

Quadrotor
Aircraft

四旋翼飞行器 快速上手

■ 陈志旺 等 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

四旋翼飞行器快速上手

陈志旺 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了动手制作 (DIY) 一个微型四旋翼飞行器的理论知识及实践方法, 主要目的是使读者熟悉并掌握四旋翼飞行器的飞行控制及组装原理, 熟悉并掌握航电设备的使用。本书以四旋翼飞行器涉及的嵌入式系统基本概念、原理、定律和嵌入式系统软/硬件开发方法为主线, 以“实际、实用、实践”为原则, 淡化理论深度, 突出工程应用, 构建科学、协调、可操作的内容体系, 知识结构合理, 注重课程交叉, 及时引入课程最新发展成果。

本书适合对四旋翼飞行器感兴趣的读者阅读, 也可作为高等学校相关专业的教学用书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

四旋翼飞行器快速上手/陈志旺等编著. —北京: 电子工业出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-121-32548-9

I. ①四… II. ①陈… III. ①无人驾驶飞行器—制作 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 205318 号

策划编辑: 张 剑 (zhang@phei.com.cn)

责任编辑: 苏颖杰

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17 字数: 432 千字

版 次: 2017 年 8 月第 1 版

印 次: 2018 年 4 月第 2 次印刷

定 价: 49.90 元

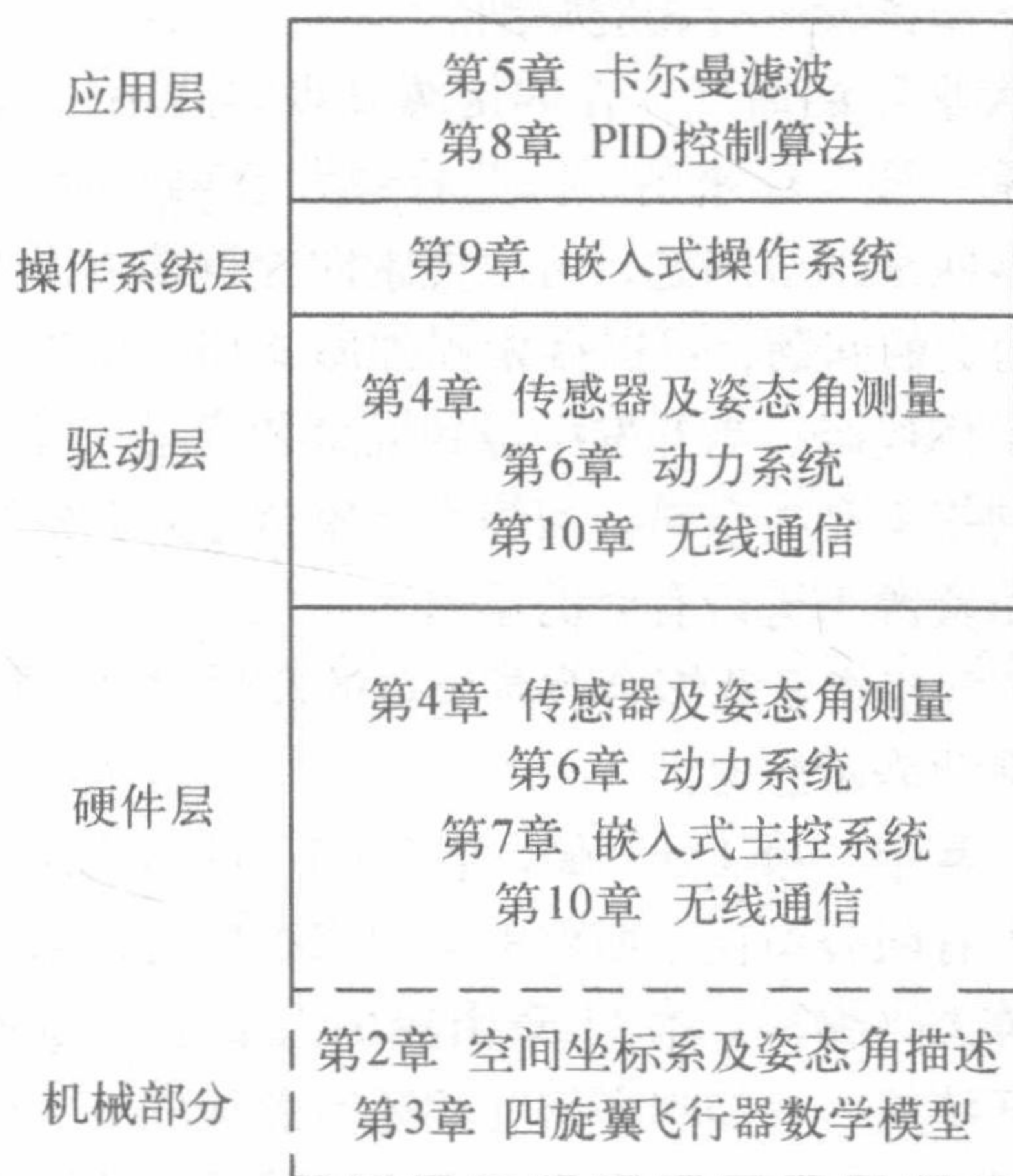
凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: zhang@phei.com.cn。

