

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.040

结构参数对双旋流贫燃预混燃烧室流动影响的数值研究

王东浩,金义,张凯,姚康鸿,王云飙,魏浩

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:为探究结构参数对燃气轮机燃烧室流动特性的影响,开展不同主、预燃级旋流数、不同中心钝体结构方案的双旋流贫燃预混燃烧室冷态流场数值模拟研究,并通过 TECFLAM 物理模型进行有效性验证。结果表明:燃烧室主燃区流场形成了 3 个回流区,分别为中心回流区、钝体后回流区及角回流区,有利于主燃区火焰和值班扩散级火焰的稳定。中心回流区长度随主燃级旋流数增大而增大,宽度随预燃级旋流数增大而增大。角回流区尺寸主要受主燃级旋流数影响,随着主燃级旋流数的增大而减小。中心钝体结构改变对钝体后回流区影响显著,钝体后回流区尺寸随钝体后端面积增大而增大。

关键词:旋流数;数值模拟;贫燃预混燃烧室;流场特性;燃气轮机

中图分类号:TP15 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)04-0218-06

Numerical Study of Influence of Structural Parameters on Lean-burn Premixed Combustor Flow

WANG Donghao, JIN Yi, ZHANG Kai, YAO Kanghong, WANG Yunbiao, WEI Hao

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

Abstract: In order to explore the influence of the structural parameters on the flow characteristics of gas turbine combustor, the numerical simulation study of the cold flow field of dual-stage swirler lean-burn premixed combustor with different first and second stage swirl numbers and different central blunt body structure schemes was carried out, and its effectiveness was validated by the TECFLAM physical model. The results show that the primary zone of the combustion chamber forms three recirculation zones: the central recirculation zone, corner recirculation zone and bluff recirculation zone, which are conducive to the stability of the primary zone flame and the on-duty diffusion flame. The length of the central recirculation zone increases with the increase of the number of the second stage swirler, and the width increases with the increases of the first stage swirler. The size of the corner recirculation zone is mainly affected by the number of the second stage swirler, and decreases with the increase of the number of the second stage swirler. The change of bluff body structure has a significant effect on the bluff recirculation zone, and the size of bluff recirculation zone increases with the increases of the area of the posterior bluff body.

Keywords: swirler number; numerical simulation; LPP combustor; flow field characteristics; gas turbine

0 引言

随着世界各国对生态环境保护问题的日益关注,鉴于对燃气轮机污染物低排放的要求,各国都在改进燃烧室的燃烧技术。经过几十年的发展,先进的燃烧技术主要包括:贫燃预混燃烧(LPP)、分级燃烧室等,其中发展前景最为广阔的是贫燃预混燃烧技术^[1]。

贫燃预混燃烧技术是指燃料在进入燃烧室燃烧前,预先经过预混管道与预氧化剂充分掺混后进入主燃区燃烧。由于燃料在低于化学恰当的当量比状态下燃烧,过量的空气会降低火焰温度,达到降低污染物排放的目的^[2-4]。在燃烧过程中,

由于化学反应与流场的相互作用以及当量比的波动,使得贫燃预混燃烧技术易产生燃烧不稳定问题,如燃烧振荡、回火^[5-7]等。当燃烧室预混段内的气体流速小于火焰传播速度时,火焰会沿通道向上游传播,最终导致燃烧室回火。

旋流器和中心钝体是燃烧室重要的结构,直接影响预混管道内空气的速度分布及燃烧室的流场结构,决定了燃烧室的点熄火性能和燃烧性能。国内外学者针对燃烧室旋流器进行了大量研究,双级旋流器中一、二级旋流器的不同将显著影响燃烧室的流场结构。赵自强等^[8]对三头部旋流流场特性进行了数值模拟研究。研究结果表明回流区尺寸、旋流数等随着进口流量分配改变有明显

