

无人直升机着舰 制导与控制

Guidance and Control of Unmanned Helicopter Ship Landing

主 编 南京航空航天大学 杨一栋
副主编 南京航空航天大学 袁锁中
海军装备研究院 王 夷
杨一栋 袁锁中 王夷 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

V279

14

无人直升机着舰制导与控制

Guidance and Control of Unmanned Helicopter
Ship Landing

主 编 南京航空航天大学 杨一栋
副主编 南京航空航天大学 袁锁中
海军装备研究院 王 夷
杨一栋 袁锁中 王 夷 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

舰载无人直升机已是现代水面舰艇作战系统不可缺少的组成部分,在未来战争中也起着重要作用。舰载无人直升机的技术核心是设计与开发一种十分有效的制导系统,使直升机自主安全地降落在作六自由度运动、着舰空间又十分有限的舰船甲板上。为开发这一着舰制导与控制技术,本书在描述物理概念的基础上,着重研究进场着舰的基准期望轨迹,着舰制导与控制的总体结构配置,以及制导与飞控系统的设计与工程应用开发。

本书主要内容为:无人直升机进场与着舰坐标体系的建立与着舰环境建模;无人直升机进场着舰制导系统三维期望轨迹的生成及相应的结构配置;基于视线的进场阶段制导系统开发设计;具有自主起降功能的着舰阶段制导系统设计;具有甲板运动预估的着舰阶段制导系统设计;无人直升机自动降落在运动体上的轨迹优化设计;制导系统及飞控系统的经典设计与现代控制设计方法;无人直升机飞行控制系统软硬件开发与技术实现。

本书广泛地吸取了国外有关文献资料及南京航空航天大学直升机飞控研究团队的研究成果,可供从事这一研究领域的学者、工程人员借鉴与参考,亦可作为“导航、制导与控制”学科的研究生辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

无人直升机着舰制导与控制/杨一栋主编. —北京:
国防工业出版社, 2013. 10
ISBN 978-7-118-08996-7

I. ①无… II. ①杨… III. ①无人驾驶飞机—直升
机—舰载飞机—自动着陆控制 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 226470 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10¼ 字数 228 千字

2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

编委会名单

主 编 南京航空航天大学 杨一栋

副主编 南京航空航天大学 袁锁中

海军装备研究院 王夷

编 委 (按姓氏笔画排序)

王新华 陈国军 张贞 茅坪

潘巨辉 戴文正

前 言

将无人直升机自主安全地降落在作六自由度运动的舰船甲板上是一项十分复杂的轨迹制导任务,轨迹制导系统的根本任务是使直升机的运动轨迹精确地跟踪设计的期望轨迹。而建立在惯性地面坐标系中的进场与着舰期望轨迹,是由直升机相对于舰体的相对运动期望轨迹及舰在地面坐标系中的牵连运动叠加而成,而舰的运动又是六自由度的。这一物理本质使描述着舰运动的坐标体系及相应的轨迹制导系统的结构显得更为复杂,故本书的研究工作:首先建立着舰运动坐标系,并给出坐标系间的相互转换方法,从而为舰的甲板运动及舰尾扰动模型的建立,为着舰制导系统的设计及地面仿真验证提供必要的物理基础。

在建立总体物理概念的基础上,作为核心内容,本书着重研究了三维着舰期望基准轨迹实时生成的数学表达式,在此基础上构建了对期望轨迹进行跟踪的制导系统结构。该三维着舰制导结构对本书其他各章的研究有指导意义。

由于通常的直升机着舰制导分为进场与着舰两个阶段,因此本书着重研究基于视线的进场基准轨迹的生成与制导方法,接着研究基于自主进场与着舰的期望轨迹的生成与制导方法,并针对高海况时的无人直升机的着舰环境,着重开发具有甲板运动预估的无人直升机着舰制导系统,并进行相应的仿真验证。为拓宽研究视野,本书还研究了无人直升机降落在陆地上运动的战车上,对其降落轨迹进行了优化设计,这一优化设计方法对无人直升机的着舰制导具有借鉴意义。

为了面向工程实际,本书以某小型无人直升机为例,较全面地设计了制导系统中的飞控系统,包括控制律的经典设计方法及现代控制设计方法,并作了仿真验证对比。开发了控制系统软硬件实现技术、结构配置、测试方法及地面的物理仿真验证。