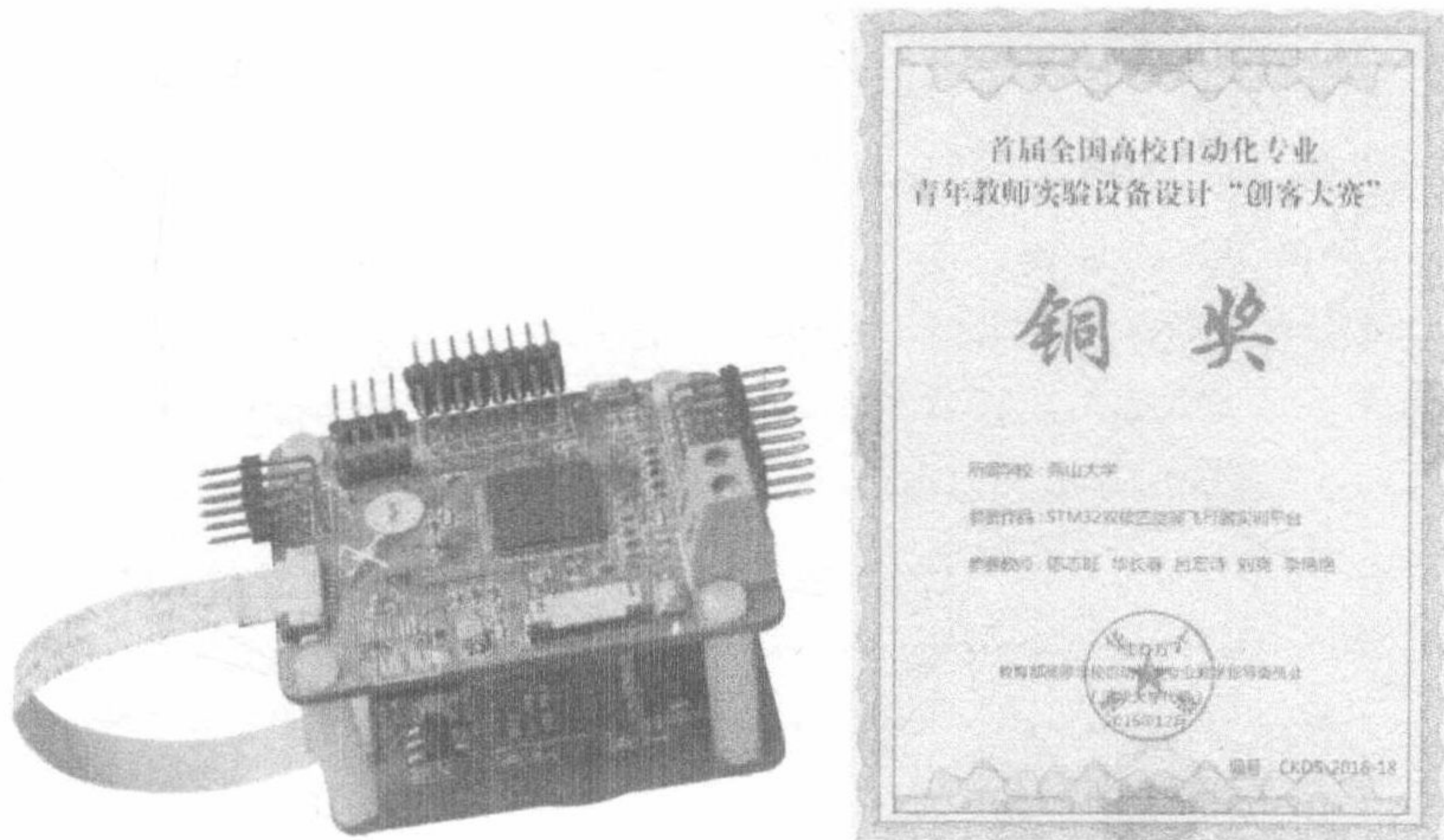
前 言

本书主要讲述动手制作（DIY）一个微型四旋翼飞行器涉及的理论及实践知识。四旋翼知识体系主要涉及两大方面，即机械部分和电控部分，本书侧重电控部分，以“四旋翼电控开发工程师”为培养目标，而电控部分具体指“嵌入式系统开发”，按照嵌入式系统层次组成，本书各章节关系如下图所示：



除了上述章节外，还包括第1章绪论和第11章飞手实训。

本书与各章节理论相结合给出的代码基于我们自己开发的飞控系统，该系统在首届全国高校自动化专业青年教师实验设备设计“创客大赛”中获得铜奖（见下图）。但本书的理论内容不拘泥于此，任选一款开源飞控，都可以参考本书进行四旋翼飞行器的相关学习。



本书以应用为导向进行内容安排。例如，四元数的概念放到第2章，四元数的微分方程放到第5.3.1节；欧拉角的概念放到第2章，欧拉角奇点的概念在第3.3.5节中介绍，欧拉角和四元数的转换放到第5.3.5节。

本书侧重知识体系构建及引导案例设计，例如第7章和第9章，给出了知识框架，而没有分别写成“STM32系列芯片手册”和“FreeRTOS库函数手册”，因为我们的目的是让读者在本书的指导下入门嵌入式学习，而芯片手册等像砖头一样的参考资料可以上网下载，使用的时候查找即可。

本书反复论述的一个核心：“四旋翼能够飞行主要是依靠传感器系统获取位姿信息并反馈到微处理器进行控制系统的运算，然后驱动电动机完成姿态控制”分别在第3、7、8、9章从不同方面进行论述，希望读者进行相应归纳。

现在是“互联网架空大学”的时代，在四旋翼开发实践中，与其说四旋翼是“做”出来的，不如说是从搜索引擎“搜”出来的，因此希望大家和Baidu、Google做朋友，如果遇到一个四旋翼动力系统参数匹配细节问题，可以搜索四旋翼动力设计网页；如果遇到嵌入式开发stm32固件库函数使用上的问题，可以搜索固件库文档；如果遇到卡尔曼滤波、PID算法等典型任务，可以搜索示例代码；当开发中遇到疑难杂症时，可以提炼关键词搜索是否有人遇到相同问题。总之，网络就是大金矿，而搜索引擎就是采矿机器，善用搜索引擎可以帮助我们充分利用丰富的网络资源来进行有效的学习和开发。

本书是DJI大疆创新产学研合作专业综合改革项目的成果之一，得到了国内多旋翼知名企业大疆创新公司的支持，在此表示感谢。

本书由陈志旺等编著。其中，第1~3章、第7~10章和附录由燕山大学陈志旺编写；第4章由国网黑龙江省电力有限公司佳木斯供电公司宋娟编写；第6章由国网黑龙江省电力有限公司佳木斯供电公司陈志兴编写；第11章由燕山大学宁志旋编写；第5章由燕山大学吕宏诗编写。全书由陈志旺统稿。参加本书编写的还有薛佳伟、王敬、张子振、赵子铮、邵玉杰、王小飞、张健、黄兴旺、白铎和赵方亮。书中引用了一些网上文献，无法一一注明出处，在此向原作者表示感谢！

由于编著者水平有限，书中难免存在错误与不妥之处，欢迎读者朋友不吝赐教！

本书QQ群：560351263（四旋翼无人机原理）

编著者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 飞行器分类	1
1.2 无人机的概念	6
1.3 无人机自主飞行	8
1.3.1 自主飞行概念	8
1.3.2 无人机自主控制等级	9
1.3.3 无人机模块化结构	12
1.4 国际空中机器人大赛	14
1.5 开源飞控	17
1.6 飞行器控制涉及的知识	22
第 2 章 空间坐标系及姿态角描述	25
2.1 满足右手定则的坐标系	25
2.2 方向余弦阵	28
2.2.1 二维坐标旋转	28
2.2.2 三维坐标旋转	29
2.3 欧拉角	32
2.4 由等效旋转矢量到四元数	35
2.4.1 向量点乘和叉乘	35
2.4.2 等效旋转矢量	36
2.4.3 复数形式四元数	39
2.5 四元数、欧拉角以及方向余弦阵对比	41
第 3 章 四旋翼飞行器数学模型	43
3.1 飞行要素	43
3.1.1 大气飞行环境	43
3.1.2 伯努利定理	45
3.1.3 固定翼飞机的平飞	48
3.2 四旋翼飞行器的飞行原理	49
3.3 四旋翼飞行器的数学模型	53
3.3.1 数学模型概述	53
3.3.2 建模假设条件	54
3.3.3 动力子系统建模	55
3.3.4 动力学模型	56

3.3.5	运动学模型	61
3.3.6	模型的简化	63
3.4	四旋翼飞行器的特点	65
第4章	传感器及姿态角测量	66
4.1	基本概念	66
4.2	MEMS	68
4.3	陀螺仪	69
4.3.1	机械陀螺仪原理	69
4.3.2	MEMS 陀螺仪	70
4.3.3	ITG3200 应用	71
4.4	加速度计	72
4.4.1	加速度计原理	72
4.4.2	LIS3VDQ 结构	74
4.4.3	加速度计标定	75
4.5	磁罗盘	79
4.5.1	磁罗盘原理	79
4.5.2	磁罗盘 LSM303DLH	80
4.5.3	磁罗盘标定	82
4.6	GPS	83
4.7	姿态角测量公式	85
4.7.1	俯仰角和滚转角测量	85
4.7.2	偏航角测量	86
第5章	卡尔曼滤波	91
5.1	线性系统状态能观性	91
5.2	卡尔曼滤波原理	93
5.2.1	数学基础	93
5.2.2	卡尔曼滤波算法	94
5.2.3	卡尔曼滤波案例 1	98
5.2.4	卡尔曼滤波案例 2	99
5.2.5	参数分析	99
5.2.6	扩展卡尔曼滤波	100
5.3	卡尔曼滤波在姿态解算中的应用	102
5.3.1	四元数微分方程	102
5.3.2	状态模型	104
5.3.3	测量模型	104
5.3.4	卡尔曼滤波算法步骤	107
5.3.5	四旋翼姿态解算代码实现	107

第 6 章 动力系统	109
6.1 电动机	109
6.1.1 有刷电动机	109
6.1.2 空心杯电动机	110
6.1.3 无刷电动机特点	110
6.1.4 无刷电动机结构	111
6.1.5 无刷电动机工作原理	113
6.1.6 无刷电动机参数	116
6.2 电调	119
6.2.1 电调功能	119
6.2.2 电调原理	120
6.2.3 电调参数	122
6.3 电池	123
6.3.1 锂电池简介	123
6.3.2 电池参数	125
6.3.3 电池使用注意事项	128
6.4 螺旋桨	130
6.4.1 螺旋桨的作用	130
6.4.2 螺旋桨的分类	132
6.4.3 螺旋桨的参数	133
6.5 导线	134
6.6 机架	136
第 7 章 嵌入式主控系统	138
7.1 微型计算机的组成	138
7.2 CM3 体系结构	140
7.3 CM3 寄存器	144
7.4 STM32 的存储结构	148
7.4.1 总线接口	148
7.4.2 CM3 存储器组织	150
7.4.3 STM32 存储器映射	151
7.4.4 大端和小端	154
7.4.5 字节对齐	155
7.4.6 动态内存	159
7.5 ARM 指令集	159
7.6 STM32F1 和 STM32F4 的区别	164
7.7 STM32 的选型	166
7.8 嵌入式系统分层结构	169

