

注：国家自然科学基金资助项目 (NO: 61571053)

摘要：随着四旋翼飞行器的发展，人们对其抗干扰能力及飞行控制要求也不断提高，针对姿态控制问题进行了分析，以四旋翼飞行器为研究对象，控制器采用 STM32F103RET6 单片机，惯性测量元器件采用 MPU6050 等传感器。通过一种易于实现的串级 PID 控制器对其姿态进行控制，利用 MATLAB/Simulink 进行抗干扰仿真实验，通过参数整定，最后验证了较于传统 PID，串级 PID 可以使飞行器旋翼的抗干扰能力有一定的提高，达到良好的飞行姿态控制效果。

关键词：四旋翼飞行器；串级 PID；仿真；抗干扰

中图分类号：TP13

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2018)11-0032-06

收稿日期：2018-09-28

# 基于 STM32 的四旋翼飞行器旋翼干扰下的串级 PID 控制

盛广润 高国伟 张迎雪

北京信息科技大学传感器重点实验室，北京 100101

## 一、引言

四旋翼飞行器是一种具有强耦合性、六自由度的欠驱动系统。同时，四旋翼飞行器的构造特点造成了其易于受外界干扰与自身扰动影响的特点，这样也增加了控制上的难度，因此对于四旋翼飞行器控制系统的算法要求也逐渐提高。

STM32 出自于 ST 公司，该款嵌入式处理器具备 ARM Cortex-M3 内核，其不仅有着超低的功耗表现，还具有更快的速度响应，同时还可以在不同种传感器之间保持信息通讯。所以基于 STM32 的飞行控制系统有着资源有效利用、减少开发成本的优势。

目前常用的控制算法主要还是 PID 控制算法，同时也还有反演控制和滑膜控制方法，但是反演控制方法的悬停效果控制能力比较差，而滑膜控制法的缺点是在飞行过程中会发生控制结构的变化，导致一定的高频扰动而使得控制效果变差。传统的 PID 算法不具备较好的抗干扰能力。

本文尝试通过一种基于传统 PID 改进的串级 PID 控制系统，通过 MATLAB/Simulink 仿真环境，整定参数对四旋翼飞行器姿态逐步进行优化控制。

## 二、四旋翼飞行器飞行原理

四旋翼飞行器主要是由四轴机架、螺旋桨、无刷电机、飞控板、起落架、电源、遥控接收机、无刷 ESC 等部分来组成<sup>[1]</sup>。呈十字交叉形状的四轴机架，四个螺旋桨都处在统一高度平面，十字交叉的顶端分别安装同型号的两对正反螺旋桨和电机，支架中心安装飞行控制计算机和外部设备。飞控板、机载传感器和电池等安装在无人机的中间位置。

如图 1 所示，四旋翼无人机的姿态调整都是由四个电机决定的，通过增减了两侧各两个电机的转速，才可以实现四轴的四向偏转，从而再向四个方向运动。也通过增减对角线方向两组各两个电机的转速，可以实现四轴的顺时针、逆时针转向。将四旋翼无人机的

运动状态分类,基本包括:前后、侧向、滚转、俯仰、偏航、垂直运动<sup>[2]</sup>。

### 三、四旋翼飞行模型的建立

对于飞行器的飞行位置及状态的确定,一般是取用惯性和物体坐标系。如图2所示,前者坐标系的原点是选用地球的中心,选用的惯性坐标系和物体坐标系分别表示为E(OXYZ)、B(oxyz)<sup>[3]</sup>。

通过研究飞行器的运动状态,可以将其运动状态概括为旋转、平移运动方式的组合。 $[x, y, z]$ 表示的是以地面为参考系,四旋翼飞行器质心的具体位置。 $[\phi, \theta, \psi]$ 则是表

示<sup>[4]</sup>物体坐标系与坐标轴之间的夹角,而其绕着三个轴的角速度 $(\dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$ 则是可以用陀螺仪来得到。将三者之间的关系表示为:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi / \cos\phi & \cos\phi / \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (1)$$

