

高校无人机应用技术专业新形态系列教材（总主编：何先定 刘建超 李屹东）

# 多旋翼无人机 组装与调试

刘 静 闫俊岭 刘清杰 编 著



资源库



校企合作

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·

## 内容简介

本书以多旋翼无人机组装与调试为核心,阐述了无人机组装与调试的基本原理、装配流程、调参方法以及不同地面站的应用。全书共分7个实训项目,分别介绍了无人机基础知识、无人机组装工艺与装配流程、APM/Pixhawk飞控 Mission Planner 地面站、Pixhawk 飞控 QGC 地面站、大疆 Ground Station 地面站、DJI Naza 与 DJI A2 自驾仪、三轴云台、相机、图传、雪花屏、遥控器使用等方面的内容。

本书可作为职业院校无人机应用技术及相关专业的配套教材,也可作为无人机普及培训教材和无人机爱好者的参考用书。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

多旋翼无人机组装与调试 / 刘静, 闫俊岭, 刘清杰  
编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2022.3  
ISBN 978-7-5643-8399-2

I. ①多… II. ①刘… ②闫… ③刘… III. ①无人驾  
驶飞机—组装②无人驾驶飞机—调试方法 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 238136 号

---

Duoxuanyi Wurenji Zuzhuang yu Tiaoshi

### 多旋翼无人机组装与调试

刘静 闫俊岭 刘清杰 编著

---

责任编辑 何明飞

封面设计 吴兵

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川森林印务有限责任公司

---

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 24.5

字数 613 千

版次 2022 年 3 月第 1 版

印次 2022 年 3 月第 1 次

定价 59.00 元

书号 ISBN 978-7-5643-8399-2

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 高校无人机应用技术专业新形态系列教材

## 编写委员会

### 主任委员

刘建超 国家教学名师 成都航空职业技术学院

### 副主任委员

何敏 云影系列无人机总设计师 成都飞机工业(集团)有限责任公司  
李屹东 翼龙系列无人机总设计师 中航(成都)无人机系统股份有限公司  
李中华 国家英雄试飞员 中国人民解放军空军指挥学院  
冯文全 北京航空航天大学  
任斌 成都纵横自动化技术股份有限公司  
董秀军 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室  
张秦罡 自然资源部第三航测遥感院

### 总主编

何先定 刘建超 李屹东

### 执行编委(按拼音排序)

陈世江	重庆电子工程职业学院	江启峰	西华大学航空航天学院
李乐	国网乐山供电公司	李兴红	成都理工大学工程技术学院
刘清杰	四川航天职业技术学院	卢孟常	贵州航天职业技术学院
王福成	黑龙江八一农垦大学	王晋誉	上海民航职业技术学院
王利光	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	王永虎	重庆交通大学
魏永峭	兰州理工大学	吴道明	重庆航天职业技术学院
许云飞	成都航空职业技术学院	徐绍麟	云南林业职业技术学院
查勇	天府新区通用航空职业学院	周军	厦门大学

### 委员(按拼音排序)

陈宗杰	成都航空职业技术学院	戴升鑫	成都航空职业技术学院
邓建军	成都航空职业技术学院	段治强	成都航空职业技术学院
范宇航	成都航空职业技术学院	房梦旭	成都航空职业技术学院
冯成龙	成都航空职业技术学院	付鹏	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
何达	成都航空职业技术学院	何国忠	四川航天中天动力装备有限责任公司
何云华	成都工业学院	胡浩	天府新区航空旅游职业学院
姜舟	成都航空职业技术学院	蒋云帆	西华大学航空航天学院
李恒	成都航空职业技术学院	李林峰	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
李艳	成都航空职业技术学院	李宜康	成都航空职业技术学院

李懿珂	成都纵横大鵬无人机科技有限公司	李志鹏	中航（成都）无人机系统股份有限公司
李志异	成都航空职业技术学院	廖开俊	中国人民解放军空军第一航空学院
刘 驰	四川航天中天动力装备有限责任公司	刘 旻	成都纵横大鵬无人机科技有限公司
刘 健	山西机电职业技术学院	刘佳嘉	中国民用航空飞行学院
刘 静	重庆科创职业学院	刘明鑫	成都航空职业技术学院
刘 霞	重庆航天职业技术学院	马云峰	成都纵横大鵬无人机科技有限公司
梅 丹	中国人民解放军海军工程大学	牟如强	成都理工大学工程技术学院
潘率诚	西华大学	屈仁飞	成都西南交大研究院有限公司
瞿胡敏	四川傲势科技有限公司	任 勇	重庆电子工程职业学院
沈 挺	重庆交通大学	宋 勇	四川航天中天动力装备有限责任公司
唐 斌	成都航空职业技术学院	田 园	成都航空职业技术学院
王 聪	成都航空职业技术学院	王国汁	中航（成都）无人机系统股份有限公司
王 进	成都纵横大鵬无人机科技有限公司	王朋飞	西安航空职业技术学院
王 强	成都航空职业技术学院	王泉川	中国民用航空飞行学院
王思源	成都航空职业技术学院	王文敬	中国民用航空飞行学院
王 旭	成都航空职业技术学院	王 洵	成都航空职业技术学院
魏春晓	成都航空职业技术学院	吴 可	重庆交通大学
吴 爽	中航（成都）无人机系统股份有限公司	谢燕梅	成都航空职业技术学院
邢海涛	云南林业职业技术学院	熊 斌	重庆交通大学
徐风磊	中国人民解放军海军工程大学	许开冲	成都纵横自动化技术股份有限公司
闫俊岭	重庆科创职业学院	严向峰	成都航空职业技术学院
杨 芳	成都航空职业技术学院	杨谨源	中航教育科技（天津）有限公司
杨 琴	成都理工大学工程技术学院	杨 锐	成都纵横自动化技术股份有限公司
杨少艳	成都航空职业技术学院	杨 雄	重庆航天职业技术学院
杨 雪	成都航空职业技术学院	姚慧敏	成都航空职业技术学院
尹子栋	成都航空职业技术学院	游 玺	成都纵横大鵬无人机科技有限公司
张 捷	贵州交通技师学院	张 梅	成都农业科技职业学院
张 松	四川零坐标勘察设计有限公司	张惟斌	西华大学
张 伟	成都纵横大鵬无人机科技有限公司	赵 军	重庆电子工程职业学院
郑才国	成都理工大学工程技术学院	周 彬	重庆电子工程职业学院
周佳欣	成都航空职业技术学院	周仁建	成都航空职业技术学院
邹晓东	中航（成都）无人机系统股份有限公司		

随着“中国制造 2025”的提出，我国加快推进以智能制造为核心的工业 4.0 战略。而作为智能制造与通用航空融合的无人机未来发展前景广阔，特别是民用无人机近几年发展迅速，在个人消费、植保、测绘、能源等领域被广泛应用。

