

文章编号 1004-924X(2007)05-0713-06

# C8051F020 的微型旋翼飞行器实验平台的控制系统

罗 均,邢兰兴,周 焱,谢少荣

(上海大学 精密机械工程系, 上海 200072)

**摘要:**提出了一种与传统桨距角递推算算法不同的基于高速摄影和图像处理的桨距角测定方法。根据实验要求,开发了一个以微型旋翼飞行器的非对称变距装置为测试主体的实验平台,并设计了一套基于 C8051F020 的微型旋翼飞行器实验平台的控制系统。该控制系统以 C8051F020 单片机为微控制器,用微型位置传感器来检测螺旋桨主轴的相位信息,并利用 C8051F020 单片机内部的 PCA 捕捉功能采集位置传感器的输出信号,得到螺旋桨主轴的四个相位;利用单片机输出的 PWM 方波信号控制电机的转速,以达到对螺旋桨电机进行加速的目的;利用单片机内部产生的 PCA 捕捉中断来触发高速摄像机的拍摄,以实现飞机加速与拍摄的同步。该控制系统结构紧凑,系统可靠性高。最后通过该控制系统来控制微型飞行器仿真飞机前飞的状态,得到该状态下桨叶的变距曲线,证明所提出的桨距角测定方法和由此开发的实验平台在测量桨距角中是有效的,达到了预期目标。

**关 键 词:**微型旋翼飞行器;实验平台;C8051F020;高速摄影

**中图分类号:**V27;TP273 **文献标识码:**A

## A control system for experimental platform of micro aerial vehicle based on C8051F020

LUO Jun, XING Lan-xing, ZHOU Yan, XIE Shao-rong

(Department of Precision Mechanics Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A new measuring way different from the traditional deducting method for the angle of blade pitch was proposed based on high-speed camera and image processing. According to the experiment requirement, an experimental platform mainly based on the device of Micro Aerial Vehicle(MAV) and a new control system found on C8051F020 SCM were designed. In the platform, C8051F020 SCM was the MCU; the phase information of the propeller's main-shaft was tested with the micro position sensor and the PCA capture function of C8051F020 SCM. The four phase information of a propeller's main-shaft was gained by collecting the output signal of a position sensor; the motor speed was controlled by the output signal of PWM generated by C8051F020 SCM for controlling the motor speed up; a high-speed camera was touched off by the interrupt signal from the PCA capture in order to realize the synchronization between the speeding up of the motor and the taking pictures of the camera. This control system has compacted configuration and high reliability. Finally, using this system to control the MAV for simulating the forward flying, the electronic collector curve of MAV was ob-

收稿日期:2006-10-27;修订日期:2007-02-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50405046);上海市优秀青年教师培养计划资助项目(No. 04Y0HB094)

tained. It is proved that the proposed method and the experiment platform based this method can be used to measure the blade pitch and have met the design requirement completely.

**Key words:** MAV; C8051F020; experimental platform; high-speed camera

## 1 引言

近些年来随着微电子机械系统(MEMS)的蓬勃兴起,人们越来越关心微型飞行器(Micro Air Vehicle-MAV)的发展。微型飞行器是指飞行器整体尺寸在 150 mm 以内,重量在几十到上百克,有效载荷 20 g 左右,航程 10 km 左右的微型飞行器。它具有体积小、重量轻、携带方便、操作简单、隐蔽性好、机动灵活等特点,在现代军事和民用方面具有十分广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

