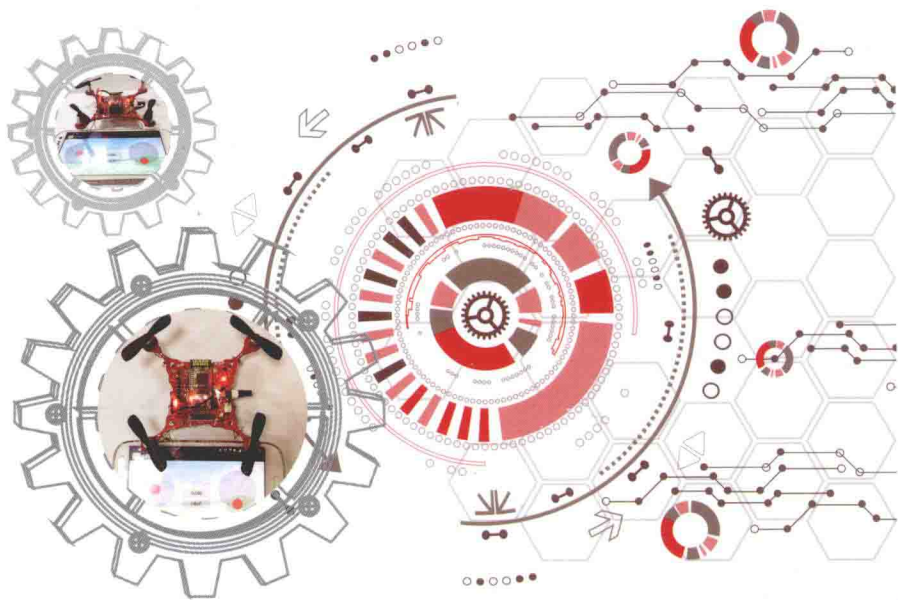


DIY四轴飞行器

基于MSP430F5系列单片机与Android

黄和悦 编著



基于作者自身参加四轴飞行器大赛的经验
深入讲述四轴飞行器的制作流程与核心算法
基于Android系统来实现移动互联的控制

嵌入式技术与应用丛书

DIY 四轴飞行器

——基于 MSP430F5 系列单片机与 Android

黄和悦 编著



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

四轴飞行器（四旋翼飞行器）是最近比较火的一种机电类设备，应用范围很广，从科技竞赛到航拍、侦查，随处可见四轴飞行器的身影。作者根据自己参加竞赛的实践经验编写了本书，引领读者DIY四轴飞行器。

本书以TI公司的MSP430F5为控制器，首先简要介绍了四轴飞行器的历史，给出了四轴飞行器的组成部分及各部分的功能，接着介绍MSP430F5及Flappy430硬件、MSP430开发环境和编程方法、MSP430功能模块和四轴坐标系，然后详细讲述四轴飞行控制——卡尔曼滤波/四元数法，以及安卓程序的开发，最后讲解了四轴飞行器的实际使用及操作要点。

本书配有辅助资料，读者可登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）免费注册后下载。本书适合对四轴飞行器感兴趣的读者阅读，也可以作为TI公司MSP430的入门图书。

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

DIY 四轴飞行器：基于MSP430F5系列单片机与Android / 黄和悦编著. —北京：电子工业出版社，2015.9
（嵌入式技术与应用丛书）

ISBN 978-7-121-27054-3

I. ①D… II. ①黄… III. ①飞行器—基本知识 IV. ①V47

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第200978号

责任编辑：田宏峰

印 刷：三河市双峰印刷装订有限公司

装 订：三河市双峰印刷装订有限公司

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：12 字数：307千字

版 次：2015年9月第1版

印 次：2015年9月第1次印刷

印 数：3000册 定价：42.00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。

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

服务热线：（010）88258888。

前 言

四轴飞行器（四旋翼飞行器）是最近比较火的一种机电类设备，目前，从科技竞赛到航拍、侦查，随处可见四轴飞行器的身影。四轴飞行器是机械、通信、电子、自动控制几大学科融汇的具有较高科技含量的一种设备，主要承载了微处理器、惯性导航、自动控制、无线通信、电脑上位机软件、电路设计、PCB 制作、外部机械结构设计、空气动力学及基本的航模控制知识。

因此，四轴飞行器十分适合作为电子信息、自动控制等学科的研究课题，也适合用作这些专业的教学、科技实践、工程实训设备。

笔者在制作四轴飞行器教学设备的过程中，感觉很多知识比较零散，而详细探讨四轴飞行器的书籍不是很多，因此斗胆编写了本书，希望能与喜欢四轴的朋友们一起分享经验，同时也对 MSP430 系列的知识做一简单介绍。

笔者自身是一个比较钝的人，能写成此书，离不开身边人们的大力支持和帮助，在此致谢，略表心意。

首先感谢我的研究生阶段导师赵建教授，赵老师多年来悉心教育学生，不断引导我们要创新，对于技术要精益求精，从本科开始给了我极多的耐心教导和帮助，以及方向性的建议。

其次，无论有没有本书，必须感谢我的父母、女友、亲人们的大力支持和鼓励，以及充分的理解和关心。

制作四轴的过程中，身边小伙伴们也非常给力，给了我很多的支持和关心，也特此感谢我的朋友们！尤其是对于手机 APP 及 PPT 的制作，要感谢孔玉英的大力支持。

具体到算法上，笔者从 MK、MWC、KKC 等开源飞控代码，以及 Madgwick、seawood、Cnmusic、zksniper 等网友的文章中（很多在 Amobbs）得到了很多启发，在此对其表示感谢！制作四轴的过程中从 TI（德州仪器）公司申请了不少免费芯片，对 TI 公司及其大学计划表示感谢！