本书编著过程中广泛地参阅了国外文献资料,并反映已有的科研成果,力求阐明物理实质,使内容具有系统连贯性及可读性,尽可能注重工程实际应用,对开发内容均辅有仿真验证。尽管如此,由于作者水平所限,有谬误及不妥之处,渴望读者们批评指正,协助我们改正,在此不胜感激。

本书的编著工作得到我国海军装备研究院的鼎力支持与密切合作,多年来也一直得到有关科研院所及南京航空航天大学研究生院的支持与资助,得到了南京航空航天大学直升机飞控研究团队的大力协助,在此表示感谢。

杨一栋

2013年5月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 舰载无人机在现代海战中的应用	1
1.2 当前国内外舰载无人直升机发展情况	2
1.3 舰载无人直升机关键技术	5
1.4 舰载无人直升机回收精确导引技术	6
1.5 本书主要内容	6
第二章 无人直升机着舰坐标体系及着舰环境	8
2.1 无人机着舰的坐标系及其转换	8
2.1.1 地球坐标系 $o_e-x_e y_e z_e$	8
2.1.2 地面坐标系 $O_E-X_E Y_E Z_E$	8
2.1.3 地理坐标	9
2.1.4 机体及舰体坐标系 $O-X_B Y_B Z_B$	10
2.1.5 机体坐标系 $O-X_B Y_B Z_B$ 及地面坐标系 $O_E-X_E Y_E Z_E$ 之间的关系	12
2.1.6 速度坐标系 $O_a-X_a Y_a Z_a$	14
2.1.7 地理坐标与地面坐标的转换	15
2.1.8 大圆航线及大圆导航	16
2.1.9 三维空间坐标系之间的转换	17
2.2 无人直升机的着舰环境	17
2.2.1 舰船甲板运动	18
2.2.2 大气紊流干扰	21
2.2.3 地面效应建模	24
第三章 无人直升机进场着舰制导系统总体结构	26
3.1 无人直升机三维基准轨迹的生成	26
3.1.1 直升机及舰在不同坐标系中的运动轨迹	26
3.1.2 无人直升机三维期望基准轨迹表达式	27
3.1.3 基于着舰点的三维期望轨迹的生成	29
3.2 无人直升机进场着舰三维制导系统结构	29
3.3 直升机着舰制导系统性能指标	32

第四章	基于视线的无人直升机进场制导系统	34
4.1	引言	34
4.2	有人操纵的直升机着舰过程	34
4.3	无人直升机进场基准轨迹的描述	36
4.4	无人直升机进场航迹的生成与平滑	37
4.4.1	航路点的生成	37
4.4.2	航路点的平滑	40
4.5	基于视线法的无人直升机制导系统	43
4.5.1	视线制导原理	43
4.5.2	路径点的切换	44
4.6	基于视线的无人直升机进场制导系统结构配置	46
4.6.1	航向制导系统	46
4.6.2	速度控制系统	48
4.6.3	高度控制	48
4.7	无人直升机进场轨迹跟踪仿真验证	49
第五章	直升机起降自主飞行制导系统	54
5.1	引言	54
5.2	制导系统的一般结构	54
5.3	直升机舰上起飞过程及轨迹生成	55
5.3.1	起飞时 Z_E 轴的轨迹生成	56
5.3.2	起飞时 X_E 轴的轨迹生成	57
5.4	直升机着舰过程及轨迹生成	59
5.4.1	返航进场阶段轨迹生成	59
5.4.2	降落段轨迹设计	63
5.5	直升机起降自主飞行的仿真验证	66
5.5.1	LQR 显模型飞控系统设计	67
5.5.2	自主起飞轨迹跟踪仿真	70
5.5.3	返航进场段轨迹跟踪仿真	70
5.5.4	着舰降落段轨迹跟踪仿真	70
第六章	具有甲板运动预估的无人直升机着舰制导系统	72
6.1	引言	72
6.2	着舰的规范要求	72
6.3	着舰制导系统的组成	73
6.4	甲板预估器的设计	74
6.4.1	确定模型阶数和参数	74
6.4.2	甲板运动预估算法	76

