

基于APM的模块化飞行控制器的设计

王鑫, 成泳陶, 王立峰

北方工业大学现场总线技术及自动化实验室, 北京

Email: sddtwx@163.com

收稿日期: 2021年1月28日; 录用日期: 2021年3月30日; 发布日期: 2021年4月7日

摘要

本文以开源的APM飞控板的硬件原理、固件原理为基础, 模块化搭建和研究飞行控制系统。文章对四旋翼无人机飞行控制系统的架构进行分析, 硬件部分, 采用模块化单元设计, 替换更改部分元器件和接口, 主要由32位的STM32F4处理器芯片, 替换APM的Mega2560、Mega32u2的8位双处理器芯片, 替换部分传感器, 删除或添加了部分外部接口; 软件部分, 底层的驱动库源码程序, 采用父子类的形式编写源码, 实现源码的模块化, 方便后期的软件升级和维护。该系统方案具实用性高、后期开发方便、经济性好等优点。

关键词

飞行控制系统, 模块化, STM32F4

Design of Modular Flight Controller Based on APM

Xin Wang, Yongtao Cheng, Lifeng Wang

Field Bus Technology & Automation Laboratory, North China University of Technology, Beijing

Email: sddtwx@163.com

Received: Jan. 28th, 2021; accepted: Mar. 30th, 2021; published: Apr. 7th, 2021

Abstract

Based on the hardware principle and firmware principle of the open source APM flight control board, this paper constructs and studies the flight control system in a modular manner. The article analyzes the architecture of the quad-rotor UAV control system. The hardware part adopts modular unit design and replaces and changes some components. The 32-bit STM32F4 processor chip is mainly used to replace the 8-bit dual processing of APM's Mega2560 and Mega32u2. The chip is

replaced with some sensors, and some external interfaces have been deleted or added; the software part, the underlying driver library source code file, uses the parent-child class to write the source code, realizes the modularization of the source code, and facilitates later software upgrades and maintenance. The system scheme has the advantages of high reliability and high cost performance.

Keywords

Flight Control System, Modularity, STM32F4

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科技的不断发展,无人机在各个行业的应用也越来越广泛。飞行控制系统是无人机的核心控制系统,飞控板是飞行控制系统的硬件载体,目前市面上已出现多种类型的飞控板,如:Pixhawk、MWC、KK等。这些飞控板存在一些问题,硬件电路都采用了多层PCB板组成集成电路,电路复杂高度集成,不利于后期单元模块的更换和升级;软件源码的编译大部分采用Linux操作系统下的GCC工具链编译,编译环境难搭建,源码思路复杂层次不够清晰。本文探索研究的是在Windows操作系统下使用MDK开发环境编译源码,硬件电路采用模块化搭建设计,软件源码采用C++语言,以创建父子类的形式模块化编写。解决开发环境难搭建的问题,同时也有硬件电路后期更换升级方便,软件源码维护升级方便,后期软硬件开发升级维护简单等优点。

本文是基于开源APM飞行控制系统的硬件和软件为基础,针对四旋翼无人机飞行控制系统的硬件和软件进行模块化设计,以供参考[1]。

2. 四旋翼无人机简介

无人机是一种由电动力驱动、无人驾驶、可重复使用的航空器的简称[2]。无人机在军用领域和民用领域都有广泛的应用[3],军用领域可用于:跟踪定位、特种作战、精确制导等;民用领域可用于:气象监测、电力巡检、快递送货等。无人机按结构有多种分类:固定翼无人机、多旋翼无人机、无人直升机等多种形式。

四旋翼无人机,是一种由电动力驱动,可垂直起降的飞行器,具有结构简单、稳定性好,对起降场地要求低等优点,得到了广泛的应运[4]。四旋翼无人机在结构上有“十”型结构和“X”型结构,“X”型结构较为常见,本文以“X”型结构的四旋翼无人机为载体研究模块化飞行控制系统,四旋翼无人机具有体积小、重量轻、携带方便、能轻易进入人不易进入的各种恶劣环境等优点[5],在民用领域和军用领域都有极广泛的应用。

四旋翼无人机由机械结构系统、动力系统、控制系统三大系统组成。机械结构系统主要由机架组成,用于连接支撑无刷电机、飞控板、动力电池等器件;动力系统主要由动力电池、电子调速器、直流无刷电机组成;控制系统主要由飞控板、GPS模块、无线数传模块等器件组成。本文是以“X”型结构的四旋翼无人机为载体,研究模块化飞行控制系统,以供参考。

