

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.06.002

舰载机自动着舰引导与控制综述

张志冰^{1,2} 甄子洋¹ 江 驹¹ 薛艺璇¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 211106; 2. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳, 110035)

摘要: 引导与控制是舰载机自动着舰的关键技术, 为此本文对该技术进行综述。给出了舰载机进场航线和几种着舰工作模式, 概述了基于跟踪雷达的着舰引导系统和基于卫星的着舰引导系统的工作原理及关键技术, 着重分析了自动着舰的几种控制技术, 包括控制律设计技术、直接力控制技术、推力矢量控制技术、甲板运动预估与补偿技术、舰尾气流抑制技术、动力补偿技术以及着舰安全控制技术。最后, 从多系统集成着舰控制技术、多体制融合着舰引导技术两方面对自动着舰引导与控制技术进行了展望。

关键词: 舰载机; 自动着舰系统; 引导; 飞行控制

中图分类号: V249.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2018)06-0734-11

Review on Development in Guidance and Control of Automatic Carrier Landing of Carrier-Based Aircraft

ZHANG Zhibing^{1,2}, ZHEN Ziyang¹, JIANG Ju¹, XUE Yixuan¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang, 110035, China)

Abstract: Guidance and control is the key technique of the automatic carrier landing of the carrier based aircraft. This paper summarizes the research development of this technique. The approaching routes and several carrier landing modes are given. The principles and key techniques of the radar based guidance system and the satellite based guidance system are respectively described. Several carrier landing control techniques are mainly analyzed, including the control law design, direct lift control, thrust vectoring control, carrier deck prediction and compensation, automatic power compensation and carrier landing safe control. Finally, the future prospects of the guidance and control technique are summarized from the aspects of multi-system integrated carrier landing control and multi-mode fusion carrier landing techniques.

Key words: carrier-based aircraft; automatic carrier landing system; guidance; flight control

航母和舰载飞机武器系统是海军最强大的武器系统。美国拥有数量最多的航母和舰载机, 人工和自动着舰技术都已相当成熟。美国航空发展中心(Naval air development center, NADC)曾记录、

分析和统计了大量的着舰试验结果, 涵盖的舰载机包括 F-14, F-18, A-6E, A-7E, EA-6B, E-2C, S-3A, TA-3B 以及教练机 T-2C 和 TA-4 等^[1]。美国海军自 1948 年起致力于开发全天候自动着舰引导系

基金项目: 国家自然科学基金(61741313, 61673209)资助项目; 江苏省“六大人才高峰”高层次人才计划(KTHY-027)资助项目。

收稿日期: 2018-09-13; **修订日期:** 2018-10-14

作者简介: 张志冰, 男, 沈阳飞机设计研究所研究员。研究方向: 导航、制导与控制。

通信作者: 甄子洋, 男, 教授, E-mail: zhenziyang@nuaa.edu.cn。

引用格式: 张志冰, 甄子洋, 江驹, 等. 舰载机自动着舰引导与控制综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(6): 734-744. ZHANG Zhibing, ZHEN Ziyang, JIANG Ju, et al. Review on development in guidance and control of automatic carrier landing of carrier-based aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(6): 734-744.

统(All-weather carrier landing system, AWCLS),并以 F-14A, A-7E, F-4J, F-4D, S-3A 等为验证机进行大量试飞,到了 20 世纪 60 年代末至 70 年代初已进入实用阶段,其中关键用到了 Bell 宇航公司研制的 SPN-42 数字式飞行全天候战术数据系统^[2-3]。到了 20 世纪 80 年代中期,AWCLS 技术有新的突破,美国麦道公司的 F/A-18A 飞机做了数十次自动着舰试飞,终于将着舰纵向误差控制在 6.7 m 以内,为 90 年代初 F/A-18A 在海湾战争中完成上万架次的着舰任务奠定坚实基础^[4-5]。自动着舰引导系统(Automatic carrier landing system, ACLS)是 AWCLS 系统的关键部分,可将飞机在白天或夜间降落在运动航母上,并尽可能不受不利天气及海况影响。国内海军现拥有辽宁舰和歼-15 舰载机,首艘国产航母目前正在进行海试。因此,国内对自动着舰技术的掌握迫在眉睫,国内的相关科研院所相继开展了自动着舰技术研究,尤其杨一栋教授课题组在国内率先出版了十余部相关著作,对实现自动着舰具有重要参考价值^[6]。

舰载机着舰受到几个因素制约,比如:①须在期望区域触舰以便成功钩住拦阻索;②须在下滑过程中保持飞机在着舰区,不允许有较大侧向偏差;③须保持飞机适当姿态,使得飞机尾钩可以准确地钩住拦阻索;④须以合适下滑速度着舰,避免拦阻啮合装置承载过大,应在起落架所能承受范围内;⑤须确保飞机着舰时能有一定高度余量穿过舰尾;⑥须保证发动机可以迅速达到最大推力,以便成功复飞或逃逸。舰载机若要实现自动着舰,则引导与控制技术起到关键作用。

文献[7-8]对国内外自动着舰引导与控制技术进行了详细综述。本文在此基础上,侧重于工程角度,进一步补充概述:①进场航线、着舰工作模式;②典型自动着舰引导系统;③直接升力控制、推力矢量控制和着舰安全控制等问题;④“魔毯”着舰控制和多体制引导技术。

1 进场航线与着舰工作模式

舰载机返航着舰过程分为引导、待机、进近与着舰等 4 个阶段。进近至着舰之间又有盘旋、对中、下滑、阻拦、复飞和紧急着舰等过程。

舰载机在离航母 200 n mile 处接受舰上航空飞行管制中心的航行管制和指挥,获得飞机离航母的距离、方位、高度及航母航向,按照进场航线飞行,高度、速度、航向、飞机构型等飞行状态需达到下滑着舰要求,以帮助进入下滑着舰阶段。在离舰约 50 n mile 处,舰载机进入待机阶段,舰载机按照马歇尔等待航线飞行。在等待过程中,航母空中交

通指挥中心(Carrier air traffic command center, CATCC)告知舰载机进近着舰方式与拦阻方式,并告知初始着舰位置信息。在离舰约 20 n mile 处,舰载机进入进近着舰阶段,包括进场和下滑着舰两大阶段。舰载机在离航母 3~20 n mile 的空域即为进场阶段,在离舰 3 n mile 以内即为着舰阶段。当舰载机进行通场飞行时,进场段与着舰段有交叉空域,着舰阶段定义为捕获下滑道后的下滑着舰。