6.4.3	预估结果及分析	76
6.5	下降着舰制导系统设计	78
6.5.1	等待阶段控制律设计	78
6.5.2	下降第一阶段控制律设计	79
6.5.3	下降第二阶段控制律设计	80
6.5.4	中断控制	80
6.6	水平位置制导系统设计	81
6.7	飞控系统设计	82
6.8	下降着舰仿真与分析	83
6.8.1	未加舰尾流场扰动、阵风干扰和地面效应时的仿真验证	83
6.8.2	加入舰尾流场扰动、阵风干扰和地面效应干扰时的仿真验证	88
第七章	无人直升机降落在运动体上轨迹优化设计	93
7.1	引言	93
7.2	轨迹生成的优化设计	93
7.2.1	三次样条轨迹	93
7.2.2	运动方程	94
7.2.3	轨迹优化	95
7.3	仿真	96
第八章	无人直升机飞控系统控制律经典设计	98
8.1	引言	98
8.2	无人直升机飞行控制系统结构	98
8.2.1	无人直升机纵横向姿态控制结构	98
8.2.2	无人直升机航向控制结构	100
8.2.3	高度通道控制结构	100
8.2.4	速度控制通道结构	101
8.2.5	悬停控制与轨迹跟踪控制结构	101
8.3	无人直升机纵向通道控制律参数设计	102
8.3.1	纵向姿态控制系统控制律设计	102
8.3.2	纵向速度控制系统控制律设计	103
8.3.3	纵向位移控制系统控制律设计	104
8.4	无人直升机横向通道控制律设计	105
8.4.1	横向姿态控制系统控制律设计	105
8.4.2	横向速度控制系统控制律设计	106
8.4.3	横向位移控制系统控制律设计	107
8.5	无人直升机航向通道控制律设计	108

8.6	总距通道控制律设计	109
8.7	无人直升机轨迹跟踪控制仿真验证	111
第九章	直升机轨迹跟踪现代控制方法	114
9.1	引言	114
9.2	基于显模型的飞行轨迹跟踪控制系统设计	114
9.2.1	控制器设计	114
9.2.2	仿真与分析	117
9.3	具有指令预估器的飞行轨迹跟踪控制系统设计	119
9.3.1	预估器设计	120
9.3.2	状态反馈控制器设计	121
9.3.3	仿真与分析	123
9.4	基于反馈线性化的飞行轨迹控制系统设计	124
9.4.1	基于 LQR 的飞控系统镇定设计	124
9.4.2	基于反馈线性化的制导系统轨迹跟踪设计	125
9.4.3	仿真与分析	126
9.5	三种不同飞行轨迹控制系统的鲁棒性能分析	127
9.6	经典控制方法与最优控制方法的性能比较	131
第十章	无人直升机飞行控制系统实现技术	132
10.1	引言	132
10.2	基于 DSP 和单片机的双 CPU 无人直升机飞控系统总体方案	132
10.2.1	控制器性能需求	132
10.2.2	DSP+双口 RAM+单片机的控制器架构设计及选型	133
10.2.3	飞控系统总体方案设计	135
10.2.4	传感器模块的选择	136
10.2.5	通信模块	138
10.2.6	执行机构	139
10.3	飞控系统硬件设计	140
10.4	飞控系统软件设计	142
10.5	飞控系统软硬件测试过程与结果	147
附录 A	无人直升机动力学模型	150
A.1	无人直升机运动方程	150
A.2	无人直升机小扰动线性化数学模型	151
A.3	无人直升机动力学特性分析	152
	参考文献	154

第一章 绪 论

1.1 舰载无人机在现代海战中的应用

高科技军事技术在舰载无人机上的广泛应用,使舰载无人机装备的有效载荷具有更多的功能、更强的战斗力,能够执行多种作战任务。

1. 情报侦察和战场监视

侦察无人机具有续航时间长、飞行高度高、不易被对方发现与攻击的特点。机上可搭载电视摄像机、光电/红外/紫外/前向红外传感器、激光指示器、合成孔径雷达等多种传感器;能够对可能发生武装冲突、局部战争的海域进行长时间的实时侦察、监视,一旦发生冲突和战争,便可实施多批量、大纵深、全天候、立体化的全向侦察,搜集敌方的作战情报,及时传送到己方舰载或岸基指挥控制中心。

2. 空中电子压制和干扰

无人机可搭载有源干扰机,在战前或战争中担负电子压制和干扰(EMI)的任务。在防空压制中,无人机升空进行干扰,可扩大干扰距离,增强干扰效果,使敌方防空信息网视听混淆,判断出错。大量使用可使敌防空系统饱和,达到压制其防空系统的目的。无人机飞临敌上空或附近空域时,可对预设频率或频段实施干扰,也可利用机上设备进行实时侦察干扰。

