

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003822

# 基于相关法的低采样率超声水表时延估计方法\*

曾竞凯<sup>1</sup> 赵文龙<sup>1</sup> 娄嘉骏<sup>1,2</sup>

(1. 南昌航空大学 信息工程学院 南昌 330063; 2. 宁波水表(集团)股份有限公司 宁波 315038)

**摘要:**针对当前超声水表中相关法时间分辨率只能达到采样周期的问题,提出了一种基于相关法的低采样率超声水表时延估计方法。首先,研究了超声水表中所能达到的最大时间延迟;其次,讨论了相关法在超声水表当中的具体应用及插值算法对于提高流量测量精度的作用;最后,利用 MATLAB 软件对算法进行仿真评估了实际噪声条件下算法能达到的时延估计精度并搭建流量计量系统证明算法的有效性。仿真结果表明,在超声换能器频率为 1 MHz、采样频率为 4 MHz 的情况下,时延估计的平均绝对误差在百皮秒内。表明该算法能在较低的采样频率下实现高精度的时延估计,在时延估计精度上比传统相关法更具有优越性。

**关键词:** 超声水表;相关法;数字信号处理;傅里叶变换;抛物线插值;时延估计

**中图分类号:** TP312 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Low-sampling rate ultrasonic water meter time delay estimation method based on correlation method

Zeng Jingkai<sup>1</sup> Zhao Wenlong<sup>1</sup> Lou Jiajun<sup>1,2</sup>

(1. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Ningbo Water Meter Co., Ltd, Ningbo 315038, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the temporal resolution of correlation method in ultrasonic water meter can only reach the sampling period, a time delay estimation method based on correlation method with low sampling rate is proposed. Firstly, the maximum time delay in ultrasonic water meter is studied. Secondly, the specific application of correlation method in ultrasonic water meter and the function of interpolation algorithm to improve the accuracy of flow measurement are discussed. Finally, MATLAB software is used to simulate the algorithm and evaluate the estimation accuracy of the algorithm under the condition of actual noise, and the flow measurement system is built to prove the effectiveness of the algorithm. The simulation results show that the average absolute error of time delay estimation is within 100 picoseconds when the frequency of ultrasonic transducer is 1 MHz and the sampling frequency is 4 MHz. It is shown that the proposed algorithm can achieve high precision delay estimation at low sampling frequency and is superior to the traditional correlation method in the accuracy of delay estimation.

**Keywords:** ultrasonic water meter; correlation method; digital signal processing; fourier transform; parabolic interpolation; delay estimation

## 0 引言

超声水表是一种无阻流元件、可以做到零压损的非接触式水表<sup>[1]</sup>。其关键的参数是超声波飞行时间差,测量超声波飞行时间差有多种方法,阈值法<sup>[2]</sup>、相位差法<sup>[3]</sup>

及相关法<sup>[4]</sup>。因对于测量稳定性及抗干扰的考虑,本文以相关原理来测量超声波飞行时间差。

针对相关法进行时延估计问题,诸多文献提出了一系列的解决方法。文献[5]提出一种高采样率并使用二分法搜索相关函数峰值的解决方案,但是该方法需要的硬件条件较高。文献[6-8]提出了一种对采样信号进行

插值再进行相关计算的方案,一定程度上提高了时延估计的精度,但是也大大增加了相关计算的运算量。文献[9-10]提出了一种提取超声信号的包络,再对包络信号进行奇异点检测的方法,虽然该方法计算简单,但是精度较低。

本文根据超声信号为前后端幅值减小的正弦信号及超声水表中最大时间延迟在  $1 \mu\text{s}$  内等特点。提出一种基于相关法的低采样率超声水表时延估计方法。与传统相关法相比,本文的方法在进行相关计算后再采取插值处理,降低了相关法时延估计的运算量。

