

高速高精度超声波流量计数字处理模块的设计

韩宇杰¹, 杨 舟¹ 王 红¹, 杨士元¹, 范顺杰²

(1 清华大学 自动化系, 北京 100084; 2 西门子中国研究院, 北京 100102)

摘 要: 阐述了一种基于 DSP 的高速、高精度超声波流量计的数字处理模块的设计方案, 并以 TMS320C6713 DSP 为例, 从波形的高速收发、高精度的时序协调、控制参数的配置等几方面展开详细介绍并予以实现。实测证明, 该方案能够在 75 MHz 的波形数据发送频率下使流量计算的时间误差达到纳秒级精度的要求。

关键词: 超声波流量计; DSP; 高速; 高精度

中图分类号: TP274. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)12-0145-04

Design of High-speed, High-precision Digital Signal Processing Module in Ultrasonic Flowmeter

HAN Yu-jie¹, YANG-Zhou¹, WANG Hong¹,
YANG Shi-Yuan¹, FAN Shun-jie²

(1 Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 Siemens China, Beijing 100102, China)

Abstract: As a core of the ultrasonic flow meter which could control, This article describes a DSP-based digital signal processing module design of high speed, high precision. We realize the plan in the example of TMS320C6713 DSP and formulate it as follows: the high-speed transceiver of the waveform, the high-precision timing coordination and the configuration of parameters. Experiment results show that this design scheme can reduce the time error of flow calculation to ns-level accuracy in the condition of 75MHz data transfer frequency.

Key words: ultrasonic flow meter; DSP; high-speed; high-precision

1 引言

目前的超声波流量计数字处理模块从硬件构成上来讲, 主要有 MCU、FPGA、DSP 等几种类型^[1-3]。从流量测量原理上讲, 则主要包括时差法、相位差法、相关法等。本文阐述超声波流量计中一种基于 DSP 的高速、高精度、可配置的的数字处理模块的设计方案及实现方法。这种设计方案选用 DSP 作为核心器件, 利用 DSP 相较于 MCU、FPGA 具有较高的主频、强大的浮点运算能力的优点, 搭建起波形收发高速, 流量计算高精度的数字处理模块。同时, 充分利用 DSP 片上丰富的外设(EMIF、MCBSP、GPIO、TIMER 等), 不需要额外的控制协调电

路, 即可与人机交互界面和模拟收发通道的良好接口, 进而提高了超声波流量计整个系统的可扩展性。

2 总体设计方案和控制流程

超声波流量计中一种基于 DSP 的高速、高精度、可配置的的数字处理模块的设计方案如图 1 所示。

这种设计方案的优点如下:

(1) DSP 具有强大的浮点运算能力, 在复杂的信号处理方面(如相关运算)比 MCU、FPGA 更加擅长, 使用 DSP 计算流量响应更快、实时性更高, 算法设计更加灵活。

(2) 直接利用 DSP 中外接存储器接口(Exter-

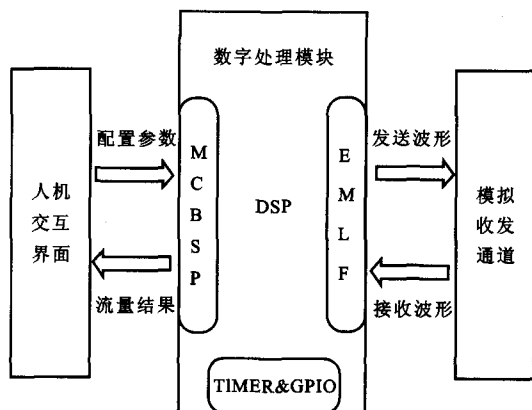


图1 总体设计方案结构图

nal Memory Interface, EMIF)与ADC、DAC无缝衔接,不仅可以控制超声波的接收,还可以直接将存储在RAM中的超声波波形进行多脉冲间隔发射(图2),因而相对于单脉冲具有更高的精度,同时降低了添加专门的超声波发射电路所带来的额外的误差和成本。

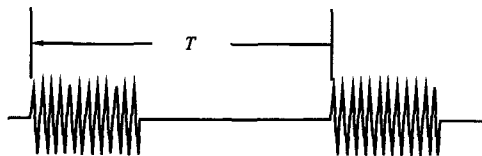


图2 多脉冲间隔发射(周期T)