3. 四旋翼无人机工作原理

如图 1 所示，“X”型结构四旋翼无人机。四旋翼无人机一般采用 4 个正反桨的机械结构，4 个无刷直流电机作为其核心的动力源，M1、M3 电机顺时针旋转，M2、M4 电机逆时针旋转，用于抵消四旋翼无人机的陀螺效应。

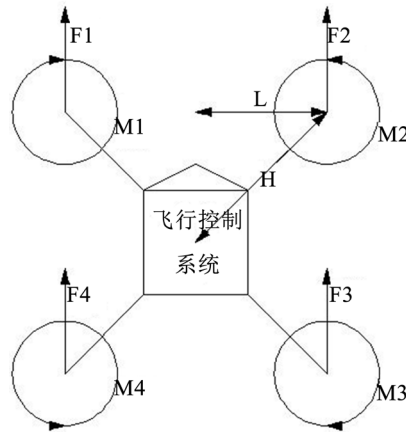


Figure 1. “X” type four-rotor UAV structure diagram

图 1. “X”型四旋翼无人机结构图

四旋翼无人机的控制系统是欠驱动控制系统[6]，由垂直、滚转、俯仰、偏航 4 个输入，向上、向下、向前、向后、向左、向右 6 个输出。根据四旋翼无人机特殊的结构模式，有四种飞行控制模式：垂直控制、滚转控制、俯仰控制、偏航控制。

1) 垂直控制。垂直控制用于四旋翼无人机的上升、下降、悬停飞行，如图 1 所示，在 Z 轴方向向，同时增加 M1、M2、M3、M4 电机的转速，4 个旋翼产生升力的合力大于四旋翼无人机的重力时，实现上升运动；同时减小 M1、M2、M3、M4 电机的转速，4 个旋翼产生升力的合力小于四旋翼无人机的重力时，实现下降运动；在 M1、M2、M3、M4 电机转速在某一值时，4 个旋翼产生升力的合力等于四旋翼无人机的重力时，并且此时的俯仰、偏航、滚转三个姿态角为零，实现悬停状态。

如图 2 所示，由牛顿第二定律知：

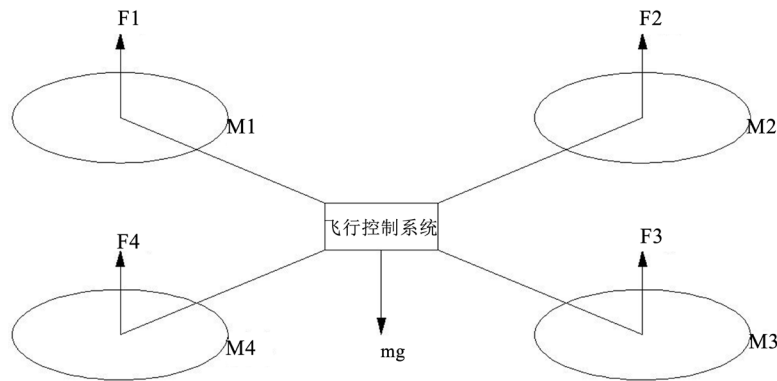


Figure 2. Vertical control

图 2. 垂直控制

$$\sum F = m\ddot{z} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - mg$$

$$\ddot{z} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - mg}{m}$$

其中： F 为合外力， F_1 - F_4 为电机 M1-M4 产生的向上升力， m 为无人机的总质量， \ddot{z} 为轴方向的加速度。

如上所示：当 $\ddot{z} > 0$ 时，上升运动；当 $\ddot{z} < 0$ 时，下降运动；当 $\ddot{z} = 0$ 时，悬停运动。

2) 滚转控制。滚转控制用于四旋翼无人机的向左、向右飞行，如图 1 所示，同时增大 M1、M4 电机的转速，减少 M2、M3 电机的转速，左边的升力大于右边的升力，无人机向右倾斜，产生向右的分力，无人机向右飞行，分力越大，向右飞行的速度越快；同时减小大 M1、M4 电机的转速，增大 M2、M3 电机的转速，右边的升力大于左边的升力，无人机向左倾斜，产生向左的分力，无人机向左飞行，分力越大，向左飞行的速度越快。

如图 3 所示：

$$\sum M = I_x \ddot{\alpha} = L(F_{23} - F_{14})$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{L(F_{23} - F_{14})}{I_x}$$