以进近着舰时的气象条件和飞行员的目视情况为依据,舰载机进近着舰主要有 3 种模式:①模式 I:目视进场及目视着舰,主要工作在气象条件良好,云层高度在 3 000 ft(900 m)以上,且能见度超过 5 n mile(9 260 m)的白天;②模式 II:仪表指示进场及目视着舰,工作条件为航母控制区的云层高度在 1 000~3 000 ft 之间,且能见度超过 5 n mile;③模式 III:仪表指示进场及全自动着舰,主要工作在航母控制区的云层高度低于 1 000 ft,或能见度低于 5 n mile,或日落后 1.5 h 至日出前 1.5 h 的时间。这种分类可以保证舰载机进近着舰的全天候性与安全性。

AWCLS 系统是一种多模态的引导系统,主要包括以下 4 种模态:①模态 I:全自动控制,采用自动着舰系统;②模态 IA:由 ACLS 将舰载机引导至离舰 0.75 n mile 处,然后转入菲涅尔透镜光学助降系统(Finellens optical landing system, FLOLS)人工引导着舰;③模态 II:半自动控制,采用仪表着舰引导系统(Instrument landing system, ILS),手动控制舰载机飞行至离舰 0.75 n mile 处,转为 FLOLS 着舰;④模态 III:人工控制着舰,采用舰上控制进场系统(Carrier controlled approach system, CCAS),将舰载机引导至 FLOLS 着舰区域内,由 FLOLS 引导着舰。

雷达截获窗口离舰 2~4 n mile,各距离节点的定义如图 1 所示,具体过程描述如下^[5]:

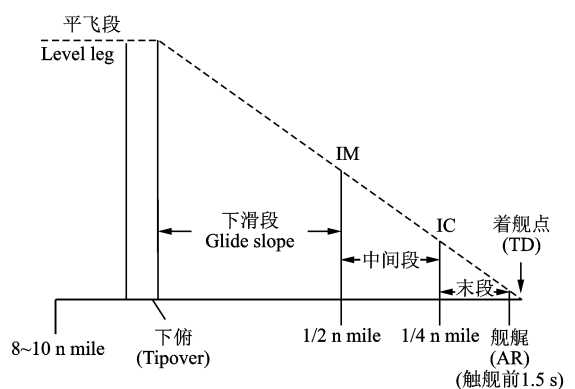


图 1 F/A-18 飞机着舰时各距离节点的定义

Fig. 1 Definition of each distance nodes for F/A-18 landing process

(1) 飞行员从离散信息指示器 LDGCHK 上确定是否可以着舰, 若可以, 则可得到 ACLS 的数据通道, 此时舰载 CATCC 系统发出“AP CPLR”信息给飞机, 表明机载飞行控制系统可与数据链耦合, 机上“CHECK OFF”灯亮, 表明自动着舰前的检查工作完毕。

(2) 若飞机被雷达截获窗截获, 在数据链中发送离散信息“ACL LOCK ON”给飞机, 并自动点亮机上“ACL CPLR”灯, 又称“CMD CONTROL”灯。此时由舰上 CATCC 系统的着陆控制中心 (Landing control center, LCC) 发送纵向及侧向偏离着舰轨迹误差信号。飞行员随即将 ACL/OFF/PCD 开关拨到 ACL 位置, 即采用自动着舰模式。

(3) 若飞机在下滑过程中处在允许偏差范围内, 则“ACL LOCK ON”信息自动点亮“COUPLER AVAILABLE”灯, 告知飞行控制系统可与耦合器耦合, 飞行员接通飞行控制系统, AWCLS 模式 I 工作, “Command Control”灯亮, 表明飞控系统正接收地面引导指令并进行工作。

(4) 若飞机不落在自动着舰安全区, 则“COUPLER AVAILABLE”灯关闭, 并自动断开飞行控制系统, 此时飞行员按模式 II 工作, 采用 ILS 半自动着舰, 但若在模式 II 下飞机又返回到安全区, 此时“COUPLER AVAILABLE”灯又亮, 飞行员可重新接通飞行控制系统按 ACLS 工作。若在模式 II 状态下, 飞机又超出安全区, 飞行员会接到舰上指令, 则按模式 III 工作。

(5) 当飞机进入舰尾紊流区时, 舰上 CATCC 系统根据着舰前 20 s 内垂直误差的统计值大小, 发出舰尾上仰指令。上仰指令大小取决于受紊流影响程度, 加入时间取决于飞机偏离下滑道时间, 一般在着舰前 6~10 s 内加入。

(6) 在着舰前 12.5 s, 舰上发出“10 second”指令, 使机上“10 second”灯亮, 告诉飞行员将甲板运动补偿 (Deck motion compensation, DMC) 信号加入到下滑道信息的数据链指令中, 补偿引入后只需 2 s 左右就能使飞机运动与甲板运动同步。

(7) 离舰 1.5 s 时, 由于进入雷达的盲区, 则自动断开 ACLS, 飞机在姿态稳定系统工作下触舰。此时, ACLS“冻结”俯仰与横滚数据链指令, 由机上飞行控制系统保持着舰姿态不变。

(8) 若飞机在模式 II 状态下超出安全区, 则飞行员会接到“Wave-off”指令, 进行复飞。

2 自动着舰引导关键技术

着舰引导系统主要用于确定机舰相对位置、生成基准下滑轨迹、计算或测量轨迹跟踪误差等。目

前, 得到成功应用的自动着舰引导系统主要包括雷达引导和卫星引导两种。

2.1 雷达引导系统

ACLS 系统的主要部件组成包括一台 AN/SPN-42 跟踪雷达、稳定平台及高速通用计算机。雷达跟踪天线的角位置、斜距信息送入计算机, 计算机将其转换为甲板上理想着陆点处的侧向、纵向与垂直位置坐标。同时亦将稳定平台测得的甲板运动信息送入计算机, 经数据处理, 使测量信息中消去舰运动影响, 获得飞机在惯性空间坐标系中的精确位置。与贮存于计算机中的基准下滑轨迹进行比较, 由此产生两种指令信息: 一是轨迹误差指令信息, 飞机接收误差信号, 通过指针式仪表或平显仪显示给驾驶员; 二是飞行控制系统指令信息, 或者自动驾驶仪信息, 轨迹引导指令分别由纵向与侧向引导误差经各自的导引律计算得出。在计算机中存贮了不同飞机的基准下滑轨迹规律, 以满足不同飞机的引导要求, 例如可作恒定下滑角进场, 陆上拉平进场, 或像 V/STOL 飞机的大角度 (High angle) 进场等。

美国现役精确进近着舰系统核心雷达装备型号为 AN/SPN-46, 数据尚未完全公开。文献[5]开发、测试和评估了 F/A-18E/F 飞机的自动着舰系统, 在海上进行了多次全自动着舰, 采用了 AN/SPN-46(V) ACLS 系统, 它由精密跟踪雷达、通用计算机和数据链路发射器组成, 雷达嵌入了 AN/APN-202 雷达信号放大器, 测得飞机的空间位置, 通用计算机通过计算引导控制律, 生成下降速率和轨迹倾斜角指令, 引导和控制飞机沿下滑道飞行, 更详细描述见文献[9]。

