

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.06.003

直升机着舰引导与控制研究进展

廖智麟 陆晓安 黄一敏 甄子洋

(南京航空航天大学自动化学院,南京,211106)

摘要:随着现代海战向立体化、多层化发展,舰载直升机以其垂直起降、定点悬停等优势成为未来海战武器装备的重要组成部分,而着舰引导与控制是舰载直升机的关键技术。本文对直升机着舰引导技术与着舰控制技术的研究进展进行概述,着重概述和分析了着舰引导技术中的雷达、卫星、视觉、光电引导技术。其次对舰载直升机着舰的环境影响因素、综合流程以及应用现状进行概述分析,最后对舰载直升机着舰技术进行了展望。

关键词:直升机;着舰引导;着舰控制;自动着舰

中图分类号:TN958

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2018)06-0745-09

Research Progress of Landing Guidance and Control for Carrier-Based Helicopter

LIAO Zhilin, LU Xiaolan, HUANG Yimin, ZHEN Ziyang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: With the three-dimensional and multi-layered development of modern naval warfare, carrier-based helicopter has become an increasingly important part of future naval warfare with its advantages of vertical takeoff and landing and fixed-point hovering. Landing guidance and control is the key technology of carrier-based helicopter. In this paper, the research progress of helicopter landing guidance technology and control technology is described, in which the radar, satellite, vision and photoelectric guidance techniques are emphatically described. Moreover, the landing environments, general process and applications are summarized. Finally, the future of helicopter carrier landing technology is explained.

Key words: helicopter; landing guidance; landing control; automatic boarding

直升机具备独有的高机动性、垂直起降、可定点悬停、对环境依赖程度低、低空性能好以及无需专门的发射回收装置等优点,已成为舰载飞机中的重要组成部分,受到了世界军事强国的重视^[1]。舰载直升机要求执行的任务较为复杂且多样化,如空战、电子战、预警侦察、通信中继、超视距目标指示、搜索救援、探测攻击潜艇等多项作战任务。

舰载直升机得以成功应用的重要前提无疑是先解决舰载直升机的着舰问题。虽然舰载直升机着舰的平均时间较短,但是着舰过程所占的事故率

却高达近 80%。着舰技术无疑是舰载直升机技术全面应用的关键所在。直升机自身具有强耦合、高阶、多变量等复杂性^[2],而着舰技术的难点不仅仅在于舰船艏摇、横摇、纵摇、横荡、纵荡与垂荡等六自由度运动,还面临海况多变、甲板晃动、复杂相对来流、甲板表面紊流场等复杂问题^[3]。甚至对于有人舰载直升机而言,飞行员经过长时间、高强度飞行,体力与精神力已非最佳状态,甚至有人员负伤、机体损毁情形,极大地影响着舰成功率。因此,舰载直升机应具有一套安全、自主的综合着舰系统。

基金项目:国家自然科学基金(61533008)资助项目。

收稿日期:2018-09-27;**修订日期:**2018-11-10

通信作者:廖智麟,中国直升机设计研究所高级工程师,E-mail: chrdi_lzl3666@126.com;陆晓安,男,硕士研究生。

引用格式:廖智麟,陆晓安,黄一敏,等. 直升机着舰引导与控制研究进展[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(6): 745-753. LIAO Zhilin, LU Xiaolan, HUANG Yimin, et al. Research progress of landing guidance and control for carrier-based helicopter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2018,50(6):745-753.

各国专家学者也为实现该目标进行了大量的研究与实验,取得了一定成就,如为研究舰船摇摆运动提出的实时状态预估策略^[4,5],甲板晃动情况的着舰平台补偿方法^[6,7],复杂海况紧急着舰的系绳引导策略^[8],海浪变化影响的平静机会预测研究^[9],空气尾流的仿真评估试验等^[10]。

目前公开的国外舰载直升机主要有“火力侦察兵”“S-100”“QH-50”和“CL-327”等,其中“火力侦察兵”和“S-100”应用最为成功。国内对直升机也展开了一系列研究,在各大科研院所和高校的努力下,我国自主研发的无人直升机在军用及民用上均取得较大成果,主要有“V750”“U8”“LE110”“WZ-5”“WZ-6B”和“蜜蜂-28”等无人直升机^[11]。下面对国内外直升机应用情况举例概述。

(1)国外对舰载无人直升机的研制已经取得一定成就。“火力侦察兵”是美国海军专门为海战研制的一款舰载无人直升机,2002年完成首飞,2006年实现自主着舰,已具有较强的海战能力,但为保持其综合性能,续航时间仅3 h。奥地利西贝尔公司于2003年研制“S-100”无人直升机,降低了综合性能要求,将续航时间延长至“火力侦察兵”的两倍,并已实现自主起降飞行。该直升机升限仅有3 962 m,在直升机旋翼噪音较大的情况下容易暴露。“鹰眼”是由美国波音公司研制的一种共轴双旋翼无人直升机,2006年现役,相比于“S-100”直升机,最大升限提升至14 600 ft,很好地保障了隐蔽性。