其中： M 为合外力矩， F_{14} 为电机 M1、M4 产生的向上合升力， F_{23} 为电机 M2、M3 产生的向上合升力， I_x 为无人机 X 轴上的转动惯量， $\ddot{\alpha}$ 为 X 轴方向的角加速度。

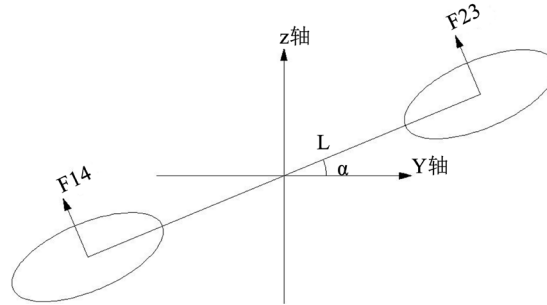


Figure 3. Roll control
图 3. 滚转控制

如上所示：当 $\ddot{\alpha} > 0$ 时，向左加速翻转运动；当 $\ddot{\alpha} < 0$ 时，向右加速翻转运动。对 $\ddot{\alpha}$ 一次积分运算，可得旋转角速度，对 $\ddot{\alpha}$ 二次积分运算，可得旋转角度，既滚转角。

3) 俯仰控制。俯仰控制用于四旋翼无人机的向前、向后飞行，如图 1 所示，同时增大 M3、M4 电机的转速，减少 M1、M2 电机的转速，后边的升力大于前边的升力，无人机向前倾斜，产生向前的分力，无人机向前飞行，分力越大，向前飞行的速度越快；同时减小大 M3、M4 电机的转速，增大 M1、M2 电机的转速，前边的升力大于后边的升力，无人机向后倾斜，产生向后的分力，无人机向后飞行，分力越大，向后飞行的速度越快。

如图 4 所示：

$$\sum M = I_y \ddot{\beta} = L(F_{12} - F_{34})$$

$$\ddot{\beta} = \frac{L(F_{12} - F_{34})}{I_y}$$

其中： M 为合外力矩， F_{12} 为电机 M1、M2 产生的向上合升力， F_{34} 为电机 M3、M4 产生的向上合升力， I_y 为无人机 Y 轴上的转动惯量， $\ddot{\beta}$ 为 Y 轴方向的角加速度。

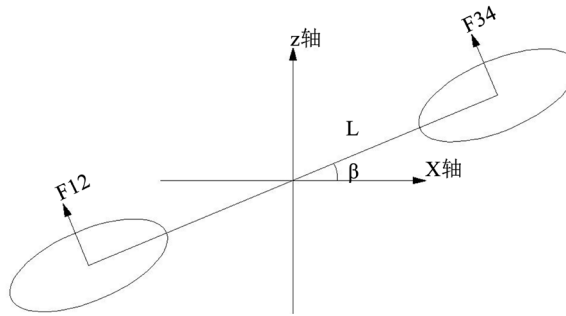


Figure 4. Pitch control
图 4. 俯仰控制

如上所示：当 $\ddot{\beta} > 0$ 时，向前加速翻转运动；当 $\ddot{\beta} < 0$ 时，向后加速翻转运动。对 $\ddot{\beta}$ 一次积分运算，可得旋转角速度，对 $\ddot{\beta}$ 二次积分运算，可得旋转角度，既俯仰角。

4) 偏航控制。偏航控制用于四旋翼无人机在滚转、俯仰角度为零时，控制无人机向左、向右转向控制，如图 1 所示，M1、M3 与 M2、M4 电机转速相同、方向相反，目的是克服自身的牛扭矩力，当 M1、M3 与 M2、M4 电机转速不相同，会产生一定的扭矩力，从而对四旋翼无人机的偏航进行控制。当同增大 M1、M3 的转速，减少 M2、M4 的转速时，四旋翼无人机向左偏转，同减少 M1、M3 的转速，增大 M2、M4 的转速时，四旋翼无人机向右偏转。

