

◇ 研究报告 ◇

时差法超声波流量计测量精度的补偿方法^{*}

郭 涛 王志强[†] 李 成

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 超声波时差法测量精度的提高, 不仅使流量计的测量值更加准确, 更能满足工业生产监控的智能化及自动化的需求。文中对时差法流量计的测量原理以及影响因素进行分析, 结合超声波接收原理, 设计了过零检测电路结构, 并在顺逆流的时间差的测量问题上, 应用互相关算法, 完成对时间测量的自补偿。实验结果显示: 在采取以上补偿方法后, 能有效改善流量计精度, 时差测量误差小于 0.8%, 并提高了测量实时性。

关键词: 超声波; 时差法; 过零检测; 互相关; 自补偿

中图法分类号: TH814

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2021)02-0269-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.02.014

Compensation method for measuring accuracy of transit-time ultrasonic flowmeter

GUO Tao WANG Zhiqiang LI Cheng

(Key Laboratory for Electronic Testing Science and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The improved measurement accuracy of the ultrasonic time difference method not only makes the measured value of the flowmeter more accurate, but also meets the needs of intelligent and automated industrial production monitoring. The paper analyzes the measurement principle of compensation method for flowmeter and influencing factors. Combined with the principle of ultrasonic reception, the zero-crossing detection circuit structure is designed, and the cross-correlation algorithm is applied to the measurement of the time difference between the forward and reverse currents to complete the self-compensation for the time measurement. The experimental results show that after the above compensation method is adopted, the accuracy of the flowmeter can be effectively improved, the measurement error of transit-time method is less than 0.8%, and the real-time measurement is improved.

Keywords: Ultrasonic; Transit-time method; Zero crossing detection; Cross-correlation; Self compensation

2020-05-30 收稿; 2020-09-11 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (51975541)

作者简介: 郭涛 (1971-), 男, 山西临汾人, 硕士, 研究方向: 微机电系统微器件设计制造和微传感器集成的研究。

[†]通信作者 E-mail: 860991610@qq.com

0 引言

随着各领域的技术革新,能源计量、环境保护、交通运输等应用领域对流量测量需求的牵引,使得流量计的使用量迅速增长。使用传统流量计对工业流体流量进行测量时,受管道和流量计自身工作要求的限制,存在着制造运输困难、造价过高以及调试安装不便等缺点。而超声波流量计可以通过非接触式测量方法即在管道外壁安装,不会带来管道堵塞和能量损耗等问题,且相较于传统流量计性价比比较高。其中,又以时差式超声波流量计最具发展潜力。超声波流量计的测量精度涉及领域广,较为复杂。其中,顺流和逆流的时间差直接决定了时差式超声波流量计系统的测量精确度。因此准确地计算出时间差是整个测量系统需要处理的关键问题^[1-2]。

1 时差法测量原理

超声波流量计的两个换能器以固定角度安装在管道两侧,通过系统控制换能器切换发射和接收工作状态,测量超声波在管道内顺逆流下的传播时间,再由公式计算得出流量值。其工作原理如图1所示^[3-4]。

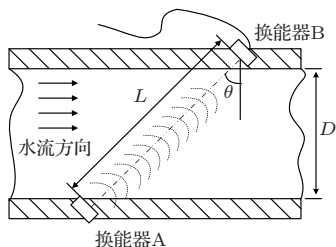


图1 超声波流量计工作原理

Fig. 1 Working principle of ultrasonic flowmeter

结合时差法流量计的工作原理,瞬时体积流量计算公式推导如下:

顺流时间 t_s 公式为

$$t_s = L / (c + v \sin \theta), \quad (1)$$

式(1)中, L 为探头垂直距离, v 为流体流速, θ 为声道角, c 为流体中超声波速。

逆流时间 t_n 公式为

$$t_n = L / (c - v \sin \theta). \quad (2)$$

联立式(1)、式(2)及 $L = D / \cos \theta$,得到公式(3):

$$v = \frac{D}{2 \sin \theta \cos \theta} \left(\frac{1}{t_s} - \frac{1}{t_n} \right). \quad (3)$$