2019 年 1 月，国务院印发《国家职业教育改革实施方案》（国发〔2019〕4 号，以下简称“职教 20 条”），明确了推进职业教育改革的目标任务和政策措施。本书是在领会“职教 20 条”文件精神，推动职业教育大改革大发展的背景下，以能力为本位，努力构建产学结合的人才培养模式，强调教学内容的岗位针对性、重视实践教学环节、重视实际工作能力的培养。

本书以多旋翼无人机组装、调试、操控为核心内容，阐述了多旋翼无人机组装与调试的基本原理、装配流程、调参步骤、开源地面站与商用地面站的使用等。全书共包含 7 个项目；项目 1 介绍了多旋翼无人机工作原理与组成；项目 2 介绍了无人机动力系统、飞控系统与遥控设备各部分的参数及选配方法；项目 3 介绍了两个开源飞控 ArduPilotMega（APM）和 Pixhawk 的构成与系统安装方法，项目 4 在讲解 Mission Planner 地面站飞行任务规划界面的基础上，介绍了如何使用地面站的航迹规划命令规划航点和事件任务，为后续学习无人机操控打下基础；项目 5 介绍了 QGround Control 地面站软件的安装和使用方法；项目 6 分别介绍了大疆 F450 多旋翼平台搭载商用飞控 Naza 自驾仪以及大疆 S1000+ 搭配 A2 自驾仪的安装和调试操作要点；项目 7 主要介绍了多旋翼无人机的飞行与操控注意事项、操作步骤以及各种飞行练习方法。

本书在编写过程中本着通俗易懂、可操作性强的原则，力求内容丰富实用，既有系统的理论介绍，又有直接指导实操的技巧和方法。本书可作为职业院校无人机应用技术及相关专业的配套教材或参考教材，也可作为无人机普及培训教材和无人机爱好者的参考用书。

本书大部分内容由重庆科创职业学院闫俊岭撰写完成并统稿，重庆科创职业学院刘静和成都航天职业学院刘清杰参与了部分内容的编写，重庆科创职业学院学报编辑胡文平博士对全文进行了审核，在此表示感谢！

由于编者水平、经验有限，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

本书参考学时如下：

课程内容	学时
项目 1 多旋翼无人机工作原理与组成	6
项目 2 无人机动力系统、飞控系统与遥控设备认知	8
项目 3 开源飞控组装与调试	20
项目 4 Mission Planner 地面站高级应用	10
项目 5 QGroundControl 地面站使用	6
项目 6 大疆商用飞控无人机组装与调试	6
项目 7 多旋翼无人机飞行与操控	6
机动	2
总计	64

闫俊岭

2021 年 10 月

项目 1 多旋翼无人机工作原理与组成 .....	1
任务 1 四旋翼无人机工作原理认知 .....	2
任务 2 四旋翼无人机基本组成认知 .....	4
任务 3 开源飞控与商品飞控对比及选配 .....	9
【思考与练习】 .....	17
项目 2 无人机动力系统、飞控系统 with 遥控设备认知 .....	18
任务 1 动力系统认知 .....	19
任务 2 飞行控制系统认知 .....	41
任务 3 动力系统搭配与多旋翼设计流程 .....	50
任务 4 遥控设备认知 .....	57
【思考与练习】 .....	65
项目 3 开源飞控组装与调试 .....	67
任务 1 ArduPilotMega 飞控构成与硬件安装 .....	68
任务 2 Pixhawk 飞控构成与硬件安装 .....	76
任务 3 常用地面站及 Mission Planner 简介 .....	83
任务 4 飞控固件与硬件平台简介 .....	89
任务 5 机型选择与加速度校准 .....	100
任务 6 罗盘校准 .....	105
任务 7 遥控输入校准 .....	111
任务 8 伺服控制输出 Servo Output .....	113
任务 9 电调校准 ESC Calibration .....	119
任务 10 飞行模式设置与注释 .....	129
任务 11 失控保护设置 .....	152
任务 12 可选外围硬件 .....	159
任务 13 地理围栏 .....	172
任务 14 基本调参扩展调参与辅助功能开关 .....	176
任务 15 标准参数高级参数与全部参数表 .....	195
任务 16 飞行准备与解锁前检查 .....	201
任务 17 三轴云台安装调试 .....	205
任务 18 图传相机与雪花屏安装调试 .....	213
【思考与练习】 .....	217



项目 4 Mission Planner 地面站高级应用 .....	218
任务 1 地面站高级选项 .....	218
任务 2 飞行规划与指令 .....	232
任务 3 飞行任务规划与自动任务流程 .....	244
任务 4 转场点设置与仿地飞行 .....	253
任务 5 飞行日志任务回放与故障诊断 .....	256
【思考与练习】 .....	279
项目 5 QGroundControl 地面站使用 .....	280
任务 1 前期准备 .....	280
任务 2 QGC 地面站界面功能 .....	283
任务 3 菜单介绍 .....	287
任务 4 飞行设置 .....	290
任务 5 飞行规划 .....	304
任务 6 飞行数据 .....	306
任务 7 飞行调试 .....	307
【思考与练习】 .....	309
项目 6 大疆商用飞控无人机组装与调试 .....	310
任务 1 F450 多旋翼平台 Naza 自驾仪安装 .....	310
任务 2 大疆 S1000+ 搭配 A2 自驾仪组装与调试 .....	321
任务 3 大疆 Ground_Station 地面站使用与 AOPA 考核 .....	336
【思考与练习】 .....	348
项目 7 多旋翼无人机飞行与操控 .....	349
任务 1 多旋翼飞行注意事项 .....	349
任务 2 飞行练习方法 .....	352
任务 3 航拍新手必练的 8 种基本运动 .....	359
【思考与练习】 .....	362
参考文献 .....	363
附录 1 多旋翼无人机装配流程卡 .....	364
附录 2 中国 AOPA 民用无人机驾驶员地面站科目题库 .....	378
附录 3 常用资源链接 .....	383



## 项目 1

# 多旋翼无人机工作原理与组成

无人机是无人驾驶飞机的简称（Unmanned Aerial Vehicle，UAV），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，包括无人直升机、固定翼机、多旋翼飞行器、无人飞艇、无人伞翼机等。广义的无人机也包括临近空间飞行器（20~100 km 空域），如平流层飞艇、高空气球、太阳能无人机等。某种意义上而言，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，可以被看作“空中机器人”。

### 学习目标

#### 1. 知识目标

了解开源飞控的基本知识，掌握四旋翼无人机的总体架构、基本组成、工作原理。

#### 2. 技能目标

掌握 Arduino、MWC、APM、PX4 和大疆 Naza 飞控的选配方法。

#### 3. 思政目标

加强学生的思想政治教育，培养学生科学的思维方法，严谨的工作态度。

## 任务分析

无人机按飞行平台构型分为固定翼无人机[见图 1.1.1(a)]、单旋翼无人机[见图 1.1.1(b)]、多旋翼无人机[见图 1.1.1(c)]、无人飞艇、伞翼无人机、扑翼无人机、复合翼无人机等几大类；按用途可划分为民用无人机和军用无人机。其中，四旋翼无人机具有结构简单、机动性强、可垂直起降、定点悬停、安全性高、操控灵活、携带方便等特点，已经被广泛地应用于航拍、灯光秀表演、巡检、勘探测绘、应急救援等场景，实现了“无人机+农业”“无人机+环保”“无人机+交通”等应用场景，与传统行业相结合开辟出新“蓝海”。