第 8 章	PID 控制算法	173
8.1	控制的基本过程	173
8.2	四旋翼飞行器 PID 控制器原理	174
8.2.1	PID 控制基本理论	174
8.2.2	控制规律的选择	176
8.2.3	四旋翼飞行器的串级 PID 控制	177
8.3	PID 参数整定	178
8.3.1	PID 参数对系统性能的影响	178
8.3.2	参数整定基本概念	181
8.3.3	单环 PID 参数整定	181
8.3.4	串级 PID 参数整定	182
第 9 章	嵌入式操作系统	184
9.1	操作系统基本概念	184
9.1.1	操作系统功能	184
9.1.2	操作系统工作过程	185
9.1.3	前后台系统	186
9.1.4	实时操作系统	186
9.1.5	通用操作系统与实时操作系统的比较	186
9.2	飞行器与操作系统	188
9.3	操作系统中的任务	190
9.3.1	任务的特性	190
9.3.2	多任务的实现	192
9.3.3	任务划分的目标	192
9.4	FreeRTOS 操作系统简介	193
9.5	FreeRTOS 中的任务管理	195
9.5.1	FreeRTOS 中的任务	195
9.5.2	相对延时	197
9.5.3	绝对延时	197
9.6	FreeRTOS 中的互斥信号量	198
9.6.1	互斥信号量的概念	199
9.6.2	互斥信号量的应用	201
9.7	FreeRTOS 中的任务通信	205
9.7.1	队列概念	205
9.7.2	队列通信案例	207
9.8	飞控操作系统中的任务及其通信	208
第 10 章	无线通信	210
10.1	无线通信原理	210

10.2	无线电波	213
10.2.1	无线通信按频率分类	213
10.2.2	2.4GHz 无线技术简介	216
10.2.3	2.4GHz 无线通信扩频技术	217
10.2.4	2.4GHz 无线技术特点	220
10.3	手持遥控器工作原理	220
10.3.1	发射机	220
10.3.2	接收机	226
10.3.3	设备使用中需注意的问题	228
10.4	飞行器的其他无线通信	229
第 11 章	飞手实训	231
11.1	无人机就业职位要求	231
11.2	飞手练习方法	233
11.3	民用无人机空中交通管理办法	238
11.4	飞行时的注意事项	241
11.4.1	人	242
11.4.2	机	245
11.4.3	环境	246
11.5	飞行器检修及保养	247
附录 A	磁罗盘椭球拟合标定程序	250
附录 B	卡尔曼滤波代码	255
附录 C	PID 参数对系统性能影响试验代码	257
参考文献	259

第1章 绪论

无人机的基础还是一个飞行器，但这是一个多项尖端科技整合的技术，是多个前沿学科的技术集成和积累的产业。

——潘农菲（大疆创新公司原副总裁）



1.1 飞行器分类

飞行器就是能够离开地面飞行的装置，是在地球大气层内或在大气层之外的空间（含环地球的空间、行星和行星际空间）飞行的器械。按照大气层内外空间，飞行器活动可分成航空和航天两类。

☺ **航空**：指在大气层内的空间飞行活动，一般不超过 30km 高度。航空必须具备空气介质和克服航空器自身重力的升力，大部分航空器还要有产生相对于空气运动所需的推力。

☺ **航天**：指在大气层外的近地空间、星际空间的飞行活动。

航天不同于航空，航天器是在极高的真空宇宙空间以类似于自然天体的运动规律飞行。但航天器的发射和回收都要经过大气层，这就使航空航天之间产生了必然的联系。航空航天一词，既蕴藏了进行航空航天活动必需的科学，又包含了研制航空航天飞行器所涉及的各种技术，从科学技术的角度看，航空与航天之间是紧密联系的。

