

提高超声波流量计量精度的方法^①

王 璐, 段晨旭, 高泉春, 葛祖郁, 徐丽平, 段培永

(山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101)

摘 要: 时差法超声波流量计通过检测换能器发射和接收的超声波信号的传播时间信号, 实现流量的计量. 超声波换能器的谐振频率及超声波信号传播过程中相位和幅值的变化等因素, 会影响对超声波信号到达时间的准确计量, 从而影响流量测量的精度. 准确计量超声波信号的到达时刻是提升时差法超声波流量计的计量精度的关键之一. 针对换能器发射和接收超声波信号的处理和获取电路进行了设计和分析, 得出了实验结果和实验数据, 对实验结果给出了实验分析和结论, 并通过软件算法给出了进一步提高测量精度的方法.

关键词: 时差法; 换能器; 小波去噪方法; 信号处理; 阈值法

Method of Improving Measurement Precision of Ultrasonic Flowmeter

WANG Lu, DUAN Chen-Xu, GAO Quan-Chun, GE Zu-Yu, XU Li-Ping, DUAN Peo-Yong

(School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: The ultrasonic flowmeter with transit-time difference method can realize the flow measurement by detecting the propagation time of ultrasonic signals between the transmit and receive from the transducer. The resonant frequency of ultrasonic transducer and the phase and amplitude changes in the process of ultrasonic signal propagation will affect the measurement precision of the arrival time of ultrasonic signal, and the measurement accuracy of ultrasonic flowmeter is affected finally. The precise measurement for arrival time of ultrasonic is one of the effective way to improve the measurement accuracy of ultrasonic flowmeter. The processing and acquisition circuit of the ultrasonic signal transmitted and received are designed and researched by the paper. The experimental results and experimental data are obtained and the experimental analysis and conclusion are given. The way to improve the measurement accuracy is given by software algorithm.

Key words: time difference method; transducer; method of wavelet denoising; signal processing; thresholding

1 引言

超声波流量检测技术根据被测流体对超声波传播速度产生调制来实现流速测量. 近年来随着数字信号处理技术、大规模数字电路的应用以及新型超声换能器的出现, 促使超声波流量检测技术取得了长足进步^[1]. 与传统的流量计相比超声波流量计解决了大管径、大流量及各类明渠、暗渠液体流量测量困难的问题, 同时, 可以测量包括: 液体、气体, 甚至对双相介质在内的液体流量, 对测量介质无要求. 且具有低压降、低能量消耗、测量精度高的优势, 所以它正在逐渐取代机械式的流量计. 但超声波用于小口径流量测量时, 由于超声波穿过被测液体的时间很短, 有用的测量信号

容易被杂波所淹没, 从而影响流量的测量精度. 针对小口径超声波流量检测的上述问题, 通过硬件电路设计和软件算法的改进, 较好的解决了测量精度问题.

2 超声波流量计换能器的驱动和信号处理

超声波流量计检测方法主要有: 时差法、多普勒效应法、相关法、噪声法、波束偏移法等, 时差法超声波流量是依靠在超声波信号传播到介质当中后, 在流动的介质里会带有介质流速信息, 依靠超声波接收传感器把带有流速信息的超声波回波信号接收到电路板中, 进行一系列的信号处理之后就会得到被测介质的流速或者流量^[1].

^① 基金项目: 国家自然科学基金(61374187)

收稿时间: 2014-01-17; 收到修改稿时间: 2014-03-05

(1)时差法超声波流量计的工作原理

时差法计量的关键是要能够获得高精度的时间测量参数,近几年来,随着高速时间计数处理芯片不断出现,使得几十皮秒的测量精度变得可能,这对于时差法用于小口径超声波流量计提供了计量保证.图 1 是时差法超声波流量测量法的基本原理图.

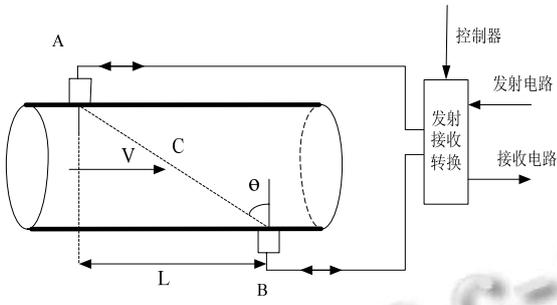


图 1 超声波流量测量原理

两个超声波探头 A 和 B 既可以发射又可以接收,当探头 A 发射, B 接收时,超声波就在流体中顺流传播,其速度就要加快,测量出顺流时间;反之逆流传播时超声波的速度就会减慢^[5].