最后，电子工业出版社对本书给予了很多关怀和支持，在此表示感谢！

感谢所有关心与支持过我们及 Flappy430 的人！

时间仓促，水平有限，多有不尽不全之处，只能说是框架性的入门，还望高人们多多指点。

作 者

2015 年 7 月于西安电子科技大学

目 录

第 1 章 四轴飞行器概述	1
1.1 四轴飞行器的历史	1
1.2 四轴飞行器的现状、应用及微型化	2
1.3 四轴飞行器的力学原理及控制框图	6
1.3.1 四轴飞行器的力学原理	6
1.3.2 四轴的坐标及控制知识初步	8
第 2 章 四轴飞行器的组成及各部分功能	9
2.1 四轴飞行器组成概述	9
2.1.1 2.4 GHz 遥控器及接收机	9
2.1.2 蓝牙/WiFi 等遥控器及接收机	10
2.1.3 姿态检测单元	10
2.1.4 处理器	11
2.1.5 调试器	11
2.1.6 电机驱动及电机	11
2.2 遥控器	12
2.2.1 2.4 GHz 遥控器	12
2.2.2 蓝牙/安卓遥控	16
2.3 电机及驱动	18
2.3.1 无刷电机及电调	18
2.3.2 有刷电机及驱动电路	21
2.4 机架	23
2.4.1 大四轴飞行器机架	23
2.4.2 微型四轴飞行器机架	24
2.5 电池	24
2.6 飞控	25
第 3 章 MSP430F5 简介及 Flappy430 硬件	27
3.1 MSP430F5 系列介绍	27
3.2 Flappy430 学习板介绍	29
3.3 PCB 布线心得	34
3.4 硬件实物图及基本使用	34
3.5 配套资料及学习微处理器的顺序	37
第 4 章 MSP430 开发环境及编程方法	38
4.1 IAR 安装及使用	38
4.1.1 软件及仿真器安装	38

4.1.2	Flappy430 软件驱动及串口通信软件	40
4.2	IAR 的使用和调试	43
4.2.1	IAR 的界面	43
4.2.2	新建一个工程并调试	44
4.3	Flappy430 程序介绍及学习板的使用	48
4.3.1	新建 Flappy430 飞控工程	48
4.3.2	Flappy430 学习板的装配及使用	50
4.4	MSP430F5 编程介绍	55
4.4.1	头文件	56
4.4.2	库函数	58
4.5	C-430 的特性及编程风格	59
4.5.1	C-430 的数据类型	59
4.5.2	位带操作, 常用语句形式	59
4.5.3	自写函数的接口规范	60
4.5.4	中断系统架构和中断函数写法	60
4.5.5	分离式源文件、头文件的组织	64
第 5 章	MSP430 功能模块及四轴坐标系	66
5.1	时钟系统	66
5.2	数字 IO 口	71
5.3	端口映射 (Portmapping) 功能	76
5.4	定时器 Timer	78
5.5	PWM 波	83
5.6	串口 USCIA_uart	87
5.7	蓝牙/PC 上位机及反馈测试	93
5.7.1	PC 上位机通信协议	93
5.7.2	蓝牙通信协议	95
5.7.3	上位机测试四轴反馈	98
5.8	陀螺仪、加速度计及磁强计	100
5.8.1	陀螺仪	100
5.8.2	加速度计 ADXL345	108
5.8.3	磁强计	109
5.8.4	LSB 概念及分析	112
5.9	PID 算法及机体坐标系初步分析	113
5.9.1	PID 算法的构造分析	113
5.9.2	四轴机体坐标系的构建	115
第 6 章	四轴飞行控制——卡尔曼滤波/四元数法	122
6.1	传感器中立点	122
6.2	基于卡尔曼滤波的姿态计算方法	125
6.3	卡尔曼滤波法分析及测试	136
6.3.1	积分限幅及数据类型选择	136

6.3.2	算法效果测试	138
6.3.3	转换系数/LSB 与传感器更换分析	140
6.3.4	算法 loop 周期的优化	141
6.4	PID 调节器的构造及分析	142
6.4.1	PID 算法各项的构造	142
6.4.2	PID 算法各参数的整定	144
6.4.3	磁阻锁定及 Yaw 轴反馈	145
6.5	四元数算法的介绍及应用	149
6.5.1	四元数算法介绍	149
6.5.2	四元数算法的程序及实际应用	153
6.5.3	测试及分析	158
6.6	MWC 飞控算法简介	159
第 7 章	安卓程序简介	164
7.1	安卓系统简介	164
7.2	安卓遥控器开发	165
第 8 章	四轴飞行器实际使用及操作	175
8.1	四轴飞行器起飞前的调校	175
8.2	四轴飞行器在飞行中常见问题的解析	178
附录 A	Flappy430 PCB 图	181
附录 B	Flappy430 整体原理图	182
附录 C	本书资料下载	183
参考文献		184