## 任务 1 四旋翼无人机工作原理认知

四轴飞行器是飞行器的一类。对它进行控制一般具有 4 个基本操作如下：

- (1) throttle: 油门 (控制动力输出大小)。
- (2) pitch: 俯仰 (就是机头上下, 绕  $y$  轴旋转)。
- (3) roll: 横滚 (左右偏, 绕  $x$  轴旋转)。
- (4) yaw: 偏航 (转向, 改变航线, 绕  $z$  轴旋转)。

对于固定翼, 可通过横滚和俯仰来实现偏航效果。

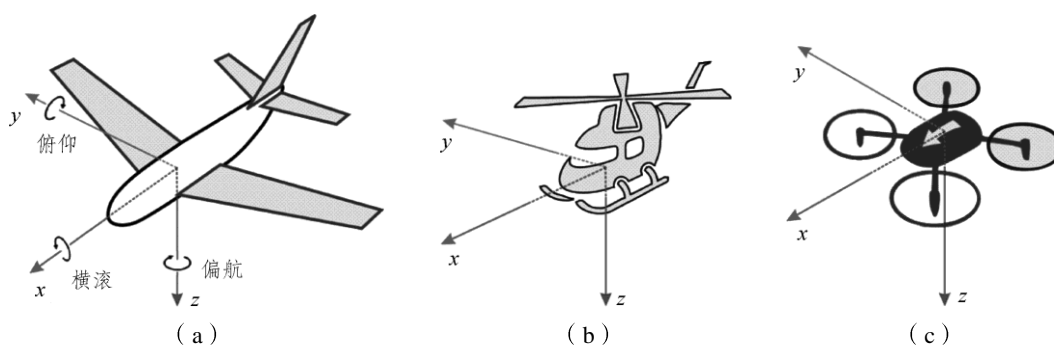


图 1.1.1 三种架构无人机

### 1. 四轴架构

四轴飞行器 4 台电机成十字形排列, 驱动 4 片桨旋转产生向上推力, 4 台电机轴距几何中心距离相等, 当对角两根轴产生的升力相同时能够保证力矩平衡, 四轴不会向任何一个方向倾转。4 台电机一对采取正转, 一对反转的方式使得绕垂直轴方向旋转的反扭矩平衡, 保证了四轴航向的稳定。通过控制 4 个力的大小就可以实现四轴飞行器的前进、后退、转向 (偏航) 和旋转。

与传统的飞行器相比, 四旋翼飞行器有下列优势: 各个旋翼对机身所施加的反扭矩与旋翼的旋转方向相反, 当电机 1 和电机 3 逆时针旋转的同时, 电机 2 和电机 4 顺时针旋转, 可以平衡旋翼对机身的反扭矩。

根据用户自定义机头位置不同, 四轴飞行器可以分为“X”模式和“十”模式。“X”模式的机头方向位于两台电机之间, 而“十”模式的机头方向位于某一台电机上。“X”和“十”是表示正对机头方向时飞行器的形状。根据电机分布的位置, 常见的四轴飞行器类型有以下几种:

- (1) 四轴“十”模式 (见图 1.1.2), 4 台电机成十字分布, 对头方向是 M4 电机方向 (M 代表电机, 箭头代表电机旋转方向)。

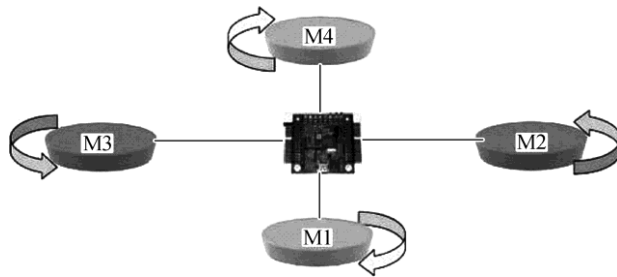


图 1.1.2 四轴“十”模式

(2) 四轴“X”模式 (见图 1.1.3), 4 台电机成 X 形分布, 对头方向是 M4 和 M2 的中间点。

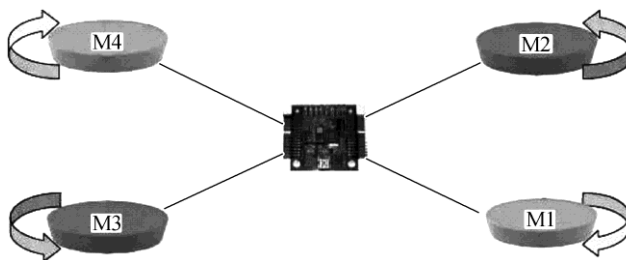


图 1.1.3 四轴“X”模式

(3) 四轴“Y”模式 (见图 1.1.4), M1 和 M3 电机正反安装在同一个中轴上, 对头方向是 M4 和 M2 的中间点。

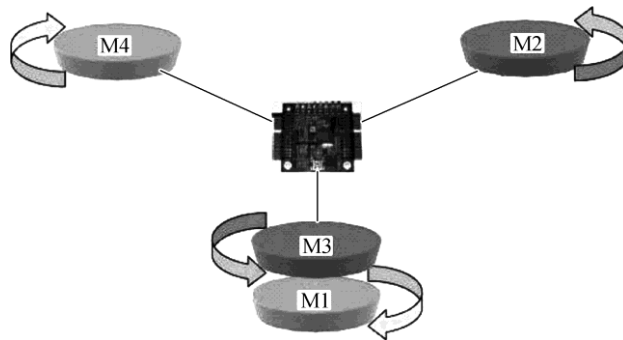


图 1.1.4 四轴“Y”模式

## 2. 四轴飞行工作原理

飞行器的主要飞行动作有垂直 (升降) 运动、俯仰 (前后) 运动、横滚 (左右侧向) 运动和偏航 (方向旋转) 运动 (见图 1.1.5)。

垂直 (升降) 运动即控制油门, 推油门上升, 拉油门降低, 所有升力来自旋翼。

俯仰运动。在固定翼中是靠推拉升舵来实现, 四轴则是通过控制其中 4 个 (十字模式 2 个) 轴线上的电机转速来实现的。如图 1.1.5 所示, 1 号 3 号电机提速, 2 号 4 号电机降速, 四轴沿 X 轴方向仰起。并且, 俯仰运动的同时, 四轴也会做前后运动, 四轴发生一定程度的倾斜, 从而使旋翼拉力产生水平分量, 因此可以实现飞行器的前飞运动。向后飞行与向前飞