对于雷达引导的着舰系统, 抑制雷达测量信息中的电子噪声是其关键技术问题。通常采用含有 $\alpha\beta$ 滤波器的轨迹控制器。在滤去雷达噪声的同时, 对轨迹误差信息进行 PID 处理, 使着舰引导系统有一定稳定裕度的同时, 有足够带宽, 抑制噪声进入飞行控制系统, 以避免舵面抖动及磨损^[10]。文献[11]建立了自动着舰仿真系统, 加入雷达信号测量数值、时间延迟和噪声杂波干扰等 3 种不同类型的误差, 以验证其着舰影响。

2.2 卫星引导系统

联合精确进场和着陆系统 (Joint precision approach and landing system, JPALS) 是新一代的选用差分 GPS 替代传统雷达系统的全自动着舰系统, 由美国国防部 (Department of defense, DoD) 牵头研制成功, 其中海军负责开发舰上的舰载相关全球定位系统 (Shipboard related global positioning system, SRGPS), 为海基飞机操作提供精确的导

航和双通道空中交通控制(Air traffic control, ATC)^[12]。SRGPS体系结构将取代舰载“塔康”系统。海基JPALS系统由空间段、舰面段、机载段3部分构成,其目标是整合美国海、陆、空以及海军陆战队的现役固定翼/旋翼飞机、有人/无人机的进近着舰引导系统。

SRGPS系统的硬件组成主要包括^[13]:SRGPS信息处理器、小型增强GPS接收机、嵌入式GPS惯性导航单元、数据链发送/接收器、时空位置信息记录、机上及舰上天线。SRGPS系统通过比较飞机上的第二个GPS数据,预先测定相对着陆点,通过不断消除信号误差,来提供一个相对处于运动状态下的航母的精确位置。卫星引导可以满足无线电静默、灯火管制的要求,是实施空天一体化战略的重要一环^[14]。SRGPS将支持所有的ATC功能,包括起飞、离场、滑行、马歇尔盘旋(等待)、进场、着陆、接地后逃逸、进场失败后的复飞和远程导航。

2001年4月,装有SRGPS着舰引导系统的F/A-18在航母上首次进行了海上试验,SRGPS的设计导航精度应在40cm以内,甚至可达20cm以内,充分证明了GPS作为用于最终阶段的精密着舰引导完全可行^[14-16]。美国海军X-47“飞马”验证机在试飞中也安装了美国海军的SRGPS辅助降落系统。JPALS是美军未来有人机和无人机着陆/着舰引导的主用手段。文献[17]分析了美军联合精密进近与着陆系统的引导质量需求、系统架构、技术原理以及发展目标。

3 自动着舰控制关键技术

自动着舰控制系统用于控制舰载机跟踪引导系统给出的引导指令。飞行控制系统一般由飞行控制策略、甲板运动补偿器、舰尾气流抑制环节、动力补偿环节等回路组成。

3.1 飞行控制律设计

常规控制架构包含3个控制回路:①纵向通道 $ACLS|_H$,将雷达系统给出的惯性测量系中的飞机高度 H 与基准下滑轨迹 H_c 的偏差 H_{er} 经引导律进行PIDD处理,由数据链发送给飞机飞行控制系统 $FCS|_H$ 来控制飞机的俯仰姿态,以实现航迹倾斜角控制;②侧向通道 $ACLS|_y$ 的基本要求是使飞机沿着甲板中心线飞行,实现零侧偏,被雷达测量轴感受的侧偏形成误差信号,通过舰载迹控制器,形成一定的引导律信息,通过数据链发送至飞机侧向飞行控制系统 $FCS|_y$,由副翼操纵飞机滚转角,修正航迹角,从而实现清除侧偏,而方向舵操纵机头偏转,以消除侧滑角;③进场动力补偿系统

(Approach power compensation system, APCS),使飞机在低动压着舰状态下有效地阻尼飞机长周期运动,并使轨迹角对姿态角有快速精确的跟踪能力。此外,文献[18]将垂直速度指令和俯仰角指令控制结构与速度保持APCS和迎角保持APCS组合成4种控制构型,仿真比较了这4种构型在指令响应、风扰抑制上的性能差异。

格鲁曼F-14“雄猫”是美国20世纪末的舰载机主要机型,F/A-18系列是美国21世纪的主要舰载机机型。对于F-14飞机,经典控制已经得到实际应用^[19],增益调度^[20]、鲁棒控制^[21]在其非线性模型中进行了仿真验证。对于F/A-18飞机,经典控制已经得到实际应用^[4-5],模糊ACLS得到了自动着舰仿真验证^[22-23],非线性自适应与滑模控制^[24]、鲁棒控制^[25]、非线性动态逆控制^[26]、自适应控制^[27]等方法在模型中进行验证,虽然多数不是针对着舰应用,但也具有重要参考价值。美国海军航空系统司令部基于计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)技术对F/A-18E“超级大黄蜂”在着舰状态下进行了气动建模,并与传统的风洞实验建模结果进行了对比分析^[28]。此外,文献[29]分析了F/A-18E/F全自动着舰飞行特性,包括对下滑轨迹纠偏与控制能力、控制器指令响应特性、变换下滑道机动特性进行了仿真分析。文献[30-34]针对F/A-18飞机非线性模型,采用预见控制方法,能够有效融合下滑道已知信息,来提高轨迹跟踪精度,提高动态响应速度,但是多变量设计方法都存在控制参数难以与被控变量一一对应导致参数难调问题,这或许也是阻碍先进控制策略应用的最大障碍。文献[35]采用单变量模型参考自适应控制方法,在美国“银狐”无人机非线性模型上进行了仿真验证。

3.2 直接力控制

直接升力控制(Direct lift control, DLC)这一主动控制技术可以实现在较低进场速度下,改善飞行轨迹控制性能。它通常是快速偏转襟翼进行飞行轨迹控制。

美国海军试验结果表明,若仅采用水平安定面作为唯一的高度控制面,则很难改善着舰偏离误差,由此提出DLC技术,它可在不转动机身来获得迅速的高度纠偏效果,增强了轨迹跟踪、气流扰动抑制能力。而且,姿态保持也正符合着舰要求,所以DLC是实现精确着舰的关键技术之一^[36-38]。由直接力控制和动力补偿一起工作的ACLS,称为 $ACLS|_{APC, DLC}$ 综合控制系统,着舰高度偏差经相位超前补偿及洗出网络处理后,进入襟翼偏转作动器,偏转襟翼产生直接力,达到迅速纠正高度偏差

