

# 单声道超声水表测量特性分段校正方法的研究

姚灵<sup>1,2</sup> 王让定<sup>2</sup> 左富强<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波水表股份有限公司, 浙江 宁波 315032)

**摘要** 当管道内流体处于不同雷诺数测量条件时, 超声水表的线平均流速  $v_l$  与面平均流速  $\bar{v}_s$  之间存在着显著的非线性。本文在分析研究基础上提出了一种分段流量测量特性校正新方法, 使校正精度和效率均有明显提高。校正方法是: 根据管道内被测流体介质流动分布状态不同, 在其临界处设立校正分界点。层流时, 采用常系数校正; 湍流与过渡流时, 分别采用拟合直线方程校正。经实验验证, 该方法是可行的。

**关键词** 超声水表 传播时间差法 测量特性校正方法

**中图分类号:** TH814.92

**文献标识码:** A

**文章编号:**

随着水流量传感与信号处理技术的快速发展以及供排水领域对水流量测量需求的提升, 等同采用国际标准的水表产品标准 GB/T778.1~3—2007 已将水表产品门类从传统机械水表拓展至适用于电或电子原理以及机械原理带电子装置的各类水表。超声水表是电子水表的一种主要形式, 近年来在产品性能不断完善基础上已逐步投入市场应用。

水表的主要特点是流量测量范围宽, 使用环境恶劣, 对电子水表而言还须电池供电等。因此, 超声水表除了应有很强的环境适应能力和采用低功耗设计外, 还必须保证在极宽的流量测量范围内 (如  $R=250\sim 500$ ) 使其测量准确度符合标准要求。超声水表由于存在声道线平均流速  $v_l$  与管道面平均流速  $\bar{v}_s$  之间的非线性关系, 使仪器自身具有的线性测量特性与在实流条件下的测量特性之间随着被测管流雷诺数变化 (即管内流速分布变化) 而出现很大差异, 导致超声水表实际使用时的测量特性出现显著的非线性。分析研究并采取行之有效的特性校正策略, 是超声水表实现高准确度、宽测量范围、高效率校正所必须的前提。

传播时间差法是超声水表目前采用的主流测量方法, 其线平均流速的测量表达式为

$$v_l = M \cdot \left( \frac{\Delta t}{t_{1-2} \cdot t_{2-1}} \right); \quad M = \frac{D}{2 \sin \varphi \cos \varphi} \quad (1)$$

式中  $t_{1-2}$ —超声波正向传播时间;  $t_{2-1}$ —超声波逆向传播时间;  $\Delta t$ —超声波正、逆向传播时间差;  $v_l$ —流体轴向线平均流速;  $D$ —超声水表测量管内径;  $\varphi$ —超声波传播方向与流体轴线间的夹角;  $M$ —常数, 仅与测量管的加工、装配精度有关。

## 1 测量特性分析

通常情况下，封闭管道采用面平均流速作为水表流量测量特性校准与测量误差评判依据。由于超声水表测量得到的线平均流速  $v_l$  与管内实际分布的面平均流速  $\bar{v}_s$  在不同雷诺数  $Re$  条件下的关系复杂，因此在整个流量测量范围内两者呈现出了明显的非线性，见图 1。

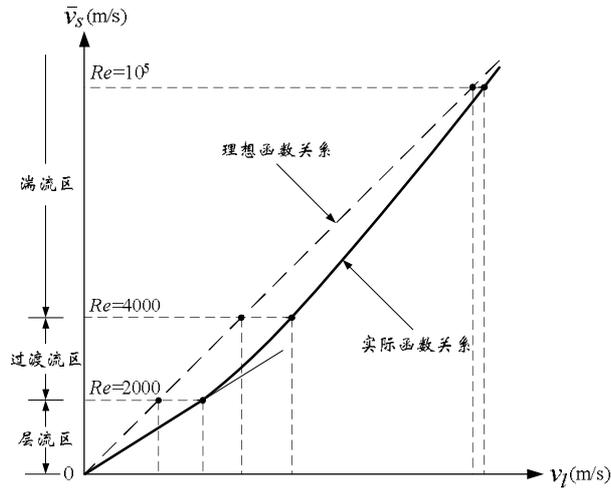


图 1

产生非线性测量特性的主要原因是：流速处于充分发展管流条件下，随着流速由慢至快，即雷诺数由小到大，管道内的流速会经过层流、过渡流、湍流等不同流动区域。当雷诺数  $Re \leq 2000$  时，管内流速呈层流状态，其分布为抛物面状，见图 2；当流速较高，即雷诺数  $Re \geq 4000$  时，管内流速逐步呈湍流状态，其分布为指数面状，见图 3；当雷诺数介于这两者之间时，即  $2000 < Re < 4000$ ，管内流速处于过渡流状态，其分布由抛物面状向指数面状逐步变化，且分布不稳定。