根据微型飞行器的性能要求,设计了一种面向微型旋翼飞行器的非对称变距装置<sup>[2]</sup>。该非对称性变距装置的变距原理与传统的机械变距原理完全不同,它通过突然改变主桨电机的转速使与螺旋桨相连接的弹性连杆发生变形,从而带动螺旋桨绕桨叶轴线方向转动而改变安装角,达到变距的目的。为了能够更好的操控该微型飞行器,需要找出主桨电机转速的改变量与螺旋桨距角的变化量之间的对应关系即新型非对称变距机理。则要求在地面上能够模拟飞机真实飞行时的各种飞行模式,比如飞行时机身的前后倾斜,左右倾斜等等,并能同时记录下桨叶的变距过程。基于以上要求,开发了一个以微型旋翼飞行器非对称变距装置为测试主体的实验平台。该实验平台的控制系统以 C8051F020 单片机为主控微处理器,通过串口与上位机进行通信,得到所需要的控制信息,利用 PCA 的捕捉功能采集飞机主桨的相位信息,用输出的 PWM 方波信号控制主桨电机转速,在 PCA 中断中触发高速摄像机,使电机的加速与高速摄像机的拍摄保持同步。

## 2 微型飞行器实验平台介绍

为了寻找微型旋翼飞行器中的新型非对称变距机理,提出了一种与传统桨距角递推算法不同的基于高速摄影和图像处理的桨距角测定方法。这是一种非接触式测量,即利用高速摄像机拍摄飞机桨叶变距的全过程,然后对得到的图像进行

处理测量出桨距角,最终通过对应主桨电机的改变量与桨距角的变化量,找出飞机飞行时的变距机理。

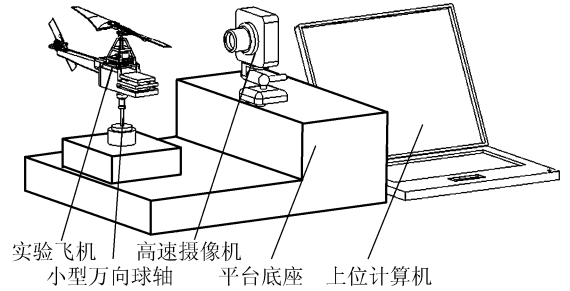


图 1 微型飞行器实验平台示意图

Fig. 1 Sketch map of MAV's experimental platform

实验用微型飞行器的主桨电机转速在 10 000 r/min 以上,通过减速系统传到螺旋桨的转速在 1 500 r/min 左右,速度非常快。本文采用了 5 000 帧/s 的高速摄像机拍摄螺旋桨在每周四个相位的旋转状态图像(这四个相位分别对应飞行器前后左右飞行)。对四个相位中的某个相位拍摄时,要求控制飞机的主桨电机在这个相位突然加速,使螺旋桨的桨距角发生改变,同时使控制系统启动高速摄像机进行拍摄,以保证加速与拍摄的同步性。

根据实验要求,开发了如图 1 所示的实验平台。实验飞机通过控制系统的控制可以绕小型万向球轴向先后左右倾斜,模拟飞机真实飞行时的各种飞行模式;高速摄像机用来拍摄桨叶旋转状态的图像;上位计算机用来给下位控制系统发送相应的控制信息,同时存储高速摄像机拍摄下的图像。

## 3 控制系统设计

### 3.1 系统功能

该系统首先需要采集到螺旋桨旋转时的位置信号(即对应着飞机前后,左右飞行时的四个相位信息);然后根据不同的相位信息由微处理器输出不同占空比的 PWM 方波信号,控制飞机主桨电

机的加速,同时触发高速摄像机进行拍摄,把螺旋桨桨叶变距的过程记录下来,使主桨电机加速的过程与拍摄桨叶变距的过程保持同步。系统并能通过上位机来控制螺旋桨旋转的快慢和对四个相位中的哪个相位进行加速。

### 3.2 系统硬件结构

根据控制系统的功能要求,设计了一个以C8051F020 为主控微处理器的控制系统,其中系统的硬件构成如图2所示<sup>[6,7,8]</sup>:

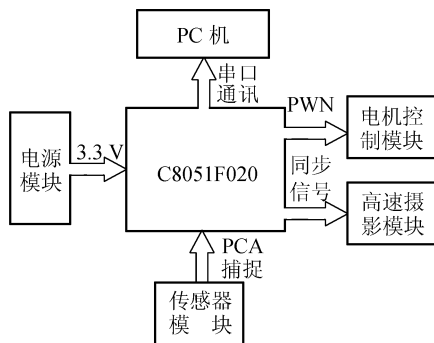


图2 系统硬件构成

Fig. 2 Structure of system hardware

#### 3.2.1 微处理器的选择<sup>[3,5]</sup>

为了使整个控制系统的硬件电路尽可能简洁,减少芯片数量和占用空间,节省功耗,提高系统的可靠性,微控制器选用美国CYGNAL公司的C8051F020。该芯片体积只有 $16\text{ mm}\times 16\text{ mm}\times 1.2\text{ mm}$ ,内部集成了多种功能部件,包括PCA模块、电压比较器、A/D转换器、D/A转换器、UART、定时器、看门狗定时器和64 kB的Flash存储器等,可以很好地满足该控制系统的需要;同时因为它集成了各个模块,减少了外围电路,使硬件系统变的非常紧凑,大大提高了系统的可靠性。由于C8051F020微控制器使用片内JTAG调试方式,使本系统能够方便地在线调试和更新,大大减少了开发周期。

#### 3.2.2 电机控制模块

C8051F020单片机发出四路控制信号:其中两路为PWM方波信号;两路为电机方向控制信号。四路信号先通过高速光电耦合器4N25隔离后再传递到电机驱动芯片上,分别控制主桨和尾桨电机的转速和转向。因为电机的工作额定电流为4.5 A,该系统选用的是大功率驱动芯片L298N来驱动电机。高速光电耦合器用来隔离

单片机信号和电机的驱动信号,以防止单片机受到大电流信号的冲击而遭到损坏。

#### 3.2.3 高速摄影模块<sup>[4]</sup>

选用美国Redlake生产的MotionPro HS-4型号的高速摄像机进行拍摄。该型号摄像机在分辨率为 $512\times 512$ 时,最大帧比率为5 000 帧/s;最大内存为4 GB,具有很强的存储能力;快门为 $1\text{ }\mu\text{s}$ 的最小曝光时间,可以捕捉和分析高速运动物体;触发方式可由软件或由BNC接头传输3.3 V CMOS高电平触发;同步性:通过BNC接头传输3.3 V CMOS高电平保持同步。本系统是在C8051F020的PCA捕捉中断中,发送3.3 V触发信号,通过BNC接头与高速摄像机相连,把信号传给摄像机。这样就保证了电机加速的同时,启动高速摄像机进行拍摄。

#### 3.2.4 传感器模块

为了得到螺旋桨旋转时,对应飞机前后,左右飞行的四个相位,同时又要考虑到传感器尽量小巧,轻便。本系统选用由位置控制码盘和光电传感器组成的位置传感器,结构如图3所示。位置控制码盘有内外两圈,内圈用作标定相位的起始位置即0相位,外圈用作确定螺旋桨的四个相位;它通过中心的轴孔安装在螺旋桨主轴上。光电传感器通过外面的两个螺栓安装在机架上,通过内置的感光元件检测到内外圈孔的通与不通,从而得到螺旋桨旋转时的位置信号。

