

# 四旋翼无人机控制系统设计与实现<sup>\*</sup>

杨则允<sup>1</sup> 李 猛<sup>2</sup> 张 全<sup>1</sup>

(1.山东龙翼航空科技有限公司,山东 济宁 272000 2.济南大学 自动化与电气工程学院,山东 济南 250022)

**摘 要** 四旋翼无人机是一种结构简单、操作灵活的垂直起降无人机。首先分析了四旋翼无人机的基本运动原理,然后以 APM 飞控计算机为核心,结合 GPS 定位芯片、陀螺仪、加速度计、航向计、无线数据电台等装置,进行了微型四旋翼无人机的系统集成。分析了包括位置回路和姿态回路的双闭环控制结构的四旋翼无人机的控制逻辑与控制规律。在进行传感器标定、参数整定等工作的基础上,对无人机进行了综合调试。最终实现了无人机的稳定可靠飞行,具有良好的姿态控制、轨迹控制能力,各项性能指标符合设计要求。

**关键词** 四旋翼无人机;PID 控制;飞行控制;姿态控制;轨迹控制

中图分类号:V279

文献标志码:A

文章编号:2095-2945(2018)34-0105-03

**Abstract:** The four-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) is a kind of vertical take-off and landing UAV with simple structure and flexible operation. In this paper, the basic principle of motion of the four-rotor UAV is analyzed, then the APM flight control computer is used as the core, and the GPS positioning chip, gyroscope, accelerometer, heading meter, wireless data radio and other devices are combined. The system integration of micro quad-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) is carried out. The control logic and control law of the four-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) with double closed-loop control structure including position loop and attitude loop are analyzed. On the basis of sensor calibration and parameter tuning, the UAV is comprehensively debugged. Finally, the UAV can fly stably and reliably, and it has good attitude control and trajectory control ability, and all the performance indexes meet the requirements of design.

**Keywords:** four rotor UAV; PID control; flight control; attitude control; trajectory control

## 1 概述

四旋翼无人机是一种非共轴、多旋翼式无人机,改变四个旋翼产生的升力大小就可以实现姿态稳定及飞行控制,其结构简单、体积较小,且飞行平稳、隐蔽性好,可用于救援搜索、侦查监控、探查航拍等任务,具有重要的研究价值和广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

四旋翼无人机的设计研制是集诸多学科于一体的综合科学技术问题,涵盖了结构设计、动力与能源控制、导航通信、微机电、传感器等专业技术领域<sup>[2]</sup>。四旋翼无人机是一个高度非线性、多变量的欠驱动系统,用四个输入量控制六个自由度输出,因此它的输出量之间具有高度耦合的特性,任意一个旋翼转速的改变将至少影响三个自由度的改变。这给四旋翼无人机的控制系统设计带来许多困难<sup>[3,4]</sup>。

## 2 控制系统设计实现

### 2.1 飞行原理

四旋翼无人机采用刚性的十字形机架,机架末端各有一个独立的电机驱动系统,图 1 中,一对电机顺时针转动,另一对电机逆时针转动,以平衡其对机身的反扭矩,改变某一个旋翼的速度,飞行器会产生相应的运动。四旋翼无人机在空间中具备的四种基本运动状态。

#### 2.1.1 垂向飞行

同时增加四个电机的输出功率,旋翼转速增加,总升力增大,无人机便垂直上升;反之,同时减小四个电机的输出功率,

则无人机则垂直下降,实现了沿 z 轴的垂直运动。当旋翼产生的升力等于无人机的自重时,无人机便保持悬停状态。保证四个旋翼转速同步增加或减小是垂直运动的关键。

#### 2.1.2 横向或纵向飞行

实现无人机在水平面内横向、纵向的运动,必须在水平面内对无人机施加一定的力。由于结构对称,所以横向飞行的工作原理与纵向运动完全一样。

在图 1 中,增加电机 3 转速,使升力增大,相应减小电机 1 转速,使升力减小,同时保持其它两个电机转速不变,反扭矩仍然保持平衡。无人机首先发生一定程度的倾斜,从而使旋翼升力产生水平分量,因此可以实现无人机的前飞运动。

