

# 超声电子水表测量稳定性研究

裘晨

(宁波水表股份有限公司 宁波, 315000)

**摘要:** 本文主要从电子设计的角度, 对超声电子水表测量稳定性进行研究。首先介绍了超声电子水表的组成和时差测量法的基本原理, 提出影响超声电子水表稳定测量的几点要素, 并提出改良性能的方法。

**关键词:** 超声电子水表 设计优化 测量稳定性

## Research of measurement stability for ultrasonic electronic water meter

**Abstract:** This article mainly studies the measurement stability of ultrasonic electronic water meter from the perspective of electronic design. Firstly it introduces the composition of ultrasonic electronic water meter, the basic principle of time difference measurement method, then puts forward the elements that influence the measurement stability of ultrasonic electronic meter, and proposes the method of performance improvement.

**Keywords:** ultrasonic electronic water meter, design optimization, measurement stability

### 0 引言

超声电子水表是目前优于其它水表且比较先进的计量器具, 目前超声电子水表主要存在的问题是: 随着计量时间的推移, 以及温度、压力等环境的变化, 超声电子水表测量性能会发生变化, 导致计量不准确。本文从电子电路方面出发, 优化电子电路, 从而提高超声电子水表的测量性能。

### 1 超声电子水表组成与计量原理

本文超声电子水表主要由电子电路控制部分、塑料基表、超声波传感器组成。电子电路控制部分主要选用低功耗的单片机 (TI 公司的 MSP430449) 和高精度时间转换芯片 (TDC-GP22); 塑料基表选用高强度、耐老化、低蠕变、抗腐蚀、安全卫生的 PPS 材料, 其结构图如图 1 所示; 超声波传感器选用中心频率为 1MHz 的收发两用的压电陶瓷片。本文超声电子水表设计主要采用的测量原理是通过测量超声波在基表内顺流和逆流所经历的时间差来求得流体的流量。用时间差法求流体流速和流量, 如公式 (1) ~ (2) 所示<sup>[1]</sup>:

$$v \approx \frac{c^2 \Delta t}{2L_2} \quad (1)$$

$$qv = A(kv) = \frac{\pi D^2}{4} kv \approx \frac{\pi D^2 c^2}{8L_2} \bullet k \Delta t \quad (2)$$

从而得出累计流量:

式中:  $\Delta t$ : 超声波顺、逆向传播时间差;  $c$ : 超声波传播速度;  $v$ : 流体轴向平均线流速;  $L_2$ : 基表反射片之间超声波传播路径;  $D$ : 管道直径。

从式 (2) 可以看出: 累计流量与超声波传播速度以及测量时间差有关, 其中  $\frac{\pi D^2}{8L_2}$  仅与超声水表测量管的加工、装配准确度有关, 超声波速度随着温度变化曲线如图 2 所示:

### 2 测量不稳定性影响因素

流体是由大量的、不断地做热运动的分子构成, 它的密度会随着流体的状态 (即温度  $T$ 、压力  $P$ ) 而变化, 流场也会随着阻流件以及流体状态的改变而改变。从公式 (2) 可知, 流体的累计流量仅与传播时间以及超声

波波速有关，当传播时间和超声波波速发生变化时，会引起流体累计流量的测量值发生变化，导致水表测量稳定性能降低。同时，安装环境（电磁干扰、水表震动）等都会对电子产品产生一定的信号干扰，尤其对超声波传感器发出的弱信号干扰甚大，导致水表测量不稳定。增强抗干扰，提高超声电子水表测量性能，是超声电子水表发展的重点之一。