(2)在国内各大高校和科研院所的努力下,在舰载直升机自主研发上也取得了一定成就,主要有用于海上舰船作业的“V750”和“WZ-6B”等。“LE110”是由南航和上海某公司2002年联合研制成功的无人直升机。该机型使用自主研发的一套自动飞行控制系统,但其续航时间过短。“V750”是国内中航、中电等多家单位联合研制的舰载无人直升机,如图1所示,于2011年首飞,2012年实现批量生产。为解决“LE110”带来的问题,延长续航时间长达4 h,达到国际续航水平。该机抗风能力5级,装备多种任务设备,能够实现全天候的监视侦察。“WZ-6B”是国内总参某所专门为海军研制的舰载无人直升机,如图2所示。该舰载无人直升机不仅具备高精度舰面导引系统,具有“一键程控”功能,与其他直升机不同的是,配备了鱼叉着舰回收系统,具备运动舰面自主起降的能力。北京航空航天大学从20世纪90年代初开始研制共轴直升机“蜜蜂-28”,该机型是一种共轴双旋翼无人直升机,其最大飞行速度为130 km/h,续航时间为3~5 h,质量250 kg,最大升限3 000 m,可用于侦查,数据通讯,海上作战,测绘勘探等。

本文着重从引导、控制、环境影响及着舰流程等方面对舰载直升机着舰关键技术进行概述。



图1 “V750”无人直升机

Fig.1 V750 unmanned helicopter

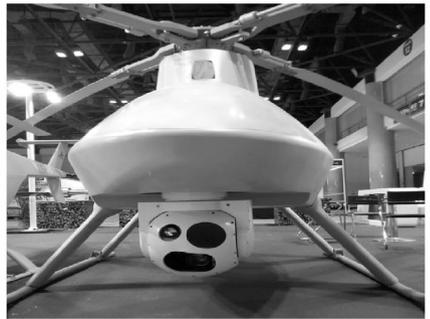


图2 “WZ-6B”无人直升机

Fig.2 WZ-6B unmanned helicopter

1 着舰自动引导技术

着舰引导是舰载直升机能够顺利完成着舰的前提保障。随着引导系统的作用距离及测量精度的提高,舰载直升机全天候着舰的自动化程度进一步提高,从而很大程度地减少着舰事故的发生。舰载直升机有多种着舰引导方式,主要包括雷达引导、GPS/卫星引导、视觉引导、光电引导。

1.1 雷达引导

舰船雷达系统通过接收机载雷达信号获得关于直升机位置和姿态的信息后,经过信息处理,再向直升机发射进场引导信号、中心偏差信息和下滑斜率信息,并形成双向通信,从而确立机舰姿态以及相对位置。通过信息实时测量机舰位姿信息,进行坐标变换,向机载系统实时发送信息,便于舰载直升机及时作出调整,保持沿着预设轨迹顺利着舰。

着舰引导雷达的优点是在能见度差、云底较低的复杂气象条件下,作用距离可达数十公里。不受光照条件影响,具备较强抗干扰能力,对机载设备要求不高,可提供较高精度的距离、偏航角数据,为实现自动进近着舰提供了强有力的保障。着舰引导雷达用来测量着舰飞机相对于舰面的偏差,并发送到着舰引导系统,根据甲板运动、风向和风速等

信息,生成着舰飞机的俯仰和侧滑控制指令,通过特高频(Ultra high frequency, UHF)信道向飞机发送控制指令,实现平稳着舰^[12]。

典型的无人直升机着舰雷达引导系统有美国 Sierra Nevada 公司的无人机通用自动恢复系统(UAV common automatic recovery system, UCARS)和法国 THALES 公司的 MAGIC ATOLS 系统。它利用舰上的着舰引导雷达测出机舰相对位置,将信息数据传送给无人直升机进行着舰引导^[13]。美军已研制的用于主战的全天候着舰系统的核心是一部 AN/SPN-XX 精确跟踪雷达,采用 Ka/X 双频段,Ka 频段雷达频率为 30.2 ± 0.2 GHz,利用 1.22 m 抛物面实现单脉冲卡塞格伦天线,X 频段雷达的工作频率为 $9\ 310 \pm 35$ MHz,MW 雷达进行自动搜索和捕获目标,毫米波雷达实现精确跟踪和引导。精密引导雷达是一种能同时实现正交波束角度测量和径向距离测量的系统^[14]。雷达引导技术已经相对成熟,激光雷达引导流程如图 3 所示^[15]。激光雷达输出反射值和范围值,反射值反馈 x, y, z 坐标值及三轴姿态角,平面拟合输出 z 坐标值、滚转角和俯仰角,所有信息送入观测模型,经过粒子滤波器之后获得甲板运动的预估值,利于实现精准着舰。雷达引导的水平精度可达到 3~5 m,垂直精度可达到 0.5 m,适用于直升机着舰进近及悬停过程。引导设备的抗干扰能力、发送数据的精度、精确定位能力和数据处理能力可进一步提高,设备本身也可往小型化发展,进一步提高雷达引导系统的经济性、实用性和可靠性。

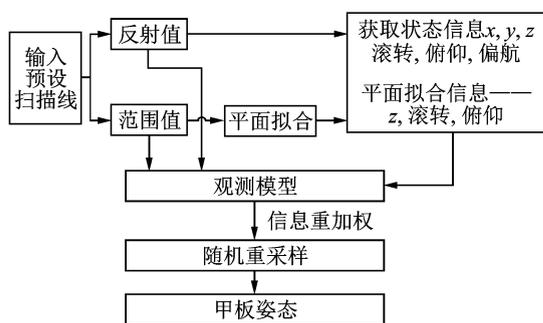


图 3 激光雷达引导流程图

Fig. 3 Flow-process diagram of laser radar guidance

1.2 GPS/卫星引导

与雷达引导类似,GPS/卫星引导通过 GPS/卫星获得机舰的相对位姿信息,经过信息处理,生成基准飞行轨迹,实现舰载直升机的着舰引导。GPS/卫星引导设备主要由搭载在舰船上的卫星接收设备以及直升机上的卫星信号接收器组成,具有精度高、使用简单、成本低、不受时间和地点制约等优点^[16-17]。美国的 GPS 系统遥遥领先于世界各

