

旋流器形式对双环腔燃烧室点火性能的试验研究

李茂,钟世林,马存祥,郭凯,周昊航

(中国航发四川燃气涡轮研究院,四川成都 610500)

摘要:为了提高双环腔主燃烧室在大流量、宽广工作范围内的贫油点火边界,对值班级单级轴向旋流器及双级径向旋流器两种形式的旋流器进行冷态流场及油雾场的数值模拟和贫油点火的试验研究。结果表明:两种旋流器形式下,流场均为三涡结构。相比值班级为单级轴向旋流器的燃烧室,双级径向旋流器的燃烧室形成的回流区直径大,长度不变,回流强度增大30.6%,燃油浓度增加,贫油点火边界在3个火焰筒压降下变宽40%以上,且均存在最佳火焰筒压降,使得贫油点火边界最宽。

关键词:双环腔燃烧室;旋流器;流场;点火

中图分类号:V233.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)03-0227-05

Experimental Research on Ignition Performance of Double-annular Combustor with Swirler Type

LI Mao, ZHONG Shilin, MA Cunxiang, GUO Kai, ZHOU Haohang

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to improve the lean ignition fuel boundary of double-annular combustor in large flow and wide working range, numerical simulations of cold flow field and fuel mixed field and lean ignition experiments were carried out for two types of swirlers, single-stage axial swirler and double-stage radial swirler on pilot stage. The results show that: under the two swirler situations, the combustor flow field is a three-vortex structure. Compared with the combustion with the single-stage axial swirler, the diameter of the recirculation zone formed by the combustor with the double-stage radial swirler increases, the length remains unchanged, and the recirculation intensity increases by 30.6%, the fuel concentration increases. The lean fuel ignition boundary is widened by more than 40% at each the pressure drop of the dome, and there is an optimal dome pressure drop making the lean fuel ignition boundary widest.

Keywords: double-annular combustor; swirler; flow field; ignition

0 引言

双环腔燃烧室属于径向分级燃烧室,20世纪末,NASA制定了RTA计划,该计划将双环腔燃烧室作为涡轮机组合循环发动机的主燃烧室^[1],能够实现宽范围工作。双环腔燃烧室是将火焰筒头部做成径向排布的结构,通过中心隔离环把火焰筒分隔成内侧的主燃级、外侧的值班级两个并行燃烧区,从而实现分级分区燃烧。涡轮机组合循环发动机工作马赫数范围最高可达3及以上,在大体积流量进口、宽广工作范围的条件下,主燃烧室采用径向分级的双环腔构型,不同燃烧区域发挥不同的功能,能够满足涡轮机组合循环发动机工作的要求。

双环腔燃烧室由于构型上与单环腔燃烧室有较大差异,主要体现在组织燃烧的环腔(火焰筒高度)大以及两个燃烧区结构。这样在起动、小状态下,只有值班级工作,主燃级只有空气流动,并与中心体一起对值班级回流区产生影响,尤其是点熄火工况,燃烧室在低压、低温、高燃烧室进口速度下容易出现点火困难的问题。

国内外学者对点火特性及机理进行了大量研究,采用数值模拟动态点火过程,并针对点火问题提出了相应的点火模型,对点火延迟时间、高空再点火规律等进行了研究^[2-6]。姜磊等^[7]研究了喷嘴位置对点火性能的影响,发现其影响很小;刘桂桂等^[8]研究了旋流杯一级旋流数对燃烧室点火性能的影响,结果表明:旋流杯一级强旋流有利于点火;刘威等^[9]发现值班级进气温度和速度增加,点火特性更好;康尧等^[10-11]发现文氏管喉道直径过大会使雾化性能变差,使点火性能恶化;并对单头燃烧室的旋流杯套筒混合段长度进行了试验研究,结果表明套筒混合段长度过长会使贫油起动点火油气比增加,不利于点火性能。