四轴飞行器概述

引言：近年来，四轴飞行器越来越多地融入了人们的生活，不论是航模表演，还是侦查救灾，乃至高校的科技竞赛，都能看到它们轻盈的身影。那么，这种新奇的飞行器是不是一夜之间冒出来的新品种呢？比起传统的单轴直升机，它们有哪些优势？这些优势的产生，源于怎么样的控制原理和控制系统？与单片机、自动控制、传感器学科又有哪些联系呢？本书的目的就在于比较详细地梳理这些知识点，并从具体的单片机编程出发，详细阐述四轴飞行器的制作，争取能给航模和电子爱好者一些参考。本章主要阐述四轴飞行器的历史、现状、力学分析等基础内容，为后面的学习打下基础。



1.1 四轴飞行器的历史

四轴飞行器概念的提出是非常早的。早在 20 世纪初，法国的科学家与学者 Charles Richet 制造了一个非常小的、没有驾驶员的旋翼式直升机，但没有试飞成功。不过这一灵感被他的学生 Louis Breguet 继承和发展了。1907 年，Louis Breguet 和他的兄弟 Jacque 制造了他们的第一架旋翼机 Breguet-Richet “旋翼机 1 号”并进行了第一次试飞，但试飞中没有对飞行器进行控制，因而只上升到了 1.5 m 的高度。“旋翼机 1 号”主体是用钢管焊接而成的“十”字形结构，具体如图 1.1.1 所示。

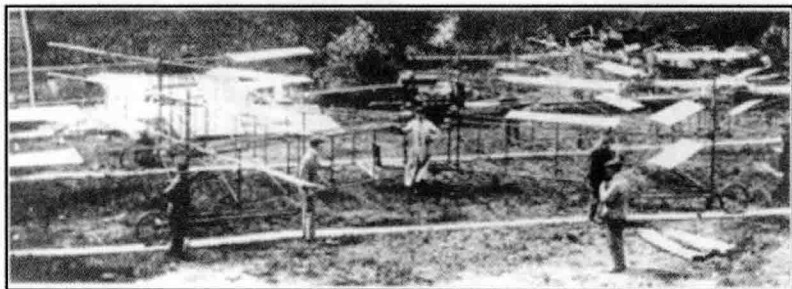


图 1.1.1 “旋翼机一号”

1921 年，George De Bothezat 在美国俄亥俄州的代顿空军基地建造了另一个大型的四轴飞行器，比起之前的有了不小的进步，但进行了 100 多次试飞之后仍然没有达到美国空军的要求，如图 1.1.2 所示。

同时，标致（Peugeot）公司的年轻工程师 Etienne Oemichen 自 1920 年起也在不断地研究旋翼机，并先后更换了多种设计。1924 年，他设计的四轴飞行器首次实现了 1 km 的垂直飞行并最多在空中停留了 14 分钟，如图 1.1.3 所示。

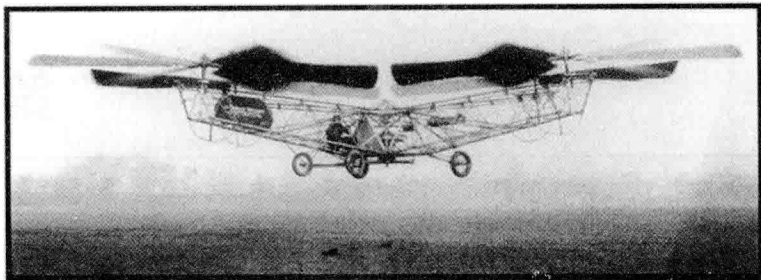


图 1.1.2 George De Bothezat 的四轴飞行器

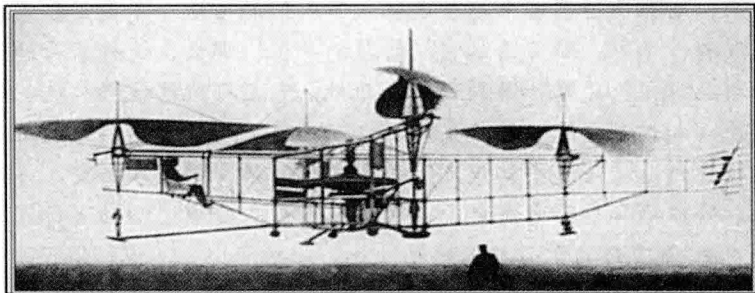


图 1.1.3 Etienne Oemichen 的四轴飞行器

1956 年, Convertawings 公司在纽约的 Amityville 制造了一架四旋翼直升机, 该直升机的螺旋桨直径超过了 5.79 m, 并通过机翼产生向前飞行的升力。在设计中用到了两台发动机, 通过改变每个螺旋桨提供的推力来控制直升机。

这种通过改变各个旋翼的转速来控制前进后退等运动的思路与现在的四轴飞行器的控制思路类似, 而实际的试飞也比较成功, 先后还设计了 Convertawings Model A/model B 等型号。但遗憾的是由于缺乏对这种直升机的兴趣, 最终导致了工程设计人员研究的停止, 如图 1.1.4 所示。

