

文章编号:1674-4578(2021)05-0043-04

# 基于 MATLAB 的四旋翼无人机飞控 PID 仿真设计\*

邵霖文, 廖芳, 丁黎明, 舒薇, 何志谦

(怀化学院电气与信息工程学院, 湖南 怀化 418000)

**摘要:**四旋翼无人机因其结构简单, 可灵活操作等优点而备受关注, 并成功应用在各个行业, 特别是在农业植保等领域。本文根据四旋翼无人机的姿态数据解算与融合滤波算法, 设计了双闭环级联 PID 控制器, 以实现无人机飞行的稳定性, 并利用 MATLAB 开展软件的仿真实验, 验证了所设计控制器的有效性。

**关键词:**四旋翼无人机; 姿态控制; 互补滤波; 双闭环级联 PID

**中图分类号:**TP391.9      **文献标识码:**A

## 0 引言

四旋翼无人机在较好的环境中飞行具有较好的稳定性, 但是对于较为复杂的飞行环境, 往往难以达到用户的需求, 特别是在农业植保无人机方面。因此, 对四旋翼无人机的控制研究具有重要的意义和应用前景。

四旋翼无人机核心设计包括无人机的姿态控制器设计, 姿态控制器将决定无人机的运行稳定性和灵敏性, 本文将阐述一种通过四旋翼无人机的姿态数据解算与融合滤波算法而设计的双闭环级联 PID 控制器, 并利用 MATLAB 开展软件的仿真实验, 从而验证无人机控制器的稳定性。

## 1 四旋翼飞控姿态解算

在无人机控制系统中, 主要采用捷联惯性导航的基本思想, 结合其他定位方式对其在捷联惯性导航中的误差进行修正<sup>[1]</sup>。处理器读取每个传感器的原始测量数据, 使用四元数方法更新姿态, 然后将四元数转化为欧拉角, 通过互补滤波器执行姿态校正, 最后将校正后的欧拉角转换为四元数并对其进行归一化后执行下一个姿势更新, 以便获得实际角

收稿日期:2021-07-12

基金项目:湖南省教育厅科研项目重点项目(18A446);湖南省科学技术厅科研项目《地方本科院校基于科技创新创业人才培养的研究与实践》(2020RC1013);国家级大学生创新创业训练项目(S202010548021);怀化学院重点研究项目(HHUY2019-11);武陵山片区生态农业智能控制湖南省重点实验室开放课题(ZNKZ2018-2)。

作者简介:邵霖文(2001-),男,湖南人,本科生,电气工程及其自动化专业。

通信作者:丁黎明(1982-),男,湖南人,副教授,博士,主要研究方向:神经网络,时滞系统。

度值<sup>[2]</sup>。

四元数的定义式如下:

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1. \quad (1)$$

式中  $i, j, k$  分别为空间直角坐标系中  $x, y, z$  轴正方向上的单位向量。

变化公式如下:

设四元数:

$$Q = [WXYZ]^T. \quad (2)$$

$$|Q|^2 = w^2 + x^2 + y^2 + z^2 = 1. \quad (3)$$

使用旋转轴和围绕旋转轴的旋转角度来构建四元数:

$$\begin{cases} w = \cos(\alpha/2) \\ x = \sin(\alpha/2)\cos(\beta_x) \\ y = \sin(\alpha/2)\cos(\beta_y) \\ z = \sin(\alpha/2)\cos(\beta_z) \end{cases}. \quad (4)$$

式中  $w$  为四元数的标量部分的系数;  $xyz$  表示四元数的矢量部分的系数<sup>[3]</sup>;  $\alpha$  是绕旋转轴旋转的角度;  $\cos(\beta_x), \cos(\beta_y), \cos(\beta_z)$  分别为旋转轴在  $x, y, z$  方向上的分量。

根据四元数的定义, 可以得到欧拉角对四元数

的算法：

$$Q = \begin{bmatrix} w \\ x \\ y \\ -z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) + \sin(\varphi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \sin(\varphi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) - \cos(\varphi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\varphi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) + \sin(\varphi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\varphi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) - \sin(\varphi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由此可以得出四元数和欧拉角的转换方法：