## 1 超声水表工作原理

超声水表的工作原理<sup>[11]</sup>如图 1 所示,在水流经过管道的时候超声换能器<sup>[12]</sup>1 发射一束超声波经反射片反射后传播到超声换能器 2 处,由超声换能器 2 接收,超声波经过换能器 1 到达换能器 2 的传播时间记为  $T_{12}$ <sup>[13]</sup>。则有:

$$T_{12} = \frac{L}{c+v} + \frac{2r}{c} \quad (1)$$

式中: $L$ 为两反射片之间的距离; $c$ 为声音在水中的传播速度; $v$ 为水的流速; $r$ 为管道半径。

同理,超声波由换能器 2 到达换能器 1 的传播时间记为  $T_{21}$ ,则有:

$$T_{21} = \frac{L}{c-v} + \frac{2r}{c} \quad (2)$$

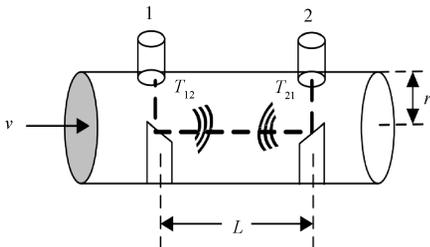


图 1 超声水表原理

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic water meter

由式(1)和(2)可得超声波飞行时间差  $\Delta T$  为:

$$\Delta T = T_{21} - T_{12} = \frac{2Lv}{c^2 - v^2} \quad (3)$$

因声速  $c$  远大于水的流速  $v$ ,故式(3)可化简为:

$$\Delta T = \frac{2Lv}{c^2} \quad (4)$$

由式(3)可得声道上水的流速  $v$  为:

$$v = \frac{\Delta T c^2}{2L} \quad (5)$$

再根据管道的截面积和流量修正系数<sup>[14]</sup>即可得到

面平均速度及当前流量。因此在超声流量计量中最重要的就是得到超声波飞行时间差  $\Delta T$ <sup>[15]</sup>。

## 2 相关运算

在相关法的实际应用中,为了使参与相关运算的数据都是有意义的,通常根据声速及声距提前计算超声波从触发到接收的大概时间,把触发超声信号后到下一个换能器接收到超声信号前的这段时间设置为屏蔽时间,不进行信号采集。屏蔽时间过后再开始信号采集,此时采集到的信号为含有超声信号的有用信号,一方面排除了部分噪声信号的干扰,同时也减少了相关运算处理的数据量。若把超声波换能器 2 接收到的信号记为  $x(t)$ ,超声波换能器 1 接收到的信号记为  $y(t)$ 。当超声波的激发信号相同,理论上两个信号的波形特征相似,只是在时间轴上有间隔的两组信号。由相关理论可以计算这两个信号的相关函数为:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t+\tau)dt \quad (6)$$

对式(6)进行离散化,得:

$$R_{xy}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)y(i-j) \quad (7)$$

式中: $N$ 为采样点个数; $j = \{-N, -(N-1), \dots, N-1, N\}$ 。

超声水表的超声波信号在发送端为等幅的正弦信号,但是在接收端由于信号在水中传播过程的衰减,前后端的幅值减小,图 2 所示为示波器捕获到的接收的超声波信号波形。

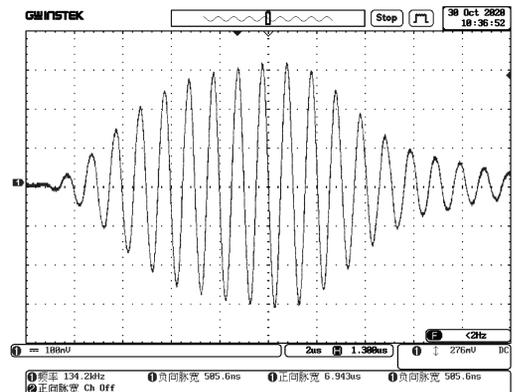


图 2 示波器捕获超声波波形

Fig. 2 The oscilloscope captures the ultrasonic waveform

以示波器采集的超声信号幅值为依据,构建仿真给定信号如图 3 所示。

根据奈奎斯特-香农采样定律,为了不失真地恢复模拟信号,采样频率应该不小于模拟信号频谱中最高频率的 2 倍。因此本文按照每个周期 4 个采样点的采集方式进行采样。由原始波形直接采集得到第 1 组数据,然后

