

嵌入式技术专家执笔，实际项目开发经验总结

全面论述基于STM32处理器的四旋翼飞行器设计，书中案例可二次开发

ARM公司|ST公司|伊利诺伊大学|哈尔滨工业大学|哈尔滨工程大学

专家推荐阅读

清华

开发者书库



Design of Quad-rotor Unmanned Aerial Vehicles

四旋翼无人飞行器设计

冯新宇 范红刚 辛亮 著

Feng Xinyu Fan Honggang Xin Liang

程序代码
设计图纸
演示视频

清华大学出版社



清華

开发者书库



Design of Quad-rotor Unmanned Aerial Vehicles

四旋翼无人飞行器设计

冯新宇 范红刚 辛亮 著

Feng Xinyu Fan Honggang Xin Liang

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

四轴飞行器是一种无人飞行器,也是一种智能机器人,“四轴”指飞行器的动力由4个旋翼式的飞行引擎提供。人们对于四轴飞行器的研究从军用到民用、商用领域都有涉及。近几十年来,随着现代控制理论与电子控制技术的发展,运用现代控制技术,使用电机代替油动力引擎进行四轴飞行器控制研究。本书利用主流控制器STM32系列微处理器平台,从设计的方案论证、器件选型、代码调试的全过程对四轴飞行器设计透彻细致地讲解,读者可以根据书中给出的电路和代码自行设计。本书可作为电子、通信及控制等相关专业的参考书,也可以作为相关技术人员的技术参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

四旋翼无人飞行器设计/冯新宇,范红刚,辛亮著. —北京:清华大学出版社,2017

(清华开发者书库)

ISBN 978-7-302-46735-9

I. ①四… II. ①冯… ②范… ③辛… III. ①无人驾驶飞行器—设计 IV. ①V47

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第048634号

责任编辑:盛东亮 赵晓宁

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:186mm×240mm 印 张:8.75

字 数:196千字

版 次:2017年6月第1版

印 次:2017年6月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:39.00元

产品编号:068408-01

推荐序

FOREWORD

欣闻学生新宇的新作《四旋翼无人飞行器设计》即将出版,我感到非常高兴。新宇一直从事嵌入式系统的教学与实验工作,这本书是他工作经验积累的最终成果体现,衷心地祝福他,也希望他再接再厉,取得更多的成果,并总结分享给广大读者。

嵌入式系统已经深入到人们生活的各个方面,因此,对嵌入式工程师的需求量越来越大,推动了嵌入式系统人才高效快速培养方式的发展。《四旋翼无人飞行器设计》这本书主要分为三部分:第一部分主要论述四旋翼无人飞行器的原理及采用的算法,从四旋翼无人飞行器的基本原理出发,定义了四旋翼无人飞行器的整体架构,介绍了四旋翼无人飞行器常用飞行控制方法及飞行器中传感器工作原理与姿态解算方法;第二部分主要论述四旋翼无人飞行器嵌入式飞控系统电路和遥控器电路设计,采用模块化的方式介绍了构成四旋翼无人飞行器的嵌入式飞控系统电路的各个模块,如核心主控模块、姿态传感模块、无线通信模块、定高模块等,该部分从核心主控模块开始,一步步逐渐扩展,最后构成了完整的四旋翼无人飞行器嵌入式飞控系统电路和遥控器电路;第三部分主要论述四旋翼无人飞行器嵌入式飞控系统和遥控器电路的软件设计,包括主控软件、姿态解算软件、气压计算软件、摄像头控制软件、无线通信软件等。书中对软件/硬件设计给出了详细的说明,便于读者理解和使用,按照书中的说明,读者自己完全可以实现该四旋翼无人飞行器,同时也可在此基础上进行二次开发,通过增加硬件模块和相应的软件,以实现新的功能。

《四旋翼无人飞行器设计》这本书以四旋翼无人飞行器为例,从系统结构、软件/硬件设计三方面,通过模块化的方式实现了一个完整的嵌入式系统,非常适合嵌入式系统的爱好者和在校本科生和研究生学习使用,我想通过本书的学习,一定能很快提高读者对嵌入式系统的认识及实际的动手能力。

