

超声水表流场仿真与性能改进策略研究

姚 灵^{1、2} 左富强^{1、2} 王欣欣^{1、2} 张凯³

[1. 宁波水表股份有限公司, 浙江 宁波 315032; 2. 浙江省水表研究院, 浙江 宁波 315032;
3. 中国计量学院, 浙江 杭州 310018]

摘要: 供水管路中的阻流件是导致超声水表测量管道内原先对称分布的流动发生畸变的主要原因。当对称流流动状态下校正的超声水表如在流动畸变工况下使用, 其测量误差就会显著增大。计算机仿真技术可以证实几种主要管路阻流件对测量管道内流场分布的干扰, 通过采用有效对策和措施可以削弱这种干扰对测量结果带来的影响。

关键词: 超声水表 超声流量计 数值模拟 计算机仿真 测量误差

中图分类号: TH814. 92

文献标识码: A

文章编号:

Ultrasonic water meter flow field simulation and performance improvement strategies research

Yao Ling^[1] Zuofuqiang^[1] Wangxinxin^[1] Zhangkai^[2]

[1.Ningbo Water Meter Co.,Ltd (Zhejiang Province Water Meter Reserch Institute),
2. China Jiliang University]

Abstract: In ultrasonic water meter measuring pipe, the fluid flow of original symmetric distribution occurs distortion because the irregularity of the water supply line. Ultrasonic water meter be adjusted at symmetry flow state, then it is used in flow distortion conditions, its measurement error will increase significantly. Computer simulation technology can confirm fluid flow the interference caused by the several main irregularity pipeline, through the adoption of effective countermeasures and measures to weaken the effects of this kind of interference on measuring results.

Keywords: ultrasonic water meter, ultrasonic flowmeter, numerical simulation, computer simulation, measurement error

1. 概述

超声水表是近期最有可能成批推广使用的一种新型电子水表。在大口径封闭管道累积流量计量方面, 目前主要采用的是传播时间法原理的超声水表。图 1 是换能器对射安装的超声水表原理图, 式 (1) 是其速度差法计算公式。

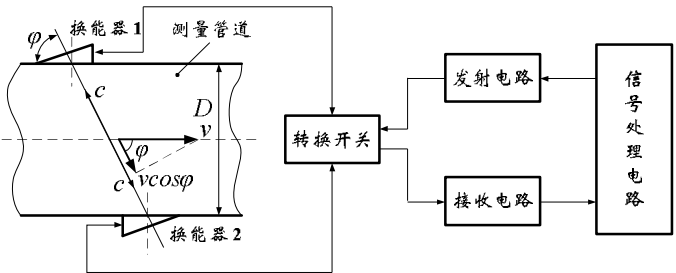


图 1 换能器对射安装的超声水表原理图

$$v = \frac{D}{2 \sin \varphi \cos \varphi} \left(\frac{\Delta t}{t_1 t_2} \right) \quad (1)$$

式中 v —管道内被测介质（水）的线平均流速； D —超声水表测量管道内径； φ —两换能器安装轴线与管道轴线之间夹角； Δt —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）。

2. 大口径超声水表常见测量管道结构

为了在小流量测量时增加超声波在被测介质中的时间差，减少计时分辨力不足对测量结果的影响，通常会在超声水表测量管道设计时采用缩小内径增加流速值的方法，见图 2。如果测量管道内径缩小 50%（由 D 改变为 d ），流速值就会增加 2 倍，反映到测量时间差上也是原来的 2 倍，见式 2 和式 3。

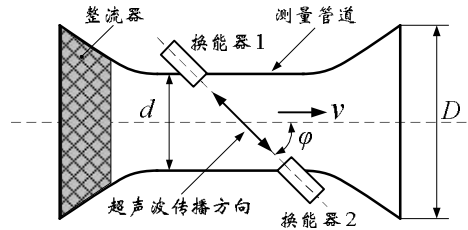


图 2 采用缩径方式的测量管道结构示意图

因为

$$v \approx \frac{c^2 \tan \varphi}{2D} \Delta t = \frac{c^2 \tan \varphi}{2(2d)} \Delta t \quad (2)$$

所以

$$2v = \frac{c^2 \tan \varphi}{2d} \Delta t ; \Delta t = \frac{2d}{c^2 \tan \varphi} (2v) \quad (3)$$

