

超声波传输时间精密测量方法及应用研究

张兴红 向风云 张天恒 蔡伟

重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心,重庆,400054

摘要:根据超声波回波信号是一个变幅周期性信号这一特点,提出一种用数字细分来精密测量超声波传输时间的方法,阐明了超声波换能器驱动电路原理及利用 FPGA 电路和高分辨率 A/D 电路通过高频采样来实现这一方法的原理,并采用该方法和电路设计了超声波流量计。指出超声波传输时间测量的分辨率取决于超声波信号的频率和 A/D 电路的分辨率,为保证测量精度,应尽可能采用较高的采样频率。超声波传输时间的测量综合了全部回波信号采样数据,有很好的可靠性和很强的抗干扰能力。

关键词:超声波;传输时间;回波信号;流量测量

中图分类号:TP216.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.06.005

Study on Precision Measurement of Ultrasonic Wave Transmission Time and Its Applications

Zhang Xinghong Xiang Fengyun Zhang Tianheng Cai Wei

Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment,
Ministry of Education,Chongqing University of Technology,Chongqing,400054

Abstract:In accordance to the characteristics that ultrasonic wave echo signal is a periodic signal with variational amplitude of each wave,a precision measurement of ultrasonic wave transmission time through digital subdivision method was proposed.The principles of ultrasonic transducer drive circuit as well as how to realize this method by using high-resolution A/D and high-speed FPGA circuit to actualize high frequency data sampling from ultrasonic wave echo signal were illustrated.A ultrasonic flowmeter was designed based on these methods and circuits.It is pointed out that the measurement resolution of ultrasonic wave transmission time depends on the frequency of ultrasonic signals and the revolution of A/D circuit.In order to improve measurement accuracy,the sampling frequency should be as high as possible.Because the measurement of ultrasonic wave transmission time is based on all ultrasonic wave echo signal sampling data,it has good reliability and strong anti-interference ability.

Key words:ultrasonic wave;transmission time;echo signal;flow measurement

1 超声波技术在流量测量中的应用

在流量测量中人们利用超声波在不同流速流体中顺流、逆流传播速度的不同设计了时差法超声波流量计^[1],如图 1 所示。

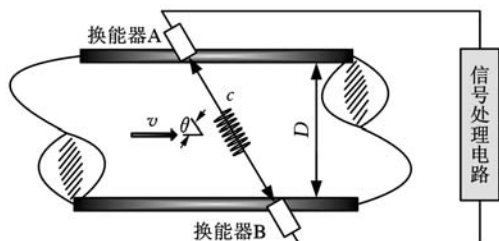


图 1 时差法超声波流量计原理图

图 1 中: D 为管道直径; θ 为换能器 A、B 的轴线与管道轴线夹角(声道角); v 为管道中液体介质的流速; c 为超声波在液体介质中的传播速度。超声波换能器 A、B 均既可以发射超声波又

可以接收超声波。则管道中的流量为

$$Q = S_r v = \frac{\pi D^2}{4} \frac{c^2 \sin \theta}{2 D \cos \theta} \Delta t = \frac{\pi D c^2 \sin \theta}{8 \cos \theta} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中, t_1 、 t_2 分别为超声波沿顺流、逆流方向上的传播时间; S_r 为截面积。

由式(1)可知,超声波传播时间的测量是时差法超声波流量计流量测量^[2]的关键。假设图 1 中管径 $D=300\text{mm}$,声道角 $\theta=45^\circ$,则超声波换能器 A、B 之间的距离约为 424.26mm 。已知超声波在洁净水中的传播速度约为 1450m/s ,若水流速为 1m/s ,则超声波顺流、逆流传播时间差约为 400ns 。要保证测量达到 0.2% 的测量精度,要求测量的传输时间差的分辨率至少要小于 0.8ns 。这么高的时间测量分辨率对传统的嵌入式仪表测时电路来说很难实现,这也是为什么 20 世纪 30 年代初人们就提出利用超声波来测量流量但直到 80、90 年代随着高性能 FPGA 等集成电路的飞速发展才研制出高精度超声波流量计的原因^[3]。