#### 2.1.3 偏航转动

偏航运动是借助旋翼产生的反扭矩来实现。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扭矩,反扭矩的大小与旋翼转速有关,当四个电机转速相同时,四个旋翼产生的反扭矩相互平衡,四旋翼无人机不发生转动;当四个电机转速不完全相同时,不平衡的反扭矩会引起四旋翼无人机转动。

## 2.2 系统构成

四旋翼无人机采用十字形机身,以嵌入式控制器作为飞控系统的核心,以直流电机作为旋翼驱动装置,同时包括 GPS、陀螺、加速度计、航向计等必要的传感器。无人机飞行控制系统总体由电源模块、机载飞控模块、电机驱动模块、通信

<sup>\*</sup> 基金项目:山东省西部经济隆起带基层科技人才支持计划(编号:XB2018CX008)

作者简介:杨则允(1982-),男,汉族,山东济宁人,工程师,研究方向:无人飞行器技术研究。

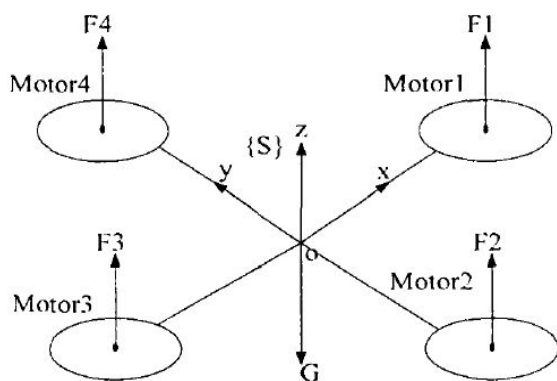


图1 四旋翼无人机飞行原理图

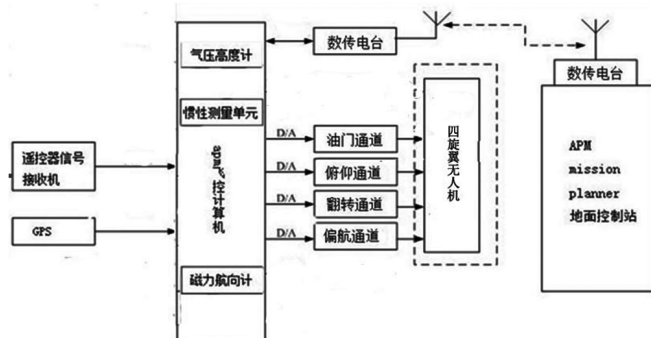


图2 无人机飞行控制与地面测控系统组成

模块和导航模块五个部分组成。如图2所示。五个组成部分相互协作，共同作用，实现无人机的飞行与控制。

### 2.2.1 APM 飞行控制模块

APM 控制器是一个开源的飞控系统，能够支持固定翼无人机、3轴、4轴、6轴无人机，主要结构包括飞控主芯片 Atmega1280/2560、PPM 解码芯片 Atmega168/328，负责监视模式通道的 pwm 信号监测，以便在手动模式和其他模式之间进行切换。同时 APM 飞控机可扩展接入无线电台、GPS 导航仪，带有 I2C 总线接口。

### 2.2.2 电机驱动模块

选用直流电机作为旋翼驱动电机，通过调整电机转速而改变旋翼升力。直流电机型号为新西达 a2212-13 KV980，外形尺寸 27.8\*27mm，重量 48g，输出轴径 3mm，额定参数 11V，13.1A，7630r/m，推力 780g。

### 2.2.3 通信接收器

对本无人机设计采用两种无线通讯模式，分别是使用遥控器控制和使用数传电台进行遥控遥测。地面测控系统在上位机中使用 APM 任务规划器监控无人机。

### 2.2.4 导航模块

四旋翼无人机的导航模块包括 GPS、磁力计、惯性测量单元。惯性测量单元指陀螺仪和三轴加速度计，可配合三轴磁力计或 GPS 测得方向数据进行校正，计算出飞机姿态。APM 集成的惯性测量系统为六轴数字传感器 MPU6000，磁力计为霍尼韦尔的 HMC5843/5883，空速计为 MPXV7002 模块空速计，GPS 导航模块选用 Leica-6h，测量飞机当前的经纬度、高度、地速等信息。

## 2.3 软件实现

采用 APM 任务规划器作为上位机软件，可以使用 Google Maps 进行即点即得的航点输入，能够从下拉菜单中选择任务指令，下载任务日志文件并分析，配置机载的 APM 控制器。

