

基于神经元 PID 控制的无人机 DSP 飞控系统设计

何清华^{1,2}, 黄斌¹, 贺继林^{1,2}, 刘银春¹, 杨敏¹

(1. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083; 2. 湖南山河智能机械股份有限公司, 长沙 410083)

摘要:航空科学技术的进步和应用领域的扩展不断推进着无人机飞控系统向着高精度、低功耗和小型化方向发展。针对小型无人机飞控系统在功耗、成本、可靠性以及集成度等方面的高要求,设计了一种基于 Freescale M56F807 型 DSP 和神经元 PID 控制策略的飞控系统,详细阐述了系统的设计思想以及硬件、软件基本结构和控制策略。采用了时域信号的取样积累平均方法,减少了算法的实现难度,提高了采样精度。对硬件设计中的关键技术进行了研究和探讨,所设计的系统具有设计精炼,可靠性高,开放性好等优点,取得了较好的实验效果。基于 DSP 的现代高速数字处理飞控系统,能够赋予无人机更大的机动性、更高的灵活性和更广泛的适用性。

关键词:神经元;PID;无人机;DSP;飞控系统

中图分类号: V249.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)02-0001-05

随着航空技术的进步和应用领域的扩展,新型控制概念的提出以及新设计方法的应用,不断推进着无人机飞控系统向着高精度、低功耗和小型化方向发展^[1-2]。这对控制算法的复杂性、计算速度、稳定性以及适应性等方面提出了更高的要求。性能指标和体积限制迫切需要新型飞控系统的研制。基于单片机和基于通用处理器是目前飞控计算机设计中最常用的两种方式。单片机运算速度相对较慢,数字信号处理能力不够,片内集成度低,IO 资源少,系统资源不足。其解决办法就是采用多单片机并行处理,但这样无疑会使系统复杂化,可靠性降低,系统之间的协调性也难以得到保证。基于通用处理器的飞控系统运算速度快,寻址能力强,但接口能力差,需要多接口器件配合,不易实现小型化^[3]。并且通用型微处理器一般采用冯·若依曼结构,指令灵活性较差^[4],这给设计流程和系统应用带来了一定的难度。针对以上系统所存在的问题,我们开发了基于 M56F807 型 DSP 的飞控系统。

1 M56F807 性能特点

Freescale 公司基于 56800 Hawk V1 内核的 16 位 DSP——M56F807,采用了 MCU 与 DSP 相结合的结构,实现了微控制器与数字信号处理器的优势互补,其主要特性如下:

80 MHz 时钟频率下处理能力可达到 40 MIPS,片内 60 k × 16 位字节程序 Flash,2 k × 16 位字节程序 RAM,8 k × 16 位字节数据 Flash,4 k × 16 位字节数据 RAM,2 k × 16 位字节启动 Flash,7 条内部总线,支持流水线操作;2 个 PWM 输出模块,每个模块可以产生 6 路独立的 PWM 信号,2-16 位可编程数据长度和数据格式主从 SPI 接口,从机最大移位频率等于总线频率,可编程选择时钟极性和相位;两个全双工/单线 13 位波特率选择收/发及中断独立 SCI 接口;片内集成 1 个符合 CAN2.0A/B 标准的 MSCAN 模块,以及 2 个带看门狗相位检测器,4 个定时器单元(每个定时器单元包括 4 个 16 位计数/定时器)^[5]。M56F807 丰富的片内外资源、较低的功耗、良好的抗干扰能力和工作稳定性以及高速的数据处理能力,使之非常适用于无人机的飞控系统。

收稿日期:2007-10-08

基金项目:湖南省科技计划重点项目(2007FJ1006)

作者简介:何清华(1946-),男,湖南岳阳人,教授,博士生导师,主要从事特种机器人、机械电子工程等研究。

E-mail:hbdfbz116@yahoo.com.cn

2 控制系统硬件设计

作为无人机“心脏”飞控系统主要用于实现从起飞到着陆全飞行过程的控制功能。无人机对飞行控制的要求主要在于:首先,飞控系统能够自主实现姿态、速度、航迹等控制;其次,在运行过程中,飞控系统需要完成从任务指令到一系列子任务和操纵指令的调度及决策;再次,在突发情况下,飞控系统要能够自动检测故障并回复到“安全”状态。飞控系统接收由地面测控站通过机载终端送来的数据和控制命令,机载检测模块测量运动参数,经过处理和解算后输出相应的控制指令到执行机构,实现无人机的飞行控制和任务设备管理。同时飞控系统将无人机的工作参数实时地传回地面测控站,为地面人员提供相关信息,以引导无人机完成飞行任务。综合考虑并结合 M56F807 的片上模块,设计了图 1 所示的飞控系统硬件平台。