本文提出一种通过数字细分和高分辨率 A/D

高速采样来实时精密测量超声波传输时间^[4]的新方法,并将这一方法运用于高精度超声波流量计的研制。

2 超声波传输时间测量方法

如图 2 所示,驱动电路给超声波换能器 A 供以频率在超声波频率范围内的周期信号,使换能器 A 把电信号转换成周期性振动,产生超声波信号。换能器 B 接收到该信号并将其转换成周期性电信号,该信号称之为超声波回波信号,是一个变幅信号。换能器 A 发射的超声波信号上的任意一点与换能器 B 接收到的回波信号上相对应的那一点之间的时间间隔就是超声波的传输时间。超声波传输时间精密测量的关键是确定传播时间的终点,其精度依赖于终点的精确确定。

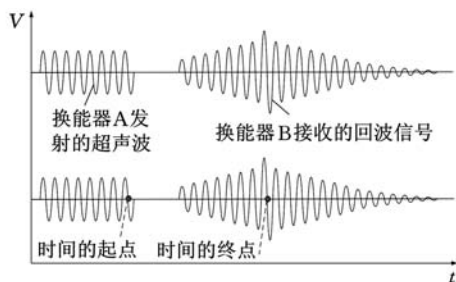


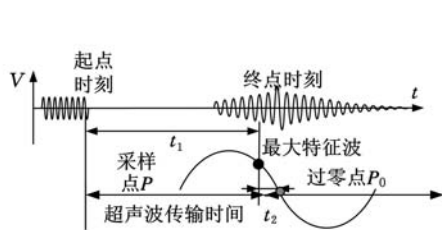
图 2 超声波传输时间示意图

换能器 A 发射完一定数量的超声波信号后, A/D 电路马上从换能器 B 上采集超声波回波信号。回波信号采集完成后首先逐点比较 A/D 采样点,找出采样点的最大值就可以确定幅值最大的特征值波形。然后,如图 3b 所示,确定超声波传输时间终点所对应的过零点 P_0 。前一个采样点 P 和后一个采样点 P_{+1} ,显然在特征波内采样点 P 的采样值大于零,采样点 P_{+1} 的采样值小于零。最后,以采样点 P 和 P_{+1} 两个点对应的时刻作为基准,用数字拟合细分插补算法可以准确地计算出过零点 P_0 所对应的时刻。

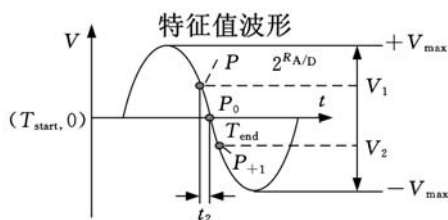
如图 3 所示,设超声波信号的输入频率为 f_u , A/D 的采样频率为 $f_{A/D}$, A/D 分辨率为 $R_{A/D}$ 位,相邻两个采样点之间的时间即采样周期为 $T_{A/D}$ 。采样后开始计数,第一个采样点计数为 1,采样点 P 的采样点计数为 N ,采样点 P 对应的采样值为 V_1 ,所对应的时刻为 t_1 :

$$t_1 = NT_{A/D} \quad (2)$$

采样点 P_{+1} 对应的采样值为 V_2 ;采样点 P 与过零点 P_0 之间的时间为 t_2 ,在过零点附近较小的区域内,正弦波的波形接近于直线,可以根据直线插补的方法确定 t_2 :