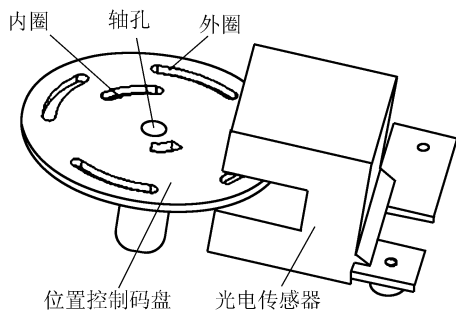


图3 位置传感器

Fig. 3 Position sensor

### 3.3 系统软件结构

控制系统软件采用模块化结构,由主程序、UART模块、PCA模块等组成。程序流程图如图4所示。

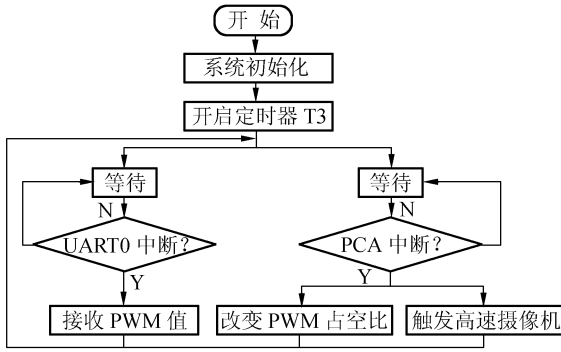


图 4 系统程序流程图

Fig. 4 Flow chart of system program

### 3.3.1 系统初始化

选择系统时钟: C8051F020 有一个内部振荡器和一个外部振荡器驱动电路, 每个驱动电路都能产生系统时钟, 当单片机复位后从内部振荡器启动, 且瞬间完成。但内部振荡器产生的时基信号存在 20% 的误差, 为了给系统提供精确的时基信号, 本系统选用外部晶体振荡器来产生时基信号。

端口初始化: 首先初始化交叉开关, 交叉开关根据优先权顺序将端口 0~3 的引脚分配给器件上的数字外设 (如 UART、SMBus、PCA、定时器等); 然后配置端口引脚的输出方式, 每个端口引脚都可以被配置为漏极开路 and 推挽方式。本系统根据要求引脚分配为 TX0 = P0. 0、RX0 = P0. 1、CEX0 = P0. 2、CEX1 = P0. 3、CEX2 = P0. 4、CEX3 = P0. 5, 且把 P0. 2 和 P0. 3 设为推挽输出。

定时器 T3 初始化: 为了从外部得知系统在运行, 本系统添加了一个系统运行指示灯, 即每隔一秒钟让指示灯点亮一次。选用定时器 T3 的输出信号作为指示灯的时基信号, 定时器 T3 设置如下: 时钟采用系统时钟的 12 分频, 每隔 10 ms 产生一次中断, 计时器初值设定为 20 000。同时定时器 T3 产生的时基信号还可以用作以后的系统扩展, 如用作采集陀螺仪或水平仪输出时的时基信号。

### 3.3.2 UART 模块

UART 模块用来接收上位机的控制信息, 然后对信息进行处理, 解析出各个相位对应的 PWM 控制值。UART 的工作方式选为方式 1: 异步、全双工通信。每个数据字节共使用 10 位: 一个起始位、8 个数据位和一个停止位。使用定

时器 1 工作在模式 2, 8 位自动重装方式产生波特率; 定时器的时基选用系统时钟。根据实际情况, 选择的波特率为 9 600。

UART 模块采用中断接收方式, 其流程图如图 5 所示。接收数据格式为: \$ <相位值> # <PWM 控制值>, 如在相位 1 时, 令所对应的 PWM 所对应的高电平计数值为 132, 则数据格式为 \$ <1> # <132>。