时差法中顺流传播时间 t_1 为:

$$t_1 = \frac{L}{c + V \sin \theta} + \tau$$

逆流传播时间 t_2 为:

$$t_2 = \frac{L}{c - V \sin \theta} + \tau$$

顺逆流时间差 Δt 为:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2LV \sin \theta}{c^2 - V^2 \sin^2 \theta}$$

可得:

$$V = \frac{C^2}{2L \sin \theta} * \Delta t$$

其中, C 为超声波在液体中的声速; L 为两个换能器之间的距离; V 为管道中心轴方向的平均流速; θ 为超声波进入液体的入射角; τ 为超声波在液体传播以外的附加时间.

(2)超声波换能器的驱动控制

在超声波流量测量时,首先要对换能器进行驱动,激励换能器产生振荡并发出超声波信号,以下是分别采用 1 个驱动脉冲、10 个驱动脉冲和 15 个驱动脉冲

作为换能器的激励源,图 2 是 1 个驱动脉冲时,接收端换能器所接收到的波形.可以看出,当一个脉冲驱动时,所接收到的波形比较微弱,波形很不规范.图 3 是 10 个驱动脉冲时,接收端换能器所接收到的波形.波形形状得到明显改善.图 4 是 15 个驱动脉冲时,接收端换能器所接收到的波形.



图 2 1 个驱动脉冲接收波

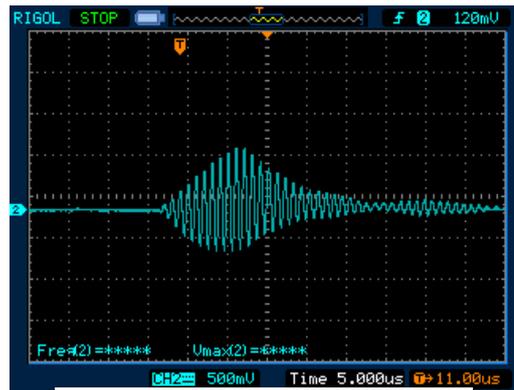


图 3 10 个脉冲接收波形



图 4 15 个脉冲接收波形

由上面几个图可以看出 15 个脉冲时换能器接收波形是比较规范的正弦波,幅值较大,GP2 最多能发出 15 个驱动脉冲,因此选用驱动脉冲为 15 个.

3 换能器接收信号的获取

当发射端的超声波换能器发出的声波经过液体传至与其相对的接收端换能器时，由于各种环境复杂的工业现场噪声，以及流体介质中的杂质颗粒和气泡等产生的干扰，特别是来自外界的电磁干扰等，使接收信号的幅值衰减很大同时伴随着各种干扰信号，因此如何从这种接收信号中获得可靠的 STOP 信号成为信号处理的重点内容。下面就探讨几种针对超声接收信号的获取 STOP 信号的方法^[6]。

(1) 过零检测

理论上超声波信号的传播时间是接收信号到达时刻确定的，只需要将接收波形的第一个零点选为停止信号即可。由图 4 可以看出超声波接收信号起振点处幅值较小且不稳定，容易被干扰信号掩盖造成误触发，使测量结果发生错误。

(2) 阈值比较法

由测量的原理可以看出流量测量最终需要的是顺逆流时差，所以在测量过程中需要的不一定是接收信号的起振点，只需找到某个固定的点作为 STOP。因此可以采用阈值法，阈值如图实线所示。由图 4 可以看到，换能器接收信号比较微弱，只有几百毫伏，容易受到换能器起振，气泡等因素的干扰使幅值发生变化，如图 5 所示，假设在同一流速下，顺流测量时，过阈值比较，在 STOP1 出得到停止信号，逆流测量时，出现虚线所示的情况，第二个的波形已经不能产生 STOP 信号，此时第二个过阈值的点(STOP2)便引起了误触发，出现此种情况所测得的时间差就增加了一个周期即为一微秒，测量出错。导致流量测量出现偏差。

