

涡轴发动机折流燃烧室不同进口负压下的点火性能研究

洪侨嗣,何小民

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:为提升涡轴发动机的高原启动性能,对不同进口负压条件下的折流燃烧室点火性能进行研究。在进口马赫数为0.035、温度300 K、压力56.5~101 kPa的条件下,开展折流燃烧室点火性能试验与冷态数值模拟研究。试验结果表明:随着压力的升高,折流燃烧室的点火油气比逐渐减小。结合数值模拟分析,不同进口负压下折流燃烧室的流场结构与速度分布场变化较小,对于点火性能无影响。进一步分析,随着压力的降低,折流燃烧室内燃烧的化学反应速率减慢、燃油在燃烧室内雾化性能变差以及蒸发率降低,造成了折流燃烧室的点火性能变差,导致需要更高的油气比来提供更多的点火能量以实现点火。

关键词: 涡轴发动机;折流燃烧室;进口负压;点火性能

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2022)03-0208-05

Study on Ignition Performance of Annular Slinger Combustor of Turboshaft Engine under Different Inlet Pressure

HONG Qiaosi, HE Xiaomin

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

Abstract: To enhance the ignition performance of turboshaft engine on plateau, the research on the ignition performance of annular slinger combustor under different pressure conditions was conducted. Experiment and numerical simulation study on the ignition performance of the annular slinger combustor was carried out under the conditions of inlet Mach number at 0.035, temperature at 300 K and pressure at 56.5–101 kPa. The experiment results show that the ignition FAR of the annular slinger combustor decrease gradually with the increase of pressure. Combined with numerical simulation analysis, the flow field structure and velocity distribution field of the annular slinger combustor has little change under different pressure conditions, with no influence over the ignition performance. By further analysis, the chemical reaction rate, fuel breakage degree and evaporation rate in the annular slinger combustor all decrease, resulting in the worse ignition performance of the annular slinger combustor, and leading to a higher gas-oil ratio for increasing ignition energy to perform ignition.

Keywords: turboshaft engine; annular slinger combustor; inlet pressure; ignition performance

0 引言

涡轴发动机由于具有体积小、质量轻以及输出功率大等特点^[1],被广泛地运用于现代直升机中。我国幅员辽阔,当涡轴发动机在高海拔区域启动过程中,往往会由于环境的压力、含氧量、温度的降低等原因,导致涡轴发动机出现工作性能下降、启动失败等情况。而折流燃烧室作为涡轴发动机内的核心部件,其点火性能很大程度将影响涡轴发动机的启动性能。通过对不同进口负压条件下的折流燃烧室点火性能进行研究,对拓展涡轴发动机性能具有重要的意义。

现阶段,国内外很少有针对折流燃烧室在高原条件下进口负压的燃烧室点火性能的相关研究,这极大地限制了折流燃烧室的性能提升及优化。而负压条件下的点火研究大都针对其他类型的燃烧室,CHEN J等^[2]通过对不同压力下火焰面的增长情况,对燃烧室点火过程进行研究分

析。研究表明压力的变化将改变初始火核的形成时间与位置,进而影响整个点火过程。JIANG P等^[3]通过对新型概念的斜流驻涡燃烧室进行点火特性试验,获得了斜流驻涡燃烧室的点火过程,验证了斜流驻涡燃烧室在不同压力下都具有比原折流燃烧室更优秀的点火特性。董康等^[4-6]对低压条件下的驻涡以及加力燃烧室的油雾场以及点熄火特性开展了细致研究,结果表明燃烧室燃油的雾化特性和燃烧状态都会随着压力降低而变差,从而使点火边界变窄。肖新鹰等^[7]通过对预燃式和径向/预燃式组合火焰稳定器进行研究,发现随进口压力的降低,燃油供给压力会降低,从而影响了燃油雾化特性,极大地增大了点火油气比。李凡玉等^[8]为改善涡轴发动机在高海拔负压条件下的启动问题,通过启动初期补氧及控制启动过程中液压负载的方式,成功减少启动时间。杨谦等^[9]通过改变火焰筒内外壁主燃孔位置,将主燃区由非对称回流变为对称回流,该结构在不同负压条件下都具有较优的点火性能。

第一作者简介:洪侨嗣(1995—),男,四川宜宾人,硕士研究生,研究方向为燃烧与传热传质。

虽然国内外已开展不少关于负压点火性能的研究,但现阶段折流燃烧室在负压条件下点火性能研究还很少,为了弥补该方面的不足,本文通过试验与数值模拟相结合的方式开展了不同负压条件下折流燃烧室点火性能的研究,为未来折流燃烧室的研究提供参考依据。

