

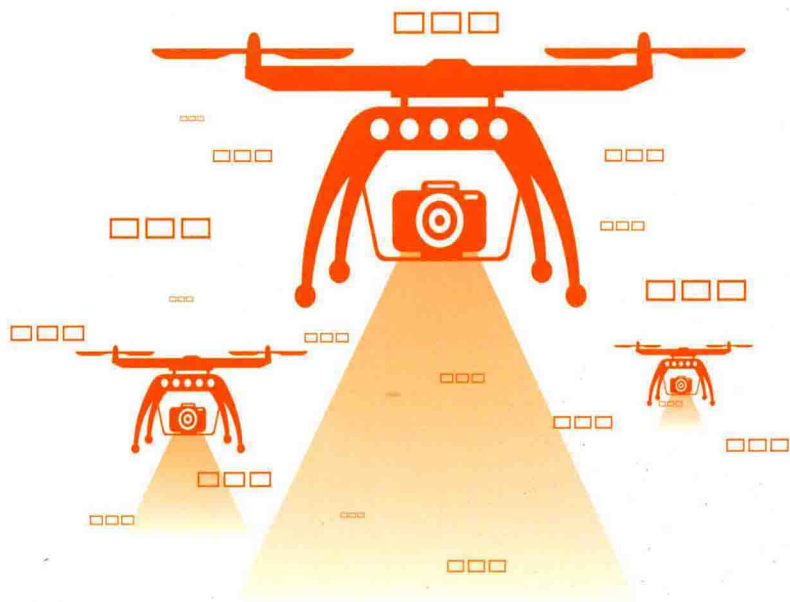


普通高等教育创新型人才培养规划教材

# 多旋翼无人机设计

陈 阳 梁建宏 编著

DUOXUANYI WURENJI SHEJI



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育

教材

# 多旋翼无人机设计

陈 阳 梁建宏 编著



北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书从介绍多旋翼无人机各子系统的组成出发,结合理论知识设置了多个实验测试环节,包含机身机械结构子系统、电机/螺旋桨子系统、电源子系统、传感器子系统、控制子系统等主要系统模块。本书旨在帮助学生进行基于模块化的子系统学习以掌握多旋翼无人机设计中的关键技术及方法,并最终具备形成飞行器总系统的能力。本书具有基础性、实践性、系统性等特点。

本书可作为高年级本科生教材,还可作为该领域研究的入门指南,亦可作为多旋翼飞行器工程师的自学教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

多旋翼无人机设计 / 陈阳,梁建宏编著. -- 北京 :  
北京航空航天大学出版社,2018.5

ISBN 978-7-5124-2703-7

I. ①多… II. ①陈… ②梁… III. ①无人驾驶飞机  
—设计 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 088506 号

版权所有,侵权必究。

### 多旋翼无人机设计

陈 阳 梁建宏 编著

责任编辑 孙兴芳

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

保定市中国画美凯印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:9.75 字数:250千字

2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-5124-2703-7 定价:35.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

# 前 言

目前,无人机在公共安全、消费等领域得到越来越广泛的应用,并且作为一种智能设备,其将在农业植保、国土监测、企业服务等领域得到越来越多的关注。然而,由于无人机开发具有一定的技术门槛,仅有少数一些院校能够进行与无人机相关的科学研究活动,对于具有电子、信息、控制等专业的众多院校而言,其进行无人机平台开发具有一定的难度。鉴于此,我们希望能够推出一套无人机专业课程建设方案,以期推动无人机教学在各大高校的普及,进而促进无人机在应用领域的发展。

从航空飞行器的发展历程来看,按照产生升力原理的不同,航空飞行器主要分为轻于空气的航空飞行器和重于空气的航空飞行器两大类。前者靠空气静浮力升空,包括气球、飞艇等;后者靠空气动力克服重力升空,包括固定翼飞行器、旋翼飞行器及扑翼飞行器。其中,固定翼飞行器续航时间最长、飞行效率最高、载荷最大,但它需要助跑起飞,降落时必须滑行;扑翼飞行器更多的是从仿生角度模仿鸟类的飞行;旋翼飞行器虽然不具备固定翼飞行器足够长的续航时间,但它垂直起降的优点适合场地有限的飞行,相较于固定翼飞行器,旋翼飞行器更适用于无人机专业建设,利于实验实训的开展。

就旋翼飞行器而言,可分为单旋翼飞行器和多旋翼飞行器两种。其中,单旋翼飞行器主要是我们常见的直升机,此种飞行器机械结构复杂,维护较为困难;多旋翼飞行器主要有三旋翼、四旋翼、六旋翼、八旋翼等。多旋翼飞行器由于其结构紧凑,2005—2013年期间,国内外许多高校、企业等的科研团队针对多旋翼的自主飞行控制进行了深入研究,证明其相较于单旋翼飞行器具有更好的安全性与操作性,并且可控性好。

自2013年起,多旋翼飞行器在消费级市场迎来了爆发式发展,目前在消费级无人飞行器市场占据了很大的份额,国内包括大疆、极飞、零度智控、科比特、亿航等从事无人机研发生产的厂商在该领域做了大量的工作,对推动我国多旋翼飞行器的发展做出了突出的贡献。