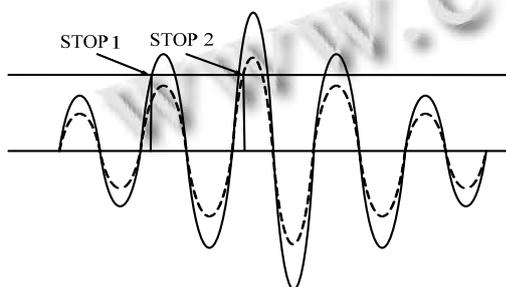


图 5 阈值比较法

采用此种方法的硬件电路如图 6 所示。

采用 LMV7239 高速电压比较器，单电源供电，输入正端接入放大之后的接收信号，负端把 5V 电压经过 4.7K 和 2K 电阻分压，得到过 1.5V 电压，输入信号

和 1.5V 电压进行比较，大于 1.5V 输出正，小于 1.5V 输出零。

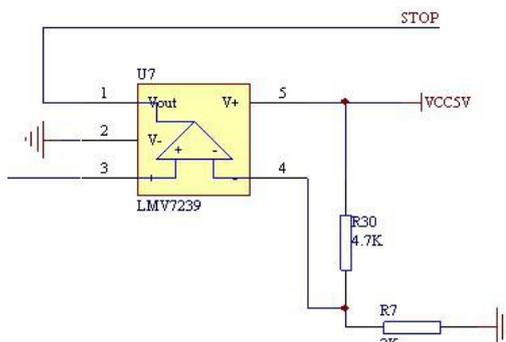


图 6 阈值比较法电路

采用此种方法测得的时差如图 7 所示，

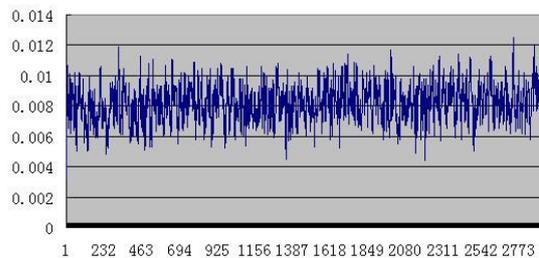


图 7 阈值比较测得时差

由上图可以看出采用此种方法时差变化范围较大，上限时差达到 0.012 微秒，下限到 0.004 微秒，很难对时差做出准确的判断，导致流量测量的精度很低。

在静态时，测得的顺逆流时差理论上为零，用阈值法可能出现下图所示情况，顺流时信号为实线所示，STOP1 为停止信号，当逆流时受到各种信号的干扰，会出现波形如图虚线所示，致使 STOP2 成为停止信号，信号点发生漂移，造成静态偏差。

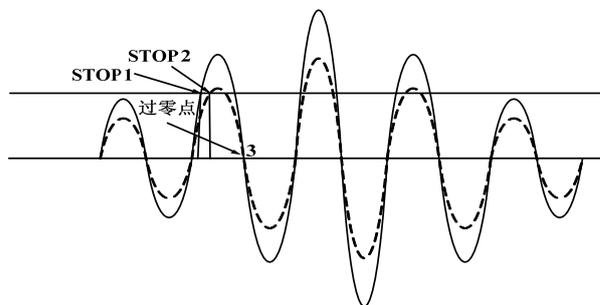


图 8 阈值比较法跟过零比较相结合

(3) 阈值比较跟过零比较相结合

由大量的实验和测量原理可以得出，接收信号的

频率为换能器的固有频率,即为 1MHZ,所以干扰信号或者幅值变化不会对零点产生影响,利用这一特点,可以把过某一个阈值之后的零点当做停止信号,可以

减小测量的误差(如上图所示 3 点)提高流量计的计量精度. 硬件原理图如图 9 所示:

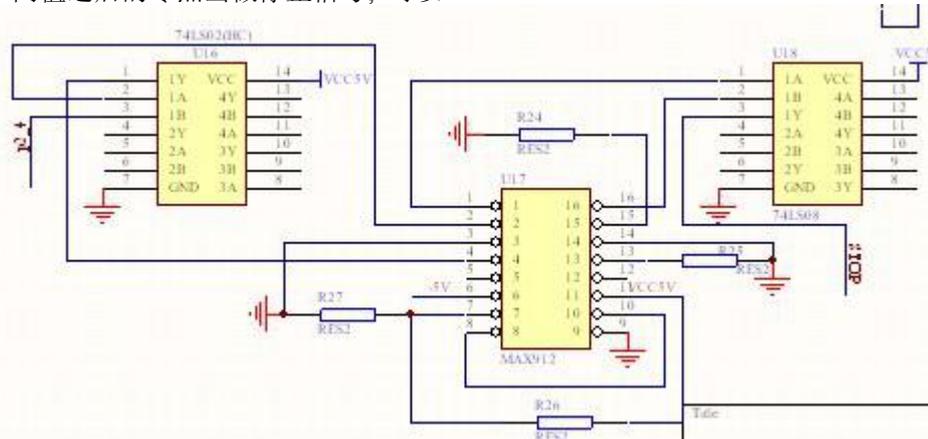


图 9 阈值比较法跟过零比较结合电路

采用 MAX912 双通道, 高速, 低功耗比较器, 可单双电源供电, MAX912 提供一个 TTL 兼容的锁存功能, 拥有比较器输出状态. 只要锁存启用为高电平或悬空时, 输入信号对输出状态没有影响. 锁存启用为低电平时, 控制输出电压和输入差分锁存器是透明的.

输入信号进入通道 1 的正输入端, 当大于设定的阈值后, 输出高电平, 锁存器会对这个高电平进行锁存. 同时进入通道 2 的负输入端, 当大于零时输出负, 小于零时输出正, 通道 1 和通道 2 的输出经过 74LS08 输出停止信号, 这样就得到了如图 8 所示的 3 点.

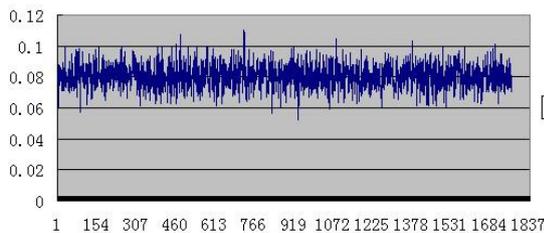


图 10 阈值比较法跟过零比较结合测得的时差

通过图 10 可以看出, 阈值比较和过零比较相结合比直接过阈值比较得到的时差稳定, 波动范围较小, 跟过零比较和过阈值比较相比, 可以很好地提高测量精度.

由图 10 和图 7 以及图 11 的对比, 可以明显看出图 10 阈值比较跟过零比较的优势, 所以在本文硬件选用此方法进行设计. 但是, 如图 10 所示, 某些测量点显示的时差超过了 0.1 微秒, 下限超过了 0.06 微秒, 这

些也会影响测量结果. 因此, 还需要软件来提高测量精度.

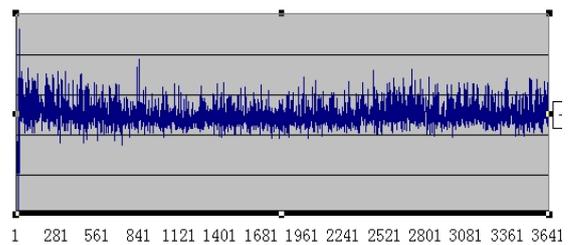


图 11 过零比较

4 软件提供测量精度

超声波接收信号在放大和滤波处理过程中, 受电源杂波和电磁干扰的影响, 存在的杂波, 导致测量的时间差数据存在噪声和偶尔的尖峰^[1], 小波去噪方法采用了多分辨率的方法, 可以非常好地刻画信号的非平稳特征, 如边缘、尖峰、断点等.

含噪声的一维信号模型可表示为^[12,13]:

$$s(t) = f(t) + \xi e(t) \quad t = 0, 1, \dots, n-1$$

式中: $f(t)$ 为真实信号, 相对比较平稳, $s(t)$ 为含噪信号; 通常为低频信号; $e(t)$ 为噪声, 为噪声标准偏差, 通常表现为高频信号; ξ 为噪声水平. 可以按照以下步骤进行小波滤波算法处理^[14]:

- 1) 对含噪信号进行预处理, 并进行小波分解. 选择一个小波并确定小波分解的层次 N , 然后对信号进行 N 层小波分解.
- 2) 小波分解高频系数的阈值量化. 对第 1 到第 N

层的高频系数进行量化处理;

3) 一维小波的重构. 根据小波分解的第 N 层低频系数和第 1 层到第 N 层的高频系数, 进行一维重构.

