

基于 DSP 的高性能陀螺仪信号采集系统

扶文树, 徐晓苏, 唐 炜, 李 瑶

(东南大学 仪器科学与工程系, 江苏 南京 210096)

摘要:陀螺仪信号采集系统是捷联式惯性导航系统的重要组成部分, 设计出高性能陀螺仪信号采集系统是捷联式惯性导航系统的基本要求。系统中选取了高性能的集成电路芯片, 在 DSP 的基础上进行了简单易靠的接口电路设计和在线的误差校正, 实验结果表明该信号采集系统能满足捷联式惯性导航系统的技术要求。

关键词:陀螺仪; 信号采集; MAX195; TMS320VC5416; 通用异步串口; 误差校正

中图分类号: TP273 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-8829(2006)08-0011-03

High-Performance Gyro's Data Acquisition System Based on DSP

FU Wen-shu, XU Xiao-su, TANG Wei, LI Yao

(Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The gyro's data-acquisition system is an important part of strapdown inertial navigation system. It is essential for strapdown inertial navigation system to design a high-performance gyro's data acquisition system. In the system, on the basis of DSP and selected high-performance ICs, easy and reliable interface circuit is designed and online error-correcting is performed. The experimental result indicates that the system designed can satisfy the technical demand brought forward by strapdown inertial navigation system.

Key words: gyro; data-acquisition; MAX195; TMS320VC5416; UART; error-correcting

陀螺仪是捷联式惯性导航系统中最重要敏感元件之一, 用来测量基座(或运载器)的转角或角速度。陀螺仪工作在速率状态, 采用高精度的模拟再平衡回路拾取其敏感的速率信号, 对速率陀螺仪而言, 该回路中的电流与陀螺仪所敏感角速度成正比。在捷联式惯性导航系统中, 陀螺和加速度计被直接安装在载体上, 因此对捷联系统的陀螺仪要求很高, 一方面要求其在恶劣的环境下正常工作; 另一方面对其数据读出装置在实时性、动态范围以及转换精度上提出了更高的要求^[1]。因此, 设计出高性能的陀螺仪信号采集系统, 对模拟平衡回路中的电流信号进行 A/D 转换, 是捷联式惯性导航系统设计的一个很重要关键技术。

1 系统的硬件组成

图 1 是捷联式惯性导航系统中的陀螺仪信号采集系统总体框图, 系统的输入是 3 个陀螺仪分别输出的电流信号 i_1 、 i_2 和 i_3 , 用以表示载体纵摇、横摇、航向的角速度; 陀螺仪数据经采样处理后, 以 RS-422 标准的

通用异步串口形式发送。笔者介绍的采集系统的主要是由 3 个信号处理通道、DSP 最小系统组成和高精度电源组成。

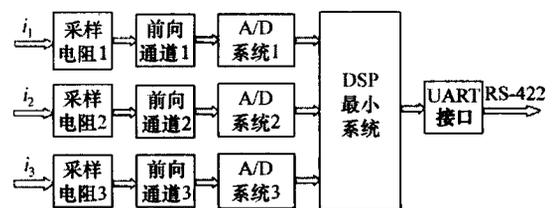


图 1 系统的总体框架

在保证陀螺仪正常工作的情况下, 可将精密采样电阻的阻值取得足够大, 这样信号在前向处理通道中就不需要比例放大环节, 从而消除由于比例放大带来的误差。图 1 的前向通道中含有由超精密的运算放大器构成的二阶低通滤波器和电压跟随器, 其作用分别是滤除陀螺仪信号中的高频噪声和隔离前级对后续单元的影响。A/D 系统由 16 位 A/D 转换器 MAX195 和高精度的参考电压源组成。MAX195 具有 $0.4 \times 10^{-6}/\text{C}^{\circ}$ 的温度漂移系数^[2], 这是大多数 A/D 转换器所不能比拟的。TI 公司的 TMS320VC5416 和 Flash(用于存储用户程序)构成的 DSP 最小系统充当信号采集系统的 CPU。用于发送数据的通用异步串口是利用 TMS320VC5416