多旋翼飞行器的使用者主要有两类:第一类是单纯的任务载荷使用者,主要是直接基于前述厂商提供的多旋翼飞行器平台实现航拍、植保、监控等任务;第二类是包括本专科院校师生在内的极客与爱好者,利用前述厂商提供的机械、动力配件,结合自身在飞行器导航、制导与控制方面的兴趣,自己动手制作多旋翼飞行器。对于第一类使用者,主要是向其提供一套使用便捷的飞行器系统;对于第二类使用者,则涉及包括机械、动力、电子、控制、软件等多学科的设计与测试。

综上所述,选用多旋翼飞行器作为无人机专业的切入点具有理论与市场基础。

从逆向设计来看,多旋翼无人机的设计主要包括系统的总体方案设计及各子系统的详细

设计。总体方案设计主要是对需求分析进行学科专业分解,形成各个子系统方案,而后针对子系统进行详细设计。多旋翼无人机系统可分解为如下子系统:机身机械结构子系统、电机/螺旋桨子系统、电源子系统、传感器子系统、控制子系统、数据链路子系统。就开设无人机专业课程而言,可以从介绍多旋翼无人机子系统出发,结合理论知识设置各个子系统的实验测试环节,帮助学生基于模块化建立起多旋翼无人机设计中关键技术的认知及解决方法,最终形成飞行器总系统。

全书内容如下:

第1章 无人机概述:主要讲述无人机、多旋翼无人机的概念;重点是帮助学生建立起多旋翼无人机的基本概念并确立总体设计原则,使其能够对多旋翼无人机的性能进行分析评价。

第2章 多旋翼无人机的机械结构:主要讲述多旋翼无人机结构设计的要求及材料选择,振动的来源及减振措施;重点是帮助学生确立结构设计的原则以及选择减振方法。

第3章 多旋翼无人机动力系统:主要讲述不同的动力电池、无刷电机、螺旋桨,并进行动力系统建模;重点是帮助学生认识不同类型电池的特性,掌握无刷电机的参数及螺旋桨升力、扭矩参数的测试及动力系统建模方法。

第4章 多旋翼无人机传感系统:主要讲述无人机导航需要的加速度计、陀螺仪、磁强计、GPS接收机、气压高度计、超声测距与光流测速等传感器的原理与使用,并介绍组合导航算法;重点是帮助学生理解并掌握不同传感器的使用方法及工程注意事项。

第5章 多旋翼无人机飞行控制系统:主要讲述多旋翼无人机动力学建模、参数辨识、姿态稳定控制方法设计及仿真;重点是帮助学生掌握飞行控制的基本规律及现有自驾仪的参数调整方法。

第6章 多旋翼无人机的发展与展望:主要讲述多旋翼无人机的先进控制方法及视觉导航发展;重点是帮助学生跟踪未来发展趋势。

本书由陈阳、梁建宏编著,其中,第1、2、6章由梁建宏编写,第3、4、5章及附录由陈阳编写。北京博创尚和科技有限公司在测试平台上给予了很大的支持,在此表示衷心的感谢!

本书涉及工程领域的多个学科,由于作者水平有限,错漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。关于本书的任何建议和疑问,请读者与作者联系,联系方式:chenyang4117@163.com。

作者

2018年3月

# 目 录

第 1 章 无人机概述	1
1.1 无人机的概念	1
1.1.1 飞行器的定义和分类	1
1.1.2 无人机的定义	3
1.2 多旋翼无人机的发展历程	5
1.3 典型多旋翼产品及其参数分析	7
1.4 多旋翼无人机系统的总体设计原则	9
1.5 实训一：多旋翼无人机参数对比调研分析	12
思维训练	12
第 2 章 多旋翼无人机的机械结构	13
2.1 无人机机身结构	13
2.1.1 无人机结构的一般要求	14
2.1.2 无人机机身结构所采用的主要材料	15
2.1.3 机臂结构与刚度	17
2.1.4 实训二：机臂的材料与尺寸选择	21
2.1.5 机舱及起落架的结构	24
2.2 飞行器机身减振	26
2.2.1 多旋翼无人机的振动源	27
2.2.2 自驾仪的减振措施	30
2.2.3 实训三：螺旋桨的静平衡及减振垫的选择	36
2.2.4 实训四：传感数据的频谱分析及数字滤波器设计	41
2.3 多旋翼无人机的惯量	42
2.3.1 重心	42
2.3.2 惯性矩及惯性积	43
2.3.3 实训五：多旋翼无人机的 CAD 设计	43
思维训练	44
第 3 章 多旋翼无人机动力系统	45
3.1 概 述	45
3.2 电 池	47
3.2.1 常见的二次电池	47
3.2.2 锂电池的使用	50