王进祥

哈尔滨工业大学微电子中心教授、博士生导师

前言

PREFACE

无人直升机,即旋转翼无人机。从 20 世纪 50 年代出现至今,它的发展较为缓慢,但是,随着与其相关技术的发展和应用,无人机飞行器领域迎来了革命性的巨变,其中无人直升机的研究和发展也迎来了一个全新的时代。无人直升机的功能越来越全面,体积越来越小,在军事领域和民用领域共同发展。

本书的写作初衷是 2015 年的全国电子设计大赛和学生选择了飞控类的题目,把我们参加比赛制作的过程做了一个记录。比赛后,经过增加一些功能,PCB 的全部设计制作,四轴飞行器飞控相对地稳定。结合实验室的一些项目,把上位机等相关的内容添加进来,斗胆把自己的一些心得写成一本书和大家分享。

本书是按照无人机制作顺序来写的,更像是一本内容多一些的论文。个人觉得本书与其他众多书籍最大的不同是,上位机软件设计和操作手柄设计没有使用现有的成品。这么做是为了达到实践和锻炼的目的,特别是针对电子类相关专业的本科生。如果学生能照着做一个,调试出来,就能学到很多知识。例如,利用 LabVIEW 学习上位机软件设计,对于非计算机专业的学生还是挺实用的。

本书中核心设计的内容应该是姿态数据的获取和处理,采用了 DMP 实现解算。稍后笔者编写的代码会发布在 QQ 群内和广大的程序爱好者一起研究和完善。互联网有很多优秀开源的代码,读者只要认真地熟读一个完整代码,其他的问题就会迎刃而解。入门的过程较难,特别是对于大学二年级与三年级的学生,需要自学的东西较多。

本书完成得匆忙,很多东西加工得不是很细致,留个 QQ 群号,方便读者交流学习,QQ 群:185156135。本书的很多素材、资料都是来源于一些知名网络论坛和优秀的参考书,这里一并感谢!感谢黑龙江科技学院电子技术实验室支持我的同学和同事。

由于时间仓促,书中难免存在不足之处,欢迎读者批评指正。

编者

2017 年 4 月

目录

CONTENTS

第 1 章 简介	1
1.1 四旋翼飞行器发展历史	1
1.2 四旋翼飞行器的研究现状	3
1.3 四旋翼飞行器的主要应用	4
第 2 章 四旋翼飞行器的控制原理	5
2.1 四旋翼飞行器的结构	5
2.2 四旋翼飞行器的运动控制方法	6
2.3 四旋翼飞行器各部分的工作原理	8
2.3.1 飞行姿态与升力关系	8
2.3.2 飞行姿态的测量	10
2.3.3 加速度传感器工作原理及角度测量	10
2.3.4 陀螺仪传感器工作原理及角度测量	11
2.3.5 磁力计传感器工作原理及测量方法	12
2.4 姿态解算方法	13
2.4.1 互补滤波算法	13
2.4.2 卡尔曼滤波算法	15
2.4.3 DMP 姿态数据获取	17
2.5 PID 控制算法	20
2.5.1 PID 概述	20
2.5.2 四轴飞行器 PID 控制器设计	21
第 3 章 硬件设计	23
3.1 协议预备知识	23
3.1.1 SPI 总线	23
3.1.2 I2C 总线	26
3.1.3 USART 总线	29

3.2	总体设计	32
3.2.1	遥控器电路基本框架	32
3.2.2	飞行器主控电路基本框架	32
3.3	飞行器主控电路最小系统设计	33
3.3.1	基本原理	33
3.3.2	硬件电路设计	34
3.4	姿态传感器模块	36
3.4.1	基本原理	37
3.4.2	硬件电路设计	39
3.5	无线通信模块	40
3.5.1	基本原理	41
3.5.2	硬件电路设计	42
3.6	定高模块	43
3.6.1	超声波定高模块	43
3.6.2	气压计定高模块	45
3.7	电机及驱动模块	47
3.7.1	基本原理	48
3.7.2	硬件电路设计	49
3.8	遥控器模块设计	50
3.8.1	基本原理	50
3.8.2	硬件电路设计	52
3.9	电源模块选择	54
3.10	四轴飞行器的组装	55
3.10.1	电机、浆、电池、机型的相互关系	55
3.10.2	机架的组装	56
第4章	软件设计	57
4.1	软件预备知识	57
4.1.1	刚体的空间角位置描述	57
4.1.2	用欧拉角描述定点转动刚体的角位置	57
4.1.3	四元数	60
4.1.4	控制与滤波算法	60
4.2	主控程序初始化设置及说明	65
4.2.1	SPI的I/O口初始化实现	67
4.2.2	IIC的I/O口初始化实现	69
4.2.3	定时器初始化实现	71