国,不仅技术成熟,应用广泛,正在研究与发展基于 GPS/INS 组合的着舰引导系统。它将成为美国海军下一代的主要引导方式。1996 年,由美国国防部建设,陆、海、空三军共同开发了下一代基于 GPS 的联合精密进近和着陆系统(Joint precise approach and landing system, JPALS)。但由于该系统存在的各种技术问题,严重影响了研制进度,直到 2007 年宣布初步完成关键技术研究。该系统在 2014 年完成舰载 JPALS 的系统开发和演示验证,具备初始运行能力;在 2013—2016 年期间,展开小批量生产,并在 F/A-18E/F 战斗机等多型飞机上进行飞行试验和设备安装^[18]。此外,2013 年 7 月奥地利西贝尔电子设备公司的“坎姆考普特”S-100 无人直升机配装了欧洲航宇防务集团 EADS 阿斯特里姆公司的“甲板发现者”(DeckFinder)局部定位系统,完成了一系列旨在验证 GPS 拒止环境中无人机自动起飞与回收能力的飞行试验。DeckFinder 是一种由 6 台射频发射机(伪卫星)组成的地面段和相应的 1 台机载接收机组成的局部定位系统,着舰导航定位精度优于 20 cm。

文献[19]给出了 INS/SRGPS/VISION 一体化着舰系统原理图,如图 4 所示。机载 GPS 接收机、KCPT 模块、舰载 GPS 接收机、GPS 预处理模块和数据链路装置构成了载波相位差 GPS(Carrier-phase difference GPS, CDGPS),这是 SRGPS 的主要传感源。数据链路装置传输 GPS 差分校正数据、载波运动信息和着舰轨迹参数等。机载运动学载波相位跟踪(Kinetics carrier phase track, KCPT)模块跟踪 GPS 载波相位,计算载波相位整周模糊度,给出飞机相对于航空母舰的精确位置和速度。机载制导计算机根据相对运动信息计算着舰制导指令。INS/GPS 与 GPS 预处理两路信息按照不同频率运用卡尔曼滤波信息融合。

国内的北斗导航卫星迅猛发展,目前北斗导航系统的第三阶段建设正在有序进行。2018 年 10 月 15 日西昌卫星发射中心用长征三号乙运载火箭以“一箭双星”方式发射第 39,40 颗北斗导航卫星。根据规划到 2020 年将完成 35 颗北斗三号卫星的组网,真正实现覆盖全球,可共同指挥多艘舰船,引导飞机着舰。但是,卫星导航易受电磁环境影响,战时使用不可靠,暂时不适宜作为主要的引导手段,更适用于多引导方式组合的辅助引导手段。待北斗系统发展完善,才有可能成为我国舰载直升机的重要着舰手段。

1.3 视觉引导

视觉导航技术正在逐步发展,基于视觉的着舰

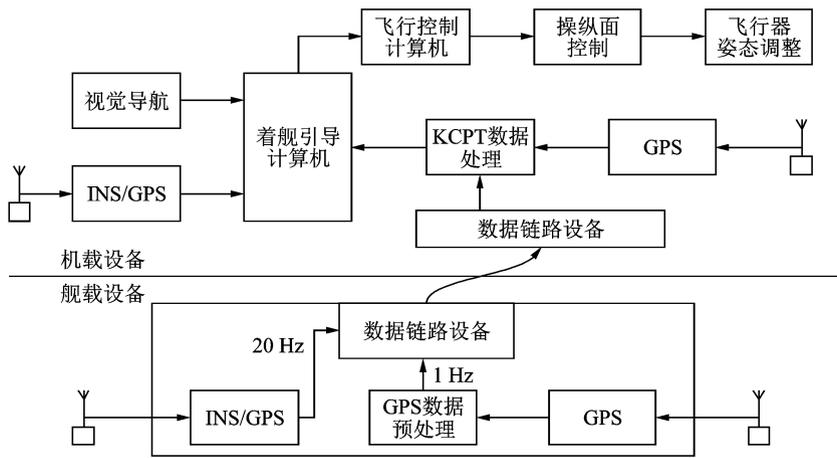


图4 GPS/INS 着舰综合系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of GPS/INS integrated system for landing

引导技术发挥有其独特优势。视觉着舰引导系统通过机载视觉传感器系统实时采集图像,在机载处理器中利用图像处理技术,通过对舰船目标特征信息的提取和匹配,得到舰船位姿信息,进而得到机舰的相对姿态和位置,为直升机飞行控制系统提供着舰引导参数,实现着舰任务。相对于其他的导航技术,视觉导航不仅具有获取外界信息量大、精度高、体积小、重量轻等优点,还具备抗干扰性能强等特性。视觉传感器属于被动传感器,通过物体反射光线成像,不受电磁干扰的影响^[20]。

