡,但轴向和径向长度大大增加。

旋流杯2与旋流杯1流场差异的原因分析是,文氏管喉道位置距旋流器出口距离增加,导致内旋流与外旋流之间相互混合的时机提前,头部回流区范围增加。

旋流杯3与旋流杯2流场差异的原因分析是,文氏管喉道直径缩小后,旋转气流在径向上的发展受限,因此回流区1变得狭长,范围缩小,而流通面积缩小,导致流动阻力增加、内旋流强度减弱,此时流体会产生附壁效应,在主燃区下侧会形成范围更宽广的低速回流区,即回流区2轴向和径向长度增加。当燃烧室头部流量降低,从主燃孔及掺混孔进入的空气流量就会增加,射流得到增强,回流区3变得更饱满、范围更广。

旋流杯下游不同轴向位置上的轴向速度如图6所示。从图6可以看出,不同旋流杯出口起始部分($x/d_{out}=0.3$)处轴向速度分布趋势基本保

持一致,在高度 $y=-10\text{ mm}$ 和 $y=20\text{ mm}$ 之间的速度为负,代表回流,从速度由正转负的转折点位置判断出旋流杯3回流区径向高度比旋流杯1要更低一点;从 $x/d_{out}=0.7$ 处开始,由于旋流杯3文氏管喉道直径缩小,内旋流强度减弱,导致下游流场结构与旋流杯2差异逐渐变大,而旋流杯2下游轴向速度分布与旋流杯1保持一致。

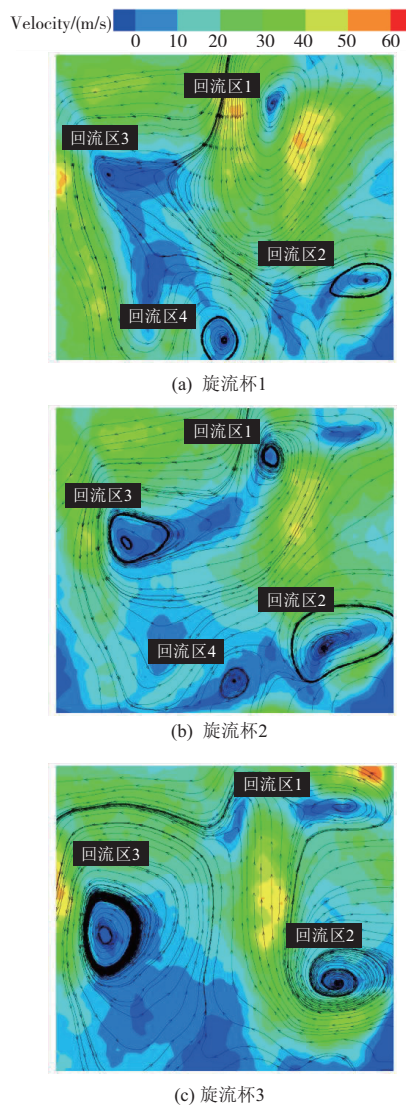
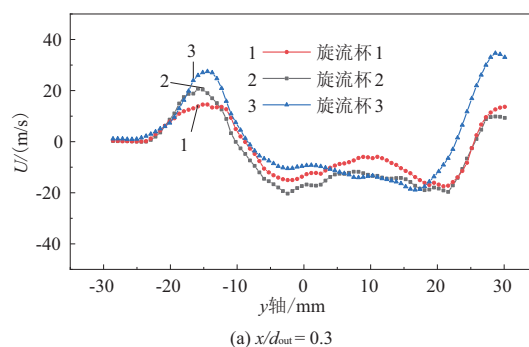