飞行器按照其飞行环境和工作原理的不同被分为三类：火箭和导弹、航天器、航空器。

1) 火箭和导弹 在大气层内外飞行的一种特殊飞行器，是利用火箭发动机而获得运动的飞行器，带有动力装置和战斗部分。

2) 航天器 在大气层外飞行，靠运载火箭推力获得一定速度和高度后，在引力作用下按照天体力学的规律进行轨道飞行的飞行器。航天器基本类型如图 1-1 所示。

3) 航空器 在大气层内飞行，靠空气静浮力和与空气相对运动产生的空气动力飞行的飞行器。航空器基本类型如图 1-2 所示。

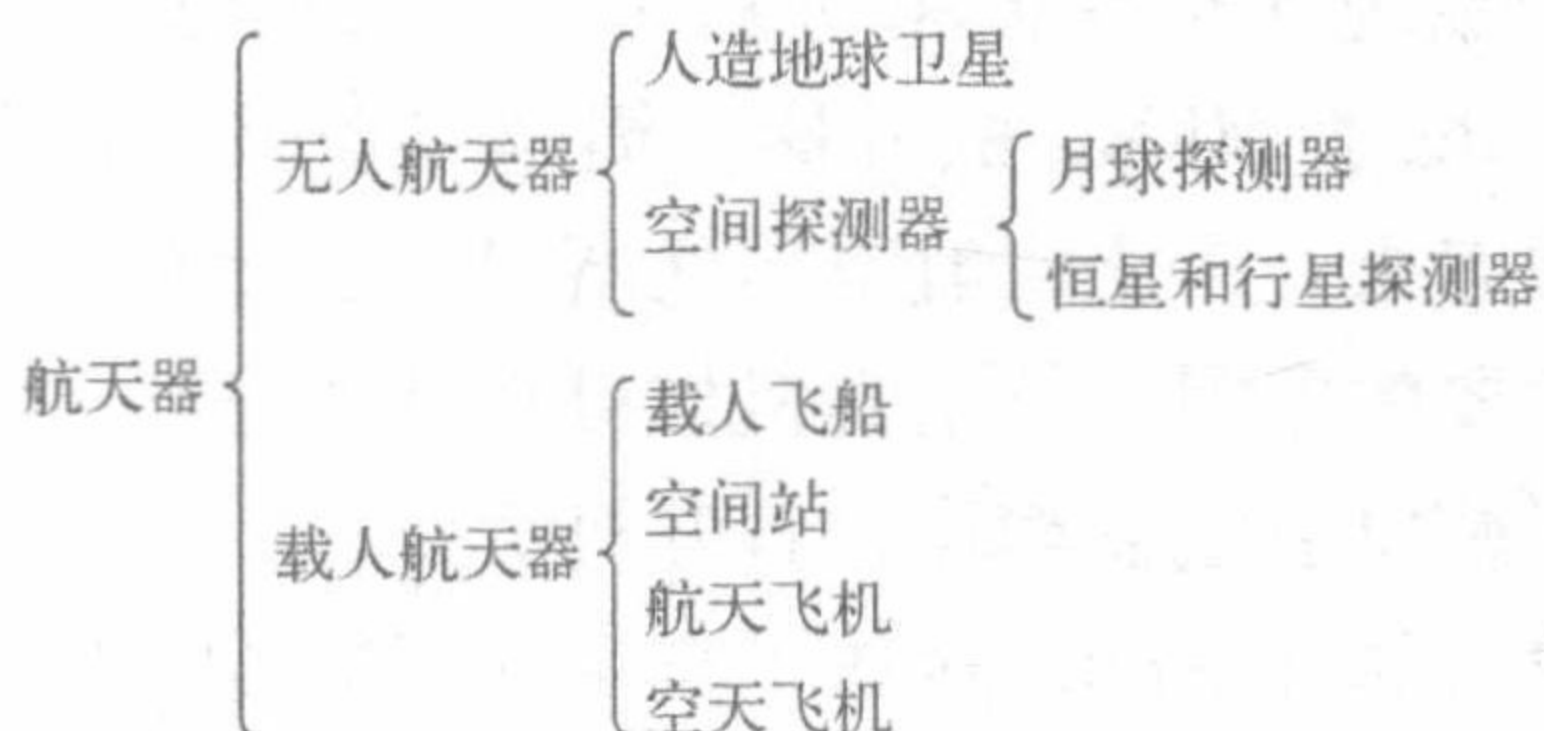


图 1-1 航天器分类

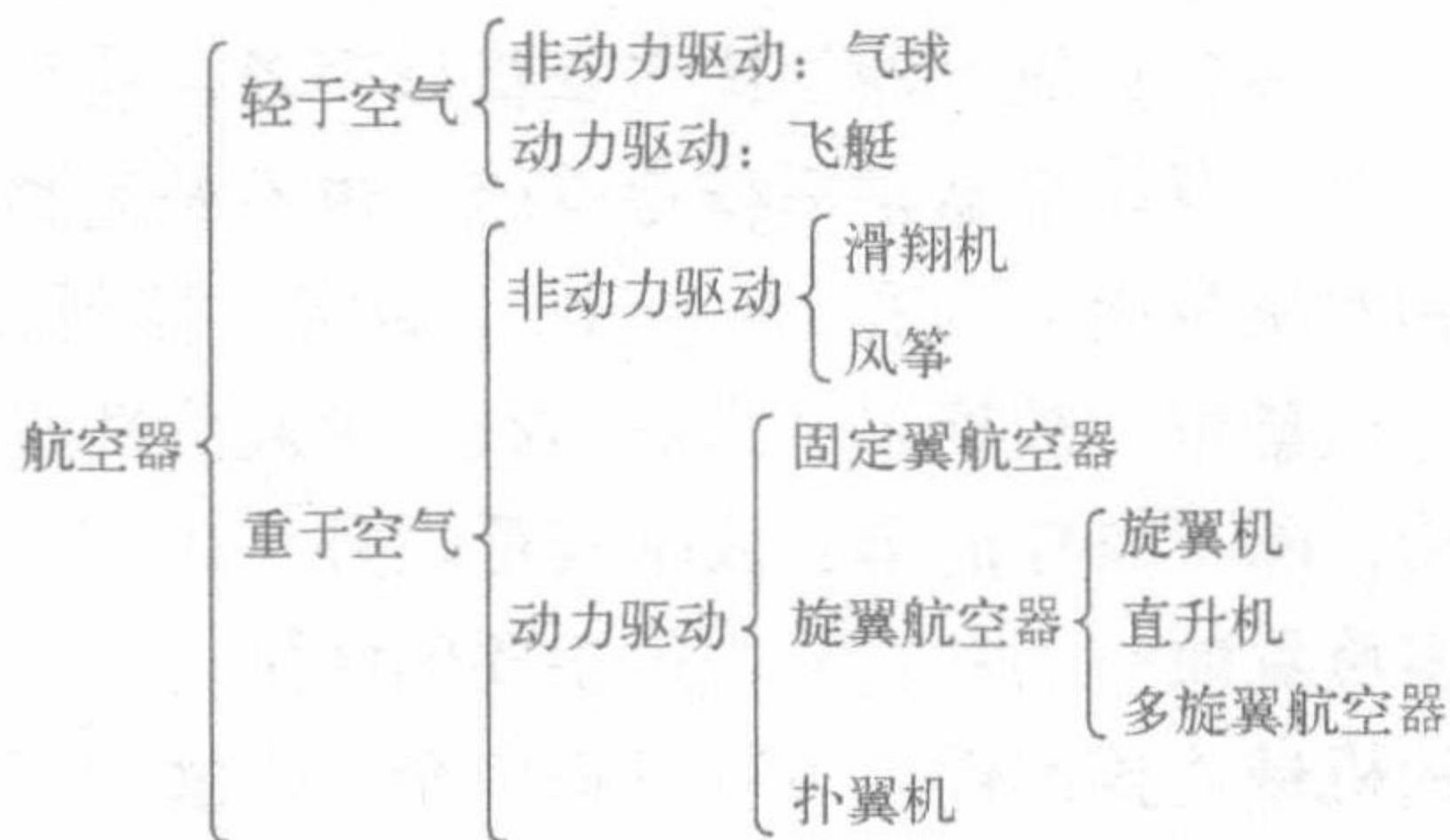


图 1-2 航空器分类

航空器中，飞艇是一种装有安定面、方向舵和升降舵的流线型气球，并装有发动机带动螺旋桨产生拉力。滑翔机是指没有动力装置的重于空气的固定翼航空器。

固定翼航空器、直升机和多旋翼航空器外形如图 1-3 所示。

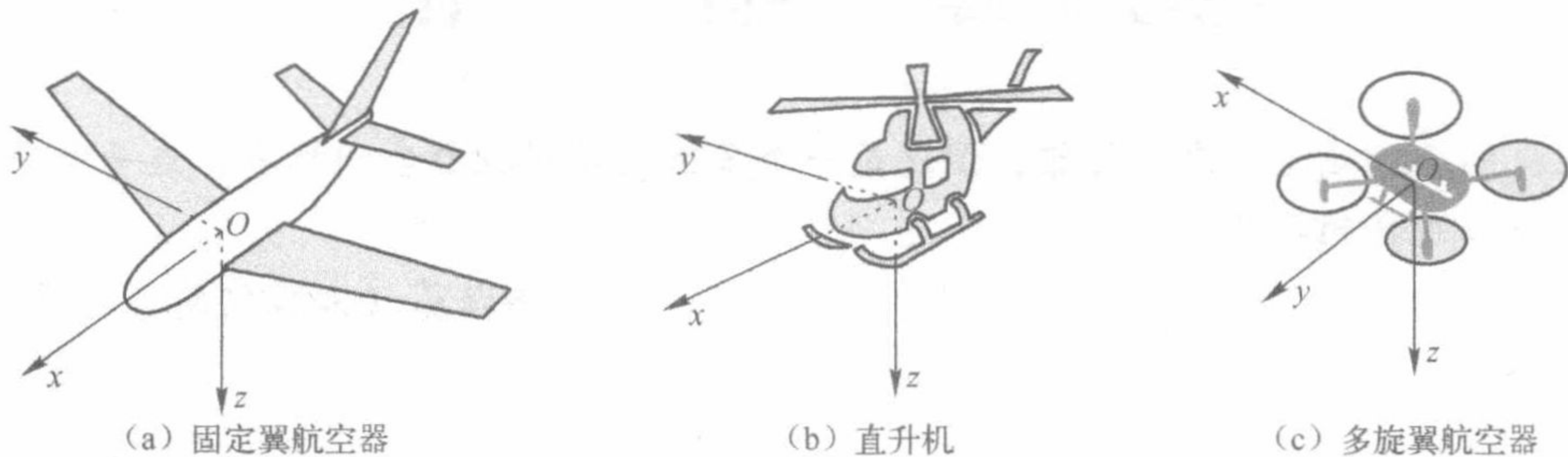


图 1-3 固定翼航空器、直升机和多旋翼航空器外形

(1) 固定翼 (fixed wing) 航空器：商务波音 747、空客 A380 和 F-16、歼-15 等都是固定翼航空器。顾名思义，固定翼就是翅膀形状固定，靠流过机翼的风提供升力。动力系统包括机翼和助推发动机。固定翼航空器的优点是在三类飞行器里续航时间最长、飞行效率最高、载荷最大，缺点是起飞时必须助跑，降落时必须滑行。