收稿日期: 2005-10-22

作者简介: 扶文树(1978—), 男, 湖北省荆州人, 博士生, 主要研究方向为测控技术及计算机辅助工程。

的片上资源进行设计而得。系统中的数字地和模拟地在低噪声处单点相接,以降低数字系统对模拟系统的干扰。系统对外的数字接口均采用了光耦隔离技术,以减少外界串入的干扰。

2 系统中的接口电路设计

以最少的芯片、最简单的电气连接设计出同样功能的电路是硬件设计的原则之一,遵循这一原则设计的系统可靠性好、成本低、体积小。在采集系统的设计中本着这一原则,充分利用了 TMS320VC5416 的多通道缓冲串口 (McBSP) 的强大功能。McBSP 是一种同步串口,其结构如图 2 所示,包括数据通路和控制通路部分,并通过 6 个引脚与外部器件相连接。各引脚功能分别如下^[3,4]:DX 为发送引脚,与 McBSP 相连接发送数据;DR 为接收引脚,与接收数据总线相连接;CLKX 为发送时钟引脚;CLKR 为接收时钟引脚;FSX 为发送帧同步引脚;FSR 为接收帧同步引脚。在时钟信号和帧同步信号的控制下,接收和发送通过 DR 和 DX 引脚与外部器件直接通信。数据发送过程为首先将数据写入数据寄存器 DXR[1,2];然后,通过发送移位寄存器 XSR[1,2]将数据经引脚 DX 移出发送。类似地,数据接收过程为通过引脚 DR 接收的数据移入接收寄存器 RBR[1,2],然后再复制到 DRR[1,2],最后通过中断将数据读出以供进一步处理。