第一作者简介:王东浩(1999—),男,内蒙古自治区赤峰人,硕士研究生,研究方向为燃烧传热与传质,wdh19990325@qq.com。

的变化^[9-11]。于涵等^[12]对中心分级贫油直喷燃烧室的流场及排放特性进行了数值模拟研究。结果表明:在值班级旋流角度为 32° 的条件下主燃区仍然能够形成稳定的回流区, NO_x 的生成量随着主油喷射角度的减小而减少。李乐等^[13]研究了两级旋流器旋向对中心分级燃烧室流场及温度场的影响。结果表明:冷态流场下两级旋流器旋向相同有利于中心回流区的形成,且在热态温度场下出口温度分布系数更好。常峰等^[14]研究了低旋流条件下中心分级燃烧室的流场特性。结果表明副模单独工作时无法形成中心回流区,副模与主模同时工作时能够形成稳定的中心回流区。

从研究现状看,国内外针对旋流器结构对中心分级燃烧室的流场特性研究较多,但关于旋流结构对贫燃预混燃烧室流场特性研究,特别是中心钝体结构对流场特性的研究很少,因此本文选择一种圆柱形燃烧室为对象,研究不同主、预燃级旋流数、中心钝体结构对燃烧室冷态流动特性的影响。

1 研究对象及方法

1.1 研究对象

本文的研究对象为圆柱形燃烧室,结构如图1所示。燃烧室主要由双级旋流器、套筒、中心钝体、燃烧腔组成,其中一级旋流器与钝体为一体连接,双级旋流器均为直叶片轴向旋流器。燃烧室总体长度为593 mm,进口直径为118 mm,火焰筒直径为190 mm,预燃级(一级)旋流器外径为61 mm,内径为23 mm,出口直径为64.7 mm,主燃级(二级)旋流器外径为118 mm,内径为91 mm,出口直径为110 mm。

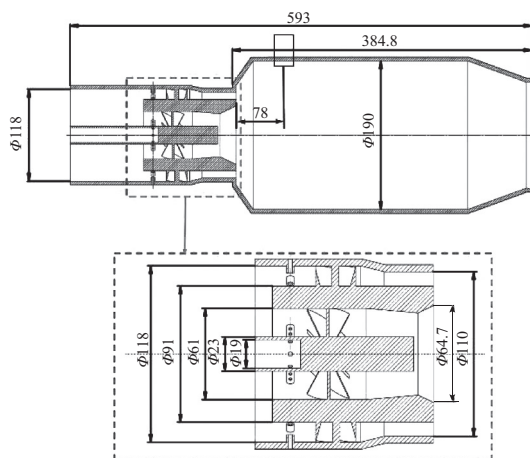


图1 燃烧室结构示意图

本文研究旋流器旋流数和中心钝体结构对燃烧室流场特性的影响。旋流数 S_N 是为了表征回流区的强度以及旋流器工作性能引入的概念,旋流数指切向动量矩与轴向动量矩的比值,即

$$S_N = \frac{G_m}{G_t(D_{sw}/2)} \quad (1)$$

式中: G_m 为切向动量矩; G_t 为轴向动量矩; D_{sw} 为旋流器外径。对于直叶片旋流器,可得旋流数 S_N 的计算公式为

$$S_N = \frac{2}{3} \cdot \frac{1 - (D_{hub}/D_{sw})^3}{1 - (D_{hub}/D_{sw})^2} \tan\theta \quad (2)$$

式中: D_{hub} 为旋流器内径; θ 为叶片角度。

本文研究中主、预燃级旋流数分别有3组。中心钝体类型分别为圆柱型、收缩型和扩张型。旋流器详细结构参数如表1所示,下标pri表示为主燃级旋流器,下标pre表示为预燃级旋流器,数字3表示旋流数最大,数字1表示旋流数最小。在研究某一结构参数的影响时,其他结构参数均选择一固定参数作为对比。研究方案如表2所示。