式中 c —超声波在被测介质（水）中的传播速度。注：式（2）是由时间差公式推出。

超声水表测量管道缩径后，其付出的代价是：在大流量测量情况下，管道内对称流场会发生某些变异，而且管道压损也会有所增加。

3. 测量管道内流场畸变的数值模拟

当管道中安装有阻流件（如：平面弯管、立体弯管、阀门等），而水表前后直管段又不充分长时，测量管道内的流场就会发生严重的畸变；如果加上测量管道缩径等带来的流场影响，超声水表现场使用时的测量准确度是值得担忧的。

用 CFD（计算流体动力学）技术的数值模拟方法可以定性或半定量反映上述因素对超声

水表测量管道中流场分布的影响程度。

超声水表测量管道和整流器外形的三维建模见图 3。仿真模型采用：测量管道缩径结构（ $D=100\text{mm}$ 、 $d=60\text{mm}$ 、 $\varphi=55^\circ$ ），进水口安装叶片式简易整流器，连接上下游 $10D$ 的前后直管段，试验流量为 $Q=1\text{m}^3/\text{h}$ ，见图 4。当超声水表安装在没有阻流件的供水管路中时，其测量管道内小流量的流场分布是对称的，见图 5 流速等值线分布图和截面流线图。

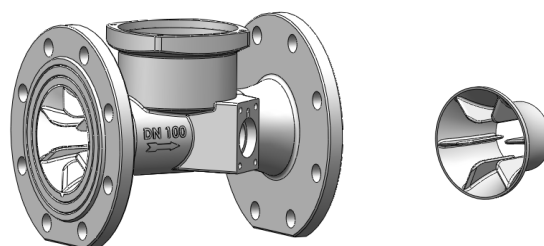


图 3 超声水表测量管道和整流器的三维建模图

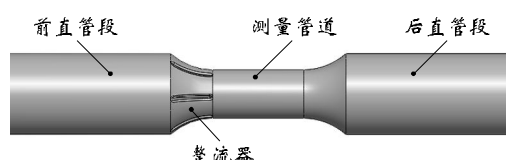


图 4 超声水表使用条件下的仿真模型

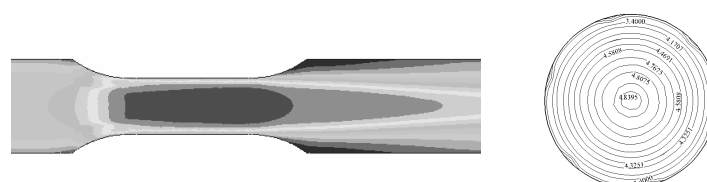


图 5 测量管道内流速等值线分布图和截面流线图

超声水表在实际使用环境下，对其测量管道内的流场干扰和影响主要有以下三种常见的工况，现分别对它们作出模拟和分析：

1) 测量管道前安装有平面弯管时

仿真条件：测量段上游阻流件为 90° 平面单弯管，其中进口管段直径 $D=100\text{mm}$ ，测量段管道直径 $d=60\text{mm}$ ，弯管弯曲半径 $R=1.5D$ ， L 为弯管出口与超声水表进口之间的直管段长度（ $L=10D$ ），试验流量为 $Q=1\text{m}^3/\text{h}$ 。单弯管计算几何模型见图 6。

图 7 为超声水表进口处有平面单弯管时的流速等值线分布图和截面流线图。图中可以看到，超声水表测量管道内的流场分布已经发生显著的变化，并有二次流出现。

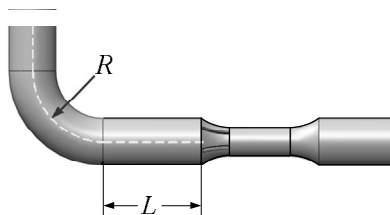


图 6 进口处有平面单弯管时的几何模型图



图 7 进口处有平面单弯管时的流速等值线分布图和截面流线图

2) 测量管道前安装有立体弯管时

仿真条件：测量段上游阻流件为 90° 立体双弯管，其中进口管段直径 $D=100\text{mm}$ ，测量段管道直径 $d=60\text{mm}$ ，弯管弯曲半径 $R_1=R_2=1.5D$ ， L_1 为弯管出口与超声水表进口之间的直管段距离 ($L_1=10D$)、 L_2 为两弯管之间距离 ($L_2=2D$)，试验流量为 $Q=1\text{m}^3/\text{h}$ 。立体双弯管计算几何模型见图 8。

