

中国核科学技术进展报告

(第五卷)

——中国核学会2017年学术年会论文集

第7册

- ▲ 计算物理分卷
- ▲ 核物理分卷
- ▲ 粒子加速器分卷
- ▲ 核聚变与等离子体物理分卷
- ▲ 脉冲功率技术及其应用分卷
- ▲ 核工程力学分卷

中国原子能出版社

中国核科学技术进展报告

(第五卷)

——中国核学会 2017 年学术年会论文集

第 7 册

计算物理分卷

核物理分卷

粒子加速器分卷

核聚变与等离子体物理分卷

脉冲功率技术及其应用分卷

核工程力学分卷



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国核科学技术进展报告. 第五卷, 中国核学会 2017 年学术年会论文集. 第 7 册, 计算物理、核物理、粒子加速器、核聚变与等离子体物理、脉冲功率技术及其应用、核工程力学 / 中国核学会主编. — 北京: 中国原子能出版社, 2018. 4

ISBN 978-7-5022-8806-8

I. ①中… II. ①中… III. ①核技术—技术发展—研究报告—中国 IV. ①TL—12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 016627 号

内 容 简 介

中国核学会 2017 学术双年会于 2017 年 10 月 16—18 日在山东省威海市召开。会议主题为“安全、绿色、和谐、发展”。大会共征集论文 1 400 篇, 经过专家审稿, 评选出 701 篇较高水平论文收录进《中国核科学技术进展报告(第五卷)》, 报告共分为 10 册, 并按 26 个二级学科设立分卷。

本册为计算物理、核物理、粒子加速器、核聚变与等离子体物理、脉冲功率技术及其应用和核工程力学分卷。

中国核科学技术进展报告(第五卷) 第 7 册

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

策划编辑 付 真

责任编辑 孙凤春

特约编辑 张宝珠

装帧设计 赵 杰

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 890 mm×1240 mm 1/16

印 张 24 字 数 698 千字

版 次 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-8806-8 定 价 120.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

中国核学会 2017 年 学术年会大会组织机构

大会名誉主席 王寿君

大会主席 顾军

执行主席 李冠兴

大会副主席 (按姓氏笔画排序)

王森 刘永德 孙汉虹 余剑锋 张延克 张维岩
祖斌 贺禹 赵军 康克军 詹文龙 雷增光

高级顾问 丁中智 马栩泉 王乃彦 王大中 张国宝

杜祥琬 陈佳洱 胡思得 钱绍钧 穆占英

学术委员会

主任 李冠兴

副主任 叶奇蓁 邱爱慈 陈念念 赵志祥 程建平

成员 (按姓氏笔画排序)

王贻芳 卢文跃 叶国安 司胜义 田佳树 华跃进
张永学 张志俭 张志忠 张金带 李建刚 杨华庭
陈炳德 陈森玉 罗志福 罗顺忠 姜宏 赵宏卫
赵振堂 唐传祥 柴国早 彭先觉 曾毅君 樊明武
潘传红 潘自强

组委会

主任 雷增光

常务副主任 于鉴夫

副主任 王志 庄火林

委员 (按姓氏笔画排序)

丁有钱 马文军 王丽瑶 王国宝 石金水 帅茂兵
朱科军 刘伟 刘亚强 孙晔 李景焯 苏艳茹
张建 张勇 杨海峰 陈东风 陈怀璧 陈伟
胡绍全 郑卫芳 段旭如 郝朝斌 黄伟 彭太平
解新芳 魏素花

秘书处

主任 秦昭曼

副主任 徐若珊 张 玮 黄海英

成 员 (按姓氏笔画排序)

于清妍 王 宇 王 凯 叶 琦 龙 云 刘世伟
孙俊燕 张宝珠 李 钢 李小禹 李 静 沈 莹
杨 爽 苏明煜 杜婷婷 陈 旭 陈晓鹏 胡 静
耿庆云 秦子淇

主办单位 中国核学会

承办单位 中国核工业建设集团公司

协办单位 中国核工业集团公司

国家电力投资集团公司

国家核电技术公司

中国广核集团有限公司

清华大学

中国工程物理研究院

中国科学院

中国华能集团公司

中国大唐集团公司

技术支持单位 各专业分会及省级核学会、哈尔滨工业大学(威海校区)

