

# 超声水表流量传感器参数设计分析

王欣欣, 裘晨, 左富强, 姚灵

(宁波水表股份有限公司 宁波, 315000)

**摘要:** 本文介绍了超声水表时间差测量法的原理, 然后根据其原理及流体特性分析了超声水表流量传感器的参数(主要是管段直径  $D$ 、超声波传播方向与流体轴线间的夹角  $\varphi$ )对超声水表计量性能的影响, 从而得到了单声道超声水表的流量传感器参数设计的三个简单、准确、有效的设计准则, 可大大缩短超声水表设计周期, 为今后更好的研究超声水表提供了依据。

**关键词:** 超声水表; 流量传感器; 时间差; 参数设计; 计量性能

## Analysis of the Parameter Designing on ultrasonic Flow Sensor

**Abstract:** The principle of methods using transit-time ultrasonic water meter is described in this paper, and the impact of the parameters (mainly pipe diameter  $D$  and the angle  $\varphi$  between the direction the ultrasonic wave and the flow) of the ultrasonic flow sensor on the measuring performance of the meter is analyzed according to the flow characteristics and the principle. And three simple, accurate and effective design criteria on the parameters are got. It can help us to shorten the development cycle, and be the basis of researching on ultrasonic water meter.

**Keywords:** Ultrasonic Water Meter; Flow Sensor; Transit-time Difference; Parameters Designing; Measuring Performance

### 0 引言

超声水表凭借其无运动部件、压损小、无堵塞、量程范围宽、准确度等级高等优点, 在供水行业逐步占有了一定的位置, 特别是大口径水表方面, 其优势更为明显, 已成为流量测量的一个亮点。

超声水表壳体和换能器组装为一整体, 被称为超声流量传感器。超声水表流量传感器设计是否合理直接影响到其计量性能。近几年超声流量计发展迅速, 国内外的超声流量计在计量领域均得到了非常成功的应用, 同时也有不少专业机构对在应用过程中对其在应用中出现了问题进行了研究, 而超声水表由于其在满足一定的计量准确度的同时还需要更宽的测量范围, 亟待我们更深入的研究, 特别是对超声水表流量传感器的研究。因此, 在超声水表设计研发中, 研究其流量传感器, 即研究其参数设计对超声水表计量性能的影响具有非常重要的意义。

### 1 超声水表的原理

自来水管中最常用的超声流量测量方法是时差法测量法, 它是根据超声波在测量管道中的正、逆向传播时间及时间差来对流速或流量进行测量的, 其工作原理见图 1 所示。正、逆向传播时间、

时间差和线平均流速和流量值的计算公式如式(1)和式(2)<sup>[1]</sup>。

$$t_{1-2} = \frac{D/\sin\varphi}{c+v\cos\varphi}, \quad t_{2-1} = \frac{D/\sin\varphi}{c-v\cos\varphi} \quad (1)$$

$$\Delta t = t_{2-1} - t_{1-2} \quad (2)$$

式(1)变形得,

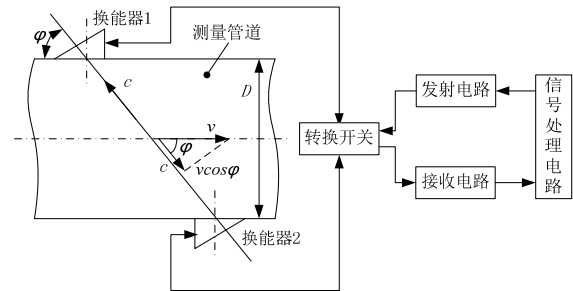


图 1. 时差法流速测量原理图

Fig.1 The Schematics of Methods Using Transit-time Ultrasonic Water Meter

$$c+v\cos\varphi = \frac{D/\sin\varphi}{t_{1-2}} \quad (3)$$

$$c-v\cos\varphi = \frac{D/\sin\varphi}{t_{2-1}} \quad (4)$$

式(3)-式(4), 并将式(2)代入, 得

$$2v \cos \varphi = \frac{D}{\sin \varphi} \left( \frac{\Delta t}{t_{1-2} \cdot t_{2-1}} \right) \quad (5)$$

$$v = \frac{D}{2 \sin \varphi \cos \varphi} \left( \frac{\Delta t}{t_{1-2} \cdot t_{2-1}} \right) \quad (6)$$

$$q_v = A(kv) = \frac{\pi D^2}{4} kv \quad (7)$$

$$q_v = \frac{\pi k D^3}{8 \sin \varphi \cos \varphi} \left( \frac{\Delta t}{t_{1-2} \cdot t_{2-1}} \right) \quad (8)$$