目前,基于计算机视觉的无人机降落引导在无人机着陆方面取得了一些令人瞩目的研究成果^[21-23]。美国加州大学伯克利分校选择了特殊形状的着陆平台,通过图像处理提取角点特征,然后进行状态估计获取无人机的位置和姿态信息,并取得较好的试验效果^[24]。文献[25]采用双视觉摄像技术,对实时采集图像进行模板匹配和直方图匹配,实现实时高度估计。文献[26-28]利用图像采集设备对机场跑道特征进行实时检测,计算进近着陆阶段的精确位置和姿态,取得较好实验效果。文献[29]针对舰载无人机设计了基于红外视觉的着舰引导系统,简化了相对位姿估计的过程,并利用红外视觉具备减少光线的影响的能力。文献[30]在着陆跑道上设置红外视觉装置,用机载红外摄像机进行识别,采用仿射不变特征矩的方法计算出飞行姿态。文献[31]为提高红外视觉引导的姿态解算精度,着重分析了红外成像热模糊问题,并提出优化设计方法。文献[32]利用视觉分析下滑道灯光几何信息,再利用卡尔曼滤波得到视觉引导系统飞行器导航参数。文献[33]采用 Meanshift 聚类算法检测红外目标,由红外双目视觉导航系统引导无人机实现对无人机位置的解算。文献[34]设计了一套红外灯辅助引导的机载视觉导航系统引导无人机着陆。

1.4 光电引导

光电引导常被作为最后阶段引导飞机着舰的最重要手段,无论是激光跟踪、红外成像或是高分辨率电视引导方式都具有超高精度,能够准确地得出机舰位姿偏差信息,以用于着舰最后时刻也是事故率最高时刻的精准控制,消除偏差实现完美着舰。以激光引导为例,它主要由指向器(含激光测量部件)、辅助指向器、伺服机构等组成,采用激光照射无人机,由无人机上预设标志将激光反射回来,通过返回时间测量相对运动信息,着舰引导精度较高。光电引导方式还具备全天候、抗电磁干扰性强和无线电静默等诸多优点。

目前,美国正在研制的基于光电的进近着舰虚拟成像系统 VISUAL,法国以及日渐完善的 SADA 无人机光电着舰引导系统^[35],以及紫外引导这种新光电引导方式的兴起,体现了对光电引导的广泛关注。法国研制出“光电多传感器着舰引导系统:DALLAS”并装备于“福熙”号航母和“戴高乐”号核动力航空母舰和美国海军实施“进近着舰成像系统:VISUAL”并实现装备^[36]。除此之外,还有以菲涅尔透镜光学助降系统 FLOLS、激光目视助降系统 ICOLS 为代表的目视着舰光学助降系统等^[36]。研究者对基于红外检测、光学助降下滑光波束、飞行员光学视差辅助、激光发射波频段选择、视轴稳定控制、光电标校方法等课题开展了一系列研究,不断推动光电着舰引导的发展,其中基于基于红外检测的算法流程如图5所示^[37]。

除了上述常见引导技术外,还有基于天文、惯导测高等着舰引导技术,比如俄罗斯的 Resistor 系列着舰引导系统,还有美国的用于夜间着舰的舰载机精确进近与回收的“增强引导综合控制技术”(MAGIC CARPET)、“新型目视甲板灯阵引导”(Bedford array)等新技术。



图 5 基于红外检测的算法流程

Fig. 5 Procedure of infrared detection algorithm

2 着舰自动控制技术

直升机是一个高阶、多变量、强耦合系统,且由于旋翼机所特有的气动特性,导致了直升机的稳定性相比于固定翼差,存在不确定性较强和易受干扰等问题。除自身问题外,环境因素对着舰控制的影响也为重中之重,如舰船纵摇、横摇、艏摇、纵荡、横荡和垂荡的六自由度甲板运动,多变海面气候的来流和舰尾流影响等因素。在有人舰载直升机中,还需考虑飞行员综合素质,助降设施的人员安全,着舰视野拓展等诸多要素。下面对舰船运动预估技术、舰尾流两个重要环境影响因素成因及其研究方法进行简要分析。

(1) 六自由度舰船运动

舰船六自由度运动预估是着舰引导中十分重要的技术,在获得当前舰船位姿参数情况下,能较为准确地预测位姿变化是安全着舰的前提,以便于直升机调节自身姿态、匹配舰船运动实现平稳着舰。当前主要有卡尔曼滤波预估法、粒子滤波预估法、时间序列预估法等。卡尔曼滤波预估法虽然能够处理噪声情况,然而在实际应用中很难精确得到甲板运动的数学模型。粒子滤波预估法能够处理含量测噪声的情况,但仍然需要甲板运动数学模型,且计算复杂,实时性不高。时间序列法不依赖甲板运动本身的数学模型,采用最小二乘法对模型参数进行辨识,通过对多种模型作选择的判别方法准则(Akaike information criterion, AIC)对模型进行定阶从而得到预报模型,进而可进行递推预报。

(2) 舰面气流扰动

近舰流场尤其是舰尾流对直升机的飞行稳定性产生重大影响,它源于舰船航行时海面气流从前往后流动遭遇到舰船表面相对较高的建筑物阻挡,在建筑物后方产生不同程度的紊流。多数舰艇着舰点设于舰艇后方,因此不可避免要受到舰尾流影响。当前研究多是通过舰艇风限图的分析,选择气流较为平稳或是较缓慢的区域作为着舰点。国外主要通过对直升机进行多次舰载试飞,测量其在不同状态下的操纵量,并通过所测量结果给定该直升机的风限图,但该方法试验周期较长且成本较高^[38]。国内对于直升机着舰的研究不多。文献^[39]给出了直升机着舰时旋翼迎角、滚转角、总距、