(3) DSP拥有丰富的片上外设,如利用MCBSP可与前端人机交互界面进行实时通讯,利用TIMER则可以用来精确定时,使之具有良好的扩展性。

DSP作为超声波流量计的数字处理模块,是控制、协调波形配置和收发,进行流量计算的核心。在超声波每个收发周期中,DSP的具体工作流程如图3所示:首先与人机交互界面通讯,在输出前一周期的流量计算结果的同时获取本周期的波形控制参数(如波形收发周期 T)两步;其次与模拟收发通道通讯,包括发送波形至ADC,从ADC接收波形两步;最后进行流量计算。如此循环往复。

3 基于DSP的高速波形收发方案

6713的EMIF接口^[4]可在最高100 MHz的时钟下与SDRAM、SBSRAM等外接存储器无缝相接,从而达成片上RAM(容量为 $256\text{ k} \times 8\text{ bit}$)和片外存储器直接的高速数据交换。在超声波流量计中,将要发送和已接收的波形数据(一维数组,其中的每个数据为8 bit)均储存在DSP片上L2RAM中,将DAC和ADC配置在EMIF的外接存储空间中,并添加适当的使能端,即可得到基于DSP的高速波形收发方案,具体硬件连接结构如图4所示。

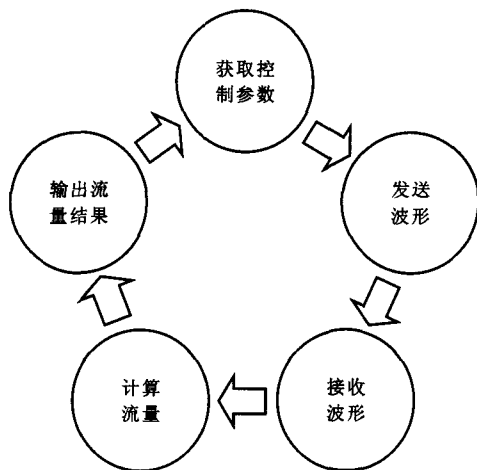


图3 DSP每周状态切换图

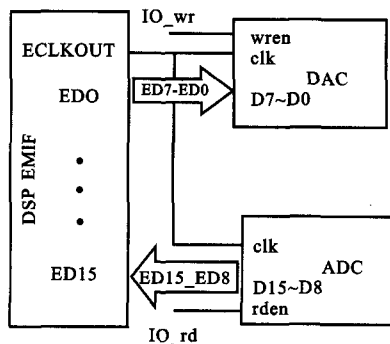


图4 高速波形收发方案

其中,EMIF的时钟接口ECLKOUT(频率可配置)与DAC、ADC的时钟输入端相接;EMIF数据端低八位ED7~ED0与DAC数据端相接,作为波形发送端口,高八位ED15~ED8与ADC数据端相接,作为波形接收端口;DAC的写使能端wren和ADC的读使能端rden由DSP的两个IO口按照一定的时序(见第4节)控制。DAC和ADC作为模拟收发通道的一部分,后接功放电路,即可与超声波换能器相连。

为达到高速的波形收发,DSP中也必须同时对EMIF以及波形收发控制进行相应的设置。由于超声波波形是以多脉冲间隔的形式发送和接收,因此EMIF中CECTL寄存器中存储器类型就必须设置为SBSRAM的形式,并设置为32 bit(虽然实际只使用了ED15~ED016根数据线),以获得最大程度的带宽。值得注意的是,必须同时禁止SDRAM的自动刷新,否则EMIF会默认自动刷新,由此带来数据传输中断问题。此外,选用EDMA的方式而非CPU直接读写的方式进行L2RAM与ADC、DAC之间波形数据的来回搬移,可以保证数据单个时钟周期的准确传递。

4 基于 DSP 的高精度时序配合方案

超声波流量计中波形发送和接收的起点至关重要,因为这直接影响了最终测量结果的时间精确度^[5]. 对应在数字处理模块中,体现的就是数据端和控制端的时序配合问题.

每个波形收发周期中的时序配合如图 5 所示. 首先是波形的发送阶段(阶段 1,时长 T_x),此过程中须保证 DAC 使能而 ADC 禁止. 因此,DAC 的写使能端,即 DSP 的 IO_WR 控制端在波形发送过程中始终保持使能状态(假设为高电平)直至发送结束;ADC 的读使能端,即 DSP 的 IO_RD 控制端为低电平,表示此时禁止接收(因为接收到的必为无效数据). 其次是发送之后的等待阶段(阶段 2,时长 T_D),此过程中发送停止(IO_WR 无效),同时继续禁止接收(IO_RD 无效). 第三阶段为波形接收时间,需保证开始接收而禁止发送,故 DAC 使能端 IO_WR 波形应如如图 5 中阶段 3 所示.

