

空中机器人(固定翼)专项教育教材

Aerial robots (Fixed-wing UAV) special education materials

丑武胜 贾玉红 何宸光 雷旭升 编著



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

空中机器人(固定翼) 专项教育教材

丑武胜 贾玉红 何宸光 雷旭升 编著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

空中机器人已广泛应用于航空拍摄、农作物播种喷药、灾害监测、危险搜救等领域。本书针对固定翼空中机器人,概述了其系统组成和涉及的关键技术。在此基础上,详细介绍了固定翼空中机器人的基本飞行原理,结构设计与组装技术,以及相关的导航技术和控制技术。

本书内容全面,深入浅出,通俗易懂,可供空中机器人爱好者和有关科研与教育工作者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

空中机器人(固定翼)专项教育教材/丑武胜等编
著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2013. 9
ISBN 978-7-5661-0690-2

I. ①空… II. ①丑… III. ①智能机器人—教材
IV. ①TP242. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 221110 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 9.25
字 数 147 千字
版 次 2013 年 9 月第 1 版
印 次 2013 年 9 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

编审委员会

编委会主任：何宸光

编 委 会：晓 敏 韩立群 冀运熙 张 怡
邢小泉 秦吉宏 白 洁 乔 雷
滕兆勇

前言

江泽民同志指出：科学技术是第一生产力。振兴经济首先要振兴科技。只有坚定地推进科技进步，才能在激烈的竞争中取得主动。当前，我国经济正面临着加速发展、调整结构、提高效益的重大任务，尤其需要全社会提高科技意识，多方面增加科技投入，真正依靠科技进步。科技工作要面向经济建设主战场，在开发研究、高新技术及其产业、基础性研究这三个方面合理配置力量，确定各自攀登高峰的目标。在世界高科技领域中，中华民族要占有应有的位置。通过深化改革，建立和完善科技与经济有效结合的机制，加速科技成果的商品化和向现实生产力转化。不断完善保护知识产权的制度。认真抓好引进先进技术的消化、吸收和创新。努力提高科技进步在经济增长中所占的含量，促进整个经济由粗放经营向集约经营转变。

众所周知，文化是一个民族的实力，教育是一个民族的生机，体育是一个民族的国力。社会变革是极其巨大的，正是这极其巨大的变革迫使人们去认识新事物，迎接新挑战，迫使人们去思考许许多多前所未有的东西。服务机器人作为新生事物，已经走进人类，人类已经走进机器人时代。机器人技术涵盖了人类所有的学科知识和自然科学知识，特别是智能机器人和服务机器人，与人们的生产生活密不可分。2012 年国家科技部组织编制了《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》，《规划》中明确了服务机器人技术是集机械、信息、材料、生物医学等多学科交叉的战略性高技术，对于相关技术与产业的发展起着重要的支撑和引领作用。在全国范围内实施《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》，实现机器人技术作为战略高技术，推动国防军事、智能制造装备、资源开发，发展未来服务机器人产业，有望培育新的战略性新兴产业，而且具有很强的技术辐射性与带动性，对促进智能制造装备发展、提高应急处理突发事件能力、发展医疗康复设备、增强军事国防实力等都具有十分重要的现实意义。

2011 年，国家体育总局与神州通信集团战略合作，共同调研机器人运动

的国际和国内现状，在美国、日本、欧洲国家等发达国家，机器人教育教学已被纳入中小学的必修课，有些大学还专门设立了机器人学科或机器人学院；机器人体育赛事方面，国际上著名赛事均由本国军事或太空部门主办，如 AUVic 赛事由国际无人系统联合会（AUVSI）和美国海军装备研究中心联合主办，水下 SAUC-U 赛事由全球海军技术研究局主办。机器人运动在我国必须规范开展，而规范的前提是规则。国家体育总局借鉴国际机器人教育教学和机器人体育赛事的先进经验，结合国内机器人赛事的现状，根据《中华人民共和国体育法》的有关规定，将机器人运动纳入国家社会体育运动项目，定义为中国素质体育机器人运动，以彰显这项运动的本质是素质教育。