周期变距及尾桨总距的计算模型,并以此模型介绍了理论风限图的确定方法。理论风限图确定的前提是进行直升机着舰的平衡计算^[40]。

综上舰载直升机的自身特性问题与环境影响因素复杂的处理过程可知,其着舰控制直升机飞行控制一直以来都是一个复杂问题,舰载直升机的飞行控制系统应具有解耦能力和鲁棒性能。针对无人直升机的飞行控制,国内外学者进行了广泛研究,从经典线性控制方法如 PID 算法,到现代控制方法:最优控制(Optimal control)、总能量控制(Total energy control, TEC)、预见控制(Preview control);从非线性自适应控制方法:非线性动态逆控制(Dynamic inversion control)、滑模控制(Sliding model control)、反演控制(Backstepping control)、非线性自适应容错控制,到智能控制方法。下面对常见控制方法进行简要概述。

(1) 经典与现代线性控制方法

经典 PID 控制方法,因其诞生较早,理论成熟,工程实用性强,实现较为简单,当前应用于控制大多数国内无人机,但因其处理不确定能力较弱,须与其他方法进行组合控制。

现代控制方法主要包括:①模型预测控制。该控制方法的设计与模型相关,针对不同复杂度的模型,其设计难度也有所不同,该控制律除了可实现直升机姿态控制外,还可对高度进行控制,配合实现直升机导航功能。②线性最优控制。该方法当前较少的适用于直升机姿态解耦控制的控制律,但需要对象的精确模型以处理系统的动态问题和噪声问题。③显模型跟踪控制。该方法设计简单,响应效果好,但鲁棒性不强,通常用于进行直升机全包线飞行控制设计,当前已应用于 ADOCS 项目和 RASCAL 项目。④特征结构配置。该控制可直接设计闭环系统的阻尼,解耦度,抗扰动性能好,适用于多变量系统,当前应用于位置姿态控制,如 BO-105 直升机位姿控制的采用特征结构配置。

(2) 非线性与自适应控制方法

非线性与自适应控制方法主要包括:①动态逆控制。它对控制对象进行逆模型求解,对数学模型精确度要求较高,求解过程比较困难,鲁棒性相对较弱,适用于直升机的姿态控制和全包线飞行控制。②自适应控制。它处理非线性能力强,对对象

本身依赖较少,在复杂多变的不确定环境下有良好的控制性能的优势,但在强扰动下处理能力较弱,当前广泛应用于直升机全包线控制。③ H_{∞} 控制。控制律设计及计算过程较为复杂,但具有强鲁棒性优势,当前广泛使用于直升机悬停以及位置姿态的控制等。④变结构控制姿态控制。该控制鲁棒性较好,应用于全包线飞行控制,但是工程实现较为困难。

(3)智能控制方法

智能控制方法主要包括:①模糊控制。该控制不依赖对象数学模型,极大简化了建模过程,但多数情况下需靠经验进行推理,理论准确性有待完备,该方法应用于直升机悬停过程及位置姿态的控制。②神经网络控制。该控制在预测推理、参数寻优、故障诊断上具有很强优势,同样应用于直升机全包线控制,但实时性、稳定性难以得到保证。

在国外直升机着舰控制中现代控制技术应用广泛。如美国航空发展中心(Naval Air Development Center)研究了F-8C舰载直升机自动着舰系统(Automatic carrier landing system, ACLS)。系统中利用最优控制理论解决着舰轨迹跟踪问题;NASA德莱顿飞行研究中心研究了在F/A-18舰载机上的 H_{∞} 控制解决被控对象出现参数摄动情况下的稳定问题等等。此外,国外一些研究机构已成功将现代控制应用到实际型号上,如加拿大“CL-372”高水平直升机已实现自主导航飞行和自动目标跟踪,美国海军“QH-50”攻击性无人直升机可执行反潜、侦察、监视、火力校射等多项任务,俄罗斯“卡-137”共轴双旋翼无人直升机也是发展相当成熟的舰载直升机^[41]。然而,国内无人直升机的控制大多采用经典PID控制,虽正在开展的先进控制理论性能研究,但是真正达到工程实现水平的还只是少数,如由国内中航、中电等多家单位联合研制而成的“V750”无人直升机,由南航和上海某公司联合研制而成的“LE110”无人直升机,由总参某所研制而成的“WZ-5”无人直升机已经应用了技术领先的现代控制方法。俄罗斯库兹涅佐夫号航母最新装备的数字化无线电综合控制系统,实现了全自动、全天候。英国的舰载滑跑垂直降落(Ship-borne rolling vertical landing, SRVL)飞行控制技术具有区别与其他飞行控制技术的独创性。美国的“飞机进场远程接管员”远程控制系统,由地面操作人员的操纵杆控制舰载机着舰成功,为未来着舰飞行控制技术开创了新思路。