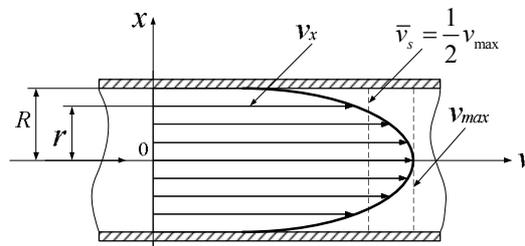


图 2

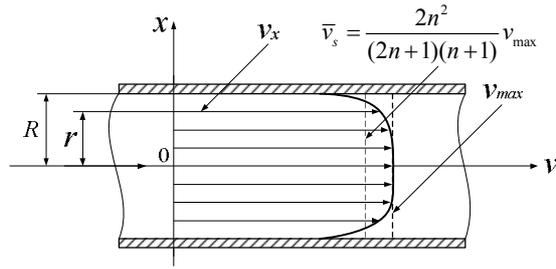


图 3

1) 层流流动时, 管内流体的流速分布可用下式表示,

$$v_x = v_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中  $v_x$ —离管中心距离为  $x$  处的流速;  $v_{\max}$ —管中心处的最大流速;  $R$ —测量管内半径;  $r$ —离管中心的径向距离。

此时管内的面平均流速  $\bar{v}_s$  为

$$\begin{aligned} \bar{v}_s &= \frac{q_v}{S} = \frac{\int_0^R 2\pi r v_x dr}{\pi R^2} \\ &= \frac{\int_0^R 2\pi r v_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] dr}{\pi R^2} = \frac{\pi R^2 v_{\max} / 2}{\pi R^2} = \frac{1}{2} v_{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $q_v$ —管道截面的体积流量;  $S$ —管道截面的面积。

线平均流速  $v_l$  为

$$v_l = \frac{2 \int_0^R v_x dr}{2R} = \frac{\int_0^R v_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] dr}{R} = \frac{2}{3} v_{\max} \quad (4)$$

由式 (3) 和 (4) 解得,

$$\bar{v}_s = \frac{3}{4} v_l \quad (5)$$

因此在层流状态下, 超声水表测得的线平均流速与面平均流速之间的比例系数  $k_1$  为

$$k_1 = \frac{v_l}{\bar{v}_s} = \frac{4}{3} \quad (6)$$

2) 湍流状态下, 其流速分布可用下式表示

$$v_x = v_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (7)$$

式中  $n$  一随  $Re$  的不同而变化的系数。

与层流相比，湍流状态下流速分布仍以管道中心轴线为对称并呈指数面状分布，其流速分布是雷诺数的函数。湍流状态下，管道截面的平均流速  $\bar{v}_s$  为

$$\begin{aligned} \bar{v}_s &= \frac{q_v}{S} = \frac{\int_0^r 2\pi r v_x dr}{\pi R^2} = \frac{\int_0^r 2\pi r v_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} dr}{\pi R^2} \\ &= \frac{2n^2}{(2n+1)(n+1)} v_{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

其线平均流速  $v_l$  为

$$v_l = \frac{2 \int_0^r v_x dr}{2R} = \frac{\int_0^r v_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} dr}{R} = \frac{n}{n+1} v_{\max} \quad (9)$$