(a) 特征波形的确定



(b) 过零点的波形

图 3 特征波过零点示意图

$$t_2 = \frac{1}{|V_2 - V_1|} V_1 T_{A/D} \quad (3)$$

t_2 对应的时间分辨率为

$$R = \frac{1}{|V_2 - V_1|} T_{A/D} \quad (4)$$

由于

$$T_{A/D} = \frac{1}{f_{A/D}} \quad (5)$$

如果把正的最大值和负的最大值之间的波形近似看作直线,则有

$$\begin{aligned} |V_2 - V_1| &= \frac{2^{R_{A/D}}}{(t_u/2)/T_{A/D}} = \\ \frac{2 \times 2^{R_{A/D}} T_{A/D}}{t_u} &= \frac{2 \times 2^{R_{A/D}} f_u}{f_{A/D}} \end{aligned} \quad (6)$$

故

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{|V_2 - V_1|} T_{A/D} = \\ \frac{f_{A/D}}{2 \times 2^{R_{A/D}} f_u} \frac{1}{f_{A/D}} &= \frac{1}{2 \times 2^{R_{A/D}} f_u} \end{aligned} \quad (7)$$

而超声波传输时间 t_u 为

$$t_u = t_1 + t_2 \quad (8)$$

由于 t_1 是 A/D 采样电路的采样频率的整数倍,故其分辨率依赖于器件的性能; t_2 是由特征波中过零点对应的时刻决定的,根据采样数据由数字细分插补得到,其分辨率主要取决于超声波信号的频率和 A/D 采样电路的分辨率。

由上述分析可以得出如下推论:①在 A/D 电路分辨率一定的情况下,超声波信号的频率 f_u 越高,超声波传输时间测量的分辨率 R 越高;②当超声波输入频率 f_u 为定值时,选用的 A/D 电路的分辨率 $R_{A/D}$ 位数越高,超声波传输时间测量的分辨率 R 越高。

3 换能器驱动电路

超声波换能器驱动电路原理如图 4 所示,其主

要功能是给超声波换能器供电,使之发射超声波信号。CPU 控制 FPGA 电路内的信号发生器产生数字信号,经 D/A 电路转换成模拟信号,由功率放大电路进行功率放大后驱动换能器发射超声波信号。

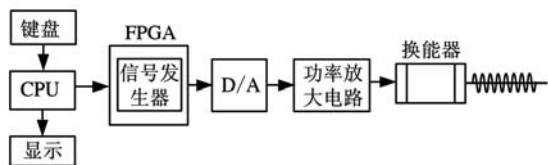


图 4 换能器驱动电路原理框图

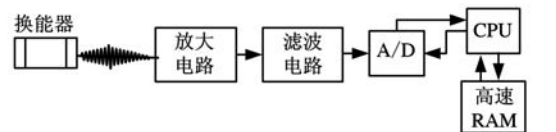
信号发生器产生的数字信号要确定以下参数:

(1)频率。如上所述,超声波信号的频率是影响超声波传输时间测量分辨率的重要因素,与驱动电路的频率相同。为实现高精度的超声波传输时间测量,超声波信号的频率越高越好。合理选择超声波信号的频率对实现经济合理的高精度流量测量十分重要。

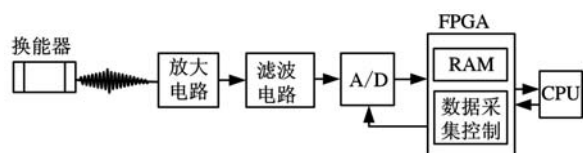
(2)信号的周期数。如果换能器 A 发射的超声波信号周期数太多,则超声波信号不停地作用于换能器 B,换能器 B 上产生的超声波回波信号的幅值先是逐渐增大,到达额定值后就不再增大,直到没有超声波信号作用于其上后,其幅值才逐渐减小。这样形成回波信号的波形中幅值最大值(额定值)的波有很多个,不利于确定特征波;如果发射的超声波信号的周期数太少,则超声波回波信号幅值最大的那个波的振幅不能达到或接近于换能器的额定值,也不利于确定特征波,因此要合理确定超声波信号的周期数。

