

舰载无人机自主着舰回收制导与控制研究进展

甄子洋¹

摘要 舰载无人机正成为未来海战的重要组成部分, 制导与控制是舰载无人机自主着舰/回收的关键技术. 本文综述了舰载无人机自主着舰/回收制导与控制技术. 概述了舰载无人机的发展历史, 简单描述了舰载无人机跑道拦阻着舰、撞网回收、伞降回收、绳钩回收、天钩回收、过失速着舰、智能飞落着舰、风向筒回收、秋千式吊架回收等典型着舰回收方式. 在深入分析无人机自主着舰/回收制导与控制关键问题的基础上, 重点概述了无人机着舰/回收经典制导与现代制导技术, 以及着舰/回收经典控制、现代控制、非线性与自适应控制、智能控制等飞行控制技术的研究现状. 最后, 对无人机自主着舰/回收制导与控制技术的发展状况进行总结, 并对未来研究重点进行展望.

关键词 无人机, 自主着舰, 舰船回收, 制导系统, 飞行控制, 非线性控制, 智能控制

引用格式 甄子洋. 舰载无人机自主着舰回收制导与控制研究进展. 自动化学报, 2019, 45(4): 669–681

DOI 10.16383/j.aas.2018.c170261

Research Development in Autonomous Carrier-Landing/Ship-Recovery Guidance and Control of Unmanned Aerial Vehicles

ZHEN Zi-Yang¹

Abstract Carrier-based unmanned aerial vehicle (UAV) combat is becoming an important form of future naval warfare. Guidance and control is the key technology of UAVs autonomous carrier-landing/ship-recovery. This paper summarizes the research status of carrier-based UAVs automatic landing guidance and control technology. First a development history of carrier-based UAVs is presented. Then, the typical landing recovery modes are introduced such as arresting line landing, net recovery, parachute/parafoil recovery, cable hook recovery, skyhook recovery, post stall recovery, bio-inspired perched landing, wind sock recovery and trapeze recovery. And key technical problems of carrier-landing/ship-recovery are analyzed. After that, the research status of UAVs automatic landing using classical and modern guidance techniques and flight control techniques including classical control, modern control, nonlinear and adaptive control, and intelligent control are summarized. Finally, research development and future trend of UAVs autonomous carrier-landing/ship-recovery technology are forecasted.

Key words Unmanned aerial vehicle (UAV), autonomous carrier-landing, ship-recovery, guidance system, flight control, nonlinear control, intelligent control

Citation Zhen Zi-Yang. Research development in autonomous carrier-landing/ship-recovery guidance and control of unmanned aerial vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(4): 669–681

无人机具有独特优势, 与有人机相比, 其显著优点在于能够在 3D (Dull, dirty, dangerous) 环境下执行任务, 在军用和民用领域都具有广泛应用前景^[1]. 舰载无人机是一类装备在军舰上的由飞行器、

任务设备和舰面系统等组成的无人驾驶飞行器, 具有成本低、作战使用灵活、可避免人员伤亡等优势, 将成为航母和其他舰船的重要武器力量^[2]. 海湾战争、科索沃战争、阿富汗战争等现代局部战争中, 舰载无人机执行了大量的空中侦察、目标指示、战损评估、弹道校正等重要任务. 2003 年美国空军启动了联合无人空战系统 (J-UCAS) 项目, 旨在演示和评估陆基和舰载无人空战系统及加快研制生产该作战系统所必需的未来技术, 以提高空军和海军的作战能力. 2011 年 2 月, 美国海军高调宣布一款能够从航母上起飞的新型无人机 — X-47B 无人侦察攻击机完成首次试飞, 它具备高水平的空战系统, 可为美军全天候作战任务提供作战支持.

早在 20 世纪 20 年代, 无人机就已在某些国家海军中得到应用. 当时的无人机多数由有人

收稿日期 2017-05-13 录用日期 2018-04-28
Manuscript received May 13, 2017; accepted April 28, 2018
国家自然科学基金 (61741313, 61673209, 61533008), 航空科学基金 (2016ZA52009), 中央高校基本科研业务费专项资金 (NS2017015), 江苏省六大人才高峰高层次人才项目 (KTHY-027) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61741313, 61673209, 61533008), Aeronautical Science Foundation (2016ZA52009), Fundamental Research Funds for the Central Universities (NS2017015), and Jiangsu Six Peak of Talents Program (KTHY-027)
本文责任编辑 朱纪洪
Recommended by Associate Editor ZHU Ji-Hong
1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 211106
1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106

机改装而成, 当作靶标或侦察用。从 20 世纪 80 年代开始, 随着无人机技术的迅猛发展, 出现了众多先进的舰载无人机。美国海军拥有世界上性能最先进、数量最多的舰载无人机, 已经应用或正在开发的舰载无人机主要包括^[3-5]: 以色列麦茨雷特公司研制最初用于发现战列舰的“先锋”(Pioneer) 无人机、美国侦察系统和无人机制造商 Teledyne-Ryan 研制的 BQM-145A 中程无人机、美国诺斯罗普·格鲁曼公司开发的世界上第一款喷气式无人驾驶战斗/侦察机 X-47B 无人战斗机、美国通用原子航空系统公司研发的“捕食者”(Predator) C — “复仇者”型长航时无人攻击机、由波音公司与英国因斯特公司联合研制的第一架专门用于支持海军行动的海事专用无人机“扫描鹰”(ScanEagle) 无人机、美国海军陆战队的“银狐”(Silver Fox) 低成本小型无人机、美国诺斯罗普·格鲁曼公司生产的用于无人情报、监视、侦察、“广域海上监视”的“全球鹰”(Global Hawk) MQ-4C 无人机、澳大利亚国营飞机公司(GAF)研制的单发喷气式靶机“金迪维克”(Jindivik)(美国、澳大利亚等国海军已采购^[6-8])、美国 AAI 公司研制的 RQ-7 “影子 200”战术无人机。以色列也是研制舰载无人机的佼佼者, 它先后推出了“猛犬”、“拓荒者”等舰载无人机。此外, 加拿大、法国和意大利等国先后研制成功了“哨兵”、“奇观”、“塘鹅”等舰载无人机。

随着无人机技术的发展与应用, 无人机自主控制成为当前航空宇航科学与技术、控制科学与工程、信息与通信工程等学科领域的研究热点。为此, 无人机自主着舰是舰载机自动着舰和无人机自主控制等相关技术的重要发展趋势。由于着舰环境十分复杂, 精确制导与控制技术成为舰载无人机安全着舰/回收(Carrier-landing/Ship-recovery)的重中之重, 我国关于无人机着舰/回收技术的研究起步较晚, 但近年发展迅速。南京航空航天大学在有人舰载机自动着舰引导与控制技术研究基础上, 较早系统地开展了无人机着舰技术的研究^[9-12]。

舰载无人机正日益成为海洋军事强国争相发展的重要舰载武器装备, 本文综述了国内外无人机着舰回收制导与控制关键技术的研究进展。本文结构安排如下: 第 1 节概述无人机自主着舰/回收不同方式; 第 2 节概述无人机自主着舰/回收制导与控制的关键问题; 第 3 节和第 4 节概述无人机自主着舰/回收制导技术和飞行控制技术的研究进展; 第 5 节总结舰载无人机着舰/回收技术发展现状, 并对未来趋势进行了分析展望。

1 典型的舰载无人机着舰/回收方式

舰载无人机着舰/回收方式种类繁多, 下面概述

几种典型着舰/回收方式的发展现状, 主要包括^[13]:

1) 跑道拦阻着舰(Runway arrested landing). 1922 年 10 月 26 日, 美国 Godfrey deC·Chevalier 少将驾驶一架 39B 双翼机, 首次采用拦阻着舰方法着陆于美国海军第一艘专用航母——兰利号航母^[14]。拦阻着舰源于有人舰载机着舰, 主要用于大型舰船, 因为大型舰船有较大甲板, 其质量和尺寸较大, 对海浪运动不甚敏感。攻击型无人机等大型无人机, 例如捕食者、全球鹰等已成功完成在航母上的起降。该方法已成为回收非垂直起降飞机着舰的标准方法^[15]。

2) 撞网回收(Net recovery). 1986 年在美国爱荷华州号(USS Iowa)军舰上, 采用撞网回收方法第一次成功回收 RQ-2 先锋无人机, 它是一种简单且确实可行的方法^[16-18]。相对其他类型无人机, 轻型和超轻型无人机更适合该方法, 例如国际合作的“先锋”(Pioneer)、美国的“海上机载测深索”(Sea-ALL)、“银狐”(Silver Fox)、“杀人蜂”(Killer Bee) 都成功地使用过撞网回收系统。文献[19-20]开发了简易的基于 GPS 引导的撞网回收系统。文献[21-22]设计了基于视觉引导的无人机撞网回收系统。回收网可以放置在甲板上方或甲板侧面等不同位置, 也可以倾斜放置或垂直放置。若是垂直放置, 无人机需有尾钩挂住网^[23]。

3) 降落伞/翼伞回收(Parachute/Parafoil recovery). 固定翼无人机需要一个最小空速来维持可控飞行, 这限制了机翼升力^[24]。伞降回收主要包括三种方法: a) 无控降落伞^[25], 它辅助机翼升力, 这种回收方法主要用于靶机回收, 例如澳大利亚海军的 Kalkara 无人机、英国的 Phoenix, Observer, Skyeye 无人机、意大利的 Mirach 100 无人机、美国的 Exdrone, Israeli Ranger 无人机。同时, 一些采用常规跑道着舰的陆基无人机也使用降落伞回收作为紧急回收的方法, 例如美国 Predator 等使用降落伞作为应急回收方法; b) 翼伞/滑翔伞(Parafoil/Parasail)^[26-28], 通常是长方形或椭圆形, 自带操纵系统控制其飞行状态。滑翔伞是翼伞的一种, 可以作为滑翔机使用。滑翔伞回收飞机是 Greenhalgh 等人于 1974 年提出的, 1991 年在英国 Skyeye 号无人机上进行了飞行测试; c) 动态降落伞^[10], 来源于一些飞机在着陆着地之前使用减速伞或反推力, 也来源于过失速问题, 但该方法还未见实际使用。

4) 绳钩回收(Cable hook recovery). 它是无人机在远海可能遇到包括大浪、风、紊流等条件下实现自动回收的一种有效手段^[29-30]。主要对象是小型固定翼无人机, 相对于“先锋”无人机这样尺寸的无人机, 使用绳钩回收比广泛使用的撞网回收可以获得更好的操作性能。Khantsis 等研究了无人机绳钩

回收技术的有效性^[31-32].