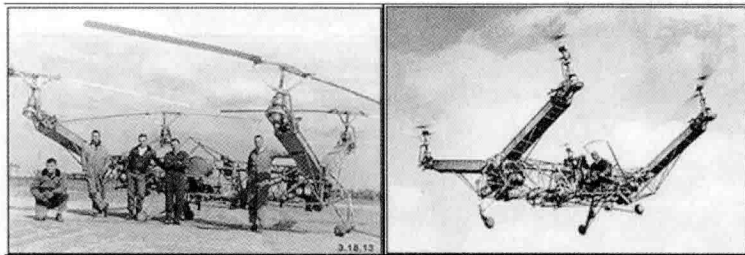


图 1.1.4 Convertawings 公司的四轴飞行器

此后, 由于传感器、微控制器等的发展还不是特别成熟, 四轴飞行器的姿态检测和控制等受到局限, 因此四轴飞行器没有特别大的进步, 也没有进入实用阶段。

1.2 四轴飞行器的现状、应用及微型化

最近十几年来, 四轴飞行器的“大脑”——微控制器取得了极大的发展和进步; 另一方面, 四轴飞行器的“感觉器官”——陀螺/加速度计/磁力计等也做得更加准确, 且都向微机电 (MEMS) 方向发展, 更加的小型化和稳定; 更重要的是, 四轴姿态检测与计算的理论研

究也取得较大的进步，很多简洁易用，适合计算机的姿态计算程序也被开发出来。加上四轴飞行器确实机械结构简单，易于维护，而且飞行稳定性较好，所以人们研究四轴飞行器的热情又再一次被点燃了。

国外比较著名的研究例子有：

(1) 宾夕法尼亚大学的基于视觉反馈的直升机控制系统（始于2002年）。这一团队的作品也多次出现在TED演讲、优酷视频等处，自主悬停时使用基于模型的线性反馈控制，而在穿越障碍、自主飞行时与视觉反馈控制相结合，其研究重点已经向多机协作和自主飞行倾斜。

(2) 瑞士洛桑联邦理工学院于2003年开始研发的OS4微型四轴飞行器。他们试验了各种不同的控制算法，对于最优控制理论、飞行器自主飞行和避障等做了比较深入的研究。

(3) 斯坦福大学的Mesicopter飞行器研究组、麻省理工大学的Robust Robotics研究组等也都对于四轴飞行器的建模、飞行、视觉控制、周围环境监测等领域做了很多研究工作。

国内研究方面，国防科技大学在2004年即开始了对微型四轴飞行器的研究，并做了一系列的建模和实践；哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、西北工业大学等高校也相继做了较多的实验和探索。

由上面叙述可以知道，四轴飞行器的研究核心和基础在于飞行控制，也就是“飞控”部分。

在商业应用及DIY方面，最早公布自己的比较完善的飞控代码，并引来众多爱好者研究和制作的四轴飞控，当属德国的MK飞控。MK的代码在2007—2009年前后就已相当完善，能非常稳定地飞行，也有完善的电脑端调试系统及航拍、GPS寻路等功能。

四轴的DIY活动大致从这时候开始变得更有深度，国内爱好者们以AMOBBS和5iMX论坛为基地，做出了很多关于四轴代码、电路等的研究和改进工作。

同时，这一时间段，国内的大疆(DJI)、Xaicraft等公司的无人机整体方案也发展得较快，四轴商业航拍开始逐渐兴起，各种场景的应用较大地提升了四轴飞行器的知名度。

2010年，法国人Alex在模型网站Rcgroups发布了他的Multiwii飞控程序，彻底地将四轴飞行器的制作拉到了“平易近人”的水平。Multiwii使用数字传感器，通过IIC数据总线传输数据，因此比之前的模拟传感器飞控更加方便且小型化；而其使用的控制器也是非常大众化的arduino。虽然Multiwii程序写的并非特别易读，但在硬件DIY方面，直到今天也是最简单、皮实的飞控之一。

此后，四轴飞行器的制作成本进一步降低，四轴的DIY在买配件组装，以及四轴飞控硬件制作方面变得比较容易。

不过，四轴飞行器最核心的知识还在于飞行控制算法的设计和程序的编写，因此我们今天能比较方便地DIY四轴飞行器，要特别向开源的MK飞控、MWC飞控、KK_C固件、Anotech飞控、madwick四元数代码的作者，以及很多写了大量非常好的四轴程序分析的人们表达敬意。

目前，在高校竞赛方面，四轴飞行器已经不断出现在各种赛事中，从各类创新杯到电子设计竞赛，都可以看到四轴飞行器的身影，有的是作为其他功能的载体，有的是直接作为题目要求。

在具体的应用场景上，四轴飞行器的航拍目前已经比较成熟，各种提供航拍服务的公司

层出不穷，“爸爸去哪”里面的大疆飞行器就是典型；由于四轴飞行器的飞行比较稳定灵活，各种救灾、侦查也都有应用四轴飞行器的趋势；总之，四轴飞行器近几年取得了蓬勃的发展，而由四轴衍生出来的六轴、八轴、十二轴飞行器等，也都在陆续出现，四轴飞行器研究可说是一个充满活力、多个学科融合的领域。

上面的论述，大多是针对较大的四轴飞行器（轴距 250 mm 以上）而言的，目前航拍等主力也是这类四轴飞行器。但是，较大的四轴飞行器也有一些难以克服的缺点。例如

- 耗电较大；
- 旋翼力量很大，调试中容易发生危险；
- 太大，不易细致地观察与调试控制效果；
- 航拍中容易被发现，不利于隐蔽；
- 对飞行场地面积要求较高；
- 制作成本较高。