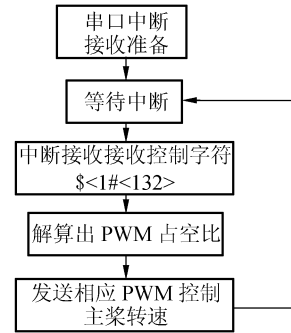


图 5 串口中断接收流程图

Fig. 5 Flow chart of UART interrupt receive

### 3.3.3 PCA 模块

系统要求采集位置传感器内外两圈的输出信号和产生两路 PWM 方波信号, 选用 PCA 模块中的四个 16 位捕捉/比较模块来完成上述任务。PCA 的时基选用系统时钟的 12 分频; 模块 0 和 1 的工作方式为 8 位脉宽调制器方式, 用来产生两路 8 位的 PWM; 模块 2 和 3 的工作方式为边沿触发的捕捉方式。其中模块 2 为负沿 (即下降沿) 捕捉方式, 采集位置传感器内圈输出信号, 标定为 0 相位; 模块 3 为负沿 (即下降沿) 捕捉方式, 采集位置传感器外圈输出信号, 标定为 1~4 相位。位置传感器的输出信号经过外围电路的比较和放大后, 如图 6 所示: 高电平为 C8051F020 所能接受的 3.3 V, 低电平为 0 V; 内圈信号对应着 0 相位, 外圈信号对应着 1~4 相位。

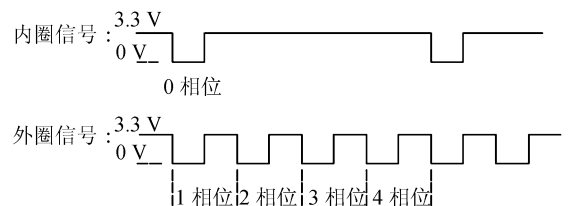


图 6 光电传感器输出信号

Fig. 6 Output signals of photoelectric sensor

根据得到的螺旋桨相位信息和 UART 模块传来的控制信息,在 PCA 中断中,把各相位对应的 PWM 控制值配置给 8 位脉宽调制器,产生相应占空比的 PWM 方波信号使电机进行加速,同时在加速的相位令 C8051F020 单片机的 P2.0 口发出一个 CMOS 高电平信号,触发高速摄像机进行拍摄,使得电机加速的同时进行拍摄。

### 4 实验结果

图 7 为高速摄像机拍摄到的桨叶图片,根据桨距角的定义:在桨叶长度 0.7 倍处的桨叶安装角即为桨距角,为了便于后面的图像处理,特别把桨叶长度 0.7 倍处涂成黑色。经过图像处理得到如图 8 所示的特征曲线,则提取出的特征曲线与水平方向的夹角即为所要测量的桨距角。

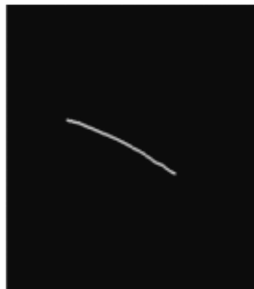
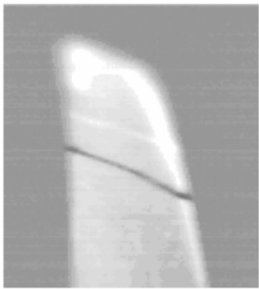


图 7 拍摄的桨叶图片 图 8 特征提取后的图片

Fig. 7 Picture of blade Fig. 8 Picture after processing

飞机实现前后、左右飞行的机理基本相同,本文选取利用实验平台模拟飞机前飞的一组实验来验证系统的可靠性。实验时,通过改变发送给微处理器的 PWM 值来改变主桨电机的转速,同时用高速摄像机拍摄下桨距角的变化过程,然后经过图像处理得到桨距角的变化值;而电机两端的电压值可以根据 PWM 的值计算出来,最后数据整理如表 1 所示:根据表 1 的数据绘制出微型飞行器桨叶的变距曲线如图 9 所示。

### 参考文献:

[1] 罗均,蒋蓁,程维明,等.国际上微型飞行器研究的进展及其关键技术[J].上海大学学报(自然科学版),2001,7(4): 293-296.