3. 用作舰外有源诱饵

随着导弹技术的不断发展,导弹末制导雷达的开机时间越来越短。这对现役的舰外有源诱饵系统来说,由本舰(电子支援措施)系统对敌方导弹进行侦收、处理、设定干扰程序、选择最佳发射装置和发射时间,再由发射的干扰弹对来袭导弹实施诱导干扰,极有可能因其系统反应速度慢和作战准备时间长而不能满足现代实战的要求。在近海作战交战时间极短的情况下尤为突出。装载有源诱饵的舰载无人机可以作为舰外有源诱饵系统,在可能交战的区域,在预计要受到导弹攻击的紧急情况下发射出去,发射后按预先编制的程序飞行,利用无人机承载的电子战有效载荷对来袭导弹实施干扰。这类研究在西方发达国家得到了高度的重视,而且有些已经在试验和实战中得到了验证。

4. 用作反辐射攻击武器

在无人机上搭载截获接收机、自动寻敌器和战斗部,可用作对敌防空压制的有效兵器,不仅可攻击雷达,还可攻击干扰机、预警机及专用电子战飞机等辐射源。它一般先于作战飞机发射升空,飞向目标区上空,一旦升空,其寻敌器就开始工作,对截获到的信号进行处理、分选和识别,选定攻击目标。攻击目标一旦选定,寻向设备就利用寻敌器输出的敌方辐射源方位和仰角数据自动控制载机飞向目标。

5. 目标指示、攻击制导、战损评估和通信中继

无人机可为舰艇炮火和导弹选定攻击目标,测定目标参数,协助舰载火控系统计算射击诸元,进行目标分析;可用激光目标指示器照射目标,对激光制导武器进行精确制导;攻击过后,可测定弹着校正参数、检查目标的毁伤程度。利用无人机还可转发情报、通信、导弹控制指令等信号,满足因现代海战作战区域广而产生的对信息传递、指挥控制、导弹攻击的更高要求。

1.2 当前国内外舰载无人直升机发展情况

西方目前公开的无人舰载直升机主要有“火力侦察兵”、“先锋”、“小精灵”和“普赖莫斯”等。而美国的“火力侦察兵”已经实现了自主着舰。中国目前先进的有“天鹰”-3 无人驾驶直升机,但是它还不能用于舰载飞行操作。就舰载无人直升机飞行控制而言,我国与西方国家还有着不小的差距。

相对于固定翼无人机,不需滑跑或弹射,是旋翼无人机的优越之处。它可以在甲板上直上直下,甚至在空中悬停。更为重要的是,旋翼无人机彻底解决了着舰回收困难这个关键问题。

CL-227“哨兵”(Sentinel)是加拿大研制的实时监视和校靶无人机,主要机载设备是电子战设备等。空载重量 159kg,最大平飞速度 142km/h,实用升限 3000m,活动半径 60km,最大续航时间 3.5h。

加拿大的 CL327(比 CL227 更为先进)的旋翼直径为 4m,飞行器重量 350kg,整个系统单元由飞行器主体与两个人操作的便携式控制站组成。CL-327 无人机如图 1.1 所示。

“鬼怪式”(SPRITE)是英国研制的多用途无人直升机(图 1.2),主要用来监视、巡逻、侦察、情报搜索、目标指示和电子战等。“鬼怪式”无人直升机装有电视或红外摄像机、微光电视、激光目标指示器、化学传感器、电子情报和电子战设备等,最大起飞重量 40kg,最大平飞速度 130km/h,活动半径 32km,实用升限 2440m,最大续航时间 2h。

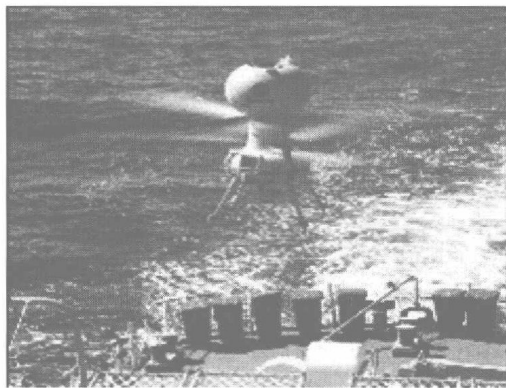


图 1.1 CL-327 无人机



图 1.2 “鬼怪式”无人机

德国的“西莫斯”共轴式旋翼机旋翼直径 6m, 只需一个 $8\text{m} \times 8\text{m}$ 的甲板就能完成起降。

俄罗斯的“卡”-137 也属于共轴双旋翼无人直升机, 它的外形为球形, 旋翼直径 5.3m, 采用合金材料制成, 球的上部装有活塞发动机动力装置、控制系统和机载设备, 下部可根据用途选配专用设备。“卡”-137 可进行空中打击、通信中继、电子干扰、搜寻营救、探雷排雷等。