5) 天钩回收 (Skyhook recovery). 对于无人机来说, 尤其是小型无人机, 可以采用飞行中捕获这种方法, 由此产生了天钩回收方式, 即在导引装置指引下, 使机翼翼尖小钩捕获悬挂在回收系统吊杆上的拦阻绳, 拦阻绳连接吸能缓冲装置, 触绳后绳钩回收系统柔和地吸收能量, 使无人机回旋减速, 从而平稳、准确地实现拦阻回收^[33]. Insitu 公司的小型“海上扫描” (Seascan) 无人机和波音公司的“扫描鹰” (Scaneagles) 无人机使用垂直的悬浮钢丝天钩回收技术^[34].

6) 过失速回收 (Post stall landing). 采用类似动态机动着舰的思想, 也是无人机着舰/回收方式的发展趋势之一. 以色列 Elbit Systems 公司的 Skylark I 无人机的回收方式包括过失速、拦阻和天钩^[34]. 另一种方法是通过一个较陡的向上拉平动作, 使无人机在正常迎角降低速度, 在轨迹最高点时无人机达到失速后降落到理想点. 不过, 该方法须提供一定高度和无障碍的着舰点. 然而, 实际机动形式取决于飞机特性, 特别是机翼负荷、有效推力以及升降舵操纵能力. 文献 [35] 研究了基于非线性模型预测控制的无人机失速着陆控制问题.

7) 智能飞落着舰 (Bio-inspired perched landing). 这是一种模拟鸟类飞落着陆的无人机回收方式^[36-39]. 着舰过程分为几个阶段: a) 无人机进场, 控制进场速度, 通过机动最小化或优化水平和纵向速度, 通过增加迎角把水平速度转化为垂向速度; b) 起落架 (人工爪) 伸展, 一旦飞机进入预定位置, 起落架扩展以便抓住停留处, 扩展过程时间最小化, 以便减小外部干扰引起的着舰误差, 还需要速度匹配, 减小对停留处的碰撞冲击; c) 吸收碰撞能量, 一旦抓爪接触停留处, 落点的受力与飞机速度和质量有关, 需要通过一个受控的力来分散撞击动能; d) 能量分散之后, 控制飞机位置和方位, 所以系统需要两个控制器.

8) 风向筒回收 (Wind sock recovery). 风向筒是圆锥形, 开口比翼展要大许多, 尾部先封闭, 当飞机进入后, 由于风向筒具有压缩、内紧特性, 使得飞机减速至停下, 然后打开风向筒尾部即可取出飞机^[34]. 该方式回收时间短、复杂度低、重量轻, 但是缺陷是无法回收前置螺旋桨无人机.

9) 秋千式吊架回收 (Trapeze recovery). 由现成的海上起重机、安装在起重机吊杆末端的秋千式吊架、安装在无人机上的高升力翼组件、拦阻钩等组成^[34, 40-41]. 该方式适用于舰船回收长航时、大型无人机, 具有很好的应用前景.

根据着舰/回收方式, 出现了多种着舰/回收引导系统, 常见引导方式包括: 雷达、卫星、激光和视

觉等, 引导系统用于获取理想着舰/回收目标点的位置、速度和姿态信息或相对运动信息, 输入给制导与控制系统.

2 无人机着舰/回收制导与控制关键问题

由于着舰环境十分恶劣, 舰尾气流、着舰区紊流、舰船甲板运动等扰动作用都会对无人机着舰产生很大影响, 极大增加了无人机自主着舰难度, 严重影响了着舰安全.

无人机着舰/回收制导与控制系统的原理框图如图 1 所示. 不论采用何种着舰/回收方式, 制导与控制系统首先需要获取着舰/回收目标位置和姿态的运动信息, 计算或测量机舰相对运动信息, 对甲板运动进行预测以实现甲板运动补偿, 生成基准下滑轨迹, 计算轨迹偏差, 产生制导指令并转化为姿态指令输入给飞行控制系统控制无人机.

无人机系统具有不确定、非线性、多变量耦合和受外界扰动等特性, 而不确定性主要来源于非定常气动特性、燃油变化带来的重心和惯量变化、系统故障等, 非线性主要表现在气动力及其系数都是状态相关的非线性函数以及六自由度运动本身呈现出非线性特性, 多变量耦合主要体现在纵横向运动耦合. 无人机的数学模型可由一组非线性微分方程组简单表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{D}, \mathbf{E}) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{X} = (V, \alpha, \beta, p, q, r, \theta, \psi, \phi, x, y, h)^T$ 为状态向量 (分别表示速度、迎角、侧滑角、滚转角速率、俯仰角速率、偏航角速率、俯仰角、偏航角、滚转角、位置分量), $\mathbf{U} = (\delta_T, \delta_e, \delta_a, \delta_r)^T$ 为控制向量 (分别表示油门、升降舵偏角、副翼舵偏角、方向舵偏角), \mathbf{D} 表示外界干扰量, \mathbf{E} 表示不确定量, 根据不确定性的来源, 既可以表示为外部输入量, 也可以表示为系统参数摄动量.

与无人机着陆相比, 无人机着舰的区别与难点主要在于: 着舰过程没有拉平阶段, 着舰平台是一个六自由度运动平台, 对下滑轨迹及落点的控制精度要求更高, 着舰环境更加复杂且对无人机干扰更加严重, 恶劣的着舰环境更容易引起无人机系统出现故障. 针对上述复杂的无人机对象及着舰任务, 自主着舰需要解决的制导与控制关键问题包括:

1) 无人机自主着舰/回收制导问题. 该问题可以看作一个移动目标寻的制导问题. 无人机自主着舰时, 需要事先设定进场着舰基准轨迹, 基准轨迹是指综合考虑机舰协同、飞行机动、飞行时间、着舰特殊要求等约束因素下, 从无人机初始设定位置到目标着舰位置的最优或可行基准运动轨迹. 轨迹控制器的设计目标是根据实时测量获得的机舰相对位置,

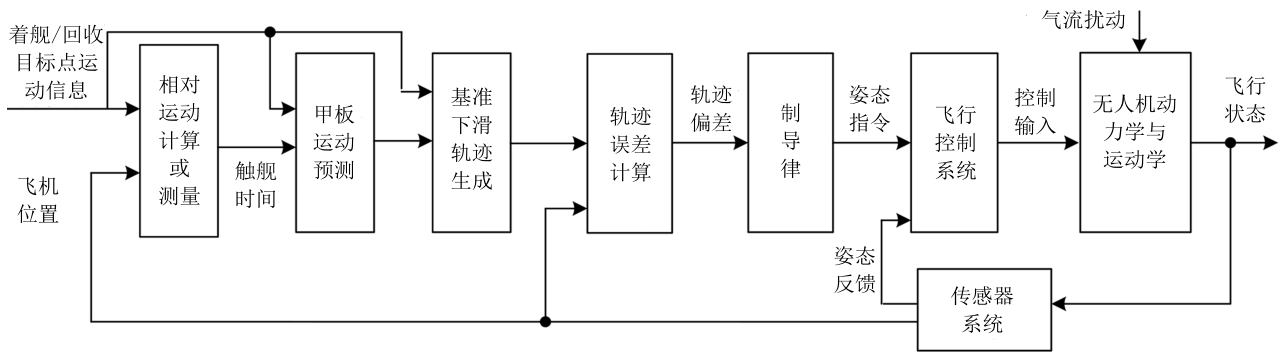


图1 无人机自动着舰/回收制导与控制系统原理框图

Fig. 1 Guidance and control system diagram for automatic carrier-landing/ship-recovery of UAV

提高系统对基准轨迹的动态跟踪性能和对外界扰动的抑制能力。因此，制导问题主要包括基准轨迹生成、机舰位置测量与计算、制导信号生成等，传统上它属于姿态控制回路的外环。

2) 无人机着舰轨迹的精确跟踪控制问题。舰载无人机受到外界环境干扰以及系统本身参数不确定等因素影响时，要求控制器仍具备使飞行器精确跟踪基准轨迹的控制性能。对于拦阻着舰，理想着舰点在舰尾部斜坡距离 48.768 m (160 ft) 处，有 4 条拦阻索分布在着舰点处，间隔为 12.192 m (40 ft)。下滑角一般为 -3.5° ，飞机到达舰尾时要求净空为 2.560 m (8.4 ft)，并在 1 s 后以 3.767 m/s (12.36 ft/s) 撞击速度着舰^[42]。着舰轨迹有严格的容许范围。例如，对于 5° 的下滑道，高度容许误差 1 m 需要 11.5 m 的甲板长度，若要考虑由于舰船运动引起的着舰位置变化则需要更长的甲板。而且，无人机是一种典型的强干扰不确定非线性多变量系统，这给控制器设计也带来了很大挑战。

