

大疆慧飞无人机应用技术系列丛书
无人机应用技术“十三五”规划教材

总 编 罗亮生 徐华滨
主 编 罗亮生 张力平

无人机应用基础

Fundamentals of UAS Applications



中国民航出版社

大疆慧飞无人机应用技术系列丛书
无人机应用技术“十三五”规划教材

无人机应用基础

总 编 罗亮生 徐华滨
主 编 罗亮生 张力平



中国民航出版社

图书在版编目(CIP)数据

无人机应用基础/罗亮生,张力平主编. —北京:
中国民航出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-5128-0586-6

I. ①无… II. ①罗… ②张… III. ①无人驾驶飞机
-技术培训-教材 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 181711 号

无人机应用基础

罗亮生 张力平 主编

责任编辑 陈晨

出版 中国民航出版社(010)64279457

地址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼(100028)

排版 中国民航出版社录排室

印刷 北京环球画中画印刷有限公司

发行 中国民航出版社(010)64297307 64290477

开本 787×1092 1/16

印张 12.5

字数 297 千字

版印次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5128-0586-6

定价 48.00 元

官方微博 <http://weibo.com/phcaac>

淘宝网店 <https://shop142257812.taobao.com>

电子邮箱 phcaac@sina.com



罗亮生，航空高级工程师、民航运输专业教授。现任南京航空航天大学兼职硕士生导师，广东省无人机协会副会长，广州民航职业技术学院通航研究中心副主任、继续教育学院院长。曾就读于南京航空航天大学飞机总体设计专业、民航管理专业和中山大学工商管理专业。曾就职于航空航天部610研究所、广东机械学院、珠海航展公司。多次获得省部级奖励，2009年获广东省第五届省级教学名师奖。



张力平，广州民航职业技术学院民航经营管理学院院长，副教授。毕业于西北电讯工程学院（现西安电子科技大学）电子工程专业，长期从事民航通信导航和空中交通管理专业的教学和管理工作的。

责任编辑：陈 晨
封面设计：李士勇

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

本书编写委员会

总 编：罗亮生 徐华滨

主 编：罗亮生 张力平

顾 问：黄永宁 王 霞 孙卫国 米燕军

刘 宽 孙嘉栋 朱林锐

编写人员：罗亮生 张力平 蒋 军 王芳丽

张 军 江亚东

审 核：徐华滨 江亚东

总 序

对大多数人来说，飞行是昂贵而专业的，拥有自己的飞行器可望而不可即。无人机的出现给大多数非航空专业的人提供了一个选择，让飞行变得更简单，让每个人都能享受飞行的乐趣，让更多的行业都能把飞行器作为日常的生产工具。

无人机也叫“无人驾驶航空器”，与航空模型有很深的渊源，两者的区别在于飞控系统。通过飞控系统，无人机既可以手动操作飞行，也可以预设航线实现自主飞行，飞行范围可以超出视距之外。而航模没有飞控系统，仅能通过遥控器手动控制，并且始终要在视线范围内。最早的无人机出现于第一次世界大战期间，作为一种遥控军用飞行器出现；在海湾战争之后，无人机在军事方面的用途逐步被认识并开始得到广泛的应用；但无人机快速发展则是在民用市场，其技术爆发点是多旋翼无人机的流行。

多旋翼无人机是从2009年开始流行起来的，它结构简单、成本极低、操控容易，虽然起飞重量小、续航时间短，但已足够满足大部分非专业用户的需求，因此迅速获得了市场认可。在目前全球的民用无人机中，多旋翼结构约占97%。2012年，大疆创新推出了世界上第一款到手即飞（Ready to Fly）的四旋翼无人机“精灵”（Phantom）。在之后的几年，多旋翼无人机技术经历了快速迭代，市场容量从每年几千台增长到数百万台。在短短6年时间里，多旋翼无人机快速走过了四个发展阶段。

