

基于 ARM 的四旋翼无人飞行器控制系统

刘 乾, 孙志锋*

(浙江大学 电气工程学院 浙江 杭州 310027)

摘要:为改变传统以单片机为处理器的四旋翼无人飞行器的控制方式,提出了一种基于嵌入式 ARM 的飞行控制系统的设计和实现方案。详细介绍了控制系统的总体构成以及硬、软件设计方法,包括传感器模块、电机模块、无线通信模块。试验结果表明,该设计结合嵌入式实时操作系统,保证了系统的高可靠性和高实时性,能满足飞行器起飞、悬停、降落等飞行模态的控制要求。

关键词:ARM; 四旋翼无人飞行器; 控制系统

中图分类号:TP277;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)10-1237-04

Four-rotor unmanned aerial vehicles control system based on ARM

LIU Qian, SUN Zhi-feng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to change the conventional control of four-rotor unmanned aerial vehicles using microcontroller as the processor, a solution of flight control system based on embedded ARM was presented. The main function of the system, the hardware structure and the software design were discussed in detail, including the sensor module, the motor module, the wireless communication module. With embedded real time operating system to ensure the system's high reliability and real-time performance, the experiments results show that the requirements of flight mode are satisfied, including taking off, hovering and landing and so on.

Key words: ARM; four-rotor unmanned aerial vehicles; control system

0 引言

近年来,随着新型材料以及飞行控制技术的进步,小型四旋翼低空无人飞行器得到了迅速发展,在军事和民用领域具有广阔的应用前景。和传统的直升机相比,它有着自身的优势:当前后两个旋翼逆时针旋转,而左右两侧的旋翼顺时针旋转时,则尾桨控制和旋翼倾斜问题可以被忽略^[1]。但由于小型四旋翼低空飞行器是一个具有 4 个输入力,同时却有 6 个输出的欠驱动系统,具有多变量、非线性等特性,这使得飞行控制系统的设计变得比较困难。

目前的飞行器控制系统多采用单片机来完成姿态控制,存在硬件资源有限、运算和处理速度慢等问题。本研究选用 32 位 ARM 处理器,并且可以内嵌实时操

作系统,和传统的控制方式相比,外设资源更丰富,性能更好。本研究从小型四旋翼飞行器的机型特点和实际需要出发,结合 ARM 控制器的优越性能,探讨小型四旋翼飞行器控制系统的硬、软件实现方案。

1 系统工作原理和结构框架

1.1 四旋翼飞行器工作原理

四旋翼飞行器上下的垂直运动是通过 4 个旋翼同时增速(减速)得到的,当 4 个旋翼的升力之和等于飞行器的自重时,飞行器便保持悬停。水平面内的前后运动是在旋翼 1、2 分别增速(减速)的同时,旋翼 3、4 减速(增速),这样机身就会发生向后或者向前的倾斜,得到水平面内的前后运动;俯仰运动是通过旋翼 1、3 速度不变,旋翼 2 增速(减速)的同时,旋翼 4 减速

收稿日期:2011-03-24

作者简介:刘 乾(1986-),男,河南驻马店人,主要从事嵌入式技术及网络通信方面的研究。E-mail: qianustb@163.com

通信联系人:孙志锋,男,副教授,硕士生导师。E-mail: eeszf@zju.edu.cn

(增速)来实现的。相似地可以得到滚转运动:即旋翼 1 增速(减速),同时旋翼 3 减速(增速)。

通过组合以上的基本运动,可以实现小型四旋翼飞行器的各种复杂运动^[2]。四旋翼飞行器的结构俯视图如图 1 所示。



图 1 小型四旋翼飞行器结构俯视图

1.2 控制系统总体框架

小型四旋翼飞行器的飞行控制系统通常由传感器测量装置、主控制器和驱动电机等部分组成。传感器用来测量四旋翼飞行器的飞行状态信息,主控制器根据这些传感器反馈回来的状态信息、预先给定的状态和现场无线输入的控制指令信息进行处理,使控制系统根据控制算法处理结果输出 4 路 PWM 信号控制电机转速,以实现自动调节旋翼力矩来稳定飞行姿态。整个四旋翼飞行器控制系统主要分为机载控制部分和地面控制部分。机载部分系统结构框图如图 2 所示。

