



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

北京威航世纪教育科技有限公司推荐用书

嵌入式与工业控制技术

Development Guide of Embedded Flight Control
System For Multi-Rotor UAV

多旋翼无人飞行器嵌入式 飞控开发指南

林庆峰 谌利 奚海蛟 编著

Lin Qingfeng

Chen Li

Xi Haijiao



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Development Guide of Embedded Flight Control
System For Multi-Rotor UAV

多旋翼无人飞行器嵌入式 飞控开发指南

林庆峰 湛利 奚海蛟 编著

Lin Qingfeng

Chen Li

Xi Haijiao

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

随着集成电路、微控制器以及微机电技术的发展,多旋翼无人飞行器的控制技术得到了蓬勃的发展。随着大疆、派诺特、3DR 等国内外一系列无人机公司推出针对普通大众的消费级无人机产品,无人机作为一个普通消费应用也得到了大众的认可和接受,越来越多的工程技术人员将多旋翼无人飞行器作为一个经典的控制系统来进行学习和研究。本书主要围绕多旋翼无人机的飞控系统设计,从嵌入式的基础知识开始,深入浅出地介绍了无人机的基本知识和硬件构成,重点介绍了无人机的飞控系统原理、基础和开发流程,针对飞行器系统的状态解算介绍了几种不同的解算方法,并给出相应的实际代码例程。本书从各方面对无人机系统的设计进行阐述,并提供了最前沿的知识和信息,既有初学者希望了解的基础知识,也有行业研究者所希望深入了解的算法分析,以及室内定位 SLAM 原理等。

除了正文部分,本书还提供了丰富的附录,包括四旋翼无人机的组装、无刷电机与电调的相关知识、无人机实验室的相关研发调试设备,以及业界流行的开源飞控的相关知识,甚至包括无人机的相关应用,让读者能够更全面地熟悉和了解整个无人机行业的生态系统。

本书特别适合作为高等院校自动化、计算机、电子工程等相关专业“多旋翼无人飞行器设计”课程的教材,也可供从事嵌入式系统开发与应用的工程技术人员参考。

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

多旋翼无人飞行器嵌入式飞控开发指南/林庆峰,谌利,奚海蛟编著. —北京:清华大学出版社,2017
(高等学校电子信息类专业系列教材)
ISBN 978-7-302-47256-8

I. ①多… II. ①林… ②谌… ③奚… III. ①无人驾驶飞机—飞行控制—系统开发—指南 IV. ①V279-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 125959 号

责任编辑:盛东亮
封面设计:李召霞
责任校对:李建庄
责任印制:刘海龙

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:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.5

字 数:570千字

版 次:2017年9月第1版

印 次:2017年9月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:69.00元

产品编号:074966-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

一 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	谢凯年	赛灵思公司
	刘铁根	天津大学	张伟刚	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	宋峰	南开大学
	苑立波	哈尔滨工程大学	靳伟	香港理工大学
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

莱特兄弟发明飞机的 17 年后(即 1920 年),多旋翼无人飞行器诞生,此后便经历了漫长的沉默期和酝酿期。随着现代控制理论和技术的发展,以及集成电路、嵌入式微处理器和微机电技术的成功应用,在多旋翼飞行器硬件和算法两方面均发展成熟的情况下,众多和无人机产业相关的公司如雨后春笋般涌现,同时风险投资等各类资本也都纷纷涌入无人机产业。随着多旋翼无人飞行器在民用及消费类市场的普及和应用,整个行业对无人机相关专业领域的人才需求也呈爆发式增长。无人机系统作为一个先进复杂的现代控制系统,涵盖了材料、通信、电子、控制、数字信号处理和传感器技术等各方面的专业技术应用,因此也需要各个专业领域的技术人才,很多高校也同时开设了相关专业。

现在,国内外与多旋翼无人飞行器相关的研究论文尤其是针对飞控系统的论文非常丰富,但是国内针对飞控系统的教材和书籍以介绍理论知识居多,偏向应用的资料不够丰富,而应用级别的教材书籍正是广大无人飞行器爱好者和基础研究人员迫切需要的资料。正是在这个背景下,北京航空航天大学林庆峰老师与武汉飞航科技有限公司共同合作推出了这本开发指南,希望能够结合国内外的研究成果和各自的研究技术及产品,为业界提供一个基础学习和入门的资料。