表1 主、预燃级旋流器结构参数

旋流器编号	外径/mm	内径/mm	安装角/ $^\circ$	叶片数/片	旋流数
$S_{pri,1}$	99.0	44.5	38.0	20	0.696
$S_{pri,2}$	99.0	44.5	42.0	20	0.802
$S_{pri,3}$	99.0	44.5	58.0	20	1.425
$S_{pre,1}$	30.5	11.5	37.5	10	0.564
$S_{pre,2}$	30.5	11.5	47.5	10	0.803
$S_{pre,3}$	30.5	11.5	57.5	10	1.154

表2 结构参数研究方案

方案	结构参数	主燃级旋流数	预燃级旋流数	中心钝体结构
1	主燃级旋流器	0.696		圆柱型
2		0.802	0.803	
3		1.425		
4	预燃级旋流器		0.564	圆柱型
5		1.425	0.803	
6			1.154	
7	中心钝体结构			收缩型
8		1.425	0.803	圆柱型
9				扩张型

1.2 计算域及网格划分

为保证数值计算的准确性,合理利用计算资源,本文网格划分采用多面体网格类型,多面体网格单元之间的接触面更多,能够得到更多插值信息,具有更快的收敛速度,且计算精度优于四面体网格,因此采用多面体网格划分方式既能减少网格数量,有效利用计算资源,又能保证较高的计算精度^[15]。对狭小通道及中心钝体附近的网格进行了局部加密,本文网格数量为 361 万左右。计算流域尺寸如图 2 所示。

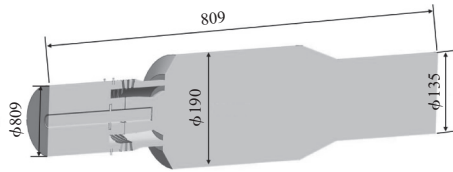


图 2 计算流域尺寸图

1.3 计算方法及边界条件

现阶段的湍流模拟方法主要有:直接数值模拟(DNS)、雷诺平均数值模拟(RANS)和大涡数值模拟(LES)。DNS 不需要建模,直接对流动进行计算,理论上可以获得精确的计算结果,但所需计算资源巨大,耗时长;RANS 可以得到流场内运动的平均物理量,满足实际工程的计算要求,计算量最小;LES 考虑了流场内大尺度涡的各向异性,可以得到流体瞬时运动的脉动量,计算量小于 DNS,但对于较大物理模型的数值模拟所需计算量仍然很大,因此本文采用基于 BSL $k-\omega$ 超大涡模拟(very-large-eddy simulation, VLES)^[16],VLES BSL $k-\omega$ 模型在标准 $k-\omega$ 的基础上,通过分辨率控制函数 F_r 对湍流黏性系数 μ_t 进行重新模化,使其达到网格分辨率相关的残余尺度,本文采用的

F_r ^[17] 具体形式如下:

$$F_r = \min \left[1.0, \left(\frac{1.0 - \exp(-\beta L_c/L_k)}{1.0 - \exp(-\beta L_i/L_k)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: L_i 、 L_c 和 L_k 分别为积分长度尺度、截断长度尺度和 Kolmogorov 长度尺度。根据网格分辨率的不同, F_r 的取值在 0~1 之间变化,实现在 RANS、LES 和 DNS 之间转换。

VLES BSL $k-\omega$ ^[18] 模拟控制方程如下所示。

$$\begin{cases} D\rho k/Dt = P_k - \beta_1^* \rho k \omega + \partial[(\mu + \mu_t/\sigma_k) \partial k / \partial x_j] / \partial x_j \\ D\rho \omega/Dt = (\gamma \omega P_k / k - \beta_2^* \rho \omega^2) + \partial[(\mu + \mu_t/\sigma_\omega) \partial \omega / \partial x_j] / \partial x_j \\ \mu_t = F_r \cdot \rho k / \omega \end{cases} \quad (4)$$

式中 $D(\cdot)/Dt$ 为物质导数。

本文中燃烧室进口为质量流量进口,进口流量 0.1 kg/s,进口温度 373 K,出口采用压力出口,操作压力为常压,壁面设置为无滑移固体壁面。求解方法为 SIMPLEC 算法,动量通量采用有界中心差分格式离散,瞬态方程采用有界 2 阶隐式离散,其他通量采用 2 阶迎风格式离散。