从式 (8) 和 (9) 可以解得

$$\bar{v}_s = \frac{2n}{2n+1} v_l \quad (10)$$

因此在湍流状态，线平均流速与面平均流速之间的比例系数  $k_3$  为

$$k_3 = \frac{v_l}{\bar{v}_s} = \frac{2n+1}{2n} \quad (11)$$

3) 过渡流状态时，管内流体分布也是雷诺数的函数，但分布处于不稳定状态，因此  $v_l$  和  $\bar{v}_s$  之间很难用函数关系确切描述。

## 2 校正方法研究

由上述分析可知，层流时管内线与面平均流速呈线性，校正系数为常数

$$\bar{v}_s = k_1 v_l = \frac{3}{4} v_l \quad (12)$$

湍流时线与面平均流速的经验系数为

$$\bar{v}_s = k_3 v_l = \frac{2n}{2n+1} v_l \quad (13)$$

其中

$$n = 1.66 \lg(Re) \quad (14)$$

$$Re = 0.354 \frac{q_v}{D \cdot \nu} \quad (15)$$

式中  $\nu$ —水的运动粘度。

过渡流时目前尚无合适经验校正方程。

## 2.1 校正策略

湍流状态下的校正，由于涉及到对数运算等复杂数学公式，导致超声水表中嵌入式微计算机运算出现困难，实时性变差；而在过渡流状态下由于没有现成的校正方程，测量效率和测量可靠性得不到应有的保证。

校正策略：在不同流速分布状态下设置简易的直线校正方程对超声水表流量测量范围内的特性进行分段预校正，并在实流状态下对特性方程的相关点（通常为 3~5 个点）进行实流微调，即可满足超声水表测量准确度的要求。

## 2.2 校正方法

计算雷诺数  $Re = 2000$  和  $Re = 4000$  以及雷诺数等于超声水表流量测量上限的三个面平均流速值，并用下列已知校准方程

$$v_l = \frac{4}{3} \bar{v}_s \quad (16)$$

$$v_l = \frac{2[1.66 \lg(Re)] + 1}{2[1.66 \lg(Re)]} \bar{v}_s \quad (17)$$

可以获得三个线平均流速值  $v_{l1}$ 、 $v_{l2}$ 、 $v_{l3}$ ，其中  $v_{l1}$  由式 (16) 计算得到， $v_{l2}$ 、 $v_{l3}$  由式 (17) 计算得到。

根据  $v_{l1}$ 、 $v_{l2}$ 、 $v_{l3}$ ，建立以下三个直线校正方程式

$$\bar{v}_s = k_1 v_l = \frac{3}{4} v_l \quad (18)$$

$$\bar{v}_s = -b_2 + k_2 v_l \quad (19)$$

$$\bar{v}_s = -b_3 + k_3 v_l \quad (20)$$

图 4 为拟合直线校正特性、经验校正特性与理想线性特性之间关系。

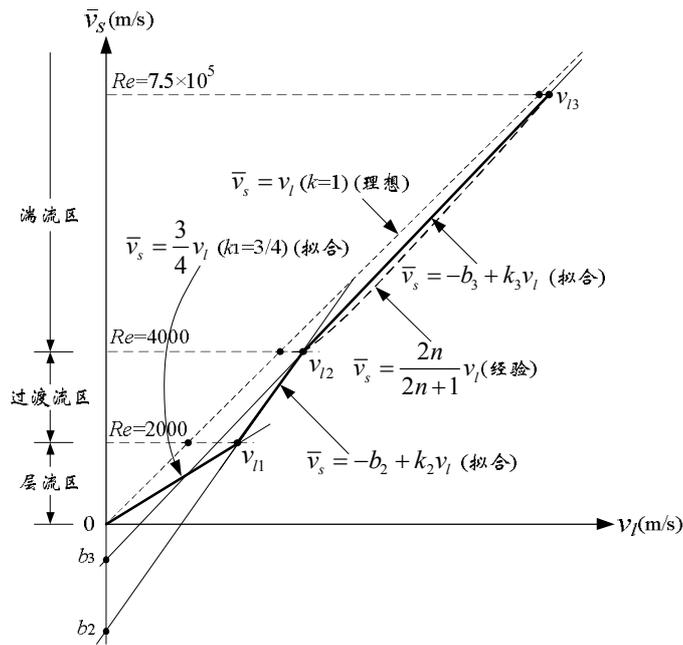


图 4

在国家标准规定的 5 个流量测量点处(以测量截面内径  $D=0.06\text{m}$ 、常用流量  $Q_3=100\text{m}^3/\text{h}$

超声水表为例), 湍流状态下的经验校正方程  $\bar{v}_s = \frac{2[1.66 \lg(Re)]}{2[1.66 \lg(Re)]+1} v_l$  与拟合直线校正方程

