

# 超声水表测量误差分析及处理

姚 灵

(宁波水表股份有限公司、浙江省水表研究院)

**摘要:** 超声水表在设计与制造过程中存在有原理性误差和因制造、使用不善等原因产生的误差。这些误差主要由系统误差和随机误差所组成, 其中系统误差可以在了解其变化规律基础上通过适当方法予以识别并校正, 而随机误差则应通过提高制造水平、采用数据处理等方法削弱其影响量。

**关键词:** 超声水表 测量误差分类 流量测量特性 误差分析与处理 测量特性校正

中图分类号: TH814.92

文献标识码: A

文章编号:

## Ultrasonic water meter measurement error analysis and processing

Yao Ling

(Ningbo Water Meter Co.,Ltd, Zhejiang Province Water Meter Reserch Institute)

**Abstract:** Ultrasonic water meter has the principle reason error, manufacturing and using error in the process of design and manufacture. These error is mainly composed of system error and random error, the system error can be corrected by understand its change rule, the random error can be weakened its influence by improving the level of manufacturing and adopting the method of data processing.

**Keywords:** ultrasonic water meter, measuring error sort, flow measurement characteristics, error analysis and processing, measurement characteristics correction

### 0 概述

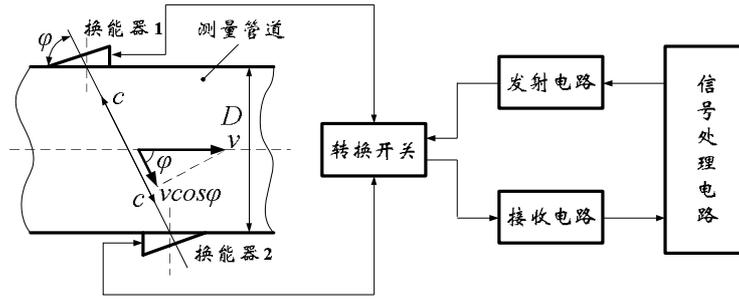
超声水表是目前技术相对成熟、正在推广使用的一种新型电子水表。超声水表在设计、制造和使用等过程中存在的各类误差, 都会集中反映到它的测量结果中。因此, 观察误差表象, 分析其产生原因, 抑制及消除误差, 对提高超声水表测量准确度是非常重要的。

超声水表的测量误差通常由系统误差和随机误差所组成。系统误差可以通过测量与分析将其识别并校正, 而随机误差则应通过制造水平提升及采用数据处理等方法将其抑制与削弱。

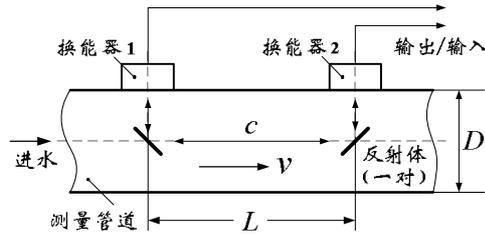
### 1 超声水表工作原理及测量不确定度分析

#### 1.1 工作原理

目前, 用于封闭管道饮用水计量的超声水表几乎均采用传播时间法 (transit-time) 原理进行工作, 算法上则以速度差法或时间差法为主。图 1 是超声水表换能器对射与反射安装时的测量原理图, 式 (1) ~ (4) 是速度差法和时间差法计算公式。



(对射式)



(反射式)

图 1 单声道超声水表测量原理图

超声水表时间差法计算线平均流速公式

$$v \approx \frac{c^2 \tan \varphi}{2D} \Delta t \quad (\text{对射式}) \quad (1)$$

$$v \approx \frac{c^2}{2L} \Delta t \quad (\text{反射式}) \quad (2)$$

超声水表速度差法计算线平均流速公式

$$v = \frac{D}{2 \sin \varphi \cos \varphi} \left( \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \right) \quad (\text{对射式}) \quad (3)$$

$$v = \frac{L}{2} \left( \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \right) \quad (\text{反射式}) \quad (4)$$

