

# 一种基于 DSP 的宽范围高精度实时数据采集系统的设计

吴峻 副教授 东南大学仪器科学与工程系[210096]  
渠慎征 硕士 东南大学仪器科学与工程系[210096]  
万德钧 教授/博导 东南大学仪器科学与工程系[210096]

**摘要** 在船用挠性捷联航姿基准系统中,如何保证大动态范围条件下的动调陀螺仪数字化线路的准确性和实时性是其关键。本文详细介绍了一种基于 TMS320VC5409 DSP 的大动态范围高精度数据采集系统,其动态范围优于 140dB,其测量精度满足了航姿基准系统的数据采集要求。

**关键词** 仪器仪表技术 DSP 动态范围 数据采集  
**中图分类号** U666.12

## 0 引言

在船用挠性捷联航姿基准系统中,陀螺仪力反馈回路中的电流与船体运动的角速率成线性关系,对力反馈回路中的电流进行测量可以获得船体运动的角速率。由于运动船体的角速率变化范围很大,一般为  $\pm 8.33 \times 10^{-6} / \text{s} \sim \pm 30^\circ / \text{s}$ ,这样,要求陀螺仪信号数据采集系统具有较大的动态测量范围(约 131dB)。此外,由于系统的主要功能是向舰载武器装备实时提供船体相对地理坐标系的姿态基准信息,要保证这些基准信息的精度和实时性就要求该数据采集系统必须具备极高的数据采集精度和实时性。针对上述特点,本文设计了一种基于 DSP 的宽范围高精度实时数据采集系统,该系统较好地满足了工程要求。

## 1 系统设计方案

该数据采集系统的中央控制单元采用 TI(德州仪器)公司的高性能定点数字信号处理器 TMS320VC5409,处理器单周期指令时间只有 10ns,每秒可完成 100MIPS 操作。TMS320VC5409 的硬件资源丰富且配置灵活,其地址总线为 23 位,程序寻址范围可达 8M,数据总线 16 位,分开的程序、数据和 I/O 空间可以设置不同的等待周期,芯片内部具有 32K 字的 RAM 可根据需要映射在程序或数据空间,三路多通道缓冲器行口(McBSPs)和 HPI 接口的引脚均可指定为 I/O 引脚,从而具备极

强的 I/O 控制功能。TMS320VC5409 具有丰富的指令,并可使用 C 语言进行开发,高效的流水线操作和灵活的寻址方式使处理器运算能力得到充分的发挥,特别适合于数字信号的处理。

基于 TMS320VC5409 的 16 位宽范围高精度实时数据采集系统的结构如图 1 所示。由于捷联系统的陀螺通道有 3 路,考虑实时性等因素,采用 3 路并行工作方式,其中虚线框内为一路信号处理的流程,其余两路与此相同。

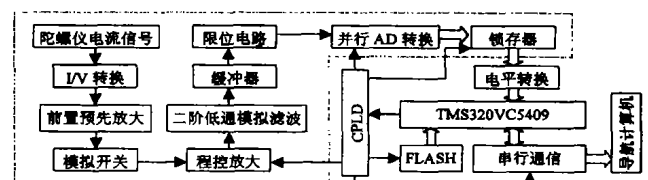


图 1 数据采集电路原理框图

为解决陀螺仪信号测量动态范围宽的问题,信号前置通道中采用预先放大与程控放大相结合的方法。微弱的陀螺仪信号先经预先放大器放大到一定的倍数,再进行程控放大,程控放大的放大倍数由 DSP 根据上次的采样值决定。两次放大倍数之积就构成陀螺仪信号测量结果的“阶码”,而 A/D 的转换结果则为“尾码”,即形成浮点放大。采用 BURR-BROWN 公司的程控放大器 PGA204,可以得到 1、10、100、1000 的放大倍数,而控制只需要 DSP 的两根 I/O 引脚就可完成。采用 Analog Devices 公司的 AD976A 型转换器来完成陀螺仪信号“尾码”的转换。

