

小型四倾转旋翼机系统平台设计与实现

张耀坤，燕会臻，刘红

(哈尔滨工程大学 自动化学院，哈尔滨 150001)

摘要：四倾转旋翼机是一种拥有三种飞行模式的非线性系统，由于很难建立其精确的数学模型，对其控制问题的理论分析和仿真研究有很大局限，因此设计并制作一小型四倾转旋翼机系统实验平台用于系统控制问题的实物研究。平台系统以 STM32F407 为主控制器，使用 MEMS 惯测元件构成 AHRS 子系统对飞行参数进行测量；利用无线通信方式实现控制指令发送和飞行信息回传；采用 FreeRTOS 嵌入式系统，实现各个功能任务的并行实时处理；利用 DMA 数据总线传输技术，实现数据的快速接收与处理；使用 Qt 应用程序框架开发地面站应用程序，方便系统调试。通过地面站测试所制作的模型机系统的运行情况，结果表明，子系统间通信正常，各传感器信号解算无误，系统各功能任务运行正常。所设计的系统平台能够投入实际研究使用。

关键词：四倾转旋翼无人机、STM32F4、FreeRTOS

Design and Implementation of Small Quad Tilt Rotor System Platform

ZHANG Yao-kun, YAN Hui-zhen, LIU Hong

(Automation College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The quad tilt rotor is a nonlinear system with three flight modes, and it is very difficult to establish an accurate mathematical model for it, so theoretical analysis and simulation research on its control have great limitations. Therefore, to solve the system control problems through physical research, a small quad tilt rotor system platform is designed and manufactured. The STM32F407 is the main controller of the platform system. The AHRS subsystem is made up by the MEMS inertial components to measure the flight parameters. The wireless instruction is used to transfer the control instructions and flight information signals. The FreeRTOS embedded system is used to achieve parallel and real-time processing of various functions. Use DMA transmission technology to achieve rapid data reception and processing. Use Qt application framework to develop ground station applications to facilitate system debugging. The QTR model machine system was tested by the ground station. The results show that the communication between the subsystems is normal, the signals of each sensor are correct, and the functions of the system function normally. The designed system platform can be put into practical use.

Key words: Quad tilt rotor, STM32F4, FreeRTOS

0 引言

四倾转旋翼机（简称 QTR）是一种能够在直升机、倾转过渡、固定翼这三种飞行模式之间进行切换的新型飞机，通过控制机翼两端的短舱系统的转角，它既能像直升机一样垂直起降和悬停，又能像固定翼机一样进行高航速和远航程的飞行，其优秀的飞行性能具有很大的商业价值和军事潜力。

相对于传统的双倾转旋翼机，QTR 具有两套对称的旋翼和机翼结构，在增强载重能力的同时也更加安全可靠，但对其的设计与控制也更加复杂。美国贝尔公司于 2005 年在 V22 双倾转旋翼机基础上开始四倾转旋翼机的 V44 研制，目前已进行了大量

实验；日本千叶大学利用自制的模型机对 QTR 姿态控制问题进行相关研究；而国内相关研究工作则大多集中于以 V-22 为基础的双倾转旋翼机的力学建模和非线性控制领域的理论研究^[1-3]。由于目前对 QTR 系统的研究较少，且鲜有公开的专业文献资料，很难建立其精确的数学模型，这给通过理论和仿真研究系统控制问题带来极大的限制。对于这类模型不充分的系统，考虑使用不依赖于模型的控制算法对其进行研究，因此本文通过对 QTR 系统的软、硬件及机械结构进行设计，制作了一小型四倾转旋翼模型机。该模型机实现了 QTR 控制系统的基本功能，

将作为实验平台对系统控制律进行深入研究。

1 系统硬件设计

1.1 总体方案

本文采用微控制器设计闭环数字控制系统实现对 QTR 模型机系统的控制。系统体系结构原理图如图 1 所示。

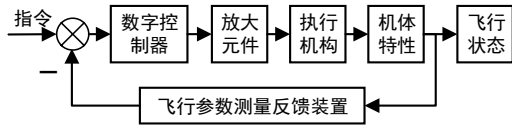


图 1 所示。

图 1 系统原理图

针对 QTR 无人机系统的功能要求，选取 STM32F407VET6 芯片为控制器；以无刷电机、舵机及相应机械结构作为执行机构；使用 MEMS 陀螺仪、加速度计、电子罗盘、气压计及 GPS 模块构成 AHRS 子系统；AHRS 模块、空速计及电流传感器等作为参数反馈传感器；指示灯、按键、无线数传模块和遥控设备等作为人机交互单元。上述各元件配合相应的信号接收与处理电路组成图 2 所示的硬件系统。