式中： $q_v$ ——管道体积流量；  
 $v$ ——流体轴向线平均流速；  
 $A$ ——管道截面积；  
 $D$ ——管道直径；  
 $k$ ——修正系数；  
 $\varphi$ ——超声波传播方向与流体轴线间的夹角。  
 由于管道直径  $D$ 、换能器安装夹角  $\varphi$  是固定的，因此可由式(6)~(8)可知，只要测得正、逆向传播时间 ( $t_{1-2}, t_{2-1}$ ) 和时间差  $\Delta t$  即可得到声道上各点流速的线平均值  $v$ ，从而得到管道体积流量  $q_v$ 。

## 2 流量特性

当流速处于充分发展流条件下，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、湍流等流动阶段。当流体处于不同雷诺数时，流速分布形状就会发生相应变化，导致超声水表测得的线平均速度与面平均速度之间出现较大的差异<sup>[2]</sup>。

如图 2 所示，当流速很低，即雷诺数  $Re \leq 2000$  时，管内流速呈层流状态，其分布为抛物面状，管内流体只有轴向运动，而没有垂直于轴线方向的横向运动；当流速较高时，即雷诺数  $Re \geq 4000$  时，管内流速呈湍流状态，其分布为指数面状，管内流体既有轴向运动，又有横向运动；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，其分布由抛物线面状向指数面状逐渐变化，且分布不稳定。流体状态不稳定时，线平均速度与面平均速度之间的关系也不稳定，因此，此时在对超声水表流量特性进行校准也很困难。

## 3 流量传感器参数设计

根据标准 GB/T 778.1-2007<sup>[3]</sup>可知，水表的压力损失  $\Delta p$  符合 4.3 节的要求：应不超过 0.063MPa，且

计量性能符合 5.2.3 和 5.2.4 的要求：在水温  $0.1^\circ\text{C} \leq$  水温  $\leq 30^\circ\text{C}$  时，水表的允许误差在高区 ( $Q_2 \leq Q \leq Q_4$ ) 为  $\pm 2\%$ ，低区 ( $Q_1 \leq Q < Q_2$ ) 为  $\pm 5\%$ 。根据 JJG 162—2007<sup>[4]</sup>冷水水表检定规程 5.2.1 和 5.2.2 可知，在水温  $0.1^\circ\text{C} \leq$  水温  $\leq 30^\circ\text{C}$  时，水表的允许误差在高区 ( $Q_2 \leq Q \leq Q_4$ ) 为  $\pm 1\%$ ，低区 ( $Q_1 \leq Q < Q_2$ ) 为  $\pm 3\%$  的水表为 1 级水表，水表的允许误差在高区 ( $Q_2 \leq Q \leq Q_4$ ) 为  $\pm 2\%$ ，低区 ( $Q_1 \leq Q < Q_2$ ) 为  $\pm 5\%$  的水表为 2 级水表。根据原理可知，超声流量传感器参数设计的合理与否，直接影响到超声水表计量的准确度等级，单声道超声水表流量传感器的参数主要有管道直径  $D$ 、换能器安装夹角  $\varphi$  以及换能器的安装位置，为了减小流体对换能器的冲蚀且又能一定程度的冲刷换能器，本研究中将换能器与管壁持平 (如图 3 所示)，重点分析管道直径  $D$ 、换能器安装夹角  $\varphi$  的设计。

