

文章编号:1674-8190(2020)03-302-06

硬式空中加油机发展趋势及设计技术分析

王秀香,高旭,高亚奎

(航空工业第一飞机设计研究院 总体气动研究所,西安 710089)

摘要:空中加油技术在一定程度上体现了一国空军实力,该技术一直受到广泛关注。本文综述了硬式空中加油机的发展情况,提出了硬式空中加油机的划代概念。结合五代空中加油机的特点和性能,给出硬式空中加油机的主要技术特征,指出硬式空中加油机的发展趋势,总结出硬式加油装置研究的总体布局设计技术、结构和机构设计技术、控制系统设计技术等关键技术,为未来装备变革提供技术支撑。

关键词:硬式空中加油装置;关键技术;空中加油机

中图分类号:V271.4⁺94

文献标识码:A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.03.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Development Trend and Design Technology of Hard Type Air Tanker

WANG Xiuxiang, GAO Xu, GAO Yakui

(General Configuration Aerodynamic Institute, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Air refueling technology reflects the strength of a country's air force to a certain extent, and has been widely concerned. The development history of hard type air tanker is summarized in this paper. Then a concept of generation about hard type air tanker is suggested. In combination with the characteristics and performance of the fifth generation air tanker, the main technology features of hard type air tanker are given, and the development trend of hard type air tanker is pointed. The overall layout design technology, structure and mechanism design technology, control system design technology and other key technologies of hard type air tanker are summarized, which can provide the technical support for future equipment reform.

Key words: hard type air-refueling device; key technology; refueling tanker

0 引言

现代空中加油技术已经给空中作战的力量部署、机动和使用带来了革命性的变化,增强了航空兵的远程作战、快速反应和持续作战能力,使整个空战能力提升了一个新台阶^[1]。

鉴于当前我国空中作战能力的拓展,有必要对硬式加油机以及硬式加油装置发展历程进行研究。本文分析硬式空中加油机的发展趋势,提炼出硬式加油装置设计主要关键技术,以期为我国发展和建立大型空中加油体系提供技术支持。

收稿日期:2019-09-13; 修回日期:2020-03-04

通信作者:王秀香,86422806@qq.com

引用格式:王秀香,高旭,高亚奎. 硬式空中加油机发展趋势及设计技术分析[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 302-307,315.

WANG Xiuxiang, GAO Xu, GAO Yakui. Analysis of development trend and design technology of hard type air tanker[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 302-307,315. (in Chinese)

1 硬式空中加油机简介

硬式加油设备也称为伸缩管式空中加油设备,这一设备最早是美国波音公司研制的,在1949年末开始投入市场应用。其主要结构是一根刚性伸缩管,位于机体内部,在需要实施空中加油任务的情况下伸出来,伸缩管中包含一个 130° 的舵形面,可以实现在一定范围内的伸缩活动。在相关任务执行的过程中,受油机在信号指引下逐渐向加油机靠近,当距离达到一定数值时,加油机操作员可以进行操作,使得双方加油管能够连接,并锁定加油杆。完成加油任务后,受油方减速慢行,这时加油杆锁解开,两机随即分离^[2]。针对硬式加油机,美军空军实验室设计“三步走”战略:第一步是驾驶硬式加油机,构建加油平台,实施空中加油试飞;第二步是驾驶硬式加油机,通过变稳定性飞行模拟器实施空中加油试飞;第三步是无人机空中加油试飞。现阶段,美国空军实验室已经完成第一步的设计工作,正在积极开展第二步研究设计工作^[3]。2012年9月,美国国防部预防研究局已经完成了两架改进型硬式加油机的飞行测试工作,硬式空中加油技术相应的理论研究方面也获得了一定的进展,例如,英国Bristol大学的Thomas Richardson提出的应用于增大算法可容许运动范围的组成图像正反算法,C. Giampiero教授以机器视觉为基础针对加油机的具体特征进行提取和配对研究^[4]。

我国在加油机研究方面尚处于起步阶段,但也取得了一定成效。1997年,卢成文^[5]针对硬式空中加油杆的建模和仿真模型,研究基于输入和输出非线性反馈线性方案对加油机的空中飞行姿态进行控制和解耦,为加油机的控制方案提供了参考;2000年,槐之杰^[6]以国外先进技术和经验为基础,研究了加油机尾部涡流场建模方案,为硬式加油机的相关加油技术奠定了理论基础;2002年,李浩源^[7]针对战机的保姆——空中加油机,对于硬式加油机的近距离导航问题进行了分析,提出基于双目视觉的导航算法,并通过三维实景仿真,进行了加油杆的精确测量和位置状态等信息的检测方案设计;2008年,赵仲武^[8]以KC-45空中加油机为例,