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ -\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \frac{2(wx + yx)}{1 - 2(x^2 + y^2)} \\ \arcsin[(wy - zx)] \\ \arctan \frac{2(wx - xy)}{1 - 2(y^2 + z^2)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由公式(5)和公式(6),可以建立四元数与欧拉角的关系。陀螺仪的输出可以转换为四元数,并在前一时刻与四元数相乘,以执行姿态递归,然后将四元数转换为欧拉角以进行输出<sup>[4]</sup>,这就是姿态更新。

## 2 互补滤波

在四旋翼无人机上安装陀螺仪可以用来测得四旋翼无人机的角速率,通过积分得到角度,如果角速率信号略有偏差,则在积分操作后,随着时间的流逝,该误差将逐渐增加,并最终导致电路饱和,无法形成正确的角度信号<sup>[5]</sup>。

加速率传感器和电子罗盘在测量姿态上没有累积误差,但是它们的动态响应很差。因此,这三个传感器在频域具有互补特性,并且它们的数据可以通过互补滤波器融合,可以对其数据进行校正以消除此累积误差,从而提高了测量精度和系统的动态性能<sup>[2]</sup>。

以  $R$  表示飞行器真实姿态的方向余弦矩阵,  $\hat{R}$  表示互补滤波器计算输出的姿态方向余弦矩阵,  $R_0$  代表由加速率传感器和数字罗盘观测到的姿态方向余弦矩阵<sup>[2]</sup>,  $u_H$  表示  $R_0$  的高频观测噪声,则  $R_0 = R + u_H$ ,  $R_c$  代表由陀螺仪数据计算得到的姿态,  $u_L$  表示  $R_c$  中的低频累积误差,则  $R_c = R + u_L$ , 取  $G_L(s) = \frac{C_{(s)}}{s + C_{(s)}}$ ,  $G_H(s) = 1 - G_L(s) = \frac{s}{s + C_{(s)}}$ 。如果  $C_{(s)}$  具有全通特性,则  $G_L(s)$  具有低通滤波特性,  $G_H(s)$  具有高通滤波特性<sup>[6]</sup>。

$$\begin{aligned} \text{令 } \hat{R}(s) &= G_L(s)R_0(s) + G_H(s)R_c(s) \\ &= R(s) + G_L(s)u_H(s) + G_H(s)u_L(s) \\ &\approx R(s). \end{aligned} \quad (7)$$

所以,互补滤波算法能同时滤除低频和高频干扰,方便实现传感器数据融合<sup>[2]</sup>。

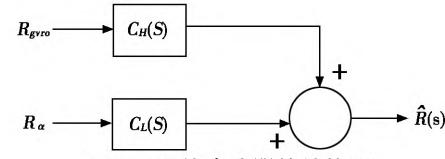


图 1 互补滤波器的结构图

图 1 是互补滤波器的结构图,图中分别是  $G_H(s)$  高通滤波器和  $G_L(s)$  低通滤波器,分别针对陀螺仪和加速度计进行滤波处理。

## 3 双闭环级联 PID 控制

### 3.1 双闭环级联 PID 控制原理

在本文中,四旋翼无人机控制分为两个环路控制。一个环路控制是内环控制,也称为姿态控制;另一个环路是外环控制,也称为位置控制,它是一个双闭环控制结构。因此,本文中将使用双闭环串级 PID 控制器来增强系统的鲁棒性。系统框图如图 2。