4 超声波回波信号处理电路

超声波回波信号处理电路原理如图 5 所示。图 5a 是常规的信号处理电路,图 5b 是在 FPGA 电路内构建随机存储区(RAM)的信号处理电路。



(a) 常规信号处理电路



(b) 基于 FPGA 的信号处理电路

图 5 超声波回波信号处理电路原理框图

常规的信号采集电路中,超声波回波信号经放大电路和滤波电路处理后输入 A/D 电路,CPU 发出数据采集指令控制 A/D 进行数据采集,每采

一个数据,CPU 都要从 A/D 读取数据,然后存入高速 RAM。所有数据采集完成后,CPU 再从高速 RAM 中读取数据,进行特征波查找,计算超声波传输时间。这种采样电路适合于低速采样,当采样频率较高时就无法完成采样。例如采样频率为 40MHz 时,假设 CPU 的时钟频率为 100MHz,由于采样一个数据需要读、存两条指令,至少需要 8 个时钟周期,即 80ns,而采样时间只有 25ns,显然来不及采样^[5-6]。

为此设计了图 5b 所示的信号处理电路,在 FPGA 电路中构建 RAM 和数据采集控制器。采样时,CPU 向 FPGA 电路发出开始采样指令,数据采集控制器控制 A/D 电路进行采样,将采样数据存储于 FPGA 电路中构建的 RAM 中。采样完成后,数据采集控制器向 CPU 发出数据采集结束信号,CPU 从 FPGA 电路中读取数据,进行特征波查找,计算超声波传输时间。由于采样数据的读、存主要由 FPGA 电路中的硬件电路完成,可以大大提高采样频率。

如上所述,A/D 电路的分辨率 $R_{A/D}$ 位数过高,则超声波传输时间测量的分辨率越高,但价格也越昂贵,因此要合理选择 A/D 电路的分辨率。

A/D 电路的采样频率对超声波传输时间测量的分辨率没有影响。但从采样的角度讲,首先要保证在一个信号周期内的采样点数能够足以反映信号的自身规律;其次,采样频率越高,就越有利于确定特征波,因此要合理确定采样频率。

5 超声波流量计工作原理

根据以上方法设计的超声波流量计的原理如图 6 所示。

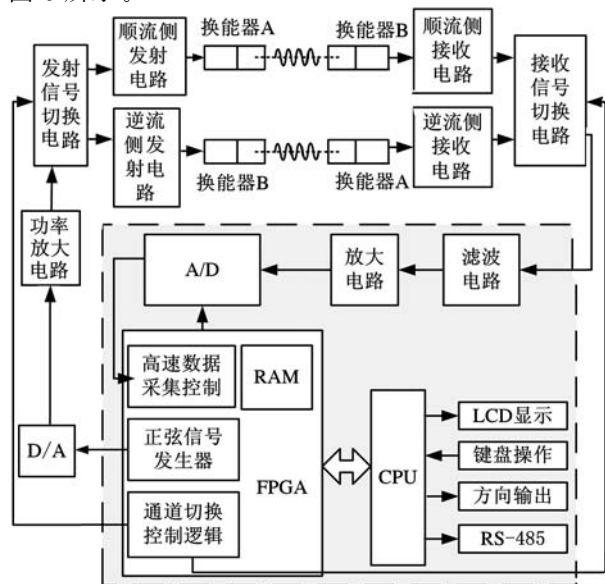


图 6 流量计原理框图

首先, FPGA 产生数字正弦激励信号, 经 D/A 数字模拟信号转换电路转换成为模拟量, 这一模拟量被功率放大电路放大, FPGA 将发射通道切换控制切换到换能器 A 的通道, 从而激励换能器 A 发射超声波并在液体介质中传播。

超声波在液体介质中传播时叠加上了液体介质的信号, 被换能器 B 接收后转换为超声波回波信号。CPU 发出指令, 使 FPGA 控制 A/D 转换电路对回波信号进行实时高速采集, 采集到的数据存储在 FPGA 内部构造的 RAM 内存中。