分析空中加油机的特性。

近年来,对于空中加油机的研究也比较多,主要研究集中在空中加油机的技术经验总结和未来发展展望方面。2014年,萧萧^[9]基于美俄大型空中加油机研究两国在空中加油机技术上的异同,分析我国空中加油机在其中可以借鉴的技术和经验;2017年,程龙^[10]对于世界空中加油机的发展史进行了阐述,进一步分析了空中加油机的发展动态和方向,研究空中加油机的未来发展趋势;2017年,车海林等^[11]提出空中加油机的发展使命,进一步奠定空中加油技术的研究基础和方向;2018年,顾俊^[12]研究分析了空中加油机的特点和发展趋势,为我国的空中加油机研究奠定了方向。

就硬式空中加油机的主要研究优势来看,研究总结出现阶段的硬式空中加油具有以下优势:伸缩管由刚性材料组成,在加油过程中受到阵风、紊流等对其影响较小,且在加油过程中不会产生太大的变形;另外,伸缩管半径较软管大,能够一次性快速完成大量加油,尤其是在战争中,能够快速完成加油极为重要;此外,加油机上有专门的加油员来操纵伸缩管完成与受油机的对接过程,降低了受油机驾驶员编队飞行的难度,节省了飞行员训练成本;除了采用加油员手工完成对接外,硬式受油系统还有辅助的自动控制系统来完成对接,为实现硬式空中加油自动化提供了条件,并在紧急情况下减小损失。基于这些优点,硬式空中加油技术是未来空中加油的发展趋势,在未来作战使用中将发挥越来越重要的作用^[13]。

2 硬式空中加油机发展

美国空军自成立以来,非常重视空中加油机的发展和运用,巅峰时期曾装备各型空中加油机1300余架。美国空军强大的空中加油能力现已成为美国实现“全球警戒、全球到达、全球力量”的关键性支援保障力量^[4]。本文以典型机型为代表进行分析,提炼硬式加油装置发展的主要技术特征。

2.1 第一代硬式空中加油机

朝鲜战争期间,美国空军要求波音公司设计一

套气动控制的、可以转动和伸缩的硬式加油管,称之为伸缩管式加油系统,即硬式加油系统。从而诞生了第一代硬式空中加油机 KB-29P(如图 1 所示^[14]),在 20 世纪 50 年代被美国空军大量使用。

KB-29P 加油操作员在飞机尾部炮塔中操作硬式伸缩管的 V 形小翼,将加油嘴伸到受油机身上的受油口中。伸缩管根部装有一组指示信号灯,帮助受油机辨认与加油机的相对位置。

第一代硬式空中加油机典型特征是以轰炸机为改装平台,受到载机有效载荷的限制,只能提供有限的外供油量。



图 1 第一代硬式空中加油机(KB-29P)

Fig. 1 First generation hard type air tanker (KB-29P)

2.2 第二代硬式空中加油机

新研制的飞机速度更快、航程更远,KB-29P 已经不能满足美国空军的需求,并被新研制的 KC-97 所取代(如图 2 所示^[15])。KC-97 所做的改进主要是更快的飞行速度和改进的伸缩管位置,以便于更准确的实施加油。KC-97 仍然是一架螺旋桨式飞机,在 1956 年~1965 年服役。

第二代硬式空中加油机典型特征是在运输机上进行改装,有效的外供油量增加,并为当时速度快的受油机进行加油。



图 2 第二代硬式空中加油机(KC-97)

Fig. 2 Second generation hard type air tanker (KC-97)

2.3 第三代硬式空中加油机

由于具有远航程和大运载能力的大型喷气式客机出现, KC-97P 很快于 1957 年被 KC-135 喷气式空中加油机取代(如图 3 所示^[16])。KC-135 的主要任务是给远程轰炸机空中加油,同时向空军、海军、海军陆战队和盟国飞机提供空中加油支援。