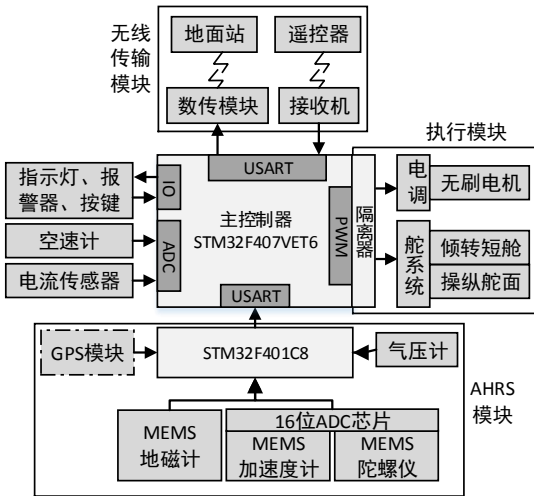


图 2 硬件总体方案设计图

1.2 主控制器

选用基于 Cortex-M4 内核的 32 位高性能芯片 STM32F407VET6 作为系统主控制器，其自带硬件 FPU 单元和 DSP 指令集，拥有多达 192KB 的片内 SRAM，512KB 的 FLASH 以及丰富的外设接口，同时其 IO 口的复用功能使系统构建更加灵活。控制器系统主要包括以下部分：

电源单元：硬件系统使用动力锂电池供电，由于传感器和单片机系统的工作电压要求，首先使用 MPS 公司的 MP1584EN 稳压芯片产生 5V 电源，供各类传感器使用，然后使用 AMS1117 稳压芯片产生

3.3V 电源供整个单片机系统工作。

复位电路和时钟单元：采用 RC 电路与按键组成外部复位单元，实现系统随时复位；使用 8MHz 石英晶振作为外部时钟信号，经芯片内部锁相环时钟倍频电路，倍频至 168MHz 作为系统运行频率。

下载与在线仿真单元：采用 JTAG 调试器和 SWD 接口对系统进行程序下载和代码调试，避免占用过多 IO 口，极大地节约了片上资源。

1.3 AHRS 模块

无人机在空中的姿态和位置信息对于系统控制极其重要，同时由于单个芯片的处理能力和外设资源有限，因此使用单独的 AHRS 模块嵌入系统。AHRS 模块的原理结构框图如图 3 所示。

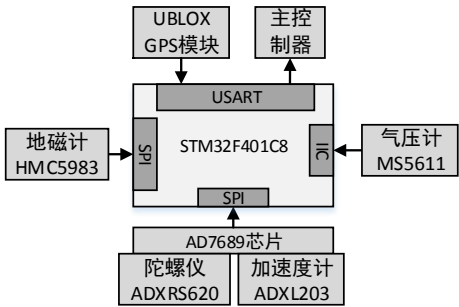


图 3 AHRS 模块结构图

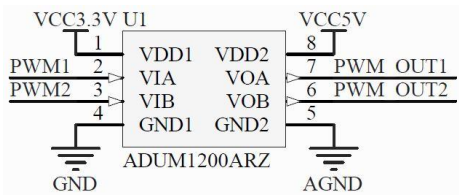
AHRS 处理器采集各传感器输出的信号并加以解算处理，得到无人机的飞行姿态、高度、位置等信息，然后通过串口以一定频率向主控制器发送这些信息。既保证了有效信号的及时更新，也减轻了主控制器的负担。

1.4 执行模块

该 QTR 无人机的动力机构由四只直流无刷电机、电子调速器和螺旋桨组成；倾转机构由四只大功率电动舵机及相应机械结构组成；舵面偏转机构由小型电动舵机驱动。

控制器以 PWM 信号的形式输出控制量作用于功率放大器件，从而驱动相关执行机构工作。由于执行元件工作环境变化剧烈，为防止脉动电压对控制系统造成影响，因此使用 ADUM1200 数字隔离器将控制器系统与动力系统隔离开来。该隔离器将高速 CMOS 与单芯片变压器技术融为一体，具有优于光电耦合器件的出色性能。隔离电路如图 4 所示。