国内外众多学者对单环腔燃烧室点火进行了大量的基础和应用研究,但对于在大流量、高进口速度下的双环腔燃烧室点火性能研究较少。本文针对双环腔燃烧室点火性能提升,设计了相同旋流数的单级轴向旋流器及双级径向旋流器,通过数值模拟研究两种旋流器轴向或径向速度、回流区大小、油雾场分布的差别,再通过试验验证两种旋流器贫油点火性能,为双环腔头部设计提供一定的参考。

1 试验方案设计

本文采用的双环腔燃烧室,外环腔与内环腔的头部比例为 2:1,经过简化后,双环腔燃烧室的计算物理模型如图 1 所示。

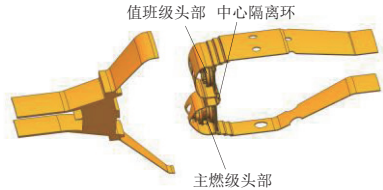


图 1 双环腔燃烧室简化模型

值班级单级轴向旋流器及双级径向旋流器结构如图 2 所示。主燃级旋流器保持不变,两种旋流器的设计参数见表 1 和表 2。对有效流通面积及旋流数作了一定的控制,使得有效流通面积误差控制在 8% 以下,而综合旋流数控制在 0.6 附近,避免油气比及旋流数不同对冷态流场及点火性能产生影响。

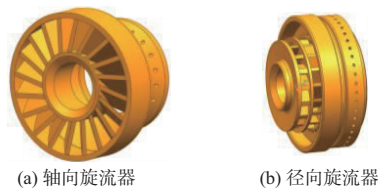


图 2 旋流器结构示意图

表 1 轴向旋流器设计参数

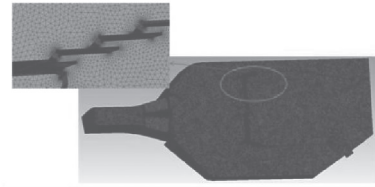
参数	A_{Cd}/mm^2	叶片数/个	叶片安装角/ $^\circ$	旋流数 S_n
数值	190.4	20	38	0.609

表 2 径向旋流器设计参数

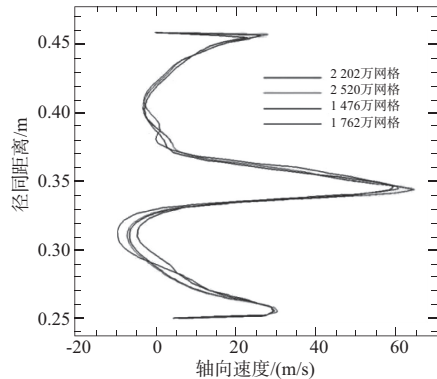
参数	一级 A_{Cd}/mm^2	二级 A_{Cd}/mm^2	总 A_{Cd}/mm^2	一级叶片安装角/ $^\circ$
数值	68.54	82.61	176.98	50
参数	二级叶片安装角/ $^\circ$	一级叶片数/个	二级叶片数/个	综合旋流数 S_n
数值	60	16	18	0.61

2 仿真计算及结果分析

在点火试验之前,对两种旋流器的冷态流场进行仿真模拟,以 ANSYS Workbench 软件对模型进行网格划分,采用四面体非结构化网格。网格划分及网格无关性验证如图 3 所示,经过网格无关性验证,使得网格数量维持在 2 200 万左右。