美国海军装备有 800 多架 QH50 系列多用途共轴双旋翼无人机(图 1.3), 它有多种型号, 除可担负反潜任务外, 还可以用于侦察监视、武器试验和运送货物等。德国也有一型“海蚊”共轴双旋翼无人机, 它是以美国 QH50 为基础研制而成的。



图 1.3 QH50 无人机

RQ/MQ-8“火力侦察兵”无人直升机(图 1.4)于 2000 年 2 月开始由诺斯罗普·格鲁曼公司研制, 美军方计划将其发展为海军装备的主要无人机型。2006 年该无人机实现了在舰上的全自主起飞与降落。MQ-8B 型无人直升机的持续飞行能力为 4h, 作战半径达 110n mile。该机的标准装备包括光电/红外扫描系统和激光测距仪, 除了搜寻和识别目标外, 还可按重要性对它们进行排序。另外, MQ-8B 还可携带一定数量的“地狱火”反坦克导弹。在攻击任务结束后, MQ-8B 还可对目标的毁损程度进行评估。

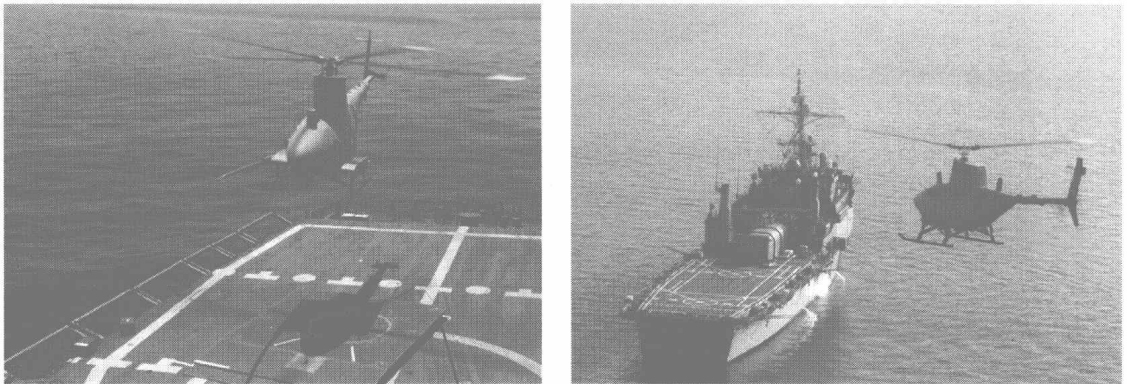


图 1.4 “火力侦察兵”无人直升机着舰

“鹰眼”是美国波音公司研制的倾转旋翼无人机系统(图 1.5), 主要用于舰炮支援、战

损评估、超视距导向目标、通信和数据中继等。主要机载设备有电视摄像机和前视红外摄像机等。最大起飞重量 1020kg,活动半径 200km,最大续航时间 3h。

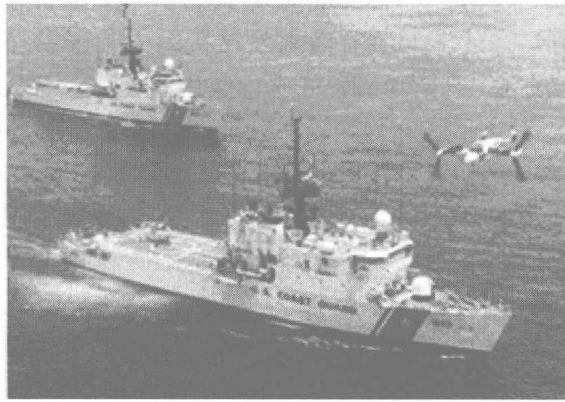


图 1.5 “鹰眼”无人机

S100 舰载无人直升机(图 1.6)是由奥地利维也纳西贝尔公司开发的,是一个小型可遥控的或完全自主飞行的舰载垂直起降无人直升机,主要用于完成地面和空中监视目标、搜索、侦察、雷区探察标识、地面爆炸物探查、昼夜交通管制边境巡逻和环境监视等任务,由于飞行器机体尺寸小巧,行踪隐蔽,因此,不易被敌方探测。S100 无人直升机小巧玲珑,技术先进,便于舰载(尤其对于没有航空母舰而大量装备驱护舰等中小舰艇的海军),同时采用垂直起降方式,有效载荷较大,至今已被美国、德国、英国、法国等多个国家采购,用于研究或装备使用。