（1）航模阶段。这一阶段的无人机是传统航模产品的技术升级，在航模上集成飞控系统之后，能实现自主悬停、航点飞行、自动返航等功能，使操控难度下降，安全性上升，让更多用户能享受到飞行的乐趣。

（2）航拍阶段。将飞行和拍摄功能结合，通过将云台和相机小型化后装上无人机，使无人机在飞行过程中能拍出稳定的视频。增加了图传技术后，地面摄影师可以实时看到航拍图像，提升了拍摄体验。无人机作为一种航拍工具在专业摄影器材市场受到了追捧，快速横扫了直升机航拍市场。

（3）消费电子阶段。在航拍无人机的基础上，进一步缩小体积、降低价格，并通过集成机器视觉和人工智能技术，使无人机能实现避障、自动跟随、智能拍摄等功能，操控也更为简化。无人机作为一种消费电子产品迅速流行起来。

(4) 行业应用阶段。多旋翼无人机作为一种空中智能平台的潜力正在不断显现。最早采用无人机进行行业应用的是电力系统、公安系统等,近年来又逐步扩展到农业、影视、建筑、测绘等领域。目前普遍认为,行业应用级无人机的市场容量将超过消费级无人机,成为市场的主流方向。

通过对近年来的无人机产业进行技术和市场分析,我们可以看出,多旋翼无人机行业发展的总体趋势是大众化、小型化、智能化、产业化。

(1) 大众化。2010 年之前,一部航拍用多旋翼无人机售价超过 5 万元人民币,商用无人机的价格高达几十万甚至上百万。而现在,一台普通的多旋翼航拍无人机价格仅与一部手机相当,商用无人机的价格也普遍在 2 万~10 万元价格区间。无人机已经成为一种大众化的电子产品,无人机服务的价格也变得相当低廉。

(2) 小型化。多旋翼无人机的飞行平台、负载设备和操控设备都在迅速小型化。据初步统计,目前多旋翼无人机中,95% 的重量在 7 千克以下。主流消费级无人机的重量在三年时间里从 1500 克左右下降到不足 500 克,轴距也从 350 毫米减少到 170 毫米,并且核心功能还有显著提升。体积变小使得无人机的携带更为便利,能耗下降,飞行安全性提升,应用场景进一步拓宽。

(3) 智能化。多旋翼无人机依靠飞控系统来实时感知自身状态并控制动力输出。随着无人机集成的传感器不断增加,算法不断优化,无人机的智能化程度在不断提升,以往需要高超飞行技巧才能完成的动作现在已经可以自动完成。2016 年,大疆在精灵 4 代无人机中引入机器视觉技术,这就像给无人机装上了眼睛,在避障、跟随、返航等方面的功能越来越强大。

(4) 产业化。多旋翼无人机保有量的增长和应用领域的拓宽也带来了产业的纵深发展。在硬件方面,逐步出现了大量生产飞控、动力、通信和图传、导航设备、云台、相机、电池等的上游厂商,和生产各类负载设备的专业化厂家,行业标准逐渐形成。在软件方面,各种飞行控制软件、数据分析软件、运行管理软件等层出不穷。在下游,则出现了大量无人机服务企业,涵盖二次改装、设备维修、周边产品、保险、租赁、培训等。很多企业成立了无人机部门,通用航空企业也在积极研究进入无人机领域。

由此可见,无人机的发展历史,就是一个小众产品通过创新拓展使用场景、寻找更大市场的过程。无人机弥补了以往通用航空门槛高、成本高的不足,迅速发展成智能化空中平台并赋能各行各业,使得很多不具备航空作业条件的场合也可以采用无人机低空作业。特别是在高度不超过 500 米、飞行半径不超过 10 千米、以数据采集为目的的作业场景中,无人机有着巨大优势。经过对市场需求和技术趋势的分析,我们认为多旋翼无人机行业应用的发展将主要集中在以下几个领域:

(1) 农业。主要包括植保飞防和农田遥感。无人机植保飞防的效率是人工植保的 50 倍以上,而成本降低了一半。农田遥感能帮助规模化农业企业更好地获取农田的各类精准

数据,在欧美已经非常普遍,在国内也将大规模普及。

(2) 安防。主要指公安、交警、消防、救援等用户,通过无人机提供的低空平台进行侦查、监视、搜索、追踪、通信中继、应急物资运输、三维现场重现等作业。不仅可以提高效率,降低成本,还可以降低工作人员的风险,减少人身伤害,意义非常重大。

(3) 创意。无人机航拍已经基本取代有人机航拍,成为各种新闻媒体、影视拍摄的必备工具,各种无人机航拍公司也如雨后春笋般涌现,成为一个规模可观的产业。近年来,通过无人机集群控制技术进行空中表演的应用也快速流行起来。

(4) 巡检。无人机在能源设备、大型建筑、高速公路、桥梁等场所能够快速到达人所不易到达的地方并采集数据,降低人员风险和设备运维成本。通过应用地面站、精确导航、机器视觉、人工智能等技术,还可以大幅提升设施巡检的自动化程度,实现无人化巡检。

(5) 测绘。多旋翼无人机是一种极为理想的中小型航测工具,由于飞行高度低、飞行速度慢,所以航测精度高、效果好,通过地面站和云台的配合,不用安装昂贵的专业相机就可以实现三维建模,在建筑、安防、保险等行业用途非常广泛。

无人机产业的发展吸引了大量年轻、高素质的人才加入这个行业,据估计,包括研发、制造、运营、服务在内,无人机行业在我国带动了近十万人的新增就业,并且这个数字还在快速增加中。各类培训机构大量涌现,很多大专院校正在酝酿或已经开设了无人机专业。

早期的无人机培训模式是从通用航空飞行员和航模飞行的培训体系结合而来,主要的课程内容包括空气动力学、无线电、航空气象等航空理论知识,以及大量的飞四角、飞“8”字、姿态模式等航模飞行技巧训练,培训周期长达20~30天,费用低则1万~2万元,高则3万~5万元。

然而,这种高收费、高门槛的培训模式并不符合多旋翼无人机的实际应用场景,随着技术的不断进步,大部分无人机已经摒弃了手动或姿态飞行模式而转向智能飞行模式,操控一架小型多旋翼无人机并不比骑自行车更难。2016年6月21日,美国联邦航空局发布的107部小型无人驾驶航空器管理规则(Small Unmanned Aircraft Regulations)中,获得小型无人机驾驶员的资质仅要求通过航空基础知识理论考试即可。2018年1月,国家空管委发布了《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例(征求意见稿)》,其中第21条将无人机驾驶员培训分为“安全操作培训”和“行业培训”。其中“安全操作培训”包含航空法律法规、相关理论知识、基本操作和应急操作,轻型无人机(7千克以下)驾驶员只需要取得理论培训合格证,对实操能力不做要求。

中国和美国两个最大的无人机市场在驾驶员资质方面的规定已经趋向一致,即基本安全资质要降低,让更多的人可以进入到无人机行业中来,那种动辄上万的“基础操作培训”已经成为过去式,“行业培训”的重要性将逐步提升,成为无人机赋能各个行业的重

要部分。随着农业植保队、电网公司、公安部门等规模化用户逐步加入无人机应用的阵营，无人机在不同领域的应用已经明显出现了差异化。一个优秀的航拍飞手，未必是一个合格的农业植保无人机飞手；同样，一位经验丰富的电力巡线无人机飞手，未必能够掌握用无人机开展人员搜救或者建筑测绘的相关技术。未来的无人机培训将是“1+X”模式，也就是“基础理论+专业方向”的模式。对于普通消费者，只要学习基本的理论知识即可；对于职业化无人机飞手，则需要额外进行行业培训。如农业植保无人机驾驶员，需要掌握一定的农药、气象、虫害方面的知识，需要具备快速测量地块的能力，并掌握农业植保中特有的飞行操控技能；电力行业的无人机飞手，需要掌握在电磁干扰环境下飞行的技术，以及红外测温、故障检测等技能。