通过物理学知识对四旋翼飞行器受力进行分析,如图2所示,主要分为四旋翼飞行器本身的重力 $G$ 、无人机在飞行过程中所受的空气阻力 $f$ 、飞行器旋翼产生的升力 $F$ 。

定义 $W$ 为飞行器物体坐标系相对于惯性坐标系的角速度向量,而沿着 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的角速度向量的分量则可以用 $p$ 、 $q$ 、 $r$ 来表示。定义 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 、 $U_4$ 为飞行器的控制输入量<sup>[5]</sup>。通过对四旋翼飞行器在物体坐标系下的分析,分别用 $\dot{p}$ 、 $\dot{q}$ 、 $\dot{r}$ 来表示滚转角、俯仰角、偏航角速度,然后依此得到滚转角加速度 $\ddot{p}$ 、俯仰角加速度 $\ddot{q}$ 、偏航角加速度 $\ddot{r}$ 运动方程,综合整理<sup>[6]</sup>最终得到四旋翼飞行器动力学模型为:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{U_1(\sin\psi \sin\phi + \cos\psi \sin\theta \cos\phi)}{m} \\ \ddot{y} = \frac{U_1(\sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi)}{m} \\ \ddot{z} = \frac{U_1 \cos\phi \cos\theta}{m} - g \\ \ddot{\phi} = U_2 L / I_x \\ \ddot{\theta} = U_3 L / I_y \\ \ddot{\psi} = U_4 L / I_z \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\phi$ —横滚角;

$\theta$ —俯仰角;

$\psi$ —偏航角;

$m$ —无人机质量;

$L$ —电机转动中心距机体中心的距离;

$U_1$ —垂直速度控制量(总升力);

$U_2$ —横滚力矩;

$U_3$ —俯仰力矩;

$U_4$ —偏航力矩增量;

$I_x$ 、 $I_y$ 、 $I_z$ —电机在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴产生的转动惯量。