1.4 计算方法验证

本文选择物理模型 TECFLAM^[19] 进行计算方法验证,该模型被广泛用于试验及数值计算。中心钝体直径 30 mm,燃料出口外径 100 mm,燃料出口内径 60 mm,网格数量与文献[20]中保持一致,进出口边界与文献保持一致,不同截面下的数值模拟时均结果与试验结果对比如图 3 所示。由图 3 可以看出,湍流模型采用 VLES 的计算结果其轴向速度峰值位置和大小,径向速度峰值位置均与实验值吻合较好,验证了本文算法的可行性与准确性。

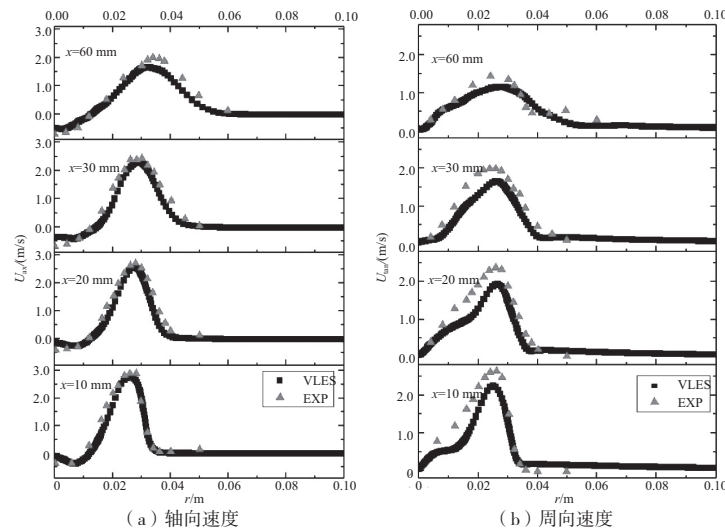


图 3 不同横截面轴向速度和周向速度分布

2 结果与分析

2.1 主燃级旋流数对流场影响

图4为不同主燃级旋流数下燃烧室的冷态流场。由图4可以看出,主燃区流场内主要存在3个回流区域,分别为中心回流区、角回流区和钝体后回流区。随着主燃级旋流器旋流角度的增大,

旋流空气的径向速度和切向速度分量变大,加速了旋流空气的扩张,角回流区受到旋流空气的“挤压”效果不断增大而被不断压缩,涡心位置不断向前移动。中心回流区的负轴向速度区域不断扩大,回流速度增大,涡心结构更加紧凑,涡心位置明显向上游移动。

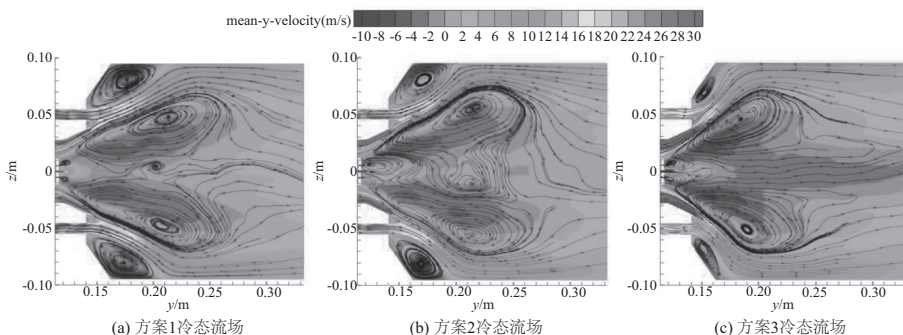


图4 不同主燃级旋流数燃烧室冷态流场

图5为不同主燃级旋流数下的冷态流场回流区。曲线1代表燃烧室内轴向速度为0的等值线。由图5可得,方案1的主燃级旋流器角度较小,旋流强度偏弱,中心回流区尺寸较小,角回流区受到旋流空气挤压弱,角回流区尺寸较大。随