2016年6月，中国航空运输协会通航分会、中国成人教育协会航空服务专业委员会和大疆创新共同成立了无人机应用技术培训中心（Unmanned Aerial Systems Training Center, UTC）。UTC是一个全球性的专业化无人机飞手的培训和认证中心，通过研究无人机行业应用技术，开发无人机在各个行业的培训方式和认证标准。这是一套完全为无人机行业应用制定的标准，涉及无人机相关的航空知识、基本操作技巧和行业应用技能，课程针对性高，培训时间适中。UTC针对有志于投身无人机事业的人员，不提供入门课程，而是要求学员选择一个专业方向进行学习和考核。相比于航模操作，UTC更注重学员对无人机作业全过程的把握，要做到“飞行前会计划，飞行中能操作，飞行后能保养”，注重培养实际解决问题、完成任务的能力。UTC对飞行场地有很高的要求，不仅制作了一大批模拟教具，还开发了相应的专业化模拟器，使学员可以进行电力、警用、巡检等具体场景下的模拟训练。

深圳市慧飞教育有限公司是大疆的子公司，致力于推广基于UTC标准的无人机培训体系。两年以来，慧飞累计培训了1万多名无人机专业飞手，在大中华地区拥有超过150个培训点，700多位认证无人机教员，已经成为全球最大的专业无人机培训机构。现在，平均每天都有60多位无人机飞手在遍布大中华地区的无人机培训学校毕业，他们中的70%成为无人机从业人员或无人机的重度用户。

经过两年多的教学实践，大疆慧飞教员团队在持续的教学实践和与行业的技术交流过程中，不断完善内部教学材料；同时，充分吸收了大疆创新强大的技术精华，聘请了民航、公安、电力、测绘、影视等领域的多位专家作为顾问，编写了这套“大疆慧飞无人机应用技术系列丛书”。我们希望向各位读者展示最实用的无人机应用技术，使读者理解无人机在具体应用中的运行逻辑，懂得相关软硬件的配合，做好飞行前的准备以及飞行后的维护，不去花费无谓的金钱和时间学习华而不实的飞行动作，而是了解到能够提升效率、增加产出的实际使用经验。慧飞团队选取了目前多旋翼无人机应用最为广泛的植保、巡检、安防、影视四个领域，分别编撰了四本图书。同时，考虑到大部分无人机用户的航空知识都相对有限，我们还邀请民航专家编写了《无人机应用基础》，向读者深入浅出地

介绍了无人机飞行中需要了解的基本航空知识、法律法规和无人机基础技术。

在本套丛书的编写过程中，我们得到了来自多方面的支持，包括中国民航大学、广州民航职业技术学院、中国农业大学、中国人民公安大学等高等院校，中国航空运输协会通用航空分会、广东省通用航空协会、广东省无人机协会等行业协会，以及国家电网、南方电网、大疆传媒等公司的业内专家。本套丛书可以作为各类大专院校和培训学校开展无人机教育培训的教学用书，也可以供有志于从事无人机行业的人员自学使用。丛书既可以单独使用，也可以配合慧飞官网（www.uastc.com）的在线课程和培训点的实操课程共同使用。希望我们的丛书可以给广大读者了解无人机带来一个全新的视角。

无人机还是一个快速迭代的产业，每过一两年，产品技术和运行理念都会有很大的提升，相关的法律法规也处在快速发展过程中，这些都会对培训课程产生影响。由于编者水平有限，书中难免会有不当之处，请各位读者谅解，并欢迎和我们联系，我们将不胜感激。