3 着舰综合流程概况

当前大部分舰载无人直升机着舰动作多以分

步方式实现,很大程度上增加了着舰的容错力,在合适情况下能够平稳安全着舰,情况不当可及时实现复飞。着舰流程大致分为3个阶段:返航进场,悬停跟进,快速着舰。

其中,快速着舰阶段是整个着舰流程中事故率最高的一环。由此,在此阶段应配备专门的舰面助降系统。完备的助降系统在直升机着舰过程中不可或缺,机舰双向配合完成着舰过程,成功率大大高于舰载直升机单方面完成着舰过程。当前舰艇搭载的常见助降舱面设施有飞行甲板、助降标志及灯光信号、助降甲板及牵引设备。文献[42]中描述了一套完备的助降系统构成:GPS及惯导组合系统,副控计算机,显控台,主控计算机,指控通讯系统,导航系统,观测仪,跟踪雷达,塔台等舰载设备。21世纪,美军在新舰船上开始装备ASIST助降系统,集直升机着舰跟踪协调、系留、牵引、入库于一体,实现舰载直升机着舰回收全自动化,不再需要甲板面的人工干预作业,在提高着舰安全性、可靠性的同时,也较大程度改善了装备的使用维护保养。日海上自卫队装备的主力舰载直升机为SH-60K,是美SH-60B“海鹰”直升机在日本的引进生产机型,其舰面起降能力不会优于“海鹰”直升机^[43]。着舰助降系统几乎是当前中量级以上舰艇的必备系统。目前世界上主流直升机助降系统有法国“鱼叉”、加拿大“熊阱”、俄罗斯“渔网”等。“鱼叉-格栅”式直升机着舰快速系留装置由设在直升机底部的“鱼叉”锁紧机构和舰艇飞行甲板上的直径约2.5 m格栅构成,适用于舰艇横摇 $\pm 8^{\circ}$ 、纵摇 $\pm 2^{\circ}$ 情况,特点是具有自动快速锁紧特性且可由飞行员操纵实现复飞,可实现恶劣天气下的安全起降。二代“熊阱”拉降式着舰装置由方格盒状的快速固定器和张力钢索回收系统组成,特点是需要机舰人员配合着舰,甲板人员控制张力钢索系紧而机上人员控制机腹位于探针之上。“渔网”式着舰装置采用一张粗糙的尼龙网,特点是简单易实现,一旦直升机机轮陷入大网中就不能轻易摆脱,实现着舰。

虽然当前多数舰艇多配备了舰面助降系统的技术支持,但是直升机着舰的高风险性依然存在。有人直升机虽然驾驶员可以进行紧急干预,但是其着舰流程和规范,可以“移植到”无人直升机。较为完备的着舰流程应包括^[44]:舰载直升机发送返航着舰指令,引导系统判断是否满足着舰进场条件,根据机舰位姿状况生成着舰引导线,直升机通过接收器获得着舰控制指令,调节直升机位姿以对准着舰引导线,由现代制导方法获得直升机实时的进近轨迹和下滑轨迹,在实时预估舰船运动情况下飞行

控制器控制直升机沿着轨迹实现着舰,着舰引导机载控制器流程如图6所示。

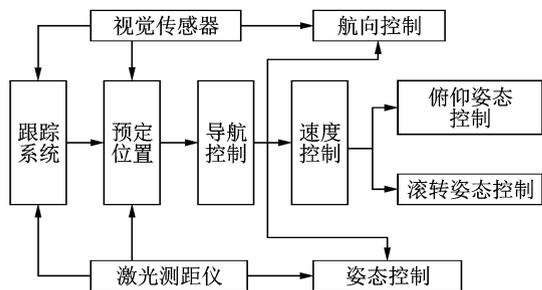


图6 着舰引导机载控制器流程图

Fig. 6 Flow-process diagram of ship-landing guidance airborne controller

文献[45]给出较为完备的着舰流程:接收返航指令,返航策略设计,路径实时生成与优化,返航策略更新确认,航迹位置与姿态跟踪飞行,到达进场门,判断是否满足着舰条件(不满足则悬停等待),最优下滑线计算,飞行至降落点正上方,甲板状态预估并捕捉间歇期,判断是否满足降落条件(不满足重新进行甲板状态预估),着舰姿态预估控制,判断是否满足降落条件(不满足则复飞重新开始计算最优下滑线),触舰,着舰结束。

4 直升机着舰技术展望

随着飞行控制、动力系统、数据链等关键技术的不断突破,舰载直升机必将不断拓展其使用范围,在未来海上任务中发挥着越来越重要作用。直升机着舰技术研究展望如下。

(1)发展强鲁棒性的直升机飞行控制技术。为保持直升机着舰过程中飞行稳定,完成对基准着舰航迹跟踪并保持与舰船位姿相匹配,抑制舰船尾流、甲板效应、空中阵风等因素干扰,飞行控制系统应具备较强的鲁棒性和解耦性以应对复杂多变的环境影响。

(2)发展高可靠性的无线数据链路技术。舰载直升机着舰引导的首要目标就是获取机舰双方的位姿信息,从而获取舰艇着舰时变情况以及直升机关键参数,信息的精确互通需要稳定、可靠、高速的信息传输通道。尤其是无人直升机海上作业过程,舰面控制站对直升机要进行遥控遥测,无线数据链路技术显得非常重要。

(3)发展高精度的自主导航定位技术。欲获得精准的着舰轨迹跟踪,应实时获得舰载直升机精确的位置信息和姿态信息,也需要精确获得舰船的位姿信息,才使舰载机着舰过程中实现位姿匹配。