着主燃级旋流数的增大,旋流空气的离心力增强,有利于中心回流区的发展,与方案1相比,方案3中心回流区长度明显增加,宽度无明显变化,角回流区明显缩小(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

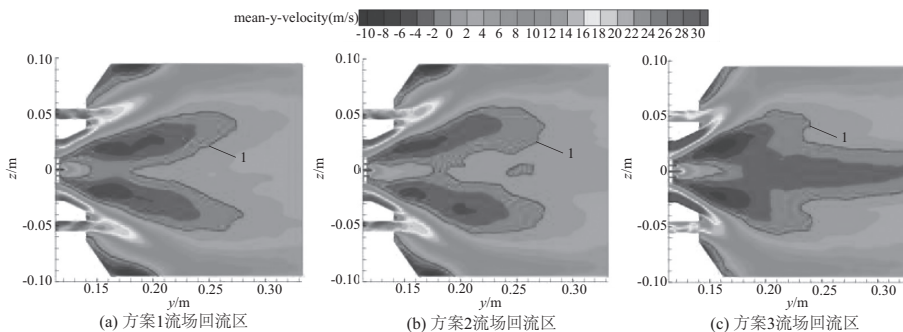


图5 不同主燃级旋流数燃烧室回流区

2.2 预燃级旋流数对流场影响

图6为不同预燃级旋流数下燃烧室的冷态流场。由图6可以看出,随着预燃级旋流器旋流角度的不断加大,中心回流区区域的涡心不断向燃烧室外侧移动,且负轴向速度区域不断向上游移动,这是由于旋流角度增大后,气流沿周向及径向的速度分量增大,沿径向形成了更大的逆压力梯度,涡心在离心力作用下不断向外侧移动,同时旋流角度增大后,中心回流区内涡团破碎的趋势更强,涡团沿径向及y轴负方向发展,流场内低速区

域不断向上游移动。在此作用下,钝体后回流区不断缩小,在方案4中,中心钝体后存在明显的“双涡”结构,随着预燃级旋流数的增加,方案6中心钝体后方无明显涡团结构。

图7为不同预燃级旋流数下的冷态流场回流区。由图7可得,随着预燃级旋流数的增加,加速了旋流空气的扩张和中心回流区的发展,与方案4相比,方案6中心回流区宽度明显增加,长度无明显变化。