专业分会 铀矿地质分会、铀矿冶分会、核能动力分会、核材料分会、同位素分离分会、核化学与放射化学分会、辐射防护分会、核化工分会、核物理分会、计算物理分会、粒子加速器分会、核电子学与核探测技术分会、脉冲功率技术及其应用分会、核聚变与等离子体分会、辐射物理分会、辐射研究与应用分会、同位素分会、核农学分会、核医学分会、核技术工业应用分会、核情报分会、核技术经济与管理分会、核测试与分析分会、核安全分会、核工程力学分会、铜系物理与化学分会

省级核学会 北京市核学会、湖南省核学会、江西省核学会、广东省核学会、四川省核学会、浙江省核学会、湖北省核学会、福建省核学会、黑龙江省核学会、陕西省核学会、辽宁省核学会、甘肃省核学会、山西省核学会、吉林省核学会、新疆自治区核学会、安徽省核学会、河南省核学会、江苏省核学会、上海市核学会、天津市核学会、贵州省核学会、山东省核学会

中国核科学技术进展报告

(第五卷)

总编委会

主任 李冠兴

副主任 叶奇蓁 邱爱慈 陈念念 赵志祥 程建平

委员 (按姓氏笔画排序)

王贻芳	卢文跃	叶国安	司胜义	田佳树
华跃进	张永学	张志俭	张志忠	张金带
李建刚	杨华庭	陈炳德	陈森玉	罗志福
罗顺忠	姜宏	赵红卫	赵振堂	唐传祥
柴国早	彭先觉	曾毅君	樊明武	潘传红
潘自强				

编委会办公室

主任 于鉴夫 潘启龙

副主任 王志 李涛 秦昭曼 谭俊

成员 (按姓氏笔画排序)

王丹	王朋	王笑	左浚茹	付凯
付真	李新邦	刘岩	孙凤春	宋翔宇
朱彦彦	肖萍	张关铭	张书玉	张宝珠
赵志军	赵明	胡晓彤	秦子淇	徐若珊
韩霞	蒋焱兰			

计算物理分卷 编委会

主任 王建国

副主任 应阳君

委员 (按姓氏笔画排序)

王瑞宏 江松青 许爱国 许海波 李敬宏
李新亮 晋长秋 蔚喜军 魏素花

核物理分卷 编委会

主任 叶沿林

副主任 陈东风

委员 (按姓氏笔画排序)

马余刚 叶邦角 朱志远 许甫荣 肖国青
邹冰松 周小红 柳卫平 袁大庆 魏 龙

粒子加速器分卷 编委会

主任 夏佳文

副主任 唐传祥

委员 (按姓氏笔画排序)

王 琳 王国宝 邓建军 刘克新 苏 萍
张 闯 陈怀璧 孟祥宇 赵红卫 赵振堂
傅世年 裴国玺 樊宽军 黎 明 潘卫民

核聚变与等离子体物理分卷

编委会

主任 彭先觉

副主任 刘永 李建刚

委员 (按姓氏笔画排序)

王珂 王友年 王爱科 冯开明 庄革
安竹 李定 杨青巍 吴宜灿 陈庆川
赵君煜 胡立群 段旭如

脉冲功率技术及其应用分卷

编委会

主任 邓建军

副主任 石金水 马弘舸 张建德

委员 (按姓氏笔画排序)

江伟华 张天爵 林福昌 蒙林

核工程力学分卷

编委会

主任 邱勇

副主任 (按姓氏笔画排序)

毛庆 刘树斌 吴莘馨 胡绍全 贺寅彪
钱达志 臧峰刚

委员 (按姓氏笔画排序)