由于四轴飞行器容易制作、飞行灵活，人们更希望其能够实现小型化及微型化，从而能进入更多的空间进行数据采集，也能够更好地节约能源，便于携带。因此，小型/微型四轴飞行器的研制，成为了四轴飞行器发展的趋势之一。

实际上，小型/微型四轴飞行器的主体结构 and 大型四轴飞行器是一样的。一般轴距为 150~250 mm 的四轴飞行器还能勉强使用无刷电机，与一般的大四轴飞行器没有太大区别；而当四轴飞行器的轴距小于 150 mm 时，则进入了微型四轴飞行器的范畴，与较大的四轴飞行器有了一些差别。主要差别在于，微型四轴飞行器的体积很小，因此大多采用了空心杯电机，升力一般比较有限；而又由于体积小型化的需要，因此很多时候直接将控制板的 PCB 作为机架使用，因此，微型四轴飞行器的传感器容易受到机身振荡及电流的干扰；而体积小、升力不是很强也使得其控制规律相对大四轴飞行器更难以整定一些。

另外，既轻又小的外形使得微型四轴飞行器惯性较小，因此运动状态极易改变，这使得对微型四轴飞行器的控制需要更高的控制频率。

但是，也正因为有以上的这些特性，微型四轴飞行器也有很多的优势。例如，其制作成本比较低，调试相对容易简单，也更容易搭建系统的测试平台；而制作完成之后，执行任务的地点也更加多样化，而且因为比较小，所以容易和智能手机等连接，因此，研究微型四轴飞行器也成为当前的一个热点。

在学术上，世界上对小型四旋翼飞行器的研究主要集中在 3 个方面：基于惯导的自主飞行控制、基于视觉的自主飞行控制和自主飞行器系统方案，其典型代表分别是瑞士洛桑联邦科技学院（EPFL）的 OS4、宾夕法尼亚大学的 HMX4 和佐治亚理工大学的 GTMARS 飞行器。

前面两者已经有过叙述了，不再赘述。GTMARS 是佐治亚理工大学面向火星探测任务而设计的 CAD 无人机系统，它重 20 kg，旋翼半径为 0.92 m，续航时间为 30 min。折叠封装的 GTMARS 随四面体着陆器登陆火星后，能自动将机构展开，能自主起飞和降落，巡航速度可达 72 km/h；另外，它还能返回到着陆器补充能量（着陆器装载有太阳能电池）。

图 1.2.1 从左至右是 HM4、GTMARS、Mesicopter。

国内研究方面，国防科技大学在 2004 年进行了比较深入的从建模到实践的研究，如图 1.2.2 所示。



图 1.2.1 HM4、GTMARS、Mesicopter 微型四轴飞行器

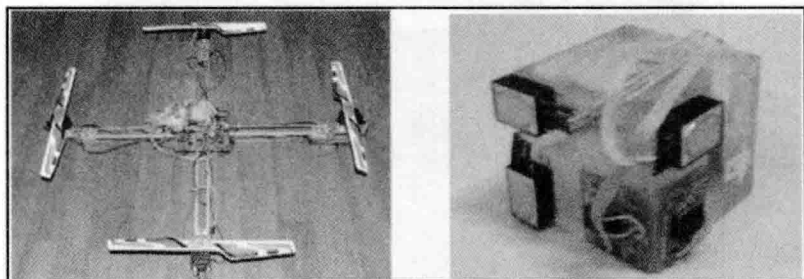


图 1.2.2 国防科技大学的微型四轴飞行器

从 DIY 的角度来看，最先出现的微型四轴飞行器 DIY 方案是 MWC，较早的时候就有了“brushed motor”版本，也就是有刷空心杯电机的程序，并维持了 MWC 容易制作、皮实易用的特点。

而 bitcraze 团队在 2011 年前后推出的 Crazyflie，则进一步发展了微型四轴飞行器，例如，使用了基于 ARM-Cortex M3 的 STM32 处理器；集成了无线通信模块；包含了无线更新飞行程序功能；可无线充电；开发了图像捕捉处理程序；飞行非常稳定；并且，其代码和硬件也是开源的。图 1.2.3 是 Crazyflie 实物图。



图 1.2.3 Crazyflie 实物图

此后，微型四轴飞行器与智能手机连接，与 WiFi 联网、Zigbee 协作等各种应用都不断地被开发出来，微型四轴飞行器的 DIY 也取得了很大的进步。

至此，四轴飞行器的现状的小说明就告一段落了。由于四轴飞行器自身结合了力学、机械、单片机/嵌入式，以及自动控制等各种知识，因而对于高校的教学或者示范有着较好的价值；又由于四轴飞行器的较好的飞行性能，所以也比较容易搭载其他的各种外设，并且在系统运行的时候具有较强的表现力，也有着庞大的爱好者群体。