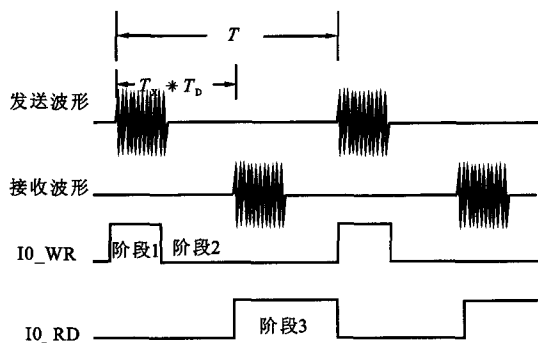


图 5 波形收发周期时序配合方案

在上述过程中,发送控制端和接收控制端使能的起点,代表了 DAC 发送波形数据和 ADC 接收波形数据的起始时刻,因此必须保证在每个周期都是确定的时刻出现,而不发生偏移. 对于一个高速的超声波流量计,这种微小的偏移往往会造成波形接收起点的不确定性,从而严重影响系统的精度.

一种时序控制实现方法是利用 DSP 的片上定时器外设:定时器在定时时间来临后会产生中断,DSP 自动响应该中断,并在中断中设置两个 GPIO. 这种实现方法能够产生图 5 所示的时序控制逻辑,但是通过示波器实测后发现,IO_WR 和 IO_RD 每个周期中拉高的时刻总在左右偏移,约有 2~3 个 ELCKOUT 时钟周期的不确定时间,而不是相对固定,这就意味着波形发送和接收的起点也在来回偏移,这对高速的波形收发而言所引入的测量误差是不可接受的(如波形发送频率为 75 MHz 时,实测接

收起点的偏移时间为 30 ns 左右). 理论分析来看,这种偏移时间是由 CPU 中断响应时间不固定所导致的抖动(Interrupt Jitter)造成的,因而单靠改进方案自身是无法消除偏移的.

本文给出一种基于 DSP 的高精度时序配合方案:鉴于上述方案造成抖动的原因在于中断抖动,与定时器无关,加之定时器具有定时精确且独立于 CPU 的特点,因而仍然选用;不同的是,读写使能信号不再由 DSP 单独的 IO 口给出,而是利用定时器输出端来实现. 定时器输出端是定时器自带的一种输出端口,每次定时一到,就会自动的取反(与定时器中断无关),这样就不会产生中断抖动问题,且会自动的输出方波^[6]. C6713 片上包含两个定时器,因此可将这两个定时器输出端分别用作读写使能端 IO_WR 和 IO_RD. 接下来以写控制信号 IO_WR 为例,介绍通过软件配置来实现 TOUT 信号的脉宽调制,从而实现图 5 所示的写控制逻辑.

首先配置定时器的输出端为 TOUT 端并设置第一个定时周期 $TIMER_setPeriod(TOUT_WR, T_x)$,此时 TOUT 稳定的输出高电平,如图 6 中①所示;在沿②处,定时时间 T_x 到,进入定时器中断并执行 $TIMER_setPeriod(hTimerR, T - T_x)$,此时定时器时间被瞬间更改为 $T - T_x$,从而使写使能信号稳定的输出低电平;当定时时间 $T - T_x$ 一到(图 6 中③处),此时再次进入定时器中断,设置定时周期为 $TIMER_setPeriod(hTimerR, T_x)$,如此往复,即可输出可进行脉宽调制的 TOUT 信号作为写使能信号. 同理可设置读使能信号,两个定时器中断相互配合,即可得到高精度的时序控制信号.

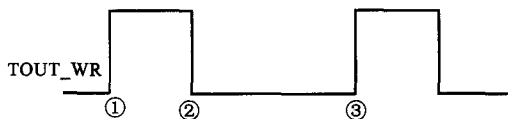


图 6 利用 TIMER 实现 IO_WR

5 波形控制参数的获取和配置

在上述波形收发周期中,需要从前端人机交互界面(如单片机)实时获取周期 T 、发送时长 T_x 、接收时延 T_D 等参数,以控制并配置波形收发过程. 这可利用 DSP 片上外设多通道缓冲串口 (Multichannel Buffered Serial Port, McBSP)^[7] 通过 SPI 协议实现. 以 DSP 作 master,人机交互界面为 slave SPI 通讯(4 线制).