对管道中流体流速进行分布补偿后,得到瞬时体积流量 q_Q 计算公式为

$$q_Q = v \pi D^2 / (4K), \quad (4)$$

其中, K 为线流速转化为面流速的补偿系数。

由计算公式可知,测量顺逆流时的绝对传播时间就成为提高流量计精度的直接因素。

2 信号处理方法探究

2.1 过零检测

根据超声波换能器的工作原理,接收信号的频率大小等于换能器固有频率且固定不变,即过零点的位置由介质声速、流速所导致的信号传播时间决定,而不随波形形状变化,为过零检测信号提供了条件。为了排除换能器起振和介质性质的影响因素,通过参考电平芯片和比较器芯片设计了阈值电压电路和锁存电路,获取超声波传播时间。

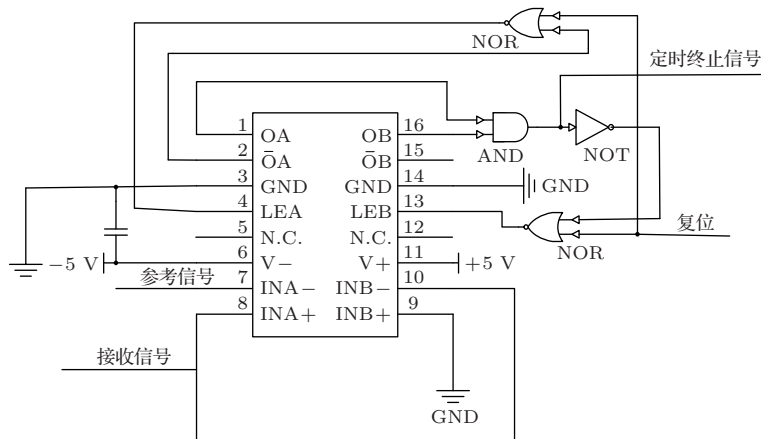


图2 过零检测设计电路

Fig. 2 Zero-crossing detection design circuit

如图2所示,选用一个双通道比较器芯片,将放大滤波后的接收信号接到芯片A通道的INA+和B通道的INB-上。利用信号锁存使能端LE的锁存功能,进行零点位置的确定。首先通过A通道进行阈值电压的判断,当接收信号的幅值超过参考电平时,OA端输出锁存为高电平。然后再通过B通道得到相邻的下一个出现的过零点,同时进行锁存为高电平。这样就得到在过零点前保持低电平、过零点后保持高电平的波形,便于后续的计时模块进行信号时间处理。具体信号处理过程如图3所示,其中 r 为阈值电压, $V+$ 为参考电压^[5]。

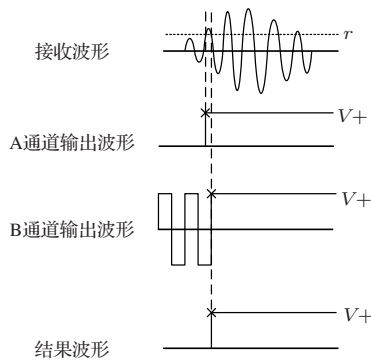


图3 过零检测信号处理波形图

Fig. 3 Zero-crossing detection signal processing waveform

实际中系统不能准确采样到首个过零点,同时,当外界对波形产生干扰时,造成阈值电压在判断波形出现时的时机不当问题,进而影响后面的过零点锁存。

2.2 互相关算法

传统的互相关检测法利用互相关计算信号时延的原理进行传播时间的计算,对噪声的免疫性是其最大的优点。其中,传播时间为超声波换能器发出激发脉冲信号到超声波接收到信号的时间。

基于超声波的特点,典型的超声波信号可以由公式(5)表述:

$$r_i(t) = \alpha_i s(t - \tau_i) + n_i(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (5)$$

其中, $s(t)$ 为超声波换能器的发射信号, τ_i 为时间延迟, α_i 为衰减因子, $n_i(t)$ 为与 $s(t)$ 不相关的零均值高斯白噪声, T 为信号观测时间。

对于参考信号和回波接收信号 $r_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 可表述为

$$\begin{cases} r_1(t) = \alpha_1 s(t - \tau_1) + n_1(t), \\ s_2(t) = \alpha_2 s(t - \tau_2) + n_2(t), \end{cases} \quad 0 \leq t \leq T. \quad (6)$$

离散化处理后可得^[6]

$$\begin{cases} r_1(nT_s) = \alpha_1 s(nT_s - N_1T_s) + n_1(nT_s), \\ s_2(nT_s) = \alpha_2 s(nT_s - N_2T_s) + n_2(nT_s), \end{cases} \quad (7)$$

其中, $0 \leq n \leq N$, T_s 为采样间隔, $T = NT_s$, $\tau_1 = N_1T_s$, $\tau_2 = N_2T_s$ 。