4.2.4 电子调速器初始化实现	72
4.3 姿态传感器软件设计	74
4.3.1 软件设计基本思路	74
4.3.2 DMP	75
4.3.3 代码实现及解析	81
4.4 气压计软件设计	85
4.4.1 软件设计基本思路	85
4.4.2 代码实现及解析	88
4.4.3 自主高度控制的实现	95
4.5 遥控器软件设计	96
4.5.1 软件设计基本思路	98
4.5.2 无线模块代码实现及解析	98
4.5.3 摇杆代码实现及解析	104
4.6 摄像头软件设计	109
4.6.1 软件设计基本思路	109
4.6.2 摄像头的的数据读取	109
4.6.3 摄像头的的数据处理	112
4.7 上位机设计	114
4.7.1 帧头检测模块	116
4.7.2 3D 模型路径模块	118
4.7.3 3D 模型属性设置模块	118
4.7.4 陀螺仪 3D 数据显示模块	120
第 5 章 调试、问题解析及改进方向随想	122
附录 A STM32F4 最小系统电路图	123
附录 B 遥控器电路	127
附录 C 飞控板连接电路	129
参考文献	130



1.1 四旋翼飞行器发展历史

无人机是一种通过无线电遥控设备或自备程序算法自行控制的不载人飞行器。早在 20 世纪初,无人机就在多次局部战争中施展其无与伦比的优越性,并且为美国、以色列等国在战争中取得胜利起了重要作用。近三十年的时间里,随着微电子技术、通信技术、材料及推进系统等技术的迅猛发展,无人飞行器不仅外形上更加独特新颖,而且性能和功能上更加先进。从一开始通过地面摇杆控制飞行器,到用人眼控制飞行器,近些年又出现了用人脑来控制飞行器。由于无人机在作战中的优异表现,并且具有先天零伤亡的优势,各国在军事研究上都将其置于优先发展的地位,国际上也掀起了研究的热潮,其中以美国和以色列位居榜首。

在无人机迅猛发展的同时,能够垂直起降的无人机备受关注,其中发展最快、研究最多的是四旋翼飞行器。它具有其他固定翼无人机无可匹敌的优越性,不仅能够执行各种非杀伤性任务,同时又能执行如侦察、目标截获、监视、通信中断等各种具有软硬杀伤性的任务。其结构与普通的单旋翼无人机设计不同,飞行器只能通过改变两对螺旋桨的转速来实现各种姿态的变化,通过四个螺旋桨的升力来实现各种飞行轨迹的控制。与传统的无人机比较,飞行器具有如下几点明显的优势:

- 体积小、重量轻,并且可以灵活地垂直起降;
- 易于控制,具有很好的机动性,并且能够快速地进行姿态控制;
- 结构简单、造价低廉,并且适用于一些比较危险的场合。

四旋翼飞行器具有相互交叉的两对旋翼,通过控制旋翼的转向和转速,可抵消每对螺旋桨产生的反桨扭矩。此外还可以通过调节两对旋翼的转速改变其扭矩大小和升力,实现对飞行器姿态的控制,而不需要调节繁杂的机械装置,从而减轻了飞行器重量、减少了飞行器的体积、提高了其负载能力。

20 世纪初就有学者对四旋翼飞行器进行了研究。直到近几年来,随着传感器、处理器以及能源供给等相关技术的发展,同时又出现了新型的飞行控制理论,为解决四旋翼飞行器

的各种疑难问题提供了极大的帮助。早期的飞行器如图 1-1 和图 1-2 所示。

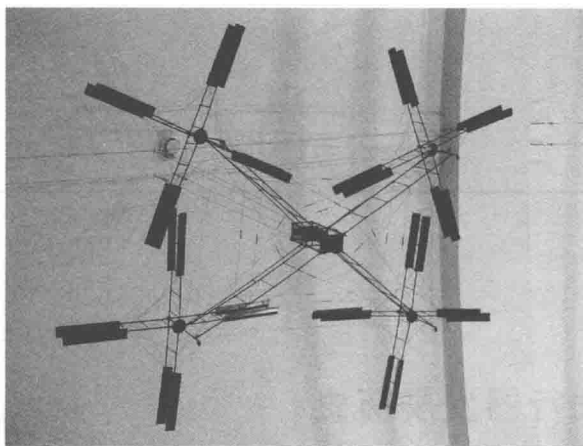


图 1-1 Louis Breguet(1907)