图5 不同流量三级旋流杯燃烧室冷态时均速度场



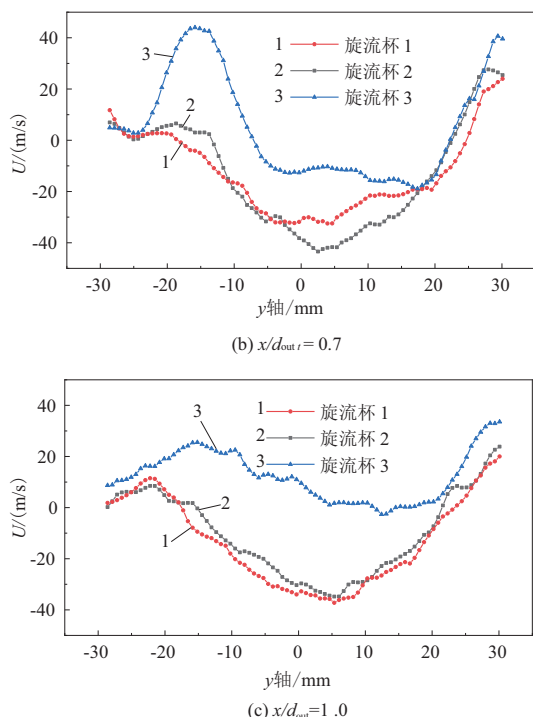


图6 不同轴向位置轴向速度分量变化

旋流杯下游不同轴向位置上的径向速度如图7所示。从图中可以看出,旋流杯2径向速度分布规律与旋流杯1基本一致,而旋流杯3径向速度分布规律与旋流杯1差异明显,进一步说明了文氏管喉道直径变化对冷态流场的影响更明显。当 $x/d_{out} = 0.3$, 以 $y = 0$ mm 为分界, 径向速度分布不对称, 说明燃烧室头部上、下两侧速度分布不对称。当 $x/d_{out} = 0.7$, 旋流杯1在 $y > 0$ mm 处径向分速度高于旋流杯3, 这表明出口旋转气流强度更高。而当 $x/d_{out} = 1.0$ 时, 在 $y > 0$ mm 处旋流杯3径向速度总体上更大。分析这是由于主燃孔射流速度增大, 由此判断出文氏管喉道直径变化对燃烧室内部气量分配有重要影响。

2.2 文氏管结构对点火过程火焰传播的影响

旋流杯1燃烧室点火过程火焰传播轨迹如图8所示(燃烧室总压损失3%, 点火成功油气比0.05)。 $t = 0$ ms, 电嘴放电形成直径超过20 mm的火核, 由于湍流耗散以及燃油蒸发吸热的影响, 火核亮度、直径均缩小。燃烧室头部上侧的油气混合物通过不断吸收火焰热量, 开始反应对外放热, 此时释热量大于耗散损失的热量, 火焰开始不断发展, 边界不断扩张。 $t = 5$ ms, 火焰一部分穿过上主燃孔射流传播到下游, 一部分以逆回流区传焰的方式传播到旋流杯出口, 并最终实现成功点火的目的。