3.2.3 实训六：常见电池接口的识别及锂聚合物电池的充放电测试	51
3.3 螺旋桨	53
3.3.1 螺旋桨产生的力及力矩	53
3.3.2 多旋翼无人机常见的螺旋桨	55
3.3.3 实训七：螺旋桨升力、扭矩参数测试	58
3.4 无刷电机与电调	61
3.4.1 无刷直流电机的参数	61
3.4.2 外转子无刷直流电机的工作原理	63
3.4.3 电调	64
3.4.4 实训八：电机与螺旋桨的匹配测试实验	67
思维训练	68
<b>第4章 多旋翼无人机传感系统</b>	<b>69</b>
4.1 概述	69
4.2 惯性测量传感器	71
4.2.1 MEMS陀螺仪	72
4.2.2 MEMS加速度计	74
4.2.3 实训九：陀螺仪、加速度计数据的基本使用	78
4.3 磁强计	79
4.3.1 地磁场	79
4.3.2 三轴磁强计	80
4.3.3 实训十：三轴磁强计的校准与航向测量	85
4.4 位置速度测量传感器	86
4.4.1 GPS接收机模块	86
4.4.2 气压高度计	90
4.4.3 超声波测距模块	94
4.4.4 激光测距模块	96
4.4.5 光流测速模块	98
4.5 传感器数据的融合	100
4.5.1 AHRS航姿参考系统	100
4.5.2 GPS/INS组合导航	105
4.5.3 实训十一：AHRS算法实践实验	105
思维训练	106
<b>第5章 多旋翼无人机飞行控制系统</b>	<b>107</b>
5.1 概述	107
5.2 多旋翼无人机的控制原理	108
5.3 多旋翼无人机的动力学建模	113
实训十二：多旋翼无人机非线性系统建模	119

5.4 基于系统简化模型的多旋翼无人机飞行控制系统设计.....	120
5.4.1 四旋翼无人机 QUAD X 形布局的系统模型简化 .....	120
5.4.2 四旋翼无人机 QUAD X 形布局的 PID 控制器设计 .....	121
5.4.3 PID 控制器参数的选择 .....	124
5.4.4 实训十三：多旋翼无人机 PID 控制仿真 .....	129
思维训练.....	130
<b>第 6 章 多旋翼无人机的发展与展望</b> .....	131
6.1 多旋翼无人机“硬件”的发展 .....	131
6.2 多旋翼无人机“智能化”的发展 .....	132
思维训练.....	136
<b>附录 考虑旋翼挥舞运动的四旋翼无人机模型 M 文件</b> .....	137
<b>参考文献</b> .....	144

## 1.1.1 飞行器的定义和分类

飞行器是在大气层内或大气层外空间(太空)飞行的器械,可分为 manned aircraft 和 unmanned aircraft 两大类,前者即有人驾驶飞机,后者即无人驾驶飞机。

### 1. 按用途

飞行器按其用途可分为军用和民用两大类,军用飞行器包括战斗机、轰炸机、歼击机、侦察机、预警机、加油机、运输机、教练机等,民用飞行器包括民用运输机、通用航空器、无人机等。按用途不同,飞行器的性能要求也不同,例如战斗机要求机动性强、速度快、隐身性能好,而民用运输机则要求载重大、航程远、安全可靠。

### 2. 按升力

在空中飞行的飞行器可分为有人驾驶飞机、无人驾驶飞机、空间飞行器、航天飞机等。它们在大气层内或空间飞行,依靠空气动力作用完成轨道运动。有人驾驶飞机是传统飞行器,无人驾驶飞机是现代飞行器,空间飞行器是航天飞行器,航天飞机是介于有人驾驶飞机和空间飞行器之间的飞行器。

### 3. 按动力

飞行器按其动力装置可分为有人驾驶飞机、无人驾驶飞机、空间飞行器、航天飞机等。它们在大气层内或空间飞行,依靠空气动力作用完成轨道运动。有人驾驶飞机是传统飞行器,无人驾驶飞机是现代飞行器,空间飞行器是航天飞行器,航天飞机是介于有人驾驶飞机和空间飞行器之间的飞行器。

### 4. 按速度

飞行器按其速度可分为有人驾驶飞机、无人驾驶飞机、空间飞行器、航天飞机等。它们在大气层内或空间飞行,依靠空气动力作用完成轨道运动。有人驾驶飞机是传统飞行器,无人驾驶飞机是现代飞行器,空间飞行器是航天飞行器,航天飞机是介于有人驾驶飞机和空间飞行器之间的飞行器。



# 第1章 无人机概述

**引言:**近年来,以四轴无人机为代表的消费级无人机越来越多地融入了人们的生活,从全球消费电子展(CES)到国内各式各样的无人机展会,从线上航模店铺、无人机专营店到线下玩具店里,都有各式各样的无人机及其周边产品;从少年儿童手上的无人机玩具到专业无人机驾驶员操纵的各型无人机,从学生竞赛DIY的四旋翼无人机到企业生产的专业级无人机,从森林防火监测到大面积农业植保喷药等诸多领域,都能见到其飒爽英姿。那么,以四轴无人机为代表的无人机与传统的飞机有什么区别?其到底有一个怎样的发展历程?本章将从飞行器的基本定义出发,阐述四轴飞行器等无人机的基本概念。

## 1.1 无人机的概念

### 1.1.1 飞行器的定义和分类

飞行器是在大气层内或大气层外空间(太空)飞行的器械,其可分为5类:航空器、航天器、火箭、导弹和制导武器。

#### 1. 航空器

在大气层内飞行的飞行器称为航空器,如气球、滑翔机、飞艇、飞机、直升机等,它们靠空气的静浮力或空气相对运动产生的空气动力升空飞行。根据产生向上力的基本原理的不同,航空器可划分为两大类:一类是轻于空气的航空器,靠空气静浮力升空,主要有气球、飞艇;另一类是重于空气的航空器,靠空气动力克服自身重力升空,主要有各式各样的固定翼飞机、旋翼飞机、扑翼机等。图1.1所示为6种常见的航空器,有热气球、飞艇、直升机、战斗机、民航客机及滑翔机。