在确定 $r_1(nT_s)$ 、 $s_2(nT_s)$ 的情况下,对这两个序列进行相关运算,得到

$$R_{rs}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r_1(kT_s) s_2(kT_s + \tau), \quad (8)$$

其中, $R_{rs}(\tau)$ 为互相关计算结果。通过求解相关函数的最大值,即可求得两信号的时差 τ 。其具体的工作原理如图4所示。

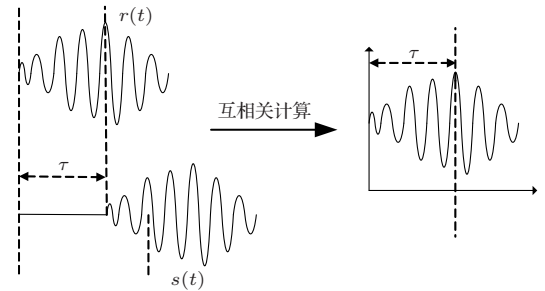


图4 互相关算法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of cross-correlation algorithm

为减少计算量,华志斌^[7]通过引入极性相关算法来达到类似的效果,但在实际系统中仍然运算量较大,系统的实时性不好。

2.3 分析应用

对于使用超声波流量计检测的管道内部来说,液体流速的变化在短时间内不存在突变,相邻两次的波形对于外部干扰的问题不敏感,对于互相关的计算存在先天优势。文中将上一次的接收信号存储并作为参考信号,与本次的接收信号进行互相关计算。在过零检测方法中已经得到一个过零点时间值,结合互相关算法再对这一数据做验证和补偿。具体工作原理如图5所示。

假设发射换能器的发射波形时间为 t_0 ,由过零检测得到的过零点时刻值为 t_z ,由互相关算法得到

的时间位移为 τ , 顺流或逆流下的时间差测量方式相同, 分别设为 t_s 、 t_n , 则

$$t_s(t_n) = t_z + \tau - t_0 - t_{\text{correction}}, \quad (9)$$

其中, $t_{\text{correction}}$ 为修正时间, 包括管壁误差、电路延迟以及流体流态等造成的影响时间 [8]。

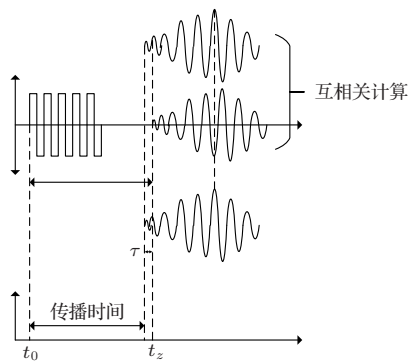


图5 时间差自补偿原理图

Fig. 5 Schematic diagram of time difference self-compensation

当零点取值因干扰的出现较为靠后时, 与参考波形做互相关算法时, 移位时间 τ 为负值; 当零点取值靠前时, 移位时间值 τ 为正值。过零检测所存在的误差总会被互相关算法所补偿, 从而保证了测量得到时间差的准确性。同时, 计算量得到大幅减少, 增强了系统的实时性。

3 实验验证

由于文中研究的重点是提高超声波测量计的时间差测量的准确度, 所以为避免管道、流体流态等不可控因素的干扰, 验证时采用改变超声波探头的距离来进行。因实验在空气中进行, 超声波的波速定为 341.3 m/s。将发射探头固定, 换能器的激励脉冲信号的频率为 40 kHz, 调整接收探头距离位置, 保证发射接收电路以及过零检测电路的参数不变。实验中初始距离为 3 cm, 每次增加 2 cm, 多次测量。通过采样电路对接收信号进行采样并导入数据分析软件进行相关性计算, 得到 τ 值。同时, 将本次的采样信号作为下一次测量计算的参考波形。根据公式 (9) 计算得出测量值。

图 6 为接收换能器接收到超声波信号后的采样后处理图像。如图 7 所示, 通过计算, 得出此例接收波形与参考波形相关性的 τ 值绝对值为 85 ns。实验

中将计算得到的传播时间定义为对比值, 实验得到的传播时间为测量值, 测量结果如表 1 所示。由表 1 可知, 误差较为稳定且普遍小于 0.8%; 首次测量时, 系统参考波形参数设置没有基于实际情况, 会选用某一波形作为参照波形, 这也导致首次互相关计算时比之后的值误差较大, 因此在表 1 中第一个测量值的误差会达到 0.73%。