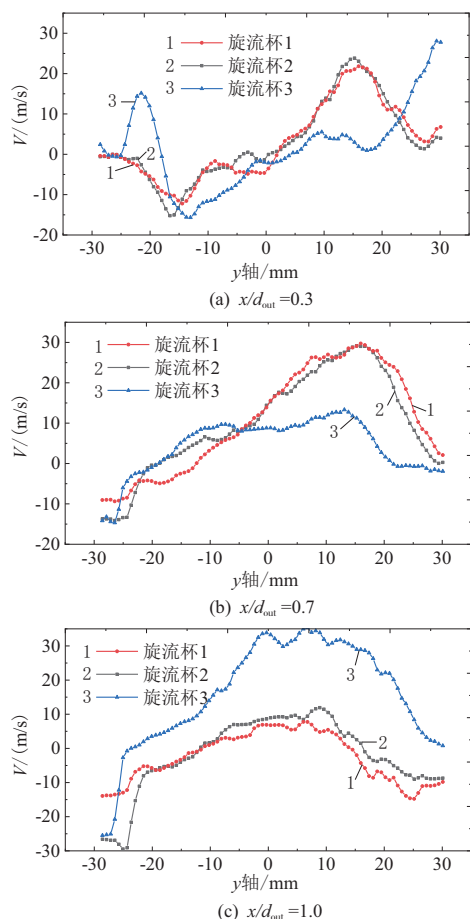


图7 不同轴向位置径向速度分量变化

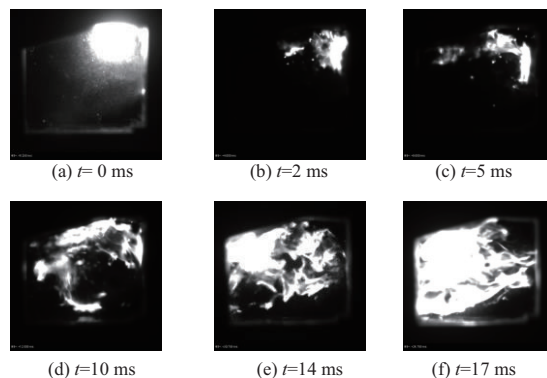


图8 旋流杯1燃烧室点火过程火焰传播

为了定量分析旋流杯1燃烧室火焰传播特性, 图9给出了火焰投影面积随时间变化曲线。将电火花放电后的火焰投影面积首次达到峰值(即面积增长率为0)的时刻定义为点火延迟时间 t_d 。点火过程火焰存在明显的阶段性变化, 在 $0 \sim t_d$ 的时间内, 火焰投影面积先降低至一定水平后得以稳定, 再继续上升直到在一定范围内波动, 因此旋流杯燃烧室火焰传播路径可归纳为: 1) 火核

建立;2) 火焰稳定及能量增长;3) 稳定火焰的形成。旋流杯 1 燃烧室点火延迟时间 t_d 为 14 ms, 且之后火焰投影面积存在波动, 波动率在 24% 附近, 分析是因为在湍流燃烧中流动与燃烧相互影响, 火焰边界会不断抖动。

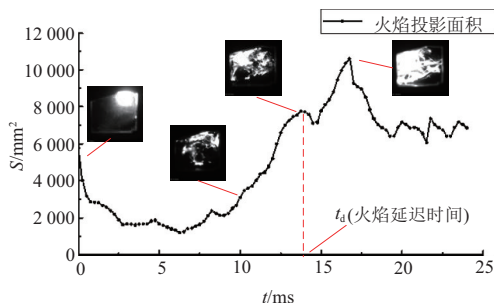


图 9 旋流杯 1 燃烧室火焰投影面积变化

旋流杯 2 燃烧室点火过程火焰传播轨迹如图 10 所示(燃烧室总压损失 3%, 点火成功油气比 0.050)。在火花塞放电后, 火核在燃烧室头部上侧回流区 1 内发生破碎并被气流输运, 且在点火过程中初始火焰也存在着往旋流杯出口(即上游)传播的形式($t=8$ ms)。由于旋流杯 2 燃烧室上侧回流区 1 低速区域范围更宽广, 更有利于初始火焰的稳定和能量增长, 因此火焰在 0~6 ms 内均位于燃烧室头部。

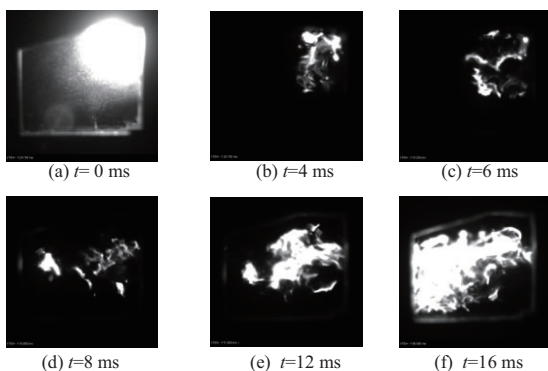


图 10 旋流杯 2 燃烧室点火过程火焰传播

图 11 给出了旋流杯 2 燃烧室点火过程火焰投影面积随时间变化曲线。旋流杯 2 燃烧室点火延迟时间 t_d 为 16 ms, 与旋流杯 1 接近。由于燃烧室头部上侧低速回流区范围增加, 火焰强度增长更稳定, 到达投影面积峰值后波动较为平缓。