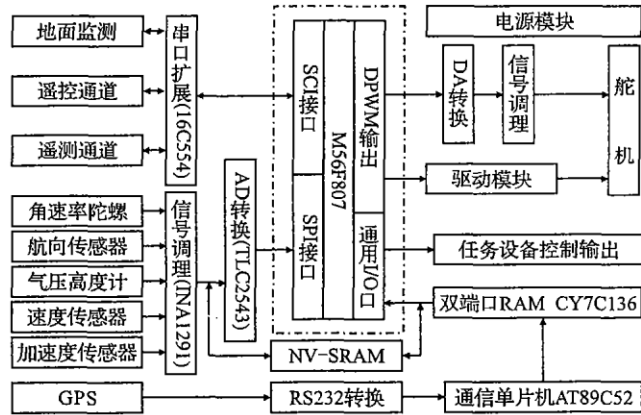


图1 系统硬件平台总体结构图

Fig. 1 Overall structure of systematic hardware platform

2.1 遥控/自主方式的切换

无人机起飞后,机上接收机将接收到的地面监测站控制指令调频信号转换成舵机控制信号来驱动舵机控制无人机的舵面到达预定高度后切换到自主飞行方式^[6]。控制方式的切换是通过判断 M56F807 的切换控制引脚电平来实现的。地面监测站将控制方式切换信号通过专用通道调频发射出去,无人机机载接收机接收信号并转换输出 PWM 信号,然后利用 RC 滤波电路将 PWM 信号转换成连续的电压信号。开关两种状态的电压分别近似为 2.5 V 和 1.5 V,如果输入信号大于 2 V 则通过比较器输出 1,输入信号小于 2 V 比较器输出 0,比较器的输出信号直接连到 DSP 的切换控制引脚,切换控制引脚的电平变化产生中断,中断服务程序对引脚的电平进行判断:如果为 1,则切换到遥控方式;如果为 0,则切换到自主飞行状态。

2.2 信号的采集与处理

信号采集模块所采集到的信号通过 3 种方式输入 DSP。角速率陀螺 MG100 输出的 3 个角速率信号,磁航向器输出的 3 个倾角信号,以及气压高度计、速度传感器和加速度传感器输出的高度信号、速度信号和加速度信号,经过信号调理并 AD 转换后,再通过 SPI 接口输入;遥控、遥测以及地面监测信号通过 SCI 输入;GPS 导航信号通过串口输入到通信单片机 AT89C52 中进行处理后,存储到双端 RAM CY7C136 中,DSP 通过通用 I/O 口直接从 CY7C136 中读取导航信号。

通常情况下信号采集处理系统的对象都为大信号,但在一些特殊的场合,采集的信号很微弱,其幅值只有几个 μV ,并且可能会淹没在大量的随机噪声中。针对这种情况,我们对前端调理电路进行了优化,利用测量放大器有效抑制共模信号(包括直流信号和交流信号),保证采集数据的精度要求,采用了时域信号的取样积累平均方法,减少了算法的实现难度。

时域信号的取样积累方法是在信号周期内将时间分成若干间隔,在这些时间间隔内对信号进行多次测量累加。时间间隔的大小取决于要求恢复信号的精度。某一点的取样值都是信号和噪声的叠加,若信号值是 S_{in} ,噪声值为 N_{in} ,则信噪比为 S_{in}/N_{in} 。若对这一采样点经 N 次采样,并对 N 个采样值线性积累平均,则信号的值将增加 N 倍,即 $S_{out} = NS_{in}$ 。但由于噪声信号的随机性,其平均输出值为 $N_{out} = \sqrt{N}N_{in}$,则累加后信号输出的信噪比见式(1)。信噪比改善见式(2)。

$$\frac{S_{out}}{N_{out}} = \sqrt{N} \frac{S_{in}}{N_{in}} \quad (1)$$

$$\frac{S_{NIRout}}{N_{NIRout}} = \sqrt{N} \quad (2)$$

若要恢复的信号逼近真实信号,理论上采样时间越短越好,重复采样次数越多越好,但实际上由于实时控制要求以及运算能力和存储能力的制约,不可能做到任意多次的重复采样。

因为角速率陀螺等传感器输入的信号幅值往往较小,因而在进行信号处理之前必须进行信号调理放大。这里选用 BURR - BROWM 公司的 INA129 小功率通用仪表放大器进行信号调理。它具有优异的精度和很宽的带宽,在增益高达 100 时,带宽达 200 kHz,其放大倍数计算公式为