#### 2. 航天器

在太空飞行的飞行器称为航天器,如人造地球卫星、载人飞船、空间探测器、航天飞机等,它们在运载火箭的推动下获得必要的速度进入太空,然后在引力作用下完成轨道运动。图1.2所示为人造卫星、载人飞船和航天飞机。

#### 3. 火箭

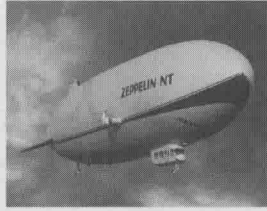
火箭是一种自身既带有燃料,又带有助燃用的氧化剂,用火箭发动机作动力装置的飞行器,可以在大气层内飞行,也可以在大气层外飞行。现代火箭可用作快速远距离运送工具,如作为探空、空间站的运载工具,以及其他飞行器的助推器等。图1.3所示为发射中的我国CZ-2F运载火箭。

#### 4. 导弹

导弹是一种依靠制导系统来控制飞行轨迹的可以指定攻击目标,甚至追踪目标动向的无



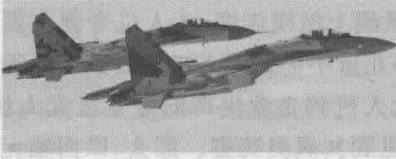
(a) 热气球



(b) 飞艇



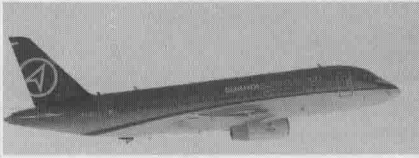
(c) 直升机



(d) 战斗机

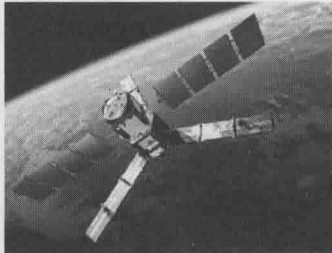


(f) 滑翔机

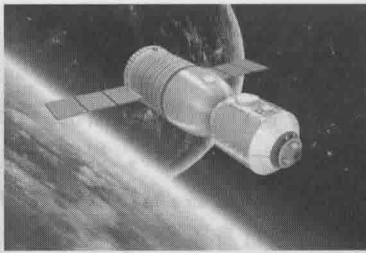


(e) 民航客机

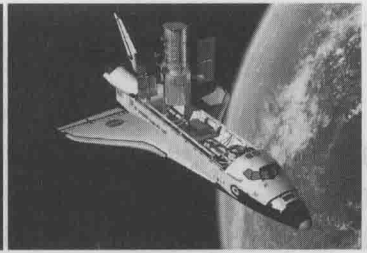
图 1.1 6 种常见的航空器



(a) 人造卫星



(b) 载人飞船



(c) 航天飞机

图 1.2 人造卫星、载人飞船和航天飞机

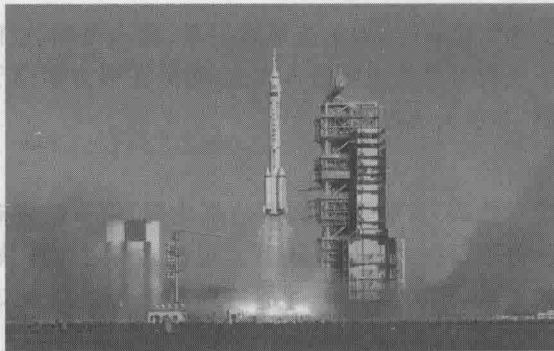


图 1.3 发射中的我国 CZ-2F 运载火箭

人驾驶武器,其任务是把战斗部装药在打击目标附近引爆并毁伤目标,或在没有战斗部的情况下依靠自身动能直接撞击目标以达到毁伤效果。其主要在大气层外飞行的弹道导弹,以及装有翼面在大气层内飞行的空空导弹、地空导弹、巡航导弹等。图 1.4 所示为发射中的空空导弹模拟图。



图 1.4 发射中的空空导弹模拟图

## 5. 制导武器

制导武器是以微电子、电子计算机和光电转换技术为核心的,以自动化技术为基础发展起来的高新技术武器,它是按一定规律控制武器的飞行方向、姿态、高度和速度,引导战斗部准确攻击目标的各类武器的统称,如末敏弹、制导炸弹等。图 1.5 所示为某型激光制导炸弹,与常规炸弹相比,气动布局增加了飞翼,炸弹前增加了激光制导装置。



图 1.5 某型激光制导炸弹

## 1.1.2 无人机的定义

无人机(Unmanned Aerial Vehicle)就是利用无线遥控或程序控制来执行特定航空任务的飞行器,是一种不搭载操作人员的动力空中飞行器。其采用空气动力为飞行器提供所需的升力,能够自动飞行或远程引导,既能一次性使用也能进行回收,能够携带致命性和非致命性有效负载。

无人机系统种类繁多、用途广、特点鲜明,使其在尺寸、质量、航程、航时、飞行高度、飞行速度、任务等多方面都有较大差异。由于无人机的多样性,出于不同的考量会有不同的分类方法,具体如下:

- ① 按飞行平台构型分,无人机可分为固定翼无人机、旋翼无人机、无人飞艇、伞翼无人机、扑翼无人机;
- ② 按用途分,无人机可分为军用无人机和民用无人机;
- ③ 按尺寸分,无人机可分为微型无人机、小型无人机、中型无人机以及大型无人机;
- ④ 按活动半径分,无人机可分为超近程无人机、近程无人机、短程无人机、中程无人机和远程无人机;
- ⑤ 按任务高度分,无人机可以分为超低空无人机、低空无人机、中空无人机、高空无人机和超高空无人机。

具体分类指标如图 1.6 所示。

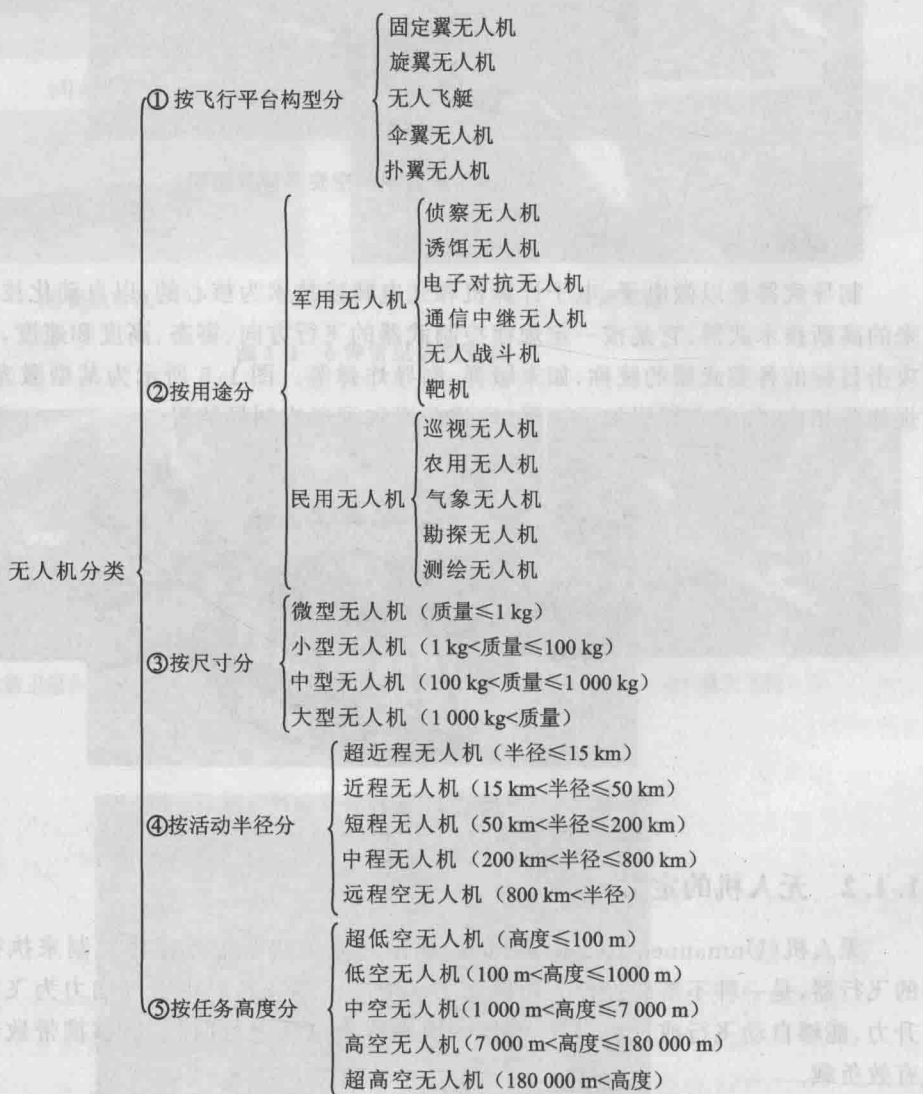


图 1.6 无人机分类

## 1.2 多旋翼无人机的发展历程

多轴飞行器的概念几十年前就已经出现,但是因为同时期的技术水平有限,大型四轴飞行器的制造难度很高,性价比远远低于固定翼飞行器和直升机飞行器,因此历史上人们更多关注固定翼飞行器和直升机飞行器的研发,相对地,多旋翼飞行器的发展较缓慢;2002年前后,随着微机电系统(MEMS)的成熟,以及电池和无刷电机等技术的发展,电动微型(直径小于1 m,质量小于2 kg)四轴无人机被发现是一种效率极高的飞行器,引起了学术界极大的关注;2005年之后,小型四轴无人机的研究日趋成熟,一些商用产品开始面世。

国外比较著名的研究例子有:

① 瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL)于2003年开始研发的OS4微型四轴无人机,主要是进行了机构设计和自主飞行控制算法研究,至2004年,已经分别基于多种控制算法(如PID、LQ、Backstepping、Sliding-mode)实现了飞行器姿态控制。OS4 II的机身最大长度为72 cm,重520 g,机载230 g的锂电池能提供自主飞行30 min的能量。它与OS4 I的区别主要有:使用了桨叶面积更大的新旋翼;使用了更轻、功率更大的LPK无刷电机BLDC;使用皮带减速装置代替了电机减速箱;控制器、传感器、电池和电机驱动模块等都直接安装在机体上,不再由机体外部提供。2006年1月,EPFL已经实现了OS4 II在室内环境中基于惯导的自主悬停控制;2013年,EPFL教授Raffaello D'Andrea的团队在TED展示了其四旋翼无人机。EPFL研究的OS4 I、OS4 II及最新四轴无人机如图1.7所示。