1 试验系统、模型及参数

图1为试验系统简图。整套试验系统分为供气系统、燃油系统、测量系统、温度采集系统、燃烧室试验段。

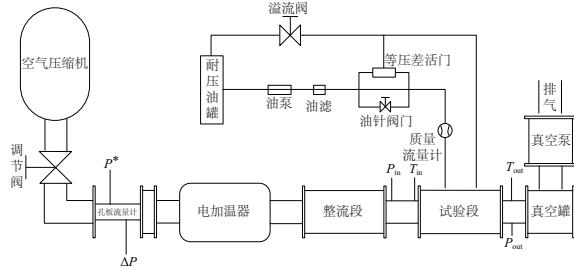


图1 试验系统简图

试验系统中的供气系统包含了双螺杆空气压缩机及真空泵,能实现最大 $35\text{ m}^3/\text{min}$ 的空气流量以及 0.02 MPa 的试验段压力。在空气压缩机作用下形成的高速射流,先通过孔板流量计对其进气流量进行测量,测量误差 $\leq 1\%$;接着高速射流进入整流段,在整流段的出口通过K型热电偶(镍铬-镍硅)以及精密压力表测量其进口温度与压力,其中热电偶测量误差 $\leq 0.75\%$ 、压力表精度等级为0.25级;然后高速射流进入试验段并进行燃烧试验,通过出口周向均匀布置且与cDAQ-9178温度采集系统连接的K型热电偶(镍铬-镍硅)测量其出口温度,热电偶测量误差 $\leq 0.75\%$;最后完成试验后的燃烧废气在通过真空罐的防污染处理后排出。在燃油系统中,燃油流量通过科里奥利质量流量计测量,测量误差 $\leq 0.3\%$ 。

图2为折流燃烧室全环模型,其主要由扩压器、机匣、火焰筒以及涡轮导向器叶片组成。

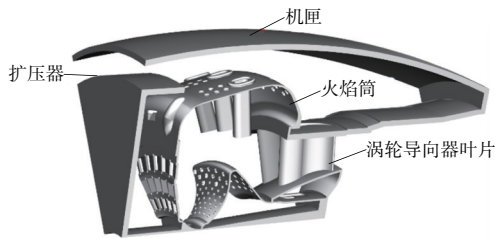


图2 燃烧室模型图

图3为火焰筒的进气区域,主要分为旋流板、前壁面进气缝、外环主燃孔、进气斗、外环掺混孔、内环掺混孔、内环主燃孔。另在火焰筒与外机匣间安装有火炬点火器,火炬点火器的功能主要通过形成射流火焰,进而将火焰筒内的油气混合物引燃。发动机的中心转轴内安装有离心甩油盘,甩油盘通过跟随主轴的高速转动,将燃油从内部集油腔喷射至火焰筒内部。

试验中通过改变进口负压对折流燃烧室点火性能的

影响进行研究。试验中设计了5个不同的压力方案以及压力所对应的海拔高度,详见表1。

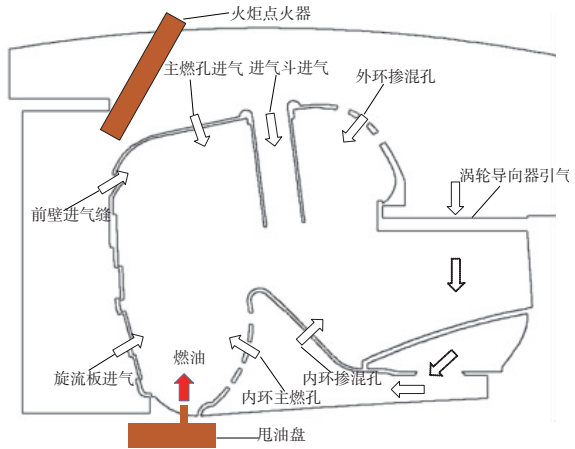


图3 火焰筒分区示意图

表1 点火性能试验研究工况

进口温度/K	进口马赫数	进口压力/kPa	海拔高度/m
300	0.035	56.5	4 660
		60.0	4 200
		65.0	3 600
		80.0	2 000
		101.0	0

点火试验中,在进气的气动参数到达工况后,开始供入燃油,通过启动火炬点火器,进行点火。对比试验段进出口处温度,当进出口温升 $>70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,判断折流燃烧室点火成功,并对相同点火成功时的油气比通过重复成功3次以上点火试验,验证数据可靠性。