这就对自主导航定位技术要求较高,高精度的组合导航定位系统对于舰载直升机返航自主着舰至为关键。

(4)发展高精确性的舰船甲板状态预估技术。在海浪影响下,海基着舰与陆基着舰的差别尤为明显。舰船六自由度运动使得舰载直升机在着舰最后阶段必须选择运动间歇期或者稳定期进行着舰,避免事故发生。因此对舰船运动进行实时短期的预报与评估至关重要。

(5)发展高效率的实时图像处理技术。视觉引导技术需要高效率的实时图像处理。有人直升机着舰过程中飞行员目视距离有限,需要计算机视觉技术进行辅助观测周围情况甚至超视距信息。一种准确性高、实时性好的图像处理算法对舰载直升机平稳着舰非常有利。

参考文献:

- [1] SANCHEZ-LOPEZ J L, SARIPALLI S, CAMPOY P, et al. Toward visual autonomous ship board landing of a VTOL UAV [C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems. [S. l.]: IEEE, 2013:779-788.
- [2] SANDINO L A, BEJAR M, OLLERO A. On the applicability of linear control techniques for autonomous landing of helicopters on the deck of a ship [C]//IEEE International Conference on Mechatronics. Istanbul, Turkey: IEEE, 2011:363-368.
- [3] YOO C S, CHO A, PARK B J, et al. Sea wave modeling and shipboard landing simulation of tilt rotor unmanned aerial vehicle [C]//International Conference on Control, Automation and Systems. Gwangju, South Korea: IEEE, 2014:1854-1859.
- [4] WEI D, YE J, WU X, et al. Time series prediction for generalized heave displacement of a carrier-borne helicopter platform [C]//Isecs International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Guangzhou, China: IEEE, 2008:80-84.
- [5] TAN C K, WANG J. A novel PID controller gain tuning method for a quadrotor landing on a ship deck using the invariant ellipsoid technique [C]//International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul, South Korea: IEEE, 2014:1339-1344.
- [6] WEI D, YE J, ZHANG X, et al. Real time multi-step prediction for carrier-borne helicopter platform motion [C]//International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Shandong, China: IEEE, 2008:655-659.
- [7] HERVAS J R, REYHANOGU M, TANG H. Automatic landing control of unmanned aerial vehicles

- on moving platforms[C]//IEEE, International Symposium on Industrial Electronics. Istanbul, Turkey: IEEE, 2014:69-74.
- [8] OH S R, PATHAK K, AGRAWAL S K, et al. Approaches for a tether-guided landing of an autonomous helicopter[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(3):536-544.
- [9] RIOLA J M, DIAZ J J, GIRON-SIERRA J M. The prediction of calm opportunities for landing on a ship: Aspects of the problem [C]//Oceans. Santander, Spain: IEEE, 2011:1-8.
- [10] YOO C S, PARK B J, CHO A, et al. Simulation based on motion platform for tilt rotor UAV shipboard landing[C]//International Conference on Control, Automation and Systems. Busan, South Korea: IEEE, 2015:1747-1750.
- [11] 黄誉. 无人直升机自主着舰关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
HUANG Yu. Research on key technology of automatic carrier landing for unmanned helicopter [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [12] 李喜龙, 范海震, 史会丽. 光电引导系统在舰载机着舰引导中的作用分析[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(7):1-6.
LI Xilong, FAN Haizhen, SHI Huili. Analysis of electro-optical guidance system used in carrier landing guidance[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(7):1-6.
- [13] 蓝启诚, 赖水清. 无人直升机着舰引导技术[J]. 直升机技术, 2017(1):59-65.
LAN Qicheng, LAI Shuiqing. Guidance technology of carrier landing for the unmanned helicopter [J]. Helicopter Technique, 2017(1):59-65.
- [14] 周煜, 伍逸夫, 赵峰. 航母着舰引导系统概述[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(11):22-24, 36.
ZHOU Yu, WU Yifu, ZHAO Feng. Review on the landing vectoring system of aircraft carrier[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(11):22-24, 36.
- [15] ARORA S, JAIN S, SCHERER S, et al. Infrastructure-free shipdeck tracking for autonomous landing [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013: 323-330.
- [16] CHO A, KIM J, LEE S, et al. Fully automatic taxiing, takeoff and landing of a UAV using a single-antenna GPS receiver only [C]//International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul, South Korea: [s. n.], 2007: 2485-2489.
- [17] HSIAO F B, HUANG S H, LEE M T. The study of real-timed GPS navigation accuracy during approach and landing of on ultralight vehicle[C]//International Conference on Recent Advances in Space Technologies. Istanbul, Turkey: IEEE, 2003.
- [18] 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, USA: [s. n.], 2001:852-862.
- [19] TANG D, JIAO Y, CHEN J. On automatic landing system for carrier plane based on integration of INS, GPS and vision[C]//Guidance, Navigation and Control Conference. Nanjing, China: IEEE, 2017:2260-2264.
- [20] KONG W, ZHOU D, ZHANG Y, et al. A ground-based optical system for autonomous landing of a fixed wing UAV[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014:4797-4804.
- [21] XU G, ZHANG Y, JI S, et al. Research on computer vision-based for UAV autonomous landing on a ship[J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(6): 600-605.
- [22] AZINHEIRA J R, RIVES P. Image-based visual servoing for vanishing features and ground lines tracking: Application to a UAV automatic landing [J]. International Journal of Optomechatronics, 2008, 2(3):275-295.
- [23] CESETTI A, FRONTONI E, MANCINI A, et al. A vision-based guidance system for UAV navigation and safe landing using natural landmarks[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2010, 57(1): 233-257.
- [24] SHARP C S, SHAKERNIA O, SASTRY S S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle [C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul, South Korea: IEEE, 2003.
- [25] JEON D, CHO K, KIM D H. Vision-based autonomous landing for small-scale unmanned rotorcraft [C]//IEEE International Symposium on Object/component/service-oriented Real-time Distributed Computing Workshops. Newport Beach, CA, USA: IEEE, 2011.
- [26] LAIACKER M, KONDAK K, SCHWARZBACH M, et al. Vision aided automatic landing system for fixed wing UAV[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 2013.
- [27] RAJA V M. Vision based landing for unmanned aerial vehicle[C]//Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2011.
- [28] ABUJBARA K, ALHEADARY W, SUNDARAM-ORTHY G, et al. A robust vision-based runway detection and tracking algorithm for automatic UAV