本书为读者提供了可以从零基础开始学习的多旋翼无人飞行器的基础知识,包括无人机所涉及的机架、动力系统、飞控系统、遥控遥测系统、传感器、卫星导航定位系统、光流定位系统、无线图传系统和地面测控站等方面的基础知识,这些内容主要在第 1 章介绍,是针对航模爱好者与初学者的入门参考资料。需要了解飞控系统硬件设计的读者可以重点阅读第 2 章,该章深入浅出地介绍无人机飞控系统的硬件设计,处理器的选型和应用。在此基础上,读者可以进一步学习无人机飞控系统软件开发的详细流程与方法,包括嵌入式实时操作系统的相关知识、飞控系统的各种传感器的数据采集和处理、自动控制的核心(即控制系统的状态估计在无人机系统中的应用和开发),以及 PID 线性控制规律的设计核心方案,这些内容主要在第 6 章、第 7 章和第 8 章中介绍,这一部分也是本书的重点内容。此外,通过本书,读者还能够了解到无人机的自主导航的相关知识,包括室内导航和室外导航的一些核心知识,以及避障系统的相关介绍。本书还介绍了针对无人机地面测控站设计的核心技术、遥测数据链路的通信原理设计、飞控参数存储加载与更新以及其他一些辅助功能的相关介绍。此外,本书还对无人机飞控系统的应用调试与检测设备进行了详细的介绍,因此对于希望学习了解无人机飞控软件算法并且需要进行深入研究的读者和爱好者,本书都是一种非常有价值的参考书籍。

本书主要由北京航空航天大学林庆峰老师及武汉飞航科技有限公司研发人员编写而成,所有作者均有多年从事无人机设计研发及应用方面的经验。除三位主要作者的工作之

外,本书还凝聚了武汉飞航科技有限公司技术团队的众多工程师的辛勤劳动,他们是徐凡、郑森林、徐仕斌、吴志雄、雷航、王飞、魏德明、毕野、杨金星、奚天麒、张玮和张伟,在此对他们一一表示感谢。此外,本书还得到了郑州航空工业管理学院电子通信工程学院的陈宇老师的支持和指导。本书所介绍和阐述的飞控系统和其他各部分无人机设备及检测设备均由武汉飞航科技有限公司提供,所介绍的实验案例均可在该公司的光标系列飞控设备上运行。

由于编者水平所限,并且时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2017年3月

目录

CONTENTS

第 1 章 多旋翼无人机基础知识	1
1.1 无人机的介绍	1
1.2 无人机的分类与管理	4
1.3 无人机与航空模型的区别	4
1.4 多旋翼无人机的发展历史	5
1.5 多旋翼无人机的组成	7
1.5.1 机架系统	7
1.5.2 动力系统	8
1.5.3 动力电源与充电系统	11
1.5.4 电子调速器	13
1.5.5 飞行控制系统	14
1.5.6 遥控器和遥控接收机	15
1.5.7 遥测链路数传系统	17
1.5.8 光流定位系统	18
1.5.9 全球卫星导航系统	19
1.5.10 高度计	20
1.5.11 导航系统	20
1.5.12 无线图传系统	22
1.5.13 地面站控制系统	23
1.5.14 任务载荷云台和摄像头	24
1.5.15 避障系统	25
1.5.16 虚拟现实和增强现实系统	28
1.6 多旋翼飞行器的结构和飞行原理	29
1.6.1 多旋翼飞行器的机身布局	29
1.6.2 多旋翼飞行器的旋翼结构	31
1.6.3 多旋翼飞行器的飞行原理	32
1.6.4 多旋翼的优缺点	35
1.7 开源飞控简介	36
第 2 章 飞行控制系统核心硬件	42
2.1 ARM Cortex-M4 架构	42
2.1.1 ARM 内核	42
2.1.2 Cortex-M4 内核	42
2.1.3 以 ARM Cortex-M4 为核心的微控制器	49