式中  $v$ —管道内被测介质（水）的线平均流速； $c$ —超声波在介质中的传播速度； $D$ —测量管道内径； $L$ —两反射片之间的中心距离； $\varphi$ —两换能器安装轴线与管道轴线之间的夹角； $\Delta t$ —超声波传播时间差（ $\Delta t = t_2 - t_1$ ）； $t_1$ 、 $t_2$ —超声波在介质中的正、逆向传播时间（即从换能器 1 或 2 至换能器 2 或 1 的传播时间）。

从上述公式可知，时间差法计算公式与超声波在介质中的传播速度  $c$  有关，因此当被测介质温度、压力等物性参数改变时，超声波传播速度就会随之改变，导致测量结果出现误差；而速度差法由于在公式中消去了声速项  $c$  的影响，通常情况下就不需要声速补偿了。

## 1.2 测量不确定度分析

以式(4)的反射式速度差法计算公式为例,对单声道超声水表的测量不确定度进行分析。式(5)是在式(4)基础上进行体积流量计算的公式

$$q_v = Sv = k_h \frac{\pi}{4} D^2 \frac{L}{2} \left( \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \right) \quad (5)$$

式中  $q_v$ —体积流量;  $S$ —测量管内圆截面积;  $k_h$ —流速分布校正系数。

不确定度主要来自以下三部分: 1) 流速分布校正系数  $k_h$ ; 2) 测量管的几何参数; 3) 测量时间。体积分量的相对不确定度是由其全微分方程除以  $q_v$  获得的, 见下式

$$\frac{dq_v}{q_v} = \frac{dk_h}{k_h} + 2 \frac{dD}{D} + \frac{dL}{L} + \frac{1}{(t_1 - t_2)t_1 t_2} (t_2^2 dt_1 - t_1^2 dt_2) \quad (6)$$

由于上述参数都相互独立, 因此各分项的平方(即各相对不确定度的平方)可以由下式表达

$$E_{q_v}^2 = E_{k_h}^2 + 4E_D^2 + E_L^2 + \frac{1}{(t_1 - t_2)^2} (t_2^2 E_{t_1}^2 + t_1^2 E_{t_2}^2) \quad (7)$$

式中  $E_{q_v}$ —体积分量相对不确定度;  $E_{k_h}$ —流速分布校正系数相对不确定度;  $E_D$ —管道直径相对不确定度;  $E_L$ —中心距长度相对不确定度;  $E_{t_1}$ —传播时间  $t_1$  相对不确定度;  $E_{t_2}$ —传播时间  $t_2$  相对不确定度。

这些不确定度通常是由管道内流场扰动、测量管道加工、信号检测、时间测量及处理等因素、技术、方法引起的, 如: 测量时受到横向(漩涡)流、脉动流、流速分布畸变、温度压力变化等干扰, 管道内壁粗糙度、管道尺寸及形状、环境电磁场、内部电子热噪声、电路计时分辨力、计时算法及计时启停点准确度等影响。

## 2 系统误差分析

系统误差是一种有确定性变化规律的误差, 因此可以通过修正或校正方法削弱其影响。构成超声水表系统误差的因素较多, 以下结合不确定度分析对主要影响因素予以分项讨论, 提出消除误差的方法。

### 2.1 线平均流速 $v$ 与面平均流速 $\bar{v}$ 之间的非线性误差

超声水表测得的流速值是超声波被测介质传播路径上线流速的平均值, 称为线平均流速  $v$ , 而评定管道流量用的流速则是面平均流速  $\bar{v}$ , 在不同雷诺数测量条件下它们之间具有某