当前虽然有较多的四轴飞行器资料，但是大多比较零散；且较多的停留在硬件组合阶段，

没有深入分析四轴飞行器的代码和控制。故我们大胆编写了本书，以我们自主编程制作的 Flappy430 微型四轴飞行器为蓝本，从四轴飞行器的力学原理，到四轴飞行器的控制器、传感器，以及四轴飞行器的编程等角度，比较深入地分享我们对于四轴飞行器的一些经验。希望能对读者有所帮助。我们的 Flappy430 微型四轴飞行器如图 1.2.4 所示。

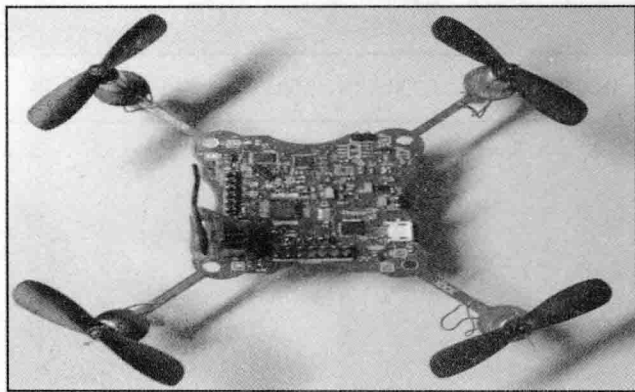


图 1.2.4 Flappy430 实物图

1.3 四轴飞行器的力学原理及控制框图

1.3.1 四轴飞行器的力学原理

四轴飞行器通过改变自身四个旋翼的转速，可以比较灵活地进行各种飞行动作。主要依据的运动原理是力的合成与分解，以及空气转动扭矩的反向性，如图 1.3.1 所示，四轴飞行器通常有两种模式，“+”字模式与“×”字模式。图中的电机编号，旋转方向为本书中的标准方向。实际上，不同的四轴飞行器设计有不同的力学设计及编号方案，但一般遵循类似原则。

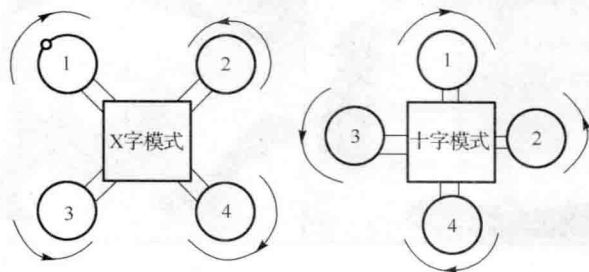


图 1.3.1 四轴飞行器的“×”字模式与“+”字模式

首先，为了之后描述方便，我们将四个电机编号为 1~4 号，这也是本书中 Flappy430 一直采用的编号。然后，需要注意的是，相邻的两个旋翼的转动方向相反，而在对角线上的两个电机的转动方向相同。例如，×字模式，1、4 电机是顺时针转动，而 2、3 电机是逆时针转动。这样一来，为了保证它们产生的升力都是向上的，1、4 电机需要使用的螺旋桨是“正桨”，一般指顺时针转动能产生向上升力的桨；而 2、3 电机使用的螺旋桨是“反桨”，即逆时针产生向上升力的桨。在装配四轴时，我们也应注意四个旋翼都是“向下吹风”的，以便均提供向上拉力。

这样做的原因是，旋翼在旋转时会产生反扭矩。例如，顺时针转动的桨在转动时，则空气会产生使得四轴逆时针转动的反向扭矩。而当 1、4 同方向，2、3 同方向的时候，这两个扭矩就恰好抵消掉了，使得四轴在偏航方向能保持平衡，不至于出现自旋转。

分析清楚了之后，我们就可以知道四轴如何进行偏航方向的旋转了。以上图的×字模式为例，文字方向为前方，则当需要四轴左转（逆时针）的时候，需要增加 1、4 的转速，同时减少 2、3 的转速。这样，空气反扭矩会推动四轴逆时针旋转；反之亦然。

事实上，四轴一共有 8 种比较典型的运动情况，可以概括为：上升、下降、左旋、右旋、左飞、右飞、前飞、后飞。上面分析了旋转的情况。而上升和下降相对比较简单，同时增加和减少四个旋翼的转速就可以了。下面我们来看其余几种情况。以×字模式的左飞为例，当需要向左飞行的时候，我们可以增加 2、4 的转速，同时减少 1、3 的转速，这样，四轴就会有一个倾斜角度 α 。这个角度会从两个方面带来向左的动力。

- 四轴本身的重力会有沿着倾斜方向的分力 $mg\sin\alpha$;
- 四轴四个旋翼的升力由于四轴的倾斜，会产生水平向左方向的分力 $F\sin\alpha$ 。