### 四、系统硬件组成

四旋翼无人机的飞行控制系统一般是以微控制器为核心,集成各种机载传感器、动力驱动系统,同时统一的调用、合理的分配系统资源,保证每一个环节相互都可以起到作用,加强

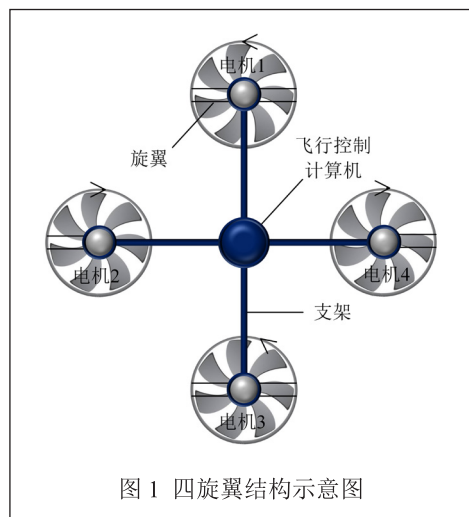


图1 四旋翼结构示意图

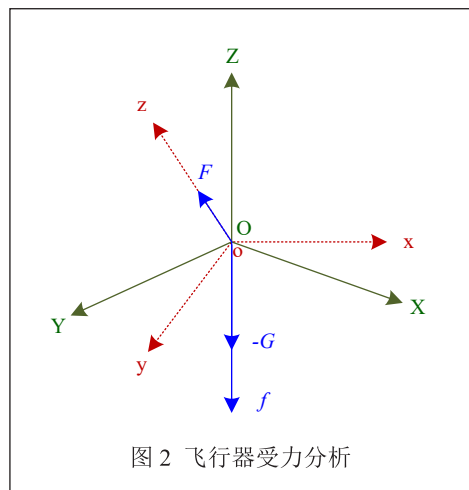


图2 飞行器受力分析

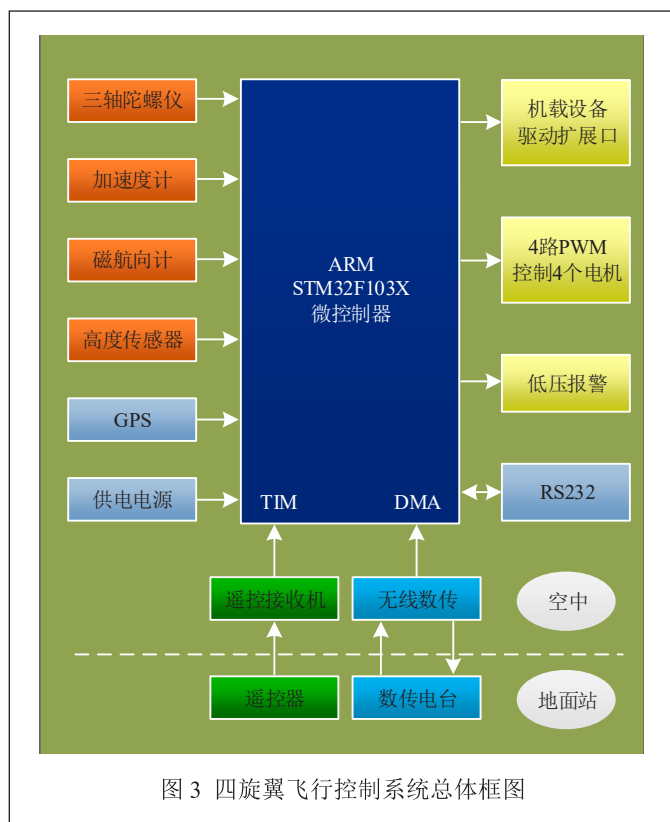


图3 四旋翼飞行控制系统总体框图

对四旋翼飞行器的控制。飞控系统总体框图如图3所示。

在整个飞控系统中，主要用到的传感器有：加速度计、陀螺仪、气压高度计、磁航向计、超声波传感器等。而捷联惯导系统<sup>[7]</sup>就是由三轴加速度计与角速率陀螺仪共同组成的。飞行器控制器通过处理MEMS惯性器件和传感器采集的数据，与相关的控制律相结合<sup>[8]</sup>，得到合适的控制信号，可以有效的对四旋翼飞行器的飞行姿态进行控制。

### 1、主控模块

由于四旋翼飞行器的结构特点以及飞控系统的复杂程度，对于控制系统的执行速度要求是一定要特别快，而主控制器作为核心部件，其选型直接关系到飞控系统执行速度的快慢，故选择出自ARM公司设计的STM32微控制器。STM32F103RET6较于普通单片机功能强大，接口更为丰富。

ST公司出品的STM32F系列，工作频率最高能达到72MHz；STM32F103RET6芯片在程序存储器方面表现达到512K，64K的RAM存储空间；2.0V~3.6V供电和I/O引脚；低功耗体现在Vbat能够给寄存器供电，拥有睡眠、停机待机模式；2个12位模数转换器；2个DMA控制器，支持定时器、SPI、

I<sup>2</sup>C、UART、ADC等外设。

### 2、数据采集模块

通过惯性测量元器件MPU-6050来测量加速度和角速度，MPU-6050是拥有3轴加速度计和3轴陀螺仪的组合传感器，无论是陀螺仪还是加速度计，它们可测量的精确范围完全可以通过对实际应用的研究来进行适度的调整，另外400kHz的I<sup>2</sup>C接口被采用来进行与设备寄存器通信。

四旋翼飞行器的气压计选用MEAS（美国）推出的MS5611。该气压传感器分辨率能够达到10cm，高分辨率的温度输出无需别的传感器就能实现温度、高度计功能；通过I<sup>2</sup>C接口可以连接大部分微控制器。