$$G = 1 + 49.4/R_c \cdot (R_c \text{为可调电阻器阻值}) \tag{3}$$

2.3 外围的扩展

M56F807 型 DSP 片内带有 2 个 8 通道 AD/DA 转换模块,但在试验过程中,我们发现转换时系统的控制性能和控制质量会受到一定的影响,并且数据转换经常出错,为了提高系统的控制性能和稳定性,需要在片外扩展 AD/DA 转换模块。由系统结构框图可以看出,飞控系统需要 3 个串口与外部设备进行异步通信,而 M56F807 只有一个串口,AT89C51 也只有一个串口,不能满足控制系统需要,故采用 1 片 16C554 专用串口扩展芯片对 M56F807 进行串口扩展。为了满足对无人机飞行过程中断电保护的要求,外扩了一片 32 k 的非易失性 NV - SRAM,实时记录飞行参数,当突然断电或电压由于开油门等突然降低后又恢复正常的情况下,系统可以从 NV - SRAM 中读取断电前的参数,按照最近的飞行姿态飞行。

2.4 舵机的控制

M56F807 有 2 个脉宽调制模块,在本系统中只用到了 4 路 PWM 输出,其他通道可用于发动机转速监测等。PWM 模块具有边对齐和中心对齐两种对齐方式,其中,中心对齐方式下 PWM 周期 = (PWMCM) × (PWM 时钟周期) × 2,边对齐方式下 PWM 周期 = (PWMCM) × (PWM 时钟周期)。为了得到比较低的 PWM 频率,可对系统时钟 IPBus Clock 进行预分频。若 PWMCM 中的 LDOK 位置 1,则从 PWM 参数重载周期开始,将使用新频率,这种过程是带缓冲的。然后通过一个 15 位的通用 PWM 计数器进行计数,产生 PWM 信号,其周期由 PWMCM 寄存器决定。最后,通过后续通道交换和掩盖,极性输出控制输出 PWM 控制信号^[7]。输出脉宽由 PWM 计数值寄存器决定,其占空比计算式为:占空比 = 计数值寄存器值/模数寄存器值为了兼容现有的模拟舵机,除 4 路 PWM 输出之外,还在飞控系统中设计了 4 路模拟输出。系统 4 路 DA 通道分别对升降舵、方向舵、副翼舵和油门舵回路的控制量进行 DA 转换,经运算放大器放大后送给伺服机构。

3 控制策略与软件设计

3.1 神经元 PID 控制算法

在过程控制中,95% 以上的控制回路具有 PID 结构^[8]。PID 之所以被广泛地采用,主要原因在于它具有结构简单、鲁棒性强以及利于理解和实现等突出优点。但从飞行模型可知,无论飞机的纵向还是横向控制都具有高度非线性和时变不确定性等特点,难以得到精确的数学模型,并且传统的数字 PID 最大的弱点在于不能在线调整参数,这给飞控系统的实际应用带来了一定的困难。神经网络具有很强的非线性映射能力^[9],经过仿真实验研究验证,此时采用神经元 PID 控制可以得到较好的控制效果。理想模拟 PID 控制算式为

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \tag{4}$$

式中: $u(t)$ 为 PID 控制器的输出信号; $e(t)$ 为控制偏差; K_p 为比例系数; T_I 为积分时间常数; T_D 为微分时间常数。

因为在计算机控制系统中,只能根据采样时刻的偏差值计算控制量,所以,模拟 PID 控制算法不能直接使用,需要采用离散化方法。针对式(4)中的模拟算法,可得离散 PID 表达式:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) T + K_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \tag{5}$$

式中: $K_I = K_p/T_I, K_D = K_p T_D; T$ 为采样周期; k 为采样序号, $k = 1, 2, \dots, e(k-1)$ 和 $e(k)$ 分别为第 $k-1$ 和第 k 时刻所得到的偏差信号。

试验中首先采用的是离散 PID,但在调试过程中效果一直不好,跟踪精度比较差,多次试验以后,最终决定改用增量式 PID 控制。由式(5)可以得到控制系统的改进增量式 PID 表达式:

$$\Delta u(k) = K_p (e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \tag{6}$$
 由此,可以得到神经元 PID 控制系统的原理图如图 2 所示。