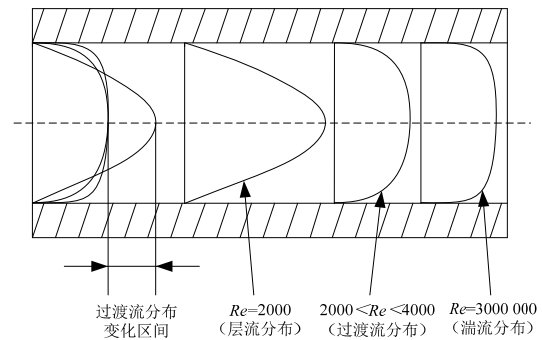


图 2. 圆管内流速分布

Fig.2 Velocity Distribution of Water Flow in the Pipeline

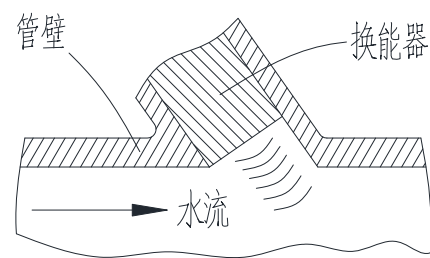


图 3. 换能器与管壁持平

Fig.3 Transducer in contact with the fluid (flush)

### 3.1 管道直径 $D$

参数管道直径  $D$  是超声流量传感器的重要组成部分，其设计的是否合理直接决定着流量传感器是否合理，直接影响超声水表的计量性能。

一方面，由于超声测量得到的线平均值  $v$  与流

速分布的面平均值  $\bar{v}$  在不同雷诺数以及相应流速分布时的关系复杂<sup>[2]</sup>，层流时管内线与面平均流速呈线性，校准系数为常数

$$\bar{v} = k_1 v = \frac{3}{4} v \quad (9)$$

湍流时线与面平均流速的经验系数为

$$\bar{v} = k_2 v = \frac{2n}{2n+1} v \quad (10)$$

$$q_v = S \bar{v} \quad (11)$$

$$n = 1.66 \lg(Re) \quad (12)$$

$$Re = 0.354 \frac{q_v}{D \cdot v} \quad (13)$$

目前过渡流时尚无合适经验校准方程。可知，对于任何计量性能依赖水流量流速分布状态的流量计、水表，流体处于不稳定的过渡流状态时就难以校准。因此，在设计中流量点尽量避开过渡流状态，特别是处于高低区临界且属于低区的分界流量  $Q_2$ 。

另一方面，采用缩径技术可相对提高超声波表对小流量测量的计量性能。从表 1 中可知，DN100 超声波表缩径越小，其在最小流量  $Q_1=0.2(\text{m}^3/\text{h})$  时，其面平均速度越来越大，同时雷诺数  $Re$  也增大。面平均速度  $\bar{v}$  增大， $v$  也增大，由式 (6) 可知，传感器所采集的时间差  $\Delta t$  变大，如此以来便降低了其对小流量测量的随机误差，从而提高了其对小流量测

量的计量性能。

再者，缩径后不可避免的会引起一定的压力损失，也会使流体产生漩涡而流体状态不稳定，因此也不能无限制的减小管径。不过，由于都是圆管道，无任何运动部件，因此一定程度的缩径其影响也是比较小的。试验证明，DN100 超声波表其壳体缩径为 0.06m 时，其压力损失仅为 0.06KPa 左右，远小于要求的上限值 0.063MPa。同时进口处采用圆弧相切过渡，配合特制的整流器后，可明显避免漩涡流的产生。

因此，超声波表流量传感器的参数设计准则可有：(1) 流量点特别是分界流量  $Q_2$  尽量避开过渡流状态；(2) 在满足压损要求、流体状态稳定性要求的情况下，采用一定的缩径以提高其对小流量测量的计量性能。

以 DN100 超声波表为例，根据超声波表基表的设计准则，根据式(11)、(13)可得到面平均速度  $\bar{v}$  度和流体雷诺数  $Re$ ，如表 1 所示。根据流量传感器参数设计准则及表 1 可知：若计量性能为 R500，理想管径可选取  $D=0.06\text{m}$ ，面平均速度  $\bar{v}$  可提高 2.78 倍，雷诺数  $Re$  提高了 1.67 倍；若计量性能为 R250，理想管径可选取  $D=0.05\text{m}$ ，面平均速度  $\bar{v}$  可提高将近 4 倍，雷诺数  $Re$  提高了 2 倍。可知，缩径后可大大提高传感器所采集的时间差  $\Delta t$ ，降低其对小流量测量的随机误差，提高其小流量测量时的计量准确度。