如图 5 所示：

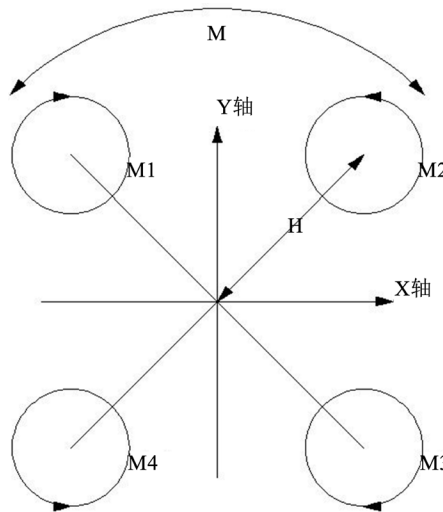


Figure 5. Yaw control
图 5. 偏航控制

$$\sum M = I_z \ddot{\gamma} = M_1 - M_2 + M_3 - M_4$$

$$M_1 = HF_1$$

$$M_2 = HF_2$$

$$M_3 = HF_3$$

$$M_4 = HF_4$$

$$\ddot{\gamma} = \frac{H(F_1 - F_2 + F_3 - F_4)}{I_z}$$

其中： M 为合外力矩， $F_1 \sim F_4$ 为电机 M1~M4 产生的向上合升力， I_z 为无人机 Z 轴上的转动惯量， $\dot{\gamma}$ 为绕 Z 轴方向的角加速度， H 为电机到机体中心的距离。

如上所示：当 $\dot{\gamma} > 0$ 时，机体逆时针加速旋转运动；当 $\dot{\gamma} < 0$ 时，机体顺时针加速旋转运动。对 $\dot{\gamma}$ 一次积分运算，可得旋转角速度，对 $\dot{\gamma}$ 二次积分运算，可得旋转角度，既偏航角。

4. 飞行控制系统的硬件模块化设计

飞行控制系统是四旋翼无人机的控制核心系统，飞行控制系统的好坏，决定了四旋翼无人机的飞行品质。

本文以开源的 APM 飞行控制系统的硬件原理图为基础，根据实际工程的需要，并考虑因素，删除或添加部分硬件电路或接口。本文设计搭建的模块化飞行控制系统与 APM 飞行控制系统，在硬件方面具有较多的创新点：

1) 采用 32 位 ARM 结构的 STM32F407 做为主控芯片，替换 APM 原有的 8 位 Mega2560、Mega32u2 双处理器，在处理性能、功耗和经济性有很大的优势。

2) 采用 SPI 通讯的双 MPU6500 传感器，代替 APM 原有的 IIC 通讯的 MPU6050，在数据采集速度有较大的提升，双传感器的方式也提高了数据精度和可靠性。

3) 采用低端的 BMP180 气压计代替 APM 原有的 MS5611 气压计，可以较大程度上节约经济成本。

4) PWM 信号读的方式，本文保留了 APM 的 PPM 信号解析读取的方式读取各路 PWM 信号，取消了 APM 直接读取各路 PWM 信号的方式读取 PWM 信号，大量节约了电气连线。

5) PWM 输出，本文采用的是通过 IIC 通讯的 16 路 PWM 模块输出 PWM 信号，代替 APM 通过主控芯片的引脚直接输出 PWM 信号的方式，节约了电气连线和自控芯片的引脚接口，也便于后期扩展 PWM 信号通道。

6) 增加 OLED 显示屏，用与显示飞行控制系统的相关信息状态，代替了 APM 通过不同的 LED 状态显示的方式，读取信息状态更加直观明了。

7) 所有传感器单元模块、GPS、数传电台等器件采用杜邦线与主控板连接，代替 APM 高度集成的 PCB 板，便于后期器件更换和升级。

本文模块化设计搭建的硬件结构图如图 6 所示，其中：

1) STM32F407 处理器模块，用于读取传感器数据、接收机信号、地面站信号，做姿态解算、位置解算、处理数据等，通过 16 路 PWM 模块输出 PWM 信号，控制电机转速实现不同的飞行姿态。

2) EEPROM 存储器模块，采用 AT24C256 模块，32KB 存储容量，模拟 APM 处理器 Mega2560 中的 EEPROM，IIC 的通讯协议，存储程序源码中的一些静态数据、传感器校正值、航点数据等数据。

3) IMU 惯性测量单元，包含两个 MPU6500 模块，一个 HMC5883L 模块。通过读取加速度值、角速度值、磁场强度值，做姿态解算，用于得出飞行姿态角。