行的操作相反。

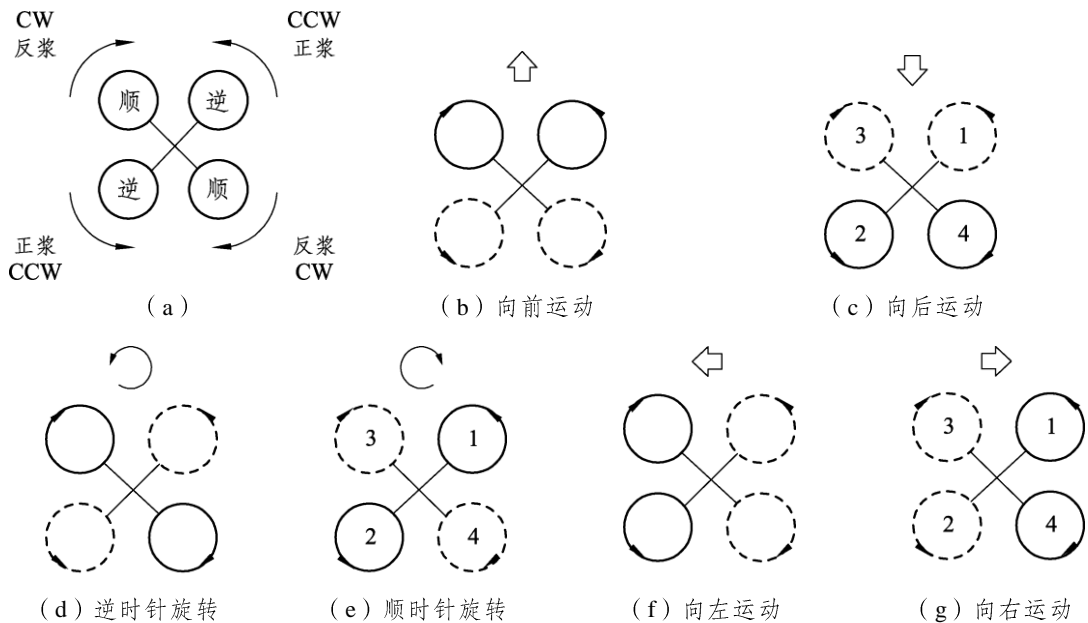


图 1.1.5 横滚、俯仰与偏航运动

横滚运动。在固定翼中靠控制副翼实现，四轴则也是通过控制其中 4 个（十字模式 2 个）轴线上的电机转速实现的。和仰俯运动控制方式一样，只是作用的电机不同而已。如图 1.1.5 所示，2 号和 3 号电机提速，1 号和 4 号电机降速，四轴沿 Y 轴方向翻滚。并且，小幅度的横滚运动，会导致四轴做侧向运动。

偏航运动，在固定翼中控制方向舵实现，四轴则通过反扭力来实现。旋翼转动过程中，由于空气阻力作用会形成与转动方向相反的反扭力，为了克服反扭力的影响，4 个旋翼，2 个正转，2 个反转，且对角线上的旋翼转动方向相同。反扭力的大小与旋翼转速有关，当 4 台电机转速相同时，四个旋翼产生的反扭力相互平衡，四旋翼飞行器不发生转动；当 4 台电机转速不完全相同时，不平衡的反扭力会引起四旋翼飞行器水平转动，从而实现偏航运动。如图 1.1.5 (e) 所示，1、2 号电机转速提高，3、4 号电机转速降低，四轴就会水平（顺时针）旋转，由于总体的升力不变，所以不会导致四轴上升或下降。

## 任务 2 四旋翼无人机基本组成认知

通常一个四轴飞行器由机架、飞控、电调、电机和桨片等设备和部件构成。由于每个设备和部件有很多类型，要组装一台四轴飞行器，需要综合考虑各种因素，制作者必须细心挑选相应的设备和部件，才能做出一台适合自己、开销合理的四轴飞行器。下面将详细讲解这些设备的种类，以及如何选择合适的设备。

## 1. 机 架

机架虽然不是四轴飞行器的核心部件，但也是不可或缺的部件。要选择一个好的机架需要先了解机架的种类，并明确自己的需求。本节就机架的种类和选择展开详细讲解。

### 1) 机架构造

在四轴飞行器中，机架相当于人体的骨骼，机架决定了飞行器的主体结构，如图 1.2.1 所示。机架是飞行器的基础平台，电机、电调和飞控（飞行控制器）等设备都安装在机架上面。机架主要作用如下：

(1) 提供安装接口。这些接口包括安装和固定电机、电调、飞控的螺纹孔。

(2) 提供整体稳定的和坚固的平台。飞行器飞行过程中需要一个稳定坚固的平台，可以使电机转动过程中不会损坏其他设备，并保障传感器稳定工作。

(3) 起落架等缓冲装备。这些装备可以为飞行器提供安全的起飞和降落条件，避免损坏其他仪器。

(4) 保证足够低的质量（重量）。这样就可以给其他控制设备提供更多的余量。

(5) 提供相应的保护装置。这些保护装置用于保护飞行器本身和可能接触到的操作人员。因为飞行过程中会存在各种不可预知的情况，一定的保护措施可以减少不必要的损失。

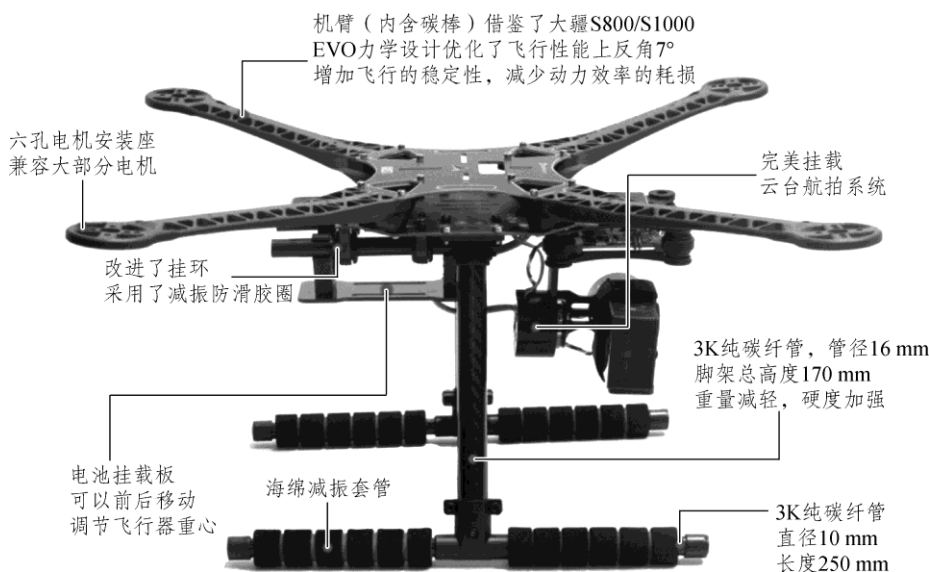


图 1.2.1 Holybro S500 机架

### 2) 机架类型

在组装四轴飞行器时，除了最重要的飞控选择比较困难外，其次就是机架的选择。机架的重量决定了整个飞行器的基础重量，从而间接影响飞行器的载重和飞行时间。而这主要是由机架的材质决定的，按材质可分为 3 类机架。