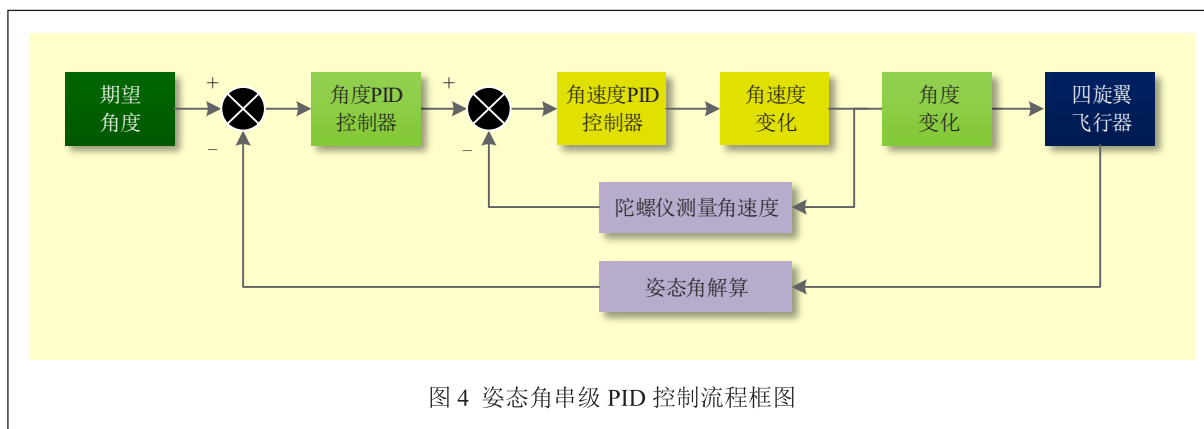
在飞行过程中，由于要求精确的控制方向，虽然有很多方法测量方向，但是参考地磁获取方位角的数据来进行精确的方向控制是最为方便的。霍尼韦尔HMC5883L是弱磁传感器芯片，表面<sup>[1]</sup>贴装高集成度、带有I<sup>2</sup>C接口。其集成电路具备霍尼韦尔专利，具备毫高斯至8高斯的测量范围。

### 3、驱动模块

四旋翼飞行器的驱动通过4个ST2210无刷直流电机来进行支持，同时选用ST20A电调，支持3.3V与5V电平，STM32通过配置GPIO，利用PPM信号输出，0%~100%油门与其1ms~2ms脉宽互相对应，从而电调能够控制电机转速。

## 五、串级姿态PID控制器设计

串级控制结构中含有两个回路，内回路是在控制过程中负责粗调，外回路则是完成细调；姿态控制在整个控制系统中是最为重要的也是最为困难的一个环节，因为当四旋翼飞行器在空中飞行的时候，会存在各种各样不确定的干扰，设定外界有干扰的情况下，姿态采集传感器中的加速度计还有陀螺仪采集到的数据会发生失真，无法准确地推算出



欧拉姿态角。

### 1、控制系统模型建立

本文在传统PID的基础上采用双环PID控制系统，内环采用的是角速度PID控制器，而外环采用的是角度PID控制器<sup>[9]</sup>。相比于单环的角度PID控制器，四旋翼飞行器很难在复杂环境中保持一定的稳定性，新加入的内环角速度PID控制器可以提高旋翼的抗干扰能力。如图4所示。

### 2、姿态角串级PID控制仿真

对于推导得到的四旋翼无人机非线性模型，引入控制量通过LPV法将四旋翼无人机的动力学模型转化为状态空间表达式<sup>[10]</sup>。根据标准的四旋翼无人机参数，我们可以得到各通道的传递函数，姿态角也根据传感器采集的数据进行姿态解算<sup>[11]</sup>后可以根据建立好的控制系统模型，在MATLAB中的Simulink搭建系统的仿真模型进行实验验证。以横滚角为例，分别对单环PID和串级PID进行仿真对比。

#### (1) PID调参

基于串级PID控制对PID进行调参，因为内外环相互各自独立，首先是对内环进行参数整定，再对外环进行调参。内环角速度PID调节过程中，适当增大比例系数P，从而可以加快系统回复的快速性能，但是过大会导致系统的震荡；积分项参数I可以减小系统的稳态误差，但是系统输出震荡的效果与I成正比，I越大震荡越明显；微分参数D可以增加系统阻尼使得系统可以尽可能降低震荡，保证姿态角的稳定性。对于外环的PID调节与内环相比更为方便些，