种函数关系，见图 2。因而需要引入速度分布校正系数  $k_h$  来消除该项误差。

进行线、面平均流速校正的前提条件是，管道内的流速分布必须是经充分发展的对称流。

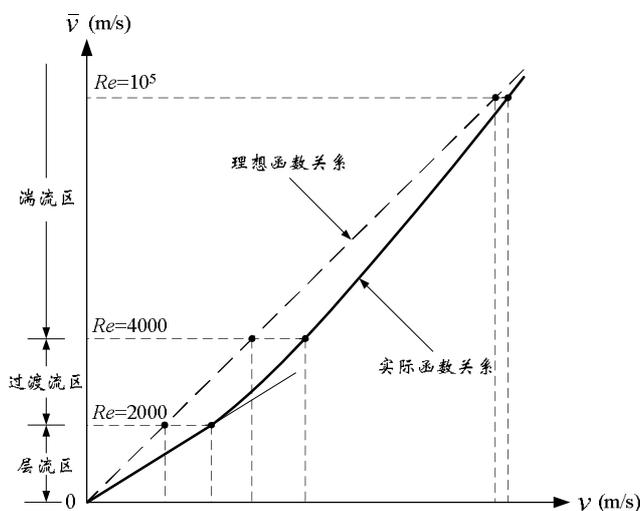


图 2 线、面平均流速之间的函数关系

当管道内流体流动处于层流状态（即雷诺数  $\leq 2000$ ）时，线平均流速与面平均流速之间的关系为

$$k_h = \frac{\bar{v}}{v} = \frac{3}{4} \quad (8)$$

当雷诺数  $2000 < Re \leq 4000$  时，流体流动处于过渡流状态，线与面平均流速之间没有固定关系。由于该区域很窄，通常可予以忽略；当雷诺数大于 4000 时，流体进入到湍流状态，线与面平均流速之间的关系改变为

$$k_h = \frac{\bar{v}}{v} = \frac{2n}{2n+1}; \quad n \approx 1.66 \lg Re \quad (9)$$

水表流量测量范围通常很宽，一般都能覆盖到上述三个流动区域。线与面平均流速在三个流动区域之间的函数关系见图 2。除了过渡流区域，其它两个区域均可通过设立校正系数将两者误差消除或削弱。

## 2.2 加工、装配误差

由式 (1) ~ (4) 可知，制造过程中因测量管内径  $D$ 、两反射片中心距离  $L$ 、换能器安装轴线与管道轴线夹角  $\varphi$  等参数偏离设计值，会使测量结果出现系统偏离的情况。因加工误差属系统误差范畴，可以用一校正系数予以修正。

## 2.3 管道内壁粗糙度影响

管道内壁过大的粗糙度会造成管道内径值和流速分布状态的变化。在湍流流动时，管壁粗糙度对流速分布很敏感，它会导致管内流速分布趋于弯曲，使先线、面流速校正出现偏差，

见图 3。内壁粗糙度的影响也可以通过改变校正系数予以修正。

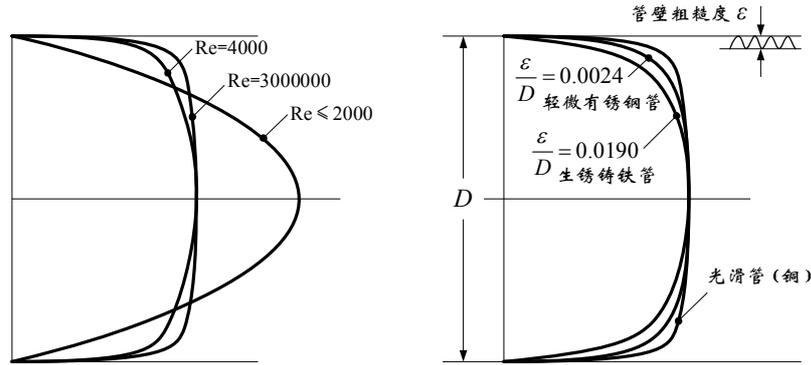


图 3 管壁粗糙度对流场分布曲线的影响

#### 2.4 超声波在非测量段传播时产生的时延误差

超声波信号在被测介质中的传播时间比较短，一般都在微秒（ $\mu\text{s}$ ）量级上，因此超声波沿导线、电子电路、换能器等非被测介质传播时产生的时延误差就不能忽略不计了。超声波经过这些部分的时延是个恒定值，同样可以采用校正方法将其予以修正。

#### 2.5 常压下温度变化引起的误差

假设管道内水的压力无突变，对于 T30 冷水水表而言，在额定工作范围内的温度变化接近为  $30^{\circ}\text{C}$ 。介质和环境温度变化会导致测量管几何形状发生一定的形变量，产生几何量误差。温度变化一般符合式（10）规律，因此可以通过检测管道内外温度变化对其几何尺寸及形状误差进行补偿

$$\frac{Q_{V(true)}}{Q_{V(meas)}} = (1 + \alpha \Delta T)^3 = 1 + 3\alpha \Delta T + 3(\alpha \Delta T)^2 + (\alpha \Delta T)^3 \quad (10)$$