3) 无人机着舰低速下滑姿态稳定控制问题。无人机在进场着舰段，随着飞行速度减小，飞行迎角一般都会超过临界迎角，处于速度不稳定区域，使飞行轨迹保持变得非常困难。无人机着舰时通常通过控制飞机姿态角来控制飞机航迹角，航迹角对姿态角的动态响应特性直接影响飞机的基准轨迹跟踪性能，而且飞行速度和航迹角对推力和升降舵控制指令响应之间存在强烈耦合，所以速度保持须与姿态控制同时作用。因此，为了保持无人机着舰状态下的低速稳定性，提高基准轨迹跟踪精度，必须在气动舵面操纵同时对发动机推力进行控制。

4) 舰船甲板运动扰动补偿问题。舰船在海上航行过程中，由于受海浪、海涌及风的影响，舰体将会产生纵摇、偏航、横摇、上下起伏等形式的甲板运动，导致舰船上的着舰点为三自由度活动点，严重影响无人机着舰的难度以及安全性，尤其采用拦阻着舰、天钩回收、过失速着舰和智能飞落着舰等方式。下

滑角必须大于甲板运动在进场的方向所允许的角度幅度，否则当甲板的倾斜度大于下滑角时，着舰是不可能的。太低的角度进场是致命的，因为无人机会撞到舰尾。因此，进场航线应该认真设计，以便在碰到舰尾时，飞机在舰尾有一个适当的高度安全裕度。为补偿甲板运动扰动，通常在着舰最后阶段加入甲板运动补偿，使得无人机跟踪实际着舰点飞行。

5) 甲板风与舰尾气流扰动抑制问题。通常情况下，无人机从舰尾进场，因为可以借助舰船速度来减小碰撞速度，不过这需要无人机穿越舰船的尾流场，另外还可能有强侧风或顺风。如果允许无人机从相反方向进场，需要一个直通的甲板或两个着舰甲板，这增加了对舰船的设计要求。与有人机相比，在海上的多变的环境下，无人机对恶劣天气条件的适应能力较弱。甲板上的气流分布受到海面环境和甲板布局、甲板上建筑物或武器装备布置的影响，容易导致舰载机着舰的安全性受到威胁。因此，研究舰体周围流场分布、设计强鲁棒性控制系统至为重要。

6) 飞机故障情形下的容错控制问题。面对恶劣的着舰环境以及复杂而艰巨的作战任务，飞机机体损伤、执行器故障或传感器失效都是舰载无人机实际飞行过程中需要考虑的问题。然而，现有的多数容错控制方法很难直接应用到六自由度运动无人机的飞行控制系统中。

3 无人机着舰/回收制导研究

无人机基准下滑轨迹的生成是着舰/回收轨迹制导的前提，杨一栋、甄子洋等分别设计了基于飞机重心和飞机尾钩的着舰基准轨迹，并且为补偿甲板六自由度运动扰动，对基准轨迹进行了修正^[10]。无人机着舰/回收问题可看作一个移动的目标寻的制导，往往需要更精确的控制。目标寻的制导算法大致分为经典制导算法和现代制导算法。下面概述无人机自主着舰/回收制导问题的研究进展。

3.1 经典制导方法

经典制导算法有多种,如追踪法、三点法、平行接近法和比例导引法等。追踪法、平行接近法要求制导系统在每一个瞬间都要准确测量目标位置、飞行速度以及前置角,制导系统有些复杂^[43]。比例导引法具有需要信息量小、结构简单、易于实现等优点,典型的改进算法有:纯比例、理想比例、真比例、PID比例、变结构比例、修正比例等。

1) 追踪法。追踪法是飞行器速度向量始终指向目标的一种导引方法。首尔大学 Yoon 等^[21]研究了基于追踪制导技术的无人机撞网回收问题,设计了纯追踪、前置追踪和伪追踪制导律。前置追踪的制导指令与追踪法的制导指令(视线角、航迹角、偏航角)为回收网中心点的高度、宽度以及飞机重心与回收网中心点的纵横向距离有关。若不考虑前置角,则为纯追踪法;若考虑前置角,则为前置追踪法;若视线角中纵横向相对距离改为指向虚拟着陆点的分段轨迹,则是伪追踪法。随后, Yoon 等^[22]将其拓展用于螺旋形下降轨迹的撞网回收制导问题中,这种螺旋形轨迹可以从任意位置、航向角起始,到达朝向回收网的最终进场航路点,控制飞机轨迹角与螺旋形下降末端时的进场方向保持一致,飞机直接从进场航路点导引到回收网,并进行了仿真验证。用追踪法导引无人机着舰/回收,飞行轨迹比较弯曲,双方速度比受到严格限制,而且只能从舰船后方接近,但它容易实现,适用于低速度运动舰船回收使用。

2) 比例导引法。比例导引法是指要求制导导弹速度矢量转动角速度与弹目线转动角速度成比例的一种导引方法,易于工程实现且对不同机动特性的目标适应能力较强。在无人机最后着舰阶段由于船体振荡原因,无论是回收窗口的速度还是加速度都在不断变化,除非有着舰目标区域精确预测的模型,否则经典导引方法的效果都有所减弱,不能很好地满足着舰性能要求。墨尔本皇家理工大学 Khantsis^[31]研究了基于纯比例导引(Pure proportional navigation, PPN)和真比例导引(True proportional navigation, TPN)的无人机绳钩着舰技术,将着舰问题转化为寻的制导问题,由制导律产生垂直和水平方向的过载因子指令,然后运动学转换环节将这些指令转化为倾斜角指令和常规机体的过载因子指令,并进行了仿真验证。甄子洋等^[44-45]提出了一种基于GPS引导的无人机自动着舰制导系统,主要采用了PID引导策略。

3) 视线法。视线是指舰载无人机位置点指向下一个航路点,基准航迹被离散化为航路点序列。Skulstad^[46]、Kim^[47]等在地面进行了撞网回收无人机实验,就是利用视线制导法(LOS)进行回收引导。You 等^[48]在地面进行无人机拦阻绳着陆飞行验证

来模拟航母拦阻索着舰,设计了基于瞄准视线的轨迹跟踪制导律,将纵向和侧向轨迹误差分别转化为俯仰角指令和滚转角指令予以消除。

然而,比例导引法、直接视线法、消除侧偏法等传统制导方法几乎都受限于目标区域的动态变化,如果动态变化预测不准确,引导性能将显著下降。为此,针对甲板着舰区域动态变化难以精确预估的问题,郑峰婴、甄子洋等^[49]设计了一种基于新坐标系动态变化的自动着舰引导算法。在捕获阶段,新坐标系随无人机空间位置变化而变化,根据无人机初始航向、位置信息确定基准航迹,采用直接视线法获取航迹误差。在跟踪阶段,新坐标系随回收区域变化而变化,考虑甲板运动确定基准航迹,采用坐标系动态变化法得到航迹误差。该引导技术针对直接视线法对目标动态区域跟踪效果不好的缺点,引导无人机在动态坐标系下位置和速度误差为零,提高了无人机在特定着舰环境下的着舰性能,并且在着舰跟踪阶段引导算法中直接引入甲板运动,避免在控制器中加入甲板运动补偿器,降低了飞行控制系统的复杂性。

由此可知,经典制导方法在无人机着舰问题中具有很好的工程应用可行性。

3.2 现代制导方法

现代制导方法建立在现代控制理论和微分对策理论基础之上,包括线性最优法、自适应法、微分对策法以及非线性控制法等。

线性最优法是利用最优控制理论将制导看作带有终端约束的控制器设计。文献[50]提出了基于视线矢量的无人机自动着舰最优制导方法。最优法结构灵活且引导信号多,对目标加速度估计误差、剩余飞行时间估计误差灵敏度高,对测量元件提出较高要求。较大的信息测量或估计误差会使其性能变差。自适应法的实际引导信息随实际参数和外界条件变化而变化,以消除系统模型及外界环境条件的不确定因素带来的影响,因而可以提高制导精度^[51-52]。微分对策法是以微分对策理论为基础的最优制导法^[53-54],求解微分对策制导律要用极大值原理,需要解边值问题,实现起来较为困难。往往应用奇异摄动理论和可达集理论来研究制导律,这样求解过程比较简单,但是仍然需要较多的测量信息和目标的估计信息。非线性控制理论应用到制导算法领域的有微分几何方法、反馈线性化理论、变结构理论等,然而,目前在舰载无人机上应用研究的报道极少。文献[55]针对无人机自动撞网回收问题,借鉴比例导引法提出了基于视线角的制导算法,并引入反步法的设计思想以提高制导算法的自适应性。基于视线角的制导律使无人机的轨迹倾斜角变化率与视线角

变化率成比例, 通过控制视线角来跟踪下滑轨迹倾斜角, 可以减小无人机运动对目标舰船参数变化的敏感性, 获得较为稳定的下滑轨迹。

总之, 现代制导方法日趋成熟, 但是在无人机自主着舰问题中还未得到深入研究, 亟待解决舰船六自由度运动这种随机运动目标的精确制导问题, 在无人机着舰领域具有广阔的应用前景。