万强 王春明 孙立斌 杨吉军 吴瑞安
张斌 金挺 胡杰 蒋晗 潘良明

前 言

《中国核科学技术进展报告(第五卷)》是中国核学会 2017 学术双年会优秀论文集集。

2015 年以来,中国核科学技术领域亮点频出,喜讯不断:中国三代压水堆核电“华龙一号”全球首堆示范工程穹顶吊装圆满完成;全球首条高温气冷堆燃料元件生产线投料生产;北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)建成;大亚湾实验测得最精确的反应堆中微子能谱;国际热核聚变实验堆超热负荷第一壁原型件率先通过国际权威机构认证;国际首座微堆低浓化成功实施;用于激光核物理研究的 OPCPA 超高峰值功率激光系统处于国际同类装置领先水平;玲龙一号(ACP100)模块式小型堆全球首个通过 IAEA 安全审查;中国先进大型铀纯化转化生产线建成投产;自主化核级数字化仪控系统平台“和睦系统”研制成功与规模化应用……

以上所取得的成绩首先得益于中国共产党的坚强领导。习近平总书记 2015 年对核工业创建六十周年重要批示指出,“要坚持安全发展、创新发展、坚持和平利用核能,全面提升核工业的核心竞争力,续写我国核工业新的辉煌篇章。”总书记的重要批示确立了核工业发展新的指导思想,开启了核工业发展的新时代。其次,得益于成千上万中国核科技工作者顽强拼搏、锐意进取、不畏挫折、无私忘我的工作精神,正是广大核科技工作者勇于登攀、勇于创新,才攻克了一个又一个科技难关,不断推动中国核科技事业蓬勃发展,推动核行业向前进步。

中国核学会 2017 学术双年会于 2017 年 10 月 16—18 日在山东省威海市召开,由中国核工业建设集团公司承办。会议主题为“安全、绿色、和谐、发展”。学术年会报告分为大会报告、分会场口头报告和张贴报告;同期举办核医学科普讲座、“高温气冷堆与四代核能”高端论坛、青年论坛、妇女论坛等多层次的专题论坛。年会发布了中国核学会“2015—2017 年度中国十大核科技进展”和《宣传绿色核能 建设美丽中国——科普行动宣言》;进行了优秀论文及团队贡献奖颁奖活动。来自核能动力、铀矿地质、核材料、核安全等 20 多个分会的 84 篇论文获得中国核学会 2017 年学术年会优秀论文奖。核工程类专业工程教育认证、核专利信息服务两个团队获得团队贡献奖。

大会共征集论文 1 400 篇,经过专家审稿,评选出 701 篇较高水平论文收录进《中国核科学技术进展报告(第五卷)》公开出版发行。《中国核科学技术进展报告(第五卷)》分

为 10 册,并按 26 个二级学科设立分卷。

《中国核科学技术进展报告(第五卷)》顺利结集、出版与发行,首先感谢中国核学会全体分支机构和 22 个省级(地方)核学会的鼎力相助;其次感谢总编委会和 26 个(二级学科)分卷编委会全体同仁的严谨作风和治学态度;再次感谢中国核学会秘书处和出版社工作人员,在文字编辑和校对过程中做出的具体贡献。

《中国核科学技术进展报告(第五卷)》编委会
2018 年 3 月 10 日



计算物理
Computation Physics

目 录

基于 STM32 的四旋翼飞行器控制系统设计与实现	汪皓毅,李华芳,李旭东(1)
高温气冷堆蒸汽发生器螺旋管数值模拟研究	翟 杰,欧阳小龙,刘思光(7)
HFETR 不同停堆工况碘坑深度研究	刘红倩,康长虎,刘水清(14)
HFETR 辐照钨-钨靶对堆芯物理性能的影响研究	康长虎,刘水清,刘红倩,等(21)
采用 IRAM 算法求解中子输运/扩散方程及其共轭方程的高阶谐波
.....	吴文斌,于颖锐,李 庆,等(25)

基于 STM32 的四旋翼飞行器控制系统设计与实现

汪皓毅, 李华芳, 李旭东

(核工业计算机应用研究所, 北京 100048)