的目的^[39]。

目前曾有几种舰载机已经配备了 DLC 系统作为辅助控制器,如 F-14 和 S-3 在 DLC 中使用了扰流板调节器,其中 F-14 具有“向上”直接力和“向下”直接力(“Up” and “Down” DLC),而 S-3 飞机则只有“向下”DLC。许多飞行员只在目视飞行规则(Visual flight rules, VFR)时,使用 DLC 以迅速减小最后转弯时过大的空速。DLC 的另一作用是避免触舰时力量过大,便于飞机着舰后挂上拦阻索。后来,当飞机在紊流中无法获得足够动力时,合理使用“向上”DLC 能顺利地通过紊流。然而,使用 DLC 的问题是飞行员需要通过 3 个输入(油门、驾驶杆和 DLC)来控制两种状态(下滑道和迎角),这对许多飞行员来说需要熟练综合使用。最后时刻采用 DLC 可降低下滑飞行轨迹,避免带来低动压状态造成逃逸复飞加速过程太久,以及下俯运动过大、机头往下情形,这两种情况都会抬高拦阻钩,不利于着舰。

针对舰载机进入触舰前雷达引导盲区时的姿态和轨迹控制问题,文献[40]提出舰载机实现中性稳定的直接力控制着舰模式,利用后缘襟翼对称偏转所产生的直接力,对迎角小扰动变化进行气动解耦,消除了由于气流扰动而引起的舰载机振荡,使飞机姿态与轨迹到很好解耦。文献[41]针对无人机着舰过程中的舰尾流扰动和甲板运动扰动对着舰点散布的影响,提出了多操纵面平衡态直接力控制策略及粒子群优化控制参数策略。

3.3 推力矢量控制

推力矢量控制是指飞机发动机系统提供前进动力外,还能在飞机的俯仰、偏航、滚转和反推力方向上提供推力操纵,与常规气动操纵面、油门操纵共同构成飞机的操纵机构。美国的 F/A-18HARV、F-16MATV 和俄罗斯的米格-29 都加装了推力矢量系统。推力矢量使飞机进场速度及下沉速率明显减小,改善飞行轨迹控制及复飞性能。考虑到飞机着舰的整体性能,最满意的推力矢量配置角为 $45^{\circ} \sim 50^{\circ}$,此时仍使用进场动力补偿^[42]。德莱顿飞行研究中心(Dryden flight research center)对 F/A-18 飞机的推力矢量技术进行了飞行论证,虽然针对的是大迎角飞行包线,但是对于着舰具有重要参考价值^[43]。

推力矢量技术是未来先进的飞行控制手段,在现代飞行器中得到成功应用,能够提高飞机的机动性和敏捷性。推力矢量控制与常规操纵面控制之间的协调控制、权限分配等问题尤为关键。

3.4 甲板运动预估与补偿

海洋环境作用下,舰船产生 6 个自由度的耦合

运动,导致舰载机理想着舰点变为三维空间的活动点,特别是理想着舰点高度的变化,增加了舰载机的着舰难度。因此,甲板运动预估及补偿技术成为自动着舰系统的关键技术之一。

甲板运动的大小与频率与海况有关。一般来说,海浪主要引起俯仰涌(长浪),俯仰涌是导致舰浮沉的主要成因,舰运动的特性具有随机性和非周期性。6 级海况会引起舰船大约 1° 的俯仰以及约 4.5 ft 的沉浮。航母运动对 ACLS 有两个影响,一是明显地影响触舰点的位置,但这在一定程度上可以由 DMC 来加以修正;二是影响舰尾流大小。

为了消除甲板运动对着舰精度的影响,当飞机接近着舰时,应将甲板运动信息加入到自动着舰引导律中,使飞机能够跟踪甲板运动。AN/SPN-42 系统在着舰前 12 s 左右通过控制飞机纵向轨迹运动来跟踪甲板运动。由数据稳定系统(Data stabilization system, DSS)所测得的舰俯仰、横滚及垂直加速度通过计算可转换为着舰点的垂直运动。DMC 的有效工作频率设计在 $0.3 \sim 0.8$ rad/s 内,基本覆盖了可预计的甲板沉浮频率。由于控制指令与飞机响应之间存在时延,因此指令必须在相位上提前于甲板运动。提前量取决于自动飞行控制系统(Automatic flight control system, AFCS)系统的响应快慢。AN/SPN-42 系统采用二阶滤波网络进行相位提前。采用甲板运动预估器也是一种相位提前方法^[44-45]。现代滤波技术在甲板运动预估中得到很多应用,比如卡尔曼滤波、粒子滤波等,预见控制能够有效融合这些预估信息,提高对甲板运动的补偿精度^[46]。

3.5 舰尾气流抑制

舰尾气流扰动对飞机下沉速度、姿态、着舰点偏差、逃逸率等都有影响。着舰任务可能由于舰尾流的存在而变得更加复杂,安全性大大降低。飞行员甚至把接近舰尾的复杂气流扰动区称为进入“鬼门关”。

舰尾流来源于舰船结构与相对风的相互作用,它主要在最后半英里的着舰过程产生影响。具体原因包括:①舰前进在尾部形成真空区;②甲板边缘产生的旋风;③舰面上的上层建筑设施、飞行甲板船头部分以及斜角甲板末端与其他甲板形成的转角部分产生的紊流^[47]。紊流包括随机分量、周期分量以及稳态分量。随机分量主要是由舰船上层建筑背风区中的湍流。周期分量与舰船的周期俯仰运动有一定关系。稳态分量由稳态风减少量以及舰尾的主导上洗流组成,它是甲板风大小以及

飞机与舰船之间距离的函数^[48]。

紊流的稳态分量与周期分量会使进场飞机的飞行轨迹产生偏移,随机分量会导致迎角的变化。飞行轨迹的偏移需要进行补偿,包括在进入紊流(离舰尾 1 000~2 000 ft)时针对上洗流反作用的影响,以及在离开紊流时下降气流的影响。补偿方法是将俯仰指令中的前馈信号加入到 ACLS 系统中。为有效抑制气流扰动,除了采用具有直接力的 DLC/APCS/ACLS 综合控制以外,常采用以高度变化率为主反馈的飞行控制系统 $FCS|_H$,它在姿态控制系统 $FCS|_\theta$ 上构成^[49]。美国麦克唐纳飞机公司联合海军航空试验中心在 F-4J 飞机的 ACLS 系统中应用了 H-Dot 控制技术,飞行试验结果表明其有效降低了舰尾流扰动下的着舰散布^[50]。如果能够预估舰尾气流,则可以利用预见控制等先进控制策略进行补偿^[51]。

3.6 动力补偿/自动油门

20 世纪 60 年代中期,舰载机自动油门系统就使用迎角反馈。采用电传飞行控制的飞机(尤其是 F/A-18)有了外回路的油门控制,改善了内回路反馈控制系统的飞行动力学特性。对采用电传操纵和电传油门控制的飞机,有许多控制策略可用于综合飞行/推力控制(Integrated flight/power control, IFPC)系统中。美国海军很早就采用了迎角恒定的 APCS,在紊流扰动下还使用了法向加速度保持器^[52]。