表 1.不同管直径下的雷诺数  $Re$  和面平均速度  $\bar{v}$

Tab.1 Renault Number  $Re$  and Average Flow Velocity of Surface  $\bar{v}$  in Different Pipelines

流量点 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )		D=0.1m		(D=0.08m)		(D=0.06m)		(D=0.05m)	
		$Re$	$\bar{v}$ (m/h)	$Re$	$\bar{v}$ (m/h)	$Re$	$\bar{v}$ (m/h)	$Re$	$\bar{v}$ (m/h)
R500	$Q_1=0.2$	703	25.48	878.8	39.8	1171.7	70.77	1406	101.9
	$Q_2=0.32$	1124.8	40.76	1406	63.7	1874.69	113.2	2249.6	163.1
	$Q_3=100$	351504.3	12738.9	439380.4	19904.5	585840.5	35385.7	703008.6	50955.4
	$Q_4=125$	439380.4	15923.6	549225.5	24880.6	732300.7	44232.1	878760.8	63694.3
R250	$Q_1=0.4$	1406	50.96	1757.5	79.6	2343	141.54	2812	203.8
	$Q_2=0.64$	2249.6	81.52	2812	127.4	3749.4	226.5	4499	326.2
	$Q_3=100$	351504.3	12738.9	439380.4	19904.5	585840.5	35385.7	703008.6	50955.4
	$Q_4=125$	439380.4	15923.6	549225.5	24880.6	732300.7	44232.1	878760.8	63694.3

备注： $R=Q_3/Q_1$ ， $Q_2/Q_1=1.6$ ， $Q_4/Q_3=1.25$ 。

### 3.2 换能器安装夹角 $\varphi$

根据式(1)得，

$$\begin{aligned}\Delta t = t_{2,1} - t_{1,2} &= \frac{D/\sin\varphi}{c-v\cos\varphi} - \frac{D/\sin\varphi}{c+v\cos\varphi} \\ &= \frac{2Dv\cos\varphi}{\sin\varphi(c^2-v^2\cos^2\varphi)}\end{aligned}\quad (14)$$

由于  $c^2 \gg v^2 \cos^2 \varphi$ ，所以

$$\Delta t \approx \frac{2Dv\cos\varphi}{c^2\sin\varphi} = \frac{2Dv}{c^2\tan\varphi}\quad (15)$$

假定超声波传播速度  $c$  不变，由式(15)可知，在线平均速度不变的情况下， $\varphi$  值越小， $\Delta t$  越大，即：减小角度  $\varphi$ ，时间差  $\Delta t$  会变大。

比如：DN100 超声水表（缩径 0.06m，即  $D=0.06\text{m}$ ），取  $c=1450\text{m/s}$ （ $T=20^\circ\text{C}$ ），当  $Q_2=0.64\text{m}^3/\text{h}$ （缩径后  $v \approx 226.469\text{m/h} \approx 0.063\text{m/s}$ ）时，则根据式（14）可得：

当  $\varphi=30^\circ$  时，

$$\Delta t_1 = \frac{2Dv\cos\varphi}{\sin\varphi(c^2-v^2\cos^2\varphi)} = 6.228 \times 10^{-9}\text{s} = 6228\text{ps};$$

当  $\varphi=45^\circ$  时，

$$\Delta t_2 = \frac{2Dv\cos\varphi}{\sin\varphi(c^2-v^2\cos^2\varphi)} = 3.596 \times 10^{-9}\text{s} = 3596\text{ps};$$

当  $\varphi=55^\circ$  时，

$$\Delta t_3 = \frac{2Dv\cos\varphi}{\sin\varphi(c^2-v^2\cos^2\varphi)} = 2.518 \times 10^{-9}\text{s} = 2518\text{ps};$$

当  $\varphi=60^\circ$  时，

$$\Delta t_4 = \frac{2Dv\cos\varphi}{\sin\varphi(c^2-v^2\cos^2\varphi)} = 2.076 \times 10^{-9}\text{s} = 2076\text{ps};$$