摘要:四旋翼飞行器具有机动灵活,带载能力强等特点,在国际舞台上占有越来越重要的位置。以 STM32F103C8T6 为核心设计飞行控制板,完成四旋翼飞行器控制软硬件的设计与开发,实现了四旋翼左右、上下、前后等飞行的要求。首先对四旋翼飞行器飞行原理及模型进行推导,提出了控制系统总体方案;然后对四旋翼飞行器硬件及相关外围进行电路设计,其中包括核心 MCU 控制电路,无线通讯电路,惯性导航模块,电源模块以及空心杯直流电机驱动模块,串口通讯以及遥控地面站的硬件设计;完成了程序流程设计,MPU6050 的基本设置与姿态角的解算,PWM 脉冲宽度调试;最后,基于 PID 的经典控制算法进行调试,在实际飞行器上实现了飞行器的基本飞行要求。

关键词:四旋翼飞行器;STM32;PWM 波;MPU6050

1 四旋翼飞行原理

1.1 飞行姿态原理

四旋翼飞行器总体布局形式上属于非共轴式碟形飞行器,与常规旋翼式飞行器相比,其结构更为紧凑,能够产生更大的升力^[1]。通过控制 4 个旋翼的转速可使飞行器实现各种飞行动作^[2]。飞行器机械结构应当包括有:控制芯片以及电池等设备组成的设备舱,地面站接收信号的天线,四个旋翼作为执行机构,起落架作为防撞与减震机构^[3]。

1.2 飞行器姿态解算

提供的飞行器的姿态,是指飞行器的指向,一般用 3 个姿态角表示,包括偏航角(yaw)、俯仰角(pitch)和滚转角(roll)。姿态其实是一个旋转变换,表示机体坐标系与地理坐标系的旋转关系,这里定义姿态为机体坐标系向地理坐标系的转换。旋转变换有多种表示方式,包括变换矩阵、姿态角。转轴转角、四元数等^[4]。

主要应用四元数来确定机体在空间中的位置,主要是四元数在组合旋转过程中的运算量远远小于其他运算方法。因而飞行器的姿态解算是围绕着四元数进行的^[5]。

2 系统总体设计

四旋翼飞行器控制系统是一套完整的空中机器人飞行系统^[6],其总体设计框图如图 1 所示,主要包括两大部分:飞行器和地面站系统,其中飞行器是受控对象,通过无线传输模块,地面站可以向飞行器发送指令^[7]。

飞行器主要包含微型姿态参考系统、无线通信模块、电机驱动模块、微型控制器系统、串口通讯等。地面站包括无线通讯模块,地面控制与人机界面。其中串口可用来调试程序与仿真模拟。陀螺仪传感器测量角速度用来分析物体自身运动情况,加速度传感器测量加速度用来分析物体受力情况,磁力计测量磁力用来分析感受地磁向量以解算出模块与北的夹角;磁力计的这个功能类似于指南针;这三个传感器统称微型姿态参考系统,其目的是准确读出四旋翼目前的飞行姿态。将数据融合放入 STM32 控制系统,滤波处理后可使用^[8]。