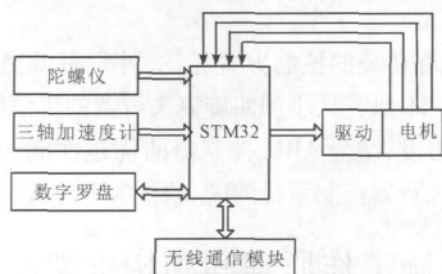


图 2 飞行控制系统结构框图

2 系统硬件设计

本研究采用 ST 公司生产的 STM32F103RCT6 作为系统的主处理器。STM32 系列基于专为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用而设计的 ARM Cortex-M3 内核。它主要负责采集传感器检测到的姿态角速率(俯仰角速率、横滚角速率和偏航角速率)、三轴的线加速度和航向信息并实时解算;根据检测到的飞行信息,结合既定的控制方案,计算输出控制量;通过无线通信模块与地面进行数据的传输,实现接收控制命令改变飞行状态和下传飞行状态数据。

2.1 传感器模块

小型四旋翼低空飞行器在某个时刻的状态由 6 个物理量来描述,包括在三维坐标中的 3 个位置量和沿 3 个轴的姿态量(即称为六自由度)。惯性传感器有两种类型:陀螺仪和加速度计。

陀螺仪起到测量四旋翼飞行器的角速率的作用,在惯性导航系统中非常重要。因此,精度和稳定性可作为陀螺仪选型的重要原则。本研究选用 ADI 公司的角速率陀螺仪 ADXRS150,负责采集四旋翼飞行器 3 个方向的角速率(俯仰角速率、横滚角速率、偏航角速率)。该陀螺测量精度达到 $150^{\circ}/s$,其工作电压为 5 V。

加速度传感器起到感应飞行器 3 个轴向的线加速度的作用。本研究的应用环境主要是室外的低速运动场合,因此每个轴向的加速度并不大。根据这个选型原则,本研究选用 Kionix 公司体积小、功耗低、高灵敏度的三轴加速度传感器 KXM52-1050。它是一款数字式传感器,灵敏度为 660 mV/g 。

在惯性导航算法中,导航参数会随着传感器的测量误差积累而发散,因而不能满足长时间自主飞行的需要,故选用霍尼韦尔公司的三轴式数字罗盘 HMR3300 对惯性导航系统进行姿态校准。它的工作电压是 5 V,采用 UART 协议通信,经过转换电路之后可以和 STM32 的 SCI 口通信,并且自带模数转换,以便与微处理器直接通信。

2.2 电机控制模块

本研究采用 PWM 控制直流电机的转速。小型四旋翼低空飞行器的动力系统由电机、减速齿轮和旋翼组成。电机选择 1225FE33 型号的铁心电机。直流电机是功率器件,需要很大的驱动电流,控制器的驱动能力有限,因此必须选用专门的驱动芯片^[3]。本研究采用 LG 生产的集成芯片 LG9110 来控制驱动直流电机,该芯片两个输出端能直接驱动电机的正反向运动,它具有较大的电流驱动能力,每通道能通过 $750\text{ mA} \sim 800\text{ mA}$ 的持续电流;同时它具有较低的输出饱和压降,使它在实现驱动直流电机的功能上更安全可靠。

由于飞行器的电机在转动过程中会产生比较大的冲击电流,为了提高飞行控制系统的可靠性,本研究需要对 STM32 输出的 PWM 信号进行隔离。飞行器选用锂电池供电,光电耦合器进行信号隔离时,工作电流大,锂电池供电能力无法满足要求。ADI 公司的 iCoupler 系列数字隔离器将 CMOS 与芯片级变压器技术相结合,大大降低了电路板的体积和功耗。电机隔离电

路如图 3 所示,数字隔离器 ADuM1400 实现了 4 路 PWM 信号的隔离。

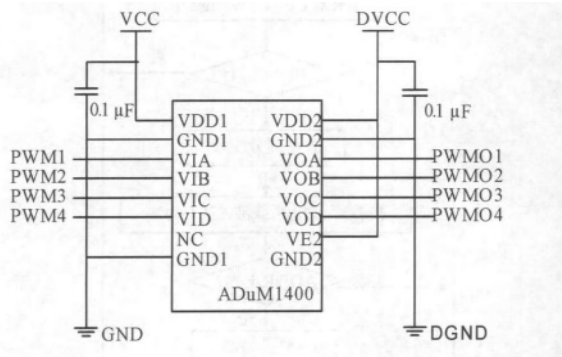


图 3 电机隔离电路

2.3 无线通信模块

无线通信模块是四旋翼无人飞行器和地面控制中心之间通信的桥梁。本研究要求的无线传输距离为 100 m 左右,故选用 Nordic VLSI 公司推出的单片射频收发器芯片 nRF905^[4]。nRF905 芯片工作在 433 MHz 的 ISM 频段,工作电压为 3.3 V,使用 SPI 接口与 STM32 通信,配置和使用非常方便。此外,nRF905 芯片功耗非常低,以 -10 dBm 的输出功率发射时电流只有 11 mA,接收信号时电流只有 12.5 mA,在 100 m 之内传输稳定可靠。具体的硬件连接如图 4 所示。