4 无人机着舰/回收控制研究

飞行控制是无人机自主着舰/回收的关键技术, 使无人机保持预定速度、稳定姿态及跟踪基准着舰轨迹, 对甲板运动与气流扰动具有补偿或抑制性能, 并对飞机系统故障具有容错功能。因此, 无人机着舰控制系统设计具有极大难度, 在控制理论领域也是一大热点和挑战。

4.1 经典控制方法

经典线性控制方法理论成熟, 采用单回路设计方法, 物理意义明确, 易于工程设计与实现, 在无人机着舰中应用最多^[15, 19-20, 47, 56-57]。英国克兰菲尔德大学的 Fitzgerald 为克兰菲尔德航宇公司 (Cranfield Aerospace Ltd.) 设计开发的 MK4A Jindivik 无人机设计了跑道着舰的制导与控制系统, 除了包含轨迹、速度和姿态控制回路以及甲板运动预估和补偿器外, 还研究了推力矢量控制、自动油门控制、可变进场速度控制等先进技术, 解决了甲板运动预测问题, 最后以着舰规范统计了仿真数据结果^[15]。挪威科技大学的 Syversen 等^[19-20, 46]研究了 GPS 引导下的无人机自动撞网回收技术, 并进行了模拟飞行验证。美国海军研究实验室 (U.S. Naval Research Laboratory) 开发了一款近距离隐蔽微型无人机 CICADA, 设计的飞行控制系统由三层回路组成: 第一、二层分别为采用经典 PID 设计的滚转姿态和轨迹角控制回路, 第三层是电池温度控制回路, 以适应高空飞行环境, 并进行了实际飞行测试^[58]。

南京航空航天大学研发的“翔飞”系列小型固定翼无人机, 引入高精度的实时载波相位差分 GPS, 在高度控制和速度控制回路中集成配备了基于数据融合的容错控制方案, 实际自主起降飞行实验结果表明无人机可以在整个飞行过程中跟踪下滑轨迹指令, 控制低速下滑姿态稳定, 实现了起飞、爬升、巡航、滑行、着陆及触舰复飞的一系列任务, 其纵向飞行控制系统如图 2 所示^[59-60]。

由此得出, 经典控制在陆地模拟飞行实验中得到了初步验证, 基本解决了轨迹、速度和姿态控制问题, 具有较好的工程可实现性^[19-20, 47, 57]。然而, 在舰船上实际飞行验证的实例极少, 因此甲板运动预

估和补偿、舰尾气流抑制、故障容错控制等问题有待进一步工程实现及验证。在恶劣环境下, 经典控制难以实现强气流干扰下的精确轨迹跟踪控制, 也难以实现对六自由度甲板运动的补偿跟踪控制, 这在跟后续先进控制方法的对比中有所体现。

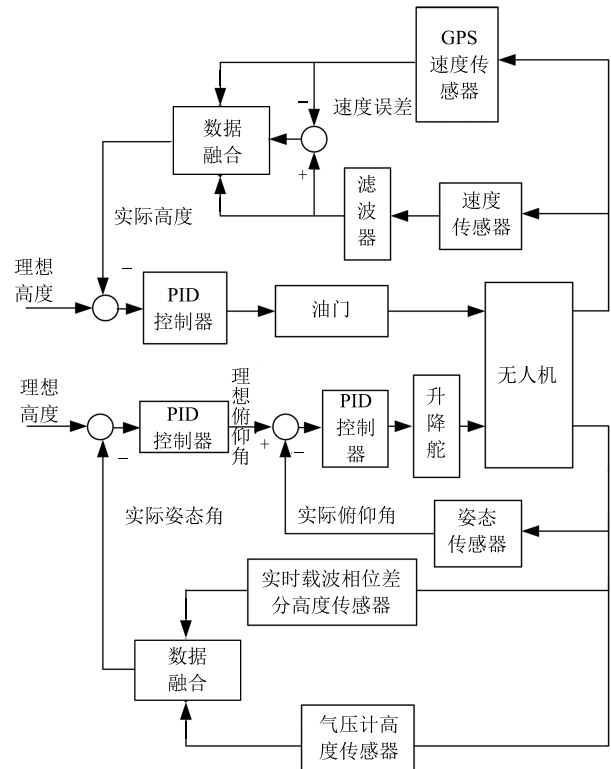


图 2 翔飞无人机纵向控制系统结构
Fig. 2 Xiangfei UAV longitudinal control system structure

4.2 现代控制方法

目前得到应用研究的无人机着舰现代控制方法主要包括最优控制 (Optimal control)、预见控制 (Preview control) 及总能量控制 (Total energy control, TEC) 等。

1) 最优控制

最优控制已经在实际飞行控制系统中得到了成功应用。它与 PID 控制的区别在于引入了最优评价函数, 并通过状态反馈矩阵形式实现。在无人机着舰问题中, 传统最优控制能够控制飞机保持低速跟踪下滑轨迹, 已在无人机撞网回收地面实验中得到验证^[48]。但是设计中没有考虑着舰环境干扰因素。由于着舰环境特殊, 受到甲板运动、舰尾气流干扰, 因此控制器还需具有一定鲁棒性能。一种改进方法是将速度及位置分量积分定义为新的状态量, 设计积分跟踪系统, 得到扩展最优控制器, 以保持进场速度和迎角恒定, 减少输出稳态误差。信息融合最优控制结合了融合估计与最优控制理论, 更适合解决最优

跟踪控制问题,在无人机着舰控制系统设计中具有较好的应用前景^[61].

2) 预见控制

预见控制不仅利用系统当前已知信息,还利用系统未来目标值和干扰值来决定当前控制策略,可以改善系统跟踪精度,提高动态响应速度,已在车辆主动悬挂系统、机电伺服系统、机器人、飞行器等领域得到了应用^[62-63].针对无人机着舰轨迹跟踪控制问题,甄子洋等^[64-66]设计了基于预见控制理论的无人机/有人机自动着舰控制系统,将基准下滑轨迹的可预见信息作为前馈信号,使控制信号根据未来目标值变化提前对飞机实施操作,能够提高着舰轨迹跟踪精度,减小瞬时控制能量,尤其在甲板运动补偿阶段,利用现代滤波方法进行预测甲板运动,并作为前馈信息送入预见控制系统,提高甲板运动扰动的补偿效果.舰尾气流若能被准确预测或测量,可送入控制系统进行补偿^[67].

3) 总能量控制

总能量控制是一种综合飞行/推力控制技术,从控制飞机总能量变化与分配出发,将飞机推力和气动舵控制结合,采用一体化设计思想,实现对纵向和侧向状态的解耦控制,同时还可以节省燃料消耗.为提高无人机撞网着舰系统抑制气流扰动的能力,杨一栋等^[10]提出一种舰载无人机自主着舰控制方法,将TEC控制与 H_∞ 控制相结合.对于纵向回路,能量变化率和能量分配变化率表示为无人机状态与受控输入的线性组合,升降舵操纵为能量分配通道的主操纵量.对于横侧向回路,设计了 H_∞ 输出反馈控制器控制副翼舵和方向舵.总能量控制的优点在于:a)利用总能量变化与转移特性,将飞机短周期姿态运动与长周期质点运动特性统一,为综合飞/推控制综合奠定基础;b)采用多输入多输出控制策略,为各种飞行控制模式提供统一基准,附加新的控制模式将变得容易;c)采用现代控制理论中的多变量解耦控制技术,解耦环节可直接构造,而系统的分析与设计也变得简单.

由此得出,最优控制在地面撞网回收实验中得到了验证,主要解决了轨迹跟踪控制问题^[48].预见控制得到了大量的仿真验证,在基准轨迹跟踪、甲板运动补偿等方面具有明显优势^[64-66];总能量控制进行了撞网回收仿真验证,且在移动平台着陆中得到过飞行验证^[68],但是对于实际海况环境下有待进一步验证;故障情形下的无人机具有较强的不确定性和非线性,因此现代控制方法难以实现无人机系统发生故障下的精确着舰/回收.

4.3 非线性与自适应控制方法

非线性控制方法对于复杂非线性系统具有较

好控制效果,可用于设计舰载无人机自动着舰控制系统,能够抑制系统不确定及外界强干扰对控制系统的影响.典型的非线性控制方法主要有非线性动态逆控制(Dynamic inversion control)、滑模控制(Sliding model control)、反演控制(Backstepping control)等.

1) 非线性动态逆控制

动态逆控制利用被控对象数学模型对消动力学模型,从而用理想动力学模型代替原始模型,是一种精确线性化方法.由于一般飞机的控制输入量少于系统输出量,导致飞机模型并不满足动态逆典型设计要求,因此通常利用奇异摄动理论将飞行状态量根据变化快慢进行分组,再对每个回路分别设计控制律.

美国空军技术学院^[69]设计了舰载无人机动态逆控制系统,包括两个控制器:一是内回路动态逆控制器,通过作动器和油门控制飞机推力和角加速度;二是外回路动态逆控制器,根据飞机和航母运动状态,为内回路提供期望航向角、俯仰角、推力值指令.随后,美国科学系统公司^[70]针对甲板跑道着舰方式,以无人机速度、航向和航迹角为控制输入,利用非线性动态逆设计了外环轨迹控制器,通过实时估计甲板幅频特性进行在线预测甲板运动,通过调整飞机航向角和航迹角达到着舰点的最小离散度,从而实现了基准着舰轨迹跟踪.