中国素质体育机器人运动受到了社会各界的广泛关注，全国政协十一届五次会议上以“高度重视，深入做好素质体育机器人赛事”提出提案（3427 号），国家体育总局对提案作出答复（体群字【2012】96 号）。《答复》中明确做好六项工作：一、项目的基础建设；二、组织建设；三、竞赛系统建设；四、加强对外交流；五、把握文化大发展大繁荣对素质体育机器人运动带来的新机遇、新要求；六、加强与其他部门的合作。并于 2012 年颁布施行《中国素质体育机器人运动通用竞赛规则》，为这项利国利民伟大工程的规范开展、健康开展、广泛开展打下了坚实的基础。

此次出版的机器人专项教育系列教材在我国机器人教育领域尚属首次，此系列教材的出版使我国机器人基础教育、专项教育、学历教育的全面普及有了良好的开端，为我国机器人体育事业的健康发展、积极发展起到了巨大的推动作用。

何宸光

2013 年 3 月于北京

利國利民 造福子孫

功在當代 利在千秋



中国素质体育机器人运动

理念：“运动炫科技，智慧赢未来”。

本质：素质教育。

表现形式：竞技。

杠杆：赛事。

宗旨：搭建培育、展示、遴选未来杰出创新人才的平台，创新中国社会体育工作，致力全国素质体育机器人赛事的全面发展。

意义：能够有效提高国民综合素质，全面提升我国在科学、技术、教育领域的先进水平，积极促进中国体育事业、体育产业的健康发展。

发展方向：打造 CRC 职业赛事，建设 CRC 职业队，完善 CRC 职业俱乐部，展现 CRC 明显效应，彰显素质体育机器人运动意义。

目 录

第 1 章 空中机器人(固定翼)概论	1
1.1 固定翼无人机概述	1
1.2 固定翼空中机器人	4
1.3 固定翼空中机器人的系统组成及关键技术	5
1.4 空中机器人的应用领域	8
第 2 章 基本飞行原理	9
2.1 飞行环境	9
2.2 空气流动基本规律	15
2.3 固定翼空中机器人飞行原理	19
2.4 固定翼空中机器人的稳定性与操纵性	34
第 3 章 固定翼空中机器人的构造	47
3.1 固定翼空中机器人结构设计的基本要求及主要材料	47
3.3 固定翼空中机器人的构造特点及分类	60
3.4 固定翼空中机器人组装	70
第 4 章 空中机器人的导航技术	83
4.1 导航系统概述	83
4.2 MEMS 惯导系统组成和工作原理	86
4.3 卫星导航系统的组成	98
4.4 组合导航技术	104
第 5 章 空中机器人的控制技术	108
5.1 空中机器人的动力学模型辨识	109
5.2 空中机器人的姿态控制	115
5.3 空中机器人航迹控制技术	129
附录	133
参考文献	135

第 1 章 空中机器人（固定翼）概论

1.1 固定翼无人机概述

1.1.1 固定翼无人机的分类

无人驾驶飞行器简称为无人机。现代无人机的发展速度极快，使得其种类繁多、型号各异，同时新的概念、新的设计不断涌现，因此目前为止对于无人机尚无统一的分类方法。全世界很多从事无人机研究的机构，例如美国联合无人机计划局（JPO）、欧洲无人机协会等都给出过自己的一些分类。一般来说，大体可以分为以下五种。

1. 按照外观尺寸大小的分类

无人机按照大小可分为微型、小型、中型和大型无人机。具体的尺寸标准尚无统一定论，我们可以做以下定性了解。

美国有关机构定义微型无人机是翼展在 15 cm 以下的无人机。而英国《飞行国际》杂志则具体地定义翼展或者机体最大尺寸小于 0.5 m，使用距离约 200 m 的无人机为微型无人机。