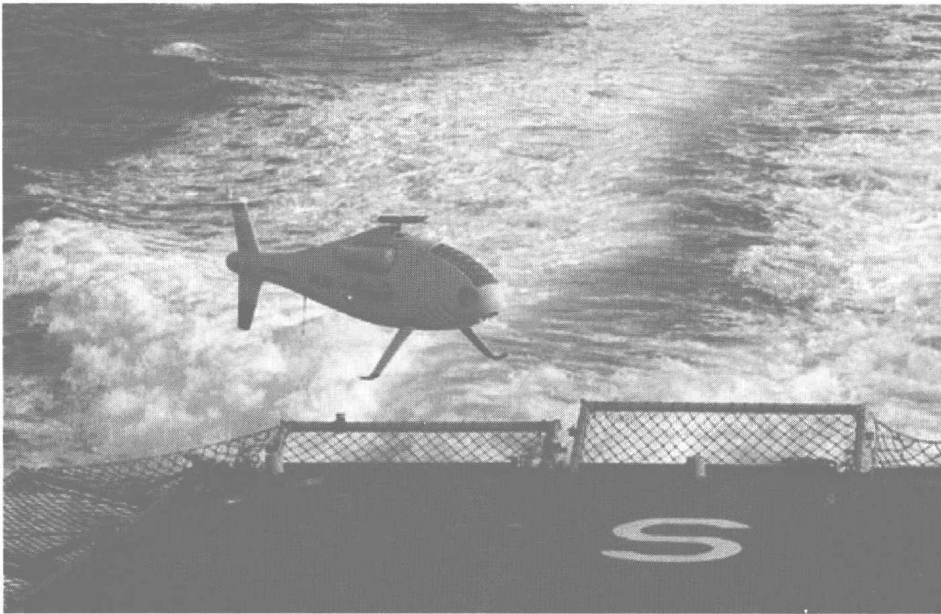


图 1.6 S100 舰载无人直升机着舰

自 20 世纪 60 年代开始,美国、意大利、以色列、德国等国的海军就对舰载反潜无人直升机进行了研制开发,以便开展对海反潜作战。受限于现代化舰艇存在复杂强大的电磁

干扰环境,舰载无人机的海上飞行缺乏可视基准陆标以及对无人机的舰上回收存在很大困难等诸多关键技术的困扰,导致舰载无人机开发缓慢甚至一度停止。但由于舰载无人机尤其是具有垂直起降能力的舰载无人直升机可伴随母舰船等作战舰船一同出航,可大大扩展海上监视预警和作战范围,同时又可有效避免有人驾驶飞机上的驾驶员冒生命危险奔赴海上交战区进行侦察的危险,因此舰载无人机是海上作战部队急需的,也是解决舰载雷达探测距离短等问题的有效和廉价装备。

随着计算机技术、微电子技术、航空技术等相关技术的快速发展,无人机自身的各种关键技术及导航技术的不断突破,可以预见,舰载无人机尤其是舰载垂直起降无人机将会不断拓展其作战使用范围,其技术性能也会得到进一步提高,必将成为未来大中型舰艇及小型特种舰艇的重要装备。

1.3 舰载无人直升机关键技术

从技术层面上,舰载无人机发展受限在于很多关键技术还没解决,目前要从航行的舰艇上操纵无人机还存在着一些问题。

(1) 军舰上的空间非常宝贵,无人机的发射与回收装置会与其他舰载装置争夺空间。即使舰上设有大型飞行甲板,也必须周密安排无人机的活动以便其对正常的空中活动干扰最小;当无人机在空中飞行时也要特别注意,避免对从军舰起飞或在军舰周围的其他飞机造成危险。