旋流杯 3 燃烧室点火过程火焰传播轨迹如图 12 所示(燃烧室总压损失 3%, 点火成功油气比 0.054)。由于冷态流场与旋流杯 2 差异明显, 火焰传播轨迹和投影面积也随之改变。在建立火核之后火焰经过更长时间的的增长周期才点火成功,

分析这是由于旋流杯 3 燃烧室头部上侧回流区 1 范围狭小, 初始火核强度低, 稳定难度更高。而与前 2 个旋流杯相似之处在于初始火焰也存在往上游传播的形式($t=15$ ms)。

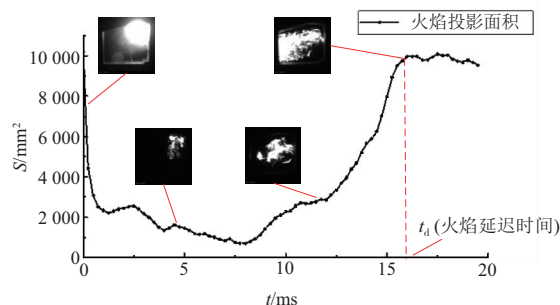


图 11 旋流杯 2 燃烧室火焰投影面积变化

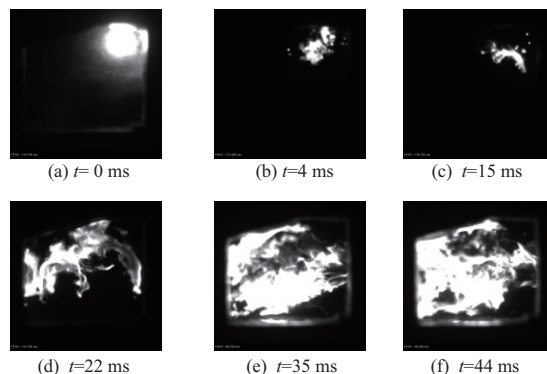


图 12 旋流杯 3 燃烧室点火过程火焰传播

图 13 给出了旋流杯 3 燃烧室点火过程火焰投影面积随时间变化曲线。旋流杯 3 燃烧室点火延迟时间 t_d 为 35 ms, 比旋流杯 2 要高出 19 ms, 增幅超过 118%。而且火焰存在剧烈波动, 波动率超过 25%。

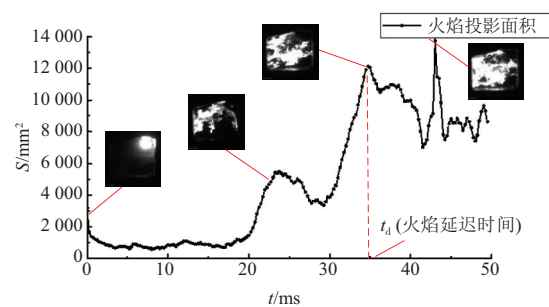


图 13 旋流杯 3 燃烧室火焰投影面积变化

3 结语

本文通过试验分析了文氏管结构变化对旋流杯冷态流场与点火过程火焰传播的影响, 得到了以下结论。

(下转第 38 页)

作进一步研究。

1) 扩展振动时间序列数据源。本文分析的3组数据均为汽车轮毂轴承的试验数据,后续应验证其他类型或其他应用的轴承,以进一步验证本方法的通用性。

2) 判定标准的界定。本文采用先定性后定量的方法对轴承失效进行提前预报。但是并未确定合适的量化标准,后续应通过更多试验总结参数量化标准。

3) 融合多个性能退化指标。本文只针对振动加速度这一个性能退化指标预报轴承故障,后续应该融合更多的性能退化指标预报轴承故障。

参考文献:

- [1] GUSTAFSSON O G, TALLIAN T. Detection of damage in assembled rolling element bearings [J]. A S L E Transactions, 1962, 5(1): 197-209.
- [2] 江叶峰, 苏万斌, 易灿灿. 高速电梯曳引机主轴组件综合性能检测装置设计与分析[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(4): 196-199.
- [3] 夏新涛, 叶亮, 常振, 等. 乏信息条件下滚动轴承振动性能可靠性变异过程预测[J]. 振动与冲击, 2017,

36(8): 105-112, 143.