LUO J,JIANG ZH,CHENG W M,*et al.* Progress in the study of micro aerial vehicle(MAV) and the key technologies [J]. *J. Shanghai Univ. (Science and Technology)*, 2001,7(4):293-296. (in Chinese)

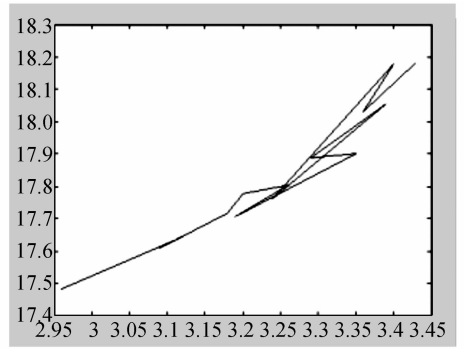


图 9 微型飞行器桨叶的变距曲线

Fig. 9 Electronic collector curve of MAV

变距曲线在电机电压为 2.9~3.2 V 时,桨距角的增加基本为线性的,说明在这一电压段飞机有很好的控制品质,电压增大到 3.2 V 后,桨距角出现波动,可能是由于电压增加,桨叶转速增大,飞机机身抖动严重,影响到桨叶拍摄的原故,这有待于以后完善。

表 1 电机电压与测量的桨距角之间的对应关系

Tab. 1 Relationship between voltage of motor and angle of pitch

PWM 值	103	105	109	111	113
对应电压值	2.97	3.03	3.15	3.22	3.27
测量的角度	17.48	17.56	17.71	17.76	17.80
PWM 值	114	115	116	117	118
对应电压值	3.30	3.34	3.36	3.39	3.41
测量的角度	17.89	17.90	18.18	18.06	18.19

### 5 结 论

为了寻找微型旋翼飞行器中的新型非对称变距机理,提出了一种与传统桨距角递推算算法不同的基于高速摄影和图像处理的桨距角测定方法。根据实验要求,开发了一个以非对称变距装置为测试主体的实验平台,通过试验证明,此方法和由此开发的实验平台在测量桨距角中是有效的,达到了预期目标。

- [2] 吕俊刚,汪家道,陈大融. 微型无人直升机旋翼操作机构设计与分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(11):1484-1487.  
LV J G, WANG J D, CHEN D R. Analysis of rotor manipulation mechanism for unmanned micro helicopters[J]. *J. Tsinghua Univ. (Science and Technology)*, 2002, 42(11):1484-1487. (in Chinese)
- [3] 万峰,范世福. 以 C8051F020 为核心的 CCD 驱动与采集系统的设计[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增):179-182.  
WAN F, FAN SH F. Development of driving and sampling circuit for CCD based on C8051F020 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.):179-182. (in Chinese)
- [4] 蒋明,杨福俊,董萼良,等. 基于高速摄像的双线性震动陀螺力学特性分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1):121-126.  
JIANG M, YANG F J, DONG E L, *et al.*. Analysis of mechanical characteristics in the double linear vibratory gyroscope using high speed photography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):121-126. (in Chinese)
- [5] 潘琢金,施国君. C8051Fxxx 高速 SOC 单片机原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002.  
PAN ZH J, SHI G J. *Theory and application of high speed SOC microprocessor C8051Fxxx* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2002. (in Chinese)
- [6] 张庆,程维明,蒋蓁,等. 微型旋翼飞行器飞行控制系统设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(6):557-560.  
ZHANG Q, CHENG W M, JIANG ZH, *et al.*. Design of a flight control system of a micro aerial vehicle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6):557-560. (in Chinese)
- [7] 张智永,范大鹏,范世珣. 光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4):681-688.  
ZHANG ZH Y, FAN D P, FAN SH X. Servo system design for E-O stabilization and track devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):681-688. (in Chinese)
- [8] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2):171-179.  
JIE D G, FAN D P, SUN L Y, *et al.*. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):171-179. (in Chinese)

作者简介:罗 均(1970—)男,重庆人,博士,副教授,主要研究方向为特种机器人、微型飞行器的机构、控制及应用。E-mail: luojun@shu.edu.cn

邢兰兴(1981—)男,山东人,硕士研究生,主要研究方向为微型旋翼飞行器变距机理和控制系统的研究。E-mail: xingili@163.com