利用小波对含噪的原始信号分解后, 含噪部分主要集中在高频小波系数中, 并且, 包含有用信号的小波系数幅值较大, 但数目少; 而噪声对应的小波系数幅值小, 数目较多. 因此可以应用门限阈值法对小波系数进行处理. (即对较小的小波系数置为 0, 较大的保留或削弱), 然后对信号重构即可达到消噪的目的. 阈值函数分为软阈值和硬阈值两种, 软阈值 (soft thresholding) 原理是当小波系数的绝对值大于等于给定的阈值时, 令其值为减去阈值; 而小于时, 令其为 0^[15].

$$w\lambda = [\text{sign}(w)](|w| - \lambda), |w| \geq \lambda$$

$$w\lambda = 0, |w| < \lambda$$

选取阈值, 对信号进行处理. GP2 芯片具备的使能窗功能, 通过设置 GP2 屏蔽窗, 可以很好地选择性接收和屏蔽脉冲信号, 只让有用的信号通过停止引脚^[10]. 针对不同的情况开窗, 可以更加有效地屏蔽干扰脉冲, 提高测量精度.

小波滤波跟使能窗相结合可以很好地对噪声进行处理. 处理后的波形如下图所示:

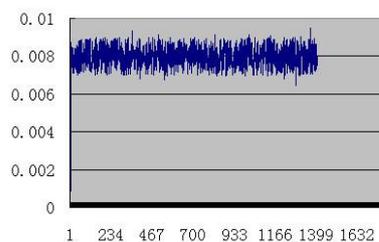


图 12 软件处理后的数据

跟图 10 相比较可以看出波形变得相对平滑, 时间差集中在 0.008 微妙附近, 没有很大的毛刺, 滤波效果比较明显.

5 结论

针对超声波流量计在小流量、小口径的流量计量中, 存在测量精度低、测量精度不稳定的问题, 在研究和分析时差法超声波流量测量原理和特点的基础上, 进行了硬件的设计, 并对各种停止信号的获取方法在

流量计试验台上进行了实际的流量计量实验, 通过对实验结果的分析可以看出采用过阈值比较跟过零比较的方法明显比其他的两种方法效果要好, 可以很好地提高测量的精度. 另外, 采用开窗的方法可以对干扰进行屏蔽, 有效地提高了测量的准确度. 为下一步软件中利用温度补偿提高测量精度提供了基础.

参考文献

- 1 杨剑. 基于 FPGA 超声波流量计的设计[学位论文]. 武汉理工大学, 2012.
- 2 段允, 王让定, 朱莹, 等. 一种抑制时差法超声流量计静态漂移的方法. 微电子学与计算机, 2010, 27(8): 205-209.
- 3 超声波换能器. www.china-ultrasonic.net/down.htm. 超声波资料库.
- 4 TDC-GP2 User Manual. http://www.acam.de/fileadmin/Download/.
- 5 张绪伟. 高精度网络化超声波热量表的研究[学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2010.
- 6 鞠文涛. 超声热量表的设计与研发[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- 7 吕国胜. 基于 ARM 的时差法超声波流量计设计[学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- 8 王伟智. 基于 TMS320 超声波流量计测控平台开发[学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- 9 江杰, 罗长海. 超声波流量计换能器参数的选择. 自动化仪表, 2011, 33(10): 76-79.
- 10 梅海舟. 基于 TDC-GP21 型超声波流量计的开发与研究[学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- 11 丁凤林, 李宗良, 魏延明, 等. 小管径高精度超声波流量计设计. 空间控制技术与应用, 2011, (1): 28-32.
- 12 张臣国. 小波分析在信号降噪中的应用研究[学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- 13 崔治. 小波分析在超声检测信号处理中的应用研究[学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- 14 吕海鸥. 基于小波神经网络的小管径超声波流量测量的研究与实现[学位论文]. 淄博: 山东理工大学, 2011.
- 15 苑津莎, 张冬雪, 李中. 基于改进阈值法的小波去噪算法研究. 华北电力大学学报, 2010, 37(5): 92-97.