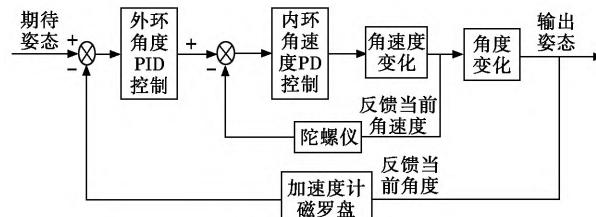


图 2 系统框图

从图 2 中可以看出,内环 PD 控制器对无人机的角速率输出进行积分,角速率由陀螺仪直接输出;外环 PID 控制器对无人机的角度输出进行积分,该角度由加速率计和电磁罗盘确定,该数据用于姿态计算。外圈 P 的作用是将无人机校正到所需角度,I 的作用是消除稳态误差,D 的作用是减少过冲;内圈 P 的作用是将角速率偏差校正为所需的角速率,D 作用是抑制和调整系统的冲击和波动<sup>[7]</sup>。这样,当外环的输出急剧变化时,内环也可以用作调节缓冲器,不会以相同的方式引起较大的波动,提高了调节效率。双闭环串级 PID 算法同时控制角速率和角度两个变量,提高了四旋翼无人机飞行控制系统的鲁棒性<sup>[8]</sup>。

### 3.2 双闭环级联 PID 控制流程设计

控制系统软件的主要功能为对传感器中测得数据进行读取, 然后对姿态和位置进行解算并控制。软件流程如图 3 所示。

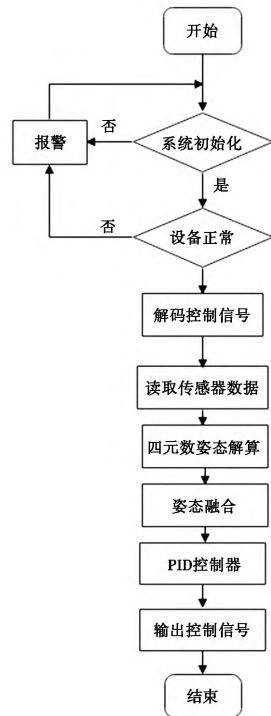


图 3 软件流程

当控制系统启动时, 它首先初始化控制系统的所有设备, 然后依次读取每个传感器的数据以计算位置和姿态, 融合计算出四元数的姿态和位置, 并根据误差使用双闭环串级 PID 算法, 求出控制量和输出, 从而调节四旋翼电机的转速, 以达到快速调节的目的。

### 3.3 双闭环级联 PID 控制 MATLAB 仿真

在 MATLAB 软件的 SIMULINK 工具模块中, 结合线性模型的传递函数, 以构建双闭环串级 PID 控制器的仿真模型。在仿真模型中, 选择 0-1 的阶跃信号作为信号发生器。被控制对象的外环是角度变换的传递函数, 内环是角速率变换的传递函数。

姿态角度的双闭环串级 PID 控制器的内外环 P、I、D 参数如表 1、表 2 所示。

表 1 双闭环串级 PID 控制器外环控制参数

控制量	俯仰角	横滚角	航向角
$K_p$	1.75	1.65	1.15
$K_i$	0.88	0.88	0.04
$K_d$	0.15	0.15	0.25

表 2 双闭环串级 PID 控制器内环控制参数

控制量	俯仰角	横滚角	航向角
$K_p$	0.050	0.050	0.055
$K_i$	0	0	0
$K_d$	0.003	0.003	0.025

在验证双闭环串级 PID 控制器对内环姿态角速率和外环位置跟随的控制效果时设置四旋翼无人机初始状态为: 俯仰、横滚和偏航, 姿态角速率全部为 0 rad/s。初始位置设置为:  $x$ 、 $y$  和  $z$  全部为 0 m。运行仿真模型, 分别得到三个姿态角速率的仿真结果图和位置的仿真结果图, 如图 4 和图 5 所示。

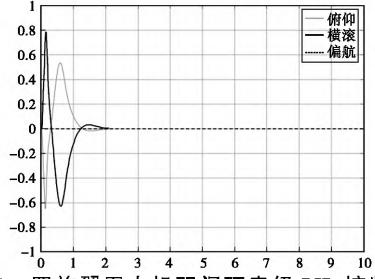


图 4 四旋翼无人机双闭环串级 PID 控制器三个姿态角速率仿真结果图

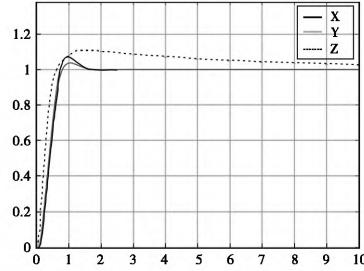


图 5 双闭环串级 PID 控制器位置控制仿真结果图

从姿态角速率仿真结果可以看出, 经过双闭环串级 PID 控制器的调整, 俯仰角速率、横滚角速率和偏航角速率均达到了预期的稳态值, 证明双闭环串级 PID 控制器对四旋翼无人机的姿态角速率具有良好的控制能力。