根据工程应用,陀螺仪的输出信号中含有多种频

率成分的干扰信号,必须采取滤波以减小信号中的干扰噪声。由计算可知,要使  $\omega \geq 140\text{Hz}$  的噪声信号衰减至 60dB 以下时,应采用 6 阶以上的低通滤波器,但此时会带来较大的过滤时间。为此采用二阶模拟有源低通滤波与 DSP 数字滤波相结合的方法,DSP 强大的计算能力可以保证滤波的实时性。同时,数字滤波可以得到严格的线性相位,而避免了模拟滤波器的电压漂移、温度漂移和噪声等问题,从而也保证了信号处理的精度。

姿态更新的周期为 10ms,因此采集的数据每 10ms 需发送一次。该发送过程由 DSP 接到发送中断时,通过串行通信来完成,此处选择 EXAR 公司的 ST16C550 异步通信芯片完成串并转换,由于其内具有 16 字节的发送/接收 FIFO,因此在每次发送数据时只需要 DSP 将 3 个字(三个通道)的有效数据连续写入 FIFO 即可,随后就可以进行下次的转换。这种流水线式的工作方式,使整个采集系统的工作速度并不因为串行数据的发送而降低。由此可见,在较高的采样频率下,一个数据发送周期内可以实现陀螺仪信号的多次采样。显然,可以灵活运用多种数字滤波方法对多个采样值进行平滑处理,以减小输入信号的噪声。

整个数据采集系统的程序固化在 FLASH 存储器内,每次上电时,DSP 首先将程序从 FLASH 内下载到片内 RAM,由于 DSP 可以零等待访问片内 RAM,程序加载到片内 RAM 执行,可以保证 DSP 全速运行,同时也增强了系统的可靠性。

## 2 A/D 转换器外围线路设计

AD976A 是 16 位高速、低功耗、单电源的并行逐次比较式模数转换器。它利用激光修正输入电阻以提供  $\pm 10\text{V}$  的双极转换输入范围。高达 200kSPS

的转换速率、并行接口、在片时钟以及内部电容阵列,使得 AD976A 不需要附加的外电路去执行采样/保持功能,就能够直接与数字信号处理器和微控制器相连。为了使三路 A/D 转换共用 DSP 的数据总线,这里将 AD976A 与 74HC574 数据锁存器相连,以起到相互隔阻的作用。

通过  $\overline{\text{CS}}$  和  $\text{R}/\overline{\text{C}}$  两个信号,可控制 AD976A 工作于两种转换模式。一种是将  $\overline{\text{CS}}$  引脚一直钳制为低电平,转换由  $\text{R}/\overline{\text{C}}$  信号控制。这种模式中,若  $\text{R}/\overline{\text{C}}$  保持低电平至少 50ns,就将启动一次转换,一旦启动转换, $\overline{\text{BUSY}}$  信号将变低并一直保持为低电平直到转换完成且输出寄存器中的数据得到更新为止。另一种转换模式中,利用  $\overline{\text{CS}}$  控制转换过程和输出数据读取。这种模式下  $\text{R}/\overline{\text{C}}$  信号应该在  $\overline{\text{CS}}$  脉冲(50ns 宽)的下降沿之前至少 10ns 变为低电平。一旦这两个信号都为低, $\overline{\text{BUSY}}$  将变低并保持到转换完成。在最长为  $4\mu\text{s}$  的时间之后, $\overline{\text{BUSY}}$  将返回高电平,并且在 ADC 的输出口上的并行数据将有效。为了方便起见,这里采用第一种转换模式,其中一路 A/D 转换电路连接如图 2 所示。

通过 DSP 内部的串口控制寄存器 SPCR0 和引脚控制寄存器 PCR0 将 DSP 的多通道缓冲串行口对应的引脚配置为通用目的 I/O 引脚,之后就以 DX0 作为启动 A/D 转换的控制线,由于 TMS320VC5409 的单指令周期为 10ns,每次启动 A/D 转换时,只需要将 DX0 引脚置低 5 个周期即可,控制相当简便。DR0 作为转换状态标志以供 DSP 进行查询,当 PCR 引脚控制寄存器内的 DR-STAT 位为“1”,即  $\overline{\text{BUSY}}$  信号为“1”时,则说明一次转换已经完成,数据锁存器里的内容有效可读。从图 2 可知,数据锁存器映射在 DSP 的 I/O 空间,由 A13、A12 作为地址译码线,其逻辑变换由 XC9536 完成,当锁存器的  $\overline{\text{OE}}$  端为低时,该通道的有效转换数据就被读入 DSP。DSP 则根据读入的数据大小通过 CLKX0 和 FSX0 引脚来控制前置信号调理中的程控放大器的放大倍数。转换时序如图 3 所示。