APM 飞控软件采用 Arduino 语言，提供包括十字形、X 型四旋翼机在内的多种机型的控制程序，通过上位机软件 APM mission planner 将对应的程序按自己的需求进行修改，然后导入飞控计算机。

四旋翼无人机的控制系统包括位置控制回路和姿态控制回路。位置回路控制通过飞机的当前位置坐标与给定位置坐标的偏差，经过 PID 控制律结算得到飞机期望的俯仰角、油门和横滚角，作为姿态回路的给定输入。姿态控制依据给定的俯仰角、油门、横滚角，结合飞机当前的姿态结算出合适的电机控制量，使飞机保持期望的飞行姿态。

四旋翼飞机在搭载 apm 控制系统后，通过数传模块与地面站连接，并可以对各传感器参数进行校准、PID 参数整定，以及给无人机设定飞行任务。

## 3 调试与飞行试验

由于 APM 飞控计算机集成了许多种机型，以及自稳定、定高、定点等多种控制模式。在不同模式下所使用的控制结构虽然相同，但选用的 PID 参数值是不同的，因此需整定控制器参数，才能使无人机达到良好的控制效果<sup>[9]</sup>。

### 3.1 控制参数设计

#### 3.1.1 传感器校准

在系统调试过程中，首先对无人机的各种传感器进行校准标定。在 APM 任务规划器之中，可直接通过界面设置修改参数，完成加速度计、陀螺仪、电子调速器、遥控器等装置的校准标定工作。

#### 3.1.2 遥控器与电子调速器校准

在控制四旋翼无人机时，需使用遥控器的固定翼飞行模式，需要使用到其中的 7 个数据通道，分别定义如下：

通道 1：低=滚转向左，高=滚转向右。

通道 2：低=俯仰向前，高=俯仰向后。

通道 3：低=油门减，高=油门加。

通道 4：低=航向向左，高=航向向右。

通道 5：飞行模式控制。

通道 6：飞行中调试。

通道 7：控制辅助功能。

#### 3.1.3 参数整定

位置控制回路中，RATE\_RLL\_P 和 RATE\_PIT\_P 分别是 x 轴和 y 轴的比例系数，默认值是 0.14。根据飞机重量和动力的不同，这两个参数将会发生一些变化。在调试过程中，飞机剧烈震荡，降低这两个比例系数将会有非常明显的效果，但如果比例系数过小，会使得响应过程变的十分缓慢。两个闭环回路中的积分时间初始设置为 0。积分环节可以用于降低飞行控制系统的稳态误差。微分时间 RATE\_RLL\_D 和 RATE\_PIT\_D 的初始值为 0.0025，微分环节可减小系统超调量，提升响应速

(下转 109 页)

超过 450℃ 监视再热器管壁温度不要超温 注意排地沟疏水汽量情况。(13)轴封控制站前温度达 250℃、压力满足时 送轴封汽 启动真空泵建立真空 真空超过-63kPa 时 逐步开大高、低压旁路及电动主汽门(注意轴封汽、辅汽压力正常) 再热器流通蒸汽。开启 241A 阀、241 阀 关闭 250 阀、230 阀 将分离器排至地沟的高温水回收至凝汽器,并控制分离器水位正常。开启 240A 阀 关闭 242 阀后的对空排汽门 根据除氧器压力、温度和振动情况调整关小 231 阀 调节 240 阀控制分离器压力稳定 轴封送汽后可以适当关小、关闭高压夹层箱及轴封供汽站管道疏水门。上述操作要注意真空的变化 保证真空不低于-63kPa。(14)辅汽系统暖管、暖箱结束 压力正常时,投渣油伴热雾化蒸汽、除尘器灰斗加热,根据需要投油区加热。(15)由于轴封、辅汽汽源分别来自主蒸汽、再热蒸汽 因此在对燃烧系统、分离器系统、高低压旁路系统操作及汽机冲转时 要顾及轴封、辅汽压力 特别是轴封汽压力。(16)投入第二层给粉机 升高主蒸汽温度、压力至冲转参数 汽机冲转、发电机并网。(17)机组并网后带 40MW 暖机 检查本机二段抽汽达 0.5MPa,温度 250℃,转本机启动联箱供轴封和除氧器用汽 关闭高压夹层箱至轴封供汽站手动门和 231 阀 汽源切换过程中保持压力、温度稳定。(18)执行“锅炉 SCR 投运”操作