固定翼航空器是自稳定系统，即飞上天、助推发动机稳定工作之后，不需要复杂控制，固定翼就能自己抵抗气流的干扰保持稳定。此外，对于飞行器姿态控制来说，固定翼航空器是完整驱动系统，即它在任何初始姿态下都可以调整到任何其他姿态，并且保持这个姿态，但存在失速问题。固定翼在空中可以借助气流产生升力，姿态变换通过“借力”实现（还要有执行器控制相应的机械结构，但省“力”很多），螺旋桨或者喷气发动机只提供额外飞行速度。


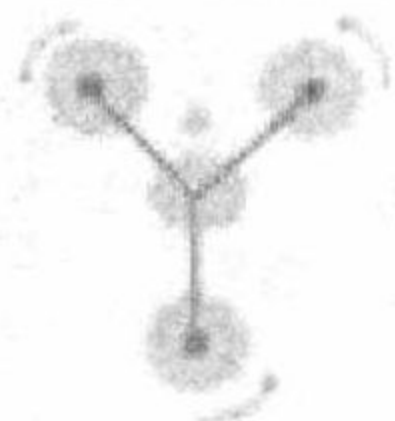
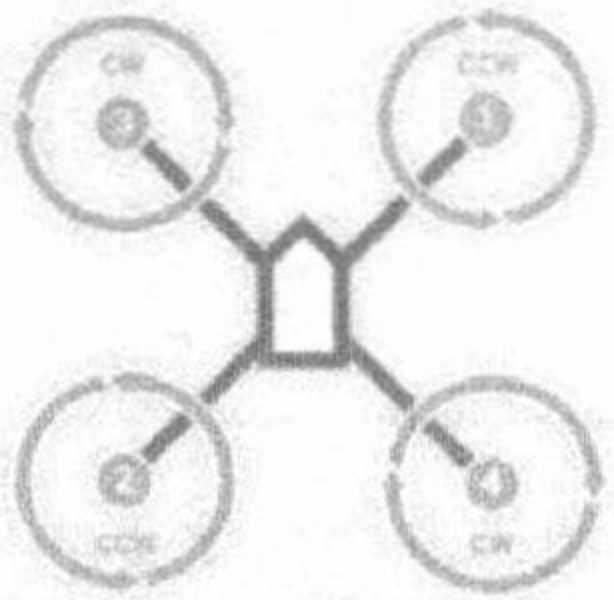
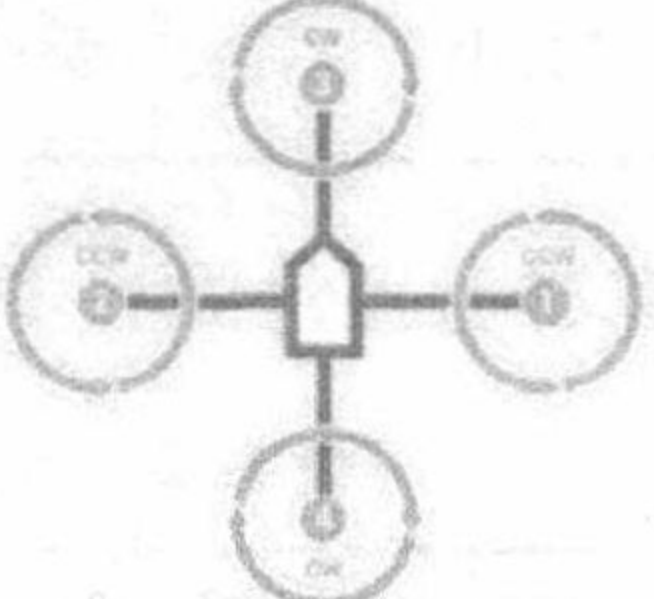
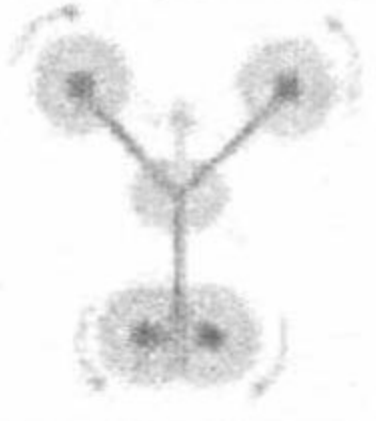
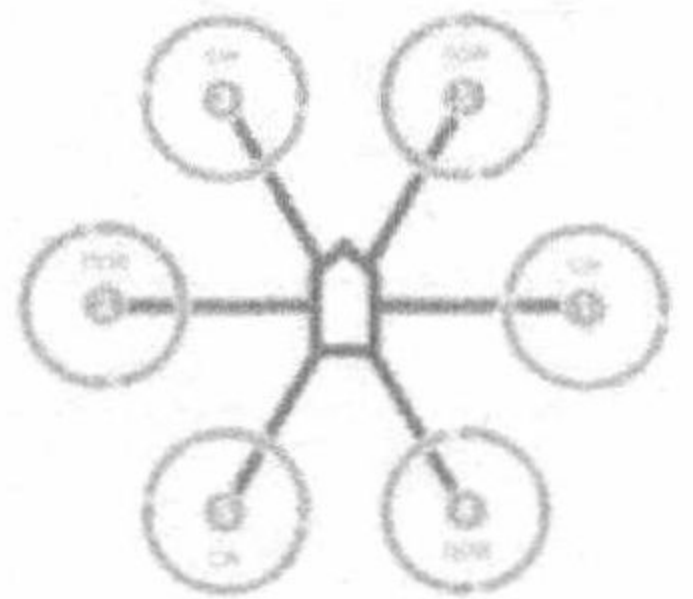
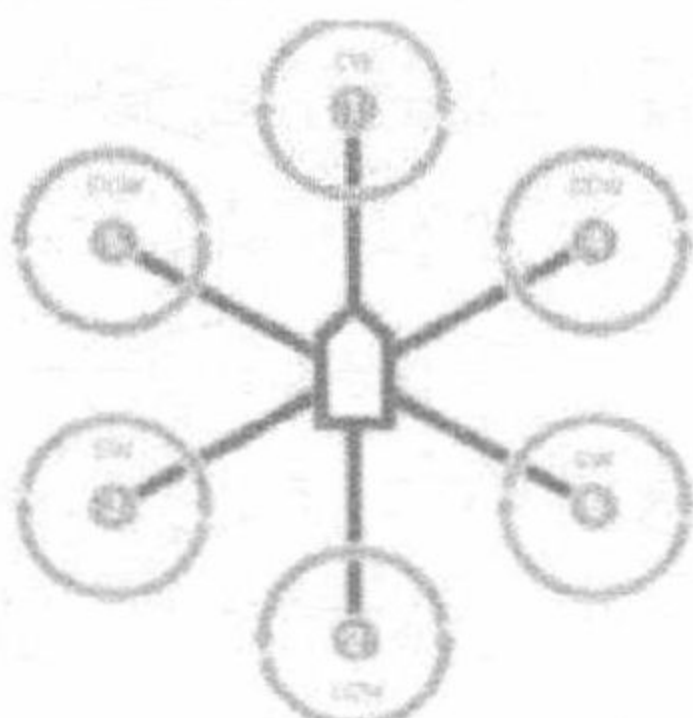
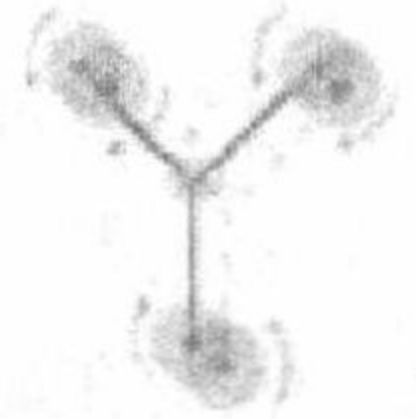
(2) 直升机 (helicopter)：特点是靠一个或者两个主旋翼提供升力。如果只有一个主旋翼，则还必须有一个小的尾翼抵消主旋翼产生的自旋力。为了能向前后左右飞行，主旋翼有极其复杂的机械结构，通过控制旋翼桨面的变化来调整升力的方向。动力系统包括发动机、整套复杂的桨调节系统。直升机的优点是可以垂直起降，续航时间中等，载荷也中等；缺点是极其复杂的机械结构导致了比较高的维护成本。