- [4] GEBRAEEL N, LAWLEY M, LIU R, et al. Residual life predictions from vibration-based degradation signals: a neural network approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(3): 694-700.
- [5] 陈旭涛. 滚动轴承可靠性评估与剩余寿命预测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [6] 夏新涛, 孟艳艳, 邱明. 用灰自助泊松方法预测滚动轴承振动性能可靠性的变异过程[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9): 97-103.
- [7] 常振, 魏剑波, 平晓明, 等. 轴承性能时间序列的概率信息求取及退化分析[J]. 机电工程, 2021, 38(1): 27-34.
- [8] WEIBULL W. A statistical theory of the strength of materials [J]. Royal Swedish Institute for Engineering Research. 1939, 151(15): 1-45.
- [9] LUNDBERG G, PALMGREN A. Dynamic capacity of rolling bearings [J]. Acta Polytech, 1947(3): 1-52.
- [10] 郭永东. 移动平均法在数据采集和分析中的应用[J]. 电子科技, 2014, 27(9): 118-120.

收稿日期: 2023-05-24

(上接第34页)

1) 流场研究结果表明, 回流燃烧室冷态流场上下结构不对称, 文氏管喉道距旋流杯出口的距离增加, 燃烧室头部低速回流区范围有所扩大, 但流动结构基本不变。文氏管喉道直径缩小, 燃烧室头部下回流区范围增幅明显, 旋流杯形成的旋转气流出现贴壁现象, 流动结构变化明显。

2) 点火过程存在明显的阶段性变化, 初始火焰往上传播对点火成功有重要作用。

3) 在燃烧室总压损失3%的条件下, 文氏管喉道距旋流杯出口的距离增加, 点火延迟时间有所增长, 但增幅不大; 文氏管喉道直径缩小, 点火延迟时间大大增加, 增幅超118%。

参考文献:

- [1] 林宇震, 许全宏, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 冯剑寒. 不同头部间距下三头部燃烧室点火过程研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2): 210-212, 221.
- [3] MONGIA H. Engineering Aspects of Complex Gas Turbine Combustion Mixers Part IV: swirl cup [C]// Proceedings of the 9th Annual International Energy Conversion Engineering Conference. San Diego, California. Reston, Virginia: AIAA, 2011: 5526.

- [4] ZHANG J, YAN L J, YIN K W, et al. PIV measurement of flow characteristic in single-head combustor with triple-stage swirler [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1064: 012014.
- [5] 吴施志, 王志凯, 石小祥, 等. 文氏管出口张角对旋流杯性能的影响研究[J]. 推进技术, 2020, 41(8): 1756-1764.
- [6] 郑耀, 张阳, 邹建锋. 文氏管喉部直径对燃烧室流场结构影响的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(2): 97-102.
- [7] CAO Z B, XIAO Y L, SONG W Y, et al. Experimental study on thermoacoustic instability and emission characteristics of premixed swirl flame in a longitudinal combustor [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 172: 107354.
- [8] YANG S H, ZHANG C, LIN Y Z, et al. Experimental investigation of the ignition process in a separated dual-swirl spray flame [J]. Combustion and Flame, 2020, 219: 161-177.
- [9] READ R W, ROGERSON J W, HOCHGREB S. Flame imaging of gas-turbine relight [J]. AIAA Journal, 2010, 48(9): 1916-1927.

收稿日期: 2023-05-26