2 数值模拟方法

研究中通过数值模拟的方法,获得不同进口负压下折流燃烧室的流场特性,并结合试验结果分析点火性能的变化原因。

数值模拟中研究模型与试验所使用的折流燃烧室模型一致。计算方法采用流动与压力耦合的SIMPLE算法,并采用二阶迎风格式。边界条件为:进口采用质量流量进口,出口采用压力出口,周向两侧壁面选用旋转周期性边界,其余壁面采用绝热固定壁面。

将燃烧室模型中选择过进气斗中心的轴向PM截面作为特征截面,如图4所示。并在PM截面上选取了5条沿径向分布的曲线L1、L2、L3、L4、L5;其轴向位置离火焰筒前壁面分别为 12 mm 、 21 mm 、 30 mm 、 39 mm 、 48 mm ,如图5所示。

针对本文所使用的模型,进行了网格独立性验证。计算中划分了4种数目的网格方案,分别为150万、450万、650万、1 000万,分别标记为G1、G2、G3、G4。在不同网格数目方案中,对于火焰筒内部的进气孔位置都进行了局部加密。在相同数值方法以及边界条件下的计算下,得到了

不同网格数目下 L1 上的轴向速度分布曲线,如图 6 所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。速度在不同网格数目下的分布不同,其中 G1 与 G2 的轴向速度分布与 G4 网格存在较大的偏差,而 G3 与 G4 相比,两者速度分布基本吻合。故 650 万网格能在更低的计算成本下,准确表现出燃烧室流场特征,最终选择 650 万的网格划分方式。

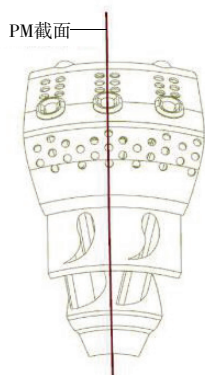


图 4 燃烧室 PM 截面示意图

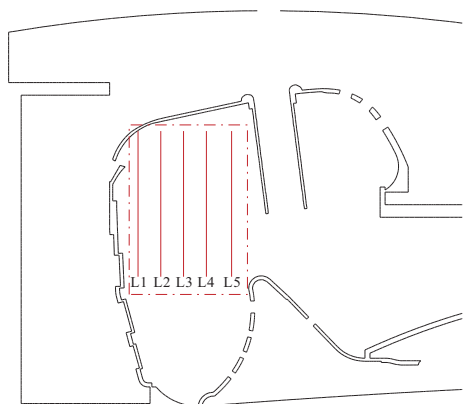


图 5 燃烧室 PM 截面上不同轴向位置处的曲线

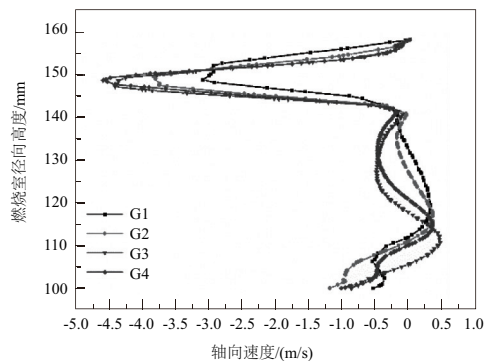


图 6 燃烧室 PM 截面速度分布图

进一步对数值计算方法进行验证,以课题组前期开展的试验结果中燃烧室平均出口温度为基准,将 Standard $k-\varepsilon$ 以及 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的计算结果进行对比,结果如图 7 所示。其中进口压力为常压,油气比为 0.010~0.016,燃烧模型选择 PDF 模型。Standard $k-\varepsilon$ 模型与 RNG $k-\varepsilon$ 模型在不同油气比下,出口平均温度都有较大差别,在油

气比为 0.016 时,二者温差达到了 189.6 K。将两个湍流模型与试验结果进行对比,可以发现 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型与试验结果对比偏差过大,而 Standard $k-\varepsilon$ 模型与试验结果的变化趋势和温度值都基本吻合,因此本文选择 Standard $k-\varepsilon$ 模型作为数值计算的湍流模型。