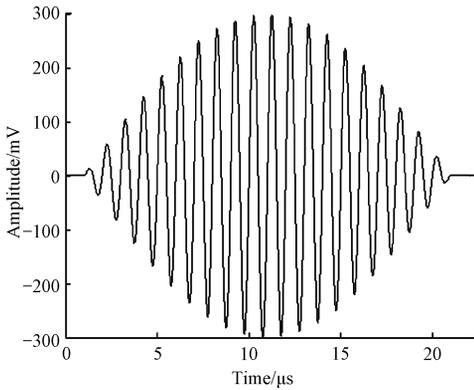


图3 仿真给定信号波形

Fig. 3 Simulate the given signal waveform

将波形左移 1/10 个采样点距离得到第 2 组数据。按照式(7)对两组数据进行相关计算得到离散的相关函数波形如图 4 所示。

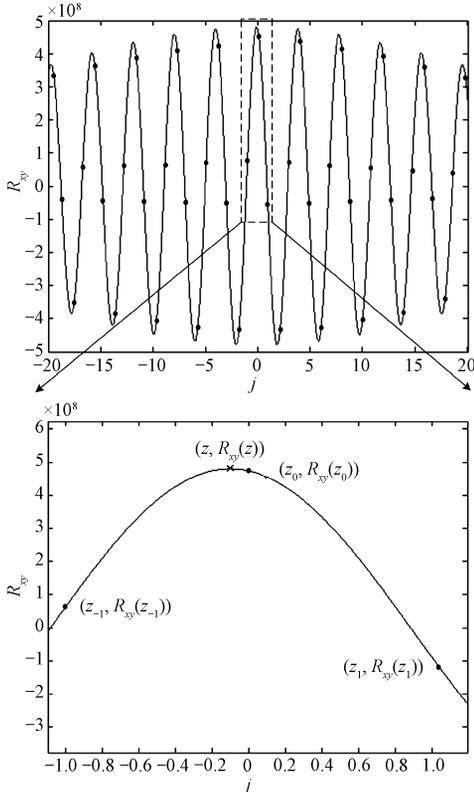


图4 相关函数波形

Fig. 4 Waveforms of correlation functions

如图 4 所示,使用离散信号进行相关运算后的相关函数为图中标记的离散点,其时间分辨率仅为采样周期 0.25 μs,达不到超声水表时延估计的要求。因此需要采用额外方法提高时间分辨率。

### 3 插值计算

根据奈奎斯特-香农采样定理,如果一个信号是带限的,且包含的最大频率小于奈奎斯特频率,然后信号的离散傅里叶变换包含足够的信息来准确地插值信号。这也允许精确地计算整数样本之间的互相关函数。根据计算的互相关函数的傅里叶系数,那么连续互相关函数<sup>[16]</sup>为:

$$R_{xy}(\tau) = S_{xy}(0) + \sum_{n=1}^{N/2-2} 2S_{xy}(n) e^{2\pi i \tau n/N} \quad (8)$$

式中:  $S_{xy}$  为  $R_{xy}$  的傅里叶变换。

随后便可以用数值方法来寻找最大值,连续抛物线插值是一个较好的选择。通常在少于 7 次迭代的情况下就可以得到  $1 \times 10^{-5}$  的精度。如果已知当前最大值的坐标,那么可以根据当前最大值点及其周围两点找到抛物线的峰值,令当前最大值点  $(z_0, R_{xy}(z_0))$ ,其左边一点为  $(z_{-1}, R_{xy}(z_{-1}))$ ,右边一点为  $(z_1, R_{xy}(z_1))$ ,则插值后的最大值横坐标为:

$$z = \frac{(z_0^2 - z_1^2)R_{xy}(z_{-1}) + (z_1^2 - z_{-1}^2)R_{xy}(z_0) + (z_{-1}^2 - z_0^2)R_{xy}(z_1)}{2((z_0 - z_1)R_{xy}(z_{-1}) + (z_1 - z_{-1})R_{xy}(z_0) + (z_{-1} - z_0)R_{xy}(z_1))} \quad (9)$$