式中  $Q_{V(true)}$  — 参比温度下测得的体积流量； $Q_{V(meas)}$  — 实际工作温度下测得的体积流量；

$\alpha$  — 热膨胀系数； $\Delta T$  — 温度变化范围。

由于式（10）高阶项是个微量，通常可以忽略，因此式（10）可以简化为

$$\frac{Q_{V(true)}}{Q_{V(meas)}} = 1 + 3\alpha \Delta T$$

如果超声水表采用 304 不锈钢用作测量管材料（其热膨胀系数  $\alpha = 17 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ），当工作温度偏离参比温度  $20^{\circ}\text{C}$  时，由此引起的系统误差一般不会超过 0.1%。所以只有当温度变化范围很大时才需要对超声水表进行温度补偿。

### 3 随机误差分析

随机误差没有确定的变化规律，但就误差的总体而言，却遵循某种统计规律。

### 3.1 计时分辨力不足引起的测量误差

目前性能较好的计时芯片其时间分辨力均在 20ps 左右，对于 DN20 小口径反射式水表而言，当被测最小流量  $Q_1=8L/h$ 、两反射片之间距离  $L=60mm$ 、超声波在常温水中的传播速度  $c \approx 1500m/s$  时，用式 (2) 可估算出超声波在介质中传播的最小时间差  $\Delta t$  约为

$$\Delta t = \frac{2L}{c^2} v \approx 360ps \quad (11)$$

由此可见，即使采用较好的计时芯片，由于其分辨力不足而造成的计数量化误差范围也已达到了 5.6%。考虑到计数量化误差是一种均匀分布的随机误差，因此可以采用多次连续采样求平均的方法减少其影响量。如采用 36 次采样平均作为一次测量结果值，其时间分辨力导致的测量重复性误差可以小于 1.0%。

$$\frac{5.6\%}{\sqrt{36}} = 0.93\%$$

多次连续求平均方法虽然牺牲了超声水表的测量实时性，也会增加电能消耗，但可以显著降低随机误差的影响，提高测量重复性。从另一方面看，水表不是流量计，它的功能侧重于累积流量的计量，对瞬时流量的实时性要求并不高。

### 3.2 计时脉冲结束时点 (stop 点) 不稳定产生的误差

由于环境干扰 (电磁或机械)、内部电子噪声、以及换能器输出幅值不稳定性等因素，会导致计时脉冲结束时点发生一定的偏移量。图 4 是换能器输出幅值显著下降后导致 stop 点严重偏离的情形。