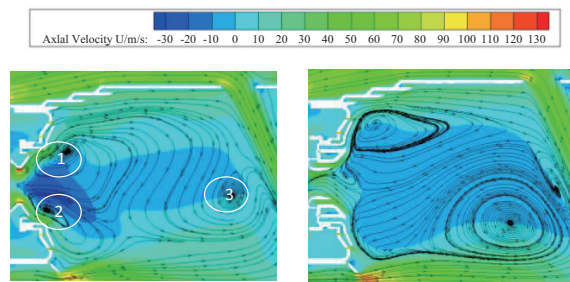
(a) 网格部分



(b) 网格无关性验证

图 3 网格划分及网格无关性验证

图 4 为两种旋流器形成的轴向速度云图及流线图,两者冷态流场存在明显差别:在图 4(a)中形成了较为对称的上下涡区(区域 1 为上涡区,区域 2 为下涡区),在回流区的尾部(区域 3 位置)由上涡区的部分回流及部分中心隔离环射流共同形成了 3 位置处的小涡,从整个流场结构来看,3 位置处的小涡不仅会影响回流流量,同时对于油雾的二次雾化也没有帮助,会影响燃烧室的点火性能。在图 4(b)中,形成了明显不对称的上、下涡区,且下涡区明显大于上涡区。其主要原因是,在中心隔离环射流的影响下,下涡区涡心向射流下游方向移动,下涡区增大,最终形成了不对称的流场结构;在主燃孔射流与下涡区之间也形成了一个涡,会造成压力损失。



(a) 轴向旋流器

(b) 径向旋流器

图 4 不同旋流器形式速度云图及流线图

图 5 展示了两种旋流器形式下的回流区。从图中可以看到,采用轴向旋流器得到的回流区较为狭小,形成的回流更加靠近旋流器的喉部,可能引起文氏管和喷嘴的积碳,甚至引起文氏管烧蚀的情况。而采用径向旋流器得到的回流区宽大,两个回流区的长度基本一致,相对来说,拥有更宽大的回流区,有利于更多的高温燃气回流,点燃新鲜混气,提高点火性能。

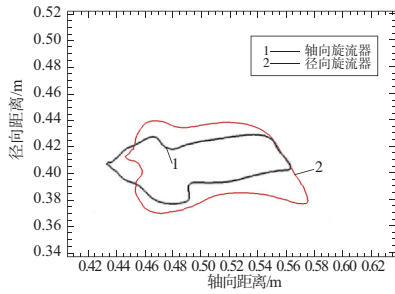


图5 不同旋流器形式回流区大小

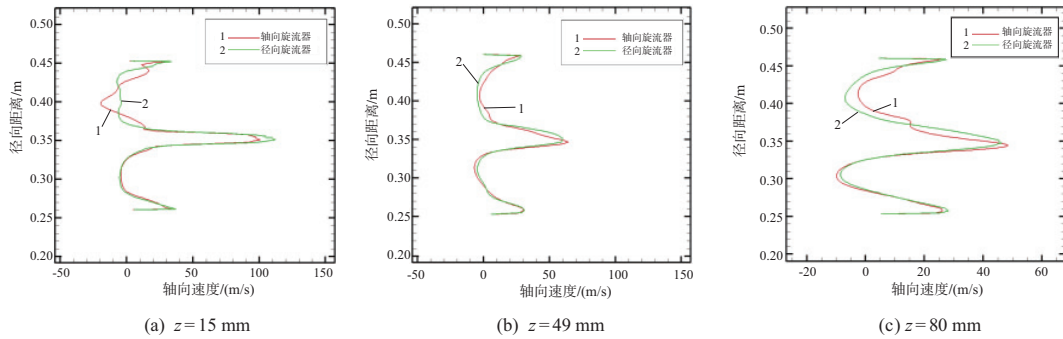


图6 不同旋流器形式沿径向的轴向速度

图7展示了在距旋流器出口15mm截面处的沿径向的速度分布及回流强度的对比,其中回流强度^[12]用涡心截面的回流量与顺流量的比值(Backflow ratio)来表示。从图中可以看到,在径向速度为0的虚线两侧有明显的两个峰值,轴向旋流器径向速度的峰值更大,且与径向旋流器的峰值方向正好相反,表明轴向旋流器涡心在轴向15mm的截面之前而径向旋流器形成的涡心在截面之后,导致径向速度方向相反。对比两者在回流强度上的差异,相比采用轴向旋流器,采用双级径向旋流器形成的回流强度增大了30.6%,与喷嘴出来的燃油液滴剪切作用更强,二次雾化效果更好,有利于燃烧室的点火性能。