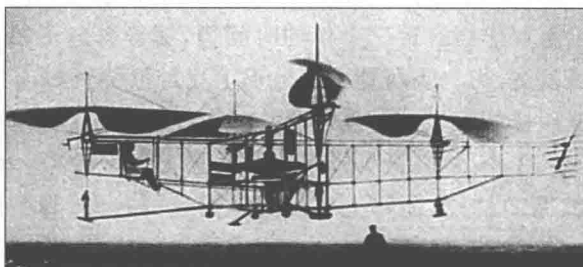


图 1-2 George de Bothezat (1922. 12)

Curtiss-Wright VZ-7 是垂直起降飞机,是 Curtiss-Wright 公司专为美国陆军设计的,如图 1-3 所示,VZ-7 通过改变 4 个螺旋桨的推力实现控制。



图 1-3 Curtiss-Wright VZ-7(1958)

1.2 四旋翼飞行器的研究现状

在过去的几十年里,小型无人机已经应用于许多领域。四旋翼飞行器研究的主要热点是如何提高机动性和悬停能力。四轴飞行器的四转子设计使得飞行器设计相对简单、可靠和易操作。目前四轴飞行器的研究热点在多机通信、环境探索及可操作性,如果把这些特性融合在一起,它可以完成目前其他车辆所不可能完成的很多任务。目前正在研发的有:

- 贝尔波音四倾转旋翼机的概念,提出对 C-130 大型军用运输机采用固定直升机概念和倾斜转子概念进一步结合;
- Aermatica Spa Anteos 是第一个旋转翼遥控飞机,获得官方许可的民用空域飞行,由意大利民航局设计制造,并首次工作在非隔离空域;
- Aeroquad 和 Arducopter 基于 Arduino 的四旋翼飞行器 DIY(Do It Yourself,自己动手做)建设开源硬件和软件项目;
- Parrot AR. Drone 是一款带有摄像机无线控制的四旋翼飞行器,可以通过智能电话和平板设备进行操控,如图 1-4 所示;
- Nixie 是一款带小相机配备的飞行器,可以作为一种穿戴设备,如图 1-5 所示。

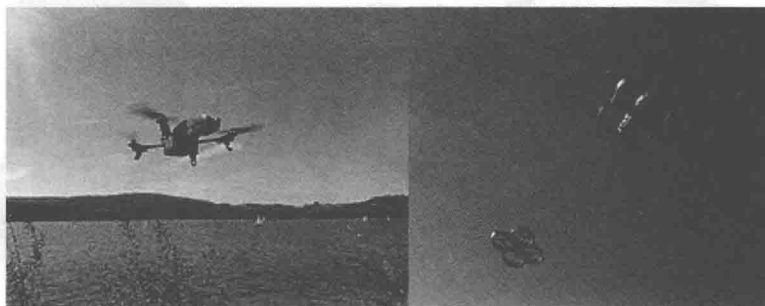


图 1-4 Parrot AR. Drone 飞行器

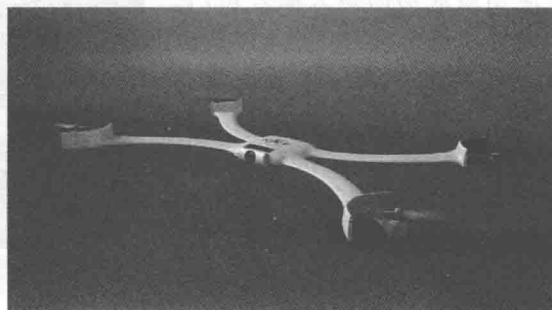


图 1-5 Nixie 飞行器

1.3 四旋翼飞行器的主要应用

因为四轴飞行器体积小,重量轻,携带方便,能轻易进入人不易进入的各种恶劣环境。该飞行器常用来制作模型,也用来执行航拍电影取景、实时监控、地形勘探等飞行任务。目前主要应用在以下几个方面。