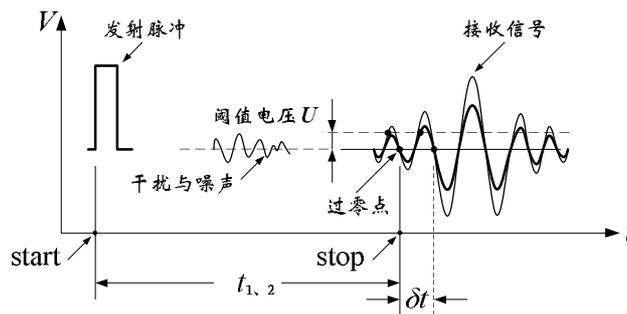


图 4 换能器输出幅值下降导致计时脉冲结束时点严重偏离

$\delta t$  属随机误差范畴，因此只能采用提高阈值电压、加强电磁屏蔽和接地、增加并稳定接收换能器输出信号幅值等方法来降低它的变化量。

当前，较先进的计时芯片都会采用时间窗技术，用以消除和削弱超声波在传播过程中受到干扰与噪声的概率；也会采用在接收脉冲中心区域的多个过零点求平均的方法使超声波传

播时间计时得更准确、更稳定，见图 5。

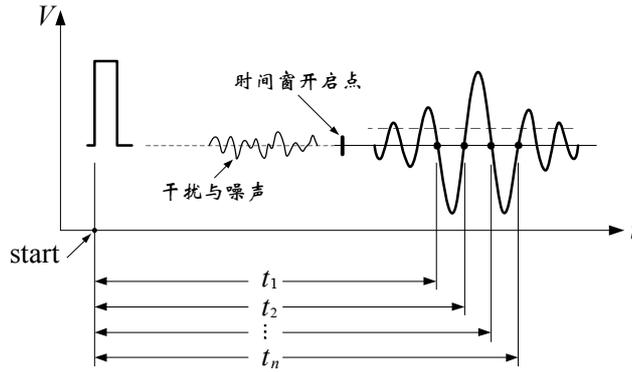


图 5 时间窗技术和多 stop 点求平均的方法

传播时间  $t_1$  或  $t_2$  的平均值可由下式决定

$$\bar{t}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \text{ 或 } \bar{t}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (12)$$

### 3.3 管道流动干扰的影响

超声水表测量管道内流体流动的畸变及扰动，如：围绕换能器端面附近的横向流动（漩涡）、轴向速度剖面形状的不确定性变化、管道内出现的瞬时脉动流、以及气泡（两相流）等情况，不能用确定性规律来描述，因此是一种随机性干扰。它们的存在会导致测量结果中出现随机性误差，使水表的测量重复性变差，见图 6。

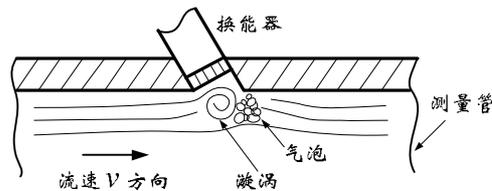


图 6 换能器端面附近横向流动及气泡示意图

对于上述流动干扰，可以通过增加水表前后直管段长度、安装流动整流器、采用多声道检测方式、改变换能器安装孔的设计方法等予以削弱和消除。

## 4 综合性能误差分析

超声水表的综合性能与其零流量输出特性（零漂）、测量误差校正方法、以及安装、使用环境优劣等情况有关。

### 4.1 零流量输出特性的影响

当被测管道内水的流量为零时（即流速为零），按照上述计算式超声波在液体介质中的

传播时间差也应为零。实际情况是，由于超声波在正向传播与逆向传播过程中除了途径液体介质外，还需经过换能器、电路和导线等非流体部分，由此产生的时延及由外部干扰和内部噪声对时延的综合影响机会是不相等的；另外，计时脉冲启动（start）和停止（stop）过程中对计时准确度的影响、以及计数量化误差等均能造成超声波正、逆向传播时间上的不一致。为简化起见，对式（1）或式（2）中的传播时间差用下式作进一步描述，

$$\Delta t = t_2 - t_1 = (t_2 + \varepsilon_2) - (t_1 + \varepsilon_1) \quad (13)$$

式中  $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_1$ —超声波正、逆向途径非流体部分时产生的时延、及由外部干扰和内部噪声对延迟产生的综合影响量、以及计时启停时点不确定性和计数量化误差等带来的影响；通常  $\varepsilon_2 \neq \varepsilon_1$ 。

当流量为零时，上式可改为，

$$\Delta t|_{v=0} = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \quad (14)$$

因此当超声水表输入为零时，水表仍有零位误差，它是由  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$  多次求平均后的均值  $\bar{\varepsilon}$  产生的，并且具有随机误差的属性。它的存在对大流量测量结果的影响不显著，但对小流量测量带来的影响则不可小觑，见图 7。

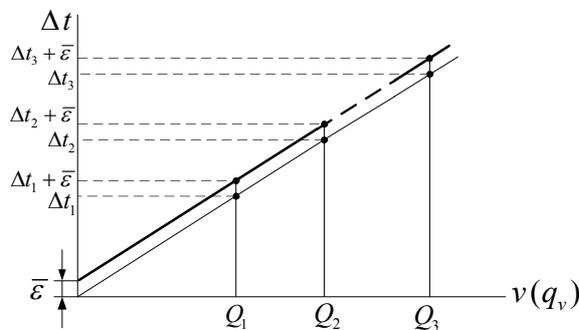


图 7 超声水表输入-输出部分特性图

由  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$  ( $\bar{\varepsilon}$ ) 造成的零位误差不能太大，否则会给分界流量和最小流量附近的示值带来较大的影响。因此应选用高稳定性计时芯片，采用降低外部干扰、正确的计时启停时点、以及多次平均求结果等方法来减少零位误差对测量结果的影响。