徐华滨

2018年6月，深圳

前言

近几年，民用无人机已经走进我们生活的各个领域，给人们生活、生产活动带来极大便利，也给许多行业的生产形式带来颠覆性的改变，其应用渗透到工业、农业和交通运输等众多领域。

随着民用无人机的广泛应用，众多行业开始把无人机作为生产工具。来自不同行业的无人机操作者不但需要掌握无人机的操作技能、行业应用技能，还需要了解无人机应用管理的法律法规。广州民航职业技术学院是中国民航局直属院校和国家示范院校，和大疆慧飞合作共建无人机应用人才培养基地项目，旨在通过校企合作，把大疆无人机行业应用技能引入高等职业教育；和大疆慧飞共同组织编写无人机应用技术系列丛书，以满足行业应用培训需求和无人机高等教育专业建设需求。《无人机应用基础》作为无人机的入门图书，将帮助未来从业者系统了解无人机应用的相关知识。本书深入浅出地介绍了无人机的概念、基本原理、基本应用以及无人机的管控和安全飞行的法律法规，适合作为无人机技能培训配套教材、无人机专业基础教材和无人机爱好者自学教材。

本教材由罗亮生编写第一章、第三章、第五章和第六章，并对全书进行统稿，由张力平编写第二章、第四章。蒋军、王芳丽和张军参加了全书的编写工作。全书由罗亮生、徐华滨编写大纲，由徐华滨进行补充、审定。

本书是“大疆慧飞无人机应用技术系列丛书”之一，得到了大疆慧飞的鼎力支持，在此对大疆慧飞的徐华滨、孙嘉栋、江亚东表示衷心感谢。

本书在编写过程中，还得到了南京航空航天大学童明波教授、民航中南地区管理局飞标处张军的大力支持和帮助，在此表示由衷的感谢。

本书在编写过程中，参考了大量国内外有关资料，由于篇幅有限，未能一一列出，在此对这些资料作者表示由衷的感谢。

由于编写水平有限及时间仓促，本书的不足之处恳请大家批评指正。

编者

2018年8月

目 录

总序	
前言	
第 1 章 无人机概述	1
1.1 无人机基本知识	1
1.2 无人机的分类	4
1.3 无人机应用	13
第 2 章 无人机系统	28
2.1 概述	28
2.2 飞行器	28
2.3 有效载荷	37
2.4 地面站	39
2.5 发射和回收装置	40
2.6 数据链	41
2.7 地面保障设备	42
第 3 章 无人机飞行原理	43
3.1 大气层的基本性质	43
3.2 空气动力学基础	50
3.3 固定翼飞行原理	59
3.4 旋翼飞行原理	65
第 4 章 无人机飞行控制	69
4.1 稳定与控制	69
4.2 任务规划概念与实施	80
4.3 导航	85

第 5 章 空中交通管理 91

5.1 概述..... 91

5.2 空中交通管制的组成..... 92

5.3 空域..... 95

5.4 机场、起降场..... 98

第 6 章 无人机法规与安全飞行..... 100

6.1 无人机飞行法规 100

6.2 无人机飞行管理 113

6.3 无人机飞行限制 115

6.4 无人机飞行安全注意事项 118

附录 1 《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例（征求意见稿）》 122

附录 2 《民用无人驾驶航空器经营性飞行活动管理办法（暂行）》 132

附录 3 《民用无人驾驶航空器实名制登记管理规定》 135

附录 4 《民用无人驾驶航空器系统空中交通管理办法》 138

附录 5 《民用无人机驾驶员管理规定》 143

附录 6 《广东省民用无人驾驶航空器治安管理办法（送审稿）》 180

参考文献..... 184

第 1 章 无人机概述

1.1 无人机基本知识

1.1.1 无人机的相关概念

无人机 (Unmanned Aircraft, UA) 是由控制站管理 (包括远程操纵或自主飞行) 的航空器, 也称远程驾驶航空器 (Remotely Piloted Aircraft, RPA), 英文也常用缩写 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)。一般所说的无人机是无人驾驶飞机的简称, 但也有飞行自动控制、搭载乘客的无人机, 采用无人机的多旋翼结构进行载人飞行。