4) BMP180 模块。气压计传感器，计算出当前四旋翼无人机的飞行高度，做微分运算可得上升下降速度，用于位置解算。

5) GPS 模块，采用的 U-BLOXNEO-6M 模组，串口的通讯协议，用于获取当前的经纬度、海拔高度、航速等信息，用于位置解算。

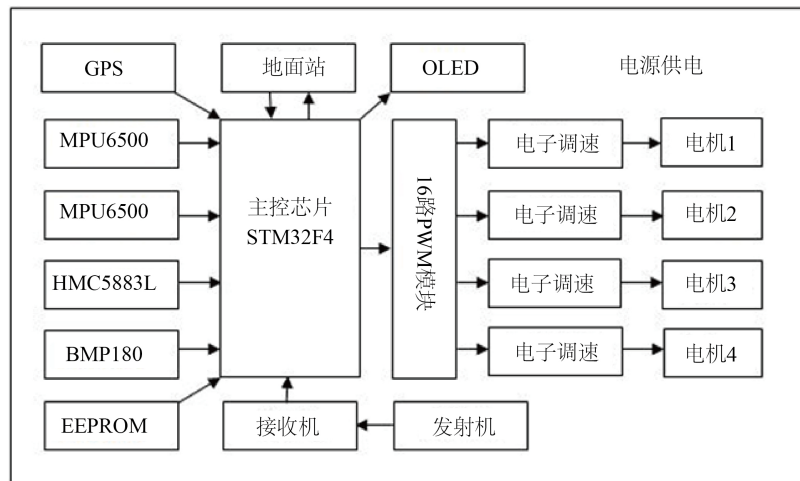


Figure 6. Modular hardware structure diagram
图 6. 模块化的硬件结构图

6) 接收机模块，主控芯片以解析接收机 PPM 信号的方式读取各个通道的 PWM 信号，用于手动模式下控制四旋翼无人机飞行的姿态和飞行模式切换。

7) 16 路 PWM 模块，IIC 的通讯协议，用于输出 4 路 PWM 信号至电子调速器，控制电机转速。

8) OLED 显示屏，显示飞行控制性的相关信息状态，如故障信息等。

5. 飞行控制系统的控制流程

算法部分，是飞行控制系统的核心部分，主要有：整体控制流程、姿态解算流程、位置解算流程、姿态控制流程、PID 控制器。

a) 整体控制流程

整体控制流程如图 7 所示，是四旋翼无人机飞行控制器的核心算法部分，主要包括：姿态控制、位置控制两大算法。加速度计、磁罗盘、陀螺仪实时采集 9 轴数据，通过姿态解算，实时计算四旋翼无人机当前的姿态角，作为闭环控制的反馈部分。GPS 模块单元，实时采集四旋翼无人机当前的位置信息，与地面站输入的航点位置作比较，通过位置控制器实时计算目标姿态角，并与当前的姿态角做对比，通过电机混控输出不同数值的 PWM 信号至电子调速器，进而控制四旋翼无人机的输出电机转速，控制四旋翼无人机的飞行姿态。

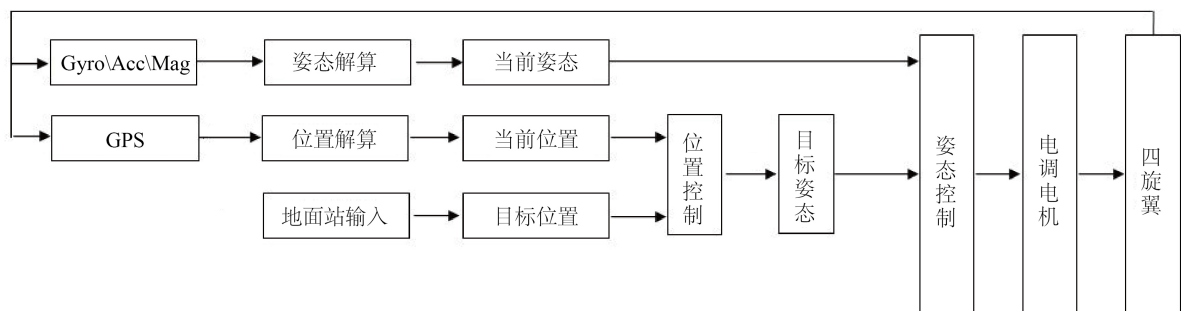


Figure 7. Overall control flow chart
图 7. 整体控制流程图

b) 姿态解算流程

姿态解算流程如图 8 所示，加速度计易受机体震动影响，磁力计易受机体周围金属物体影响，陀螺仪易受温度变化产生积分漂移。同时，机体坐标系(北东地坐标系)下，加速度计测量 Z 轴数据误差较大，磁罗盘测量 Y 轴数据误差较大，因此，本文读取 3 轴角速度的采用的方法是：首先通过一些简单算法直接读取加速度计、磁力计的姿态角，做均值滤波；然后通过 PD 控制器后计算三轴角速度；最后再与陀螺仪所读出的 3 轴角速度做权值滤波，以便提高 3 轴角速度准确性和可靠性。最后通过 DCM 矩阵，解算四旋翼无人机的姿态角。