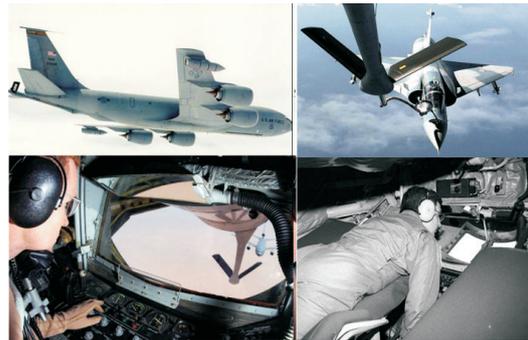


图 3 KC-135 加油机及其后部加油控制舱

Fig. 3 KC-135 tanker and its rear refueling control module

KC-135 主要的空中加油手段是机身后部的硬式加油装置。在伸缩套管的末端安装一个软管锥套适配器(Boom Drogue Adapter,简称 BDA),以满足装备软式受油的飞机加油需要。加油操作员在机身后部控制舱内操纵伸缩加油管。KC-135 的加油系统全部位于飞机机舱地板以下,因此飞机机舱可以用来运送货物或人员^[16]。

第三代硬式空中加油机具有一定的运输能力,配置了先进的硬式加油装置系统,并设置了专用加油操作员,但是加油操作环境简陋,加油环境、加油方式、加油点单一。

2.4 第四代硬式空中加油机

为了实现空军力量尽可能快速地投入战场,美国空军提出了“先进加油/货运飞机”(Advanced Tanker/Cargo Aircraft,简称 ATCA)计划,要求新的加油机在实现更高的空中加油能力的同时,具有较大的载货能力,由此发展出了在 DC-10 基础上改进而来的 KC-10 加油机(如图 4 所示^[17])。

KC-10 加油机的硬式加油系统具有操作安全

性、效率和加油率等方面的优势。其设计特点还包括:更大的控制包线,独立的断开能力,数字电传主动控制,自动卸荷,位置速度感知,轻便的精确手动控制和操作员选择的断开限制。

第四代硬式空中加油机兼有一定的货物运输能力,向软式、硬式三点加油方向发展,具有先进的硬式加油装置系统,加油员可直接观察到受油机,操作环境舒适^[17]。



图4 KC-10加油机及其硬式空中加油装置

Fig.4 KC-10 tanker and its refueling boom

2.5 第五代新型多用途空中加油机

为了在未来逐步替换结构早已老化的 KC-135 等现有加油机机型,美军提出了第五代 KC-X 空中加油机计划^[4],要求必须具有软式和硬式加油能力,空中受油能力,货物、人员运输和医疗后送能力,指挥、控制和通信能力,网络中心能力和高生存能力等,加油员操作环境具有良好的人机工效。目前主要机型有 KC-30 和 KC-46A。

KC-30(如图5(a)所示^[18])基于空客 A330-200 多用途加油机研制,第一架 KC-30 于 2007 年 9 月 25 日完成首飞。其多点式加油系统由加油吊舱、机身软式加油管和机体尾部的硬式加油装置组成。两套数字式 FRL 905E 加油吊舱最大加油速率为 1 900 L/min,可兼容美国和北约具有软式加油能力的飞机。先进的硬式加油系统使用电传控制技术,包括自动卸荷系统、独立断开功能和冗余作动器等,硬式加油装置的加油运动包线可根据各种受油机自动设定,加油操作方式具有良好的人机界面,对加油操作员提供了全天候的三维视景增强系统^[17]。



(a) KC-30 加油机方案



(b) KC-46A 加油机方案

图5 第五代新型多用途加油机方案

Fig.5 Project of the fifth generation new type multipurpose tanker

波音公司的 KC-46A 加油机方案(如图5(b)所示^[18])基于波音 767-200LR 远程货机,装备电传操纵的硬式加油装置和新型加油吊舱,以及机身中线加油平台,并可以对这三个软式加油点进行任意组合配置;采用移植的波音 787 客机驾驶舱,以及视频遥控加油系统,使用摄像机为操纵员提供三维监控加油情况。波音公司对 KC-46A 加油机的伸缩套管的处理更加细腻,零部件比原来少 2 600 个,采用新型伸缩管和滚轮系统,改进了伸缩套管的绞车,加装电操纵系统、自动减荷和位置传感器及独立的脱离系统等新部件。

2.6 硬式空中加油机主要技术特征

由上述分析可知,硬式空中加油机随着载机平台而发展^[4-5],主要技术特征如表1所示。

从平台来看,第一代、第二代主要由轰炸机、运输机改装而来,但由于受到当时平台的限制,只能提供有限的外供油量。从第三代直到最新的 KC-X 计划,加油机由大型飞机改装,具有较大的载油量,可进行多点加油,并兼有一定的运输能力。