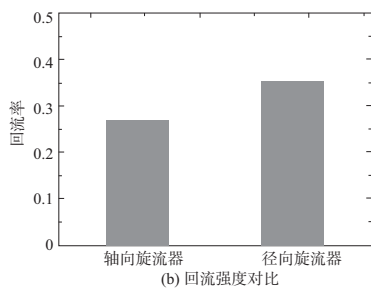
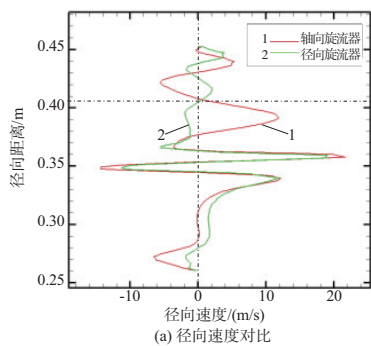


图7 不同旋流器形式径向速度及回流强度对比

图6展示了距旋流器出口轴向15mm、49mm、80mm处旋流器中心截面的轴向速度分布。从图6(a)中看到,在径向距离0.406m处也就是值班级旋流器中心轴线处,采用轴向旋流器形成的回流速度更大,这主要是由于轴向旋流器形成的涡心无论在轴向还是径向方向上离旋流器出口都更近,导致在此处的逆压梯度明显要大于径向旋流器形成的逆压梯度,因此轴向的回流速度更大;随着轴向距离的增加,在图6(b)、图6(c)中的轴向速度都是径向旋流器的更大。

图8为在两种形式旋流器下得到的燃油浓度及分布云图。从图中可以看到,在图8(a)中,燃油主要分布在轴向旋流器中心轴线附近窄小的区域中,在靠近火焰筒外环的区域,燃油浓度基本为0,这样的燃油浓度分布明显不利于燃烧室的点火;在图8(b)中,燃油基本对称分布在径向旋流器中心轴线两侧,在外环一侧的燃油浓度略高,在径向方向上的分布也更宽,充满了整个燃烧室的主燃区域,与图8(a)相比,这样的燃油分布有利于点火。因此采用径向旋流器燃油的雾化蒸发效果更好,燃油分布更为均匀。

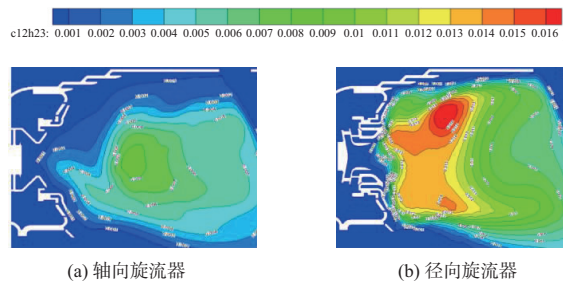


图8 不同旋流器形式燃油浓度及分布云图

图9展示了离旋流器出口15mm、49mm(点火器位置)、80mm处沿径向分布的燃油浓度。从图中可以发现,燃油分布在旋流器中心轴线0.406m的两侧,采用轴向旋流器的浓度场中,燃油浓度最高的是中心轴线位置,然后沿着两侧逐渐减小,而在采用径向旋流器的浓度场中,燃油在轴线位置处浓度并不是最高的,而是在两侧呈现两个峰值,且峰值大小不一致。这与流场漩涡不对称相关,在轴向49mm处的截面,也就是点火电嘴中心轴线所在位置,右侧的峰值更大,也就是靠近火焰筒外环的燃油浓度更高;与采用轴向旋流器的油雾场相比,采用径向旋流器的油雾场更加有利于燃烧室的点火性能。