将  $z$  代入式(9)可得点  $(z, R_{xy}(z))$ 。一般来说,仅通过一次插值计算,得到的极值点误差较大,因此把计算得到的点作为新的插值点,那么一定可以替代掉  $(z_{-1}, R_{xy}(z_{-1}))$  或  $(z_1, R_{xy}(z_1))$  其中的一个点,再次进行插值,如此反复进行,直到达到目标精度。若计算相关函数上一个点的时间复杂度为  $O(1)$ ,在需要进行  $n$  次相关运算和及插入  $m$  个值情况下,那么采用先插值后进行相关计算算法的时间复杂度为  $O(n \times m)$ ,而本文采用先相关运算再进行插值算法的时间复杂度为  $O(n+m)$ 。有效减少了运算量,提高流量计量的实时性。

### 4 相关参数计算及仿真结果

根据 JJG 162-2019《饮用冷水水表检定规程》,以 DN15 口径水表为例,其常用流量  $Q_3$  通常为  $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,而超载流量  $Q_4$  为  $Q_3$  的 1.25 倍,即  $3.125 \text{ m}^3/\text{h}$ ,因此可计算超载流量  $Q_4$  时管道中的流速。

$$v = \frac{3.125 \text{ m}^3/\text{h}}{\pi \times (0.0075 \text{ m})^2 \times 3600} \approx 4.912 \text{ m/s} \quad (10)$$

然后便可提前估算接收到的两组超声信号之间最大的偏移量,以此来限制相关运算的次数,剔除掉不必要的运算,降低运算量。当水温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时,超声波在水中的传播速度约为  $1481 \text{ m/s}$ ,DN15 口径超声水表声距普遍在

0.05~0.1 m,本文以 0.1 m 为例计算时延。

$$\Delta T_{\max} = \frac{0.1 \text{ m}}{1481 \text{ m/s} - 4.912 \text{ m/s}} - \frac{0.1 \text{ m}}{1481 \text{ m/s} + 4.912 \text{ m/s}} \approx 4.479 \times 10^{-7} \text{ s} \quad (11)$$

由式(11)可知,在普通情况下, DN15 水表正常工作时两组换能器接收到的超声波信号的时延结果小于 0.5 μs,结合换能器的频率便可计算出两列波偏移的周期数。当前市面上的超声水表采用的超声波换能器频率大多数为 1 MHz,即超声波波形的一个周期为 1 μs。在超声换能器的频率为 1 MHz<sup>[17]</sup>、采样频率为 4 MHz<sup>[18]</sup>的情况下,便可将式(7)中的 N 减小到±3,极大地降低了相关运算的计算量。

对本文的时延估计方法针对不同时延情况进行仿真。在实际情况下,采集的信号中存在着噪声,为此,本文以 MSP430FR6047<sup>[19]</sup> 单片机构建超声信号采集系统,以 4 MHz 采样频率对无超声信号和有超声信号的情况下进行信号采集,以验证噪声信号在实际超声信号中所占的比例。采集结果如图 5 所示。