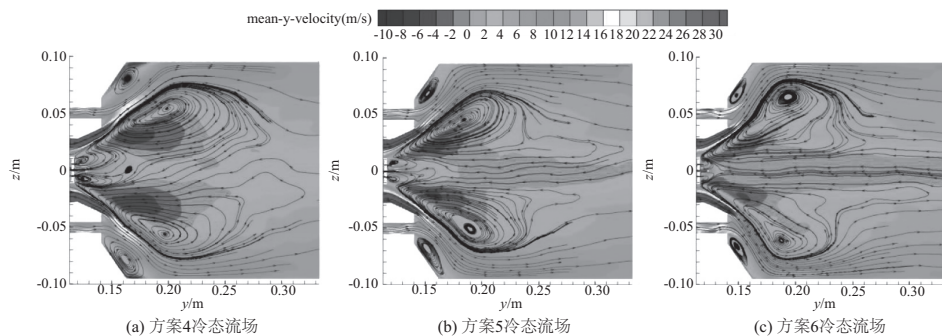


图6 不同预燃级旋流数燃烧室冷态流场

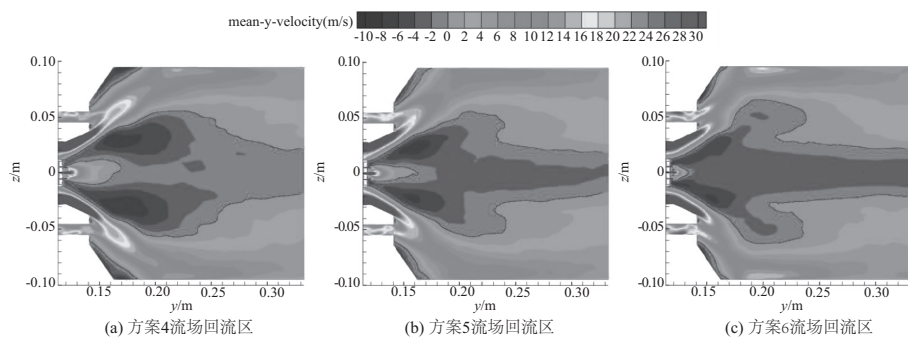


图7 不同预燃级旋流数燃烧室回流区

2.3 中心钝体结构对流场影响

图8为不同中心钝体结构下燃烧室的冷态流场。由图8可以看出,由于主燃级、预燃级旋流器的旋流角度未发生改变,燃烧室内角回流区无明显变化,涡心位置未发生改变。方案7中由于钝体后端面积的减少,无法形成钝体后回流区,涡心消失,预混段的出口面积增大使气体流速变慢,在

钝体后方存在明显的低速区。随着中心钝体后端面积的增加,有利于钝体后形成稳定的回流区,方案9中钝体后回流区明显,涡心结构完整,且预混段出口面积减小使空气流速增大,加强了由旋流器流出空气的旋流作用,在燃烧室主燃区形成了更大的逆压力梯度,中心回流区内负轴向速度更大,有利于形成稳定的回流流场。