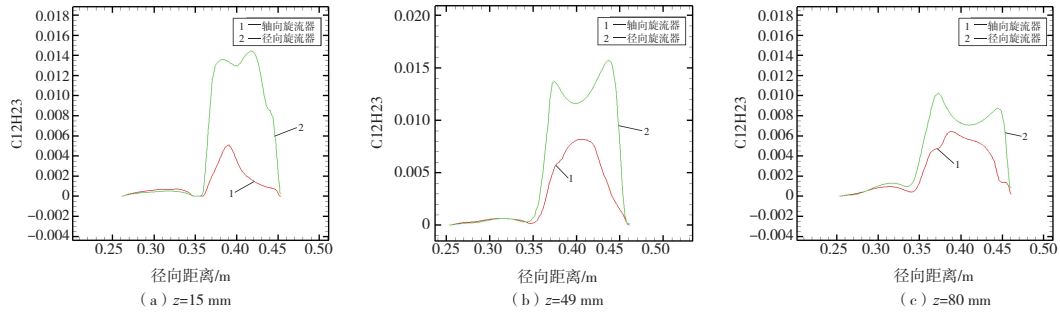


图9 不同旋流器形式轴向位置的燃油浓度分布

3 点火特性试验及结果分析

3.1 试验件

本文采用的双环腔燃烧室试验件主要由进口转接段、试验段及后转接段 3 个部分组成,试验段主要由扩压器、值班级旋流器(单级轴向旋流器及双级径向旋流器)、主燃级旋流器、电嘴、中心隔离环、火焰筒、内外环冷却通道及机匣等组成;试验段通过前后转接段与设备管道连接,试验件部分实物图如图 10 所示。

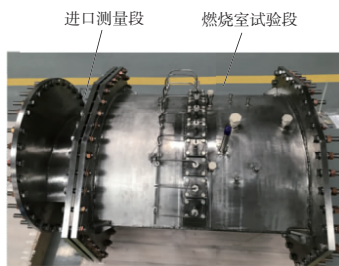


图 10 试验件实物图

3.2 试验系统

点火试验空气系统的原理图如图 11 所示。该系统主要由电动调节阀、电加热器、混合器、孔板流量测量装置、点火试验台、冷凝器、除沫塔等构成,其空气供气系统原理如下:中压进气经过电动调节阀后在电加热器中获得热量,温度上升后在混合器中与低压进气混合,经过阀门及孔板流量测量装置后进入点火试验台进行点火试验,排出的高温燃气经过冷凝器冷却降低温度后,通过除沫塔后排到大气环境中。