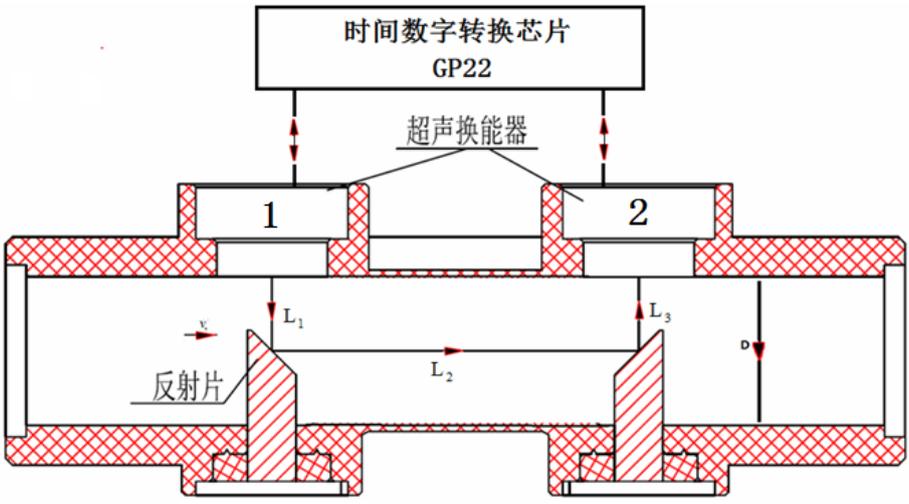


图1 塑料基表结构

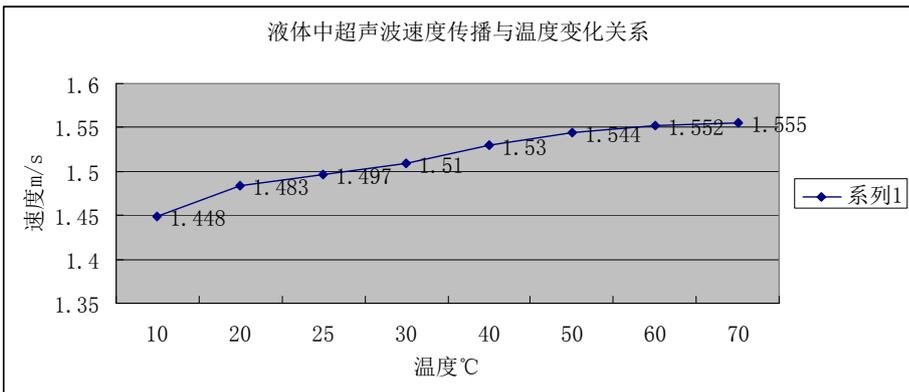


图2 超声波速度随着温度变化曲线

**2.1 温度影响**

温度对超声电子水表测量的影响比较大，主要由外部环境因素和内部环境因素决定。外部环境的主要影响因素是：当流体的温度升高时，体积膨胀，密度减小，随着温度的升高，流体状态加速变化，导致测量不稳定，与此同时，随着温度的变化，超声波在液体中传播速度发生变化；内部环境主要影响因素是：当温度升高时，超声电子水表中的流量传感器会发生一定的形变，随着水温的升高，超声波传感器的压电陶瓷片的贴片胶水会产生热胀，导致频率下降，压电陶瓷片的阻抗和电容也会发生一定的变化，从而导致超声波流量传感器的发射/接收幅值下降，其关系如图3所示<sup>[2]</sup>。同时，不同温度下声电转换的时间间隔也有所差别。

**2.2 压力影响**

压力对流体的影响较小，在5.0Mpa以下可以忽略不计，在流量测量中可以不用压力补偿，超声波传感器发射/接收幅值和压力的关系如图4所示<sup>[2]</sup>。但是，当压力增大过程中，压力元件的震动阻力增大，导致超声波流量传感器的发射/接收幅值下降，从而引起测量时间的变化。