作者简介:汪皓毅(1994—),男,本科,现主要从事计算机软件设计、系统项目集成等科研工作

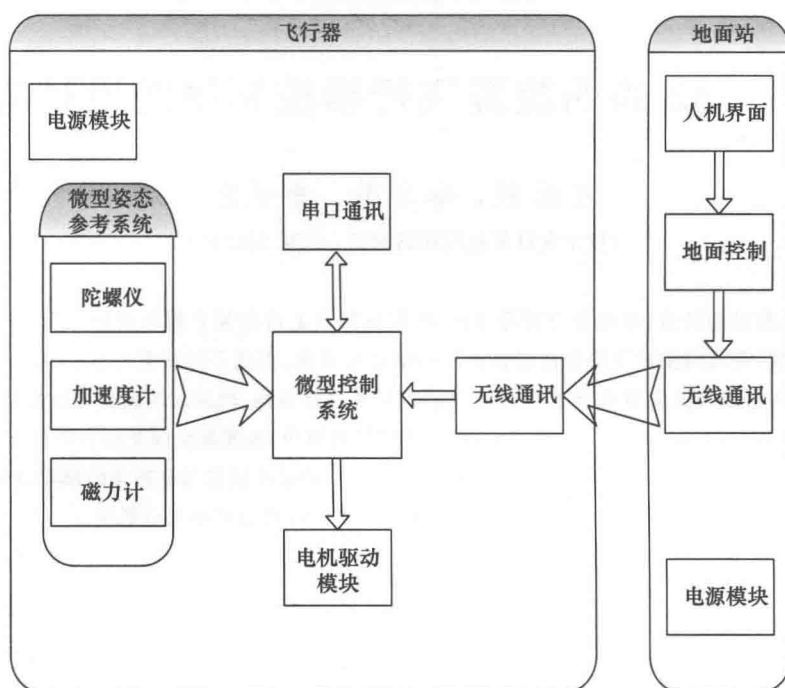


图 1 总体设计框图

3 硬件电路设计

3.1 系统硬件电路设计

飞行控制电路是整个飞行器的核心部件,它相当于人的大脑,操控和支配着整个飞行器的姿态和动作,所以在设计飞行控制电路时,必须从多方面综合考虑,不仅从性能上有更高的要求,同时还要求质量和体积都要尽可能小,这样对于飞行器的续航和操控性能上都有大大的帮助,具体结构图如图 2 所示。

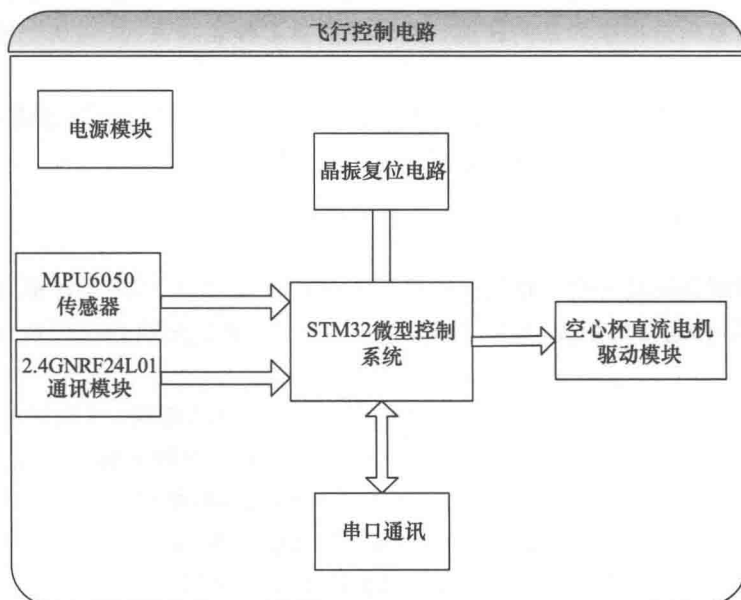


图 2 飞行控制电路结构

其中主要元器件包括 STM32F103C8T6,其作为飞行器控制器核心,负责算法运算和控制策略。

MPU6050 为 3 轴 MEMS 陀螺仪,3 轴 MEMS 加速度计作为传感器分别测量角速度与加速度。2.4G NRF24L01 无线通讯模块。电源模块主要采用电压调整器芯片 XC6206 和 LTC3200,XC6206 用于降压稳压,LTC3200 升压电路芯片等等。所设计的 PCB 版大小为 85 mm×85 mm。四旋翼加上桨的尺寸为 175 mm×175 mm^[9]。

3.2 硬件电路各模块设计

3.2.1 飞行控制器核心 MCU

采用的芯片是意法半导体公司推出的一款具有单周期浮点运算能力的芯片 STM32F103C8T6,中等容量增强型,32 位基于 ARM 核心 Cortex™—M3 带 64 或 128 K 字节闪存的微控制器 USB、CAN、7 个定时器、2 个 ADC、9 个通信接口,CPU 具有高达 72 MHz 工作频率。