小型无人机则类似于一架较大的航空模型。一般质量在 10 kg 左右，小型无人机成本比较低廉，功能比较单一，任务能力有限。

中型无人机的大小处于小型无人机和大型无人机之间；功能相对于小型无人机更为强大。

大型无人机则可以相当于一架小型载人飞机，且功能强大，能够执行各种复杂的任务。

2. 按照飞行方式的分类

无人机按照飞行方式可以分为固定翼无人机、旋翼无人机、扑翼无人机等。其中前两者应用比较广泛，而扑翼无人机主要用于微型飞行设备。



3. 按照航程及飞行时间分类

航程是无人机两项重要性能之一，它是指无人机起飞后中途不加油所能飞行的距离。在航程的基础之上规定航程的 25% ~ 40% 为无人机的有效飞行半径。按照航程分类，可分为近程、短程、中程和长距离航程四种。其中，近程无人机的航程一般为 10 ~ 30 千米，短程无人机的航程一般为 150 千米左右，中程无人机的航程一般为 650 千米左右。

4. 按飞行速度分类

无人机按照飞行速度分类可分为亚音速无人机、超音速无人机和高超音速无人机。

5. 按使用次数分类

无人机的使用次数分为单次和多次。单次使用无人机发射后不收回，也不需要安装在机上安装回收系统。多次使用无人机则指需重复使用的，要求回收的无人机。

1.1.2 典型固定翼无人机介绍

1. 美国 MQ-1 捕食者

美国是全世界最早开发无人机的国家之一，并且近代以来在无人机技术领域取得了巨大的成就。MQ-1 最高速度 217 km/h，巡航速度 130 ~ 165 km/h，航程大于 3 704 km，实用升限为 7 620 m。如图 1-1 所示。



图 1-1 美国 MQ-1 捕食者

2. 美国 RQ-4A “全球鹰”

RQ-4A “全球鹰”是由美国诺斯罗普·格鲁曼公司生产的一种高空长航时无人机,如图1-2所示。

“全球鹰”机身长13.5 m,高4.62 m,翼展35.4 m,是一种巨大的无人飞机,最大起飞质量为11 622 kg。“全球鹰”机载燃料超过7 t,最大航程可达25 945 km,自主飞行时间长达41 h,可以完成跨洲际飞行。可在目标区上空18 288 m处停留24 h。

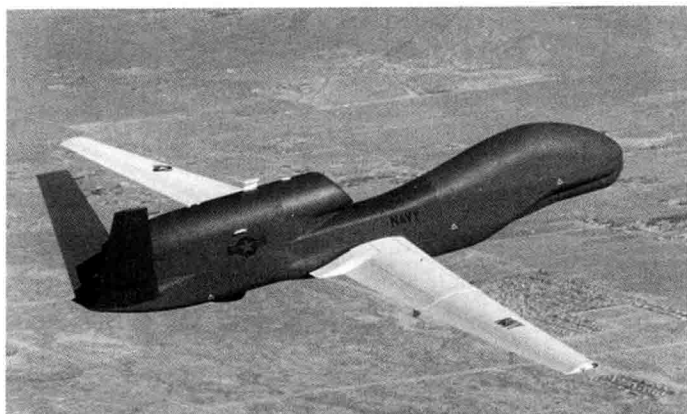


图1-2 美国 RQ-4A “全球鹰”无人机

3. 以色列“苍鹭”(Heron)无人机

“苍鹭”无人机是由以色列飞机工业公司马拉特子公司研制的高空长航时无人机,如图1-3所示。

“苍鹭”翼展16.6 m,机长8.5 m,机高2.3 m;起飞质量1 100 kg,任务设备质量250 kg,燃油质量400 kg;最大平飞速度240 km/h,实用升限10 668 m,航程250 km,续航时间50 h左右。

4. 以色列“搜索者”无人机

搜索者是由以色列飞机工业公司马拉特子公司研制的长航时多用途无人机,如图1-4所示,搜索者采用上单翼结构,发动机置于机身尾部上方,用三桨叶螺旋桨推进。目前已生产了I型和改进的II型。