其余两个通道的控制方法和工作时序与上面所述的通道 0 基本相同,只是对应的控制寄存器为 SPCR1、PCR1 和 SPCR2、PCR2,控制线也为对应的引脚线。

由于 DSP 在上电复位时,XF 引脚装置为高电平,故可将 XF 作为控制线,在系统上电复

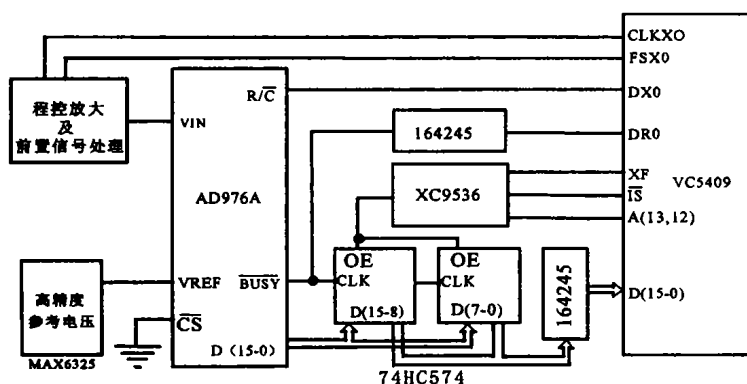


图 2 基于 DSP 的 16 位并行 A/D 转换电路原理图

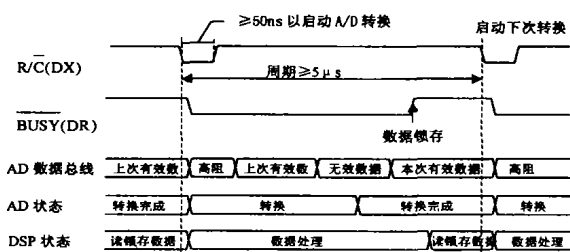


图 3 DSP 及 AD976A 工作时序

位时将前置信号调理中的模拟开关接地,以确保程控放大器不会输出过高的信号。另外,由于 TMS320VC5409 的 I/O 工作电压为 3.3V,其 I/O 电平也是 3.3V 逻辑电平,系统设计时,还应注意各种电平之间的转换,本文用 IDT74FCT164245 来完成这一任务。

### 3 系统件设计

系统软件主要由 Bootloader 下载程序、系统初始化及接地校零、数据采集及滤波处理和中断发送等几个模块构成。软件流程框图如图 4 所示。

系统开始上电时,首先执行 Bootloader 下载程序,将目标程序从外接的 FLASH 存储器中加载到 DSP 片内 RAM 中。系统初始化程度将设置 DSP 串口控制寄存器、引脚控制寄存器、中断控制寄存器、软件等待周期及 ST16C550 的相应寄存器等。接地校零则是在正式采样前,将模拟开关闭合到接地端,然后启动 A/D 进行多次转换,将采集到的数据进行处理后存放在零点漂移寄存器中,正式采样时将模拟开关接到 I/V 转换模块的输出端,然后将此时 A/D 转换的数据减去零点漂移寄存器内的数据,从而消除陀螺仪零点常值漂移的影响。

数据采集模块负责启动三路 A/D 转换,读取采样值。有效数据读取到 DSP 内部后,DSP 结合“阶码”和对应的零点漂移值修正采样值,并决定最新的“阶码”,然后启动下一次转换,在 AD976A 进行下一次转换的时候,DSP 就进行滤波处理。为得到严格线性相位,本系统中采用有限冲击响应(FIR)滤波器。又由于姿态更新周期为 10ms,这期间 DSP 和 ADC 能进行多次数据采集,为了减小测量过程中产生的随机噪声,对多次陀螺仪信号的采样值进行平滑处理。最后,当 DSP 收到 10ms 周期的触发信号时,就将最新的经平滑处理的数值发送给导航计算机。