3.2.2 无线通讯模块

无线通信模块采用 NORDIC 公司生产的 NRF24L01,工作在 2.4~2.5 GHz 的 ISM 频段的单片无线收发器芯片^[10]。

其工作原理为发射数据时,首先将 nRF24L01 配置为发射模式:接着把接收节点地址 TX_ADDR 和有效数据 TX_PLD 按照时序由 SPI 口写入 nRF24L01 缓存区,TX_PLD 必须在 CSN 为低时连续写入,而 TX_ADDR 在发射时写入一次即可,然后 CE 置为高电平并保持至少 10 μs,延迟 130 μs 后发射数据;若自动应答开启,那么 nRF24L01 在发射数据后立即进入接收模式,接收应答信号(自动应答接收地址应该与接收节点地址 TX_ADDR 一致)。如果收到应答,则认为此次通信成功,TX_DS 置高,同时 TX_PLD 从 TX FIFO 中清除;若未收到应答,则自动重新发射该数据(自动重发已开启),若重发次数(ARC)达到上限,MAX_RT 置高,TX FIFO 中数据保留以便再次重发;MAX_RT 或 TX_DS 置高时,使 IRQ 变低,产生中断,通知 MCU。接收数据时,首先将 nRF24L01 配置为接收模式,接着延迟 130 μs 进入接收状态等待数据的到来。当接收方检测到有效的地址和 CRC 时,就将数据包存储在 RX FIFO 中,同时中断标志位 RX_DR 置高,IRQ 变低,产生中断,通知 MCU 去取数据。若此时自动应答开启,接收方则同时进入发射状态回传应答信号。最后接收成功时,若 CE 变低,则 nRF24L01 进入空闲模式 1。该模块硬件特点有工作于 2.4~2.5 GHz ISM 频段。

3.2.3 惯性导航模块

惯性导航模块是飞行器中最重要的一个模块,它的性能和参数直接影响到飞行器的飞行稳定性、灵敏度和抗干扰能力,采用 MPU6050 陀螺仪是全球首例 9 轴运动处理传感器。它集成了 3 轴 MEMS 陀螺仪,3 轴 MEMS 加速度计,以及一个可扩展的数字运动处理器 DMP,可用 I2C 接口连接一个第三方的数字传感器。以数字输出 6 轴或 9 轴的旋转矩阵、四元数(quaternion)、欧拉角格式(Euler Angle forma)的融合演算数据。

通过 I2C 接口读出来的转换结果 ADC 值,并不是以度每秒为单位。一般按以下公式进行转换: $Anglerate = ADCrate / \text{灵敏度}$ 以量程为 ±1 000 °/s 为例,说明如何转换。假设读取 X 轴的 ADC 值为 200,得知在 ±1 000 °/s 下的灵敏度为 32.8 LSB/(°/s)。据公式: $Anglerate = 200 / 32.8 = 6.09756 \text{ °/s}$,可知 MPU6050 检测到模块正在以约 6 度每秒的速度绕 X 轴(或者叫在 YZ 平面上)旋转。ADC 值并不都是正的,请注意,当出现负数时,意味着该设备从现有的正方向相反的方向旋转。

3.2.4 电源模块

四轴飞行器要求整体设计质量较轻,体积较小,因此在电池的选取方面,采用体积小、质量轻、容量大的锂电池供电最合适。系统的核心芯片为 STM32F103,常用工作电压为 3.3 V,同时惯性测量传感器,通信模块的常规供电电压也为 3.3 V,因此选用锂电池的电压为 3.7 V,考虑其容量大小应为 600 mAh 要使系统正常工作,需要将 3.7 V 的锂电池电压升压至 5 V 然后降压稳压到 3.3 V。常用的 78 系列稳压芯片已不再适用,必须选择性能更好的稳压芯片。

4 系统软件设计

4.1 主程序流程设计

软件设计上由控制核心 STM32 读取传感器信息,解算姿态角,以姿态角为被控制量融合遥控信息后,输出到四个舵机以完成四轴飞行控制和稳定补偿^[11]。软件流程图如图 3 所示。