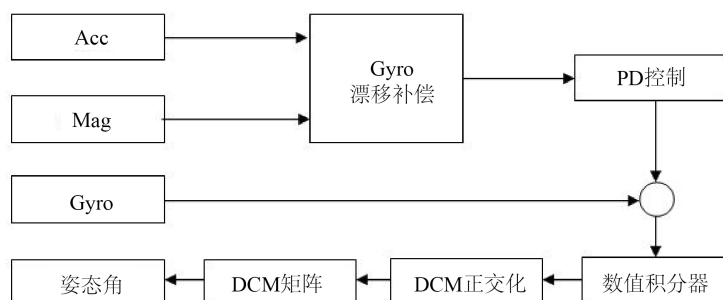


Figure 8. Posture calculation flowchart

图 8. 姿态解算流程图

c) 位置解算流程

位置解算流程如图 9 所示，期望位置由地面站输入设置，当前位置由机载 GPS 模块单元实时测量，位置误差作为输入信号，通过位置控制器计算期望飞行速度，期望速度与四旋翼无人机实时测量速度的数值误差作为速度控制器的输入信号，计算期望姿态角。

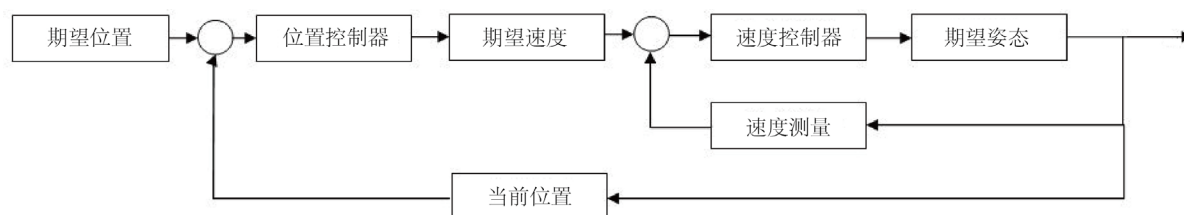


Figure 9. Position calculation flowchart

图 9. 位置解算流程图

d) 姿态控制流程

姿态控制流程如图 10 所示，期望姿态角由位置解算流程得出，测量姿态角由姿态解算流程得出，其误差数值作为角速度控制器的输入信号，计算四旋翼无人机的期望角速度，期望角速度与传感器测量的角速度做对比，通过算法计算 PWM 信号数值，通过电子调速器控制电气转速，进而控制四旋翼无人机飞行姿态。

e) PID 控制器

PID 控制器如图 11 所示，是实际工程中最为常见的控制器，它具有结构简单，参数调整方便等优势得到了广泛的应用。PID 控制器包括三大部分：比例控制器、积分控制器、微分控制器，是根据系统的输入和输出相比较的误差，利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的[7]。在实际应用中，PID 控制器也包括 PID 控制器、PI 控制器、PD 控制器，其中 PID 控制器是控制效果最为理想的控制器，既有比例 P 的响应速度，又有积分 I 的消除静态误差，还有微分 D 的超前调节控制。因此，在飞行控制系统