这样，四轴就会向左运动了。

具体的受力分析如图 1.3.2 所示，而四个旋翼之间的这种力学关系，也是后面的 PID 调节器最终输出四个电机转速的时候，其相互之间的计算关系的依据。

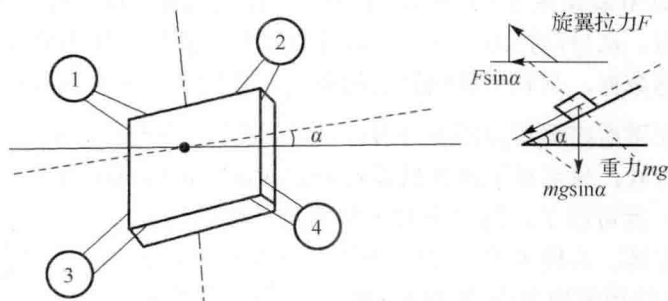


图 1.3.2 四轴飞行器受力分析示例

最后，我们将四轴的运动与四个旋翼的关系总结如下（以×字模式为例，十字模式读者可以自己推导）。

- 上升：1 ↑、2 ↑、3 ↑、4 ↑；
- 下降：1 ↓、2 ↓、3 ↓、4 ↓；
- 左旋：1 ↑、2 ↓、3 ↓、4 ↑；
- 右旋：1 ↓、2 ↑、3 ↑、4 ↓；
- 左飞：1 ↓、2 ↑、3 ↓、4 ↑；
- 右飞：1 ↑、2 ↓、3 ↑、4 ↓；
- 前飞：1 ↓、2 ↓、3 ↑、4 ↑；
- 后飞：1 ↑、2 ↑、3 ↓、4 ↓。

这是我们设计电机转速的基础力学原理，也是后面对程序进行测试时的指标之一。需要注意的是，最后输出电机的转速的时候，每个电机和自己的控制信号输入引脚一定要对应好。

1.3.2 四轴的坐标及控制知识初步

有了四轴飞行器的基本力学原理之后，我们可以基本设想一下四轴的控制了。由上文的分析可以知道，四轴的各种运动都与其姿态或者机身的倾斜和旋转角度有关，因此，首先，我们应当以四轴的重心为原点建立一个直角坐标系。

这个坐标系是针对四轴自身而言的，当四轴倾斜时，则此坐标系会与大地坐标系不再重合。因此，我们将此坐标系称为机体坐标系。这个坐标系是四元数算法中的常用机体坐标系，X、Y、Z 轴与各个旋转轴之间符合右手螺旋定则，如图 1.3.3 所示。

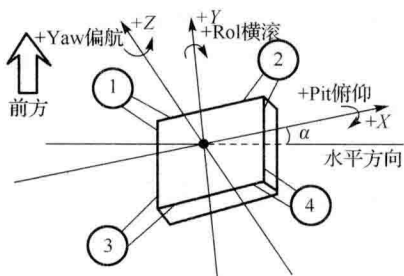


图 1.3.3 四轴飞行器的机体坐标系

X、Y、Z 坐标系上面的旋转方向命名为 Pit(俯仰)、Rol(横滚)、Yaw(偏航)。由于四轴的运动基本是由于倾斜后的分力在起作用，因此这几个变量非常重要，后面主要的解算和分析都是围绕着这几个旋转量。而四轴倾斜的角度，即类似图中的 α 角度，也是后面解算的重点。

由于 Pit、Rol、Yaw 均是有正负的，所以用这三个量，我们就可以描述四轴的姿态了。例如， $\text{angleRol}=-\alpha$ 、 $\text{anglePit}=0$ 、 $\text{angleYaw}=0$ 就是图 1.3.3 所示的情况，这样我们就完成了控制四轴姿态的第一步：描述四轴当前的姿态。从自动控制上说，可以比较精确地描述真实的姿态数值了。当然，如何解算出精确的姿态数据，是整个四轴算法的重点，我们会在后面具体地描述。

设想一下我们在用遥控器遥控四轴，同样可以用这几个姿态数据来控制四轴的各种运动。例如，需要左飞的时候，只需要用遥控器设置 $\text{angleRol}=-\alpha$ 、 $\text{anglePit}=0$ 、 $\text{angleYaw}=0$ ，将四轴调节到这个姿态，就可以了。这三个有正负的量，可以代表前、后、左、右、左转、右转 6 种运动。当然，还需要一个量来设置升降，也就是常用遥控器中的油门数值 Thr。每个数值称作一个通道的话，需要一个 4 通道遥控器，这样我们就可以设定我们想要的四轴姿态了，也就是知道了自己需要的数值——seted data。

下面我们将这几个量列出来：

Rol/Ail——横滚， Pit/Ele——俯仰，

Yaw/Rud——偏航， Thr——油门

当然，具体到四通道遥控器/蓝牙遥控器等上面，这几个量的数值正负和范围还是需要测试和校准的。

有了遥控器设置预期数值，以及能描述自身的姿态数据后，我们可以得到四轴大致的控制框图，如图 1.3.4 所示，后面各部分的设计、说明都是围绕着这个基本控制框图而进行的。

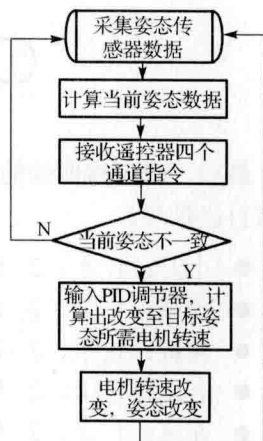


图 1.3.4 四轴飞行器控制框图

第 2 章

四轴飞行器的组成及各部分功能

引言：在第 1 章的末尾，我们基本绘出了四轴的控制流程图，这些控制流程的实现依赖于四轴的各个组成硬件。那么，通常情况下，四轴有哪些组成部分呢？每个部分的功能是什么？各个部分之间的通信信号是什么形式？各个部分中，哪一个部分是最值得关注和研究的？本章将较为详细地解答这些问题，并勾勒出 DIY 四轴飞行器的大致步骤。