#### (1) 玻璃纤维机架。

玻璃纤维机架强度比塑胶机架强度要高（即“耐摔”）。因为其强度较高，所以常常制作



成长长的管道形，这样需要的材料很少，可减少整体机架的重量。

### （2）碳纤维机架。

碳纤维机架与玻璃纤维的机架在性能上相差无几，但碳纤维机架更有发展前景。相对来说，玻璃纤维和碳纤维的机架价格比其他机架贵一些，但是，考虑到省下来的重量，有时候可以考虑使用这些材料。碳纤维机架如图 1.2.2 所示。



图 1.2.2 碳纤维机架

### （3）塑胶机架。

塑胶机架的主要特点是，具有一定的刚度和强度，同时又有一定的可弯曲度，适合初学者，相对来说较为廉价。图 1.2.3（b）所示为一种塑胶机架。

#### 3）机架选配（推荐机架）

目前市面上有成品的机架提供，它们是已经制作完成的机架，包括各种螺丝孔、安装飞控和其他设备的平台。只需要将各种设备连接，并拧上螺丝即可进行调试。

四轴机架种类繁多，下面介绍两种：F550 机架和 S500 机架。

#### （1）F550 机架。

F550 机架是 DJI（大疆）为了满足大多数航模爱好者而开发的一套机架，如图 1.2.3（a）所示。它主要包括 6 个悬臂、一块下板和一块上板。悬臂主要安装电机并连接上板与下板，同时可以固定电调。在下板上，生产商已经设计了相应电路，电路主要用于给 6 个电调供电。上板可以固定飞控和接收器（接收器用于接收遥控器信号）等。详细安装方式，可以参阅后面的项目。

#### （2）S500 机架。

S500 四轴机架是一款专为航拍设计的，入门级首选高性价比四轴机架。机臂借鉴了大疆 S800 EVO 的力学设计，并优化了飞行性能，上反角机臂，在增加飞行稳定性的同时，最大限度减少了动力的效率损耗。超硬机臂，碳纤维塑料混合材料，超越市面上任意一款塑料机臂的强度。兼容市面上绝大部分电机（包括普通电机和盘式电机），快捷电池挂载设计，电池更换方便快捷。可挂载 DJI H3-2D 云台、飞越 GoPro Hero3 云台及其他 GoPro 云台。



图 1.2.3 F550 与 S500 塑胶机架

#### 4) 机架选配原则

选择机架时，需要掌握如下原则：

(1) 机架强度：直接决定了飞控的寿命。

(2) 安装的难易度：对于初学者，使用安装简单的机架，可将精力集中于调试。

(3) 合理布线：首先，合理布线首先是为了容易区分不同的线路；其次，容易理清制作者思路清晰，而且制作出的飞行器比较美观。

(4) 机架质量：在飞行中，质量是一个重要的问题，飞行器每增重 1g 都会增加电机的负荷。

(5) 机架成本：这是一个最实际的问题，也是最需要考虑的问题。制作飞行器是一个很花费钱财的事情，只有量入为出才能设计出最有性价比的产品。

从上面 5 个问题入手，根据个人不同需求，可以选择适合自己的机架。

## 2. 电机与电调

电机与电调属于飞行器动力系统的核心部件。航空模型就是通过遥控对电子调速器的控制，驱动无刷电机，以达到调整飞机的各种飞行姿势和动作。

电调全称为电子调速器 (Electronic Speed Controller, ESC) 如图 1.2.4 所示。飞控可以通过控制电调控制电机转速的速度，从而控制飞行器的飞行姿态。电调采用直流供电，通常由 2~6 节锂电池供电。输出三相交流电，可以直接驱动电机。另外，航模无刷电子调速器还有 3 根信号输入线，用于连接接收机。信号线可以引出稳定的 5V 电压，一般可以给 2~4 个舵机供电。



图 1.2.4 电调

电机（见图 1.2.5）是四轴飞行器的主要动力来源，它也和飞行器的飞行姿态密切相关。电机的转速快慢决定了飞行器可以承载的重量。同时，其转速改变的快慢可以影响飞行器姿态的变换，这一能力常用 KV 值来衡量。无刷电机的 KV 值定义为转速每伏，即输入电压增加 1 V，无刷电机空转转速增加的转速值。



图 1.2.5 电机

### 3. 飞 控

飞行控制系统（简称飞控）是无人机完成起飞、空中飞行、执行任务和返场回收等飞行过程的核心系统，飞控对无人机的作用相当于驾驶员对于有人机控制。其功能主要有无人机姿态稳定和控制、无人机任务设备管理和应急控制三大类。

飞控载有加速度计、陀螺仪、气压计、罗盘等传感器，如图 1.2.6 所示。常见的飞控有极飞 XAircraft 的 SuperX、DJI 的 Naza/WKM/A2、零度的 X4 双子星、APM、MWC、QQ 飞控、CC3D 等。



图 1.2.6 飞行控制器

总之，四轴飞行器的飞控的功能有两种：第一，接收来自遥控器的信号，控制电调输出，进而调整螺旋桨的转速以调节飞行器起飞、悬停、俯仰、滚转、偏航、降落等动作；第二，通过板载的一系列测量元件，在无控制的情况下，通过电调输出，控制四轴飞行器稳定，保证一定的高度。

## 任务3 开源飞控与商品飞控比对及选配

本节任务介绍几种较为常用的飞控，并对如何选择一款合适的飞控提出建议。

### 1. 飞控的作用

飞控是飞行控制集成电路板的简称，同时它能实现很多复杂的功能。

(1) 处理来自遥控器或自动控制的信号，这时飞控需要识别遥控器或自动控制的信号，完成要求的飞行姿态或其他指令。

(2) 控制电调，飞控给电调发送信号调节电机转速，实现控制改变飞行姿态的功能。

(3) 飞控通过一些板载的测量元件，在没有任何外界控制的情况下，通过调整电调的输出信号保持四轴飞行器的稳定。

除了这些必备功能，有些成品的飞控还有其他功能，如固件烧写和云台搭载。为实现这些功能，需要飞控提供额外的接口，在固件程序中有相应的处理过程。

### 2. 飞控的分类

飞控按照是否公开源代码分为开源飞控和商品飞控：

#### 1) 开源飞控

目前，开源飞控主要有 KK MicroCopter、Paparazzi、AutoQuad、OpenPilot、MWC、APM、PX4 FMU/IO 与 Pixhawk 等。Paparazzi 是飞控开源的开山鼻祖，以算法强大和稳定性高著称，MCU 采用 ST 和 NXP 的方案。用户最多的是 APM，在经历基于 Arduino 的发展后，现在已经逐步过渡到 PX4/Pixhawk 平台，采用双 ST MCU、冗余电源及传感器的方案，以满足更苛刻的需求和功能。