过引脚 DR 将数据移入接收寄存器 RBR[1,2],然后再复制到 DRR[1,2],最后通过中断将数据读出以供进一步处理。

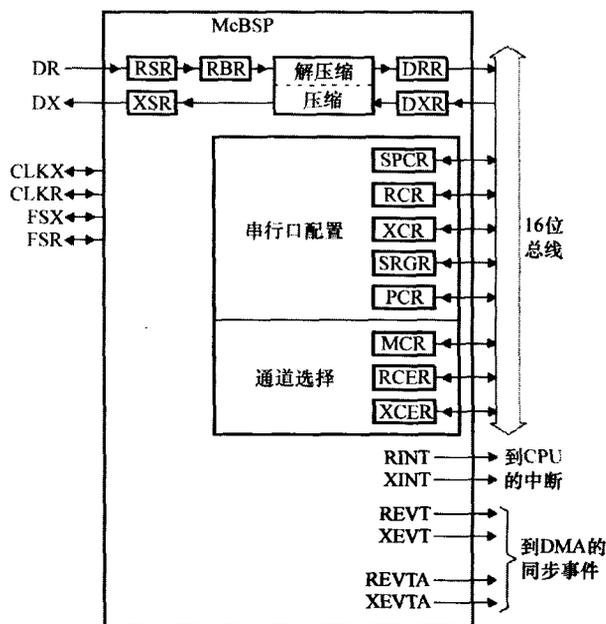


图 2 McBSP 的内部结构

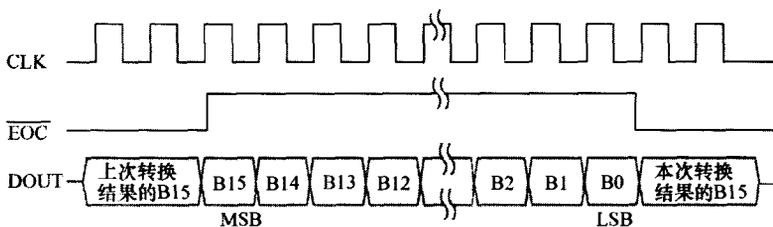


图 3 MAX195 的数据输出时序

2.1 MAX195 和 TMS320VC5416 的接口设计

MAX95 的数据转换和转换结果输出可以异步方式进行,也可以同步方式进行,图 3 是通过实验得到的同步工作方式的数据输出时序,转换和数据输出的时钟均由 CLK 引脚输入,在 EOC 引脚信号有效期间,转换结果的各数据位在时钟信号 CLK 的下降沿上由 DOUT 引脚输出,该时序恰好与 McBSP 接收部分的一种工作方式吻合。因此 MAX195 与 TMS320VC5416 的数据通信接口非常的简单,其电气连接如图 4, MAX195 数据接口部分的高电平是 +5 V,而 TMS320VC5416 的 I/O 部分的高电平是 +3.3 V,需要利用电平转换芯片 74LVC244 来实现 +5 V 到 +3.3 V 的转换。在 McBSP 的控制寄存器中将接收部分的同步帧 BFSR 设置成高电平有效、BCLKR 的下降沿接收数据、接收数据长度为 16 位,在同步帧 BFSR 和时钟 BCLKR 的作用下,MAX195 输出的串行数据就可以通

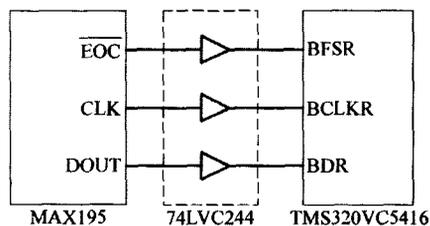


图 4 MAX195 和 TMS320VC5416 的接口

2.2 RS-422 标准的通用异步串口 (UART) 设计

陀螺仪的信号采集系统最终要将采得并处理过的数据发送到上位机,以进行捷联式惯性导航的姿态解算。在大多情况下,陀螺仪信号采集板的安装位置与进行姿态解算上位机有一定的距离,为保证数据传输的可行性,可采用 RS-422 标准的通用异步串口 (UART) 来发送数据。TMS320VC5416 型的 DSP 没有像大多数单片机一样提供片上的 UART,通常情况下要采用接口芯片来设计,但这些设计方案电气连接比较复杂,一般需要逻辑控制。实际上可以利用 McBSP

的发送端口来模拟 TTL 电平的 UART,再利用 MC3487 将 TTL 电平转换成差分的 RS-422 电气标准,这样就成了一个具有数据发送功能的 RS-422 标准的 UART。

图 5 是 UART 的电气连接示意图,数据从 MC3487 的 Y、Z 引脚上以 RS-422 标准输出。UART 的波特率通过同一个 McBSP 接收部分的引脚 CLKR 上的输入时钟和采样率发生器 (SRGR1、SRGR2) 得到,将引脚控制寄存器 (PCR) 的第 7 位设置为 1、采样率发生器 2 (SRGR2) 的第 13 位设置为 0 就使得波特率的时钟由 CLKR 提供,该时钟也是 MAX195 的工作时钟,将该时钟除以采样率发生器 1 (SGR1) 的 7~0 中所设定的系数就得到了 UART 的波特率。McBSP 发送数据位的顺序是先发高位,发送的数据长度 8 位、12 位、16 位等可选择,而 UART 的顺序是先发低位且数据位是 8 位,因此要先将欲发送数据的二进制码以 8 位为单位由低到高进行截断,不足 8 位的补 0,然后将 8 位二进制码倒序。在发送控制寄存器 1 (XCR1) 中将发送数据的长度设置为 12,发送数据二进制格式为 110XXXXXXXX1 (X 表示发送的数据位),将其以准备好的中断方式写入发送数据寄存器 (DXR1) 中,这就完成发送数据的工作。

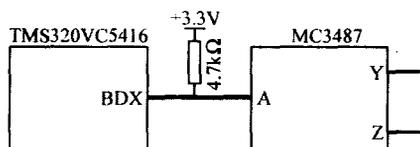


图 5 RS-422 标准 UART 的硬件结构

3 信号采集系统中的误差校正

从工程应用的角度出发,系统的各个模块应该具有互换性,这对于高精度的陀螺仪信号采集系统尤为重要。这就要求制造出来的信号采集系统在模块的零位、比例系数、线性度等指标上的差异性尽量小,这种差异性实际上是信号采集系统中的硬件误差导致的。如果能将信号采集系统的误差进行补偿校正,就能达到板间差异足够小的要求。