采用动态逆方法设计自动着舰控制系统,可以获得各种海况和天气条件下满意的着舰性能和鲁棒性,提高自动着舰控制系统性能.以上成果在跑道着舰方式下进行了大量的蒙特卡洛仿真验证,从原理上解决了无人机着舰/回收的基准轨迹跟踪、甲板运动补偿、舰尾气流抑制等关键控制问题.然而,该方法不足之处在于过分依赖被控对象精确模型,对建模误差敏感,且不能处理动态系统的未知变化,因此鲁棒性有待提高.

2) 滑模控制

滑模控制根据系统当前状态(例如偏差及其各阶导数等)有目的地不断变化,迫使系统按照预定“滑动模式”的状态轨迹运动,其非线性表现为控制的不连续.

甄子洋等^[71]针对舰载无人机撞网回收过程的下滑轨迹跟踪控制问题,设计了基于 $\alpha-\beta$ 滤波器的轨迹控制外回路,设计了趋近律滑模控制与最优控制相结合的姿态控制内回路,提高了系统的稳定性并改善了系统的动态性能.随后,针对无人机着舰环境的特殊性,为克服系统摄动、未建模动态及各种环境干扰因素的不良影响,提出一种新的积分滑模着舰飞行控制方法,为消除对外部干扰不确定上界信息的依赖以及降低舵面的抖动程度,进一步引入

了自适应模糊网络,对积分滑模切换项进行模糊逼近^[72].通过国外现役某小型舰载无人机的撞网回收仿真,验证了滑模控制在甲板运动、舰尾气流扰动以及传感器导航误差情况下的强鲁棒性.

由于滑动模态可以预先设计且与对象参数及外界扰动无关,使其具有快速响应、对参数不确定及外界扰动不灵敏、无须在线系统辨识等优点,成为处理不确定系统一种重要的鲁棒控制方法.滑模控制的缺陷是控制过程中存在抖振问题,抖振的抑制在一定程度上是以损失控制精度或鲁棒性为代价.飞行控制系统中,滑模控制的主要问题在于很难消除舵面抖动,消除抖动方法有时会增加系统负担和降低可靠性.趋近律法、边界层法、高阶滑模法及模糊滑模法等方法改善了滑模控制的抖振问题.

3) 反演控制

反演控制又称反步控制,它将复杂非线性系统分解为若干子系统,然后从距离控制输入最远的子系统开始,设计 Lyapunov 函数得到使子系统稳定的虚拟控制律,实现整体系统的全局稳定或跟踪,适用于可状态线性化或具有严重参数反馈的不确定非线性系统.

为了适应不确定的气流干扰,提高无人机着舰制导的鲁棒性,文献 [55] 基于反演控制设计了纵向制导系统,由外而内分别包括视线角跟踪制导回路、轨迹倾斜角制导回路、俯仰角制导回路、俯仰角速度控制回路,每一个子回路上产生的虚拟制导指令由比例积分控制和动态逆共同产生,撞网回收仿真结果表明反演控制有利于抑制非线性和不确定性因素.郑峰婴等^[73]应用较少的舰载无人机空气动力学信息设计了基于反演控制的纵向着舰控制系统,无人机甲板跑道着舰的仿真研究验证了其在不同海况下的基准下滑轨迹跟踪性能,并详细统计了不同导航误差、舰尾气流和甲板运动干扰下的无人机跑道着舰误差.

反演控制的优点在于不要求系统中的非线性满足增长性约束条件,并且系统的不确定性不必满足匹配条件或增长性约束条件,缺点在于每一步都需要虚拟控制律进行重复求导,容易产生计算膨胀,增加控制器设计的复杂性,也难于工程实现.

综上所述,非线性控制较之于经典和现代控制,所依赖的对象模型更加贴近实际特性,因而在甲板运动补偿、舰尾气流抑制等方面更具优势^[69, 71, 73].然而,在解决系统故障引起的不确定性问题时,需要与自适应控制或智能控制进行有机结合.

4) 自适应控制

复杂环境因素干扰、飞行高度和状态改变以及未建模误差等因素共同构成了舰载无人机系统的不确定因素.自适应控制理论不依赖被控对象的精确

模型,对系统参数时变、外界扰动都具有很强的自适应能力与鲁棒性.

无人机是一个多变量非线性系统,然而传统飞行控制系统设计方法通常采用线性化单回路设计法.针对多变量系统采用分散线性化单回路控制的合理性问题,Goodwin 等^[74]提出了基于相对增益阵列(Relative gain array)的系统耦合程度判别方法.文献 [75] 基于无人机运动特性及多变量系统分散控制原理,采用单回路方法设计自适应飞行控制律模块,如图 3 所示,将轨迹误差转化为姿态跟踪指令,然后通过自适应控制解决姿态跟踪问题.

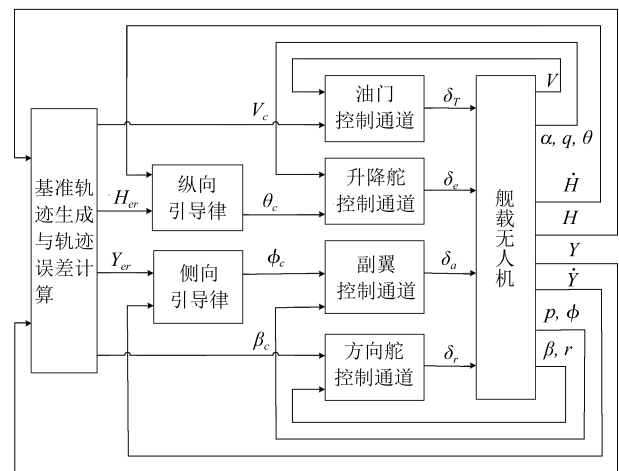


图 3 基于自适应控制的无人机着舰控制系统

Fig. 3 Adaptive control based UAV carrier-landing control system

近年来,多变量自适应控制理论成为研究热点和难点.甄子洋等^[76]提出了一种固定翼无人舰载机的多变量自适应自动着舰制导控制系统,能够使无人机高精度地跟踪下滑基准轨迹和补偿甲板运动扰动.自适应控制能够在无人机模型不确知情形下设计飞行控制系统,实现制导与控制一体化、闭环系统稳定、所有参数有界且具有渐近跟踪性能,适合于解决恶劣环境下的无人机自主着舰控制问题.

5) 非线性自适应容错控制

实际系统中不可预测的故障可能会导致系统结构和参数出现不确定性,使得所能依据的先验信息减少,只能依据被控对象的输入输出数据提取有效信息,实现控制系统的容错功能,自动在线校正相关参数,以补偿、减弱、抑制甚至消除故障的影响,即为自适应容错控制.

针对控制输入约束、外部干扰和执行器失效或锁定故障下的舰载无人机着舰容错控制问题,郑峰婴等^[77]提出了一种基于饱和约束反演控制的自适应容错策略.a) 无故障情况进行标称控制,即自适

应反演控制, 利用反步法设计控制器时给出未知参数的自适应估计律, 同时保证参数估计误差有界. b) 存在作动器故障情况进行容错控制, 控制信号通过指令滤波后的差量输入到线性滤波器中, 在故障发生后将指令滤波后的控制信号作为修复控制向量, 输入无人机系统, 补偿故障对系统性能的影响. 参数更新律补偿气动力中的不确定性或变化. 该方法不需要故障检测和隔离, 解决了舰载无人机状态受限、执行器故障模式和量值未知的难题. 随后, 又引入基于模糊逻辑的状态观测器, 结合受约束自适应反演控制, 采用指令滤波器而非虚拟控制律求导用于解决传统反演控制存在的计算复杂问题, 提出了一种新的舰载无人机执行器故障容错控制方案, 能够有效补偿未建模动态, 具有很强的鲁棒性^[78]. 上述方案在无人机自动撞网回收仿真中得到了大量验证.

此外, 文献[21]提出了考虑飞行器和执行器动态特性的受约束自适应反演容错控制策略, 用于陆地撞网回收无人机. 当控制面中的一个被卡住或不能正常工作时, 即使控制面不能够按照控制输入命令, 参数自适应算法也能实现故障补偿. 洛克希德·马丁公司^[79]开发了一款海基长航时无人机(SBE) UAV的重构飞行控制系统, 飞行控制回路由理想动态调节器、控制器分配与优化算法、输出补偿算法、机载模型以及控制量计算器组成, 控制器分配与优化算法可以实现控制信号重构, 以应对控制面饱和及故障情形, 仿真研究表明该无人机重构控制系统适合于着舰应用.

4.4 智能控制方法

典型智能控制方法包括神经网络、模糊控制及仿生优化算法.

Khantsis等^[31-32]利用进化算法解决Ariel无人机绳钩回收控制系统的优化问题. 进化算法需要目标系统的数学模型, 用于评估控制器适应度, 它由任务完成度和控制特性来评判. 飞行控制器从制导控制器的输出端接收空速指令、倾斜角指令和常规机身过载因子指令等输入信号. 然后控制飞机的四个操纵面使飞机准确地跟踪这些输入. 飞行控制律采用PID形式, 所有控制参数由进化算法优化生成. 进化算法具有如下特征: 非线性控制律自适应编码、控制律参数和结构进行解耦进化、多策略进化提高控制器学习能力. 除了进化算法, 墨尔本皇家理工大学针对绳钩着舰问题采用了遗传算法优化控制参数^[80]. 以上智能优化方法在无人机绳钩回收系统中进行了大量的仿真验证, 考虑了顺风、逆风、侧风的影响, 统计了甲板运动和舰尾气流影响下的无人机回收成功率, 总结了绳钩回收的飞行包线.