ACLS 系统工作时,若没有 APCS,低动压着舰状态下飞机的操纵特性下降,导致轨迹角不能跟踪姿态角变化,飞行轨迹易不可控^[53]。APCS 可自动调节油门以保证在着舰过程中飞行迎角和飞行速度不变。除了模态 I 着舰之外,模态 II 和模态 III 也可选用 APCS。APCS 方案主要有两种:速度恒定动力补偿系统,称 $APCS|_{u=0}$;迎角恒定动力补偿系统,称作 $APCS|_{\Delta\alpha=0}$ ^[54]。前者实际上对应速度稳定性和轨迹稳定性,而后者兼具速度稳定性、轨迹稳定性和机动性增强。文献^[54]提出了 APCS 采用控制规则在线自调整及非线性参数优化的模糊逻辑控制,在油门控制律中省去法向加速度及舵偏反馈信息,仅根据迎角误差及其变化率在线地自调整加权因子,改善了迎角恒定飞行/推力综合控制性能。文献^[55]在传统飞行航迹控制系统(包括 APCS, DLC 系统和增稳系统(Stability augmentation system, SAS))基础上,采用系统综合设计方法提出了风参考航迹控制系统和惯性参考航迹控制系统方案。

3.7 着舰安全控制

(1) 着舰安全模态

海上环境恶劣,湿度和盐度大,设备易腐蚀损害,对发动机的影响也非常大。为了提高安全性,现代高性能舰载机一般采用双发结构,如中国的歼-15、美国的 F18 大黄蜂、F-14 雄猫、俄罗斯的苏-33 和法国的海阵风等。双发舰载机在单个发动机失效情况下仍能通过舵面偏转和控制律重构安全着舰,比单发有效提高安全概率^[56]。

为保证着舰安全,具有多模态信息融合的 AWCLS 已得到实际应用。AWCLS 4 个模态之间的转换关系如文献^[7]所述。着舰阶段主要采用全自动着舰方式,舰载雷达实时检测飞机是否在规定的安全区飞行或数据链是否出现故障。假如飞行员接通自动驾驶仪时,飞机不落在自动着陆安全区内,则自动驾驶仪自动断开,飞行员按照飞行仪表的指示进行半自动人工着舰。文献^[57]建立了安全区时模态转换结构,给出了 AWCLS 模态 I、模态 II 纵向飞行轨迹安全区边界,得出了着舰前的复飞区、安全区、报警区。

(2) 复飞决策

飞机在着舰过程中,由于受到各种干扰影响及出现不可预估的故障,有时会严重偏离基准下滑道。着舰指挥官(Landing signal officer, LSO)也在密切注视着舰过程,并提供辅助的飞行轨迹纠偏信息和复飞信号,但飞行员能否及时准确地执行复飞,对保证飞机安全至关重要。

复飞操作依据是纵侧向复飞准则。为建立复飞边界,引入 3 个初始限制条件,考虑了飞机挂钩离舰尾的间隙、飞行员对指令的平均响应时间、只采用油门动力控制^[58]。另外也需要考虑发动机油门及驾驶杆输入下的飞机速度、下沉速率等因素。在低速进场时若使用推力矢量控制,产生垂直于飞机轨迹的推力分量,直接改变飞行轨迹,快速纠正下沉速率误差影响,减小复飞区。

美国在 20 世纪 60 年代就开发了仅用军用推力操纵的复飞决策系统。美国 A-3B, A-5A, A-6A, F-4B 及 F-8A 等飞机定义了“航线临界点”或复飞边界,“航线临界点”与复飞区是初始下沉速率和着舰速率的函数。复飞爬升中舰载机的飞行轨迹仍处于舰尾流中,紊流扰动对复飞轨迹产生一定影响^[59]。

着舰复飞决策系统 WODD 不断地对飞机下沉速率、前飞速度以及离舰尾水平与垂直距离进行检测,并与预定限制值进行比较,即可确定飞机是否会撞舰。具体复飞决策过程描述为:位于航母上的精确跟踪雷达负责测量飞机距舰尾的水平距离

及高度,同时飞行仪表实时显示飞机进场速度及下沉速率,这些数据都将提供给 WODD 进行判断,若 WODD 判断飞机存在撞舰风险时,则发出复飞指令。

(3) 逃逸机动

逃逸是触舰后的复飞,发生原因主要有两个:一是俯仰角输入不正确、环境干扰等引起的飞机尾钩高于拦阻索;二是飞机尾钩跳跃、拦阻索张力不够等引起的拦阻索脱勾。

逃逸的初始条件与准则如下^[9]:①舰载机经过舰尾时,若尾钩与舰尾间隙大于 6 m,则进行逃逸操纵;②飞行员对逃逸复飞的反应滞后时间为 0.7 s;③当主起落架放下后 0.5 s,油门推至中间或最大推力;④逃逸复飞过程中,必须保持姿态稳定,以最优迎角爬升。此外,当着舰姿态改为飘飞后 1.0 s,需要进行纵向控制。在飘飞段迎角保持在 α 和 $\alpha+3^\circ$ 之间,不超过 $0.9C_{L_{max}}$,整个复飞过程保持飞行品质 1(MIL-STD-1797),当主起落架接地后,要提前 0.5 s 打军用额定推力,飞机接地后输入 1.0 s 的纵向控制指令,使飞机获得理想的飞离姿态。此时飞机的迎角不能超过 $AOA+3^\circ$,而且升力系数 C_L 不能大于 $0.9C_{L_{max}}$ 。当飞机的重心高度离甲板 50 ft 时,认为完成了逃逸机动。

逃逸复飞过程由加速滑跑段和上升段组成,逃逸复飞滑跑动力学特性涉及飞机运动、起落架伸缩运动和轮胎变形运动以及舰体运动特性。逃逸离舰过程受到操纵策略、甲板运动、阵风扰动、发动机推力时延等因素影响,其分析可参考起飞过程^[60-61]。逃逸距离估算与拦阻距离估算类似,需要考虑驾驶员的反应时间,并应留有适当的安全余量^[62]。

4 结 论

航母一般配置多种类飞机,包括固定翼有人机、直升机、无人机、无人直升机等,美国针对各种机型的自动着舰技术已经比较成熟,因此我国针对多构型飞机的自动着舰技术有待加强研究,并逐步形成自动着舰规范体系。舰载机的自动着舰引导与控制涉及控制、传感器测量、计算机科学和通信工程等多学科技术,在导航、制导与控制、仪器科学与技术等学科领域具有重要理论研究价值,对我国实现自动着舰、强大海军力量具有重要实际意义。