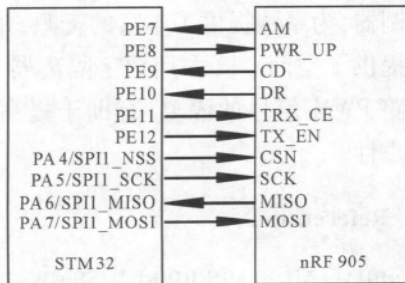


图 4 STM32 与 nRF905 硬件连接图

3 软件设计

3.1 总体设计

四旋翼飞行器控制系统软件设计的总体目标是启动飞行控制系统的各个功能模块并使之正常工作,按照既定规划实现稳定飞行。由于四旋翼飞行器为六自由度的系统,而其控制量只有 4 个,这就意味着被控量之间存在耦合关系^[5],所设计的控制算法应能够对这种欠驱动系统足够有效,用 4 个控制量对 3 个角位移量和 3 个线位移量进行稳态控制。本研究在得到四旋翼飞行器的动力学方程之后,适当地选取控制量,运用控制理论中经典的 PID 控制算法对飞行器系统进行控制。

飞行控制系统的中央控制模块主要完成系统初始化、系统自检、解算传感器数据、导航信息解算、执行控制算法、计算并输出控制量等功能。控制模块选择使用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 管理控制任务的调度。 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 是一个专为嵌入式应用设计、基于优先级调度的抢占式实时操作系统内核,它包含了任务调度、任务管理、时间管理/任务间通信与同步等功能。各任务之间通过信号量和消息队列实现相互间的数据交换和同步^[6]。系统启动流程如图 5 所示。

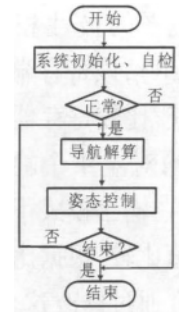


图 5 系统启动流程图

3.2 数据采集模块

STM32 内嵌 2 个 12 位的模拟/数字转换器 (ADC),每个 ADC 有多达 16 个外部通道。传感器模块中,罗盘的输出为数字信号,陀螺仪和加速度传感器的输出信号为模拟电压信号,需要进行模/数转换变为数字量,才能进行下一步处理。模/数转换的核心器件是 A/D 转换器,为了不增加系统开销,于是采用了 STM32 的 12 位 A/D 转换器。

角速率陀螺仪、加速度计经过模/数转换提取飞行器角速度和线加速度信息;数字罗盘 HMR3300 通过 UART 串口通信提取航向信息。ADC 模块工作在同步采样模式下,可以同时采样角速率和线加速度,采样结果存放在 ADC 的结果寄存器中。ADC 采样模块程序流程图如图 6 所示。

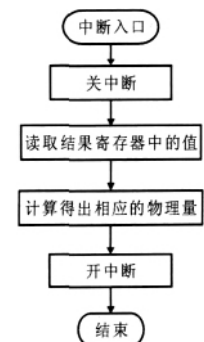


图 6 ADC 模块程序流程图

3.3 电机控制模块

STM32 的 TIMx 模块可以产生 3 组 6 路 PWM,同时每组 2 路 PWM 为互补。STM32 通过解算飞行姿态信息和路径规划输出 PWM 控制量协调控制 4 个电机,实现稳定飞行。为使 STM32 的通用定时器 TIMx 产生 PWM 输出,本研究通过设置以下 3 个寄存器来控制^[7]。捕获/比较模式寄存器 (TIMx_CCMR1/2),其模式设置位 OCxM 由 3 位组成,若使用 PWM 模式,则必须设置为 110/111。这两种 PWM 模式的区别是输

出电平的极性相反;捕获/比较使能寄存器(TIM_x_CCER),该寄存器控制着各个输入输出通道的开关;捕获/比较寄存器($TIM_x_CCR1 \sim 4$),该寄存器总共有 4 个,对应 4 个输出通道 $CH1 \sim 4$,以 TIM_x_CCR1 为例,在输出模式下,该寄存器的值与计数器 TIM_x_CNT 的值比较,根据比较结果产生相应动作。利用这点,本研究通过修改这个寄存器的值,就可以控制 PWM 的输出脉宽,从而达到控制电机的转速的目的。