由于无人机着舰环境的复杂性和随机性, 外界

干扰上界很难确定, 文献[69]设计了自适应模糊滑模控制律, 在扰动上界未知情况下, 抵消外界干扰带来的误差, 控制律的开关项用连续模糊系统逼近, 有效降低了舵面抖振. 美国海军研究实验室开发了无人机从覆盖线性飞行状态到大迎角飞行状态的自适应飞行控制系统^[81]. 基于近似动态逆方法设计控制律, 利用神经网络在线学习消除模型逆含有的模型误差, 能够实现姿态保持控制, 且对模型误差具有较强鲁棒性, 适用于无人机自主着舰控制.

由此可知, 智能控制与优化在无人机自主着舰问题中的应用尚处于起步阶段, 随着人工智能技术的迅猛发展, 智能制导与控制技术在无人机自主着舰中具有广阔的应用前景.

5 总结及展望

无人机自主着舰技术经历了数十年的发展历程, 在理论设计、地面验证及工程应用方面都取得了很大进展, 总结如下: 1) 美国等军事发达国家已经进行了舰载无人机的工程化应用, 我国较系统地掌握了无人机着舰技术, 正在向工程化应用转化; 2) 无人机着舰/回收方式繁多, 已经成熟应用的有拦阻着舰、撞网回收、天钩回收方式, 其他方式多处在理论与实验研究阶段; 3) 经典制导方法在舰载无人机着舰中已得到成功应用, 现代制导方法正处在陆基实验阶段; 4) 经典控制在无人机着舰中得到实际应用, 最优控制和总能量控制得到了模拟飞行实验验证, 而预见控制、滑模控制、反演控制、自适应控制、智能优化等都进行了数字仿真验证.

然而, 无人机自主着舰制导与控制技术仍然有很多关键问题有待进一步研究突破, 为此对未来研究重点进行如下展望:

1) 飞机与舰船协同及现代制导技术是着舰制导技术的未来研究重点. a) 参考借鉴有人舰载机自动着舰系统的引导技术, 解决不同引导系统下的着舰基准轨迹设计、抗噪声制导律设计、机舰相对位置测量与计算等^[82]; b) 研究解决甲板运动预估^[83-85]、补偿^[86]与气流扰动抑制技术^[87-88]. 着舰/回收环境十分复杂, 受强干扰影响, 环境影响因素的建模、预测、补偿或抑制, 是无人机高精度着舰/回收的保障, 可以考虑基于神经网络、群集优化算法等智能技术的舰船甲板运动预测; c) 加强现代制导技术应用, 例如自适应制导技术、微分对策制导技术等; d) 设计智能飞落着舰、风向筒回收、秋千吊架回收等新型回收方式的制导系统, 这方面的研究几乎是空白.

2) 先进控制策略及容错控制技术是无人机着舰控制技术的未来研究重点. a) 针对不确定非线性舰载机系统, 研究舰载机多个气动操纵面与发动机推力之间的综合控制问题; b) 研究先进控制理论在无

人机着舰问题中的应用. 控制理论发展迅速, 而舰载无人机飞行控制技术的进展较慢, 因此有必要研究多变量自适应控制、鲁棒预见控制、模型预测控制、动态逆控制^[89]、滑模控制^[90-91]、神经网络^[92]、大脑情感学习^[93]等先进方法在无人机着舰中的应用; c) 研究制导与控制一体化设计, 把导引回路和控制回路作为整体来研究, 可综合协调各个子系统之间的关系; d) 容错控制是飞行控制技术的重要发展趋势, 尽管容错飞行控制领域发展迅速, 例如出现了非线性自适应容错控制^[94], 但是无人机着舰容错控制技术研究成果甚少, 针对这一复杂任务, 需要研究如何在恶劣环境干扰下保证控制系统的鲁棒性能, 在故障情况下保证控制系统的容错性能.

3) 多机协同制导与控制是舰载无人机着舰技术的重要发展趋势. a) 无人机集群作战是未来海战的发展趋势之一, 因此有必要研究大规模无人机群的舰船回收协同制导与控制技术, 尤其解决基准着舰轨迹生成、防撞策略以及进场轨迹跟随控制等问题; b) 研究异构无人机的协同着舰制导与控制技术, 由于舰载飞行器种类多样, 异构协同也是未来作战需求, 其中旋翼无人机与固定翼无人机协同着舰/回收也是重要的发展趋势, 一种方案是固定翼无人机实现在旋翼无人机支撑的回收网中撞网回收^[95]; c) 研究舰载无人机与有人机、无人潜水器等舰载装备之间的协同控制技术, 提高舰载武器系统的作战效能, 形成强大的航母/舰载机作战体系^[96].

本文重点在于概述舰载无人机制导与控制关键技术, 而不同着舰方式、引导方式、制导系统设备及其关键技术等将是今后调研和总结的重点. 总之, 舰载无人机及其着舰/回收技术的发展势在必行且迫在眉睫, 以上总结工作抛砖引玉, 以期促进我国舰载无人机技术及海军作战能力的快速发展.

References

- 1 Pu H Z, Zhen Z Y, Xia M. Flight control system of unmanned aerial vehicle. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, **32**(1): 1-8
- 2 Alkire B, Kallimani J G, Wilson P A, Moore L R. Applications for NAVY Unmanned Aircraft Systems. Technical Report MG-957-NAVY, National Defense Research Institute, USA, 2010.
- 3 Nader C E. An analysis of manpower requirements for the United States marine corps tiers II and III unmanned aerial systems family of systems program [Master thesis], Naval Postgraduate School, USA, 2007.
- 4 Perry J D. Navy unmanned air systems 1915-2011. In: Proceedings of the AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress". Virginia Beach, VA, USA: AIAA, 2011.
- 5 Kracinovich S, Engdahl J. Overview of US Navy UAS Programs of Record to TTCP, MAD UAS Meeting, ADA580879, Naval Air Systems Command, USA, 2012.
- 6 Anon. Jindivik Mk 4A Design Summary. Project Report B4A-C00-051, Aerospace Technologies of Australia, Australia, 1991.
- 7 Gautrey J E, Cook M V. LPV autopilot design of a Jindivik UAV. In: Proceedings of the 2009 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago, Illinois, USA: AIAA, 2009.
- 8 Fitzgerald P. Model Flight Control System Design for the Jindivik UAV [Master thesis], Cranfield University, UK, 2000.
- 9 Zhen Z Y, Zhang Z B, Zhang J H. Guidance and control techniques of carrier based aircraft for automatic carrier landing. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, **34**(6): 600-608
- 10 Yang Yi-Dong, Zhen Zi-Yang, Qiu Shu-Bin, Xu Jia-Long. *UAV Carrier Landing Guidance and Control*. Beijing: National Defence Industrial Press, 2013. (杨一东, 甄子洋, 邱述斌, 徐佳龙. 无人机着舰制导与控制. 北京: 国防工业出版社, 2013.)
- 11 Yang Yi-Dong, Zheng Feng-Ying, Wang Xin-Hua, Shi Wei-Min, Xu Jia-Long. *Equivalent Models and Landing Control Criterion of Carrier Based Aircraft*. Beijing: National Defence Industry Press, 2013. (杨一东, 郑峰婴, 王新华, 史卫民, 徐佳龙. 舰载机等效模型及着舰控制规范. 北京: 国防工业出版社, 2013.)
- 12 Yang Yi-Dong. *Carrier Landing Guidance and Control of Carrier-based Aircraft*. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. (杨一东. 舰载飞机着舰引导与控制. 北京: 国防工业出版社, 2007.)
- 13 Holmberg J, Leonard J, King D, Cotting M. Flying qualities specifications and design standards for unmanned air vehicles. In: Proceedings of the 2013 AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Honolulu, Hawaii, USA: AIAA, 2013.
- 14 Harbaugh P M. Where stands the LSO. *Naval Aviation News, NavWeaps*, 1962, 00-75R-3: 16
- 15 Fitzgerald P. Flight Control System Design for Autonomous UAV Carrier Landing [Ph.D. dissertation], Cranfield University, UK, 2004.
- 16 Pei Jin-Hua. Technology development of UAV net recovery system. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, **41**(S1): 6-11 (裴锦华. 无人机撞网回收的技术发展. 南京航空航天大学学报, 2009, **41**(S1): 6-11)
- 17 Fahlstrom P G, Gleason T J. *Introduction to UAV Systems* (4th edition). New York, USA: John Wiley and Sons, 2012.
- 18 McGillivray P. Design considerations for launch and recovery of autonomous systems from ships, including coast guard icebreakers. In: Proceedings of the 2010 Symposium on Launch and Recovery. Arlington, VA, USA, 2010. 1-22
- 19 Skulstad R, Syversen C L, Merz M, Sokolova N, Fossen T I, Johansen T A. Net recovery of UAV with single-frequency RTK GPS. In: Proceedings of the 2015 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2015. 1-10
- 20 Syversen C L, Skulstad R. Low-Cost Instrumentation System for Recovery of Fixed-Wing UAV in a Net [Master thesis], Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2014.