由于有三个采集通道同时进行工作,软件设计时应注意流程的安排,以使系统协调稳定的工作。

考虑到程控放大器在放大倍数改变时需要一定的稳定时间(视放大倍数而定),因此在需要更改程控放大倍数时,设置计数器 T,在 T 的值不为零时,FIR 滤波器的输入值由最优估计值代替,而不使用 PGA 未稳定时的采样值。当然,由于在通常情况下,船体摇摆的加速度很小,并不需要放大倍数作频繁的变化,从而也不影响系统的实时性。

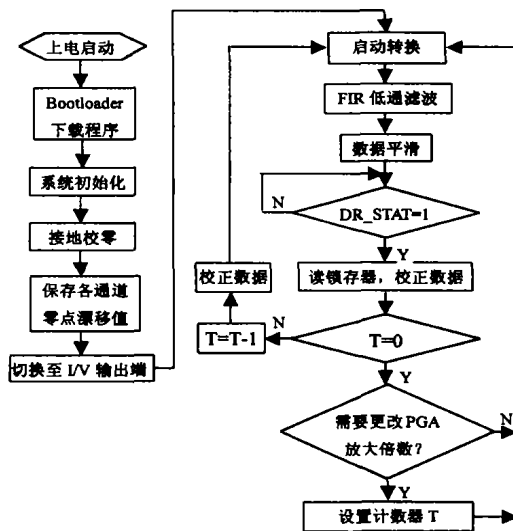


图 4 软件流程框图

### 4 系统性能分析

首先讨论系统的动态采集范围。由于 AD976A 的最大非线性误差为  $\pm 3\text{LSB}$ ,故能保证转换结果的前 14 位数为精确有效值,又满量程输入为 10V,程控放大器的最大放大倍数为 1000 时,此时陀螺仪信号采集系统的最小分辨数值 LSB 为

$$\text{LSB} = \frac{V_{\max}}{G_{\max} \times 2^N} = \frac{10}{1000 \times 2^{14}} = 0.61\mu\text{V}$$

式中,  $V_{\max}$  为满量程输入电压值;  $G_{\max}$  为程控放大器的最大放大倍数。

则动态测量范围 DR 为

$$\text{DR} = 20 \lg(V_{\max}/\text{LSB}) = 20 \lg(10 \times 1000/0.61) = 144.3\text{dB}$$

通过采用瞬时浮点放大电路,扩大了系统的动态测量范围,大大减小了信号转换的量化误差,有效地解决了陀螺仪信号动态测量范围宽的问题。

AD976A 每完成一次转换至少需要  $5\mu\text{s}$  的时间,这对单指令周期为 10ns 的 TMS320VC5409 来说,每次 A/D 转换期间可以执行 500 条指令(实际应用中,由于 DSP 有多条并发执行指令,实际执行的指令数

远大于 500 条),能够完成数字滤波和其它相关的任务。因此,三个通道并行运行时,每个通道的采集速率大于 66.7kSPS,本系统具有很好的实时性能。

为保证测量精度,系统设计时在多个方面采取了措施:前置信号处理中均选用高精度、低漂移、低噪声、高频响的运算放大器;电阻用低温漂的精密电阻;A/D 转换器的参考电压选用 MAXIM 公司的 MAX6325 芯片,其温度漂移在  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  以内。软件方面则有接地校零、多种形式的数字滤波等。

## 5 结 语

从上面的分析可知,该陀螺仪数据采集系统具

有动态范围大、实时性能好、测量精度高的优点,满足了捷联航姿基准系统的要求。该技术还可推广应用到其他信号变化范围大、实时性要求高的数据采集系统中。

## 6 参 考 文 献

- 1 张雄伟,曹铁勇. DSP 芯片的原理与开发应用. 北京:电子工业出版社,2000
- 2 TMS320C54x DSP CPU and Peripherals Reference Set. Texas Instrument, 2000
- 3 TMS320VC5409 DSP Data Sheet. Texas Instrument, 2000
- 4 AD976A Data Sheet. ANALOG DEVICES Inc, 1999