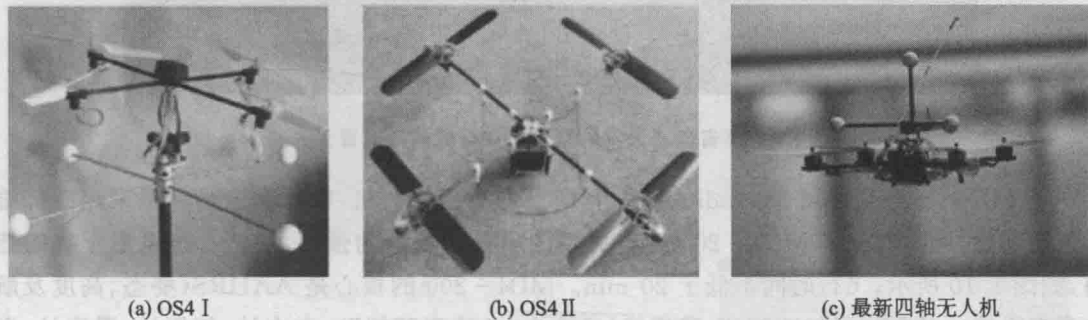


图 1.7 EPFL 研究的 OS4 I、OS4 II 及最新四轴无人机

② GRASP 实验室设计了一种能够在室内飞行的四旋翼无人机 HMX4(见图 1.8),这种飞行器通过室内的红外光辅助惯性测量单元进行姿态检测,能够在室内实现稳定飞行、翻转、避障、目标识别和着陆等功能,具有极强的控制稳定性和鲁棒性。另外,该实验室还完成了多飞行器协同工作,室内飞行器定位与 3D 建图,图像视觉与目标识别以及一些极端条件下的飞行实验。2012 年,Vijay Kumar 教授在 TED 展示了其四旋翼无人机,一场充满数学公式的演讲吸引了来自全世界的科技爱好者,并引爆了全球多旋翼无人机市场。

③ 麻省理工大学的 Abraham Bachrach、Nicholas Roy 等人设计了一种能够完成室内定位、建图和避障的四旋翼无人机(见图 1.9),该飞行器通过激光雷达获得周围的环境信息,并通过 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)算法进行飞行器室内定位,建立环境的 3D 地图,根据环境信息进行障碍物判断和路径规划,进而在室内无法接收到 GPS 信号的情况

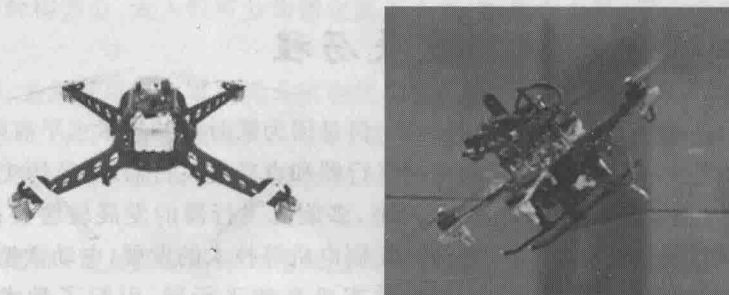


图 1.8 GRASP 实验室设计的室内飞行的四旋翼无人机 HMX4

下能够自主飞行,并能够实现避障等功能。

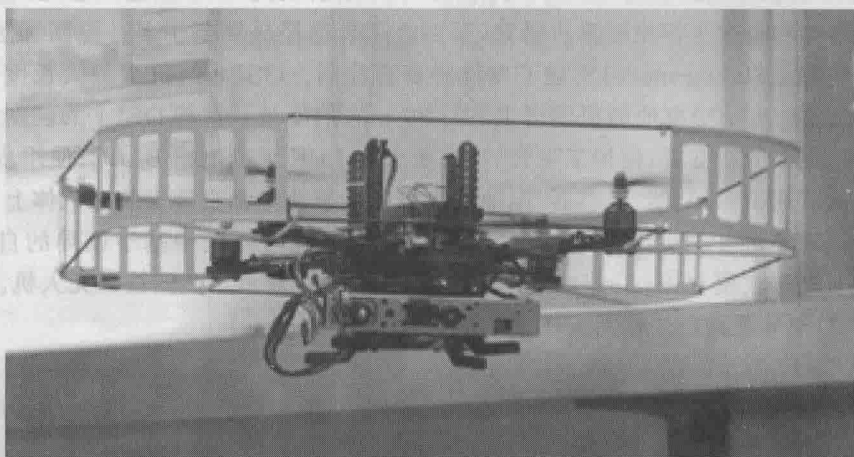


图 1.9 麻省理工大学的基于视觉导航的四旋翼无人机

④ MD4-200 是德国 Microdrones 公司研发的微型无人机,机体和云台完全采用碳纤维材料制造,这种材料使得 MD4-200 拥有更小的质量和更高的强度,并具有抗电磁干扰的能力,如图 1.10 所示,飞行时间不低于 20 min。MD4-200 的核心是 AAHRS(姿态、高度及航向参考系统),其集成了加速度计、陀螺仪(又称为“角速率陀螺”)、磁力计、气压计、湿度计、温度计等多种高精度传感器和卓越的控制算法,因而使得 MD4-200 的操控变得非常简单。用户可制定飞行航线规划,让飞行器按照预设的航线自动飞行。用户通过采用选配的 GPS 系统能够实现空间位置锁定与自动航点导航功能,还可以选择以 MicroSD 卡作为记录器的飞行记录仪来实时记录和分析飞行数据,所有重要的飞行数据都可以下载到数据中心,包括电池状态、高度、姿态、位置、飞行时间等,用于航后的数据分析。MD4-200 还具有安全保护措施以避免坠毁,它能够在电量不足和失去控制信号的情况下自主降落。