- 21 Yoon S, Kim Y, Kim S. Pursuit guidance law and adaptive backstepping controller design for vision-based net-recovery UAV. In: Proceedings of the 2008 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Honolulu, Hawaii, USA: AIAA, 2008.
- 22 Yoon S, Kim H J, Kim Y. Spiral landing trajectory and pursuit guidance law design for vision-based net-recovery UAV. In: Proceedings of the 2009 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago, Illinois, USA: AIAA, 2009.
- 23 Bradley C, Daniel J, Hanks D, Mckelvey J, Raanan J. UAV Mothership, ADA518429, Naval Surface Warfare Center Carderock Division, USA, 2009.
- 24 Guo Liang, Zhang Hong-Ying, Tong Ming-Bo. Dynamics analysis on parachute recovery of unmanned aerial vehicle. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, **44**(1): 14–19
(郭亮, 张红英, 童明波. 无人机伞回收动力学分析. 南京航空航天大学学报, 2012, **44**(1): 14–19)
- 25 Wyllie T. Parachute recovery for UAV systems. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2001, **73**(6): 542–551
- 26 Brown G, Haggard R, Fogleman J. Parafoils for shipboard recovery of UAVs. In: Proceedings of the 11th Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference. San Diego, CA, USA: AIAA, 1991. 48–53
- 27 Crowther W J, Prassas K. Post stall landing for field retrieval of UAVs. In: Proceedings of the 14th Bristol International Unmanned Air Vehicle Systems Conference. Bristol, UK, 1999.
- 28 Walz M. Parasail launch and recovery of fixed wing UAVs. *Unmanned Systems*, 2002.
- 29 Dennis B D. Methods and Apparatuses for Capturing and Recovering Unmanned Aircraft, Including a Cleat for Capturing Aircraft on a Line, U.S. Patent 7059564, June 2006.
- 30 Gajjar B I, Zalewski J. A07: On-ship landing and takeoff of unmanned aerial vehicles (UAV's). *IFAC Proceedings Volumes*, 2004, **37**(20): 42–46
- 31 Khantsis S. Control System Design Using Evolutionary Algorithms for Autonomous Shipboard Recovery of Unmanned Aerial Vehicles [Ph. D. dissertation], Royal Melbourne Institute of Technology, Australia, 2006.
- 32 Khantsis S, Bourmistrova A. UAV controller design using evolutionary algorithms. In: Proceedings of the 18th Australian Joint Conference on Advances in Artificial Intelligence. Berlin, Germany: Springer, 2005. 1025–1030
- 33 Lu Wei, Ma Xiao-Ping, Zhou Ming, Sun Lin-Feng. Simulation analysis of dynamic characteristic of UAV rope-hook recovery system. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, **36**(10): 3295–3304
(卢伟, 马晓平, 周明, 孙林峰. 无人机绳钩回收系统的动力学特性仿真分析. 航空学报, 2015, **36**(10): 3295–3304)
- 34 Eriksson M, Ringman P. Launch and Recovery Systems for Unmanned Vehicles Onboard Ships. A Study and Initial Concepts [Master thesis], KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2015.
- 35 Mathisen S H, Gryte K, Johansen T, Fossen T I. Non-linear model predictive control for longitudinal and lateral guidance of a small fixed-wing UAV in precision deep stall landing. In: Proceedings of the 2016 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. San Diego, USA: AIAA, 2016. 1–16
- 36 Crowther W J. Perched landing and takeoff for fixed wing UAVs. In: Proceedings of the 2000 Applied Vehicle Technology Symposium on Unmanned Vehicles for Aerial, Ground and Naval Military Operations. Ankara, Turkey, 2000.
- 37 Nagendran A, Crowther W, Richardson R. Biologically inspired legs for UAV perched landing. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2012, **27**(2): 4–13
- 38 Xie P, Ma O, Zhang L, Zhao Z. A bio-inspired UAV leg-foot mechanism for landing, grasping and perching tasks. In: Proceedings of the 2015 AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. Kissimmee, Florida, USA: AIAA, 2015. 1–15
- 39 Nagendran A, Richardson R C, Crowther W J. Bell shaped impedance control to minimize jerk while capturing delicate moving objects. In: Proceedings of the 4th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Robotics and Automation. Angers, France, 2007. 504–511
- 40 Frick H E. Retrieving and/or Launching System, U.S. Patent 4523729, February 1982.
- 41 Sarigul-Klijin N, Sarigulklijn M. A novel sea launch and recovery concept for fixed wing UAVs. In: Proceedings of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California, USA: AIAA, 2016. 1–11
- 42 Joseph M, Sweger F. Design Specifications Development for Unmanned Aircraft Carrier Landings: A Simulation Approach. U.S.N.A. Trident Scholar Project Report No. 316, United States Naval Academy Annapolis, Maryland, USA, 2003.
- 43 Perh D. A Study into Advanced Guidance Laws Using Computational Methods [Master thesis], Naval Postgraduate School, USA, 2011.
- 44 Zhen Zi-Yang, Yang Yi-Dong, Wang Xin-Hua, Jiang Ju. Radar Guided Uav Automatic Landing Guidance and Control System and Control Method, China. Patent ZL201510747257.8, 2018.
(甄子洋, 杨一东, 王新华, 江驹. 一种雷达引导无人机自动着舰制导与控制方法, 中国. ZL201510747257.8, 2018.)
- 45 Zhen Zi-Yang, Wang Xin-Hua, Jiang Ju, Yang Yi-Dong. GPS guided UAV automatic landing adaptive control system and method, China. Patent CN201510572353.3, 2015.
(甄子洋, 王新华, 江驹, 杨一东. 一种 GPS 引导的无人机自动着舰自适应控制系统及方法, 中国. CN201510572353.3, 2015.)
- 46 Skulstad R, Syversen C, Merz M, Sokolova N, Fossen T, Robert J T. Autonomous net recovery of fixed-wing UAV with single-frequency carrier-phase differential GNSS. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2015, **30**(5): 18–27
- 47 Kim H J, Kim M, Lim H, Park C, Yoon S, Lee D, et al. Fully autonomous vision-based net-recovery landing system for a fixed-wing UAV. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, **18**(4): 1320–1333
- 48 You D I, Jung Y D, Cho S W, Shin H M, Lee S H, Shim D H. A guidance and control law design for precision automatic take-off and landing of fixed-wing UAVs. In: Proceedings of the 2012 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Minneapolis, Minnesota, USA: AIAA, 2012. 1–19