参数获取发生在每个周期流量计算之后,具体通讯过程包括两部分:首先进行握手,保证不论

master 或是 slave 率先上电,都能保证可靠通讯;其次开始双向 SPI 传输,获取下个周期波形配置参数的同时,也将本周期的流量计算结果输出给人机交互界面。

6 实验结果

针对管内径 0.025 m 的小管径管道中的水流量进行了测量,其中超声波探头平行于流动方向放置,探头距离 0.5 m。测量结果用超声波收发之间的时间差表示,且为三组、每组十次测量的均值。如表 1 所示。

表 1 流量测量结果(时差表示) ns

理论时差	实测时差	误差
0	0.4	0.4
21.36	22.70	1.34
37.85	39.41	1.56

实验中采用多脉冲间隔发送方法,脉冲发送频率为预先将 4 000 个数据点(每 75 个数据代表一个完整的正弦波)存入 DSP 的 RAM 中,每个波形数据点的发送频率为 75 MHz,因此正弦波的周期为 1 MHz。整个数字处理模块波形的发送、接收、流量的计算、输出的周期为 10 ms。

可以看到,实际测量值相比于理论值而言,达到了较高的精度(考虑到温度、流体纯度等因素)。由于每个波形数据的发送频率为 75 MHz,这就意味着一旦发生使能端和数据端时序上的抖动,即使是发送时或接收时丢失一个点,那么实测结果也会至少偏移 13.3 ns。在实际的三组、十次测量中,测量值的波动总是<1 ns。这意味着高速数字处理模块的数据端和控制端时序配合达到了纳秒级精度的要求。

7 结束语

文中主要阐述了超声波流量计中一种基于 DSP 的高速、高精度、可配置的的数字处理模块的设计方案。该方案不仅具有波形收发高速、测量结果高精度的特点,还可以利用 DSP 丰富的片上外设和强大的浮点运算能力,进行接口(如 UART)的扩展和流量计算算法的扩展。本文还以 TMS320C6713DSP 为例,介绍了方案关键的实现方法。经过实测,基于 DSP 的数字处理模块可以达到纳秒级精度的要求。

参考文献:

[1] 闫菲,多脉冲时差法超声波流量计的设计与实现[D].大连:大连理工大学,2006.

[2] 郑鹏,基于 FPGA 的时差法超声波流量计系统的设计与实现[D].浙江:浙江大学,2006.

[3] 张俊,基于 DSP 的超声波流量计[D].南京:南京航空航天大学,2005.

[4] TMS320C6000 DSP EMIF Reference Guide[R],Dallas Texas Instruments,2004.

[5] 李广峰,刘坊,高勇.超声波流量计的高精度测量技术[J].仪器仪表学报,2001,22(6):644-647.

[6] TMS320C6000 DSP 32-Bit TIMER Reference Guide [M]. Texas Instruments,2004.

[7] TMS320C6000 DSP Multichannel Buffered Serial Port Reference Guide[R]. Texas Instruments,2006.

作者简介:

韩宇杰 男,(1985-),硕士研究生,研究方向为检测技术、NoC 测试.

杨士元 男,(1945-),教授,博士生导师.研究方向为电子技术、检测技术、系统故障诊断理论和技术、智能家居系统.

(上接第 144 页)

[2] 吴朝晖,陈华均.语义网络:模型、方法与应用[M].浙江:浙江大学出版社,2008.

[3] 崔亚楠,黄文明,朱英.基于 Agent 的网格资源共享方法研究[J].微电子学与计算机,2009,26(12):112-116.

[4] 田文雅,陈华均.基于语义网络的 E-learning 平台研究[J].开放教育研究,2007,13(3):105-108.

[5] 朱红康,孔德华,张岗亭.一种基于语义网络的 E-learning 系统框架[J].西安文理学院学报:自然科学版,2008,11(3):60-61.

[6] 龚松杰.一种基于本体语义的网格服务发现模型[J].微

电子学与计算机,2008,25(1):97-98.

[7] 钟珞,王辉,李锐,等.基于语义 Web 的网络学习资源库本体实现[J].计算机工程,2007,33(8):283-284.

[8] 姜华.基于本体的多主体网络协作学习模型研究[J].计算机工程与设计,2007,28(2):270-271.

作者简介:

吴杰 女,(1976-),硕士,讲师.研究方向为计算机教育、网络信息安全研究.