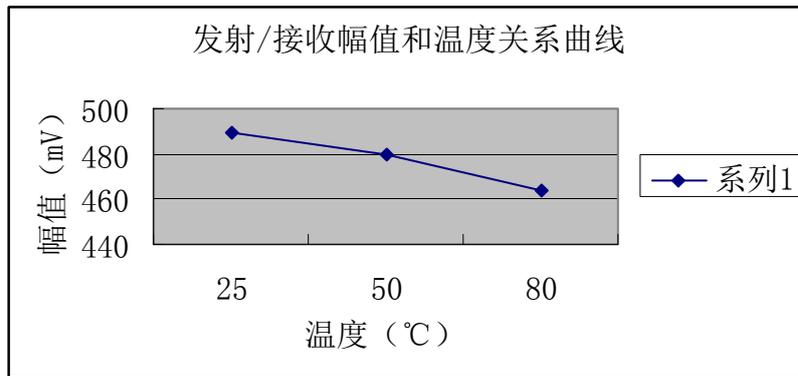


图3 发射/接收幅值和温度关系曲线

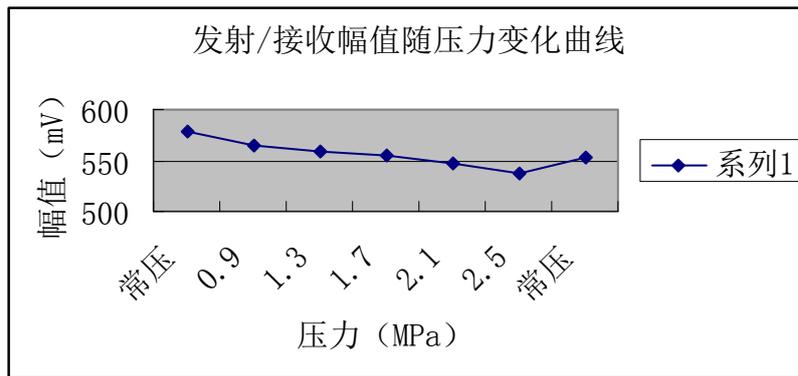


图4 发射/接收幅值和压力的关系曲线

### 2.3 流场影响

超声波电子水表在测量过程中，容易受阻流件的影响。图5为Ansys14.0的仿真结果，从图中可以看出，在反射片附近存在许多漩涡，如何处理好这些漩涡，对流量测量非常关键。同时，反射片的反射面越大，超声波发射/接收幅值越大，但是流场中漩涡也会增多，如何设计好反射片，也是做好基表的关键所在。

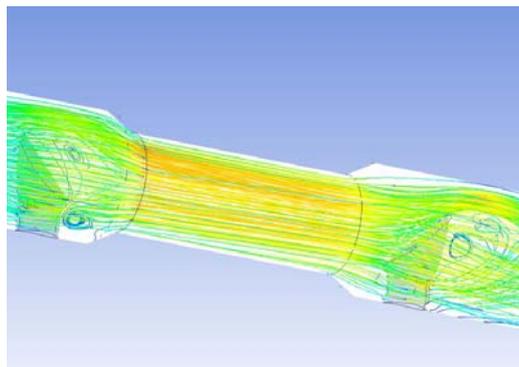


图5 Ansys14.0 流场仿真图

### 3、测量稳定性改进方法

考虑温度、压力等环境因素，本文从增加软件算法、提高硬件靠干扰能力以及选择良好的超声波传感器入手，来增强超声电子水表抗干扰能力，从而改善测量性能。

### 3.1 增加温度补偿功能

在电子电路设计中，增加温度检测模块，采用 DS18B20 直接采集流体温度，无需做任何数据处理，通过测量温度，再根据图 2 所示，调整超声波波速的温度系数，优化软件设计，合理控制误差范围，进行温度补偿。通过温度补偿的水表，可以达到 T30 标准<sup>[3]</sup>。温度补偿功能流程图如图 6 所示：

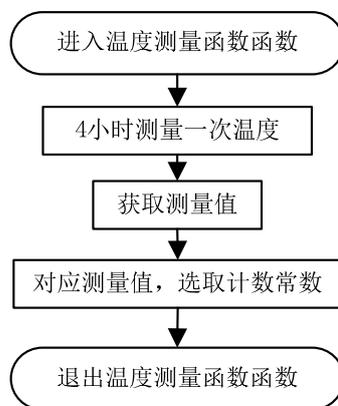


图 6 温度补偿功能软件流程图

### 3.2 增强软件滤波算法

超声电子水表时间测量时容易受安装环境、天气因素影响，针对以上原因，对采样数值采用中位值平均滤波法，结合超声电子水表低功耗的要求，选取 16 次采样数据，通过冒泡排序后去掉第 1、2、15、16 个数据，将剩余 12 个数据取平均值，再抽取第 5、7、9、11、13 次数据与平均值比较，设定比较阈值，大于阈值的数据剔除并用平均数据取代，选取阈值内的数据，再加上平均值，6 个数据进行取平均计算。这样的滤波方式可以消除随机数据的干扰，可消除由于脉冲干扰所引起的采样值偏差，采样数据相对稳定。软件处理步骤如下：

① 静水中随机采样 3 次顺逆流 16 次时间数据，以表 1-1 为例：

表 1-1 静水中采集 3 次顺逆流 16 次时间数据

组号	上游 T1	下游 T1	$\Delta T1$	上游 T2	下游 T2	$\Delta T2$	上游 T3	下游 T3	$\Delta T3$
1	16845831	16846689	858	16844104	16844166	62	16844082	16844124	42
2	16846190	16847518	1328	16844032	16844278	246	16844042	16844154	112
3	16847479	16847480	1	16844184	16844254	70	16844046	16844354	308
4	16847633	16847487	-146	16844122	16844038	-84	16844056	16844182	126
5	16847569	16847673	104	16844112	16844290	178	16844102	16844160	58
6	16846219	16846541	322	16844092	16844216	124	16844044	16844206	162
7	16846101	16846451	350	16844046	16844202	156	16844018	16844250	232
8	16847698	16847417	-281	16844068	16844148	80	16843098	16844198	1100
9	16847702	16847913	211	16844000	16844010	10	16844056	16844058	2
10	16846269	16846884	615	16843956	16844150	194	16844052	16844128	76
11	16846194	16846457	263	16844108	16844176	68	16844088	16844156	68
12	16847727	16847778	51	16844058	16844184	126	16844042	16844164	122
13	16847841	16847927	86	16844050	16844304	254	16843960	16844258	298
14	16846215	16846478	263	16844072	16844434	362	16844080	16844368	288
15	16846225	16846495	270	16844050	16844326	276	16844090	16844382	292
16	16847517	16847563	46	16843984	16844250	266	16844118	16844374	256