图 9 为超声水表进口处有立体双弯管时的流速等值线分布图和截面流线图。图中可以看到，此时超声水表测量管道内流场分布变化更为复杂，而且偏流方向也改变了。

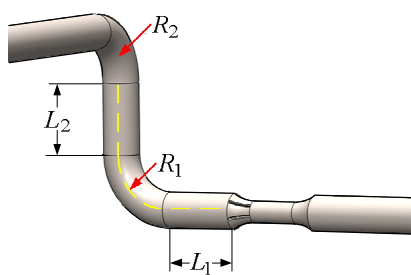


图 8 进口处有立体双弯管时的几何模型图

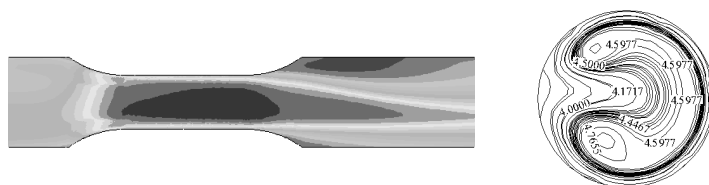


图 9 进口处有双立体弯管时的流速等值线分布图和截面流线图

3) 测量管道前安装阀门时

仿真条件：测量段上游阻流件为 90%开度的阀门，其中进口管段直径 $D=100\text{mm}$ ，测量

段管道直径 $d=60\text{mm}$ ，阀至整流器距离为 $10D$ ，试验流量为 $Q=1\text{m}^3/\text{h}$ 。90%开度的阀门计算几何模型见图 10。

仿真结果表明，阀门开度不足也会导致流场分布发生畸变，但不如平面和立体弯头带来的影响严重，见图 11。

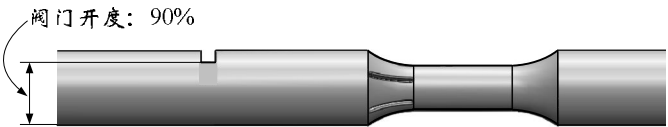


图 10 进口处有开度为 90%阀门时的几何模型图

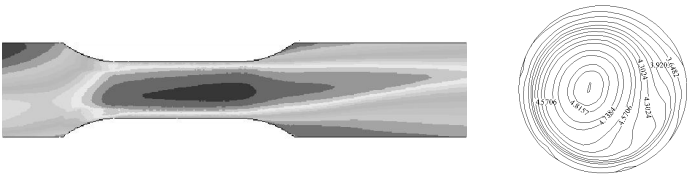


图 11 进口处有开度为 90%阀门时的流速等值线分布图和截面流线图

4. 消除流场畸变对测量影响的方法

流场畸变会导致流速对称分布条件下校正的水表特性与实际工况条件下的使用特性发生偏离，引起超声水表测量的不准确。要解决此类问题，通常可以采用如下几种方法。

1) 加长超声水表安装时的前后直管段

对单声道超声水表而言，有些文章证实需要前后有近百倍的直管段方能消除由阻流件造成的流场畸变的影响。国家计量检定规程 JJG1030-2007《超声流量计》中对单声道超声流量计作出过如下规定：如果前直管段达不到 $24\sim 70D$ ，后直管段达不到 $8D$ 的使用条件，其使用时的误差应在实验室检定结果基础上再增加一个不小于 0.3% 的附加安装误差。

因此，增加超声水表前后直管段是减少单声道超声水表附加安装误差的一种行之有效的方法。

2) 在表前安装整流器

超声水表使用时，如其进水口位置安装蜂窝状整流器，可以显著改变流场畸变的影响，见图 12。现按以下条件仿真：同样采用 $8D$ 的前直管段，在 90° 平面单弯管下游与超声水表之间安装或不安装六边形蜂窝状整流器，当流量为 $3\text{m}^3/\text{h}$ 时，它们对沿测量管道轴线的流场分布就会发生变化。因此，在湍流状态下加装整流器，测量管道内流体流动分布基本可以达到较理想的状态，见图 13。