2.2	STM32F4 系列微控制器	50
2.3	飞行控制系统硬件架构设计与原理	52
2.3.1	遥控接收机接口	53
2.3.2	电调输出接口	56
2.3.3	传感器接口	57
2.3.4	GNSS 接口	59
2.3.5	SWD 调试口	59
2.3.6	超声波接口	61
2.3.7	系统供电	61
2.3.8	遥测数传	62
2.3.9	其他功能和扩展接口	62
2.4	“光标”飞控 PCB 的布局设计	65
2.5	飞控系统硬件设计注意事项	65
第 3 章	嵌入式实时操作系统和 FreeRTOS	68
3.1	实时操作系统简介	68
3.1.1	实时操作系统的定义	68
3.1.2	实时操作系统的特征	68
3.2	实时操作系统在飞控系统中的重要性的	69
3.3	FreeRTOS 实时操作系统	69
3.3.1	FreeRTOS 简介	69
3.3.2	FreeRTOS 的特点	69
3.3.3	FreeRTOS 架构概述	70
3.4	调度策略	71
3.4.1	FreeRTOS 支持的调度方式	71
3.4.2	调度器简介	71
3.4.3	抢占式调度器	71
3.4.4	时间片调度器	73
3.5	任务及任务优先级	74
3.5.1	任务和协程(Co-routines)	74
3.5.2	任务状态	74
3.5.3	任务优先级	75
3.5.4	任务优先级分配方案	75
3.6	任务间通信——信号量	76
3.6.1	信号量的概念及其作用	76
3.6.2	FreeRTOS 任务间计数信号量的实现	77
3.6.3	FreeRTOS 中断方式计数信号量的实现	77
3.6.4	计数信号量 API 函数	78
3.7	任务间通信——消息队列	81
3.7.1	消息队列的概念及其作用	81
3.7.2	FreeRTOS 任务间消息队列的实现	81
3.7.3	FreeRTOS 中断方式消息队列的实现	82
3.7.4	消息队列 API 函数	83
3.8	任务间通信——互斥信号量	86

3.8.1	互斥信号量的概念及其作用	86
3.8.2	优先级翻转问题	86
3.8.3	FreeRTOS 互斥信号量的实现	87
3.8.4	互斥信号量 API 函数	88
3.9	飞控系统的任务规划与 5 环控制	89
第 4 章	飞行控制系统的定时器	91
4.1	STM32F407 的系统时钟配置	91
4.1.1	STM32F4 的系统时钟树	91
4.1.2	STM32F4 的系统时钟初始化	94
4.1.3	STM32F4 的系统时钟使能和配置	98
4.2	ST 微控制器的定时器模块	101
4.2.1	高级控制定时器(Advanced-control Timers)	101
4.2.2	通用定时器(General-purpose Timers)	104
4.2.3	基本定时器(Basic Timers)	107
4.3	任务调度定时器	109
4.4	遥控器 PWM 编码和定时器输入捕获	110
4.5	电子调试器的输出控制 PWM 和定时器输出比较模式	111
第 5 章	飞控系统的传感器	113
5.1	飞控系统的传感器	113
5.2	ST 微控制器的 I2C 驱动	114
5.2.1	I2C 简介	114
5.2.2	I2C 驱动在 STM32 中的硬件实现	115
5.2.3	I2C 驱动在 STM32 中的软件实现	120
5.3	加速度计的原理和测量信息	123
5.3.1	加速度计的原理	123
5.3.2	加速度计的测量信息	124
5.4	加速度计原始数据采集、校准和滤波	125
5.4.1	加速度计原始数据采集	125
5.4.2	加速度计校准	133
5.5	陀螺仪的原理和测量信息	135
5.5.1	陀螺仪的原理	135
5.5.2	陀螺仪的测量信息	135
5.6	陀螺仪的原始数据采集、校准和滤波	136
5.6.1	陀螺仪原始数据采集	136
5.6.2	陀螺仪校准	136
5.6.3	加速度计与陀螺仪的滤波	137
5.7	磁力计的工作原理和测量信息	137
5.7.1	磁力计的原理	137
5.7.2	磁力计的测量信息	139
5.8	磁力计的原始数据采集、校准和滤波	139
5.8.1	磁力计原始数据采集	140
5.8.2	磁力计校准	145
5.8.3	磁力计的滤波	148