② 通过冒泡排序的方法，对于顺逆流的时间差进行排序，剔除第 1、2、15、16 组数据，见表 1-2。

表 1-2 静水中采集 3 次顺逆流 16 次时间数据

冒泡排序				剔除第 1、2、15、16 组数据			
组号	△T1	△T2	△T3	组号	△T1	△T2	△T3
1	-281	-84	2	3	1	62	58
2	-146	10	42	4	46	68	68
3	1	62	58	5	51	70	76
4	46	68	68	6	86	80	112
5	51	70	76	7	104	124	122
6	86	80	112	8	211	126	126
7	104	124	122	9	263	156	162
8	211	126	126	10	263	178	232
9	263	156	162	11	270	194	256
10	263	178	232	12	322	246	288
11	270	194	256	13	350	254	292
12	322	246	288	14	615	266	298
13	350	254	292	平均值	215.2	152	174.2
14	615	266	298	离散性	26.17		
15	858	276	308				
16	1328	362	1100				

③ 选取第 5、7、9、11、13 组数据，设定阈值  $< |200|$ ，超过 200 用平均数代替，见表 1-3。

表 1-3 数据处理

组号	△T1	与平均数差值	△T2	与平均数差值	△T3	与平均数差值
5	51	-164	70	-82	76	-98
7	104	-56	124	-28	122	122
9	215	0	156	156	162	162
11	215	0	194	194	174	0
13	215	0	152	0	174	0
平均数	160		139.2		141.6	
离散性	9.3					

备注：离散性计算根据给定样本的总体的标准偏差。

经过数据处理后，离散性  $9.3 < 26.17$ ，对后期粗大数据处理，有一定的滤波效果。

### 3.3 硬件电子电路处理

硬件电路中，存在模数信号，将模数信号用地先分开，同时与测量基表一并接地，形成系统，可以降低超声电子水表的测量误差。主要处理方式如下：

① 加大线路板铺地，将模拟地与数字地通过单点连接。

线路板本身铺地，以及模拟地与数字地分开铺地，对处在干扰信号不强的环境中的超声电子水表来说，测量性能影响不大，效果甚微，但是当外界存在干扰，尤其安装在强震动、强电磁波辐射的环境中，效果明显，在干扰的情况下，示波器波形如图 7 所示：



图 7 干扰环境下的收发波形

在这种情况下，干扰信号强于超声信号时，就是出现测量值的粗大误差，影响水表测量性能。若采用模数信号分开铺地，单点连接，则信号的接收波形如图 8 所示：

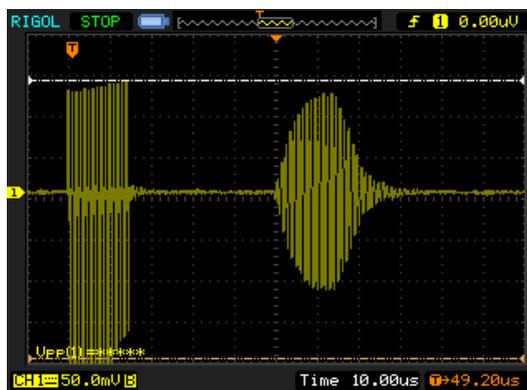


图 8 接地处理后的收发波形

从图 7 和图 8 可见，对硬件电路的处理好坏，会影响测量稳定性。

(2) 超声波传感器与线路板与基表一起接地，形成一个系统，对信号采样的影响。主要实验方式如下：恒定温度，选取线路板、传感器、表壳，分别对其进行分立安装和整体安装（一起接入线路板地线），分别观察 2 天，每半小时测量时间差数据。实验结果如图 9 所示：