- landing[C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Denver, CO, USA; IEEE, 2015.
- [29] YAKIMENKO O A, KAMINER I I, LENTZ W J, et al. Unmanned aircraft navigation for shipboard landing using infrared vision[J]. Aerospace & Electronic Systems IEEE Transactions on, 2002, 38(4): 1181-1200.
- [30] XIAOHONG W, GUILI X, YUPENG T, et al. UAV's automatic landing in all weather based on the cooperative object and computer vision[C]//Second International Conference on Instrumentation. Harbin, China; IEEE, 2013.
- [31] FENG D W, XU G L, WANG B, et al. Optimum design of the cooperation objective for computer vision-based UAV autonomous landing[J]. Advanced Materials Research, 2013, 718/719/720:1221-1227.
- [32] DAQUAN T, HONGYUE Z. Vision based navigation algorithm for autonomic landing of uav without heading & attitude sensors[C]//Third International IEEE Conference on Signal-image Technologies & Internet-based System. Shanghai, China; IEEE Computer Society, 2007.
- [33] KONG W, ZHANG D, WANG X, et al. Autonomous landing of an UAV with a ground-based actuated infrared stereo vision system[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. Tokyo, Japan; IEEE, 2013.
- [34] GUI Y, GUO P, ZHANG H, et al. Airborne vision-based navigation method for UAV accuracy landing using infrared lamps[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 72(2):197-218.
- [35] 薛海中. 飞机着舰引导及监视系统技术[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 2009.
- [36] ARTHUR P. Analysis of the instrument carrier landing system certification process for amphibious assault ships[D]. USA: University of Tennessee Libraries Knoxville Tennessee, 2003.
- [37] BAORONG X, YU Z, SHUYI F, et al. Research of the infrared ship target recognition technology based on the complex background[C]//2018 IEEE/ACIS 17th International Conference on Computer and Information Science (ICIS). Singapore, Singapore; IEEE, 2018: 850-854.
- [38] LEE D, HORN J F. Simulation and control of helicopter shipboard launch and recovery operations [C]//Proceedings of the AHS Flight Controls and Crew System Design Specialists' Meeting. Alexandria: AHS, 2002: 1-10.
- [39] 赵维义, 刘航, 傅百先. 舰载直升机风限图及其试飞[J]. 飞行力学, 2002, 20(4): 48-50.
- ZHAO Weiyi, LIU Hang, FU Baixian. Safe operating envelopes of onboard helicopter and its flight test [J]. Flight Dynamics, 2002, 20(4): 48-50.
- [40] 孟晓伟, 徐国华, 史勇杰, 等. 基于CFD与飞行动力学耦合方法的舰载直升机着舰平衡分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(2): 8-24.
- MENG Xiaowei, XU Guohua, SHI Yongjie, et al. Balance analysis of shipboard helicopter landing by cfd and flight dynamics coupling model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(2): 8-24.
- [41] 刘志超, 石章松, 吴中红, 等. 舰载无人直升机的现状和应用展望[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(12): 1-4.
- LIU Zhichao, SHI Zhangsong, WU Zhonghong, et al. Present situation and application prospect of the naval shipboard unmanned helicopter[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(12): 1-4.
- [42] 王金云. 舰载直升机助降适配系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- WANG Jinyun. Study on the carrier helicopter landing adapter system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [43] 王海, 常斌, 段广战. 国外舰载直升机高海况起降能力研究[C]//第三十一届全国直升机年会论文集. [S. l.]: 海军装备研究院, 2015: 24-29.
- WANG Hai, CHANG Bin, DUAN Guangzhan. On the take-off/landing capability of foreign shipboard helicopters in high sea state level [C]//Symposium of the 31th National Helicopter Annual meeting. [S. l.]: Naval Equipment Research Institute, 2015: 24-29.
- [44] BAGEN W, HU J, XU Y. A vision-based unmanned helicopter ship board landing system [C]//International Congress on Image and Signal Processing. Tianjin, China; IEEE, 2009: 1-5.
- [45] 朱永伟, 王庆权, 王江, 等. 舰载无人直升机着舰控制引导系统[J]. 飞航导弹, 2017(5): 87-91.
- ZHU Yongwei, WANG Qingquan, WANG Jiang, et al. Control and guidance system of ship-borne unmanned helicopter landing[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(5): 87-91.