5.9	超声波传感器简介	149
5.9.1	超声波传感器原理	149
5.9.2	超声波传感器简介	149
5.10	超声波传感器的数据采集驱动和滤波	151
5.10.1	超声波传感器数据采集驱动	151
5.10.2	超声波传感器的滤波	153
5.11	气压传感器简介	154
5.12	气压传感器的数据采集驱动	155
5.13	激光测距测高传感器	157
5.14	视觉传感器	158
5.14.1	光流	158
5.14.2	视觉里程计	163
第 6 章	状态估计	168
6.1	组合导航	168
6.2	飞行器的坐标系	169
6.3	方向余弦矩阵和欧拉角	170
6.3.1	方向余弦矩阵	170
6.3.2	姿态与欧拉角	171
6.3.3	欧拉角的定轴转动表示矩阵	172
6.4	四元数	175
6.4.1	四元数的定义	175
6.4.2	四元数与旋转的关系	176
6.5	四元数的姿态估计	177
6.6	卡尔曼滤波	182
6.7	扩展卡尔曼滤波	186
6.8	几种算法的总结比较	190
第 7 章	线性控制系统 PID 控制算法	192
7.1	控制理论与 PID 线性控制系统原理	192
7.1.1	比例控制	193
7.1.2	积分控制	194
7.1.3	微分控制	194
7.2	飞控算法 PID 框架设计	194
7.3	飞控算法外环 PID 实现	195
7.4	飞控算法内环 PID 实现	197
7.5	信号滤波	198
7.5.1	移动平滑滤波	198
7.5.2	FIR 滤波	200
7.5.3	IIR 滤波	202
7.6	PID 参数的调试	205
7.6.1	飞控的 PID 参数	205
7.6.2	调试步骤	205

第 8 章 油门和高度控制	207
8.1 油门输入曲线	207
8.2 油门解锁功能	208
8.3 油门权重分配和电调输出	209
8.4 高度控制	211
第 9 章 自主导航系统	213
9.1 自主导航概述	213
9.2 室内定位	214
9.2.1 室内定位技术	214
9.2.2 视觉导航	216
9.2.3 SLAM 简介	217
9.2.4 视觉 SLAM 闭环检测与后端优化	217
9.3 室外 GPS 定位和 NEMA 实现	218
9.3.1 GPS 定位系统的基本工作原理	218
9.3.2 单点定位	219
9.3.3 相对定位	219
9.3.4 差分定位	220
9.3.5 GPS 标准协议 NEMA	220
9.4 航路规划	230
9.4.1 航线规划	230
9.4.2 轨迹规划	232
9.5 SINS/GPS 组合导航的模型和算法	233
9.5.1 SINS 和 GPS 接收机的误差模型	233
9.5.2 SINS/GPS 松组合的状态方程和量测方程	234
9.5.3 SINS/GPS 紧组合的状态方程和量测方程	235
9.5.4 方程离散化和卡尔曼滤波	237
9.6 避障系统	238
9.6.1 避障使用的传感器	238
9.6.2 避障算法	238
9.6.3 避障过程中存在的问题	241
第 10 章 遥测数传通信链路	242
10.1 通用数传模块分类及其性能	242
10.1.1 无人机数传模块简介	242
10.1.2 调制方式的划分	242
10.1.3 传输距离及其影响因素	244
10.2 ST 微控制器的串口通信和数传模块硬件接口	245
10.2.1 ST 微控制器的串口通信	245
10.2.2 数传模块的硬件接口	248
10.3 简单通信信源编码协议及其实现	249
10.3.1 信源编码	249
10.3.2 串口通信协议	249
10.4 MAVLink 协议实现	249

10.4.1	MAVLink 协议简介	249
10.4.2	MAVLink 数据包结构	250
10.4.3	MAVLink 消息帧讲解	251
10.4.4	MAVLink 消息帧发送与解析	255
10.5	地面站数据接收与数据解析	258
10.5.1	PC 端地面站数据采集与存储	258
10.5.2	Android 地面站数据接收	260
10.5.3	Android 地面站数据存储与分析	262
第 11 章	其他辅助功能	264
11.1	参数存储、在线更新与加载	264
11.2	调试 LED	266
11.3	失控保护功能	271
11.4	手机 WiFi 控制	274
11.5	手机蓝牙控制	278
11.6	第一人称视角 FPV 控制	282
11.6.1	FPV 的定义	282
11.6.2	FPV 的设备组成	282
11.6.3	FPV 眼镜与 VR 眼镜的区别	284
11.7	无人机应用领域	285
11.7.1	拍照摄影	285
11.7.2	植保无人机	287
11.7.3	电力巡检	288
11.7.4	环保领域的应用	290
第 12 章	基于 STM32F4 的基础程序开发	292
12.1	处理器 STM32F4 简介	292
12.1.1	系统总线	292
12.1.2	系统接口	294
12.2	开发环境简介	295
12.2.1	软件安装	295
12.2.2	工程创建	298
12.2.3	软件介绍	300
12.2.4	程序调试	301
12.3	STM32 固件库	302
12.3.1	固件库介绍	302
12.3.2	固件库移植	303
12.4	LED 显示	307
12.4.1	硬件设计	307
12.4.2	软件设计	308
12.4.3	实验现象	308
12.5	USART 串口的使用	309
12.5.1	硬件设计	309
12.5.2	软件设计	309
12.5.3	实验现象	310