可知： $\Delta t_1 > \Delta t_2 > \Delta t_3 > \Delta t_4$ ，验证了减小角度  $\varphi$ ，

可增大时间差  $\Delta t$  的推断。但是，当  $\varphi=30^\circ$  时，对于一定尺寸的换能器已难以在保证一定强度的情况下设置在管道两侧，且此时加工难度也增大不少，因此不可以无限制地减小角度  $\varphi$ 。

但是对于  $\varphi=0^\circ$  时，超声波传播方向与流体轴线共线，此时水流量方向上的速度分量即为线平均速度  $v$ ，而声程  $L$  仅与换能器安装距离有关，与管径  $D$  无关，则

$$\Delta t = \frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v} = \frac{2vL}{c^2-v^2}\quad (16)$$

此时，假定超声波传播速度不变，则在  $v$  一定的情况下，可通过改变换能器安装距离来设定声程长度  $L$ <sup>[5]</sup>，从而得到合适的时间差  $\Delta t$ 。

根据以上分析可知，减小超声波传播方向与流体轴线间的夹角  $\varphi$ ，可提高时间差  $\Delta t$ ，从而提高超声水表对流量测量的计量性能，特别是对小流量测量的计量性能。因此，流量传感器的设计中在其安装换能器、机加工等条件允许的情况下，超声波传播方向与流体轴线间的夹角  $\varphi$  要尽量减小。

#### 4 试验验证

本研究中，基于成本因素，DN100 超声水表采用缩径 0.06m、 $\varphi$  取  $55^\circ$  的流量传感器参数设计，配合整流器、自主研发的电路系统及换能器等，并采用流速分段校准方法<sup>[2]</sup>进行校准，校准前后的流量点及误差如表 2 所示。

由表 2 可知，研究设计的 DN100 超声水表通过系列参数校准后，其流量范围为 R250 和 R500 时其准确度等级均可达 1 级水表。

表 2. DN100 超声水表流量点测量记录表

Tab.2 Record of Volume Flow Measuring of DN100 Ultrasonic Water Meter

流量点 (m <sup>3</sup> /h)		第 1 次 测量误差 $\varepsilon$ (%)	第 2 次 测量误差 $\varepsilon$ (%)	第 3 次 测量误差 $\varepsilon$ (%)	校准后 测量误差 $\varepsilon$ (%)	准确度 等级
R250	$Q_1=0.4$	5.2	5.8	5.7	1.7	1 级水表
	$Q_2=0.64$	4.4	4.2	4.5	0.6	
	$Q_3=100$	1.8	1.7	1.6	0.4	
	$Q_4=125$	1.7	1.6	1.8	0.3	
R500	$Q_1=0.2$	-5.2	-5.9	-4.6	2.1	1 级水表
	$Q_2=0.32$	-4.4	-4.6	-4.2	0.5	
	$Q_3=100$	-0.2	-0.3	-0.3	0.2	
	$Q_4=125$	-1.2	-1.1	-1.2	0.3	

流体轴线间的夹角  $\varphi$  要尽量小。

## 5 结论

本文对如何进行单声道超声水表流量传感器的参数设计进行了分析和研究,提出了以下三个简单、准确、有效的设计准则:

- 1) 流量点特别是分界流量  $Q_2$  尽量避免过渡流状态;
- 2) 在满足压损要求、流体状态稳定性要求的情况下,采用一定的缩径以提高其对小流量测量的计量性能;
- 3) 在安装换能器、机加工等其他条件允许的情况下,超声波传播方向与

此文发表于《仪表技术》2014(5).

## 参考文献

- [1] 姚灵编著. 电子水表传感与信号处理技术(第 1 版). 北京: 中国质检出版社,2012.
- [2] 姚灵, 王让定, 左富强等. 超声水表流量测量特性分析及校准方法[J]. 上海计量测试, 2013, (3): 1-6.
- [3] 李明华,叶显苍,陈含章等.GB/T 778.1—2007. 封闭满管道中水流量的测量 饮用冷水水表和热水水表 第 1 部分: 规范.北京,中国标准出版社,2008.
- [4] 詹志杰,赵建亮,张立谦等.JJG 162—2007 冷水水表检定规程.北京,中国计量出版社,2012.
- [5] 邵旭东, 常勤信. 一种小口径超声流量计流管 [P]. 中国. 201220491130.6, 2013-03-13