搜索者无人机长5.15 m,翼展7.22 m,高1.16 m,最大起飞质量372 kg,飞行高度4 575 m,飞行速度111~194 km/h。飞行时间可达12 h,最长留空时



间为 14 h。活动半径在有无线电中继时为 220 km，无中继时为 120 km。



图 1-3 以色列“苍鹭”无人机



图 1-4 以色列“搜索者”无人机

1.2 固定翼空中机器人

通常来讲，固定翼空中机器人（Fixed - Wing Aerial Robotics）也可以看作是无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）的别称。空中机器人不是一个单独的学科，它是一项涉及航空理论、计算机技术、控制工程技术、电子技术、机械、材料等多个学科的系统工程。而当其应用于具体问题，又会使用到飞行器的设计与制作、控制系统和算法的设计、传感器应用与融合、导航制导、数据通信、图像识别以及信号处理等多方面的知识。

与载人飞机相比,固定翼空中机器人具有体积小、造价低、对环境要求低等优点,具体有如下几个方面:

(1) 机体灵活性好,大量采用复合材料。由于固定翼空中机器人没有驾驶舱,所以机身的设计可以减少很大体积,从而可以减轻机身的质量,同时可提高固定翼空中机器人的飞行速度和机动性。

(2) 可担负多载荷任务并进行远距离、长时间航行。相比航模,固定翼空中机器人可以有更多的空间和载重来承载燃料和设备,延长了续航时间和作业能力。

(3) 具有自主能力。固定翼空中机器人自主进行起降,并能沿设定的航线自动飞行。

(4) 应用广泛性。目前固定翼空中机器人除了可以用于传统的监测、航拍等任务,更能够在核污染区、地震区等人类无法涉足的环境执行特殊、危险的任务等。

固定翼空中机器人虽然有着很多的优点,但同时也存在着一定劣势。例如固定翼空中机器人的飞行容易受到干扰,操控易受人为因素的干扰,并且存在一定的滞后性。

1.3 固定翼空中机器人的系统组成及关键技术

1.3.1 固定翼空中机器人的系统组成

一个完整的空中机器人系统包括了地面站系统、飞行系统、任务载荷系统以及无人机的控制和保障人员等部分。地面站系统包括无人机的起飞降落系统地面部分、远程遥控、监测地面部分以及其他辅助设备等。固定翼空中机器人的飞行系统包括飞机本体、动力推进系统、飞行控制系统、导航系统、起飞降落系统机载部分、遥控系统机载部分等。任务载荷指的则是固定翼空中机器人执行任务所需携带的任务设备。固定翼空中机器人的控制和保障人员也是整个系统良好运作的重要保障,经过良好技术培训的操作员是固定翼空中机器人执行任务的一个重要环节。图1-5是固定翼空中机器人系统的组成示意图。

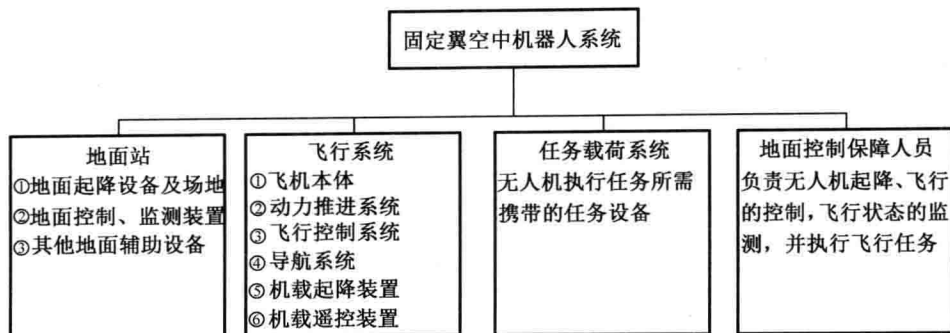


图 1-5 空中机器人系统的组成

1.3.2 空中机器人的性能指标

空中机器人的性能指标主要有以下几个方面:

(1) 航程。决定固定翼空中机器人航程的因素包括机体结构、翼型、发动机、携带能量等, 当然固定翼空中机器人的控制系统对航程也有着不可忽视的影响。

(2) 续航。续航时间是检验固定翼空中机器人持续完成任务能力的重要标准, 执行不同类型任务的固定翼空中机器人对续航的要求是不同的。

(3) 本体尺寸。固定翼空中机器人机体的尺寸能够影响其使用性能和抵抗恶劣环境的能力。

(4) 飞行速度。飞行速度对于固定翼空中机器人来说也是一项重要的指标。

(5) 升限。升限就是飞机的飞行高度。

(6) 有效载荷质量。有效载荷质量是衡量固定翼空中机器人能够携带任务载荷多少的重要指标。

(7) 发射回收方式。发射和回收方式直接影响空中机器人的易用性, 优秀的发射和回收设计会让使用者受益匪浅。常用的发射方式有轨道发射、火箭发射、滑跑发射、空中发射和垂直起飞等几种; 常用的回收方式有降落伞回收、空中回收、拦截网回收、起落架滑轮着陆、气垫着陆和垂立着陆等类型。

(8) 爬升率。指在一定飞行质量和一定的发动机工作状态下, 固定翼空

中机器人在单位时间内上升的高度。

(9) 升限。升限是指空中机器人能够维持平飞的最大高度。空中机器人的升限分为理论升限和实用升限。实用升限有着更大的实际意义,指的是空中机器人的爬升率略大于零的某一定值时所对应的最大平飞高度。

(10) 可靠性。空中机器人的可靠性是指在执行预期任务期间,无故障运行的可能性,可以用百分比表示。良好的可靠性是空中机器人稳定使用的重要保障。

(11) 经济性。空中机器人的设计、制造和维护成本是一项重要的现实指标,一般来讲,它是由空中机器人要执行的任务重要性来决定的。

1.3.3 空中机器人关键技术

1. 动力技术

较好的动力推动技术和低油耗、高可靠性的发动机可以使空中机器人承载更多的任务、航行更长的时间,是执行一切任务的基础。当前,空中机器人采用的发动机主要有活塞式、涡轮式、转子式、太阳能式等。其中,太阳能式发动机可以有效利用能源,前景非常好。

2. 通信技术

通过宽带、数据链技术实现超视距控制是空中机器人发展的关键。如果不能实施通信,操作者将无法和空中机器人进行交互,空中机器人也就失去了一定的优势。

3. 飞行控制技术

随着空中机器人任务的多样化,致使空中机器人的控制规律也各不相同,这就对飞行控制技术提出了更高要求。飞行控制律是解决空中机器人的核心系统与已建立的对象模型及各传感器间匹配的控制规律。目前,多模型的方法是处理不确定问题的重要方法,多模型的自适应是比较适合的控制技术。将设计模型与在线识别决策相结合,可根据情况的变化自主地在已建立的模型中选择适合当前工作状态的模型及与之匹配的控制器,形成实时的、具有高鲁棒性的控制系统,降低决策和控制的复杂程度,使总体性能达到最佳。

4. 人工智能技术

自主飞行是空中机器人需要解决的主要问题。这需要一些智能的综合传感器,实现空中机器人与操纵人员间的交互,可以使空中机器人能按照操作人员



的命令或预先编写的程序来完成预定任务。而要提高空中机器人的自主性,人工智能和控制技术是有效的途径。

1.4 空中机器人的应用领域

空中机器人的第一大用途是进行监测,通过无人机拍摄或者录制的图像与视频信息,能够为使用者提供所需的地面情况。目前来讲,在航空拍摄、地震抢险探测、气象预报、核泄漏抢险探测等领域无人机已经崭露头角。其次,空中机器人还能够被用于运输、反恐等用途。同时,空中机器人还将被计划用于农作物播种喷药、水产业巡逻、大气监测、土壤监测、海洋监测、灾害监测、森林灭火、危险搜救等领域。随着空中机器人技术的进一步完善,以及民用无人机飞行管理经验的丰富,空中机器人的民用领域必将蓬勃发展。