在内环控制基本稳定的情况下，可以在稳定的输出下适当调节即可。表1为姿态平衡时横滚角度/角速度PID参数。

表1 姿态平衡时横滚角度/角速度PID参数

| PID控制参数 | 比例(P) | 积分(I) | 微分(D) |
|---------|-------|-------|-------|
| 横滚角度    | 4.5   | 0.3   | 0.15  |
| 横滚角速度   | 0.45  | 0.1   | 0.07  |

#### (2) 仿真结果分析

单环PID横滚角仿真如图5所示，以单环PID为基础，采用串级双环PID控制系统进行仿真，如图6所示。

从横滚角在单环PID和串级PID的控制仿真示意图中可以明显看出，在基于阶跃信号输入的控制系统，使用串级PID控制算法的四旋翼飞行器响应速度较于单环PID更为快速，大概在0.2s左右并且系统几乎没有超调现象的出现。

### 3、旋翼干扰下串级控制仿真

四旋翼飞行器在飞行的时候可能会遇到各种复杂的干扰状况，我们从图5可以得出结论：系统在0.5s左右可以恢复到稳定状态。本文在基于STM32的四旋翼飞行器的串级PID控制上，不仅对串级PID和传统PID控制方法进行了对比验证，并且加入抗干扰性能的实验分析，在 $t=0s$ ， $t=3s$ 的时候依次加入干扰信号，对系统在一次扰动及二次扰动的情况下的结果进行观察，以横滚角为例。

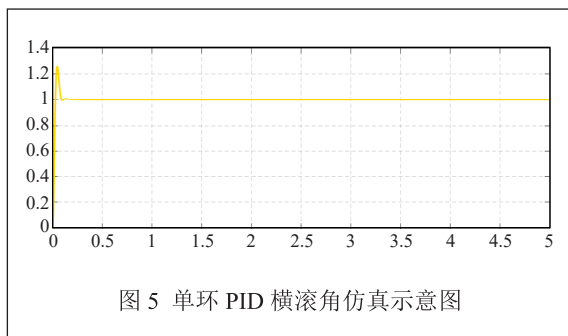


图 5 单环 PID 横滚角仿真示意图

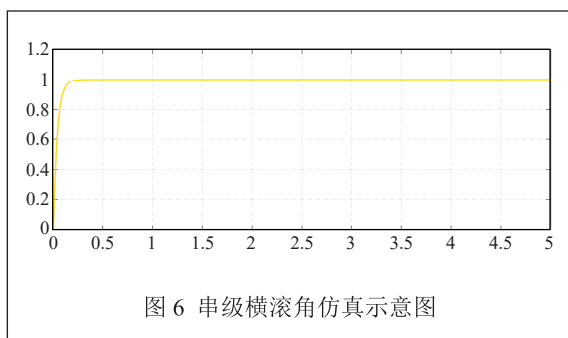


图 6 串级横滚角仿真示意图

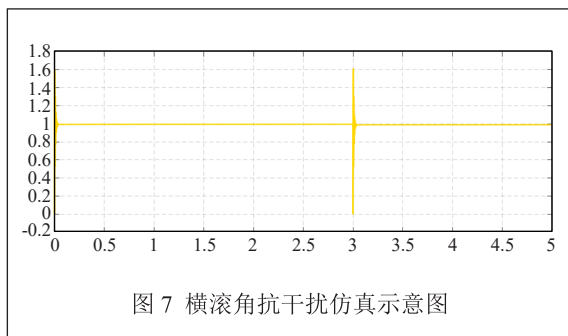


图 7 横滚角抗干扰仿真示意图

横滚角抗干扰仿真示意图如图 7 所示。可以看出在串级 PID 控制系统下，分别从  $t=0s$ ， $t=3s$  时加入干扰信号，系统能够快速地在  $0.2s$  内恢复稳定性，说明了串级 PID 控制系统能够使得基于 STM32 的四旋翼飞行器有较好的抗干扰能力，可以很好地处理飞行过程中的旋翼干扰，也再次证明了串级控制的优势。