表 1 硬式空中加油机的主要技术特征

Table 1 Main technical characteristics of refueling boom

型号	首飞/服役时间	飞机特征及改装/专用	功能匹配性	加油点	加油方式	加油流量/(L·min ⁻¹)			航程/km	最大载油量/t	外供油量/t	硬式加油操作方式
						硬式	软式	中心线				
第一代 KB-29P	/	螺旋桨飞机, B-29 轰炸机改装, 平台已退役	加油单一	3	硬式/软式	/	/	/	5 663	/	/	机械液压操纵, 操作员从飞机尾部炮塔中操作, 一组信号灯指示相对位置。
第二代 KC-97	1956 年服役	螺旋桨飞机, C-97 飞机改装		1	硬式	/	/	/	6 920	32	16	
第三代 KC-135	1954 年 7 月首飞, 1957 年前服役	Boeing 707 客机改装, 平台已退役	具有一定的货物运输能力	1	硬式	3360	1500	/	17 766	90	46(A)	机械液压操纵, 机体后端专用加油操作员, 操纵条件简陋。
第四代 KC-10	1980 年 7 月 12 日首飞, 1981 年 3 月 17 日服役	DC-10-30CF 大型客机改装, 平台已退役		3	硬式/软式	4530	1500	2260	18 515	162	90	加油员可直接观察到受油机, 操作环境较为舒适。
第五代 KC-30	2007 年 9 月 25 日首飞	A330 客机改装, 平台性能优越	具备运输/加油多功能性	3	硬式/软式	4540	1590	2240	/	110	69	电传操作系统在前舱, 由视频监控系統为加油操作员提供视觉反馈, 人机工效良好。
第五代 KC-46A	2005 年 5 月 21 日首飞	Boeing767 改装, 平台性能先进	具备现役及未来型号适应性	3	硬式/软式	4540	1520	2280	12 325	96	53	

从硬式加油装置来看,从最初的机械液压操纵向电传操纵发展,加油流量进一步增加,有利于减少对接时间,提供加受油机生存率。从操作环境来看,第一代、第二代没有专用的加油操作环境;从第三代开始,设置了专用加油操作员,但是加油操作环境简陋;而第四代加油机的加油员操作环境较为舒适,但是空间拥挤;在最新的 KC-X 计划中,充分考虑了加油员的操作环境的人机功效设计,有专用的加油员操作台,提供了良好的人机界面,可为加油员提供全天候的三维视频监控系統。

3 硬式空中加油技术发展趋势

3.1 发展趋势

综合国内外关于空中加油机相关研究的综述结果,总结得出从硬式空中加油机的各项技术特征变化,可以分析出硬式空中加油的发展趋势如下:

(1)向多用途化发展。在选择新的空中加油平台时,普遍倾向于“一机多用”的选择原则,看重加油机的使用效率。选择现有大型运输机为载机平台,充分利用其装载空间大及留空时间长的优势,

可实现以空中加油为主,兼顾运输货物、充当通信中继平台、安装货盘化的任务设备等功能。

(2)加油过程控制的自动化程度越来越高。加油过程中,多编队加、受油飞机的战术协同配合极其复杂。为提高空中加油的效能及安全性,在研制新型空中加油机或对现有加油机进行改装时,十分注重提高加油系统的数字化程度,以期实现加油过程的自动化。目前已实现了无人机的自动受油,可以预期实现空中加油全过程自动化的将为可能。

(3)加油操作专人化。操作系统逐渐成熟,人机工效占据越来越重要的地位。

(4)大流量多点加油的需求将带动硬式加油技术的进一步发展。新型空中加油机都采用一个硬式、两个软式和一个中心线空中加油平台的三点加油方式。对于如战略轰炸机、大型特种飞机等大型飞机,为缩短加油时间,要求尽可能提高硬式空中加油系统加油流量。

3.2 关键技术分析

硬式空中加油技术的发展对硬式空中加油装置的设计提出了越来越高的要求,硬式加油装置要

实现高精度俯仰、偏摆、滚转、大行程伸缩、动密封与冲击压力抑制等功能,相当于一套小型化的无人控制系统,直接影响加油机、受油机的刚性与柔性连接体一体化,研究难度大、系统复杂、安全系数要求高。因此需要对其关键技术展开攻关。