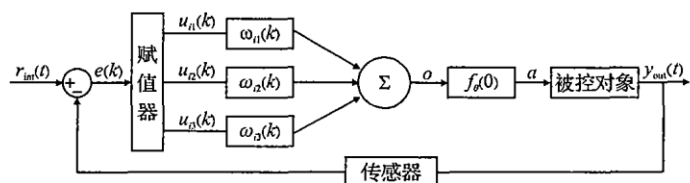


图 2 神经元 PID 控制系统原理图

Fig. 2 Principle picture of neuron PID control system

对 ω_{ij}, u_{ij} 分别赋值如下:

$$\begin{cases} \omega_{i1}(k) = K_I \\ \omega_{i2}(k) = K_P \\ \omega_{i3}(k) = K_D \\ u_{i1}(k) = e(k) \\ u_{i2}(k) = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \\ u_{i3}(k) = \Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (7)$$

神经元控制器的学习算法为

$$\omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) + \eta_{ij} e(k) u_{ij}(k) \quad (8)$$

其中, η_{ij} 为学习步长,取 $f_0(o)$ 为无偏差线性激活函数,则

$$a = f\left(\sum_{j=1}^3 \omega_{ij} u_{ij} - \theta\right) = \sum_{j=1}^3 \omega_{ij} u_{ij} \quad (9)$$

式中的 K_p, K_I 和 K_D 是事先根据经验设定的,由于 $\omega_{ij}(k)$ 能够进行自适应调整,因此神经元 PID 控制器是一个在线的自适应控制器。

3.2 软件流程

无人机飞控系统的数据采集主要包括对航向传感器、陀螺仪、GPS 以及气压高度传感器等的读数,其中陀螺仪和气压高度计的数据读取比较易于实现,航向传感器和 GPS 数据的读取则需要编写一定的代码进行数据筛选。图 3 为航向传感器和 GPS 的数据采集流程,以航向传感器 HPR 格式为例,其句子输出格式为: \$ PTNTHPR, X. X(航向), a, X. X(俯仰角), X. X(横滚角), a * hh, 其中,“\$”为数据传输起始符,“*”为数据传输终止符,“a”为测量状态符(为“N”表示定位成功,测量正常)。进入中断处理后数据采集单元首先应对数据的起始和终止进行判断,数据种类的辨识则通过“,”来区分,如第一个“,”后为航向数据。

图 4 为系统主程序流程,主要分为 4 个部分:①初始化,完成系统软硬件的初始化和参数设置;②遥控遥测,接收并执行地面监测指令,并将飞行参数和遥测数据发送回地面监测站;③自主导航,接收并处理传感器数据,进行控制解算,自主完成导航任务;④定时与中断处理,完成已规划好的相关任务。