#### 4.2 特性校正引起的误差

超声水表测量得到的线平均流速与评定其测量结果的面平均流速之间存在着严重的非线性，需要通过校正方法将其校正到线性状态，见图 8。校正方法既可采用式（8）、式（9）的系数和关系式，也可采用分段（独立或关联）校正、拟合直线校正及神经网络校正等方法。

但任何一种校正方法都有它的局限性，也会带来某种风险和误差，如：过渡流区流体流动分布的不确定性易导致校正系数的失效，分段特性校正导致测量误差曲线的不连续，水表特性不稳定致使局部校正区域示值超出期望值等。因此，在设计和选用校正方法时需要综合考虑和评估，尽量保持特性校正的可靠性。

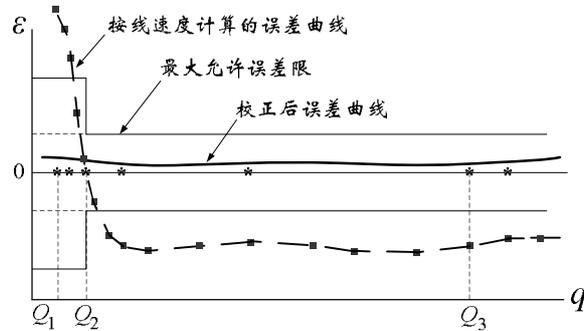


图 8 超声水表误差曲线校正效果图

#### 4.3 使用条件带来的影响

超声水表在使用过程中如不能满足其规定的要求，同样也会出现显著的误差。其影响量主要来源是：测量管道前后阻流件导致的流场分布畸变、管道中出现大的脉动流、间歇流量致使管道产生振动、以及环境振动对管道的影响等。

通常情况下超声水表（尤其是单声道超声水表）要有足够长的直管段，用以校正流场分布畸变带来的影响。当在近距离内无法避免使用管道阻流件时，应采用多声道超声水表和安装整流器；管道中持续出现大的脉动流或间歇流，需要寻找产生原因并予以消除，否则应安装稳压装置将其消除；管道振动会使管道内流体产生横向流，导致测量误差增大，因此也应找到振动源，消除其影响。

#### 5 结论

提高超声水表测量准确度，消除测量误差影响，需要从设计、制造、使用等环节对可能产生误差的各种来源和影响因素进行深入分析和处理，识别误差类型和变化规律，通过优化设计、信号与数据处理以及校正等方法来消除或削弱其影响，使超声水表在出厂检验条件下的测量误差与实际使用情况下的测量误差尽可能的相接近。

#### 参考文献：

- [1] 姚灵、王让定、左富强,等.单声道超声水表测量特性分段校正方法的研究[J]. 计量学报, 2013. 9
- [2] 姚灵、王让定、左富强等. 超声水流量检测换能器使用特性及评价指标研究[J]. 计量学报, 2014. 3
- [3] 杨亚、王让定、姚灵等. 时差法超声波流量计中时间间隔测量及误差分析[J]. 宁波大学学报, 2009
- [4] [美]R. W. 米勒编著. 流量测量工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 5

- [5] 姚灵编著. 电子水表传感与信号处理技术 [M]. 北京: 中国质检出版社, 2012. 3
- [6] BS ISO/TR 12765: 1998 Measurement of fluid flow in closed conduits—Methods using transit-time ultrasonic flowmeters
- [7] ISO 12242: 2012 (E) Measurement of fluid flow in closed conduits—Ultrasonic transit-time meters for liquid
- [8] TDC-GP22 Datasheet ( DB\_GP22\_cn V0.5 ). Germany : acam-messelectronic gmbh , 2012.6

**作者简介及联系方式:**

姚灵 宁波水表股份有限公司技术总监兼浙江省水表研究院院长, 教授级高级工程师, 享受国务院政府特殊津贴专家。宁波市江北区洪兴路 355 号 宁波水表股份有限公司; 邮编: 315032,  
邮址: [13806630959@139.com](mailto:13806630959@139.com), 电话: 0574-88195868

注: 本文曾发表在《仪表技术》2015 年第 5 期上

2015. 2. 28