(1) 硬式加油装置总体布局设计技术

由于硬式加油装置处于机身后体强干扰区域,飞机后体的流动比较复杂,硬式加油装置在收放、运动过程中受到的后体流动特性、压力分布因素影响与自由流中差别较大,使得伸缩套管受到机体振动和尾涡多重影响;同时由于加油机与受油机存在相对运动,加油机、加油装置和受油机之间的相互响应也较为复杂。

(2) 硬式加油装置结构和机构设计技术

硬式加油装置为大扰动细长体轻质结构,由于控制翼面的约束和载机的影响,其伸缩管装置要在各种复杂流场下的气动载荷、惯性载荷等作用下,在飞机飞行包线和硬式加油装置运动区域内,要求不变形。同时受到总体布局和重量的约束,内部空间狭小,要保障伸缩管机构在复杂干扰的作用下进行顺畅伸缩运动,其驱动、传动、支撑、导向等机构的设计有很高的技术难度。

(3) 硬式加油装置控制系统设计技术

硬式加油伸缩管装置犹如一架小型无人机,未与受油装置对接前要求快速精确地定位,对接后要求能自动适应加受油机之间相对位置的变化,消除对接应力。设计时应综合考虑各种模态的设置,形成最优的伸缩管控制系统总体方案。

4 结束语

空中加油机在当今地区性冲突中扮演了重要角色,从联合打击到设立禁飞区,在各种重要的军事行动中都出现了空中加油机的身影。而在未来,空中加油机在类似任务中的作用将更加重要。目前以美国为代表的世界军事强国大多装备了空中加油机,发展包括“伙伴加油”在内的多种空中加油手段,并开始了下一代空中加油机的研制,使多种作战飞机具备空中加油能力,提高其航空武器装备作战效能。硬式空中加油机作为未来空中加油机的发展趋势,其研究尤为重要,本文通过梳理硬式空中加油机的发展,指出相关需求变革的思路和关键技术,为进一步深入研究硬式加油装置提供参考。

参考文献

- [1] 陈新能. 空中加油机的发展[J]. 航空工业经济研究, 2007(2): 16-22.
CHEN Xinneng. Development of refueling tanker[J]. Economic Research of the Aviation Industry, 2007(2): 16-22. (in Chinese)
- [2] 肖允华, 牟庆森, 朱文胜. 空中加油机的发展前景[J]. 现代军事, 2001(4): 37-38.
XIAO Yunhua, MU Qingsen, ZHU Wensheng. Development prospect of refueling tanker[J]. Modern Military, 2001(4): 37-38. (in Chinese)
- [3] 曲东才. 空中加油机与空中加油技术[J]. 现代军事, 1996(9): 30-32.
QU Dongcai. Refueling tanker and air-refueling technique [J]. Modern Military, 1996(9): 30-32. (in Chinese)
- [4] 葛薜, 程龙, 郭生荣, 等. 改变美国空军文化的 KC-X 新一代空中加油机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
GE Heng, CHENG Long, GUO Shengrong, et al. New generation tanker called KC-X who change American air force culture [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [5] 卢成文. 世界飞机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1997.
LU Chengwen. World aircraft handbook[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [6] 槐之杰. 国外空中加油机简介[J]. 兵工标准化, 2000(1): 1-3.
HUAI Zhijie. The brief introduction of foreign air tanker [J]. Standardization of Ordnance Industry, 2000(1): 1-3. (in Chinese)
- [7] 李浩源. 战机的保姆: 空中加油机[J]. 航空世界, 2002, 16(5): 28-31.
LI Haoyuan. The aircraft's nanny: air tanker[J]. The Aviation World, 2002, 16(5): 28-31. (in Chinese)
- [8] 赵仲武. KC-45 空中加油机[J]. 兵器知识, 2008(5): 48-50.
ZHAO Zhongwu. The air tanker of KC-45[J]. Ordnance Knowledge, 2008(5): 48-50. (in Chinese)
- [9] 萧萧. 美俄大型空中加油机 PK[J]. 环球军事, 2014(13): 48-50.
XIAO Xiao. The PK of large air tanker between the US and Russian[J]. The Global Military, 2014(13): 48-50. (in Chinese)
- [10] 程龙. 2017 年世界空中加油机发展综述[J]. 国际航空, 2017(11): 20-23.
CHENG Long. An overview of the development of the world's aerial refueling aircraft in 2017[J]. The International Aviation, 2017(11): 20-23. (in Chinese)
- [11] 车海林, 潘志雄. 舰载空中加油机任务使命与发展趋势[J]. 飞机设计, 2017, 41(4): 51-53.
CHE Hailin, PAN Zhixiong. Mission and development