- 研发平台:四旋翼飞行器是大学研究人员测试和评估在多个不同领域新思路的一个有用工具,包括飞行控制、导航、实时系统和机器人。近年来,许多高校已经让四旋翼飞行器从事越来越复杂的空中演习。成群的四轴飞行器可以悬停在空中,自主执行复杂的飞行程序,如翻转。
- 军事和执法:四旋翼无人机用于军事侦察和执法机构侦察,以及在城市环境中的搜索和救援任务。由加拿大公司 Aeryon Labs 研发的小型无人机 Scout,可以静静地在地面徘徊,并用相机观察地面上的人和物。用户在超过视线范围内 3km 操作 Scout,在距地面 100~150m 的飞行速度达 50km/h,续航 25min。它允许飞行在恶劣天气条件下,所有通信都采用数字加密,从而降低了劫持和视频截取的风险,如图 1-6 所示。

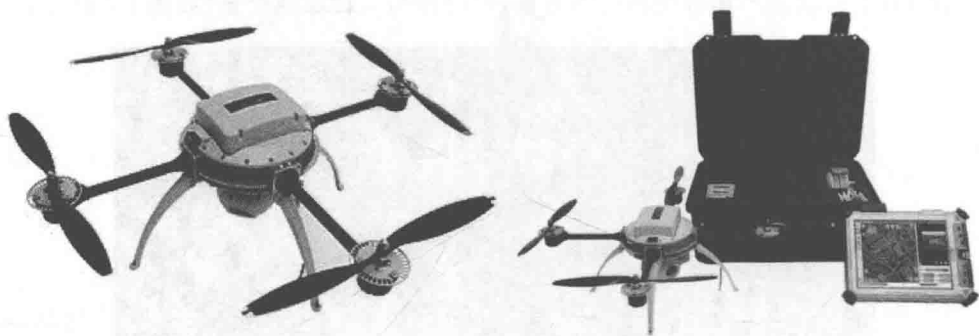


图 1-6 Scout 飞行器

- 商业应用:商业应用最成功的是大疆公司,它约占世界民用无人机市场份额的 70%,以及全球小型无人机市场份额的 50%。随着大疆公司把目光从无人机本身的平台,逐步移向建立在飞行器平台上的增值应用,未来的市场空间对于这家新兴公司来说,仍然是个未知数。在美国使用四轴飞行器最大的领域是航空影像。四旋翼无人机为航拍节约了大量成本。大疆无人机如图 1-7 所示。



图 1-7 大疆无人机



四旋翼飞行器的控制原理

2.1 四旋翼飞行器的结构

如图 2-1 所示,四旋翼飞行器一般是由 4 个可以独立控制转速的外转子直流无刷电机驱动的螺旋桨提供全部动力的飞行运动装置,4 个固定迎角的螺旋桨分别安装在两个十字相交的刚性碳素杆两端。

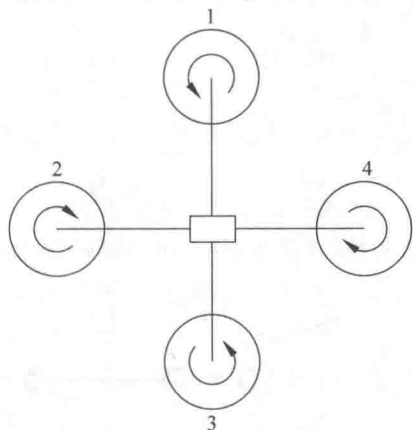


图 2-1 四旋翼飞行器结构示意图

对于绝大多数四旋翼飞行器来讲,飞行器的结构关于两根碳素杆的交点对称,并且两个相邻的螺旋桨旋转方向相反。正是由于这种独特结构,使四旋翼飞行器抵消了飞机的陀螺效应,更方便建模。与传统的单旋翼飞行器,特别是直升机相比,四旋翼飞行器没有尾桨,这使之拥有更高的能量利用率。