#### 2) 商品飞控

国内商品飞控，如大疆、极飞、零度、亿航等。

开源飞控和商品飞控各有优缺点。开源飞控制作者自立性强，能根据自己的需求制作出各自特色的飞行器，但是对用户技能要求高，对新手不友好。商品飞控易于上手，外观漂亮，算法已经过制造商优化，对整体结构进行了优化，简化了调参和线束，但用户可以调整的范围较小，成品缺乏个性。

本书主要讲解开源飞控的代表 APM 和 Pixhawk 以及商品飞控的代表 DJI。

### 3. 开源飞控知识

开放源代码促进会 (Open Source Initiative, OSI)，又译作开放源代码组织，是一个旨在推动开源软件发展的非营利组织。

开源 (Open Source) 的概念最早应用于软件，用其描述源码可以被公众使用的软件，并且此软件的使用、修改和发行也不受许可证的限制。每一个开源项目均拥有自己的论坛，由团队或个人进行管理，论坛定期发布开源代码，而对此感兴趣的程序员都可以下载这些代码，并对其进行修改，然后上传自己的成果，管理者从众多的修改中选择合适的代码改进程序并

再次发布新版本。如此，形成“共同开发、共同分享”的良性循环。

开源软件的发展逐渐与硬件相结合，产生了开源硬件。开源硬件的原则声明和定义是由开源硬件协会（Open Source Hardware Association, OSHWA）的委员会及其工作组，以及其他更多的人员共同完成。硬件与软件不同之处是实物资源应该始终致力于创造实物商品。因此，生产在开源硬件（OSHW）许可下的品目（产品）的人和公司有义务明确该产品没有在原设计者核准前被生产、销售和授权，并且没有使用任何原设计者拥有的商标。硬件设计源代码的特定格式可以被其他人获取，以方便对其进行修改。在实现技术自由的同时，开源硬件提供知识共享并鼓励硬件设计开放交流贸易。

开源硬件（OSHW）定义 1.0 是在软件开源定义基础上定义。该定义由 Bruce Perens 和 Debian 的开发者作为 Debian 自由软件方针而创建。

开源飞控是建立在开源思想基础上的自动飞行控制器项目（Open Source Auto Pilot），同时包含开源软件和开源硬件，而软件则包含飞控硬件中的固件和地面站软件两部分。爱好者不但可以参与软件的研发，也可以参与硬件的研发，不但可以购买硬件开发软件，也可以自制硬件，这样便可让更多人自由享受该项目的开发成果。

开源项目的使用具有商业性，所以每个开源飞控项目都会给出官方的法律条款以界定开发者和使用者的权利，不同的开源飞控对其法律界定都有所不同。

开源飞控的发展可分为三代：

第一代开源飞控系统使用 Arduino 或其他类似的开源电子平台为基础，扩展连接各种 MEMS 传感器，能够让无人机平稳地飞起，其主要特点是模块化和可扩展能力。

第二代开源飞控系统大多拥有自己的开源硬件、开发环境和社区，采用全集成的硬件架构，将全部 10DOF 传感器、主控单片机，甚至 GPS 等设备全部集成在一块电路板上，以提高可靠性。它使用全数字三轴 MEMS 传感器组成航姿系统（IMU），能够控制飞行器完成自主航线飞行，同时可加装电台与地面站进行通信，初步具备完整自动驾驶仪的功能。此类飞控支持多种无人设备，包含固定翼飞行器、多旋翼飞行器、飞行器和飞机等，并具备多种飞行模式，包含手动飞行、半自主飞行和全自主飞行。第二代飞控的主要特点是高集成性、高可靠性，其功能已经接近商业自动驾驶仪标准。

第三代开源飞控系统将会在软件和人工智能方面进行革新。它加入集群飞行、图像识别、自主避障、自动跟踪飞行等高级飞行功能，向机器视觉、集群化、开发过程平台化的方向发展。

#### 4. Arduino 飞控

Arduino 是最早的开源飞控，由 Massimo Banzi、David Cuartielles、Tom Igoe、Gianluca Martino、David Mellis 和 Nicholas Zambetti 于 2005 年在意大利交互设计学院合作开发而成。Arduino 公司首先为电子开发爱好者搭建了一个灵活的开源硬件平台和开发环境，用户可以从 Arduino 官方网站取得硬件的设计文档，调整电路板及元件，以符合自己实际设计的需要。

使用者可以通过与其配套的 Arduino IDE 软件查看源代码并上传自己编写的代码，Arduino IDE 使用的是基于 C 语言和 C++ 的 Arduino 语言，十分容易掌握，并且 Arduino IDE 可以在 Windows、Macintosh OSX 和 Linux 三大主流操作系统上运行。

随着该平台逐渐被爱好者所接受，各种功能的电子扩展模块层出不穷，其中最为复杂的便是集成了 MEMS 传感器的飞行控制器。为了得到更好的飞控设计源代码，Arduino 公司决定开放其飞控源代码。著名的开源飞控 MWC 和 APM 都是 Arduino 飞控的直接衍生产品，至今仍然使用 Arduino 开发环境进行开发。

## 5. MWC 飞控

MultiWiiCopter (MWC) 飞控是一款典型的 Arduino 衍生产品，是专为多旋翼开发的低成本飞控，它完整地保留了 Arduino IDE 开发和 Arduino 设备升级和使用方法。除了支持常见的四、六、八旋翼以外，该飞控的最大特点是支持很多奇特的飞行器类型，比如三旋翼、阿凡达飞行器 (BiCopter avatar style)、Y4 型多旋翼 (其中两轴为上下对置) 等，使得该飞控的开发趣味性较强，被爱好者广泛接受。

2012 年,MultiWii 论坛上的一位成员“timecop”发布了一个将 MWC 代码移植到 STM32F103 单片机上的项目，命名为 baseflight，成为 MWC 在 32 位单片机平台上的一个分支，其硬件设计源自中国的一款“MMC10 飞控” (前身为 FF 飞控)，后被一位日本人对其进行优化改良，便有了 Naze32 飞控。再后来又有人在 baseflight 的算法基础上对程序架构进行了改善，形成了 baseflight 的一个分支 cleanflight，支持包括 Naze32、CC3D 在内的数款飞控。MWC 飞控改良 Naze32 如图 1.3.1 所示。

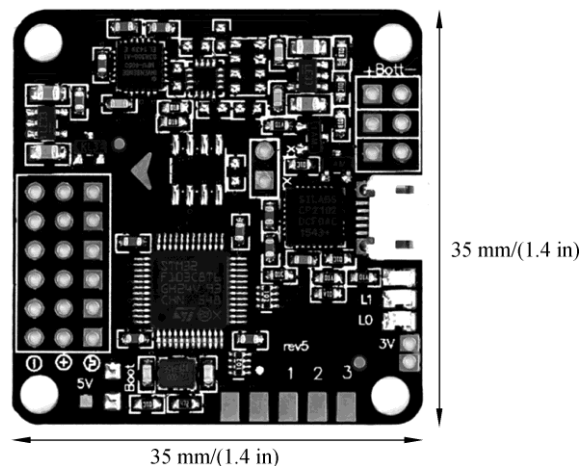


图 1.3.1 基于 MWC 飞控改良版本 Naze32 板

MWC 主要功能如下 (以 MWC MEGA-2.0 为例):