- (in Chinese)
- [34] AMANDA R K, HECTOR F G. $2\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ thermal barrier coatings resistant to degradation by molten CMAS—Part II: interactions with sand and fly ash[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 97(12): 3950-3957.
- [35] ALI A N, MAJID M, TONNY W J. Hot corrosion behavior of calcium magnesium aluminosilicate (CMAS) on the Yb_2SiO_5 -8YSZ composite as a candidate for environmental barrier coatings [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 243: 1-4.
- [36] 张珊榕, 董红英, 马文, 等. 等离子喷涂 SrZrO_3 热障涂层的 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS) 腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(1): 53-57.
ZHANG Shanrong, DONG Hongying, MA Wen, et al. Corrosion resistance of air plasma sprayed thermal barrier coating SrZrO_3 on superalloy In718 against $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS) [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(1): 53-57. (in Chinese)
- [37] 王梦雨, 吴琼, 冀晓鹏, 等. 双层 $\text{YSZ/La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 热障涂层高温性能研究[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(3): 30-35.
WANG Mengyu, WU Qiong, JI Xiaojuan, et al. High temperature performance of a double-layered $\text{YSZ/La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ thermal barrier coating [J]. Thermal Spray Technology, 2015, 7(3): 30-35. (in Chinese)
- [38] AYSEGUL A, ALEXANDER L V. Novel thermal barrier coatings that are resistant to high-temperature attack by glassy deposits[J]. Acta Materialia, 2007, 55(20): 6734-6745.
- [39] 郭巍, 马壮, 刘玲, 等. 航空发动机用热障涂层的 CMAS 侵蚀及防护[J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38(3): 159-175.
GUO Wei, MA Zhuang, LIU Ling, et al. CMAS corrosion and protection of thermal barrier coatings for aeroengine [J]. Advanced Ceramics, 2017, 38(3): 159-175. (in Chinese)
- [40] 楼思余, 单萧, 赵晓峰. 大气等离子喷涂热障涂层 CMAS 防护层成分及厚度优化[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 208-217.
LOU Siyu, SHAN Xiao, ZHAO Xiaofeng. Composition and thickness optimization of anti-CMAS layer on air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface Technology, 2018, 47(2): 208-217. (in Chinese)

作者简介:

彭睿(1993—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:热障涂层生产过程管理、质量提升。

常振东(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:热障涂层产品生产、质量控制和工艺改进。

孙莉莉(1983—),女,博士,工程师。主要研究方向:产品生产和工艺改进。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 307 页)

- trend of Shipborne air refueling aircraft[J]. Aircraft Design, 2017, 41(4): 51-53. (in Chinese)
- [12] 顾俊. 分析空中加油机的特点和发展趋势分析[J]. 智库时代, 2018, 10(2): 220-221.
GU Jun. The analysis of the characteristics and development trend of air tanker[J]. Think Tank Era, 2018, 10(2): 220-221. (in Chinese)
- [13] 侯玉燕. 国外空中加油技术的发展和展望[J]. 飞行力学, 1994, 12(4): 14-22.
HOU Yuyan. The development and prospect of foreign air refueling Technology[J]. Flight Dynamics, 1994, 12(4): 14-22. (in Chinese)
- [14] BOLKCOM C. Air force aerial refueling methods—flying boom versus hose and drogue; CRS Report for Congress RL-32910[R]. USA: CRS, 2006.
- [15] NALEPKA J P, HINCHMAN J L. Automated aerial refueling: extending the effectiveness of unmanned air vehicles; AIAA-2005-6005[R]. USA: AIAA, 2005.
- [16] RO K, KAMMAN J W. Modeling and simulation of hose-paradogue aerial refueling systems[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2010, 33(1): 53-63.
- [17] 林一平. 现代空中加油机[J]. 交通与运输, 2015(1): 53-55.
LIN Yiping. Modern aerial refueling aircraft[J]. Traffic and Transportation, 2015(1): 53-55. (in Chinese)
- [18] JHMED A S. Dynamics of multibody systems[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.

作者简介:

王秀香(1983—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器总体综合设计。

高旭(1983—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器总体综合设计。

高亚奎(1959—),男,博士,研究员、博导。主要研究方向:飞行器控制。

(编辑:丛艳娟)