⑤ AR. Drone 四旋翼无人机是法国 Parrot 公司开发的一款飞行器(见图 1.11),其类似于一款无人驾驶直升机,拥有 4 个独立旋翼,操作员可以使用 iPad、iPhone 和 iPod Touch 上的软件对其进行飞行控制操作。由于整个飞行器的操作都是基于其自身发出的 WiFi 信号,因此操控距离可达 50 m。该飞行器的下方还加装有重力感应装置、陀螺仪、机械控制芯片等部件,利用智能飞行技术可以纠正风力和其他环境误差,平衡其飞行速度和角度。这款飞行器的驾

驾驶舱前部安装有一个摄像头,可以将第一人称视角的画面通过 WiFi 信号传回 iPad(或 iPhone、iPod Touch),这样就能在 iPad 上看到逼真的模拟驾驶舱画面。同时,Parrot 公司还提供 SDK,游戏开发者可针对该产品设计开发虚拟空战游戏。



图 1.10 MD4-200 四旋翼无人机



图 1.11 AR Drone 四旋翼无人机

国内四旋翼发展方面,最开始主要是国防科技大学在 2004 年进行了比较深入的理论建模到实践的研究。其他如北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、西北工业大学等也相继在相关理论方面进行了研究。但真正将四旋翼推向市场,引爆人们热情的推手是大疆科技公司,其于 2012 年 12 月份推出了精灵 1 四轴无人机,并且后续推出的精灵系列无人机快速成为许多航拍爱好者的选择。此后,如极飞、亿航、零度智控等多家中国无人机企业也进行了四旋翼、六旋翼、八旋翼等多轴旋翼无人机的研发及产业化推广。图 1.12 所示为国内厂商研发生产的一些多旋翼无人机产品。



(a) 大疆精灵4



(b) 大疆S800



(c) 大疆M600



(d) 大疆MG-1



(e) 极飞 P20V2



(f) 亿航184

图 1.12 国内的一些多旋翼无人机产品

### 1.3 典型多旋翼产品及其参数分析

在多旋翼无人机布局中,螺旋桨数量多选择偶数(4、6 或 8 片),螺旋桨的布局大都选择正多边形对称分布。机身纵轴(或者机头方向)的选择方式有两种:一种是沿着两对称螺旋桨轴

线(记为+形),另一种是沿着两相邻螺旋桨的中线(记为X形)。当选择+型或X形布局时,飞行器相应姿态控制的动态响应速度是不同的。以四旋翼为例,同样尺寸、质量的飞行器,以及相同的电机、螺旋桨,选择X形布局时,其响应速度要比选择+形的快。图 1.13 所示为多旋翼无人机典型布局。我们以 QUAD、HEXA、OCTO 分别代表四旋翼、六旋翼及八旋翼,则