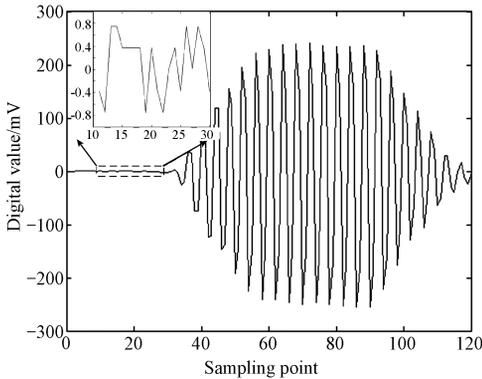


图 5 采集信号波形

Fig. 5 Acquisition of signal waveform

由图 5 可知,噪声 AD 信号的峰峰值为 1.75 mV,而在图 5 的超声信号数据由于采样频率的限制,不能直接观察到峰值所在,但是根据图 2 示波器捕获的超声波波形及超声信号为前后端幅值衰减的正弦波的特点<sup>[20]</sup>可以大致估计此时超声 AD 信号的峰峰值约为 600 mV,则可知噪声信号在采集的信号中所占比例为 0.29%。对给定仿真信号施加同比例的高斯白噪声,同时对不同迭代次数的抛物线插值进行仿真,计算了时间延迟从 0~0.25 μs 的仿真结果。并将计算结果与给定值比较,得出了 0~0.25 μs 的绝对误差分布。对绝对误差数据进行统计分析,结果如表 1 所示。

表 1 表明,连续抛物线插值计算结果在迭代次数 4 次以上时,精度不再有明显的增加,综合运算量及精度的考虑,最终连续抛物线插值的迭代次数选择 4 次。其误差分布如图 6 所示。

表 1 绝对误差数据统计结果

Table 1 Statistical results of absolute error data

迭代次数	平均值/ps	最小值/ps	最大值/ps
3	-35.8	-833.7	839.1
4	-11.1	-527.8	-457.8
5	6.74	-482	476.1
6	10.69	-462.2	538.3

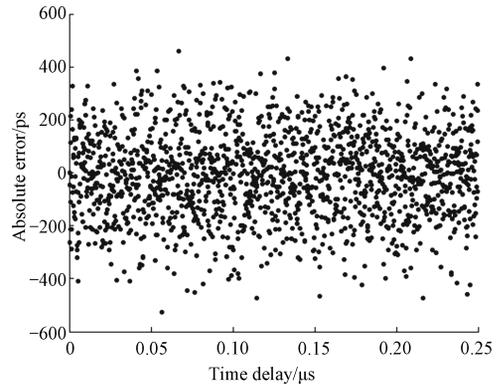


图 6 时延估计绝对误差分布

Fig. 6 Absolute error profile for delay estimation

在迭代 4 次的情况下,对所有误差结果进行统计分析,并绘制误差分布柱状图如图 7 所示。由图 7 可知,89.8%的绝对误差分布在±250 ps 以内,同时平均绝对误差 δ<sub>AVG</sub> = -11.1 ps。这表明该方法即使是在有噪声干扰的情况下,仍然保持了相当高的时延估计精度。

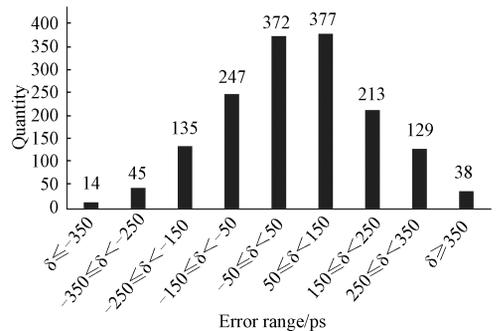


图 7 绝对误差分布柱状图

Fig. 7 Histogram of absolute error distribution

同时针对水表中换能器并非完全一致,激发的超声波幅值不等<sup>[21]</sup>的情况进行仿真。在两组超声波幅值相差 20%的情况下进行仿真,并绘制绝对误差分布,结果如图 8 所示。

与图 6 对比,幅值改变对于最后的误差没有产生太大的干扰,证明该算法对于信号整体的变化有着很好的抗干扰性,对于超声水表来说,这种特性对水表使用多年后的换能器老化或换能器差异造成的幅值差异有着重大意义。