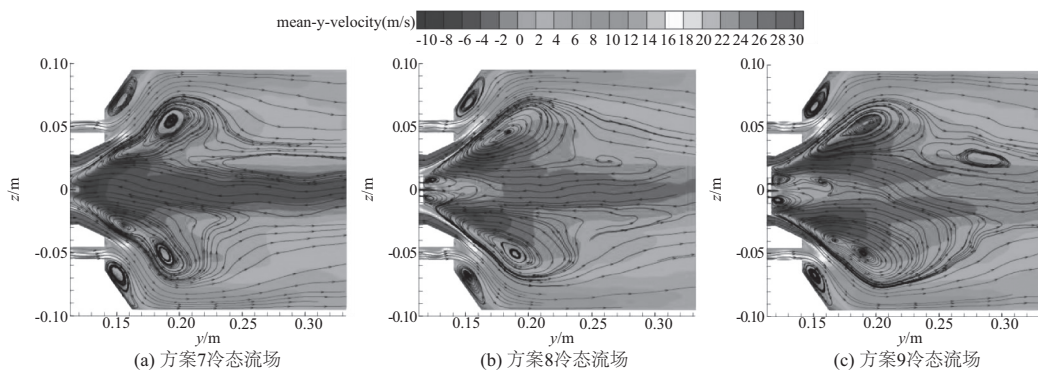


图8 不同中心钝体结构下燃烧室冷态流场

图9为不同中心钝体结构下的冷态流场回流区。由图9可得,角回流区尺寸受中心钝体结构改变的影响并不明显。随着钝体后端面积的增

加,钝体后回流区尺寸不断增大,有利于燃烧室火焰的稳定,中心回流区尺寸不断增加,相比较于方案7,方案9中心回流区后部宽度明显增加。

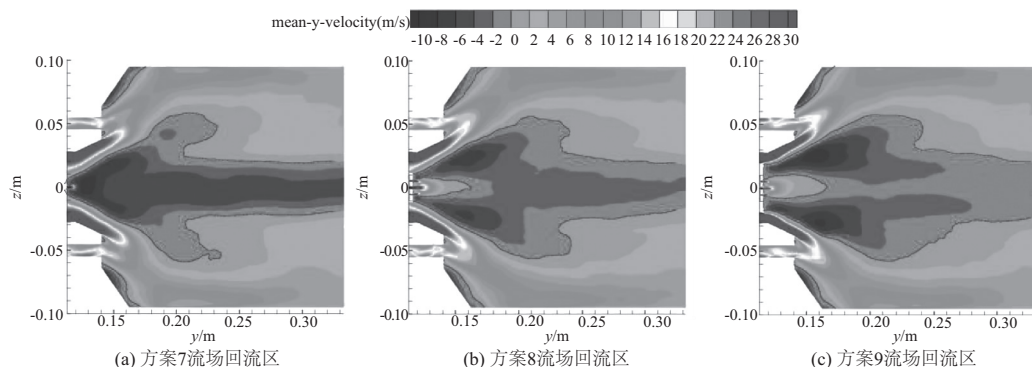


图9 不同中心钝体结构下燃烧室回流区

3 结语

本文针对燃气轮机双级旋流贫燃预混燃烧室模型,研究了结构参数对燃烧室流场结构的影响,通过对不同方案的数值模拟结果进行了分析,得到以下结论。

1) 在头部旋流器及中心钝体的作用下,主燃区形成了3个主要回流区,分别为中心回流区、钝体后回流区和角回流区,有利于主燃区火焰及值班级扩散火焰的稳定。

2) 主燃级旋流器旋流数增加,中心回流区长度不断增加,宽度无明显改变,涡心位置不断向前移动。角回流区不断缩小,涡心向前移动。钝体后回流区无明显改变。

3) 预燃级旋流器旋流数增加,中心回流区宽度不断增加,长度无明显改变,涡心位置沿径向向外侧移动,钝体后回流区不断缩小,角回流区受到影响很小。

4) 中心钝体结构改变对角回流区几乎无影响,钝体后端面积增大,钝体后回流区尺寸增大,中心回流区后部宽度增加。

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] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 986-996.
- [3] LIBBY P A, SIVASEGARAM S, WHITE LAW J H. Premixed combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1986, 12(4): 393-405.
- [4] DRISCOLL J F. Turbulent premixed combustion: flamelet structure and its effect on turbulent burning velocities[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(1): 91-134.

- [5] 田晓晶. 氢燃料旋流预混火焰燃烧诱导涡破碎回火特性研[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2015.
- [6] 田晓晶, 崔玉峰. 预混段结构对旋流预混氢火焰回火形式影响的数值研究[J]. 推进技术, 2015, 36(3): 345-351.
- [7] 田晓晶, 崔玉峰, 邢双喜, 等. 基于试验设计方法对氢燃料 CIVB 回火的多参数数值分析[J]. 推进技术, 2016, 37(6): 1098-1107.
- [8] 赵自强, 何小民, 丁国玉, 等. 旋流器流量分配对三级旋流流场特性的影响[J]. 推进技术, 2017, 38(1): 134-140.
- [9] ZENG Q H, YUAN Y X. Flow dynamics of dual-stage counter-swirl combustor in different confinement spaces[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 116: 104633.
- [10] 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.
- [11] KIM K T, HOCHGREB S. Effects of nonuniform reactant stoichiometry on thermoacoustic instability in a lean-premixed gas turbine combustor[J]. Combustion Science and Technology, 2012, 184(5): 608-628.
- [12] 于涵, 索建秦, 郑龙席. 带收敛出口的单元贫油直喷燃烧室冷态和热态流动特性研究[J]. 推进技术, 2019, 40(3): 608-618.
- [13] 李乐, 索建秦, 郑龙席. 旋向对中心分级燃烧室流场及温度场影响研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(6): 1198-1209.
- [14] 常峰, 林宏军, 程明, 等. 低旋流中心分级燃烧室流场特性研究[J]. 推进技术, 2020, 41(6): 1334-1339.
- [15] 吴迪, 金义, 丁国玉, 等. 主燃孔方案对回流燃烧室流动影响的数值研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(3): 117-122.