12.6	ADC 模数转换器	311
12.6.1	软件设计	311
12.6.2	实验现象	313
12.7	定时器中断	313
12.7.1	定时器中断的原理	313
12.7.2	软件设计	314
12.7.3	实验现象	315
12.8	FreeRTOS 实时操作系统简介	315
12.8.1	FreeRTOS 基础应用	316
12.8.2	FreeRTOS 实例	316
12.8.3	实验现象	317
12.9	FreeRTOS 操作 EEPROM	318
12.9.1	程序设计	318
12.9.2	实验现象	319
12.10	FreeRTOS 操作 MPU6050	320
12.10.1	软件设计	320
12.10.2	实验现象	321
12.11	FreeRTOS 操作磁力计	321
12.11.1	软件设计	322
12.11.2	实验现象	322
12.12	FreeRTOS 操作气压计	323
12.12.1	软件设计	323
12.12.2	实验现象	325
附录 A	F450 四旋翼飞行器 DIY 组装流程	326
A.1	材料清单	326
A.2	焊接电机	329
A.3	机架的安装	329
A.4	飞控模块安装	333
A.5	电调行程校准	334
A.6	电调、遥控接收机、数传模块与飞控的连接	335
A.7	遥控操作说明	336
A.8	图传系统连接	336
附录 B	无刷电机与电子调速器介绍	339
B.1	无刷直流电机	339
B.2	电子调速器换相的相关知识	340
B.3	电调启动频率	341
附录 C	无人机实验室研发调试设备	343
C.1	FH550 四旋翼无人机研发系统	343
C.2	应用级无人机系统	345
C.3	高级航拍数字图传系统	347
C.4	便携式地面测控站系统	348
C.5	高级飞行器 3 自由度姿态算法验证系统	349

1.1 无人机的介绍

无人机,也称无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicle,UAV),是一种配备了数据处理系统、传感器、自动控制系统和通信系统等必要机载设备的飞行器,能够进行一定的稳态控制和飞行,且具备一定的自主飞行能力而无须人工干预。无人机技术是一项涉及多个技术领域的综合技术,它对通信技术、传感器技术、人工智能技术、图像处理技术、模式识别技术和控制理论都有较高的要求。图 1-1 所示是一些全球著名的军用无人机。



(a) 美国“全球鹰”无人机



(b) 美国“捕食者”无人机



(c) 美国“影子200”无人机

图 1-1 全球著名的军用无人机

无人飞行器与它所配套的地面站测控系统、存储、拖运、发射、回收和信息处理等维护保障部分一起形成一个完整的系统,统称无人飞行器系统。图 1-2 所示是一款军用的无人飞行器系统。

相比于有人飞行器,无人飞行器的特点主要有以下几个方面:

- (1) 无人驾驶,无驾驶舱。
- (2) 有自动驾驶仪、程序控制装置等设备。
- (3) 体积小,造价低,使用及维护成本低。
- (4) 对于军用领域可降低人员战损。
- (5) 可应用于枯燥、恶劣及危险的环境。
- (6) 地面、舰艇上或母机遥控站人员通过雷达等设备对其进行跟踪、定位、遥控、遥测和数字传输。
- (7) 可在无线电遥控下像普通飞行器一样起飞或用助推火箭发射升空,也可由母机带到空中投放飞行。

- (8) 回收时,可采用与普通飞机着陆过程一样的方



图 1-2 美国“火力侦察兵”无人直升机