# Design of Real-time Data Acquisition System with High Precision and Wide Dynamic Range Based on DSP

Wu Jun, Qu Shenzheng and Wan Dejun

**Abstract:** In the marine strapdown Attitude and Heading Reference System(AHRS) based on the Dynamically Tuned Gyroscope(DTG), the key technique is how to ensure the accuracy and real time performance of ADC for DTG in a wide dynamic range. Application of Data Acquisition System based on TMS320VC5409DSP with 140dB dynamic range and high precision can fulfill the data acquisition of AHRS very well.

**Key words:** Instrument and meter technology DSP Data acquisition Dynamic range

Marintec China 2003 专题报道

## 高级海事论坛聚焦中国发展战略

[本刊讯]在中国国际海事会展期间同时举办的高级海事论坛 12 月 1 日下午在上海东锦江索菲特大酒店拉开序幕。首次举办的“采购专场”成为本次论坛的新亮点。中国船舶工业集团公司、中国船舶重工集团公司和中国船舶工业贸易公司的有关负责官员应邀为嘉宾讲述了他们在船用设备采购方面所采取的策略、标准和要求,并与欧洲和亚洲的同行共同进行探讨。

中国船舶工业贸易公司副总经理楼吉威阐述了船用设备和原材料的“集中采购”策略。今年年初,集团公司根据中央和国务院领导的重要批示精神,提出了公司“五三一”发展战略目标。即在 2005 年,2010 年进入世界造船集团“五强”、“三强”的基础上,再经过 5 年的努力,到 2015 年力争成为世界第一造船集团,从而推动我国成为世界第一造船大国。同时,集团公司投资巨资建设上海的“长兴工程”和广州的“龙穴工程”,从而使上海成为世界最大的造船基地;广州成为我国华南地区最大的造船基地。到 2015 年,集团公司要实现 1200 万吨的造船能力。目前,原材料、船用设备采购渠道混乱,这不仅直接导致造船成本的增加,而且难以与优秀的设备制造商进行长期、稳定和多方面的合作。因此必须对公司系统的物资设备采购体制进行重大改革,实行“集中采购”。通过集中采购,达到提升集团公司管理水平,降低采购成本,提高企业经济效益的目的。

在题为“世界海事业在新世纪所面临的挑战和对策”的主题报告会上,上海市人民政府副市长严隽琪阐述了上海新一轮发展给海事业带来了新的机遇;中华人民共和国国防科学技术工业委员会副主任张广钦阐述了新世纪新阶段,我国船舶工业面临着历史性的发展机遇。我国将在 2008 年、2010 年举办奥运会、世博会,北京、上海、青岛等城市新的整体规划带来了一些船厂调整搬迁的机会,这是我国造船企业加快现代化改造,实现体制、机制创新,高起点创建世界一流造船企业,赶超世界一流水平的重大机遇。中华人民共和国交通部水运司司长苏新刚在报告中说,中国政府高度重视基础设施在海运发展中的重要作用。我国现有港口 1460 个,其中万吨级以上深水泊位 835 个,对外开放港口 130 个,每年接纳世界 100 多个国家和地区的船舶 6 万多艘。中国国际海运船队为 3700 多万载重吨,列世界第五位。2002 年,全国港口货物吞吐量 28 亿吨,其中外贸货物吞吐量 78 亿吨。我们的总体发展目标是,到 2010 年,沿海港口总吞吐能力达 30 亿吨,集装箱码头总吞吐能力达 1 亿标准箱。到 2020 年,沿海港口吞吐能力达 44 亿吨,集装箱码头总吞吐能力达 1.7 亿标准箱。这些信息为到会嘉宾描述了一幅我国造船与航运事业的宏伟蓝图,让与会者对中国海事业的发展方向和策略加深了认识。