3.4 无线通信模块

无线通信模块实现上位机对四旋翼飞行器的飞行控制和跟踪定位,实时与地面控制系统交换信息,接收地面控制系统传输的飞行控制指令信号、向地面控制系统发送当前无人机实时飞行和姿态数据等相应信息,以完成指定的飞行控制任务。ARM 通过 SPI 接口与 nRF905 通信,将 ROM 中的数据发送出去。ARM 控制 nRF905 发送数据,主要分为两个步骤:一是 ARM 先向 nRF905 写入数据,二是控制 nRF905 发送数据^[8]。在执行过程中,本研究先写入发送数据的目标地址再写入数据,然后再控制 nRF905 发送地址和数据。nRF905 发送模式会自动产生字头和 CRC 校验码,当发送过程完成后,数据准备好引脚通知 ARM 数据发送完毕。nRF905 的发送和接收流程如图 7~8 所示。

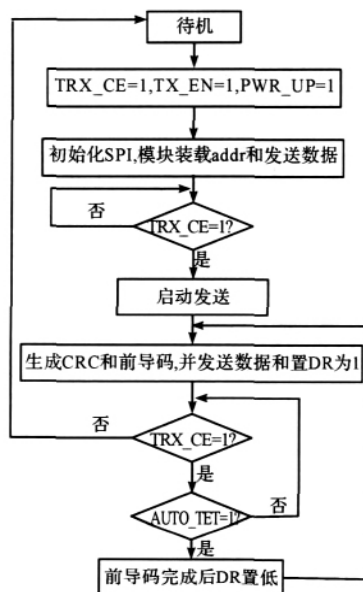


图 7 发送数据流程图

4 结束语

本研究给出了基于 ARM 处理器的四旋翼无人机飞行控制系统的软、硬件设计方法,改变了传统以单片

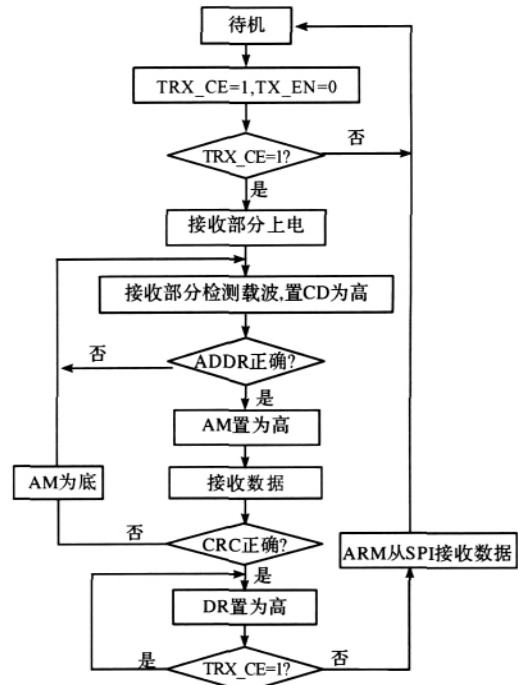


图 8 接收数据流程图

机为主的控制方式。该系统能满足飞行器起飞及悬停、降落等飞行姿态的控制要求,适合在近地面环境中执行监视、侦查、航拍等任务,具有广阔的军事和民用前景。本研究的创新点包括:①采用 ARM9 作为系统的核心控制器,为系统提供了丰富的资源,并为以后的功能扩展提供了空间。②采用数字隔离器 ADuM1400 实现了 4 路 PWM 信号的隔离,有助于提高飞行控制系统的可靠性。

参考文献 (References):

- [1] BOUABDALLAH S, MURRIERI P, SIEGWART R. Design and control of an indoor micro quadrotor [J]. Proceedings. ICRA04. New Orleans: [s. n.] 2004: 4393—4398.
- [2] 杨明志, 王 敏. 四旋翼微型飞行器控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(4): 485-490.
- [3] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 陈茜茜. 微型无线图像传输系统的设计[D]. 成都: 电子科技大学信息与通信工程学院, 2005.
- [5] KHALIL H. Nonlinear systems [M]. 3rd ed. Springer Press, 2003.
- [6] 王永虹, 徐 炜, 郝立平. STM32 系列 ARM Cortex-M3 微控制器原理与实践[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [7] 刘惠英, 范宝山. 基于 STM32 的多步进电机控制系统研究[J]. 测控技术, 2010, 29(6): 54-57.
- [8] 谭 辉. nRF 无线 SOC 单片机原理与高级应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009. [编辑: 李 辉]