图 4 控制量输出隔离电路



1.5 无线传输模块

无人机的控制指令的发送和飞行状态信息的回传都需要借助无线通信方式实现。为了避免两个信号之间的过多干扰，采用 2.4GHz 频段传输遥控器指令信号；采用 433MHz 频段数传模块实现飞行状态的回传。

2 系统软件设计

2.1 软件总体设计

基于 FreeRTOS 的飞控软件系统总体框图如图 5 所示。软件系统的框架按照功能不同划分为硬件驱动层、中间层和应用软件层。

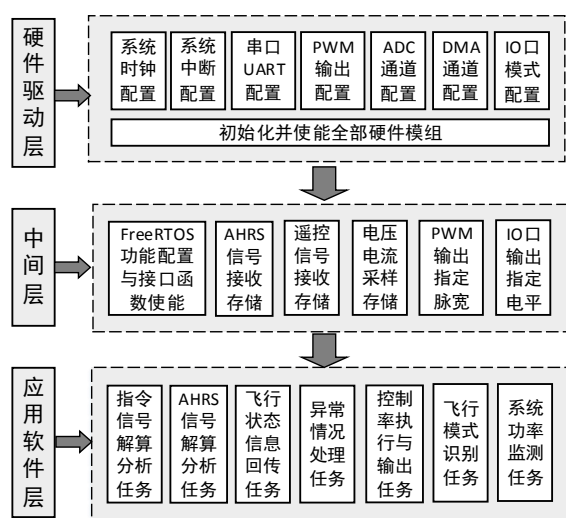
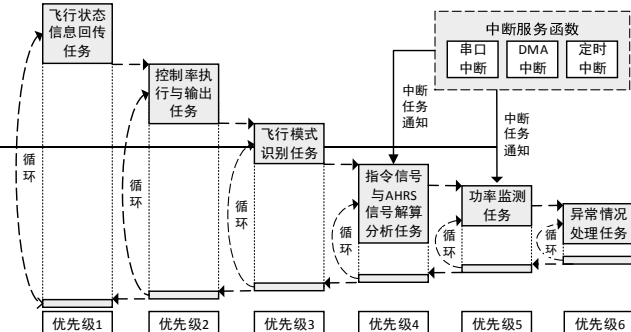


图 5 基于 FreeRTOS 的飞控软件系统总体框图

硬件驱动层直接与外部执行元件和传感器连接，因此该层主要完成微控制器中各个外设功能的基本配置与初始化。中间层为上层软件提供操作底层硬件的接口，主要包含 FreeRTOS 的功能配置、指令和传感器信号接收以及数据采样与输出等。应用软件层直接面向用户来实现系统功能。该层中创建应用环境及任务，并通过对各个任务的分配和调度处理任务内容。

2.2 系统任务创建

根据系统的功能需要，主要创建如图 6 中所示的七大任务。由于 FreeRTOS 内核支持抢占式，高优先级任务可以打断低优先级任务的运行而取得 CPU 的使用权，执行完成后再把 CPU 的使用权归还给低优先级的任务，从而保证紧急任务先被执行。处理



器在任务调度器的控制下在各个任务之间快速地切换，实现多个任务的“同时”运行，大大提高了任务执行的实时性。因此，按照每个任务逻辑联系和紧急程度，给各任务分配不同的优先级，紧急任务具有较高优先级。

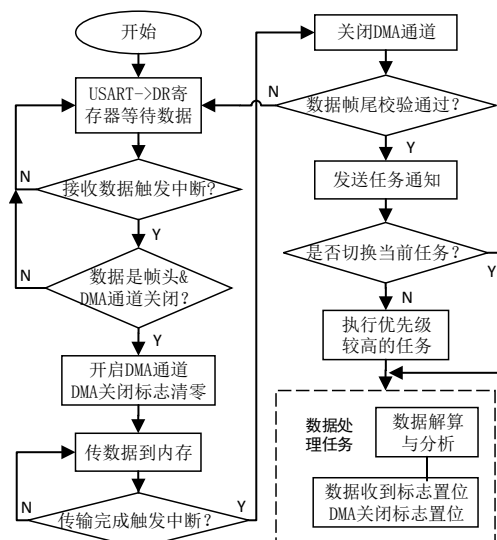
图 6 系统任务创建与运行情况

由于每个任务可以通过设置使之在就绪态、挂起态、阻塞态和运行态这四种运行状态之间相互转换，因此根据需要可以对各任务的运行状态进行控制，从而删除失效任务或添加额外任务。同时，各个任务之间相对独立，任务与任务、任务与中断之间的同步是通过发送任务通知信息完成，从而使系统框架更加清晰，易于对系统进行裁剪，同时也具有很高的可移植性。