从位置控制仿真结果可以看出, 在双闭环串级 PID 控制器对位置跟随控制的仿真过程中,  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向均达到了预期的稳态值。但  $z$  轴方向达到稳定状态需要的时间较长, 通过对参数的调节图像可以更加快速的趋于稳定。该双闭环串级 PID 控制器基本实现了位置跟随的目标。

## 4 结语

本文设计了一种基于四旋翼无人机的姿态数据解算与融合滤波算法的双闭环级联 PID 控制器。通过对控制器模型的理论分析, 设计出了基于双闭环

的 PID 控制器，并通过 MATLAB 仿真平台进行了仿真，试验结果表明，双闭环串级 PID 控制器使四旋翼无人机飞行控制系统具有良好的鲁棒性。

### 参考文献

- [1] 秦永元. 惯性导航 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 梁延德, 程敏, 何福本, 等. 基于互补滤波器的四旋翼飞行器姿态解 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30(11): 56-58.
- [3] 盛广润, 高国伟, 张伯源. 基于四元数的四旋翼飞行器姿态解算研究 [J]. 现代电子技术, 2020, 43(14): 8-12, 16.
- [4] 钟永熙, 吴黎明, 张珊珊. WiFi 环境下的微型

四轴飞行器系统设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2016(11): 66-70.

- [5] 蔡述庭. “飞思卡尔”杯智能汽车竞赛设计与实践 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 179-180.
- [6] 杨向军. 基于 μCOS - III 直立平衡系统的设 计与实现 [J]. 软件, 2014(12): 113-119.
- [7] 周少伟, 李渊洋, 李芳, 等. 基于级联 PID 控制 算法的压控大功率电流源 [J]. 电子产品世 界, 2013(8): 36-38, 41.
- [8] 何乃晨. 基于模糊自适应 PID 控制的四旋翼 无人机飞控系统研究 [D]. 天津: 河北工业大 学, 2017.

## Simulation Design of Flight Control PID of Quadrotor UAV Based on Matlab

Shao Linwen, Liao Fang, Ding Liming, Shu Wei, He Zhiqian

(School of Electrical and Information Engineering, Huaihua University, Huaihua Hunan 418000, China)

**Abstract:** Quadrotor UAV has attracted much attention because of its advantages such as simple structure and flexible operation, and has been successfully applied in various industries, especially in agricultural plant protection and other fields. In this paper, according to the attitude data solution and fusion filtering algorithm of the quadrotor UAV, a double closed - loop cascade PID controller is designed to achieve the flight stability of the UAV. The simulation experiment of the software is carried out by using MATLAB to verify the effectiveness of the designed controller.

**Key words:** quadrotor UAV; attitude control; complementary filtering; double closed loop cascade PID

(上接第 40 页)

2006(5): 22, 25.

- 学院, 2012.  
[4] 邓元望, 王耀南, 陈洁平. 混合电动汽车驱动 系统的分类方法及应用 [J]. 农业机械学报,

- [5] 彭涛, 陈全世, 田光宇, 等. 并联混合动力电动 汽车动力系统的参数匹配 [J]. 机械工程学 报, 2003, 39(2): 69-73.

## Logical Dynamic Management Strategy Based on Model Predictive Control

Fan Yifan, Yang Xingxing, Dong Shouhong, Pan Tianze

(School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471009, China)

**Abstract:** In this paper, for a parallel hybrid electric vehicle, a demand power prediction method based on Bayesian inference is proposed, and then a logic dynamic management strategy based on model prediction is designed. A dynamic predictive control model is established to optimize the fuel consumption of the system. Simulation results based on ADVISOR show that this control strategy can effectively improve the fuel economy of hybrid power system, and make full use of battery energy to better control the change of SOC.

**Key words:** parallel hybrid electric vehicle; model predictive control; control strateg