另外,四旋翼飞行器四个旋翼的转速比直升机的螺旋桨转速明显低很多。因此,它可以近距离地靠近目标物体,适合室内飞行和近地面飞行。

2.2 四旋翼飞行器的运动控制方法

四旋翼飞行器系统共有 4 个输入,分别为一个上升力和三个方向的转矩。但是飞行器在空间中却有 6 个自由度的输出坐标,可以进行三个坐标轴方向的平动运动和围绕三个坐标轴方向的转动运动。

如果沿着任意给定方向的独立运动,飞行器没有给予足够多的运动驱动,那么该飞行器就是欠驱动的。可见,四旋翼飞行器是欠驱动和动力不稳定的系统。因此,针对该系统实现全部的运动控制目标,必然存在旋转力矩与平移系统的耦合。传统的纵列式直升机为了平衡反扭矩,需借助尾桨来实现。

四旋翼飞行器采用了 4 个旋翼的机械结构,4 个电机作为飞行的直接动力源,通过改变 4 个螺旋桨的转速,进而改变螺旋桨产生的升力来控制飞行器姿态和运动。这种设计理念使飞行器结构和动力学特性得到了很大简化。

四旋翼的前桨 1 和后桨 3 逆时针旋转,左右 2、4 两桨顺时针旋转,这种反向对称结构代替了传统直升机尾旋翼。在飞行过程中,如图 2-2 所示,改变 4 个旋翼螺旋桨的转速,可使四旋翼产生各种飞行姿态,也可使四旋翼飞行器向预定方向运动,完成任务。

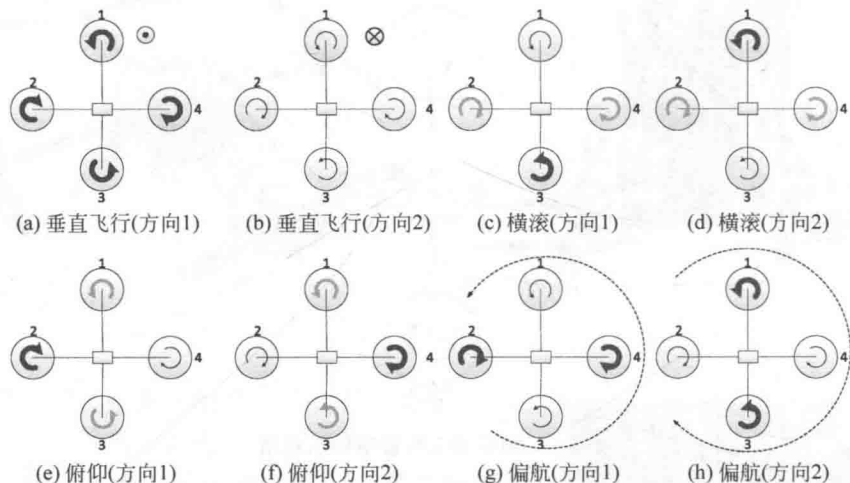


图 2-2 四旋翼飞行器飞行运动原理

根据四旋翼飞行器的运动方式的特点将其飞行控制划分为 4 种基本的飞行控制方式:

- 垂直飞行控制;
- 横滚控制;
- 俯仰控制;
- 偏航控制。

下面分别对以上 4 种飞行控制方式进行阐述。

垂直飞行控制主要是控制飞机的爬升、下降和悬停。如图 2-3 所示,弧线箭头方向表示螺旋桨旋转的方向。

当四旋翼处于水平位置时,在垂直方向上,惯性坐标系同机体坐标系重合。同时增加或减小 4 个旋翼的螺旋桨转速,4 个旋翼产生的升力使得机体上升或下降,从而实现爬升和下降。悬停时,保持 4 个旋翼的螺旋桨转速相等,并且保证产生的合推力与重力相平衡,使四旋翼在某一高度处于相对静止状态,各姿态角为零。垂直飞行控制的关键是要稳定 4 个旋翼的螺旋桨转速,使其变化一致。

横滚控制,如图 2-4 所示。通过增加左边旋翼螺旋桨转速,使拉力增大,相应减小右边旋翼螺旋桨转速,使拉力减小,同时保持其他两个旋翼螺旋桨转速不变。这样由于存在拉力差,机身会产生侧向倾斜,从而使旋翼拉力产生水平分量,使机体向右运动。当 $\Delta_2 = \Delta_4$ 时可控制四旋翼飞行器作侧向平飞运动。