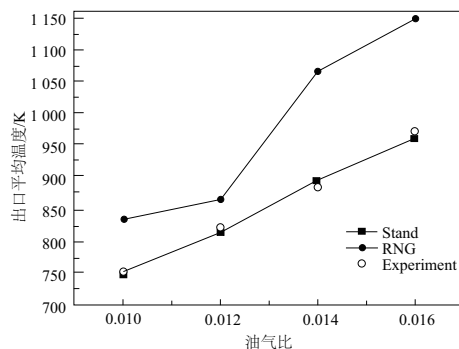


图 7 试验与计算结果的出口平均温度

3 研究结果及分析

图 8 所示为不同进口压力下折流燃烧室的点火油气比。从图 8 可以看出,随压力的升高,极限点火油气比逐渐减小。最高点火油气比为 0.019 5,出现在压力 56.5 kPa 时;最低点火油气比为 0.013,出现在压力 101 kPa 时。以 101 kPa 时点火油气比 0.013 作为基准,80 kPa、65 kPa、60 kPa、56.5 kPa 时点火油气比分别增大了 23.08%、30.77%、46.15%、53.8%。

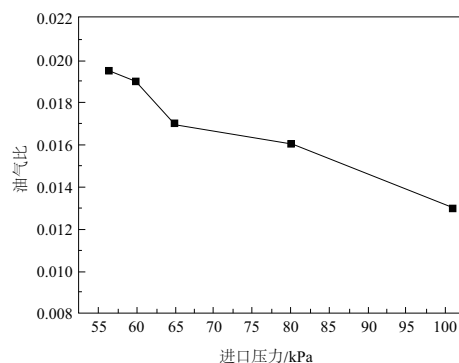


图 8 不同进口压力下的点火性能

对于折流燃烧室,其点火性能^[10]主要与流场结构、速度大小、化学反应速率、油雾的破碎以及蒸发率等密切相关。

通过数值模拟,获得了相同进口温度以及马赫数条件下,不同进口负压的冷态流场结构与速度大小。通过对数值结果研究,发现不同负压条件下的折流燃烧室流场特性都较为相似,现以 101 kPa 与 60 kPa 为例,对燃烧室内的流场结构与速度分布进行分析。图 9 是进口压力为 101 kPa 时燃烧室 PM 截面的速度矢量图。以图中进气斗为中心,将燃烧室内的火焰筒分为两部分:沿流向的上游为主燃区,下游为掺混区。主燃区内有两个回流区 S1、S2;S1 位于火焰筒内径处,由旋流板的 a1 射流与内环主

燃孔的 a2 射流的相互掺混而形成;S2 位于内外环主燃孔中间,由 a1 与 a2 混合的 A 射流、前壁进气缝 b 射流、外环主燃孔 c 射流以及进气斗射流相互作用形成。图中虚线圈内为回流区范围,回流区的中心点轴向与径向速度为 0,水平与竖直点划线分别指向了回流区的中心点坐标,S1 的中心坐标为 (84 mm, 68 mm), S2 的中心坐标为 (102 mm, 121 mm)。

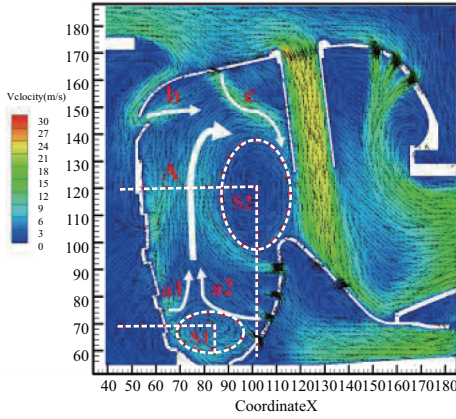


图 9 进口压力 101 kPa 时 PM 截面速度矢量图

图 10 为进口压力为 60 kPa 时燃烧室 PM 截面的速度矢量图。通过对比图 9 可以发现,该压力下燃烧室内部的主燃区与掺混区的分布几乎无差异,主燃区内的射流流动规律、穿透深度和偏转方向、回流区的范围以及中心坐标都与 101 kPa 的流场结构一致。由此可知,在保持相同进口马赫数、温度的条件下,不同进口负压的折流燃烧室的流场结构相似。

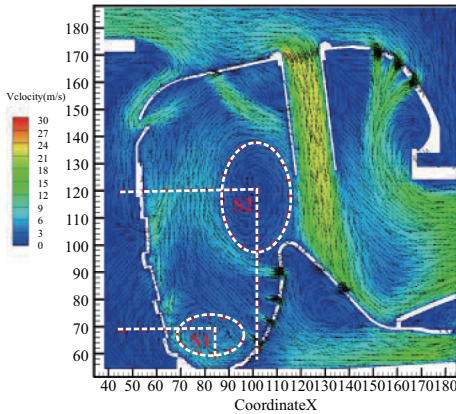


图 10 进口压力 60 kPa 时 PM 截面速度矢量图

进一步分析燃烧室内部速度大小,作不同进口压力下轴向位置 L1-L5 的轴向速度分布,如图 11 所示。从速度分布结果可以看出,在不同进口压力下,燃烧室内部不同位置处的速度分布变化规律相似,速度峰值也具有致性。