(2) 无人机失事最通常的原因之一是电磁干扰,而电磁干扰对军舰来说是一个极为严重的问题,因此在无人机执行任务的全过程中,需要发射母舰及在此海域活动的所有其他军舰都必须采取恰当的发射控制措施。

(3) 无人机在舰上的回收是另一个敏感问题。在陆地上很容易制导无人机降落在简易机场上,或进行撞网、降落伞回收,但是这些步骤在海上是不可行的或是极为困难的。由于靠近军舰上层建筑处通常有一动荡区,加上军舰的运动,所以在无人机最后接近阶段很难对其进行精确控制。在美国“衣阿华”战列舰上试验“先锋”无人机时,5架中有3架在舰上坠毁,第4架掉入海中,只有第5架成功地回收在网中。基于这些原因,舰载无人机应采用“海军专用”回收法,包括采用降落伞辅助水上着陆和直升机式垂直起降。然而,降落伞辅助回收会危及无人机并对军舰正在进行的作业产生极大的干扰,其过程也比较复杂,对海上的环境要求比较高,容易造成飞机的损坏,而且操作过程时间长,容易造成飞机的丢失。更重要的是由于伞包具有一定的重量,占去了无人机宝贵的载重能力,使得无人机的任务载荷能力受到限制。目前认为最好的解决办法是发展具有垂直起降能力的无人直升机,因为无人直升机靠旋翼产生升力和推进力,能够前后左右机动飞行、空中悬停,具有良好的低速飞行特性和灵活性,并且对发射回收场地要求不高,所以舰载应用优势得天独厚。

(4) 海上使用无人机的一个特殊问题是缺乏可视基准陆标,操纵者有时可能会不知道飞行器的精确位置,所以也就损失了其大部分效用。这个问题在海湾战争中经常出现,解决这个问题的办法是采用全球定位导航系统(GPS)导航技术,由于政策的原因GPS在很多国家的导航精度不高,必须利用差分GPS技术提高定位精度。

(5) 动力问题。无人机通常采用燃烧高辛烷航空汽油的活塞发动机作为动力装置,但由于汽油不利于舰上存储,现在国外大多数无人机已经改用(或正在改用)重燃油,这减少了由于舰上存在汽油引起的危险并提高了后勤兼容性,更有前景的发展方向是采用新型动力,如太阳能、燃料电池等。

1.4 舰载无人直升机回收精确导引技术

在上述无人机的回收方式中,都需要精确测量无人机的位置,精确控制无人机的轨迹,然后实现无人机的回收。如何引导无人机按要求的航迹飞行是无人机回收的关键技术之一。因此,解决好摇摆平台上的准确测距、测角和定位,关系到无人机作战任务的完成和它的自身安全。

1. 舰上雷达导引的方式

与舰载战斗机着舰类似,通过舰上雷达测量无人机的高度方位等,产生与理想引导轨迹的误差信号发送给无人机,控制无人机按预定轨迹下滑回收。

2. GPS 导引方式

利用 GPS 全天候、高精度的三维定位与导航能力,采用 GPS 测量飞机与舰船的位置,计算产生回收轨迹相应的控制参数,实现无人机的回收。

3. 电视导引的方式

电视导引方式是一种直观、图像逼真而且精度较高的自动导引方式,通过视频图像的处理,获得无人机下滑回收要求的控制参数。

4. 微波导引系统

微波导引系统测量方法简单,精度较高,无气象要求,但设备较复杂,费用较高。

对于无人直升机由于其可以在甲板上垂直着舰,关键在于导引方式。其导引方式可以参考固定翼无人机的导引方式。

1.5 本书主要内容

随着海上战场作战手段的不断变化,舰载无人直升机的时代已经到来,舰载无人直升机已经是现代水面舰艇作战系统必不可少的组成部分,它将不断地发展、完善,而所有这些发展都依赖于无人机能够不依靠过多的舰上辅助设备实现自主起飞和降落,这项技术已成为舰载无人直升机发展中的关键问题,成熟的自主起降系统将推进舰载无人直升机的大发展。

本书对舰载无人直升机着舰制导与控制技术进行了较为系统的分析研究,全书内容概括如下:

第一章为绪论,介绍了无人直升机的发展概况、应用及关键技术。

第二章建立了无人直升机着舰坐标体系,对描述无人直升机着舰运动中的各种坐标体系进行了详细描述,并对它们之间的相互转换关系进行了推导;对影响无人直升机着舰安全的有关环境因素进行了研究,给出了甲板运动模型、气流扰动模型。