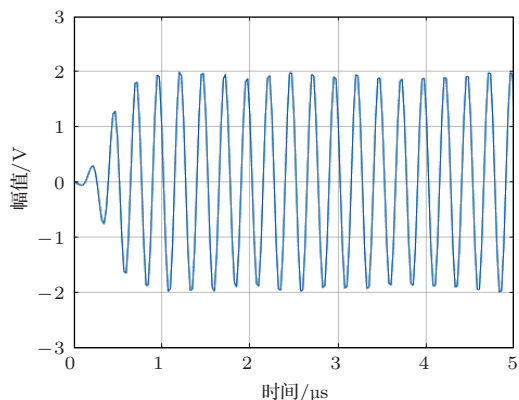


图6 超声波参考信号

Fig. 6 Ultrasonic reference signal

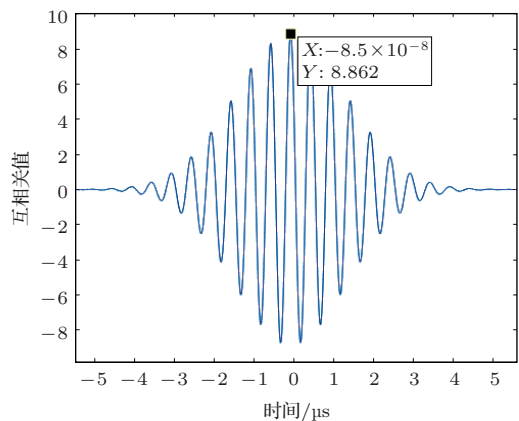


图7 超声波互相关计算

Fig. 7 Calculation of ultrasonic cross-correlation

表 1 实验测量数据

Table 1 Experimental measurement data

测量距离/cm	对比时间差/ μ s	测量值/ μ s	误差/%
3.0	87.90	87.26	0.73
5.0	146.50	146.33	0.12
7.0	205.10	205.02	0.04
9.0	263.70	263.65	0.02
11.0	322.30	322.24	0.02
13.0	380.90	380.86	0.01

4 结论

文中研究了超声波时差法测量管道顺逆流时间的问题,在过零检测的基础上,提出了互相关自补偿的测量方式。通过过零检测电路实现零点检测,对超声波参考波形和接收波形进行采样,并进行互相关补偿计算,保证实时性的同时,提高测量准确性。通过对比实验测量数据与理论值,经过计算误差均小于0.8%,验证了此方式下提高超声波流量计准确度的可行性。

参 考 文 献

- [1] 晁智强, 盛锋, 韩寿松. 时差法超声波流量计误差分析与研究[J]. 液压与气动, 2009(6): 64–67.
Chao Zhiqiang, Sheng Feng, Han Shousong. Error analysis and study on transit-time ultrasonic flowmeter[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2009(6): 64–67.
- [2] 王永波, 陈艳, 陈锦玉, 等. 液体超声波流量计实流标定难点与解决方案[J]. 化工自动化及仪表, 2018, 45(12): 929–932.
Wang Yongbo, Chen Yan, Chen Jinyu, et al. Difficulties in calibrating liquid ultrasonic flow meter and solutions to them[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2018, 45(12): 929–932.
- [3] 袁易全, 陈思忠. 近代超声原理与应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1996: 260–272.
- [4] 陈国宇, 刘桂雄. 时差式超声流量计单声道结构分析[J]. 中国测试, 2018, 44(3): 73–77.
Chen Guoyu, Liu Guixiong. Structure analysis of single-path transit-time ultrasonic flowmeter[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(3): 73–77.
- [5] 刘敦利, 蔡勤. 管道对超声波流量计计量准确度的影响分析[J]. 中国测试, 2014, 40(4): 42–44.
Liu Dunli, Cai Qin. Analyses of pipe affection on measurement accuracy of ultrasonic flowmeter[J]. China Measurement & Test, 2014, 40(4): 42–44.
- [6] 江境宏, 刘桂雄, 黄坚. 基于离散时差检测的流量计不同步计数误差补偿技术[J]. 中国测试, 2017, 43(1): 23–26.
Jiang Jinghong, Liu Guixiong, Huang Jian. Asynchronous counting error compensation technique for flowmeters based on discrete time difference detection[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(1): 23–26.
- [7] 华志斌. 多声道超声气体流量计的精密测速技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [8] 汪伟. 基于可变阈值过零检测的气体超声波流量计信号处理方法与实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.