综上所述,在保持相同进口马赫数、温度的条件下,进口压力的变化对燃烧室内部的流场结构以及速度分布影响较小,二者不是造成折流燃烧室点火性能变差的因素。

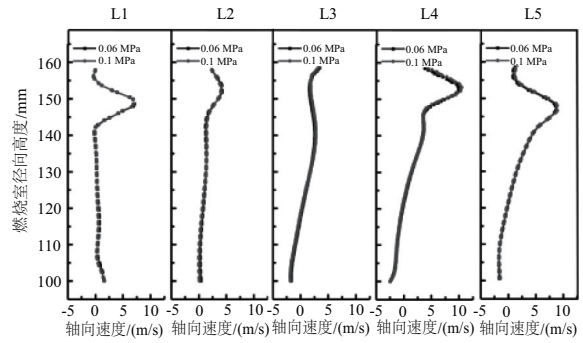


图 11 主燃区范围内轴向速度分布

进一步通过理论分析,研究不同负压条件下,化学反应速率、油雾的破碎以及蒸发率与点火性能的相互关系。

根据燃烧的基本理论:化学反应速率 ω 主要受化学反应过程中的反应物密度、活化能、流动状态^[11] 等因素影响。本研究选择的燃料为 RP-3,是一类多种碳氢化合物的混合物,通过文献[12]可知,对于其化学反应速率 ω 有以下关系式:

$$\omega = AP^l C_F^m C_O^n e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

式中: A 为指前因子; P 为压力;对于 RP-3, l 的取值^[13] 为 0.152; C_F 、 C_O 分别为气相燃油及氧气浓度; E_a 为活化能; R 为气体常数; T 为反应温度。由文献[14]可知,随压力减小, C_O 可视为定值,则式(1)可简化为

$$\omega \propto A' P^{0.152} C_F^m e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

式(2)中的 C_F 与燃烧室中的燃油雾化性能密切相关,而燃油雾化性能主要受初始粒径以及油气之间的相互作用影响。本次研究中的折流燃烧室采用固定转速的甩油盘供油,在不同进口负压下,燃油进入燃烧室内部后的初始粒径不变^[15],则燃油雾化性能主要受气动力的雾化剪切作用^[16],而气动力与液态燃油的相互作用与 We 相关。 We 表征了燃油的易破碎程度,当其值越大,燃油液滴更易发生破碎。其定义式如下所示:

$$We = \frac{\rho u_r^2 d}{\sigma} \quad (3)$$

式中: ρ 为气体密度; u_r 为气液的相对脉动速度; d 为液滴粒径; σ 为表面张力系数。

由理想气体状态方程:

$$P = \rho R_g T \quad (4)$$

将(4)式代入式(3),可得

$$We = \frac{P u_r^2 d}{\sigma R_g T} \quad (5)$$

对于式(5),结合冷态流场特性,可知在进口马赫数、进口温度不变的条件下, u_r 、 σ 、 d 将保持定值;则随压力的降低, We 减小,气动力对燃油液柱的破碎作用力减弱,燃油分布中的大液滴增加,进而导致燃油的雾化性能变差。雾化性能的变差,使燃油中大液滴增多,燃油的平均粒径 S_{MD} 增大。根据液滴蒸发的 D^2 定律,燃油的蒸发寿命 $\tau \propto d_0^2$, d_0 为燃油平均粒径。随粒径及 S_{MD} 的增大,燃油的蒸发时间 τ 增加,进而燃油的蒸发率将降低。将

燃油的蒸发率以 λ_{eva} 表示,则其与气相燃油的 C_F 有以下关系:

$$C_F \propto \lambda_{eva} \quad (6)$$

将上式代入式(2)中,则有

$$\omega \propto A' P' \lambda_{eva} e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

根据式(7)可知,在相同进口温度、油气比条件下时,随进口压力 P 减小, A' 、 E_a 保持不变。 λ_{eva} 减小,化学反应速率降低,燃烧室内单位体积的放热量减小^[17],化学反应时间增加,进而导致所需的点火油气比增加,燃烧室的点火性能变差。