第三章给出了无人直升机进场着舰制导结构。设计了无人直升机着舰期望基准轨迹,给出了无人直升机进场着舰的三维制导结构和制导系统的设计要求。

第四章研究了基于视线法的无人直升机进场制导系统设计与仿真。设计了无人直升机返航进场的轨迹,采用样条函数对其进行了平滑处理;采用基于视线制导的方法实现了对基准轨迹的跟踪制导。

第五章研究了无人直升机起降自主制导与控制。设计了无人直升机自主起飞与返航进场、自主降落的基准轨迹,并进行了仿真验证。

第六章研究了具有甲板运动预估的无人直升机着舰制导系统。对无人直升机在舰面降落段的控制模态及相应的控制律进行了分析设计。

第七章针对无人直升机自动降落在运动体上的轨迹进行了优化设计。该轨迹设计的优化技术对无人直升机着舰的轨迹设计具有借鉴作用。

第八章用经典控制方法,对无人直升机的飞行控制系统,即制导系统的内回路进行了设计。给出了无人直升机飞行控制系统的结构配置;以某型无人直升机为例,论述了飞行控制系统的设计过程,最后以轨迹跟踪的方法,对设计的飞控律进行了仿真验证。

第九章采用现代控制的方法,设计了直升机轨迹跟踪制导系统。设计了三种较为典型的直升机轨迹跟踪控制系统,并对其跟踪性能与鲁棒性能进行了验证。

第十章研究了小型无人直升机飞行控制系统的某种实现技术。详细论述了飞行控制系统的结构方案、硬件配置、软件设计以及测试验证技术,为舰载无人直升机着舰技术的工程化提供参考。

第二章 无人直升机着舰坐标体系及着舰环境

为了确切地描述无人直升机着舰运动的状态,必须适当选定坐标系。这是首要任务,因为只有在此基础上,才能建立直升机运动的动力学模型和运动学模型,才能建立无人直升机着舰制导系统中的基准期望轨迹及相应的着舰制导系统结构。

为了与国际标准接轨,本书采用 1991 年 2 月航空部颁发的航空工业标准,该标准与国际标准 ISO1151/1-1985 及 ISO1152/1-1985 相等效。

2.1 无人机着舰的坐标系及其转换

2.1.1 地球坐标系 $o_e-x_e y_e z_e$

地球坐标系如图 2.1 所示,它是原点 o_e 定在地球中心的笛卡儿正交坐标系, $o_e z_e$ 与地球自转轴重合,朝上为正。 $o_e x_e$ 在赤道平面内指向格林尼治子午线, $o_e y_e$ 在赤道平面内,指向遵循右手定则。由经纬度可以确定地球表面的某点在地球坐标系中的位置。

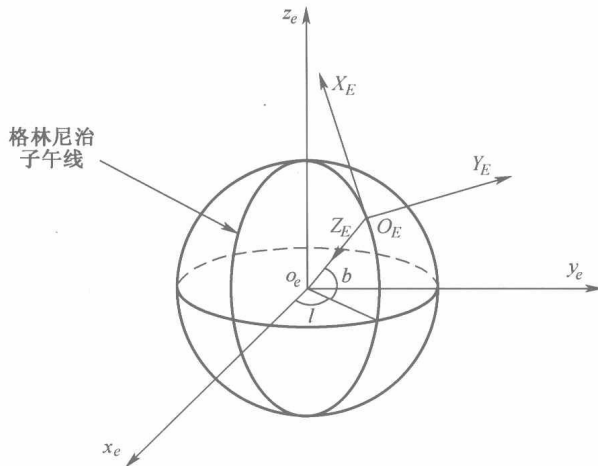


图 2.1 地球坐标系与地面坐标系

下面定义的坐标轴系均为三维正交轴系,且遵循右手法则, x 轴指向前, y 轴指向右, z 轴指向下。

2.1.2 地面坐标系 $O_E-X_E Y_E Z_E$

如图 2.1 所示,该坐标系的原点 O_E 设在地平面上某一点,其经纬度为 l, b 。 $O_E X_E$ 在地平面内指向北方(N), $O_E Y_E$ 在地平面内指向东方(E), $O_E Z_E$ 轴垂直地面指向地心,