$\bar{v}_s = -b_3 + k_3 v_l$  之间的最大偏差均小于 0.5%, 见下表。

经验校正特性与拟合校正特性之间偏差分析表

序号	雷诺数 $Re$	流量测量点 $Q$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	面平均流速 $\bar{v}_s$ (m/s)	线平均流速的 经验校正 (m/s) $v'_{l1} = \frac{2(1.66 \lg Re)+1}{2(1.66 \lg Re)} \bar{v}_s$	线平均流速的 拟合校正 (m/s) $v'_{l2} = \frac{\bar{v}_s + 0.002037}{0.95127}$	两种线平均流速校 正之间的偏差 $\Delta = \frac{v'_{l1} - v'_{l2}}{v'_{l1}} \times 100\%$
1	4000	0.68	0.06713	0.07274 (1.0836 $\bar{v}_s$ )	0.07271	0.04%
2	194411	33.21	3.2626	3.44856 (1.0570 $\bar{v}_s$ )	3.43187	0.48%
3	394735	67.43	6.6243	6.98069 (1.0538 $\bar{v}_s$ )	6.96578	0.21%
4	585400	100	9.8240	10.33681 (1.0522 $\bar{v}_s$ )	10.32939	0.07%
5	731750	125	12.2800	12.9112 (1.0514 $\bar{v}_s$ )	12.91120	0%

在实流条件下对三个流速分布状态下的校正方程作进一步微调, 通过调整其截距  $b$  或斜

率  $k$ , 使拟合直线的两端点与中间点示值均符合测量准确度要求。超声水表流量测量特性校正方法流程见图 5。

### 3 校正程序

仍以测量截面内径  $D = 0.06\text{m}$ ,  $Q_3 = 100\text{m}^3/\text{h}$  的超声水表为例:

设层流区上限值 ( $Re_1 = 2000$ ) 和湍流区下限值 ( $Re_2 = 4000$ ) 为流速分布的两个分界点, 则相应的线平均流速分界值为:  $v_{l1}$ 、 $v_{l2}$ 。

现取  $D = 0.06\text{m}$ , 水温在  $20^\circ\text{C}$  时的粘度为  $\nu = 1.007 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$