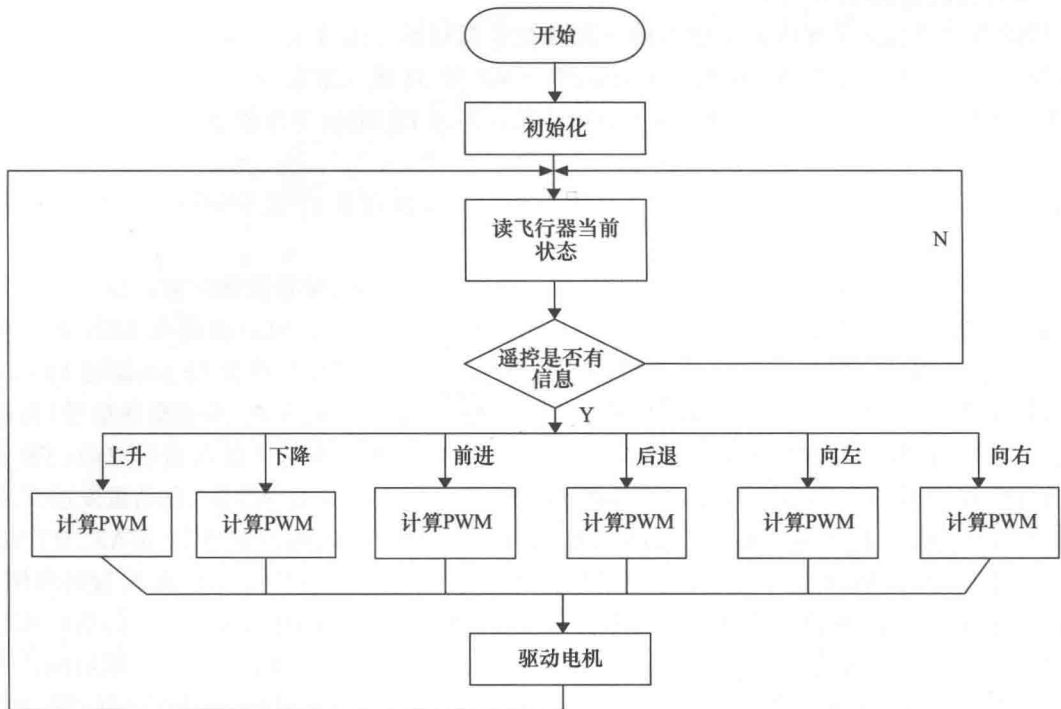


图 3 主程序流程图

4.2 MPU6050 的设置

由于项目所要做的第一步是要做姿态解算,所以在初步了解 stm32 原理以后,就开始从 MPU6050 传感器读数据。MPU6050 是一个集成了加速度计和陀螺仪的传感器,使用 I2C 和单片机进行通信。MPU6050 读取部分程序。

```
BUF[0]=Single_Read(MPU6050_Addr,GYRO_XOUT_L);
BUF[1]=Single_Read(MPU6050_Addr,GYRO_XOUT_H);
G_X=(BUF[1]<<8)|BUF[0];
G_X=-37; //减去陀螺初始化误差(经验值)
Imu_measure.gx=G_X/16.4 //读取计算 X 轴角速度数据
```

这是一段读取 MPU6050 陀螺仪 X 轴数据的程序,先通过 I2C 函数把陀螺仪 X 轴数据的低 8 位和高 8 位读取出来,分别放入 BUF[0]和 BUF[1]中,在通过移位把两个数据合成一个数据传入 G_X 变量,G_X 是一个 short 型变量,而 imu_measure.gx 是一个 double 型变量,编译器编译是自动把 G_X 转成 double 型除以 16.4 赋值给 imu_measure.gx。在 MPU6050 初始化时把 Full Scale Range 设置为 $\pm 2000^\circ/\text{s}$,所以灵敏度为 16.4 LSB/ $^\circ/\text{s}$,所以在读出寄存器值的基础上除以 16.4 就是角速度。