A/D 系统一般存在失调、增益、线性、重复性 4 种主要的误差^[5]。其中重复性误差指的每次上电后,系统对同一个模拟量的转换结果存在差异,这种差异是很难通过软件校正的,但由于选用了高精度的运算放大器,MAX195 上电后能自动校准,所以重复性误差对系统的影响可忽略不计。图 6 是信号采集系统的转换曲线。0 号曲线是理想的线性转换曲线,它的端点为坐标原点和满刻度点的线段,在这样的一种理想的转换关系中,实际上仍然存在 $\pm 1/2$ 量化单位的量化误差,这是因为无论 A/D 转换器的分辨率有多高,总会受到 A/D 转换器位数的限制;1 号曲线含有失调误

差,表明当前输入模拟量为零值时,转换的数字量不对应于零值(可能在理想函数之上,也可能在其下),它与理想转换函数之间总是相差一个固定的量;2 号曲线含增益误差,是一条通过坐标原点但不通过满刻度点的直线,这说明了某种原因使得 A/D 转换器实际上的转换函数按比例(决定于增益)偏离了原来的理想关系曲线;3 号曲线含非线性误差,严格地讲,运算放大器和 A/D 芯片都存在非线性,这是由制造工艺导致的,正是这种非线性促成了 A/D 系统的非线性误差。以上的 3 种误差同时并存,所以可以认为 A/D 系统的实际输入输出转换关系是由这 3 种曲线合成的,只要将 A/D 转换系统转入输出曲线的方程准确地拟合出来,将该方程用到的软件设计中,就能对 3 种误差进行校正。

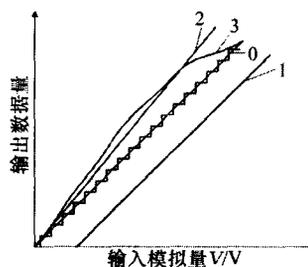


图 6 A/D 系统的转换曲线

拟合出曲线方程的步骤如下:将高精度的 6 位半数字电压表和信号采集系统分别与 PC 机的 COM1、COM2 相连(信号采集系统与 COM2 之间有电平转换),利用串口接收软件同步的接收来自数字电压表的测量数据(y)和来自信号采集系统的测量数据(x);在 MAX195 的量程内等间隔的选取 30 个点,每个点测 30 s 后取平均值,可得 30 个点的坐标(x_i, y_i)($i=1, 2, \dots, 30$);在 MATLAB 中利用 $C = \text{Ployfit}(X, Y, n)$ 函数进行拟合,其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_{30}), Y = (y_1, y_2, \dots, y_{30}), C = (c_0, c_1, \dots, c_n)$,取 $n=5$,可得 $y = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + c_5x^5$;为获得更高精度的拟合,可将曲线分为 4 段进行拟合。TMS320VC5416 有 32 位浮点运算能力,能以足够高的精度和速度进行曲线方程中的乘加运算和幂运算。

4 结束语

高性能的元器件、简易的接口电路和在线的误差校正是陀螺仪信号采集系统精度高、可靠性好和调试方便的关键所在。图 7 是一路实验数据的曲线,系统的输入由 2.5 V 的高精度参考电压源 AD780BN 提供,用 6 位半的数字电压表测得输入电压的均值是 2.499 97 V,图 7 中数据的均值是 2.500 05 V,均方差是 39 μV ,可见该数据采集系统达到了中等精度的捷

(下转第 20 页)

在 PC 机上用 VisualC++ 编程。开辟 2 个线程,主线程处理人机交互事件,子线程创建 1 ms 定时器,并在定时中断中完成数据处理,见图 6。PC 机的运算速度足够快,基本上不用考虑算法的时间消耗。下面说明几个关键代码。

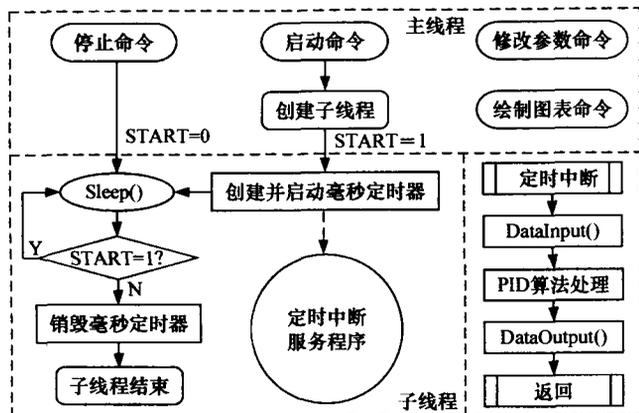


图 6 PC 机软件结构框图

(1) 主线程由 MFC 主程序自动创建,产生子线程 m_thread 的代码为:

```
CWinThread * m_thread = NULL;
if(! m_thread) {
    m_thread = AfxBeginThread( DoCtrl,0); //启动;子线程回调函数是 DoCtrl()
    START = true; //置子线程启动标志
}
```