直升机是不稳定系统，飞上天之后如果不施加控制，一阵风吹来就可能翻倒。直升机是完整驱动系统，可以自由调整姿态。这是因为直升机的桨面不但可以产生相对机身向上的推力，而且可以产生相对机身向下的推力。直升机没有失速的问题，什么时候都能调整姿态。

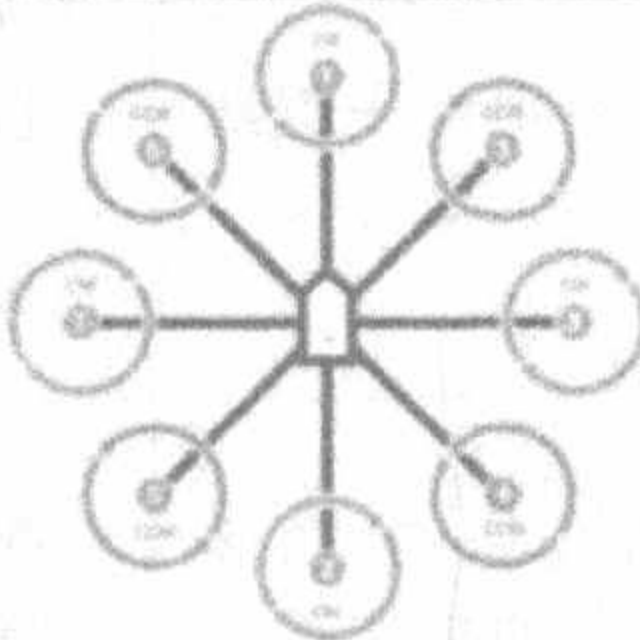
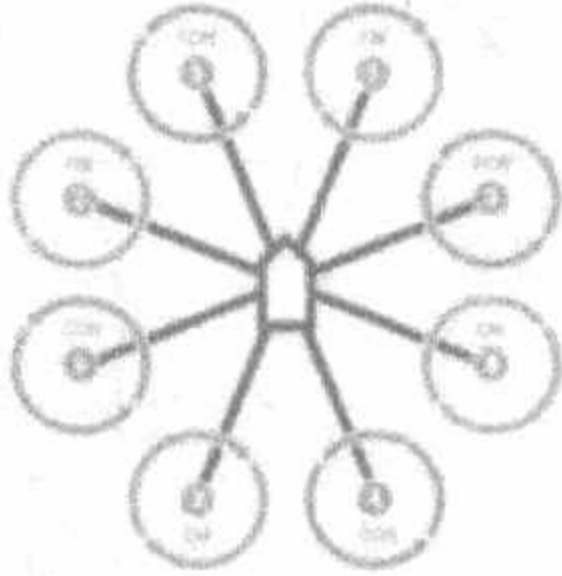
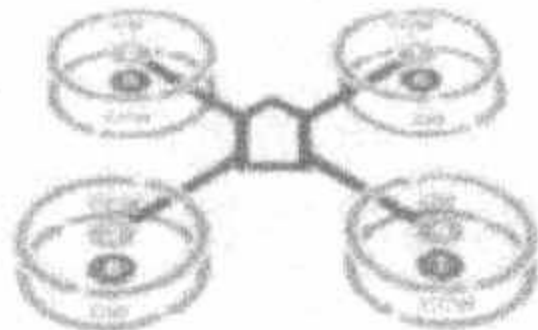
(3) 多旋翼 (multi-rotor) 航空器：机械结构非常简单，动力系统只需要电动机直接连桨。多旋翼航空器的优点是机械简单，能垂直起降；缺点是续航时间短，载荷也小。

多旋翼航空器是不稳定系统，也不是完整驱动系统（也称欠驱动系统）。它的桨只能产生相对机身向上的升力，所以不稳定、控制较难。随着 MEMS 的发展，惯性导航系统的体积和质量可以被旋翼飞行器承载，因此旋翼机发展起来。多旋翼航空器之所以能够比直升机成功，除了操控简单、成本较低之外，还有一个主要的原因，就是其机械可靠性较高，这也是多旋翼航空器和直升机最主要的区别之一。与多旋翼航空器相比，直升机需要有上千个活动的机械连接部件，飞行过程中会产生磨损，导致可靠性下降，这些不稳定因素的排查成本较高，还有可能对人体产生伤害。而多旋翼航空器上没有活动部件，它的可靠性基本上取决于无刷电动机的可靠性，因此可靠性较高。多旋翼航空器分类见表 1-1。

表 1-1 多旋翼航空器分类

名称	结构特点	特 性	示意图	备注
双轴	电动机分别位于直线形机身两侧，重心位于机身正中	横向稳定性差，飞行时易发生滚转，成本虽低但较难操控。两电动机旋转方向相反		一字形
三轴	两电动机以 90° 角固定，另一电动机位于其角平分线反向延长线上	平衡性差，转速分配复杂，机头方向位于两相互垂直电动机之间。三电动机旋转方向均为逆时针		Y 形
四轴	四角各有一个电动机，重心位于其对角线交点	机头方向位于两电动机之间，操控难度相对于十字形较大，动作更灵活。对角两电动机转向相同		X 形
		机头方向位于某一个电动机上，较易操作，灵活度较差		十字形
	与 Y 形三轴类似，较远侧由两电动机组成	机头方向位于两相互垂直电动机之间，俯仰稳定性较好。相邻两电动机旋转方向相反。两垂直电动机下顺上逆		Y 形
六轴	六个电动机分别位于正六边形的六个顶点	对角线两电动机旋转方向相反，稳定性比四轴好，便携性差		X 形
		机头方向位于某两电动机中间		十字形
	其分布与三轴 Y 形一致，共分上下两层	同一水平面上的两垂直电动机旋转方向相同且与第三个相反，同一垂直轴上两个电动机则相反。自旋，俯仰稳定性好		Y 形

续表

名称	结构特点	特 性	示意图	备注
八轴	八个电动机分别位于正八边形的八个顶点	对角电动机旋转方向相同，机头与某电动机方向一致。综合稳定性好，成本较高，便携性差，电动机数目多，飞行时单个电动机故障影响较小。载重能力强		十字形
		对角电动机旋转方向相反，机头位于某两个电动机之间		X形
	八个电动机分别位于四个顶点，与四轴形、X形一致，共分上下两层	同一对角线上两电动机旋转方向相同，同一垂直轴上两电动机则相反。自旋稳定性好		上下布局

固定翼航空器、直升机和多旋翼航空器的比较见表1-2。

表1-2 固定翼航空器、直升机和多旋翼航空器的比较

	固定翼航空器	直升机	多旋翼航空器
优点	续航时间长，飞行效率最高，载荷大	垂直起降，空中悬停	垂直起降，空中悬停，结构简单
缺点	起飞需助跑，降落需滑行，不能空中悬停	续航时间一般；机械结构复杂，维护费用高昂	续航时间短，载荷小，飞控要求高
易用性	一般	一般	优
可靠性	优	一般	优
机动性	一般	优	良
续航时间	优	良	一般
承载性	优	良	一般

从结构上看，固定翼航空器没有垂直起降飞行器过多的旋转、振动部件，气动原理也比较简单；从控制方面看，固定翼飞行器属于静稳定系统，就像我们开车，手离开方向盘几秒汽车仍能正常直行，相比之下，属于静不稳定的旋翼航空器则需要驾驶员每时每刻都调整操纵杆，稍有疏忽就会坠毁。

通常，旋翼航空器和旋翼机易混淆，但旋翼航空器≠旋翼机。直升机和多旋翼航空器都属于旋翼航空器，但“旋翼机”这个名词赋给了一种和直升机类似的单旋翼航空器，如图1-4所示。这种飞行器向前飞时的相对气流吹动旋翼自转以产生升力。它除去旋翼外，还带有一副垂直放置的螺旋桨以提供前进的动力，一般也装有较小的机翼在飞行中提供部分升力。旋翼机与直升机的最大区别是，旋翼机的旋翼不与发动机传动系统相连，发动机不是驱动旋翼为旋翼机提供升力，而是在旋翼机飞行的过程中，由前方气流吹动旋翼旋转产生升力，像一架风车，旋翼系统仅在启动时由自身动力驱动，称之为预旋（Prerotate），起飞之后靠空气