2.3 信号接收与处理模块

由于控制指令的接收、AHRS 信息的接收，GPS 报文数据接收等任务都涉及到串口通信，由于数据量大且处理过程复杂，若直接通过串口接收中断进行接收和处理，将会极大占用 CPU 的资源，降低系统的效率。因此考虑采取 DMA 通道将数据直接通过内部总线传到内存，对数据的帧头帧尾进行校验后，再在相应任务中进行数据解析的方式进行，从而减少数据接收过程对控制器内存的占用。数据串口 DMA 接收与处理流程示意图如图 7 所示。

图 7 数据接收与处理流程示意图



若串口长时间未收到数据，或数据始终错误，则数据处理任务会始终处于阻塞状态这时认为串口数据丢失，标记相应的异常标志并转到异常情况处理任务，从而保证系统的安全。

2.4 飞行控制模块

由于 QTR 无人机不只有一种飞行模式，同时不同飞行模式之间也存在一定的转换关系，这意味着飞行过程中的控制率要根据飞行模式的变化及时作出改变，因此创建飞行模式识别任务。该任务中通过状态变量记录飞行状态，状态变量的高四位表示前一时刻的飞行状态，低四位代表当前时刻的飞行状态，每当外部任务或中断中有改变飞行模式的操作时，便更新当前和之前的状态标志值。通过对状态标志的判断，决定解挂或挂起哪种控制率任务，然后在相应的飞行控制任务中对无人机进行控制。飞行控制模块的软件实现流程如图 8 所示。

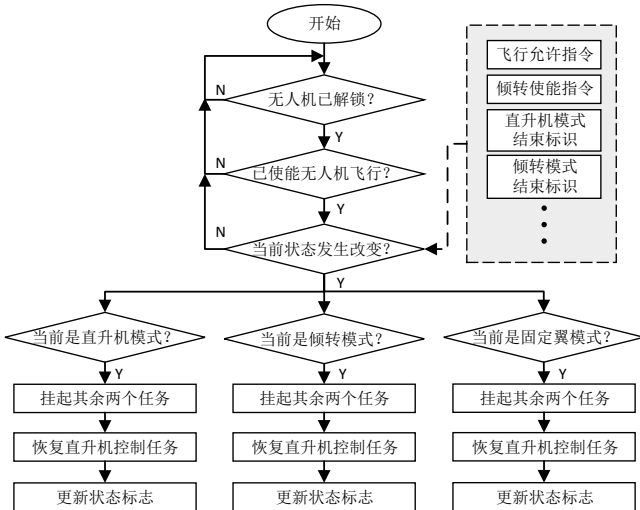


图 8 飞行控制模块的软件实现流程图

2.5 地面站软件

为了方便系统调试和辅助飞行操控，使用 Qt 应用程序框架开发 PC 端地面站应用程序和用户界面。地面站接收由无人机发来的飞行状态信息，将数据解算后显示在屏幕上。根据系统需求，地面站能够显示无人机飞行状态量和异常状态情况并以不同颜色的曲线显示主要的飞行参数变化情况，此外，还可将一段时间内的飞行数据保存为数据文件用于分析。

3 模型机设计制作

使用工业机械设计软件 SolidWorks 对模型样机进行设计，模型机整体机械结构设计图如图 9 所示。

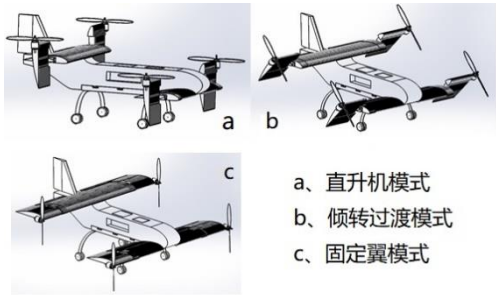


图 9 模型机整体机械结构设计图

该模型机使用前翼下单翼，后翼上单翼的串联翼结构，有效减小了前翼螺旋桨气流对后翼的影响，同时设计时将整机的重心放置在两机翼的中间位置附近，既容易产生升力又维持飞机的平衡，避免配平阻力。