综上,对舰载机自动着舰引导与控制技术的未来发展趋势作如下展望:

(1) 多系统集成着舰控制技术

美国于 2014 年开始由美国海军空战中心(Naval Air Warfare Center, NAWC)飞机处(Air-

craft Division)负责开发 MAGIC CARPET(Maritime augmented guidance with integrated controls for carrier approach and recovery precision enabling technologies,即航母舰载机精密进近与着舰的增强引导与综合控制)项目,该项目在 2015 年首次试飞成功,并于 2017 年改名为“精确着舰模式”(Precision landing mode, PLM)。

2015 年 4 月,“魔毯”技术在“乔治布什”号进行了初步着舰测试试验,2015 年 6 月底,在“华盛顿”号上开展了相关的试验工作,2016 年 6 月,F/A-18F 超级大黄蜂战斗机在 CVN-73 乔治·华盛顿号航母上测试,2017 年 1 月,位于弗吉尼亚州诺福克基地的“布什”号和位于圣地亚哥基地的“卡尔·文森”号(CVN 70)航母舰载机联队均部署了该系统^[63-64]。

“魔毯”着舰技术是一套增强的飞行控制律和平视显示符号系统,旨在减少舰载机着舰所需的独特的引航技术。“魔毯”系统的关键技术包括综合直接升力控制(Integrated direct lift control, IDLC)、飞行轨迹速率控制(Flight path rate command, FPRC)、飞行轨迹增量控制(Delta flight path command, DFPC)和改进的平视显示器(Head up display, HUD)等。飞行轨迹速率控制模式主要用于改善下滑轨迹控制的动态性能,飞行轨迹增量控制模式主要用于改善下滑轨迹控制的稳态精度。平视显示器可以综合显示基准下滑轨迹,同时还能显示当前飞机所处的下滑航路。

“魔毯”着舰技术带来的优势主要包括:①实现了姿态和轨迹的解耦,飞行员能够精确控制姿态,只需较少通场次数就能成功着舰;②极大简化了着舰最后 15~18 s 的飞行操纵,降低了飞行员工作量,减少着舰时间,降低燃油消耗,大幅提升了着舰的安全性和成功率;③提高了升阻比,能够快速轨迹纠偏,抑制舰尾气流,避免出现初始反向的“负调”现象。

(2) 多体制融合着舰引导技术

国外舰载机引导系统的发展从 20 世纪 50 年代的“助降镜”,到 20 世纪 60 年代的“菲涅尔透镜”光学助降系统,到如今成熟使用的雷达引导、卫星引导。20 世纪 80 年代末法国“戴高乐”号核动力航空母舰上的“达拉斯”光电着舰引导系统,配备了可见光电视、红外传感器和激光测距仪。在 21 世纪初美国研制了进近着舰光电引导系统 VISUAL,并已经进行了着舰试验。

光电引导系统使用红外热像仪、高分辨率电视和激光跟踪等复合手段,具有测量精度高、抗电子干扰能力强、成像分辨率高、全景监视等优点,然

而,由于系统工作于舰载动基座平台,甲板运动对设备跟踪视轴带来惯性扰动,需要视轴稳定控制技术进行运动隔离。舰载视觉引导系统可以由两个图像跟踪分系统组成,分别置于斜甲板跑道两侧,摄像机安装在二轴云台的顶部,由于飞机运动速度很大,目标形态变化大,图像识别运算量大,传感器纯滞后严重、对光照效果敏感等难题有待解决。机载视觉导航系统是从图像中获取机舰相对位姿关系,并在序列图像中跟踪舰船运动,经过舰船目标检测、目标匹配和位姿估计、目标跟踪等步骤,然而它要求在图像中确实存在舰船目标,且低能见度和高海况环境会影响视觉精度。

鉴于不同引导方式有其自身优势和固有缺陷,目前出现了前置红外/惯性导航/无线电测高传感器组合、GPS/SINS/Visual组合等引导系统的研究。美国的“魔毯”系统实际用到了多传感器信息融合引导技术,融合了多组成像传感器(照相机)、非成像传感器(包括差分GPS、伪卫星、惯性导航、雷达和激光雷达系统等)的测量信息。因此,未来发展的引导系统应该具备触舰定位精度要求高、待机与进场航线连续跟踪引导等特点,并能够实现导航、防撞、通信、进近、着舰、复飞等功能一体化融合引导。多体制引导方式采用逐段引导还是融合引导,有待深入的研究确定,以实现互相匹配,互补共存的新型着舰引导系统。

此外,2018年3月至4月,美国海军在“亚伯拉罕·林肯”号航空母舰上进行了F/A-18“大黄蜂”降落试验,首次使用了一种飞机进场遥控系统ATARI,该技术受到遥控无人机的启发,能够提高着舰效率,也是一种着舰引导新模式。

参考文献:

- [1] MICKLOS R P. Carrier landing parameters from survey 45, fleet and training command aircraft landing aboard USS ENTERPRISE CVN-65 (Appendices B Through R): AD-A258873[R]. [S. l.]: [s. n.], 1991.
- [2] LOEB J L. Automatic landing system are here: AD-714925[R]. [S. l.]: Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1970.
- [3] DAVIES W D T, NOURY R. AN/SPN-42 automatic carrier landing system[C]// Proceedings of the First Annual Advanced Control Conference. Lafayette: Dun-Donnelley Publ Corp, 1974:99-110.
- [4] URNES J M, HESS R K. Development of the F/A-18A automatic carrier landing system[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1985, 8:289-295.
- [5] PRICKETT A L, PARKES C J. Flight testing of the F/A-18E/F automatic carrier landing system[C]// 2001 IEEE Proceedings of Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2001:2593-2612.
- [6] 杨一栋,甄子洋,徐佳龙,等. 无人机着舰制导与控制[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [7] 甄子洋,王新华,江驹,等. 舰载机自动着舰引导与控制研究进展[J]. 航空学报,2017,38(2):1-22. ZHEN Ziyang, WANG Xinhua, JIANG Ju, et al. Research progress in guidance and control of automatic carrier landing of carrier-based aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 1-22.
- [8] ZHEN Z Y, ZHANG Z B, ZHANG J H. Guidance and control techniques of carrier-based aircraft for automatic carrier landing[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(6):600-608.
- [9] Naval Air Warfare Center Aircraft Division. SAFTM-01-1994, Carrier suitability test manual[S]. Maryland: Flight Test and Engineering Group (SA70A),1994.
- [10] MOOK D J, NOURY R, ROEMER M J, et al. Improved noise rejection in automatic carrier landing systems[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Portland, USA: AIAA, 1990.
- [11] 杨宝钧,刘刚,洪冠新. 雷达信号误差对舰载机全自动着舰控制的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2017(6):1247-1253. YANG Baojun, LIU Gang, HONG Guanxin. Effect of radar signal error on automatic carrier landing control of carrier-based aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017(6): 1247-1253.
- [12] MCPEAK M A. Joint USAF-USN mission need statement for precision approach and landing capability: USAF 002-94[R]. [S. l.]: [s. n.],1994.
- [13] SOUSA P, WELLS L, COLBY G, et al. Test results of an F/A-18 automatic carrier landing using shipboard relative global positioning system: NAW-CADPAX/RTR—2003[R]. [S. l.]: [s. n.], 2003.
- [14] BRUNER C P, BRESLAU R W. Use of inertial reference data to support differential GPS for carrier landings[C]//Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Institute of Navigation. Albuquerque, New Mexico: [s. n.], 2001:863-871.
- [15] SCHUG E C, AKSTETER J W, HUFF R W, et al. Guidance and control for shipboard automatic landing using GPS [C]//Proceedings of the 57th Annual