- (1) 8 路 PWM 输入。
- (2) 10 路 PWM 输出，主要用于电调信号，所以最多支持十轴飞行器的飞行。
- (3) 2 轴云台输出与快门舵机输出，用来控制云台和快门。
- (4) 1 路串口用于连接蓝牙适配器、OSD、GPS 和数传，用于飞行器的扩展功能。
- (5) MPU6050，包含了三轴数字陀螺仪与 3 种数字加速度传感器。
- (6) 高精度数字气压传感器，用于测量气压。
- (7) 三色状态指示 LED，用于反馈信息，各种不同的方式对应不同的模式或参数。

## 6. APM 飞控

APM (ArduPilotMega) 是在 2007 年 5 月由 DIY 无人机社区 (DIY Drones.com) 推出的飞控产品, 是当今最为成熟的开源硬件项目。APM 基于 Arduino 的开源平台, 对多处硬件做出了改进, 包括加速度计、陀螺仪和磁力计组合惯性测量单元 (IMU)。由于 APM 良好的可定制性, APM 在全球航模爱好者范围内迅速传播。通过开源软件 Mission Planner, 开发者可以对 APM 进行配置, 接收并显示传感器的数据, 使用 Google map 完成自动驾驶等功能, 但是 Mission Planner 仅支持 Windows 操作系统。

目前, APM 飞控已经成为开源飞控成熟的标杆, 是基于惯性导航的开源自驾仪。可支持多旋翼、固定翼、飞行器和无人驾驶车等无人设备。针对多旋翼, APM 飞控支持各种四、六、八轴产品, 并且连接外置 GPS 传感器能够增稳, 并完成自主起降、自主航线飞行、返航、定高、定点等丰富的飞行模式。APM 能够连接外置的超声波传感器和光流传感器, 在室内实现定高和定点飞行。

## 7. PX4 和 Pixhawk

PX4 是一个软硬件开源项目 (遵守 BSD 协议), 目的是为学术、爱好和工业团体提供一款低成本、高性能的高端自驾仪。这个项目源于苏黎世联邦理工大学的计算机视觉与几何实验室、自主系统实验室和自动控制实验室的 Pixhawk 项目。PX4FMU 自驾仪模块运行高效的实时操作系统 (RTOS), NuttX 提供可移植操作系统接口 (POSIX) 类型的环境。软件可以使用 USB bootloader 更新。PX4 通过 MAVLink 同地面站通信, 兼容的地面站有 QGroundControl 和 Mission Planner, 软件全部开源且遵守 BSD 协议。

由 3DR 联合 APM 小组与 PX4 小组于 2014 年推出的 Pixhawk 飞控是 PX4 飞控的升级版, 拥有 PX4 和 APM 两套固件和相应的地面站软件。该飞控是目前飞控产品中硬件规格最高的, 也是当前爱好者手中炙手可热的产品。

Pixhawk 拥有 168 MHz 的运算频率, 并突破性地采用了整合硬件浮点运算核心的 Cortex-M4 的单片机作为主控芯片, 内置两套陀螺和加速度计 MEMS 传感器, 互为补充矫正, 内置三轴磁场传感器并可以外接一个三轴磁场传感器, 同时可外接一主一备两个 GPS 传感器, 在故障时自动切换。

基于其高速运算的核心和浮点算法, Pixhawk 使用最先进的定高算法, 可以仅凭气压高度计便将飞行器高度固定在 1 m 以内。它支持目前几乎所有的多旋翼类型, 甚至包括三旋翼和 H4 结构不规则的产品。它使飞行器拥有多种飞行模式, 支持全自主航线、关键点围绕、鼠标引导、“FollowMe”、对尾飞行等高级飞行模式, 并能完成自主调参。

Pixhawk 发展成独立的开源硬件项目, 不仅支持原生的 PX4 原生固件, 还支持 ArduPilot 飞行固件。

Pixhawk 飞控的开放性非常好, 数百项参数全部开放供玩家调整, 靠基础模式简单调试后亦可飞行。PIXHawk 集成多种电子地图, 爱好者可以根据当地情况进行选择。

## 8. 大疆飞控

大疆无人机在飞控系统上, 大致可以分为两类:

第一类为 WooKong-M/A2/A3/N3/A3 Pro 等都属于工业级商用的飞控系统。

第二类是 Naza 系列飞控系统，主打性价比，主要面向群体为电子或是模型爱好者。

#### 1) 大疆 Naza 系列飞控（俗称哪吒飞控）

主要分为 Naza-M Lite、Naza-M V1，Naza-M V2。Lite 为入门级产品，以 V1 平台开发，可以加 GPS，无更多扩展功能；V1 为第一代 Naza 产品，V2 为第二代 Naza 产品，在 V1 的基础上硬件结构做了优化，有极强的扩展性能，支持 ZenmuseH3-2D、NazaOSD、Naza 蓝牙模块、iOSD、地面站。Naza 飞控如图 1.3.2 所示。



图 1.3.2 Naza 飞控

功能特点：

- (1) 一体化设计，先进的姿态算法。
- (2) 多选控制模式，包括手动模式（可选手动、姿态、失控保护）、姿态模式、GPS 模式。
- (3) 智能方向控制，航向锁定/返航点锁定。
- (4) 增强型失控保护，包含自动降落/返航自动降落熄火。
- (5) 支持四旋翼 I、X，六旋翼 I、V、Y、IY，八旋翼 X、I、V。
- (6) 掰杆启动，停止类型分为立即模式和智能模式。
- (7) 远程调参。
- (8) 支持两轴云台增稳，云台舵机多频率支持（八轴时不支持云台）。
- (9) D-BUS 接口，支持 S.Bus 接收机，支持 PPM 接收机。
- (10) 电压检测和低压报警。
- (11) 四通道遥控器支持。
- (12) 马达调制中新增电机怠速五级可调。
- (13) IMU 校准。
- (14) 支持 PMU 扩展模块，可支持 iOSD、H3-2D 云台、Naza-M BTU 模块等设备。

对航模爱好者来说，Naza 飞控更合适，它避免了 APM/Pixhawk 的复杂操作。比其他开源飞控更好，而且可以保证更高的安全性。Naza 主要接线与调参详见项目 6。

#### 2) A3/N3/WooKong-M 飞控

WooKong-M 为 A 系列的前身，A2 是 A 系列的第一款产品，不支持 DJIGO。A3 是 A2 的升级版，采用全新的工业系统解决方案，集成厘米级精度的 D-RTK GNSS 模块且支持 DJIGO。A3 Pro 配备三套 IMU 和 GNSS 模块，A3 可通过两个 IMU + GNSS 升级套件升级至 A3 Pro。