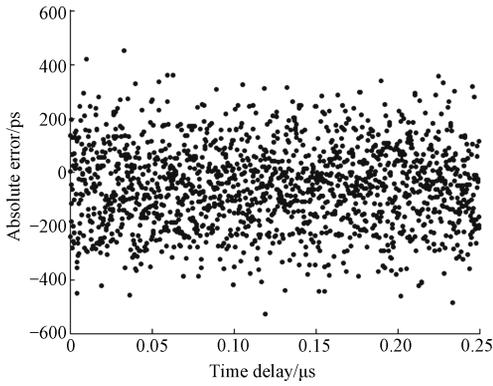


图8 模拟幅值衰减 20% 状态下绝对误差分布

Fig. 8 The absolute error distribution diagram is simulated under the condition of amplitude attenuation of 20%

### 5 信号处理算法实现

为了验证本文算法的有效性,基于 TI 公司的 MSP430FR6047 单片机及 DN15 口径管段构建流量计量系统。其他硬件模块包括超声换能器驱动模块、超声信号接收模块、液晶显示模块、铁电存储模块和光敏按键模块。

系统软件以 250 ms 时间间隔进行一次流量计算。软件流程如图 9 所示。

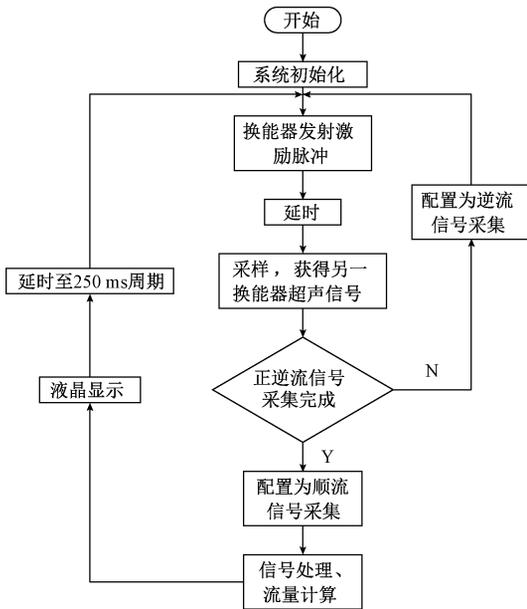


图9 软件流程

Fig. 9 The software flowchart

系统软件的工作过程为:系统上电后单片机对硬件资源进行分配、外设初始化及参数初始化;接着完成正、逆流信号的触发及采集;然后进行信号处理、流量计算;

最终把得到的流量数据在液晶上显示并等待下一采样周期。

### 6 实验结果

为考核该流量计量系统的计量精度。使用新力流量测试装置制造有限公司生产,精度为±0.2%的 XBT15-25BN 型号水表校验台进行测试。系统校准后测试结果如表 2 所示。

表 2 测试结果

Table 2 The test results

流量点/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	误差/%	重复性/%
	0.10	
3.125	0.12	0.024
	0.14	
	0.02	
2.5	-0.05	0.03
	-0.03	
	0.19	
1.667	-0.16	0.207
	0.08	
	-0.13	
0.833	-0.22	0.124
	-0.01	
	0.54	
0.016	0.22	0.325
	-0.01	
	-0.96	
0.01	-1.04	0.308
	-0.52	
	-1.55	
0.006	-1.12	0.544
	-0.63	

表 2 表明,当该流量计量系统 Q<sub>3</sub> 的数值选取 2.5 m/h, Q<sub>3</sub>/Q<sub>1</sub> 数值选取 400 时,流量高区最大误差为 -1.04%、最大重复性为 0.307%,流量低区最大误差为 -1.55%、最大重复性为 0.544%。满足 JJG 162-2019 饮用冷水水表检定规程中 2 级精度水表的相关要求。目前国内汇中等公司的超声水表 Q<sub>3</sub>/Q<sub>1</sub> 为 250,而基于相关法的低采样率超声水表时延估计方法计算量更小,能保证超声水表流量计量的实时性,并且 Q<sub>3</sub>/Q<sub>1</sub> 达到 400,有效提高了超声水表的量程比。