- Meeting of the Institute of Navigation. Albuquerque, New Mexico: [s. n.], 2001:852-862.
- [16] PETOVELLO M G, O'KEEFE K, LACHAPPELLE G, et al. Field results of a GPS/INS-based approach to measuring ship flexure onboard an aircraft carrier [C]//Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. [S. l.]: [s. n.], 2005:2039-2048.
- [17] 钟涛, 王晓旺. 美军 JPALS 系统现状与发展趋势分析[J]. 现代导航, 2016, 7(2):152-156.
ZHONG Tao, WANG Xiaowang. Status and development trend of JPALS [J]. Modern Navigation, 2016, 7(2):152-156.
- [18] 汪节, 吴文海, 张源原, 等. 自动着舰的控制构型研究[J]. 飞行力学, 2017(2):26-29.
WANG Jie, WU Wenhai, ZHANG Yuanyuan, et al. Study on automatic carrier landing control configuration[J]. Flight Dynamics, 2017(2):26-29.
- [19] BALAS G J, PACKARD A K, RENFROW J, et al. Control of the F-14 aircraft lateral-directional axis during powered approach[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1998, 21(6):899-908.
- [20] FIALHO I, BALAS G J, PACKARD A K, et al. Gain-scheduled lateral control of the F-14 aircraft during powered approach landing [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 23(3):450-458.
- [21] NIEWOEHNER R J, KAMINER I I. Design of an autoland controller for an F-14 aircraft using H-infinity synthesis[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 19(3):656-663.
- [22] STEINBERG M. A fuzzy logic based F/A-18 automatic carrier landing system[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Reston: AIAA, 1991:407-417.
- [23] STEINBERG M. Development and simulation of an F/A-18 fuzzy logic automatic carrier landing system [C]// The Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems. New York: IEEE, 1993:797-802.
- [24] SAHJENDRA N S, MARC L S, ANTHONY B P. Nonlinear adaptive and sliding mode flight path control of F/A-18 model[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4):1250-1262.
- [25] CHAKRABORTY A, SEILER P, BALAS G. Applications of linear and nonlinear robustness analysis techniques to the F/A-18 flight control laws[C]// AIAA Guidance, Navigation, & Control Conference. Chicago, Illinois: AIAA, 2009.
- [26] MILLER C. Nonlinear dynamic inversion baseline control law; Flight-test results for the full-scale advanced systems testbed F/A-18 airplane [C]// AIAA Guidance, Navigation, & Control Conference. Portland, USA: AIAA, 2011.
- [27] SINGH L, MIOTTO P, BREGER L. L1 adaptive control design for improved handling of F/A-18 class of aircraft [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. Boston, USA: AIAA, 2013.
- [28] GREEN B E, Findlay D B. CFD analysis of the F/A-18e super hornet during aircraft-carrier landing high-lift aerodynamic conditions [C]// 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, USA: AIAA, 2016.
- [29] 梁天骄, 孙立国, 屈香菊. F/A-18E/F 全自动着舰飞行特性分析[J]. 飞行力学, 2017, 35(5):17-21.
LIANG Tianjiao, SUN Liguang, QU Xiangju. Flight characteristic analysis on automatic carrier landing for F/A-18E/F[J]. Flight Dynamics, 2017, 35(5):17-21.
- [30] 甄子洋. 预见控制理论及应用研究进展[J]. 自动化学报, 2016, 42(2):172-188.
ZHEN Ziyang. Research development in preview control theory and application[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(2):172-188.
- [31] 甄子洋, 王新华, 邵敏敏, 等. 基于控制器切换的舰载机自动着舰纵向控制器及其控制方法: 中国, ZL2015102007283.3[P]. 2018-06-26.
ZHEN Ziyang, WANG Xinhua, SHAO Minmin, et al. Controllers switching based ACLS longitudinal controller for carrier-based aircraft: China, ZL2015102007283.3[P]. 2018-06-26.
- [32] 甄子洋, 邵敏敏, 龚华军, 等. 一种基于鲁棒预见控制的舰载机自动着舰控制方法: 中国, ZL201510158509.3[P]. 2017-04-07.
ZHEN Ziyang, SHAO Minmin, GONG Huajun, et al. Robust preview control based automatic carrier landing control for carrier-based aircraft: China, ZL201510158509.3[P]. 2017-04-07.
- [33] ZHEN Ziyang, MA Kun, BHATIA A K. Automatic carrier landing control for unmanned aerial vehicles based on preview control[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(4):413-419.
- [34] ZHEN Ziyang, JIANG Shuoying, JIANG Ju. Preview control and particle filtering for automatic carrier landing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 99:1.
- [35] 甄子洋, 陶钢, 江驹, 等. 无人机自动撞网着舰轨迹自适应跟踪控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38