采样结束后, CPU 从 FPGA 中读取采集到的数据进行实时数据处理, 根据采样数据计算出超声波顺流传输时间。

同理, FPGA 控制通道切换逻辑使换能器 B 发射超声波, 换能器 A 接收超声波, 可以计算出超声波逆流传输时间, 从而可以计算出超声波顺流、逆流传输时间差, 进而计算出相关的流速和流量信息, 并且控制流速和流量等不同数据的 LCD 显示。

高分辨率的 A/D 转换器和高速 FPGA 信号采集是保证超声波传输时间精密测量的硬件保障, 也是信号处理电路的核心部分。本流量计中, 正弦信号发生器产生的信号频率为 1MHz, A/D 电路的分辨率为 12 位, 采样频率为 32MHz, 则超声波传输时间的理论分辨率为

$$R = \frac{1}{2 \times 2^{R_{A/D}} f_u} = \frac{1}{2 \times 2^{12} \times 1\,000\,000} \approx 0.122\text{ns}$$

这样, 如上所述, 在流体流速大于 1m/s 时, 流量计的流量测量分辨率可优于 0.1%。若采用更高的超声波信号频率和选用分辨率更高的 A/D 电路, 还可实现更高分辨率的测量^[7-8]。

采用以上参数设计的管道直径为 300mm、声道角为 45° 的超声波流量计样机在被测介质为洁净水的情况下经中国四联仪器仪表集团流量仪表分公司标定, 流量测量精度为 0.6%, 有良好的线性和重复性。

6 结论

(1) 提出了用数字细分方法处理超声波信号的采样数据的方法, 在硬件要求不高的情况下可大大提高超声波传输时间测量的分辨率。在超声波信号的频率为 1MHz, A/D 电路的分辨率为 12 位, 采样频率为 32MHz 的情况下, 超声波传输时

间的理论分辨率高达 0.122ns, 有利于实现高精度的测量。根据这一方法设计的超声波流量计, 测量精度达到 0.6%, 有良好的线性和重复性。

(2) 在 FPGA 电路中构建 RAM 存储区, 大大缩短了采样数据的储存时间, 顺利实现了高频信号的实时采样。

(3) 在精密测量超声波传输时间的方法中, 超声波信号的频率和 A/D 电路的分辨率是影响测量分辨率的两个重要因素。

(4) 超声波传输时间的终点是通过综合整个超声波回波信号全部采样数据, 先找到特征波然后在特征波中从波峰到波谷的半个周期内通过插补算法精确确定的, 它所对应的超声波传输时间也是综合所有回波信号数据得到的, 有很好的稳定性。

参考文献:

- [1] 梁国伟, 蔡武昌. 流量测量技术及仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 蔡武昌. 流量仪表若干发展趋势和应用进展[J]. 中国仪器仪表, 2001(2): 46-48.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 超声流量计检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [4] 周利华, 修吉平. 时差式超声波流量计的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2007(6): 21-22.
- [5] 牛跃华, 彭黎辉, 张宝芬, 等. 基于数字仪器的超声波流量计研究平台设计及实现[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(10): 2024-2027.
- [6] 邹文良, 李博. 基于 LabVIEW 的超声波相关法流速流量测量仪[J]. 机械与电子, 2005(12): 44-46.
- [7] 李广峰. 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.
- [8] Chuang S Y, Terry L S. A Digitally Self-calibrating 14-bit 10-MHz CMOS Pipelined A/D Converter[J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2002, 37(6): 674-683.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 张兴红, 男, 1970 年生。重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心教授、博士。主要研究方向为计算机辅助测试技术。获国家技术发明二等奖 1 项, 重庆市技术发明一等奖 1 项, 重庆市科技进步二等奖 1 项。获中国专利 10 项。发表论文 30 余篇。向风云(通讯作者), 女, 1986 年生。重庆理工大学电子信息与自动化学院硕士研究生。张天恒, 男, 1973 年生。重庆理工大学电子信息与自动化学院讲师。蔡伟, 男, 1986 年生。重庆理工大学电子信息与自动化学院硕士研究生。