(2) 在子线程中创建并启动 1 ms 定时器的代码:
timerID = timeSetEvent (period, timerRes, TimerProc, (DWORD) this, TIME_PERIODIC); //创建并启动 1 ms 定时器 timerID;TimerProc 是定时中断服务程序名

(3) 定时中断服务程序完成数据交换和处理任务。PID 算法程序例为:

```
void PASCAL TimerProc ( UINTwTimerID, UINT msg,
DWORD dwUser, DWORD dw1, DWORD dw2) {
    DataInput( ADResults); //由数据交换卡读数据,存入 ADResults 数组
    PID = DataProcessing(); //依 PID 算法求解控制量 PID
    DataUpdate(); //更新数据并保存
    PWM = CurrentLoop( PID); //经电流环程序计算得最终输出量 PWM
    DataOutput( PWM); //向数据交换卡写数据
}
```

4 结束语

本系统软件开发时用 PC 机的高级语言进行,独立于 DSP 系统,并可进行在线调试,算法成熟后移植到 DSP 应用系统。笔者给出的实例中,数据交换卡与 PC 机通过并口连接,其优点是不必开机箱,接口方便,

适用于数据交换量不大的场合。对于高速大批量数据交换的应用,可以采用基于 PCI 等的高速接口设计。

参考文献:

- [1] 张雄伟,等. DSP 集成开发与应用实例[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [2] 张庆辉,等. 基于 Windows 的精确软件定时研究[J]. 测控技术,2002,21(11).
- [3] 张凯,等. RTLinux 构建的磁悬浮轴承控制器实验平台[J]. 电子技术应用,2003,(6).
- [4] Gadre D V. 并行端口编程[M]. 韩永斌,等译. 北京:中国电力出版社,2000.
- [5] IDT7134 data sheet[Z]. Integrated Device Technology, Inc., 1999.
- [6] TMS320F240 reference[Z]. TI,1999.

(上接第 13 页)

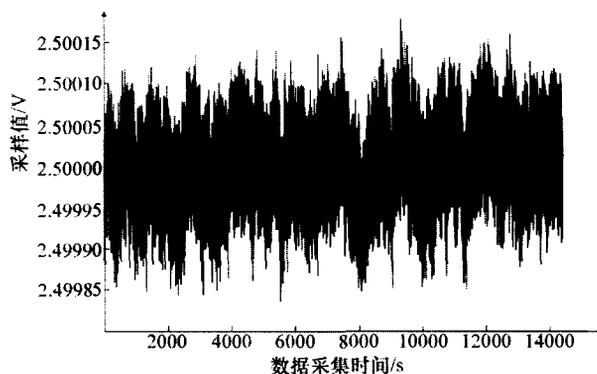


图 7 系统输出的数据曲线

联式惯性导航系统中规定的性能指标。目前该系统已经在某型捷联式惯性导航系统的样机中使用,运行情况良好。

参考文献:

- [1] 钱卫忠,万德钧. 单片机数据采集浮点放大技术在陀螺信号转换中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置,1999,(6):22-25.
- [2] 16-bit,85 ks/s ADC with 10μA shutdown[Z]. MAX-IUM, 1998.
- [3] 清源科技. TMS320C54x DSP 硬件开发教程[M]. 北京:机械工业出版社,2003:195-198.
- [4] TI TMS320C54XX DSP reference set volume 5: enhanced peripherals[Z]. Texas Instrument,1999.
- [5] 江孝国. 高精度 A/D 转换器应用中的误差调[J]. 电子测量技术,1997,(3):1-5.