票 按规定启动升压风机、电加热器控制升温速率 达到条件后及时投运尿素喷枪。(19)机组达到切分条件切除启动分离器 锅炉启动制粉系统 从下向上对角投入给粉机继续升温、升压 汽机加负荷。(20)机组负荷 100MW 用本机汽冲转一台小机。(21)机组负荷 210MW 轴封汽转本机四段抽汽供 另一台小机冲转。(22)根据需要供汽给相邻机组启动。

#### 4 结束语

经过系统改造后 在机组停运重新启动进行了多次试验,都能够保证机组顺利启动,相对于相邻机组供汽来说时间长 2-3 小时,但能够保证电网的需要,及时启动并网向电网供电。另外 我们也可以在机组正常启动时 为了提高机组效率,可以通过开启分除水阀 230A、230 阀,将分离器热水排至除氧器 回收锅炉工质和热量 提高除氧器水 从而达到节能效果。从安全、经济角度来说 确实起到比较重要的作用。

#### 参考文献:

- [1]郑伟林,等.广东粤华发电有限责任公司 330MW 机组锅炉运行规程[S].
- [2]陈小松,等.广东粤华发电有限责任公司 330MW 机组汽轮机运行规程[S].

(上接 106 页)

度。

#### 3.2 飞行验证

四旋翼无人机安装完成以后 经过传感器标定、参数调整及多次调试以后 进行了多种模式下的飞行测试。

##### 3.2.1 遥控器控制

使用遥控器来控制无人机进行实际飞行 通过上位机软件 可以看到无人机的实时状态 以及遥控器的输入与电机输出的对应状态。

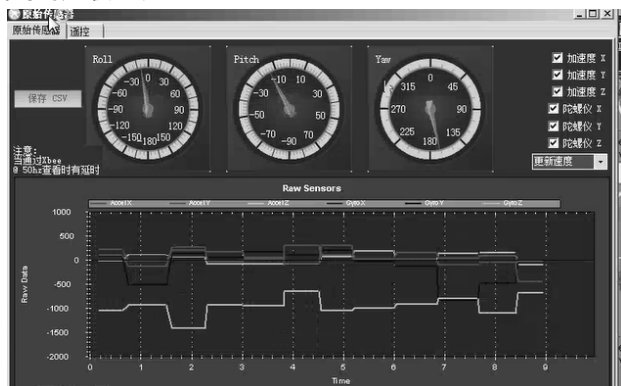


图 3 飞行过程的参数变化情况

##### 3.2.2 地面站控制

在不使用遥控器的情况下,可以利用地面站实现无人机的飞行控制。在这种情况下需要通过地面站测控软件预先设定飞行任务。通过无线数传电台在四旋翼无人机与地面站之间建立数据链路。APM 任务规划器可显示飞机的姿态、高度、对地速度、对空速度、遥控输入量、传感器实时状态等信息。

#### 4 结束语



图 4 地面站测控计算机界面

四旋翼无人机在军事和民用方面都有广阔的应用前景。本文首先分析了四旋翼无人机飞行原理和运动状态,然后进行了以 APM 飞控机为核心的四旋翼控制系统集成设计 以及参数整定和调试工作。包括硬件系统选型 控制逻辑与控制律分析设计 控制软件的实现与调试 传感器标定 控制参数整定等内容,最后通过实际的飞行测试对四旋翼无人机的性能进行了验证。

#### 参考文献:

- [1]周建军 陈超 崔麦金.无人机的发展及其军事应用[J].航空科学技术 2003 1 38-40.
- [2]陈巍.无人机飞行控制系统设计与研究[D].南京 南京航空航天大学 2004.
- [3]程广明.四旋翼无人机的建模与飞行控制研究[D].哈尔滨 哈尔滨理工大学.
- [4]刘伟.四旋翼无人飞行器设计与实验研究[D].哈尔滨 哈尔滨工程大学 2011.
- [5]康日晖 马珺 贾华宇.自适应粒子群在四旋翼 PID 参数优化中的应用[J].2018 35(3) 29-33.