N3 飞控如图 1.3.3 所示。



图 1.3.3 大疆 N3 飞控

在工业级应用上，A3 和 A3 Pro 提供全新的工业系统解决方案，可集成厘米级精度的 D-RTK GNSS 模块、智能电调、智能电池和 Lightbridge 2 高清图传。开发者可使用 DJI Onboard SDK 和 Mobile SDK 定制专属应用，实时获取飞行器状态信息，并且控制飞行器、云台和相机。A3 系列配备 CAN、API 等丰富的硬件接口，可连接第三方传感器或其他设备，针对各种行业应用对飞行平台进行灵活定制。

WooKong-M 飞控，如图 1.3.4 所示，俗称悟空飞控。WooKong-M 多旋翼飞控，是早期一款成熟的面向商用及工业用多旋翼平台的飞控系统。它支持市面上最常见的第三方电调，无须做任何线路的修改。WooKong-M 集成了高精度的感应器元件，运用了先进的温度补偿算法和工业化的精准校准算法，使系统发挥出稳定、高效、可靠的性能。



图 1.3.4 WooKoo-M 飞控

## 9. 零度双子星 (GEMINI) 飞控

零度双余度安全飞控系统(见图 1.3.5)，它集成了两套独立工作的 MC(内置 IMU)、GPS、磁罗盘，当主控设备出现意外时，从控设备会自动接管飞行器的控制，提供多重安全保障。支持零度安全伞，意外情况自动开伞，保障飞行作业安全。



图 1.3.5 零度双子星飞控

功能特点：

- (1) 双余度安全飞行控制保障。
- (2) 意外情况自动开伞保护。
- (3) 黑匣子功能（航迹回放、故障分析）。
- (4) 自定义航点、自主导航、自动生成航线。
- (5) 断桨保护功能、失控保护。
- (6) 自动避让脚架、多种操作模式。
- (7) 支持多款相机拍照、一键全景。
- (8) 内置云台增稳功能、零度三轴无刷云台增稳。
- (9) 支持手机控制、手机报警、手机调参。
- (10) 支持 9 种常用多旋翼平台/支持自定义电机混控。

硬件规格及飞行特性：

- (1) 质量：主控 119 g，GPS 37 g，Wi-Fi 39 g。
- (2) 尺寸：主控 70.5 mm × 41 mm × 25 mm；GPS 55 mm（直径）× 11 mm；LED 17 mm × 17 mm × 5.5 mm；Wi-Fi 65 mm × 40 mm × 14.4 mm；IMU 内置主控。
- (3) 悬停精度（GPS 模式）：垂直方向 ± 0.5 m，水平方向 ± 1.5 m。
- (4) 最大平飞速度 10.2 m/s，最大倾斜角度 35°，最大升降速度 ± 5 m/s。

#### 10. 极飞航拍 SUPERX 和智能 MINIX 飞控

(1) 极飞科技（XAIRCRAFT）SUPERX 飞控：是针对专业航拍设计的一款应用级飞行控制系统，采用工业级陀螺仪、GPS 模块，飞行可靠，简单易用，无须安装调参软件，仅需少量设置和调试即可飞行。SUPERX 飞控系统内置飞行数据记录模块（黑匣子），可记录最近 40 min 的飞行数据，并内置电源管理模块（PMU），可保障飞控系统稳定工作。

SUPERX 系列产品包括 SUPERX2、SUPERX2 RTK、SUPERX3（见图 1.3.6）。SUPERX2 是一款专为农业植保设计的多旋翼飞行控制器。主要用于农业作物喷洒、浇灌、农作物生长状况及环境监控，能按照自主预定轨迹进行飞行，从而实现精准喷洒、避障停喷、断点续喷等主要功能。其内置的高精度 GPS 定位还可用于测量农田边界，在喷洒过程中，可实时监控飞行及喷洒状态。SUPERX2 RTK 为 X2 的升级版，基于 GNSS RTK 技术能提供厘米级别的高精度定位，同时具有强大的抗干扰能力，同时让航线避障功能也更加精准。



图 1.3.6 极飞 SUPERX3 飞控

(2) 极飞科技“极趣”智能多旋翼飞控：是针对多旋翼模型爱好者设计的新一代智能飞行控制系统，它不仅很好地延续了极飞飞控的稳定性和安全机制，而且通过高度集成的设计原理，大幅度减小了飞控系统的体积，极大降低了飞控安装和调试的复杂度，让飞行变得简单而触手可及。

### 11. 国内其他开源飞控

- (1) STC 小四轴。用 STC51 单片机做的开源飞控，适合学 51 单片机。
- (2) 匿名科创。自己开发的地面站，飞控代码、原理图都比较齐全，陆续推出了开拓者、领航者、拓空者系列，国内参加无人机竞赛的团队使用较多。
- (3) 中航恒拓。比较偏重竞赛和实验室教学。
- (4) Light 飞控。第一家能和 openmv 结合的飞控。
- (5) 无名科创。代码注释详尽，适合学 STM32 单片机。
- (6) 烈火开发板 STM32 飞控。适合学 STM32 单片机。
- (7) 正点原子开发板 STM32 飞控。适合学 STM32 单片机；
- (8) 圆点小博士。圆点早期 Wi-Fi 功能较为强大，目前已经落伍。

### 12. 飞控的选择

飞控的选择需要考虑多种因素。

#### 1) 经济条件

对于有 DIY 精神的模友可以选择 MWC、APM 和 Pixhawk 开源飞控，而对于那些有特殊需求的人(如高精度的航拍效果)需要采用 DJI 公司的 NazaA2/A3、WooKoo-M 或者零度 YS-X4 飞控(已经停产)。

#### 2) 操控性能需求

就操控性而言，建议新手选择成熟商用飞控，成熟的飞控操控性更好，而且能保证设备安全。

### 3) 特殊功能需求

有意开发多旋翼，自主动手能力强，可选择 APM 和 MWC 的飞控。  
如果只是想进行航拍或者电力架线等工作，推荐使用 DJI 的 Naza。

### 【思考与练习】

1. 简述四旋翼无人机的工作原理。
2. 解释开源硬件与开源软件的概念。
3. 简述四轴飞行器组成及各部分的作用。
4. 什么是开源飞控？它的发展经历了哪几代？
5. 无人机按照不同结构来分有哪些？并简述其优缺点。
6. 简述机架的选择原则。
7. 无人机与航模相比有哪些主要区别？
8. 对比几款大疆无人机的性能参数。
9. 已知大疆某款飞机，最大上升速度 6 m/s，最大下降速度 4 m/s，最大水平运动 P 挡为 14 m/s，请问在 20 min 内它能完成上升 2 000 m，而后前进 200 m 的任务吗？计算其高空作业的最大停留时间。