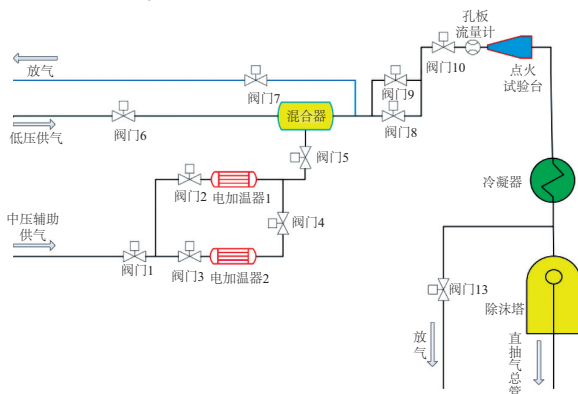


图 11 点火试验空气系统原理图

3.3 点火试验结果分析

根据试验测得的试验结果绘制得到贫油点火边界,图 12 为双环腔燃烧室在不同旋流器形式获得的贫油点火边界。

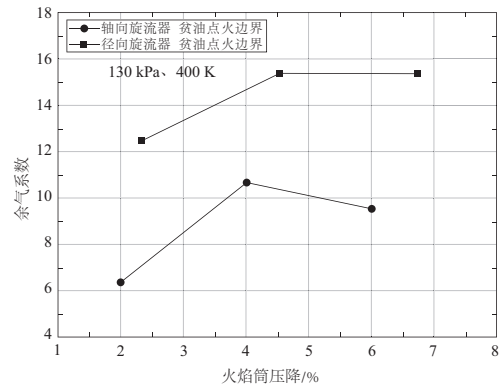


图 12 贫油点火边界对比示意图

中火焰筒压降百分比定义为: $\Delta P_1/P_{31,av}$,其中 ΔP_1 表示火焰筒压降, $\Delta P_1 = P_{31,av} - P_{S4,av}$,即火焰筒进口总压减去火焰筒出口静压(式中下标 S 代表静压);从图中的点火边界线可以看出,在两种旋流器形式下,随着总压损失增大即火焰筒压降增大,点火边界都是先增大后减小,说明存在一个最佳火焰筒压降使得点火边界最宽;对于贫油点火边界,带轴向旋流器燃烧室最佳火焰筒压降在 4% 左右,带双级径向旋流器的燃烧室的最佳火焰筒压降在 4.5% 左右,能使得贫油点火边界最宽。

相较于带单级轴向旋流器的燃烧室,带双级径向旋流器燃烧室的贫油点火边界不论火焰筒压降大小都显著变宽,最大贫油点火边界拓宽 44.2%。其主要原因在于:旋流器的不同导致主燃区流场结构相差较大,双级径向旋流器形成的回流区直径、回流速度、回流量更大,从而使得燃油液滴与气流之间的剪切作用更强,燃油雾化增强,同时燃油基本充满了整个主燃区,使得点火更为容易,贫油点火边界拓宽。

4 结语

本文通过数值模拟及试验手段研究了两种形式值班级旋流器的冷态流场及贫油点火边界,得出如下结论:

- 1) 两种旋流器形式下,燃烧室流场均为三涡结构,造

成较大的压力损失,除在旋流器出口附近以外,带双级径向旋流器的燃烧室轴向速度更大;

2) 相比于单级轴向旋流器,带双级径向旋流器的燃烧室回流区直径增大,长度相当,回流强度增大 30.6%,燃油浓度增加,燃油充满整个主燃区,点火时有利于高温燃气回流,点燃新鲜混气,形成稳定的点火源;

3) 贫油点火试验表明,存在一个最佳火焰筒压降,带轴向旋流器的燃烧室最佳火焰筒压降为 4%,带双级径向旋流器燃烧室的最佳火焰筒压降为 4.5%;对比带单级轴向旋流器的燃烧室,带双级径向旋流器燃烧室的贫油点火边界在 3 个火焰筒压降下变宽了 40%以上,即在恶劣工况下,更容易点火成功。

参考文献:

- [1] MCNELIS N, BARTOLOTTA P. Revolutionary turbine accelerator (RTA) demonstrator [C]//AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference. Capua, Italy. Reston, Virginia: AIAA, 2005: 3250.
- [2] BOILEAU M, STAFFELBACH G, CUENOT B, et al. LES of an ignition sequence in a gas turbine engine [J]. Combustion and Flame, 2008, 154(1/2): 2-22.
- [3] JONES W P, TYLISZCZAK A. Large eddy simulation of spark ignition in a gas turbine combustor [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2010, 85(3/4): 711-734.
- [4] STEIL U, BRAUN-UNKHOFF M, AIGNER M. An experimental

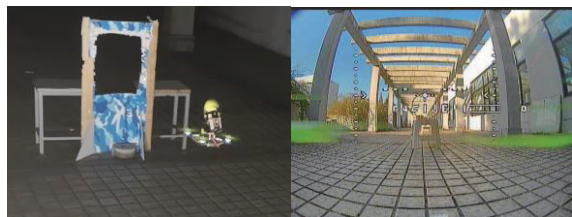
and modelling study on the autoignition of kerosene and surrogate fuel mixtures [C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2008: 973.