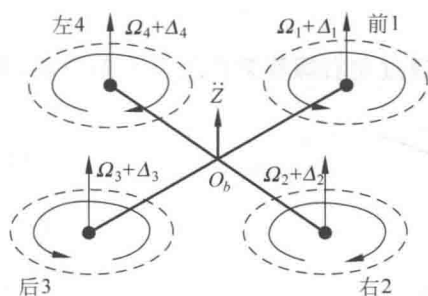


图 2-3 垂直飞行控制示意图

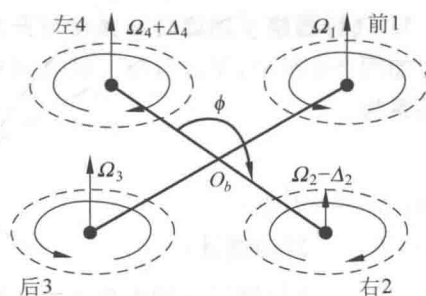


图 2-4 横滚运动控制示意图

俯仰控制,如图 2-5 所示,与横滚控制相似,在保持左右两个旋翼螺旋桨转速不变的情况下,减少前面旋翼螺旋桨的转速,并相应增加后面旋翼螺旋桨的转速,使得前后两个旋翼存在拉力差,从而引起机身的前后倾斜,使旋翼拉力产生与横滚控制中水平方向正交的水平分量,使机体向前运动。类似地,当 $\Delta_1 = \Delta_3$ 时可控制四旋翼飞行器作纵向平飞运动。

偏航控制,如图 2-6 所示。四旋翼飞行器为了克服反扭矩影响,4 个旋翼螺旋桨中的两个顺时针转,两个逆时针转,且对角线上的两个旋翼螺旋桨转动方向相同。

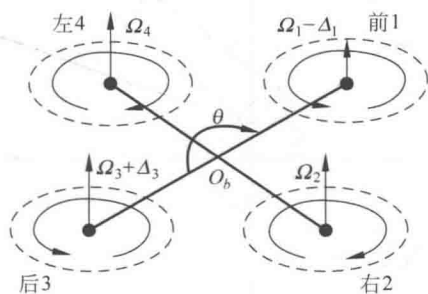


图 2-5 俯仰运动控制示意图

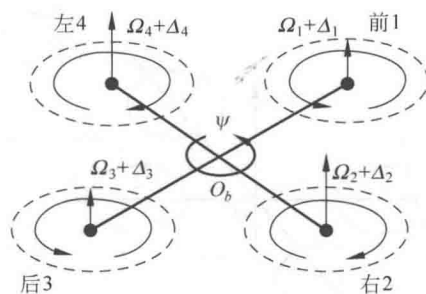


图 2-6 偏航控制示意图

反扭矩的大小与旋翼螺旋桨转速有关,当4个旋翼螺旋桨转速不完全相同时,不平衡的反扭矩会引起机体转动。根据上面的原理,可以设计四旋翼飞行器的偏航控制,即同时提升一对同方向旋转的旋翼螺旋桨转速并降低另一对相反方向旋转的旋翼螺旋桨转速,保证转速增加的旋翼螺旋桨转动方向与四旋翼飞行器机身的转动方向相反。

2.3 四旋翼飞行器各部分的工作原理

2.3.1 飞行姿态与升力关系

为便于进行四轴飞行器运动分析,建立刚体三轴坐标系,将四轴飞行器置于刚体坐标系其中如图 2-7 所示,飞行器运动过程中飞行姿态与各螺旋桨所产生升力之间的关系借助此坐标轴进行分析。

1. 飞行器绕 y 轴旋转 α 角度与升力之间的关系

如图 2-8 所示,飞行器与 y 轴之间夹角 α 。主要通过左右螺旋桨产生升力差控制,其控制关系为

$$\sum M = I_x \ddot{\alpha} \quad (2-1)$$

式中: M ——力矩;

I_x ——转动惯量;

$\ddot{\alpha}$ ——飞行器与 y 轴夹角二阶导数,即角加速度。

$$l_x (F_{\text{右}} - F_{\text{左}}) = I_x \ddot{\alpha} \quad (2-2)$$

式中: $F_{\text{右}}$ ——右侧螺旋桨旋转产生升力;