作用力驱动；而直升机的旋翼与发动机传动系统相连，既能产生升力，又能提供飞行的动力，像一台电风扇。由于旋翼为自转式，传递到机身上的扭矩很小，因此旋翼机无须像单旋翼直升机那样的尾桨，但是一般装有尾翼，以控制飞行。在飞行中，旋翼机同直升机最明显的区别为直升机的旋翼面向前倾斜，而旋翼机的旋翼则是向后倾斜的。它具有起降距离短、能低速低空飞行、简单轻巧、便于隐蔽等特点，但不能垂直起降、悬停。

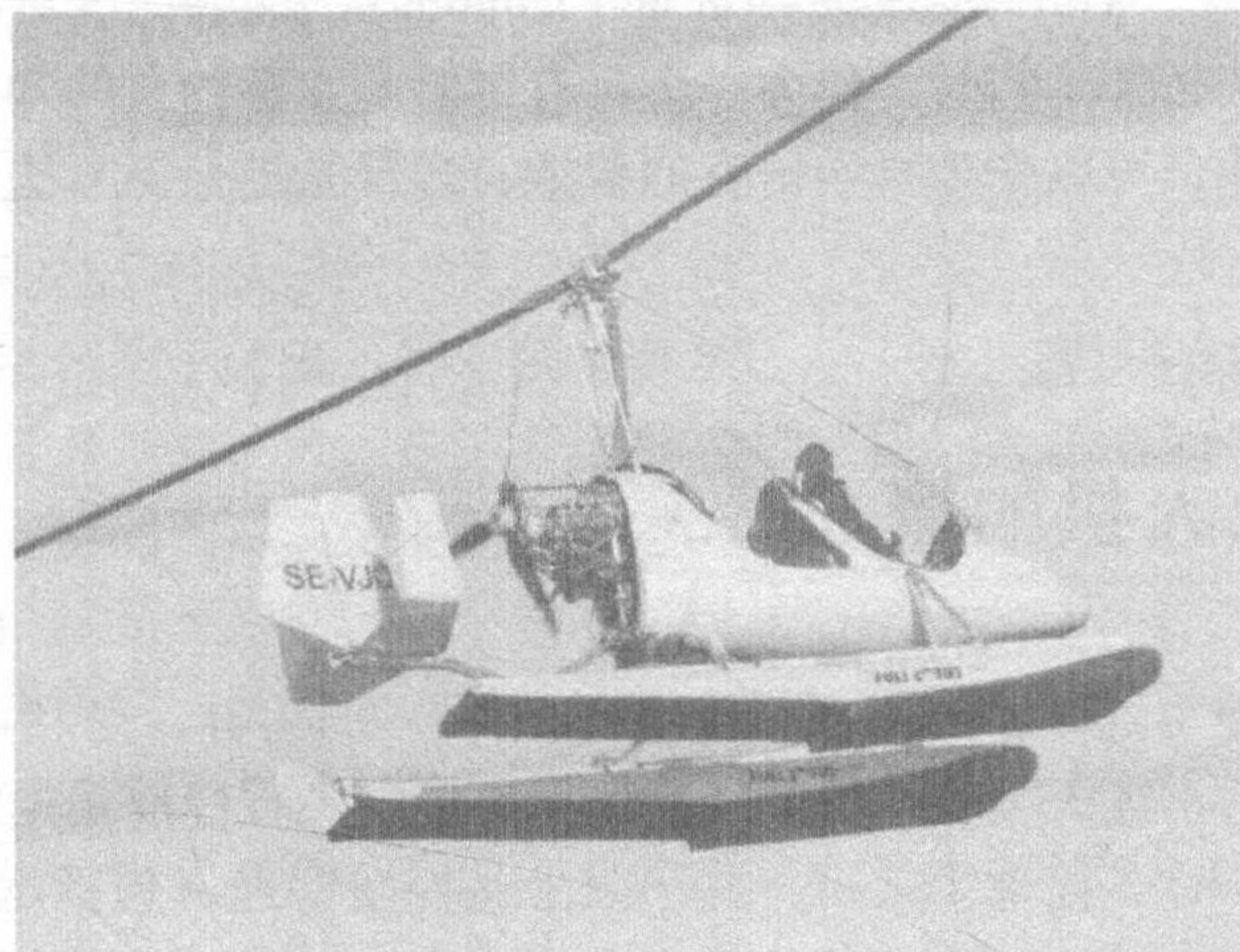


图 1-4 旋翼机

穿越机是多旋翼飞行器的一种，如图 1-5 所示，主要用于竞技飞行，利用第一人称视角监视进行操控飞行，体现的是速度与操控的结合能力，更注重体验。穿越机追求更高的灵活性和更小的惯性，它们需要更轻盈、更细小的身躯，因此它们的轴距往往只有 200 ~ 300mm，目前主流是 250mm 左右。穿越机大多没有自稳的电子设备，几乎是全手动飞行，其操作难度远高于航拍机。穿越机要求的是快，实时图传不能有任何迟滞，所以它们很多时候会采用模拟信号 (analog) 图传，虽然模拟信号传送画面经常会有雪花，但传输速度几乎完全与无人机同步，并配以图传眼镜，能让飞手第一时间做出反应。

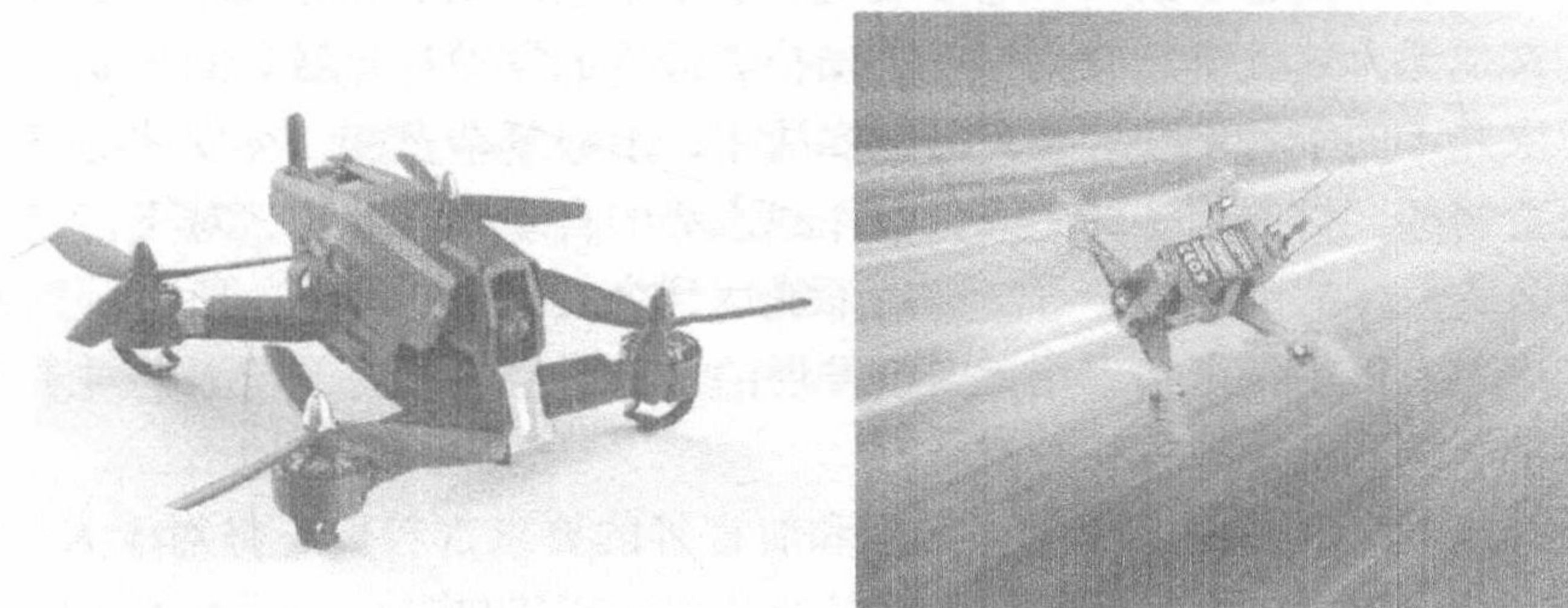


图 1-5 穿越机

四旋翼飞行器 (国外又称 Quad rotor, Four rotor 或 X4 - flyer) 是多旋翼航空器中的主流飞行器，它具有四个呈十字交叉结构的旋翼，通过对多传感器数据的融合和解算，获取自身的姿态欧拉角，进而通过 PID 控制器控制四个带螺旋桨的电动机，使其完成定点悬停、低速飞行、垂直起降等动作。四旋翼飞行器的空气动力学原理与传统固定翼飞行器及基于桨距控