### 7 结论

本文提出了一种基于相关法的低采样率超声水表时延估计方法,用于解决传统相关法时间分辨率只能达到采样周期的问题。实验结果表明,本文的时延估计方法

能在较低采样频率情况下实现对时间延迟的计算,有效地降低了传统相关法对硬件的需求。对相关计算后的相关函数进行插值计算,有效地提高了时延估计的精度,在与真实环境相似的情况下达到了百皮秒级的平均绝对误差精度。针对换能器老化或者差异造成的幅值差异情况,时延估计精度不变,表现出良好的抗干扰能力。基于 MSP430FR6047 单片机及 DN15 口径管段的流量计量系统实现了流量的计量功能,验证了基于相关法的低采样率超声水表时延估计方法和系统的有效性。提高噪声条件下的时延估计精度将是今后的主要研究方向。

### 参考文献

- [ 1 ] YU G P, MA X M. Economy value of high precision ultrasound flowmeter [ J ]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1237(2) :022009.
- [ 2 ] 章涛,赵伟国,章圣意. 气体超声流量计回波信号的自适应阈值法研究[ J ]. 传感技术学报, 2018, 31( 12 ): 1853-1857.  
ZHANG T, ZHAO W G, ZHANG SH Y. The self-adaptive threshold method of echo signal for gas ultrasonic flowmeter [ J ]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31( 12 ): 1853-1857.
- [ 3 ] 王革思,李柏松,丁坚. 相位差法超声波流量计的研制[ J ]. 信息技术, 2008, 32( 12 ): 108-110.  
WANG G S, LI B S, DING J. A new design for phase difference ultrasonic flowmeter [ J ]. Information Technology, 2008, 32( 12 ): 108-110.
- [ 4 ] 仲崇庆,杨录,张艳花. 高精度超声回波渡越时间算法研究[ J ]. 仪表技术与传感器, 2016( 3 ): 108-110.  
ZHONG CH Q, YANG L, ZHANG Y H. Algorithm study of high-precision ultrasonic echo signals [ J ]. Instrumentation Technology and Sensors, 2016 ( 3 ): 108-110.
- [ 5 ] 杨舟,韩宇杰,王红,等. 基于相关法的高精度超声波流量计的设计[ J ]. 自动化与仪表, 2011, 26( 5 ): 14-19.  
YANG ZH, HAN Y J, WANG H, et al. Design of ultrasonic flowmeter with high precision based on correlation algorithm [ J ]. Automation & Instrumentation, 2011, 26( 5 ): 14-19.
- [ 6 ] 刘园珍. 相关法超声流量计的研究[ D ]. 抚州: 东华理工大学, 2012.  
LIU Y ZH. Research on ultrasonic flowmeter with correlation method[ D ]. Fuzhou: East China University of Technology, 2012.
- [ 7 ] 周敏岚. 基于 WinCE6.0 的超声波气体流量计设计[ D ]. 南昌: 南昌大学, 2012.  
ZHOU M L. Design of ultrasonic gas flowmeter based on WinCE6.0[ D ]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [ 8 ] 汪洋. 相关法超声流量计设计及实验测试研究[ D ]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.  
WANG Y. Design and experimental test of ultrasonic flowmeter with correlation method [ D ]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [ 9 ] 贾佳,谷立臣. 基于超声流量计的包络互相关时延理论及仿真[ J ]. 自动化仪表, 2012, 33( 7 ): 53-55.  
JIA J, GU L CH. Envelope correlation delay theory and simulation for ultrasonic flow meter [ J ]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33( 7 ): 53-55.
- [ 10 ] 刘婷. 高温熔盐超声流量计的信号处理方法与技术研究[ D ]. 上海: 中国科学院研究生院(上海应用物理研究所), 2016.  
LIU T. Study on signal processing method and technology of ultrasonic flowmeter for high temperature molten salt [ D ]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [ 11 ] 荆刚. 超声流量测量关键技术研究[ D ]. 青岛: 山东科技大学, 2007.  
JING G. Research on key technology of ultrasonic flow measurement [ D ]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2007.
- [ 12 ] 孙景峰,刘慧英,舒蓉,等. 超声换能器时频域特性校准系统研究与实现[ J ]. 电子测量技术, 2016, 39( 9 ): 158-164.  
SUN J F, LIU H Y, SHU R, et al. Research and implementation of frequency domain characteristic calibration system for ultrasonic transducer [ J ]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39 ( 9 ): 158-164.
- [ 13 ] 张伦,徐科军,穆立彬,等. 基于超声回波信号包络拟合的信号处理方法[ J ]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33( 8 ): 194-201.  
ZHANG L, XU K J, MU L B, et al. Signal processing method based on ultrasonic echo signal envelope fitting [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33( 8 ): 194-201.
- [ 14 ] ZHANG H, GUO CH W, LIN J. Effects of velocity profiles on measuring accuracy of transit-time ultrasonic flowmeter [ J ]. Applied Sciences, 2019, 9( 8 ): 1648.
- [ 15 ] 贾惠芹,王成云,党瑞荣. 流体流速对超声波流量测量精度的影响及校准[ J ]. 仪器仪表学报, 2020, 41( 7 ): 1-8.  
JIA H Q, WANG CH Y, DANG R R. Effect on the flow velocity of ultrasonic flow measurement accuracy and calibration [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