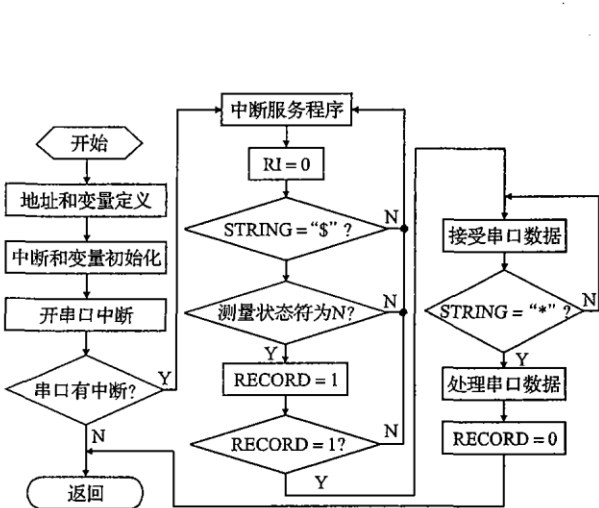


图 3 数据采集子程序流程

Fig. 3 Subprogram procedure of data collection

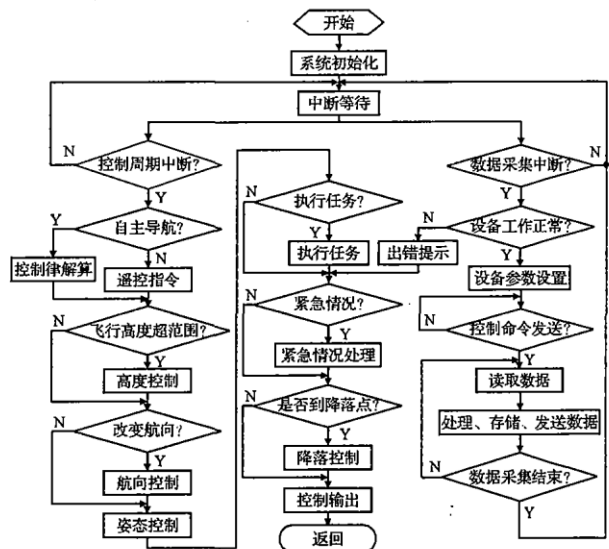


图 4 系统软件总体流程

Fig. 4 Overall procedure of systems software

4 结束语

飞控系统的各个模块已经在实验室通过调试和验证,工作状态良好,可以达到预期的控制目的。基于 DSP 的现代高速数字处理飞控系统具有较好的实时性和高性价比,较高的集成度,较广泛的应用前景,能够赋予无人机更大的机动性、更高的灵活性和更广泛的适用性。

参考文献:

- [1] Gavrlets V, Shterenberg A, Martinos I, et al. Avionics System for Aggressive Maneuvers[J]. IEEE Aess Systems Magazine, 2001, 30(9):39-45.
- [2] Jonathan M Roberts, Peter I Corke, Gregg Buskey. Low - Cost Flight Control System for a Small Autonomous Helicopters[J]. Proc 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation, 2002: 27-29.
- [3] 赵鹏, 蒋烈辉, 吴金波. 基于 AT91m55800 的无人机飞行控制系统设计与实现[J]. 微计算机信息, 2005, 21(4):97-98.
ZHAO Peng, JIANG Liehui, WU Jinbo. Digital Flight Control System Based On AT91M55800A for UAV[J]. Control & Automation. 2005, 21(4):97-98. (in Chinese)
- [4] 戴俊, 杨忠, 沈春林. 基于 DSP 飞控系统的设计和实现[J]. 机械工程与自动化. 2005, (5):39-43.
DAI Jun, YANG Zhong, SHEN Chunlin. Design and Realization of Control System Based on DSP[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2005, (5):39-43. (in Chinese)
- [5] 范寿康, 康广荃, 尹磊, 等. Freescale 16 位 DSP 原理与开发技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:3-6.
FAN Shoukang, KANG Guangquan, YIN Lei, et al. Principle and Develop Technology of Freescale 16 - Bit Digital Signal Processor[M]. Beijing: China Machine Press, 2006:3-6. (in Chinese)
- [6] 陈天华, 郭培源, 周鹰, 等. 一种自主飞行的小型无人机系统设计[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(4):55-59.
CHEN Tianhua, GUO Peiyuan, ZHOU Ying, et al. Design of the Mini - Unmanned Aerial Vehicles of Autonomous Flight[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology. 2006, 42(4):55-59. (in Chinese)
- [7] 刘银春, 何清华, 贺继林, 等. M56F807 型 DSP 在小型无人机多路舵机控制中的应用[J]. 湖南工程学院学报, 2007, 37(3):34-37.
LIU Yinchun, HE Qinghua, HE Jilin, et al. The Application of DSP56F807 to Small UAV Rudder Controller[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering. 2007, 37(3):34-37. (in Chinese)
- [8] 刘金琨. 先进 PID 控制及 Matlab 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
LIU Jinkun. Advanced PID Controls and Matlab Emulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)
- [9] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
XU Lina. The Neural Network Controls[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)

A UAV Flight Control System Using DSP Based on Neuron PID

HE Qing-hua^{1,2}, HUANG Bin¹, HE Ji-lin^{1,2}, LIU Yin-chun¹, YANG Min¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Sunward Intelligent Machinery Co., LTD, Changsha 410083, China)

Abstract: The progress of the science and technology of aviation and expansion of application are advancing the development of the flight control system of UAV in the direction of high precision, low consumption and miniaturization. A flight control system using Free Scale M56F807 DSP as processor based on neuron PID is designed, which is aimed at the demands of power, cost, reliability and integration from small UAV. The design scheme, hardware and software structure and control strategy are expatiated based on the model of certain type UAV. The difficulty of the algorithm is reduced, and the precision of sampling is improved by using the method of taking a sample and accumulating the average value of the time domain signal. The key techniques related to hardware design are investigated. The system designed has the advantage of simple structure, high reliability and opening. Better experiment results have been made. The digital processing flight control system based on DSP can give the UAV greater mobility, higher flexibility and more extensive applicability.

Key words: neuron; PID; unmanned aerial vehicle; DSP; flight control system