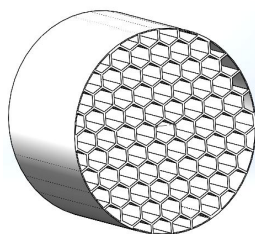


图 12 六边形蜂窝状整流器

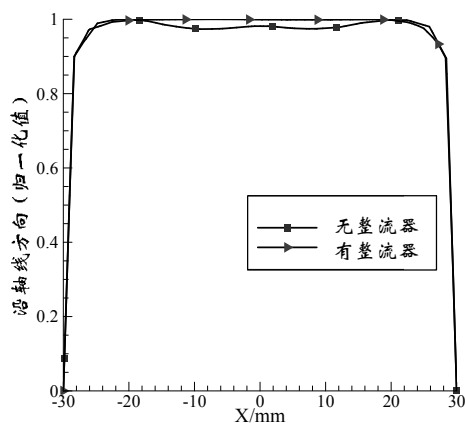


图 13 加装整流器前后的流场分布对比图

3) 采用多声道技术

多声道技术可以弥补单声道超声水表对流场分布畸变的敏感性。当测量管道内流场发生畸变时，除了轴向流动外，还存在着径向流动的二次流和漩涡流，使测量管道不同半径处的流场均处于非对称状态中。实验表明，通过在管道不同位置上布置声道的方法可以大幅度削弱流场畸变的影响。表 1 是平面单弯管出口与超声水表进口处之间距离为 $2D$ 时，采用单声道、双声道和三声道布置时平面单弯管对超声水表测量误差影响的模拟；表 2 是采用高斯声道布置法的位置值和权重系数值；图 14 是采用不同声道数的误差曲线模拟图。从仿真结果看，随着声道数的增加，误差曲线大幅收窄，其效果是显著的。

表 1 采用不同声道时平面单弯管对超声水表测量误差影响量的模拟值

序号	流量值 (m^3/h)	单声道 超声水表误差	双声道 超声水表误差	三声道 超声水表误差
1	0.1	-10.19%	3.28%	2.64%
2	0.2	-9.08%	2.86%	2.41%
3	0.4	-8.14%	2.68%	1.54%
4	1	-5.74%	1.88%	1.12%

5	3	-3.98%	1.38%	0.96%
6	5	-3.55%	1.32%	0.93%
7	10	-3.39%	1.30%	0.92%
8	30	-3.65%	1.27%	0.87%
9	60	-3.56%	1.25%	0.86%
10	90	-3.57%	1.23%	0.84%
11	120	-3.55%	1.22%	0.83%

表 2 采用高斯声道法的安装位置值与权重系数表

声道数	安装位置	权重系数
2	± 0.5774	$0.26 \pi R^2$
3	± 0.7746	$0.1118 \pi R^2$
	0	$0.2829 \pi R^2$
4	± 0.8611	$0.0563 \pi R^2$
	± 0.3400	$0.1952 \pi R^2$

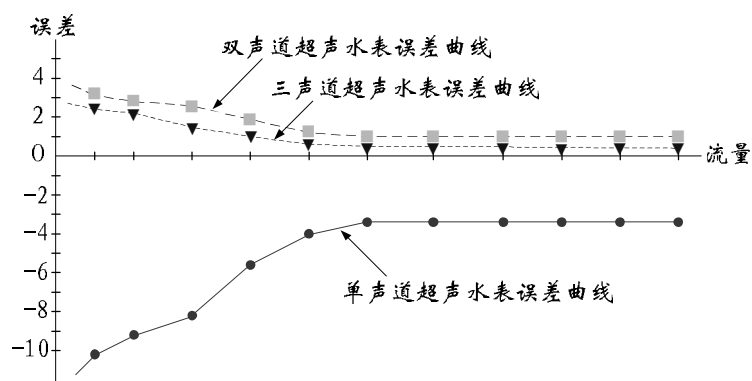


图 14 不同声道数的超声水表示值误差曲线变化图

4) 正确安装超声水表与前后直管段

超声水表正确安装与否与其测量准确度有着很大的关联性。按照相关规定，供水管路与超声水表安装轴线间的夹角应不大于 3° ，前后直管段与超声水表内径的偏差应不大于 2%，且不大于 3mm。在这种安装条件下，一般不会引进附加的流场畸变，也不会产生明显的附加测量误差。

5. 结语

超声水表实际使用环境不允许安装有很长的前后直管段，因此供水管路中各种影响流场

分布的阻流件以及水表安装不规范等因素都是造成水表附加测量误差增加的主要来源地。计算机数值模拟和仿真技术,可以提前获知或预测这些因素对水表测量结果的影响,便于大家采用科学的方法和措施将这些影响量予以彻底消除或削弱。

参考文献:

- [1]王福军编著. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 4
- [2]吴玉林、刘树红、钱忠东著. 水力机械计算流体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. 10
- [3]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

作者简介及联系方式:

姚灵 出生年月: 1953. 9; 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, 研究方向: 流量与几何量精密仪器的设计与制造
邮址: 13806630959@139.com, 电话: 0574-88195868

本文曾发表在《仪表技术》2015 年第 6 期上。