而对于加速度,设置为 $\pm 8\text{g}$,灵敏度为 4096,所以在读出值的基础上除以 4096 就是加速度。

4.3 四元数计算姿态角的实现

首先要对读取的传感器值进行移动均值滤波。定义了 Filter_ACC 结构体,先把读取值加到这个结构体变量里,每加一次,积分标记位加 1。当定时器中断触发。姿态解算周期到来时,进入 if(IMU

update_flag==TRUE){}里面求平均值并对变量清零,完成移动均值滤波,基于统计规律,将连续的采样数据看成一个长度固定为2的队列,在新的一次测量后,上述队列的首数据去掉,其余1个数据依次前移,并将新的采样数据插入,作为新队列的尾;然后对这个队列进行算术运算,并将其结果作为本次测量的结果。

4.4 PWM 脉冲宽度调制

四旋翼飞行器的动力系统主要是通过 PWM 信号驱动无刷直流电机。PWM 脉冲宽度调制技术,简称脉宽调制,是一种利用微处理器的数字输出对模拟电路进行控制的技术,它通过直流脉冲序列的占空比改变直流电的平均值进而实现变频技术。PWM 的调节作用来源于对“占周期”的宽度控制,“占周期”变宽,输出的能量就会提高,通过阻容变换电路所得到的平均电压也会上升,“占周期”变窄,输出的能量就会降低,通过阻容变换电路所得到的平均电压也会下降。PWM 就是通过这种原理实现 D/A 转换的。PWM 生成是通过 STM32 定时器输出比较 TIM_OCMode_PWM2 模式,这两种模式 TIM_OCMode_PWM1、TIM_OCMode_PWM2 其实只是极性不同,就是输出的 PWM 高低电平会相反。通过对这几个通道的设置 PWM 波就生成了。

5 结论与展望

在本项目中成功利用 STM32 主控芯片,组装了一台小型四旋翼飞行器,对四旋翼飞行器的硬件设计,软件设计以及遥控的硬件设计与实现进行了研究。

对四旋翼的飞行原理进行了动力学分析并化简推导公式,并在软件中应用。证明了四旋翼可以用 PID 控制,利用上位机分析了 PID 对飞行器的控制与影响,主要体现在 PWM 波的多路输出与控制。

致谢:

在相关实验的进行当中,得到了北京石油化工学院教授张硕生的大力支持,并提供了很多有益的数据和资料,在此向张教授的大力帮助表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 江哲. 基于 STM32 的四旋翼控制器的设计与实现[D]. 华东理工大学硕士学位论文, 2015.
- [2] 宿敬亚, 樊鹏辉, 蔡开元. 四旋翼飞行器的非线性 PID 姿态控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(9): 54-58.
- [3] 李强, 林明耀, 李海文, 等. 无传感器无刷直流电机控制系统及其启动分析[J]. 微电机, 2003, 36(3): 33-35.
- [4] 戴敏, 曹杰, 史金飞. 航模直流无刷无感电机调速控制系统设计[J]. 测控技术, 2006, 25(7): 30-33.
- [5] 吴红星, 叶宇骄, 倪天, 等. 无刷直流电机转子位置检测技术综述[J]. 微电机, 2011, 44(8): 75-81.
- [6] 许鹏, 曹建波, 曹秉刚. 无位置传感器直流无刷电机软件启动[J]. 电机与控制学报, 2009, (5): 019.
- [7] 曾小勇, 彭辉, 魏吉敏. 基于状态相依模型的非线性预测控制及应用[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(10): 54-58.
- [8] 甄红涛, 齐晓慧, 李杰, 等. 四旋翼无人机 L1 自适应块控反步姿态控制器设计[J]. 控制与决策, 2014, (6): 1076-1082.
- [9] 何勇灵, 陈彦民, 周岷峰. 四旋翼飞行器在风场扰动下的建模与控制[J]. 中国惯性技术学报, 2013, (05): 624-630.
- [10] Damodharan P, Sandeep R, Vasudevan K. Simple position sensorless starting method for brushless DC motor [J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(1): 49-55.
- [11] Lai Y S, Lin Y K. Novel back-EMF detection technique of brushless wide range control without using current and position sensors[J]. IEEE Transactions on, 2008, 23(2): 934-940, DC motor drives for Power Electronics.