- (12):1922-1927.
- ZHEN Ziyang, TAO Gang, JIANG Ju, et al. Adaptive tracking control of automatic net landing trajectory for carrier-based unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(12):1922-1927.
- [36] PRILLIMAN F W, SLINGERLAND R D, SMITH L R. Direct lift control as a landing approach aid[C] // 3rd and 4th Aerospace Sciences Meeting. New York, USA: AIAA, 1968.
- [37] HENRY R C, PATTON J M, STICKLE J W. Flight tests of a direct lift control system during approach and landing; NASA TN-D-4854[R]. [S. l.]: [s. n.], 1968.
- [38] FORTENBAUGH R L. Practical integration of direct lift control into an automatic carrier landing system [C]//AIAA Guidance and Control Conference. Stanford, California: AIAA, 1972.
- [39] MARTORELLA P, KELLY C, NASTASI R. Precision flight path control in carrier landing approach—A case for integrated system design[C] // AIAA Aircraft Systems & Technology Conference. Dayton, Ohio: AIAA, 1981.
- [40] 余勇,杨一栋,代世俊,等. 中性稳定的舰载飞机着舰模态研究[J],飞行力学,2002,20(4):22-26.
- YU Yong, YANG Yidong, DAI Shijun, et al. Study of a carrier landing mode with neutral stability using direct lift control[J]. Flight Dynamics, 2002, 20(4):22-26.
- [41] 刘宪飞,王勇,张代兵. 高抗扰高精度无人机着舰纵向飞行控制[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(9):1891-1899.
- LIU Xianfei, WANG Yong, ZHANG Daibing. High-immunity high-precision longitudinal flight control for UAV's carrier landing[J]. Journal of Beijing University of Aerospace and Astronautics, 2017, 43(9):1891-1899.
- [42] CLARK J W, MILLER D P. Investigation of the use of vectored thrust during carrier landings [C] // AIAA/RAeS/JSASS Aircraft Design and Technology Meeting. Los Angeles, CA: AIAA, 1965.
- [43] BRENNER M J. Aeroservoelastic modeling and validation of a thrust-vectoring F/A-18 aircraft [R]. USA: NASA Center for Aerospace Information (CASD), 1996.
- [44] KAPLAN P. A study of prediction techniques for aircraft carrier motions at sea[J]. Journal of Hydro-nautics, 1969, 3(3):121-131.
- [45] HESS R A, JUDD T M. Improved automatic carrier landing using deck motion prediction[J]. Journal of Aircraft, 1976, 13(2):153-155.
- [46] ZHEN Ziyang, JIANG Shuoying, MA Kun. Auto-matic carrier landing control for unmanned aerial vehicles based on preview control and particle filtering [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 81: 99-107.
- [47] CHERRY B E, CONSTANTINO M M. The burble effect: Superstructure and flight deck effects on carrier air wake: AD-A527798[R]. USA: United States Naval Academy, 2010.
- [48] ANON. Military specifications—flying qualities of piloted airplanes: MILF-8785C[R]. USA: Department of Defence, 1996.
- [49] 江驹,甄子洋,王新华,等. 抑制舰尾气流扰动的舰载机着舰引导与控制系统及方法: 中国, ZL201110287699.0[P]. 2014-02-08.
- JIANG Ju, ZHEN Ziyang, WANG Xinhua, et al. Airwake disturbance rejection based carrier landing guidance and control system of carrier-based aircraft: China, ZL201110287699.0[P]. 2014-02-08.
- [50] URNES R K H J M, MOOMAW R F, HUFF R W. H-Dot automatic carrier landing system for approach control in turbulence[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2012, 4(2):177-183.
- [51] 甄子洋,邵敏敏,龚华军,等. 一种含舰尾气流补偿的舰载机自动着舰复合控制方法: 中国, ZL201510243842.4[P]. 2017-01-04.
- ZHEN Ziyang, SHAO Minmin, GONG Huajun. Air wake compensation based automatic carrier landing composite control for carrier-based aircraft: China, ZL201510243842.4[P]. 2017-01-04.
- [52] CRAIG S J, RINGLAND R F, ASHKENAS I L. An analysis of navy approach power compensator problems[J]. Journal of Aircraft, 1972, 9(10):737-743.
- [53] 王新华,杨一栋,朱华. 低动压着舰状态下飞机的操纵特性研究[J]. 飞行力学,2007,25(4):29-32.
- WANG Xinhua, YANG Yidong, ZHU Hua. Research of handling characteristics of aircraft in low dynamic pressure situation [J]. Flight Dynamics, 2007, 25(4):29-32.
- [54] 杨京,杨一栋,范彦铭. 基于模糊逻辑的飞行/推力综合控制系统研究[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(1):43-46.
- YANG Jing, YANG Yidong, FAN Yanming. Fuzzy logic based flight/thrust integrated control system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000, 32(1):43-46.
- [55] 张勇,张东光. 舰载飞机着舰精确轨迹控制研究[J]. 飞机设计,2006(1):50-55.
- ZHANG Yong, ZHANG Dongguang. Precision

- flight path control for carrier-based aircraft landing approaches[J]. *Aircraft Design*, 2006(1):50-55.
- [56] 甄子洋, 姬猛, 王新华, 等. 双发舰载飞机单发停车的安全着舰控制方法: 中国, ZL201110132929.6 [P]. 2013-04-07.
- ZHEN Ziyang, JI Meng, WANG Xinhua, et al. Safe carrier landing method of double-engine carrier-based aircraft: China, ZL201110132929.6 [P]. 2013-04-07.
- [57] 潘婷婷, 江驹, 王新华, 等. 舰载机着舰多模态转换技术研究[J]. *飞行力学*, 2014, 32(1):25-28.
- PAN Tingting, JIANG Ju, WANG Xinhua, et al. Research on multiple mode conversion technology of carrier-based aircraft landing [J]. *Flight Dynamics*, 2014, 32(1):25-28.
- [58] JOHNSTONE R B. Development of the wave off decision device[J]. *Journal of Aircraft*, 1969, 6(4):367-371.
- [59] 杨广, 李泰安, 马经忠, 等. 舰尾流对舰载机复飞边界影响分析[J]. *飞行力学*, 2017, 35(3):16-18, 23.
- YANG Guang, LI Taian, MA Jingzhong, et al. Analysis of the influence of carrier air wake on carrier-based aircraft wave-off boundary[J]. *Flight Dynamics*, 2017, 35(3):16-18, 23.
- [60] 甄子洋, 李康伟, 王新华, 等. 舰载机滑跃起飞自动飞行控制方法: 中国, ZL201510029301.1 [P]. 2017-03-02.
- ZHEN Ziyang, LI Kangwei, WANG Xinhua, et al. Ski-jump takeoff carrier aircraft automatic flight control method: China, ZL201510029301.1 [P]. 2017-03-02.
- [61] ZHEN Ziyang, JIANG Ju, WANG Xinhua, et al. Modeling, control design and influence analysis of catapult-assisted take-off process for carrier-based aircrafts [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 232(13):2527-2540.
- [62] 王永庆, 罗云宝, 王奇涛, 等. 面向机舰适配的舰载飞机起降特性分析[J]. *航空学报*, 2016, 37(1):269-277.
- WANG Yongqing, LUO Yunbao, WANG Qitao, et al. Carrier suitability-oriented launch and recovery characteristics of piloted carrier-based aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(1):269-277.
- [63] WALKER H P, PAGAN J, WALWANIS M. Improving the safety of carrier landings: Maritime augmented guidance with integrated controls for carrier approach and recovery precision enabling technologies (MAGIC CARPET)[C]//Proceedings-Annual SAFE Symposium (Survival and Flight Equipment Association). [S. l.]: [s. n.], 2014:310-317.
- [64] JAMES W D. Project MAGIC CARPET: Advanced controls and displays for precision carrier landings[C]//54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum. San Diego, California, USA: AIAA, 2016.

(编辑:张蓓)