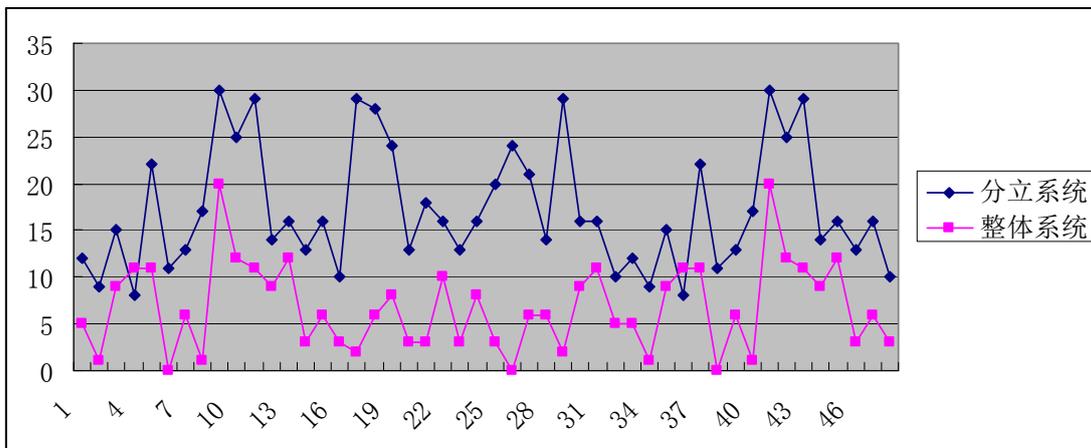


图 9 48 小时采集时间差

对采集数据进行分析，如表 1-4 所示，整体系统的信号采集数据，比较稳定。

表 1-4 数据分析

	分立系统	整体系统
平均	17.22916667	6.916667
标准误差	0.916863091	0.70449
中位数	16	6
众数	16	3
标准差	6.352213832	4.88085
方差	40.35062057	23.8227
峰度	-0.189484398	-0.35288
偏度	0.850470929	0.468559
区域	23	19
最小值	9	0
最大值	32	19
求和	827	332
观测数	48	48
最大(1)	32	19
最小(1)	9	0
置信度(95.0%)	1.844490596	1.417251

### 3.4 选择性能良好的超声波传感器

超声波传感器容易受压力、温度等影响，振动幅度发生变化，导致其振动频率、输出幅值发生变化。水表安装环境比较恶劣，在强振动以及电磁波干扰的环境影响下，超声波传感器发出的弱信号容易受到其他强信号的干扰，引入干扰信号。在高精度时间转换芯片(TDC-GP22)中，存在一个阈值，如果测量幅值降低，达不到阈值要求，就会出现测量偏差，很多超声电子水表测量不稳定，都是因为超声波传感器的发射/接收幅值处于测量阈值附近，当干扰进入时，测量结果发生变化；其次，随着时间的推移，超声波传感器自身老化，超声波传感器的发射/接收幅值会因为自身变化而降低。所以，选择性能良好的超声波传感器非常关键。对于超声波传感器的选择要求是：①高精度时间转换芯片(TDC-GP22)所设置的阈值在 $\pm 35\text{mv}$ 左右，考虑到外界环境的影响因素、传感器自身的老化因素以及超声电子水表的使用寿命，超声波传感器的最佳发射/接收幅值应选择大于 10 倍的阈值，超声波传感器的发射/接收标准波形如图 10 所示<sup>[4]</sup>；②在安装超声波传感器时，进行耐压测试，提早对其内部形变进行预测。

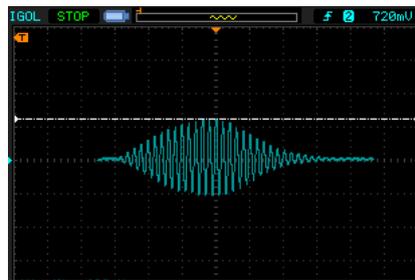


图 10 超声波传感器的发射/接收标准波形

## 3 总结

超声电子水表的性能容易受环境影响而引起测量不稳定，提高硬件电路板抗干扰能力，增加软件控制算法以及选取满足要求的超声波传感器，可以提高其测量性能。此外表壳因素、超声传感器匹配以及安装工艺都对测试性能有一定影响，将做进一步研究。

## 参考文献

- [1] 姚灵.电子水表传感与信号处理技术[M]. 北京：中国质检出版社，2012： 96~168.
- [2] 李现明. 超声波传感器的结构应用[M].北京：机械工业出版社，2010.
- [3] 曹磊.MSP430 单片机 C 程序设计与实践[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2007： 1~296.
- [4] ACAM.时间数字转换器 TDC-GP22，2012.

此文发表于《自动化与仪器仪表》，2015（3）。