- [5] 汤朝伟,李建中,金武,等. 主燃级旋流数影响三级旋流燃烧室流动与燃烧特性试验 [J]. 航空动力学报, 2021, 36(3): 634-645.
- [6] READ R, ROGERSON J, HOCHGREB S. Relight imaging at low temperature, low pressure conditions [C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2008: 957.
- [7] 姜磊,熊健,肖波,等. 旋流杯结构及进气参数对燃烧性能的影响 [J]. 推进技术, 2020, 41(3): 605-614.
- [8] 刘桂桂,林宇震,胡好生,等. 旋流杯一级旋流数变化对点火性能的影响 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(6): 1117-1121.
- [9] 刘威,王成军,于雷,等. 中心分级燃烧室燃烧性能试验研究 [J]. 中国测试, 2019, 45(9): 149-155.
- [10] 康尧,林宇震,霍伟业,等. 双级旋流杯结构变化对点火特性的影响研究 [J]. 推进技术, 2014, 35(5): 675-680.
- [11] 康尧,林宇震,蒋尧,等. 旋流杯套筒混合段长度对点火特性的影响 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(9): 2095-2103.
- [12] 代威,林宇震,张弛. 第 2 级径向旋流器旋流数对燃烧室点火和贫油熄火性能的影响 [J]. 航空动力学报, 2015, 30(5): 1092-1098.

收稿日期: 2022-01-13

(上接第 217 页)

的图像时,可安装侦查模块,可以 FPV 飞行控制无人机,用运动相机来获取画面,如图 12 所示。在需要达到物资的运输功能时,可以安装发射模块,运输小型物品如药品等,并且无需降落即可完成物品的投递任务。



(a) 侦查飞行画面 (b) 运动相机画面

图 12 穿越飞行障碍图和 FPV 运动相机中获取的画面

3 结语

综上所述,在实验过程中,实现了通过桶内折叠收纳及弹出,最后完成遥控展开并起飞,穿越障碍区投放载荷并安全返回。通过任务载荷的变化及多机的投送,能够完成协同、集群飞行。此研究也是一种无人机技术创新和尝试,无论在理论研究及军事应用中都具有有一定的借鉴价值。

参考文献:

- [1] 强岁红. 无人机发展的启示 [J]. 飞机工程, 2007(3): 5-8.
- [2] 王文雅. 各国无人机状况简介 [J]. 长岭技术, 2006(2): 53-56.
- [3] 袁新波,江多琨,周前进,等. 某型迫击炮射无人机应用研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 105-109.

- [4] 赵林. 公共图书馆 STEAM 教育研究 [J]. 图书馆学报, 2020, 42(3): 17-20.
- [5] 王文建. 四旋翼无人机控制系统设计 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [6] 王建华. 炮兵防空兵侦察技术导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [7] 张尧. 无人机载雷达结构轻型化设计与成型技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [8] 何梦林. 无人机的故障诊断与容错控制研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [9] 李华锋,王晨阳. 旋转式小型立体停车库设计 [J]. 技术与市场, 2019, 26(5): 170.
- [10] 黄蜜. 浅谈自动控制系统中控制电机的选用 [J]. 科学与信息化, 2020(23): 145-146.
- [11] 张明春. 基于 ULN2003 的步进电机控制器设计 [J]. 数码设计(上), 2019(7): 143-144.
- [12] 梁亮. 远程监控机器人专家服务系统移动载体设计 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [13] 孙瑞. PWM 技术在电机驱动控制中的应用 [J]. 科学技术创新, 2017(28): 54-55.
- [14] 周忠辉. 步进电机驱动的实现方法 [J]. 仪表技术与传感器, 2004(11): 61-62.
- [15] 王丹. 野外维护元器件智能管理系统的设计与实现 [D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2017.
- [16] 贺安之,阎大鹏. 现代传感器原理及应用 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995.

收稿日期: 2021-12-29