已知  $Re = 5854q_v$ ;  $\bar{v}_s = 0.09824q_v$ ;  $Re_1 = 2000$

所以  $\bar{v}_{s1} = \frac{0.09824}{5854} Re_1 \approx 0.03356\text{ (m/s)}$

在层流区, 因为面平均流速与线平均流速之间符合下列关系

$$\bar{v}_{s1} = \frac{3}{4} v_{l1}$$

所以分界点线平均流速  $v_{l1}$  为

$$v_{l1} = \frac{4}{3} \bar{v}_{s1} = 0.04474\text{ (m/s)}$$

同理, 在湍流区,

$$\bar{v}_{s2} = \frac{0.09824}{5854} Re_2 \approx 0.06713\text{ (m/s)}$$

又因为

$$\bar{v}_{s2} = \frac{2n}{2n+1} v_{l2},$$

所以分界点线平均流速  $v_{l2}$  为

$$v_{l2} = \frac{2n+1}{2n} \bar{v}_{s2} = 0.07274\text{ (m/s)}$$

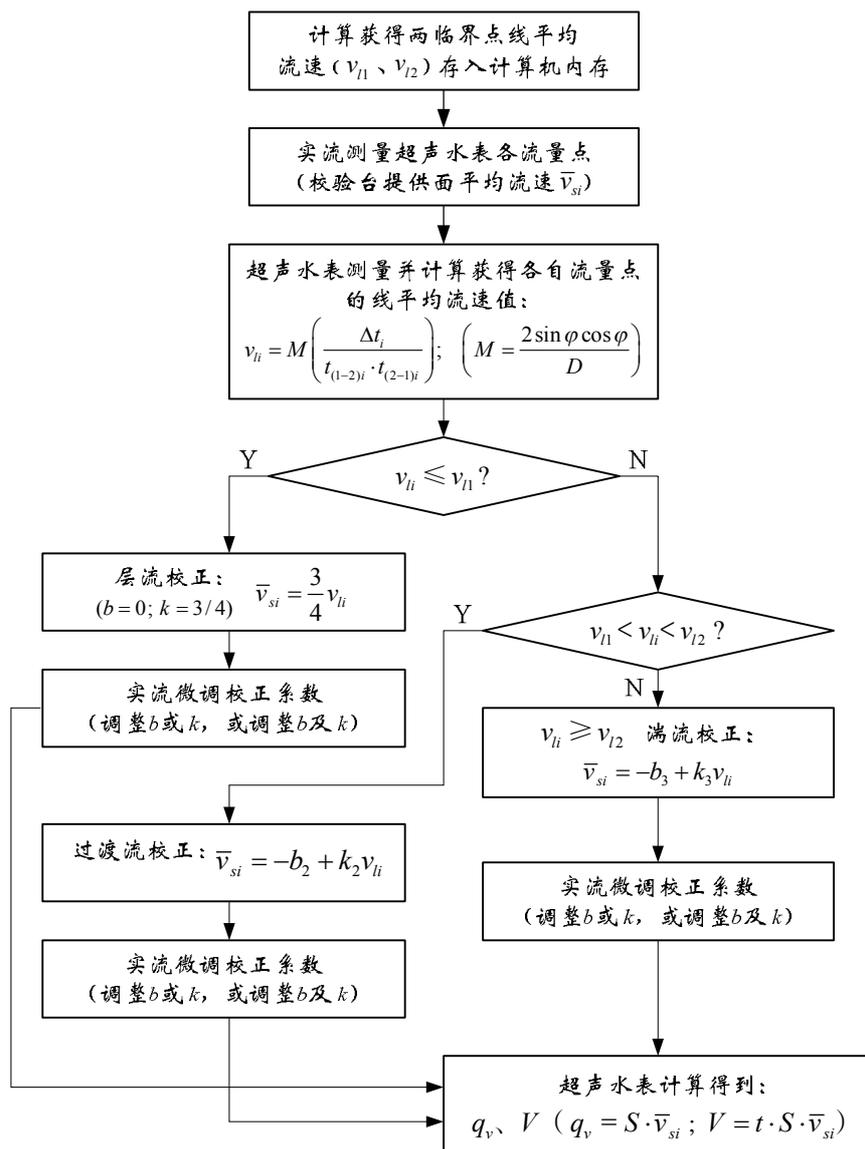


图 5

将  $v_{l1}$ 、 $v_{l2}$  存入超声水表嵌入式计算机的内存中。

校正开始时用标准校验台进行实流测量并校正。将测量台位调到某一面平均流速测量值

$\bar{v}_{si}$ ，超声水表测出该流速值下的  $\left(\frac{\Delta t_i}{t_2 \cdot t_1}\right)$ ，通过计算获得

$$v_{li} = M \left( \frac{\Delta t_i}{t_2 \cdot t_1} \right); \left( M = \frac{2 \sin \varphi \cos \varphi}{D} \right)$$

接着，判断  $v_{li}$  在哪个流速分布区间，根据不同区间按相应的校正公式进行校正：

$$v_{li} \leq v_{l1} = 0.04474 \text{ (m/s)}, \text{ 按层流进行校正;}$$

$v_{li} \geq v_{l2} = 0.07274 \text{ (m/s)}$ ，按湍流进行校正；

$v_{l1} = 0.04474 \text{ (m/s)} < v_{li} < v_{l2} = 0.07274 \text{ (m/s)}$ ，按过渡流进行校正。

#### 4 实验验证

水表示值误差可按国标 GB/T 778.1—2007 要求计算如下

$$\varepsilon = \frac{V_i - V_a}{V_a} \times 100\% \quad (21)$$

式中  $V_i$ —水表指示体积； $V_a$ —校验台标准容器提供的实际体积。

按标准要求对未经校正的 DN100 单声道超声水表在实流条件下进行多点测量并作误差计算，可得图 6 所示的“超声水表原始误差曲线”。该曲线间接地反映了管道内流体在不同流动状态下超声水表测得的线平均流速与管道实际的面平均流速之间的基本情况，在整个流量测量范围内 ( $Q_1 : Q_3$ ) 曲线非常弯曲，在大部分流量区域，水表示值误差都大大超出了最大允许误差的要求。图 6 中的“超声水表校正后误差曲线”是经实施了分段校准方法后得到的误差曲线，曲线在流量测量范围内相对比较平直，并且整条曲线基本处于最大允许误差限的中间位置，使水表的测量准确度有了十分显著的提高。