## 六、结语

本文基于 STM32 为控制核心的四旋翼飞行器，针对四旋翼在旋翼干扰下的姿态控制问题进行了分析。通过分析飞行器的飞行原理建立了四旋翼飞行器的控制数学模型，并且设计以 STM32 为主控制器的主控模

块，数据采集模块包括惯性测量元器件 MPU6050 等传感器，电机驱动等模块保证了该平台性能；基于传统 PID 的基础上改进实现了四旋翼飞行的串级 PID 控制，通过 MATLAB/Simulink 进行仿真对比，验证了串级控制对于飞行姿态的控制更有优越性，并且在结果的基础上加入了抗干扰性能的仿真，加入扰动后的结果均十分有效的验证了串级 PID 控制有较好的抗干扰性能，达到良好的飞行姿态控制效果。

## 参考文献

- [1] 江哲. 基于 STM32 的四旋翼飞行器的设计与实现 [D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- [2] Huang J, Fu L, Xu F, et al. Grid Current Control Strategy Based on Internal Model Control and Repetitive Control [M]. System Simulation and Scientific Computing, Springer Berlin Heidelberg, 2012, 111-112.
- [3] 薛佳乐, 程珩. 基于串级 PID 四旋翼飞行器控制系统研究 [J]. 电子技术应用, 2017, 43(05): 134-137+142.
- [4] 黄佳奇, 吴晓燕, 张蕊, 马震. 四旋翼飞行器姿态稳定性优化控制研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(07): 87-90.
- [5] 吴成富, 刘小齐, 袁旭. 四旋翼无人机建模及其 PID 控制律设计 [J]. 电子设计工程, 2012, 20(16): 68-70.
- [6] 刘志军, 吕强, 王东来. 小型四旋翼直升机的建模与仿真控制 [J]. 计算机仿真, 2010, 27(07): 18-20+69.
- [7] 党蒙, 陈黎明, 赵颖. 面向四轴飞行器的视觉 - 惯性组合导航 [J]. 计算机应用, 2017, 37(S2): 134-136+140.
- [8] 叶孝璐, 章志诚, 俞立, 张文安, 张丹. 四旋翼飞行器姿态控制方法和实现 [J]. 系统科学与数学, 2016, 36(11): 1825-1836.
- [9] 王伟, 马浩, 孙长银. 四旋翼飞行器姿态控制系统设计 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(19): 5513-5519.
- [10] 王永利. 四旋翼飞行器串级姿态稳定性优化控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(08): 97-101.
- [11] 戴青燃, 李航宇. 四旋翼飞行器的姿态解算及控制 [J]. 科技资讯, 2015, 13(35): 33-34.

## Cascade PID Control of Four-rotor Aircraft Based on STM32 Under Disturbance

SHENG Guang-run, GAO Guo-wei, ZHANG Ying-xue  
(Beijing Sensor Key Laboratory, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China)

**Abstract:** With the development of quadrotor aircrafts,

the requirements of people for anti-interference and flight control of quadrotors are also improved constantly. The problems of attitude control are analyzed in this paper. A four-rotor aircraft is researched with single-chip microcomputer STM32F103RET6 as controller, and MPU6050 and other sensors as inertial measuring components. The attitude is controlled by a cascade PID controller which is easy to implement. The anti-interference simulation experiments are carried out with MATLAB/Simulink. Through parameter tuning, it is verified that the cascade PID can make the anti-interference ability of the rotor wings of the aircrafts better than the traditional PID and achieves a good flight attitude control effect.

**Key words:** four rotorcraft; cascade PID control; simulation; anti-interference

#### 作者简介

盛广润, 北京信息科技大学传感器重点实验室, 硕士, 研究方向为新型传感器及系统。

通讯地址: 北四环中路 35 号

邮编: 100101

邮箱: shengguangrun@163.com

高国伟, 北京信息科技大学传感器重点实验室, 研究员, 博士, 研究方向为新型传感器及系统。

张迎雪, 北京信息科技大学传感器重点实验室, 硕士, 研究方向为新型传感器及系统。