- 49 Zheng Feng-Ying, Gong Hua-Jun, Zhen Zi-Yang. Carrier UAV autonomous landing algorithm based on dynamic change of coordinate system. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, **47**(8): 2685–2693 (郑峰婴, 龚华军, 甄子洋. 基于坐标系动态变化的无人机着舰引导算法. 中南大学学报(自然科学版), 2016, **47**(8): 2685–2693)
- 50 Storvik M. Guidance System for Automatic Approach to a Ship [Master thesis], Norwegian University of Science and Technology, Norwegian, 2003.
- 51 Chwa D, Choi J Y, Anavatti S G. Observer-based adaptive guidance law considering target uncertainties and control loop dynamics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, **14**(1): 112–123
- 52 Kim B S, Calise A J, Sattigeri R. Adaptive, integrated guidance and control design for line-of-sight-based formation flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, **30**(5): 1386–1399
- 53 Oshman Y, Rad D A. Differential-game-based guidance law using target orientation observations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, **42**(1): 316–326
- 54 Shinar J, Shima T, Weiss H. New interceptor guidance law integrating time varying and estimation-delay models. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2003, **26**(2): 295–303
- 55 Jiang Yi, Sun Chun-Zhen, Wang Kai. Ship-board UAV net recovery adaptive guidance technology. *Flight Dynamics*, 2015, **33**(1): 43–47 (蒋毅, 孙春贞, 王凯. 舰载无人机撞网回收自适应制导技术. 飞行力学, 2015, **33**(1): 43–47)
- 56 De Lellis E, Di Vito V, Ruby M, Salbego N. Adaptive algorithm for fixed wing UAV autoland on aircraft carrier. In: Proceedings of the 2013 AIAA Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. Boston, MA, USA: AIAA, 2013.
- 57 Guo Qing, Zhang Wei, Zhang Yi-Zhe, Song Bi-Feng. Accurate landing glide path control system of carrier-based UAV and its flight test. *Flight Dynamics*, 2012, **30**(5): 448–453 (郭庆, 张伟, 张怡哲, 宋笔锋. 舰载无人机精确着舰轨迹控制及飞行验证. 飞行力学, 2012, **30**(5): 448–453)
- 58 Kahn A, Edwards D. Navigation, guidance and control for the CICADA expendable micro air vehicle. In: Proceedings of the 2012 AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Minneapolis, Minnesota, USA: AIAA, 2012.
- 59 Wang S, Zhen Z Y, Jiang J, Wang X H. Flight tests of autopilot integrated with fault-tolerant control of a small fixed-wing UAV. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, **2016**: Article ID 2141482
- 60 Wang S, Zhen Z Y, Zheng F Y, Wang X H. Design of autonomous flight control system for small-scale UAV. In: Proceedings of the 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. Yantai, China: IEEE, 2014. 1885–1888
- 61 Zhen Z Y, Jiang J, Wang X H, Wang D B. Information fusion-based optimal attitude control for an alterable thrust direction unmanned aerial vehicle. *International Journal of Advanced Robotic System*, 2013, **10**(1): 43
- 62 Zhen Zi-Yang. Research development in preview control theory and applications. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(2): 172–188 (甄子洋. 预见控制理论及应用研究进展. 自动化学报, 2016, **42**(2): 172–188)
- 63 Zhen Zi-Yang, Wang Zhi-Sheng, Wang Dao-Bo. Information fusion estimation based preview control for discrete linear system. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(2): 347–352 (甄子洋, 王志胜, 王道波. 基于信息融合估计的离散线性系统预见控制. 自动化学报, 2010, **36**(2): 347–352)
- 64 Zhen Z Y, Ma K, Kumar B A. Automatic carrier landing control for unmanned aerial vehicles based on preview control. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, **34**(4): 413–419
- 65 Zhen Zi-Yang, Shao Min-Min, Gong Hua-Jun, Jiang Ju. Robust preview control based automatic carrier landing control for carrier-based aircraft, China. ZL201510158509.3, 2017. (甄子洋, 邵敏敏, 龚华军, 江驹. 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, 2017.)
- 66 Zhen Z Y, Jiang S Y, Jiang J. Preview control and particle filtering for automatic carrier landing. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, **54**(6): 2662–2674
- 67 Zhen Z Y, Jiang S Y, Ma K. Automatic carrier landing control for unmanned aerial vehicles based on preview control and particle filtering. *Aerospace Science and Technology*, 2018, **81**: 99–107
- 68 Wang Shuo, Zhen Zi-Yang, Wang Xin-Hua, Jiang Ju, Sun Yi-Li. Flight control system and method for carrier-based UAV autonomous landing, China. Patent CN201410726947.0, 2015. (王硕, 甄子洋, 王新华, 江驹, 孙一力. 一种舰载无人机自主着舰的飞行控制系统及方法, 中国. CN201410726947.0, 2015.)
- 69 Denison N A. Automated Carrier Landing of an Unmanned Combat Aerial Vehicle Using Dynamic Inversion [Master thesis], Air Force Institute of Technology, USA, 2007.
- 70 Boskovic J D, Redding J. An autonomous carrier landing system for Unmanned Aerial Vehicles. In: Proceedings of the 2009 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Chicago, Illinois, USA: AIAA, 2009. 1–17
- 71 Li Ruo-Lan, Zhen Zi-Yang, Gong Hua-Jun. Trajectory control of a UAV during net recovery based on sliding mode control and optimal control. *Electronics Optics and Control*, 2014, **21**(9): 58–60, 84 (李若兰, 甄子洋, 龚华军. 基于趋近律滑模最优控制的无人机撞网回收轨迹控制. 电光与控制, 2014, **21**(9): 58–60, 84)
- 72 Zheng Feng-Ying, Gong Hua-Jun, Zhen Zi-Yang. Carrier UAV autonomous landing system based on integral sliding mode control. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, **37**(7): 1621–1628 (郑峰婴, 龚华军, 甄子洋. 基于积分滑模控制的无人机自动着舰系统. 系统工程与电子技术, 2015, **37**(7): 1621–1628)
- 73 Zheng F Y, Gong H J, Zhen Z Y. Tradeoff analysis of factors affecting longitudinal carrier landing performance for small UAV based on backstepping controller. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, **32**(1): 97–109
- 74 Goodwin G C, Graebe S F, Salgado M E. *Control System Design*. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.
- 75 Zhen Zi-Yang, Tao Gang, Jiang Ju, Wang Xin-Hua. Adaptive tracking control of automatic net landing trajectory for carrier-based unmanned aerial vehicle. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, **38**(12): 1922–1927 (甄子洋, 陶钢, 江驹, 王新华. 无人机自动撞网着舰轨迹自适应跟踪控制. 哈尔滨工程大学学报, 2017, **38**(12): 1922–1927)

- 76 Zhen Zi-Yang, Wang Xin-Hua, Yang Yi-Dong. Carrier-based UAV automatic landing control device based on model reference adaptive control, China. Patent ZL201610917907.3, 2018.
(甄子洋, 王新华, 杨一栋. 基于模型参考自适应控制的舰载无人机自动着舰控制装置, 中国. ZL201610917907.3, 2018.)
- 77 Zheng F Y, Gong H J, Zhen Z Y. Adaptive constraint backstepping fault-tolerant control for small carrier-based unmanned aerial vehicle with uncertain parameters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, **230**(3): 407–425
- 78 Zheng F Y, Zhen Z Y, Gong H J. Observer-based backstepping longitudinal control for carrier-based UAV with actuator faults. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2017, **28**(2): 322–337
- 79 Wadley J, Tallant G, Ruszkowski R. Adaptive flight control of a carrier based unmanned air vehicle. In: *Proceedings of the 2003 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Austin, Texas, USA: AIAA, 2003. 1–9
- 80 Bourmistrova A, Khantsis S. Control system design optimisation via genetic programming. In: *Proceedings of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Singapore, Singapore: IEEE, 2007. 1993–2000
- 81 Kahn A. Adaptive control for small fixed-wing unmanned air vehicles. In: *Proceedings of the 2010 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Toronto, Ontario, Canada: AIAA, 2010. 1–17
- 82 Zhen Zi-Yang, Wang Xin-Hua, Jiang Ju, Yang Yi-Dong. Research progress in guidance and control of automatic carrier landing of carrier-based aircraft. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, **38**(2): 1–22
(甄子洋, 王新华, 江驹, 杨一栋. 舰载机自动着舰引导与控制研究进展. *航空学报*, 2017, **38**(2): 1–22)
- 83 Lin S G, Garratt M, Lambert A, Li P. 6DoF motion estimation for UAV landing on a moving shipdeck using real-time on-board vision. In: *Proceedings of the 2015 Australasian Conference on Robotics and Automation*. Canberra, ACT, Australia, 2015. 1–10
- 84 Khan A A, Marion K E, Bil C, Simic M. Motion prediction for ship-based autonomous air vehicle operations. In: *Proceedings of the 2016 Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services*. Cham: Springer, 2016. 323–333
- 85 Moriarty P, Sheehy R, Doody P. Neural networks to aid the autonomous landing of a UAV on a ship. In: *Proceedings of the 28th Irish Signals and Systems Conference*. Killarney, Ireland: IEEE, 2017. 1–4
- 86 Koo S, Kim S, Suk J. Model predictive control for UAV automatic landing on moving carrier deck with heave motion. *IFAC-Papers OnLine*, 2015, **48**(5): 59–64
- 87 Zhen Zi-Yang, Shao Min-Min, Gong Hua-Jun, Wang Xin-Hua, Jiang Ju. Airwake compensation based automatic carrier landing composite control for carrier-based aircraft: China. ZL201510243842.4. 2017.
(甄子洋, 邵敏敏, 龚华军, 王新华, 江驹. 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, 2017.)
- 88 Jiang Ju, Zhen Zi-Yang, Wang Xin-Hua, Yang Yi-Dong, Yuan Suo-Zhong, Jiao Xin. Airwake disturbance rejection based carrier landing guidance and control system of carrier-based aircraft. ZL201110287699.0. 2014.)
(江驹, 甄子洋, 王新华, 杨一栋, 袁锁中, 焦鑫. 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, 2014.)
- 89 Ye L Q, Zong Q, Crassidis J L, Tian B L. Output-redefinition-based dynamic inversion control for a nonminimum phase hypersonic vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, **65**(4): 3447–3457
- 90 Apaza-Perez W A, Moreno J A, Fridman L M. Dissipative approach to sliding mode observers design for uncertain mechanical systems. *Automatica*, 2018, **87**: 330–336
- 91 Wang D D, Zong Q, Tian B L, Shao S K, Zhang X Y, Zhao X Y. Neural network disturbance observer-based distributed finite-time formation tracking control for multiple unmanned helicopters. *ISA Transactions*, 2018, **73**: 208–226
- 92 Wang H Q, Shi P, Li H Y, Zhou Q. Adaptive neural tracking control for a class of nonlinear systems with dynamic uncertainties. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, **47**(10): 3075–3087
- 93 Zhen Zi-Yang, Sun Yi-Li, Pu Huang-Zhong, Wang Dao-Bo. UAV thrust vectoring intelligent control method based on brain emotion learning, China. Patent ZL201510264667.7, 2017.
(甄子洋, 孙一力, 浦黄忠, 王道波. 一种基于大脑情感学习的无人机推力变向智能控制方法, 中国. ZL201510264667.7, 2017.)
- 94 Yu X, Li P, Zhang Y M. The design of fixed-time observer and finite-time fault-tolerant control for hypersonic gliding vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, **65**(5): 4135–4144
- 95 Klausen K, Moe J B, Van Den Hoorn J C, Gomola A, Fossen T I, Johansen T A. Coordinated control concept for recovery of a fixed-wing UAV on a ship using a net carried by multirotor UAVs. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Arlington, VA, USA: IEEE, 2016. 964–973
- 96 Ryan J C. Investigating possible effects of UAVs on aircraft carrier deck operations. *Humans and Automation Laboratory*, Cambridge, MA, USA, 2011.



甄子洋 博士, 南京航空航天大学自动化学院教授. 主要研究方向为预见控制, 智能与自适应控制, 无人机/舰载机/高超声速飞行器飞行控制, 多无人机集群协同控制与决策研究.

E-mail: zhenziyang@nuaa.edu.cn

(**ZHEN Zi-Yang** Ph.D., professor at the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interest covers preview control, intelligent and adaptive control, UAV/carrier-based aircraft/hypersonic aircraft flight control, and multi-UAV swarm cooperative control and decision.)