$F_{\text{左}}$ ——左侧螺旋桨旋转产生升力;

l_x ——螺旋桨与飞行器中心轴距。

$$\ddot{\alpha} = \frac{l_x (F_{\text{右}} - F_{\text{左}})}{I_x} \quad (2-3)$$

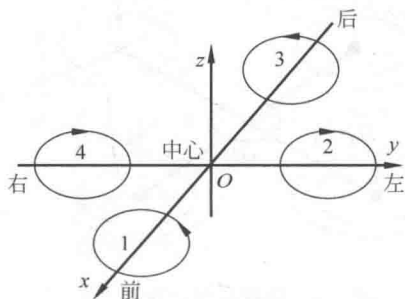


图 2-7 飞行器坐标轴建立

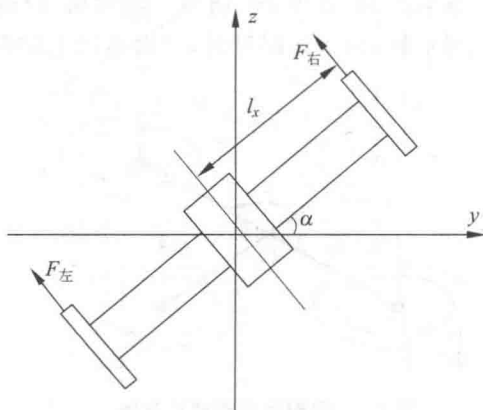


图 2-8 飞行器绕 y 轴的角度 α 与 $F_{\text{左}}$ 、 $F_{\text{右}}$ 的关系

2. 飞行器绕 x 轴旋转 β 角度与升力之间的关系

如图 2-9 所示,飞行器与 x 轴夹角 β 主要通过前后两个螺旋桨所产生升力差值进行控制,其控制关系为

$$\sum M = I_y \ddot{\beta} \quad (2-4)$$

$$l_y(F_{\text{前}} - F_{\text{后}}) = I_y \ddot{\beta} \quad (2-5)$$

$$\ddot{\beta} = \frac{l_y(F_{\text{前}} - F_{\text{后}})}{I_y} \quad (2-6)$$

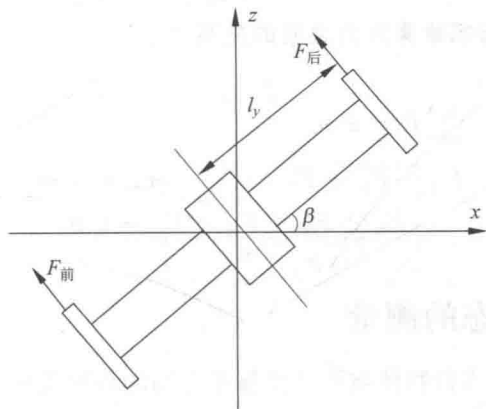


图 2-9 飞行器绕 x 轴的角度 β 与 $F_{\text{前}}$ 、 $F_{\text{后}}$ 的关系

3. 飞行器绕 z 轴旋转 γ 角度与升力之间的关系

如图 2-10 所示,飞行器绕 z 轴旋转 γ 角度,使螺旋桨产生扭矩及升力与旋转角度之间的关系为

$$\sum M = I_z \ddot{\gamma} \quad (2-7)$$

$$M_{\text{右}} + M_{\text{左}} - M_{\text{前}} - M_{\text{后}} = I_z \ddot{\gamma} \quad (2-8)$$

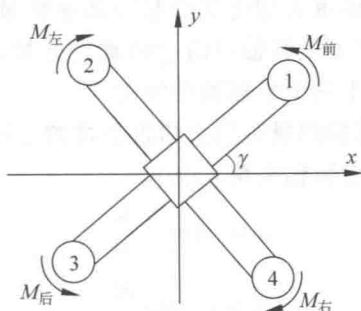


图 2-10 飞行器绕 z 轴旋转角度 γ 与 $M_{\text{前}}$ 、 $M_{\text{后}}$ 、 $M_{\text{左}}$ 、 $M_{\text{右}}$ 之间的关系