- 2020,41(7):1-8.
- [16] WIENS T, BRADLEY S. A comparison of time delay estimation methods for periodic signals [J]. Digital Signal Processing, 2009, 17: 1-15.
- [17] 姚灵,左富强,王欣欣. 超声波换能器综合性能指标的建立[J]. 测试技术学报,2016,30(3):260-266.  
YAO L, ZHUO F Q, WANG X X. The exploration of establishment ultrasonic water meter transducer integrated performance index[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2016,30(3):260-266.
- [18] ZHU W J, XU K J, FANG M, et al. Variable ratio threshold and zero-crossing detection based signal processing method for ultrasonic gas flow meter [J]. Measurement, 2017, 103: 343-352.
- [19] 季青涛,殷兴辉. 基于 MSP430 的锁相环控制系统设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(8):99-102.  
JI Q T, YIN X H. Design of PLL control system based on MSP430 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016,35(8):99-102.
- [20] 李华. 管道流体流量的超声波测量方法研究[J]. 安徽科技,2020(5):47-49.  
LI H. Research on ultrasonic measurement method of pipeline fluid flow [J]. Anhui Science & Technology, 2020(5):47-49.
- [21] 王玉琢. 超声流量检测信号处理技术研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2019.  
WANG Y ZH. Research on signal processing technology of ultrasonic flow detection [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University,2019.

## 作者简介



**曾竞凯**,2018年于南昌航空大学获得学士学位,现为南昌航空大学硕士研究生,主要研究方向为嵌入式技术及应用。

E-mail:jk\_zeng@qq.com

**Zeng Jingkai** received his B. Sc. degree in 2018 from Nanchang Hangkong University.

Now he is a M. Sc. Candidate at Nanchang Hangkong University. His main research interests include embedded technology and application.



**赵文龙**(通信作者),1985年于南昌航空工业学院获得学士学位,1996年于浙江大学获得硕士学位,现为南昌航空大学教授,主要研究方向为嵌入式技术及应用。

E-mail:3347841990@qq.com

**Zhao Wenlong** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1985 from Nanchang Hangkong University, M. Sc. degree in 1996 from Zhejiang University. He is a professor at Nanchang Hangkong University now. His main research interests include embedded technology and application.



**娄嘉骏**,2005年于浙江大学获得博士学位,现为宁波水表(集团)股份有限公司技术副总监,主要研究方向为智能仪表、物联网技术及应用。

E-mail:ljj@chinawatermeter.com

**Lou Jiajun** received his Ph. D. degree in 2005 from Zhejiang University. He is the deputy technical director at Ningbo Water Meter Co., Ltd. His main research interests include smart meters, Internet of Things technology and applications.