制的直升机系统有很大区别：在动力来源上，四旋翼飞行器直接由旋翼产生升力，而不是由机翼产生升力；在姿态控制上，四旋翼飞行器不是通过改变机翼或旋翼的空气动力学结构，而是通过协调各旋翼转速而实现飞行器的姿态控制。四旋翼飞行器使用电子飞行控制系统，因而彻底抛弃了传统飞行器复杂的机械控制部件，在相当大的程度上简化了飞行器结构和质量，也极大地降低了制造成本及装配难度。除此以外，其独特的空气动力学原理也使之具备了垂直起降能力（VTOL, Vertical Take - On and Landing），能够完成对其他飞行器而言非常困难甚至不可能完成的任务。同时，作为一个具有二阶非完整约束的六自由度飞行器，它与倒立摆、球杆系统一样，可以作为科学研究的载体，进行先进控制方法和机器人学领域的相关实验研究。



1.2 无人机的概念

无人机是无人驾驶飞机（Unmanned Aerial Vehicle）的简称，是利用无线电遥控设备和自备的程序控制装置的不载人飞机。根据中国民用航空局飞行标准司规定：无人驾驶航空器（UA, Unmanned Aircraft），简称无人机，是一架由遥控站管理（包括远程操纵或自主飞行）的航空器，也称遥控驾驶航空器。从某种角度来看，无人机可以在无人驾驶的条件下完成复杂空中飞行任务和各种负载任务，被称为“空中机器人”。传统的无人机指的是无人作战飞机（UCAV, Unmanned Combat Aerial Vehicle），是一种有动力、可控制、能携带多种任务设备、执行多种任务，并能重复使用的无人作战飞行器，也是一种充分利用信息技术革命成果而发展的高性能信息化武器装备平台。

国外通常所讲的 UAV 也包括 Drone（在周围嗡嗡响、不错的玩具、不能随便乱飞、航模），技术成熟度高，对智能性、可靠性要求相对较低。

按不同使用领域，无人机可分为军用、民用和消费级三大类，性能要求各有偏重。

(1) 军用无人机：对于灵敏度、飞行高度、速度、智能化等有很高的要求，是技术水平最高的无人机，包括侦察、诱饵、电子对抗、通信中继、靶机和无人战斗机等机型。

无人机同其他无人驾驶智能载具一样，操控者最终的需求都是载具的智能化。军用无人机的智能化要求并不同于其他智能载具。在实战中，形势复杂多变，突发情况频现，由于受技术和多种因素制约，目前装备的无人机对作战态势的自动分析处理、对飞行姿态的准确自动控制以及对敌我目标的准确判断等，都还不能达到令人满意的程度。所以，无人机自主作战即高智能作战无人机将是未来军用无人机发展的最终目标。这将颠覆人们对于智能化军械的认识，也将根本改变未来战争的方式。

(2) 民用无人机：一般对于速度、升限和航程等的要求都较低，但对于人员操作培训、综合成本有较高的要求，因此需要形成成熟的产业链，以提供尽可能低廉的零部件和支持服务。目前来看，民用无人机最大的市场在于提供政府公共服务，如警用、消防、气象等，而未来无人机潜力最大的市场可能就在民用，新增市场需求可能出现在农业植保、货物速递、空中无线网络、数据获取等领域。

(3) 消费级无人机：一般采用成本较低的多旋翼平台，用于航拍、游戏等休闲用途。

从助力现代乡村到给力智慧城市，凡是需要空中解决方案的地方，无人机都在慢慢占领它的一席之地，就像撒播的种子遇到阳光、空气和水一样，茁壮成长。无人机技术让智能媒

体时代再一次悸动。

相对于军用无人机客观设备上的根本改变，民用无人机和消费级无人机未来的发展重点则在于主观的无人机使用方式和使用安全方面。首先，在无人机出现价格大幅下降的趋势之后，普通小型民用无人机更易被当作监视工具使用的同时，安全性无法得到保证。出于对安全和隐私方面的考虑，世界各国至今都未对民用无人机完全开放其监管政策。从目前来看，未来的民用无人机将会走向多元素融合道路。一方面是侧重专业化，即针对特定任务搭配专业的任务载荷模块，从事诸如客运、物流、巡检、反恐等专业任务；另一方面是侧重智能化，它更像是能够走进千家万户的服务型机器人，飞行只是它的一个功能而已，它能够完成日常生活中我们寄予的很多任务。

抽象来看，无人机相当于给人一种新的视野和活动维度，所以它能创造的价值就与这两点相关。新视野比较容易理解，无人机最开始的应用，比如地图测绘用的就是这种新视野。新活动维度则是说低空空间资源，之前新闻报道的顺丰物流尝试无人机送货所利用的正是这种资源。至于为什么说这是一种新资源，其实可以从公路、铁路、航道上获得启示，没有人会认为高速公路不创造价值。新活动维度的适用边界比较清晰，主要会用在各种比较特别的物流场合，及时性要求越高，基础设施越不发达（或者被灾害阻断）的时候，这种送付方式的价值越大。无人机的方式在成本和速度上相比其他方式会有优势，虽然要克服安全、空域管理规则、交接等困难。新视野和新活动维度相比，其潜在价值可能更大。新视野的开发其实是有边界限制的，这意味着它可以重构非常多的行业，比如建筑行业，如果可以实时了解施工进度、物料消耗，那无疑可以整体上优化整个过程的效率。在大多的传统行业中，其根本的管理方法可以用戴明环（PDCA）来表示，在这里，P代表计划，D代表执行，C代表检查，A代表根据检查结果采取的行动。而无人机则相当于可以对C（检查）进行质的提升，所以说新视野的应用几乎是没边界限制的。

现在的手机已经终端化，终端遍布全球，人们从终端获取全球有益信息的同时也在贡献着自身的价值。未来无人机在各类应用中会像手机一样成为遍布全球的一系列终端设备，飞控作为无人机的核心会在终端化过程中扮演重要作用，在消费、农业、巡视等各领域，飞控将成为数据终端的核心，大量的飞行状态、任务数据、载荷状态会被记录、回传、分发，用户或其他利益相关方会通过付费等商业模式获取终端的有用信息。

《中国制造2025》中将航空航天装备列为十大重点发展领域之一。其中，推进无人机发展是航空航天装备制造的重要发展方向。此外，国家发改委、科技部、工信部等近期联合发布了《“互联网+”人工智能三年行动实施方案》，明确提出将推动人工智能技术在无人系统领域的融合应用。国家出台的一系列重要支持政策，对无人机行业的发展起到了重要的助推作用。

什么是好的消费级无人机？

大疆 Mavic 设计者说：好的无人机机型设计，尤其是好的折叠机的设计，是一个非常复杂、需要来回迭代的过程，其中涉及以下方面：

- ☺ 便携性、折叠方式，包括体积的最小化，折叠展开步骤的最简化；
- ☺ 结构的简洁，可靠，耐摔；
- ☺ 续航；
- ☺ 外观；
- ☺ 整机布局，合理布置 PCB 和散热，各组件和传感器的位置，并保证它们能发挥性能，