无人机系统 (Unmanned Aircraft System, UAS) 也称远程驾驶航空器系统 (Remotely Piloted Aircraft Systems, RPAS), 是指无人机、相关控制站、所需指令与控制数据链路以及批准型号设计规定的任何其他部件组成的系统。

无人机驾驶员, 是指由运营人指派的对无人机的运行负有必不可少职责的并在飞行期间适时操纵飞行的人。

1.1.2 无人机的发展历程

“无人机”一词最早是在军事中使用, 在近代局部军事冲突中无人机被广泛使用。纵观无人机系统的发展史, 军事应用总是在起推动作用, 在很多技术领域都具有类似的发展趋势, 一旦完成在军事斗争领域的开发和测试, 非军事应用就会紧随而来。

军用无人机技术在 20 世纪末经历了三次发展浪潮, 才真正进入了第一个黄金时代:

(1) 1990 年后, 全球共有 30 多个国家装备了师级 (大型) 战术无人机系统, 代表机型有美国“猎人”、“先驱者”、“捕食者” (见图 1.1), 以色列“侦察兵” (见图 1.2)、“先锋” (见图 1.3) 等。

(2) 1993 年后, 中空长航时军用无人机得到迅速发展, 以美国“蒂尔”无人机发展计划为代表, 在“波黑战争”中表现出强大的功能。

(3) 20 世纪末, 旅团级 (中小型) 固定翼和旋翼战术无人机系统出现, 其体积小、价格低、机动性好, 标志着无人机进入大规模应用时代。



图 1.1 正在执行飞行训练任务的武装型 MQ-1 “捕食者”。MQ-1 用于武装侦察、空中监视和目标获取，可以携带两枚激光制导导弹和两名飞行员



图 1.2 以色列飞机工业公司制造的“侦察兵”无人机



图 1.3 在“沙漠盾牌”行动中准备发射的 RQ-2 “先锋”无人机

我国在无人机项目上起步虽然较晚，但近几年来发展迅速，涌现出多个型号的军用无人机，与世界顶尖水平的差距正在拉近。如我国自主研发的“翼龙”无人机（如图 1.4 所示），外形和尺寸与美国“捕食者”无人机相似，部分性能指标达到“捕食者”水平，还有部分性能仍需改进。据媒体报道，我国军用无人机还外销沙特等多个国家，这也表明了国际社会对我国无人机发展水平的高度认可。



图 1.4 “翼龙”无人机

随着航空技术的飞速发展，无人机的用途更加广泛，发展到了民用化的进程。我国民用无人机发展经历了四个阶段。第一阶段：我国于 1980 年研制了国内第一架民用无人机 D-4，主要用于矿产资源探测和航空测绘；第二阶段：20 世纪 90 年代起我国民营企业开始研发无人机，研制出一些低端产品，不具有进入市场和量产的能力；第三阶段：2007 年起我国开始大力发展民用无人机，众多军工企业和民营企业开启无人机项目，取得了一些成果，其中，长航时民用无人机“黔中 1 号”成功首飞是成果的代表之一；第四阶段：无人机进入大众视野，大疆等品牌的消费级无人机发展迅速，多种型号的消费级无人机可用于航拍、影视拍摄和娱乐。

近年来，新型无人机和相机技术结合，极大地推动了消费级无人机市场的发展，尤其是大疆的精灵系列四旋翼飞行器（如图 1.5 所示）的问世，将无人机与云台相机结合起来，引发了世界范围内航拍领域的重大变革，为无人机航拍领域开启了无限的可能。



图 1.5 美国纽约当地时间 2016 年 3 月 1 日，大疆举办新品发布会，宣布推出新一代消费级航拍无人机——大疆精灵 4