中有大量的运用，主要用在四旋翼无人机的姿态控制和位置控制中。

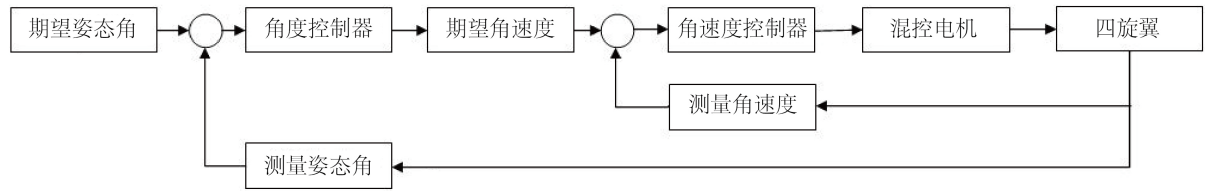


Figure 10. Attitude control flow chart
图 10. 姿态控制流程图

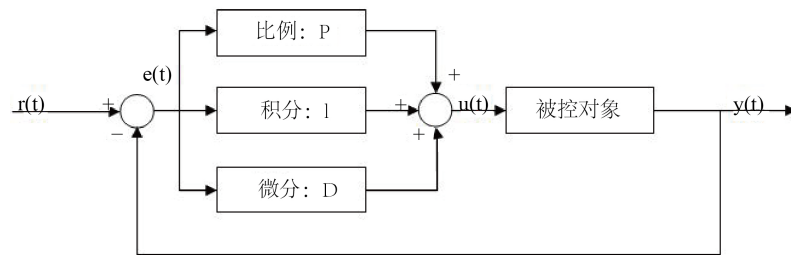


Figure 11. PID controller
图 11. PID 控制器

6. 飞行控制系统的源码模块化设计

本文以开源的 APM 飞行控制系统的源码为基础，根据所采用的硬件模块和接口，删减或添加相关源码程序。本文采用编译方式、源码编写思路与开源的 APM 源码有很多的优势之处：

1) 本文是在 Window 系统下 MDK 开发环境下编译源码程序，替换 APM 原有的在 Linux 系统下 GCC 工具链编译的方式，Windows 系统下的界面化编译环境，具有开发环境易搭建、编译调试程序方便等优点，便于后期源码开发。

2) 以 STM32F407 的标准库为工程模板，二次分装部分标准库函数接口，便于移植 APM 源码。传感器模块的源码程序采用父子类的形式编写，实现源码模块化，父类中创建应用层所调用的函数接口，子类集成父类函数接口，针对不同型号的传感器编写相对应的驱动程序，后期更新升级传感器模块，只需更新编写子类驱动源码，便于后期源码升级维护。

7. 实验结果

如图 12~15 所示，分别为：垂直控制、俯仰控制、滚转控制、偏航控制结果。

Altitude (m)	加速度Z
129.39	-938.00
偏航(deg)	俯仰(deg)
209.51	-5.55
升降速度(m/s)	DistToMAV
0.62	0.00

Figure 12. Vertical control
图 12. 垂直控制

偏航(deg)	横滚(deg)
12.16	4.00
俯仰(deg)	Altitude (m)
29.08	184.33
升降速度(m/s)	加速度Z
0.16	-843.00

Figure 13. Pitch control

图 13. 俯仰控制

偏航(deg)	横滚(deg)
1.01	-44.62
俯仰(deg)	Altitude (m)
-0.71	181.63
升降速度(m/s)	加速度Z
0.13	-711.00

Figure 14. Roll control

图 14. 滚转控制

偏航(deg)	横滚(deg)
248.62	0.42
俯仰(deg)	Altitude (m)
-0.03	178.51
升降速度(m/s)	加速度Z
0.10	-985.00

Figure 15. Yaw control

图 15. 偏航控制

8. 结束语

本文研究的是在 MDK 编译环境下，基于 APM 飞行控制系统的模块化研发，与 APM 飞行控制系统相比，具有很多的优势。在编译环境上，具有开发环境易搭建、成本低、效率高、可视化界面、易于上

手等优势；在硬件上，各个功能模块采用的是模块化设计，后期升级替换模块，仅需要针对性替换升级即可，在经济上具有很多的优势；在软件源码上，底层的驱动源码由于是采用的父子类的形式，后期替换模块，仅需要在子类中对模块实现即可，而不需要修改上层应用层源码，源码思路清晰，开发周期短，具有很大的经济效益。

参考文献

- [1] 崔江东. 小型四旋翼无人直升机飞行控制系统研究与开发[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.
- [2] Paul G. Fahlstrom, Thomas J. Gleason. 无人机系统导论[M]. 吴汉平, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 慕春棣, 李波睿. 基于视觉的自动空中加油技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(5): 670-676.
- [4] 宗意凯, 曾宪阳, 施子凡, 等. 基于 STM32 单片机四旋翼无人机自主飞行设计[J]. 电子技术, 2018, 47(6): 84-87.
- [5] 冯新宇, 范红刚, 辛亮. 四旋翼无人飞行器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [6] 吕家启. 四旋翼无人机抗风控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [7] 刘道峰. 基于速率和队列长度的主动队列管理算法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2007.