2.1 四轴飞行器组成概述

四轴飞行器的一般结构框图如图 2.1.1 所示。

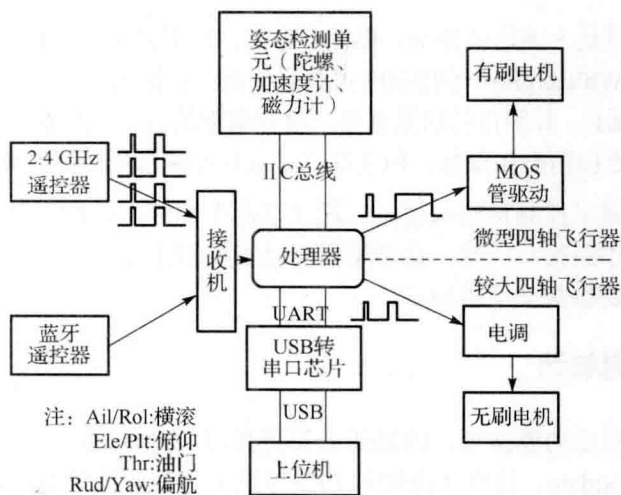


图 2.1.1 四轴飞行器组成框图

总结起来，可以分为以下几个部分。

2.1.1 2.4 GHz 遥控器及接收机

遥控器用于设定四轴飞行器的预期姿态。在第 1 章我们分析指出，四轴共有 8 种比较典型的运动状态，因此，我们至少需要一个四通道的遥控器来对四轴进行姿态的控制。遥控器大多使用 2.4 GHz 频段进行通信，并配有接收机来对发射机发射的信号进行解码和输出。通常，接收机将至少四个通道的数据用 PWM 波的形式输出到信号引脚，如图 2.1.2 所示，图中有 6 通道。

接收机输出的是 50 Hz 的 PWM 波，并用占空比（高电平时间/波形周期）数值来表示遥

控器摇杆的位置，占空比的数值范围为 5%~10%。例如，当 RoI 摇杆处于中间位置时，对应的信号引脚输出 7.5%占空比的波，而 7.5%是 5%~10%的中间位置。

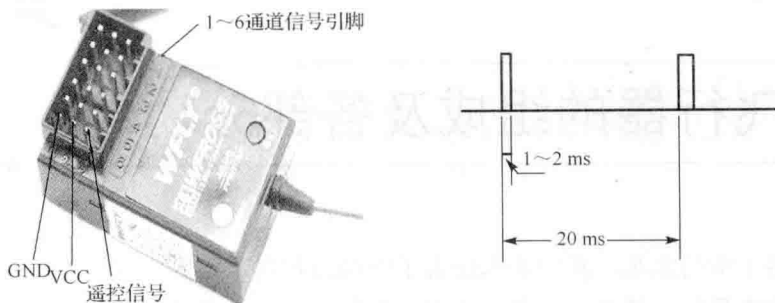


图 2.1.2 常用航模遥控器接收机及其输出信号

也有 PPM 式的遥控器，它将多个通道的数据整合在一个波形里面，这样一个引脚就能传递多个通道的占空比信息。不过随着飞控单片机的引脚越来越丰富，这种类型遥控器用得比较少了。

2.1.2 蓝牙/WiFi 等遥控器及接收机

传统的航模遥控器是上述这种类型，操作手感好，有效范围远。但随着智能硬件的流行，现在也有很多用蓝牙/WiFi/Zigbee 等物联网式通信作为遥控器的方案。这种遥控通常直接使用对应的网络协议进行通信，并用自己的数据格式进行数据的数字化传输，如直接传输 $RoI = -90$ 。相比传统的遥控器，更加精确和量化，但其缺点是通信距离还比较近，程序编写相对复杂。

上述两个部分，属于控制量输入设备，通过这两个部分，我们可以给四轴输入自己想要的姿态数据，从而操作四轴。当然，这里遥控器是由我们来控制的，如果是视觉控制、自主导航类的四轴，目标姿态则又不相同了。

2.1.3 姿态检测单元

在遥控器知道了设定的姿态后，四轴还需要将其与自身目前的姿态进行比较，也就是求出 $Error = set_data - real_data$ ，这样才能输入 PID 算法中有针对性地对电机进行控制。

姿态检测单元主要包括陀螺仪、加速度计、磁强计和气压计。

陀螺仪是检测四轴绕着 Pit、RoI、Yaw 三个方向的旋转角速度的器件，动态特性较好；加速度计是检测沿着 X、Y、Z 三个轴的线性加速度的器件，和陀螺仪结合可以得到比较准确的姿态；磁强计也就是电子罗盘，用于测定与地磁南北极的夹角，这样四轴可以更精确地知道自身的机体坐标系与大地坐标系的偏差，还可以进一步应用于四轴的锁定航向中；气压计通过测定四轴周围的大气压，从而判断四轴的绝对高度，能起到稳定高度的作用。

陀螺仪、加速度计、磁强计各有三个轴向的数据采集，而气压计又采集到了一个高度轴的数据，因此，包含以上传感器的姿态检测单元可以称为 10DOF，即 10 轴传感单元。在实际应用中，仅用陀螺仪可以完成对四轴飞行器的粗略控制，辅以陀螺和加速度计可以实现较好的控制，本书介绍的 Flappy430 还携带了磁强计。