为减小垂直飞行时旋翼下洗气流对翼面的阻力，该模型机借鉴“ERICA”倾转旋翼机研究方案，在机翼外侧附加小机翼段，使之随旋翼一起倾转。同时，为简化倾转机构的设计，使用舵机直接带动机翼外侧段和动力系统旋转。此外，该模型机具有一对副翼和可差动升降舵作为可操纵的气动舵面；不可操纵的垂直尾舵用以平衡气流；固定的支撑轮机构充当起落架。模型机实物的设计参数如

模型机尺寸参数（单位：mm;mm ² ;g）			
机身总长	800	前后翼间距	450
机身直径	110	前后翼高度差	120
机体最大高度	400	舵参考面积	8550
前（后）翼展	720	舵弦长	45
翼弦长	190	起落架高度	120
外侧小翼翼展	100	起飞重量	2400

图 10 所示。

图 10 模型机实物的设计参数

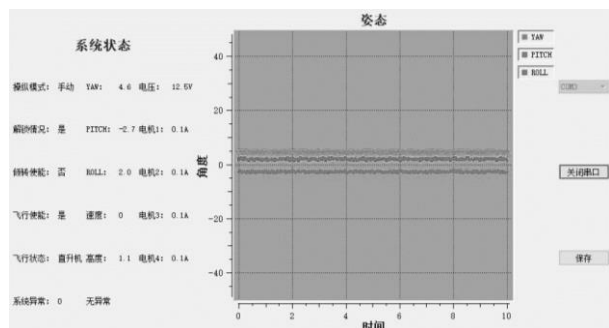
4 系统装配与调试

根据所设计的 QTR 模型机机械结构图，使用合适的材料制作出四倾转旋翼模型机，并将硬件系统各模块按照设计的布局有序地装配到模型机上，搭建起 QTR 无人机硬件实验平台如图 11 所示。



图 11 QTR 无人机硬件实验平台实物图

通过 PC 端地面站软件对系统进行整体调试,某时刻地面站显示的系统运行情况如图 12 所示。可以看出,各子系统间通信正常;遥控器指令接收并解算无误,AHRS 输出的姿态角等信息正常,系统状态识别和异常检测也符合当前情况下的设置,表明系



统中的各功能任务在有序运行。

图 12 某时刻系统运行状况

5 结语

本文基于 STM32F4 微控制器和 FreeRTOS 嵌入式系统开展四倾转旋翼无人机系统平台的设计与实现。对实际系统中存在的众多问题提出设计与解决方案,完成了相关的软硬件及结构设计。通过调试,所制作的 QTR 模型机系统实现基本功能,能够投入使用于后续的研究工作。该系统平台的设计实现过程为 QTR 飞行控制率的深入研究提供了基础,也为类似的飞行控制系统实验平台的实现提供了有益的参考。

参考文献:

- [1]陈恒,左晓阳,张玉琢.倾转旋翼飞机技术发展研究[J].飞行力学,2007(01):5-8.
- [2]https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_Boeing_Quad_TiltRotor
- [3]Snyder D. The quad tilt rotor: its beginning and evolution. In: Proceedings of the 56th annual forum, american helicopter society. Virginia Beach, Virginia; May 2000.
- [4]宋彦国. 遥控小型倾转旋翼机飞行控制系统研究[J]. 直升机技术, 2006(3):12-16.
- [5]韩涛. 四倾转旋翼机直升机模式飞行控制系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [6]刘林秀. 微型倾转旋翼机飞控系统软件设计[D]. 南京航空航天大学, 2012.
- [7]A.C. Kahvecioglu, “Design And Manufacturing Of A Quad Tilt Rotor Unmanned Air Vehicle”, M.Sc Thesis, Aerospace Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2014.
- [8]张东升, 陈航科, 梅雪松,等. 可倾转四旋翼飞行器:, CN103072688A[P]. 2013.
- [9]https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20121026_104409_61291_Aerodays_2011.pdf