(下转第 235 页)

正逆运动学进行了分析。

2) 采用刚体微分运动模型,对双机器人系统的误差进行了建模,最后得到了误差位姿与期望位姿间的关系。

3) 设计了一种自调节缓冲装置,能够根据误差自动调节手爪结构,减小内力,给予机器人控制系统足够的时间进行控制响应调节,达到防止机器人及被搬运物受损的目的。

4) 对运动学进行了仿真分析,得到了关节角随时间的变化曲线,从而验证其装置的合理性。

参考文献:

- [1] 甘亚辉,戴先中. 多机械臂协调控制研究综述[J]. 控制与决策,2013,28(3):321-333.
- [2] 李智,骆峰,胡茵. 基于工业机器人的智能加工生产线设计[J]. 自动化技术与应用,2021,40(8):28-32.
- [3] 刘芳栋,林伟,朱建良,等. 机器人+. 正在席卷全球的机器人革命[M]. 北京:中国铁道出版社,2016.
- [4] 蔡自兴. 中国机器人学 40 年[J]. 科技导报,2015,33(21):23-31.
- [5] 任韶莹. 蚁群算法在多机器人协作中的应用[J]. 沈阳理工大学学报,2011,30(5):45-49.
- [6] 李铁军,刘力源,刘今越,等. 冗余度双臂机器人协作策略下实时避障算法[J]. 机械科学与技术:2023,42(11):1821-1828.
- [7] ZHENG H F, SMEREKA J M, MIKULSKI D, et al. Bayesian optimization based trust model for human multi-robot collaborative motion tasks in offroad environments[J]. International Journal of Social Robotics, 2023, 15(7):1181-1201.
- [8] 李磊,叶涛,谭民,等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人,2002,24(5):475-480.
- [9] ZHAO M, LU H, CHENG S, et al. A multi-robot cooperative exploration algorithm considering working efficiency and working load[J]. Applied Soft Computing, 2022, 128:109482.
- [10] 梁旭,苏婷婷,侯增广,等. 基于变阻抗控制的冗余驱动并联机器人多目标内力优化[J]. 自动化学报, 2023, 49(5):1099-1115.
- [11] 王亦诗. KUKA 机器人主从协调控制及其在弧焊中的应用[D]. 保定:河北大学,2019.
- [12] UCHIYAMA M, DAUCHEZ P. Symmetric kinematic formulation and non-master/slave coordinated control of two-arm robots[J]. Advanced Robotics, 1992, 7(4):361-383.
- [13] LAURETTI C, CORDELLA F, SALTARELLI I, et al. A semi-autonomous robot control based on bone layer transition detection for a safe pedicle tapping[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2023, 18(10):1745-1755.
- [14] 颜双权,胥建成. 工业机器人复杂 B 样条曲线轨迹控制精度补偿[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5):32-35.
- [15] 潘建龙. 多机器人协作系统运动规划及位置力协调控制研究[D]. 南京:东南大学,2018.
- [16] 董理,杨东,鹿建森. 工业机器人轨迹规划方法综述[J]. 控制工程,2022,29(12):2365-2374.
- [17] 张军,白涛,文川,等. 基于 WLAN 的螺旋式管道检测机器人远程测控系统[J]. 仪表技术与传感器, 2020(4):72-76.
- [18] 莫海军,黄平. 基于最大力螺旋多指手抓取规划[J]. 机械工程学报,2009,45(3):258-262.

收稿日期:2023-10-24

(上接第 223 页)

- [16] XIA Z Y, HAN X S, MAO J K. Assessment and validation of very-large-eddy simulation turbulence modeling for strongly swirling turbulent flow[J]. AIAA Journal, 2019, 58(1):148-163.
- [17] HAN X S, KRAJNOVIĆ S. An efficient very large eddy simulation model for simulation of turbulent flow[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2013, 71(11):1341-1360.
- [18] HAN X S, KRAJNOVIĆ S. Very-large-eddy simulation based on $k-\omega$ model[J]. AIAA Journal, 2015, 53(4):1103-1108.
- [19] SCHNEIDER C, DREIZLER A, JANICKA J. Fluid dynamical analysis of atmospheric reacting and isothermal swirling flows[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2005, 74(1):103-127.
- [20] SYRED N, ABDULSADA M, GRIFFITHS A, et al. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners[J]. Applied Energy, 2012, 89(1):106-110.

收稿日期:2023-10-16