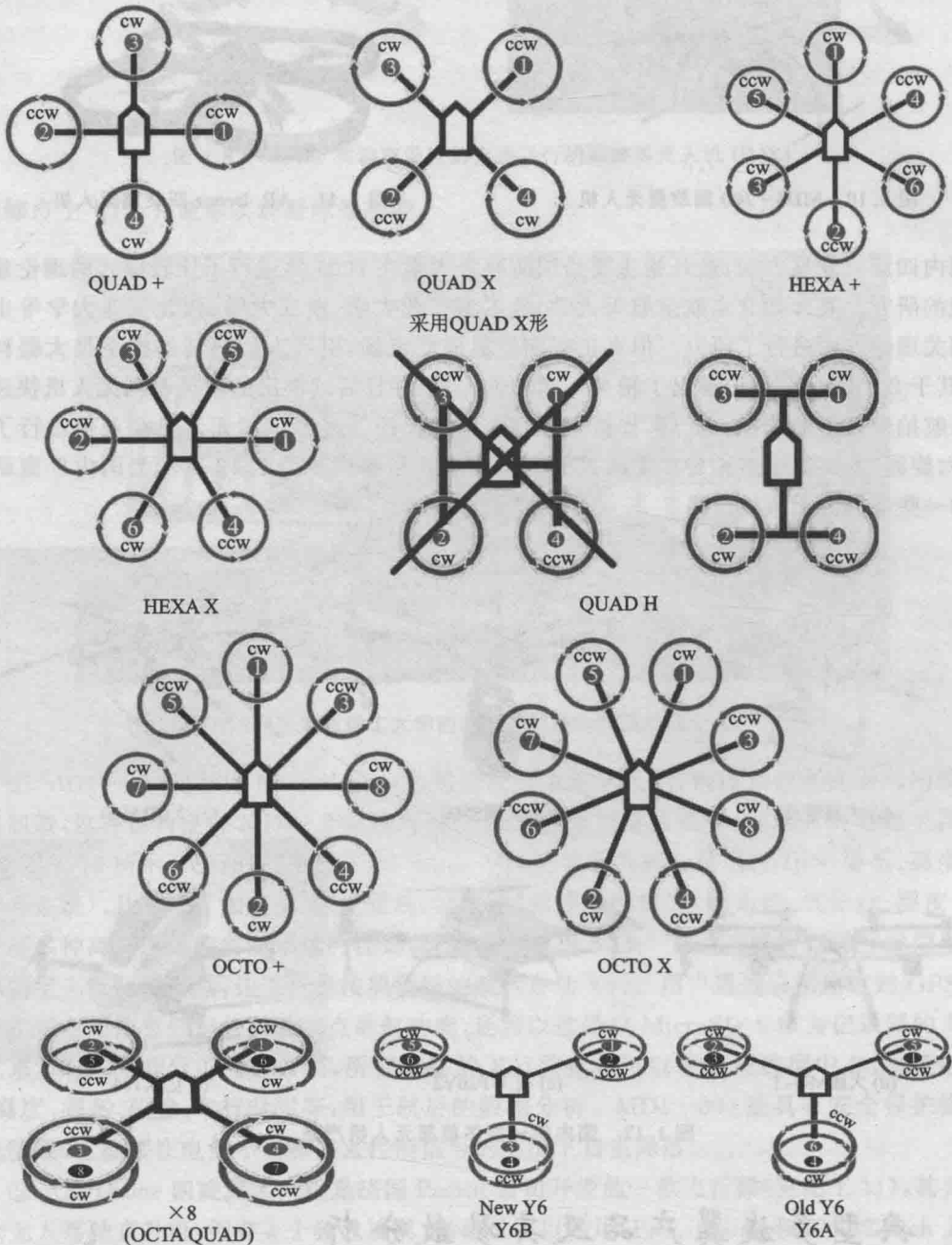


图 1.13 多旋翼无人机典型布局



相应的常规布局有 QUAD +、QUAD X、HEXA +、HEXA X、OCTO +、OCTO X。为了结构紧凑,还有些特殊布局,例如,QUAD H 是为了满足四旋翼无人机的 4 个螺旋桨轴中心点构成的四边形为长方形而产生的布局,Y6 及 OCTO QUAD 则是将六旋翼及八旋翼采用共轴返桨形式布局成三角 Y 形及 QUAD X 形。

表 1.1 所列为对应图 1.12 中实际飞行器产品的一些参数,包括螺旋桨数量、布局、质量、轴距等。由于相同尺寸结构下,选择 X 形布局能够获得更大的姿态响应速度,因此,为了结构紧凑,携带方便,前 5 款飞行器都选择了 X 形布局。为了满足飞行器任务须携带一定质量的需求,以大疆 S800 及大疆 M600 最大起飞质量与空载起飞质量数据对比为例,选择相同数量的六旋翼布局时,质量较大的飞行器其轴距也较大,螺旋桨的尺寸也较大。以大疆 M600 及大疆 MG-1 为例,使用相同尺寸的螺旋桨时,为了满足较大的起飞质量,就需要较多的电机数及较大的轴距。以大疆 MG-1 及极飞 P20V2 为例,为获得一定的负载能力,使用电机较少的飞行器则需要较大的螺旋桨及较长的轴距。亿航 184 采用 OCTO QUAD H 布局,一是为了满足结构紧凑的需求,二是为了方便人员登机;而采用 OCTO 布局则不利于人员登机且外形不美观。

表 1.1 图 1.12 中多旋翼无人机产品的一些参数

多旋翼无人机 参 数	大疆精灵 4	大疆 S800	大疆 M600	大疆 MG-1	极飞 P20V2	亿航 184
螺旋桨数量	4	6	6	8	4	8
布局	QUAD X	HEXA X	HEXA X	OCTO X	QUAD X	OCTO QUAD H
空载起飞质量/kg	1.38	6.0	9.1	12.5	12	200
最大起飞质量/kg	—	8.0	15.1	22.5	20	300
螺旋桨直径/in	9.4	15	21	21	33	590
轴距/mm	350	800	1133	1520	1710	3401

注:1 in=0.025 4 m。

## 1.4 多旋翼无人机系统的总体设计原则

多旋翼无人机系统的总体设计包括需求分析与方案设计两方面。首先,目标任务的需求决定了飞行器的应用时间、气象、场地背景等时空条件,同时这些时空条件将转换为对飞行器的两个主要约束条件:一是飞行器本身的特性约束,如飞行器的尺寸、飞行速度、航程、姿态角精度、软硬件抗干扰能力、防护等级等;二是任务载荷的约束,包括尺寸、任务识别与完成的能力、远程通信能力等。其次,这些约束条件将进一步转换为方案设计,包括结构、导航、控制、载荷、通信、地面维护、人机交互等子系统(子模块)的方案设计。这些子方案设计不是独立存在的,很多时候需要比较协调,在总预算约束下,进行多个子方案的多种组合、反馈迭代,然后设计出一个最优或是次优的方案。

图 1.14 所示为常规多旋翼无人机的系统结构示意图,主要包括无人机分系统、任务载荷分系统、链路设备分系统及地面站分系统。每个分系统又由相应的子系统构成。其中,无人机分系统由飞行器机体、动力子系统、导航飞控子系统及电气子系统组成。任务载荷分系统的构