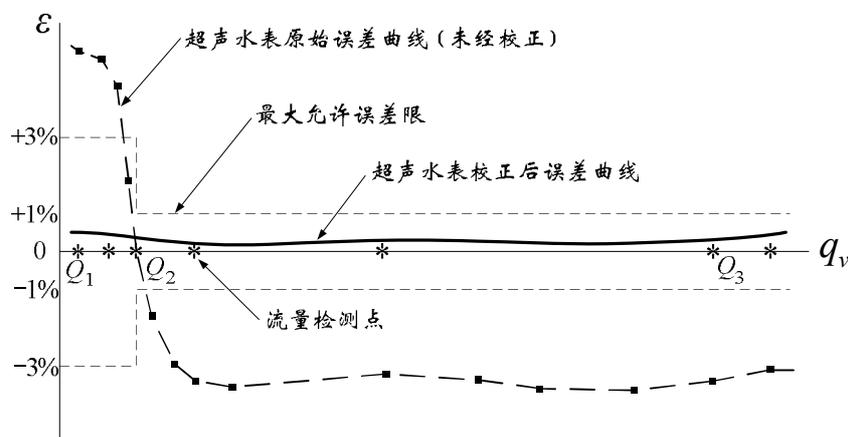


图 6 超声水表校正前后误差曲线

#### 5 结束语

用上述分段校正方法校正的单声道超声水表，经浙江省计量测试技术研究院的全性能试验，各项指标达到了标准规定的要求，处于国内领先水平。当水表流量测量范围 ( $Q_3/Q_1$ )  $R=250 \sim 500$  时，准确度等级达到了最高的 1 级水平。该校正方法准确、简便，操作性强，适

合于宽量程单声道超声水表使用。

### 参考文献

1. [美]R. W. 米勒 编著, 孙延柞 译. 《流量测量工程手册》. 北京. 机械工业出版社, 1990. 5
2. 姚 灵编著. 《电子水表传感与信号处理技术》. 北京. 中国质检出版社, 2012. 3
3. 姚 灵等. 单声道超声水表流量测量特性校正方法(发明专利). 专利申请号: 201110441265. 1
4. BS ISO/TR 12765: 1998. Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods using Transit – time ultrasonic flowmeters.

## Single path ultrasonic water meter measurement characteristic's subsection correction method research

Yaoling<sup>1, 2</sup> Wangrangding<sup>2</sup> Zuofuqiang<sup>1</sup>

( 1.Faculty of Information Science and Engineering,Ningbo University,Ningbo 315211,China;

2.Ningbo Water Meter Co.LTD., Ningbo 315032,China )

**Abstract:** When the fluid in pipe is different Reynolds number measuring conditions, the average fluid velocity along the acoustic path measured by the ultrasonic water meter and the mean axial fluid velocity have significant nonlinear. Based on the analysis and research, this paper bring forward a flow measurement characteristic's subsection correction new method, it make calibration accuracy and efficiency obviously improving. Method is: according to different fluid distribution condition in the closed conduits, to establish cut-off point in critical place. At the laminar, the constant coefficient correction; at the turbulence and transition flow, were used respectively to the fitting line equation correction. Experiments showed that this method is feasible.

**Key Words:** Ultrasonic water meter; Trsansit-time difference method; measurement characteristic's correction method

2012年8月1日

注：浙江省优先主题重点工业项目（2010C11025）；浙江省教育厅重大攻关项目（ZD2009012）；宁波市重大科研攻关项目（项目编号：2009B10003）

**第一作者简介：**姚灵（1953~），男，浙江庆元人，教授级高级工程师，企业博士后合作导师，宁波大学兼职教授，宁波水表股份有限公司技术总监，主要研究方向：流量/几何量传感与信号处理技术。E-mail: 13806630959@139.com

**通信作者：**王让定（1962~），男，甘肃天水人，博士/教授，主要研究方向：信息安全及嵌入式系统应用。E-mail: wangranding@nbu.edu.cn

**联系方式：**宁波市 江北区 北海路 268 弄 99 号 宁波水表股份有限公司 邮编：315032  
电话：0574-88195868；邮箱地址：[13806630959@139.com](mailto:13806630959@139.com)

注：本文曾发表于《计量学报》2013 年第 5 期上