4 结语

本文结合试验与数值模拟完成了不同进口压力条件下折流燃烧室的点火性能研究,详细分析了造成进口压力与点火性能之间的关系,得到如下结论。

1) 随压力的降低,折流燃烧室的点火油气比逐渐增加,点火性能变差。

2) 在相同进口马赫数以及温度的情况下,不同进口压力下折流燃烧室内部流场结构以及速度大小变化较小,二者不是造成点火性能变差的原因。燃烧的化学反应速率减慢、燃油在燃烧室内雾化性能变差以及蒸发率降低,需要更高的油气比提供更多的点火能量来实现点火,这是造成点火性能变差的主要原因。

参考文献:

- [1] 胡正义. 航空发动机设计手册第九分册:主燃烧室. [D]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [2] CHEN J, LI J Z, YUAN L. Effects of inlet pressure on ignition of spray combustion [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018, 2018; 1-13.
- [3] JIANG P, HE X M. Ignition characteristics of a novel mixed-flow trapped vortex combustor for turboshaft engine [J]. Fuel, 2020,

261:116430.

- [4] 董康,何小明,韩启祥,等. 催化点火器高空点火性能的实验研究[J]. 航空动力学报,1997,12:35-37,107.
- [5] 吴泽俊,何小民,洪亮,等. 采用离心喷嘴的单凹腔驻涡燃烧室点火与贫熄特性[J]. 推进技术,2015,36(4):601-607.
- [6] 宫冠吉. 低压亚超混合层燃油雾化特性数值研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):67-70.
- [7] 肖新鹰,王东明,王洪卓. 预燃式火焰稳定器高空低压试验研究[J]. 航空发动机,1999,25(4):22-30.
- [8] 李凡玉,李军,江勇,等. 改善发动机高原地面起动性能的实验研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2012,13(5):25-29.
- [9] 杨谦,林宇震,代威,等. 主燃孔轴向位置对低压点火性能的影响[J]. 航空动力学报,2015,30(5):1057-1066.
- [10] LEFEBVRE A H, WHITE LAW J H. Gas turbine combustion [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1984, 5(4):228.
- [11] 黄亚坤,何小民,朱焕宇,等. 进口速度分布对钝体稳定器贫油点熄火性能的影响研究[J]. 推进技术,2020,41(8):1814-1822.
- [12] 肖保国,杨顺华,赵慧勇,等. RP-3 航空煤油燃烧的详细和简化化学动力学模型[J]. 航空动力学报,2010,25(9):1948-1955.
- [13] CHEN B H, LIU J Z, YAO F, et al. Ignition delay characteristics of RP-3 under ultra-low pressure (0.01 ~ 0.1 MPa) [J]. Combustion and Flame, 2019, 210:126-133.
- [14] 徐薇,陈华. 不同海拔高度大气压和氧含压的变化与对比探讨[J]. 西藏科技,2018(3):59-61.
- [15] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [16] 徐圃青,王家骅,徐圃青. 低压下直流式喷嘴雾化特性试验研究[J]. 航空动力学报,1996,11:51-54.
- [17] 李庆. 基于凹腔火焰稳定器的亚燃冲压发动机燃烧室点火过程研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.

收稿日期:2021-03-01

(上接第 182 页)

参考文献:

- [1] 孙恺廷,朱隽垚,于存贵,等. 工业机器人三维虚拟监控系统的设计与实现[J]. 机械制造与自动化,2020,49(5):154-156,210.
- [2] 孙晓军,宋代平,王薪宇. 机器人碰撞观测器设计与实现[J]. 机械科学与技术,2020,39(10):1483-1488.
- [3] ZHAO R F, ZHANG Z, CUI J Q. The kinematics modeling and simulation of a mechanical arm in nuclear industry with postpositional drive[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 496/497/498/499/500:754-759.
- [4] 魏丽君,吴海波,刘海龙,等. 基于 D-H 算法的移动机械臂正

运动学研究[J]. 计量与测试技术,2020,47(10):1-5.

- [5] RUN X. The dynamics of torque and force on hammer with six freedoms by lagrange equation in robotic arm [J]. Social Science Learning Education Journal, 2020, 5(8):301-309.
- [6] KHODAEI H, RASSIAS T M. Set-valued dynamics related to generalized Euler-Lagrange functional equations [J]. Journal of Fixed Point Theory and Applications, 2018, 20(1):1-8.
- [7] 袁荣. 反对称实矩阵的性质定理及推广[J]. 吉林教育, 2017(42):16.

收稿日期:2021-02-01