

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.004

# 超声波流量计的弯管误差分析及修正研究\*

吴春华, 鲍 敏\*

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 针对中小口径超声波流量计的弯管二次流误差问题,运用数值仿真技术,分析了弯管二次流垂直误差与水平误差,由二次流流线规律推导出了二次流误差的计算公式。结合实际的流量计测量范围,设定雷诺数的变化范围为3 000~50 000,定量分析了安装在弯管下游5D、10D、20D位置的流量计在不同雷诺数下的误差规律。提出了“用压力差来表现二次流强度,最终结合误差规律通过测量压力差来对弯管二次流误差进行修正”的方法。研究表明,在雷诺数29 000之后,10D处的二次流垂直误差超过了5D处的误差,二次流垂直误差和水平误差的最大值分别约为1.2%和0.7%,经过仿真验证结果表明,该修正方法可行。

**关键词:** 超声波流量计; 弯管二次流误差; 压力差

**中图分类号:** TH814.92      **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2015)02-175-05

## Bending pipe error analysis and correction of ultrasonic flowmeter

WU Chun-hua, BAO Min

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the bending pipe error of ultrasonic flowmeter problem, numerical simulation was carried out to study the secondary flow vertical error and horizontal error. The formula of secondary flow was derived from the secondary flow line. The simulation was run in different Reynolds number, Reynolds number ranged from 3 000 to 50 000. Ultrasonic flowmeters were installed at 5D, 10D and 20D distance to bending pipe downstream. A method was proposed that the pressure difference between the top of and the bottom of bending pipe outlet could be used to present the secondary flow intensity. Through the pressure difference the bending pipe error could be corrected. The results indicate that when Reynolds number is larger than 29 000, error at 10D exceed error at 5D. The maximum value of the secondary flow vertical error and the secondary horizontal error are about 1.2% and 0.7% respectively, correction method is proved to be right.

**Key words:** ultrasonic flowmeter; elbow error; pressure difference

## 0 引 言

超声波流量计因其具有运行稳定、非接触测量、计量准确度高、无压力损失等优点,在工业检测领域得到了广泛的应用。随着20世纪80年代电子技术和传感器技术的发展,关于超声波流量计的基础研究和产品发展以及应用日新月异,十分旺盛<sup>[1]</sup>。目前对于超声波流量计测量精度的研究主要集中在3个方面:

信号因素、硬件因素及流场因素<sup>[2]</sup>。其中,超声波流量计对流场状态十分敏感,实际安装场合的流场不稳定影响了流量计的检测精度。对于超声波流量计流场研究多采用计算流体力学(CFD)的方法,国内外诸多学者对超声波流量计在弯管流场情况下进行数值仿真,并进行了实验验证<sup>[3-6]</sup>。以往的研究主要是针对规避安装效应的影响。但是在一些中小口径超声波流量计的应用场合,由于场地的限制,弯管下游缓冲管道不足,流体在流经弯管后不能充分发展,检测精度

收稿日期: 2014-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106141);浙江省重点科技创新团队资助项目(2011R09024)

作者简介: 吴春华(1989-),男,浙江嵊州人,主要从事传感器与自动控制方面的研究。E-mail: 15088666294@163.com

通信联系人: 鲍 敏,男,副教授,硕士生导师。E-mail: mbao@zstu.edu.cn

受到弯管下游径向二次流分速度的极大影响,安装效应需要评估,并研究相应的补偿方法。

本研究采用CFD仿真分析90°单弯管下游二次流误差形成原因,并得出误差的计算公式,定量地分析弯管下游不同缓冲管道后,不同雷诺数下的二次流误差对测量精度的影响,最终得到误差的修正规律。通过仿真发现,弯管出口处顶端和底端的压力差与弯管二次流的强度有关,提出在实际测量中可通过测得此压力差来对二次流误差进行修正的方法。该研究可用于分析其他类型的超声波流量计的误差分析,对超声波流量计的设计与安装具有重要意义。

## 1 测量原理与误差形成

### 1.1 超声波流量计测量原理

本研究针对一款双探头时差法超声波流量计。

时差法是利用声脉冲波在流体中顺向与逆向传播的时间差来测量流体流速。双探头超声波流量计原理图如图1所示。

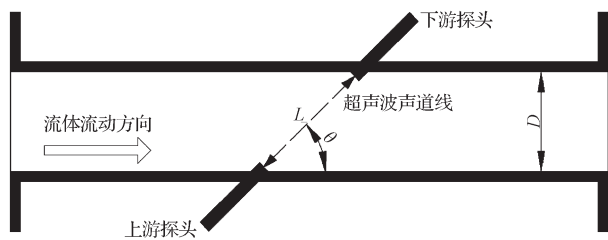


图1 双探头超声波流量计原理图

顺向和逆向的传播时间为 $t_1$ 和 $t_2$ ,声道线与管道壁面夹角为 $\theta$ ,管道的横截面积为 $S$ ,声道线上的线平均流速 $v_l$ 和体积流量 $Q$ 的表达式:

$$v_l = \frac{L}{2 \cos \theta} \times \frac{(t_2 - t_1)}{t_1 t_2} \quad (1)$$

$$v_m = v_l \times K \quad (2)$$

$$Q = v_m \times S = v_m \times \frac{D^2}{4} \pi \quad (3)$$

式中: $L$ —超声波流量计两个探头之间的距离; $D$ —管道直径; $v_m$ —管道的面平均流速,流速修正系数 $K$ 将声道线上的速度 $v_l$ 修正为截面上流体的平均速度 $v_m$ 。

### 1.2 二次流误差形成原因

流体流经弯管,管内流体受到离心力和粘性力相互作用,在管道径向截面上形成一对反向对称涡旋如图2所示,称为弯管二次流。有一无量纲数,迪恩数 $Dn$ 可用来表示弯管二次流的强度。当管道模型固定时,迪恩数 $Dn$ 只与雷诺数 $Re$ 有关。研究发现,流速越大,产生的二次流强度越大,随着流动的发展二次流逐渐减弱。

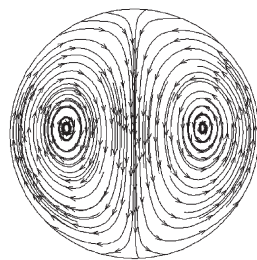


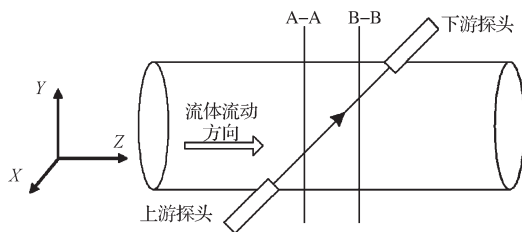
图2 二次流流线图

迪恩数 $Dn$ 的表达式如下式所示:

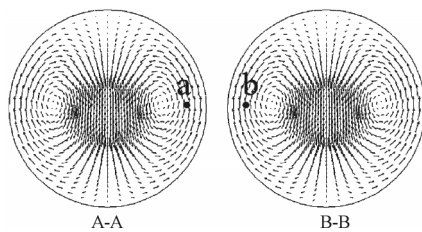
$$Dn = Re \times \sqrt{\frac{d}{R}} \quad (4)$$

式中: $d$ —管道直径, $R$ —弯管的曲率半径。

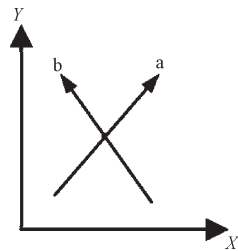
弯管下游形成的二次流在径向平面的流动,产生了弯管二次流的垂直误差和水平误差。声道线上二次流速度方向示意图如图3所示。本研究在声道线路径上取两个观察面A和B,如图3(a)所示;声道线穿过这两个二次流面的位置为a和b,如图3(b)所示。可见由于声道线穿过截面上涡的位置不同,作用在声道线上的二次流速度方向也不同,如图3(c)所示。其中,径向平面二次流速度在水平方向( $X$ 方向)上的分速度,方向相反。



(a) 声道观测截面位置



(b) 声道线位置速度矢量示意



(c) 速度方向

图3 声道线上二次流速度方向示意图

由于超声波流量计的安装,声道线均在轴向平面,这导致系统无法检测到与轴向平面垂直的二次流

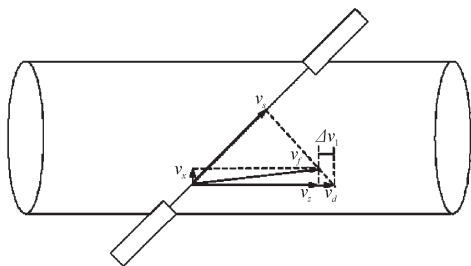
垂直分速度( $Y$ 方向),产生了二次流的垂直误差 $E_a$ ,得到 $E_a$ 的计算公式如下:

$$E_a = \frac{v_l - v_f}{v_l} \times 100\% \quad (5)$$

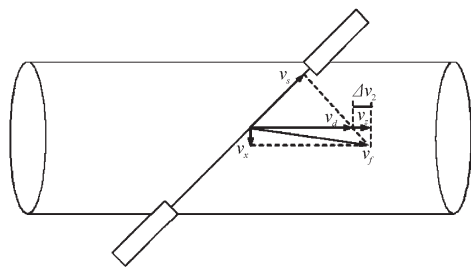
式中: $v_f$ —声道线在轴向平面上的速度。

二次流水平速度( $X$ 方向的分速度)直接影响了超声波流量计的轴向检测平面,对检测造成了非常大的影响。声道线在空间上先后收到方向相反的二次流水平速度的作用,这在很大程度上削弱了误差。但反向速度并不完全相等,且超声波流量计是按固定角度进行速度折算的,超声波传播速度 $v$ 对应地固定为轴向流速为 $v_d$ ,而其真实流速为 $v_f$ ,由此二次流流向两个相反的水平速度,分别导致了 $\Delta v_1$ (如图4(a)所示)和 $\Delta v_2$ (如图4(b)所示)两个速度变化量,其中 $\Delta v_1$ 导致测得的流速偏大, $\Delta v_2$ 导致测得的流速偏小,两个误差不能抵消,产生二次流的水平误差 $E_b$ :

$$\Delta v_1 = \frac{\cos(\theta - \arcsin \frac{v_x}{v_f})}{\cos \theta} \times v_f - v_z \quad (6)$$



(a) 速度增量  $\Delta v_1$



(b) 速度增量  $\Delta v_2$

图4 二次流水平误差形成示意图

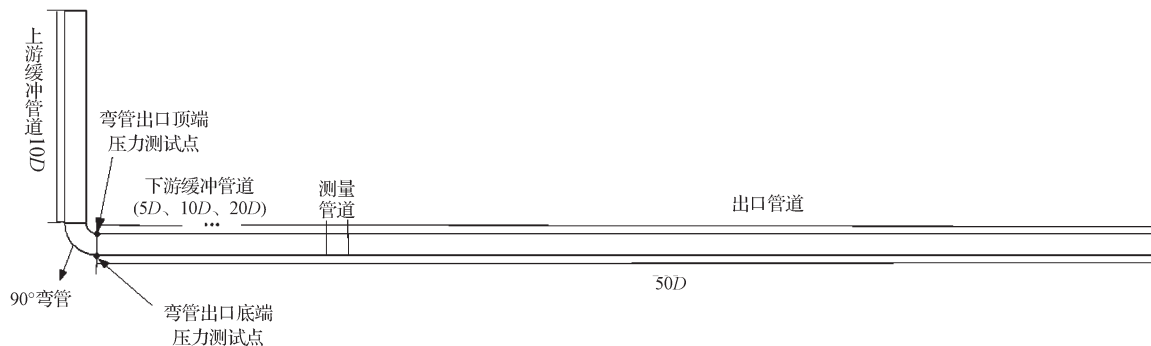


图5 弯管流场几何模型示意图

$$\Delta v_2 = v_z - \frac{\cos(\theta + \arcsin \frac{v_x}{v_f})}{\cos \theta} \times v_f \quad (7)$$

$$E_b = \frac{\Delta v_1 - \Delta v_2}{v_f} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $v_x$ —声道线线上 $X$ 方向的分速度即二次流水平速度, $v_z$ — $Z$ 方向的分速度即主流方向分速度。

## 2 数值仿真

### 2.1 几何模型

几何模型采用的是管径为50 mm的管道,弯管流场几何模型示意图如图5所示。其由上游缓冲管道、弯管、下游缓冲管道、测量管道、出口管道5部分构成。全美气体联合会(AGA)发表的5AGA-96建议,在弯管流场的下游保留5倍管径的直管作为缓冲,但有研究表明这个距离之后二次流的作用仍十分明显<sup>[7]</sup>。据此,笔者设置流量计的3个典型安装位置来放置测量管道,分别距上游弯道为 $5D$ , $10D$ , $20D$ 。本研究在弯管出口处顶部和底部分别设置观测点,测量两点压力,得到两点的压力差。

### 2.2 仿真与设定

在仿真前,笔者先对几何模型进行网格划分。网格划分采用Gambit软件,划分时,顺序是由线到面,由面到体。其中,为了得到更好的收敛性和精度,面网格如图6所示。其采用钱币画法得到的矩形网格,体网格如图7所示。其在弯道处加深了密度。网格数量总计为 $1.53 \times 10^6$ 。画好网格后,导入Fluent软件进行计算,进口条件设为速度进口,出口设为outflow,介质为空气。研究表明,湍流模型采用RSM时与真实测量最接近<sup>[8]</sup>,故本研究选择RSM模型。

为了排除次要因素的干扰,将仿真更加合理化,本研究进行如下设定:①几何模型固定不变,声波发射角度设置为 $45^\circ$ ;②结合流量计的实际量程,将雷诺数( $Re$ )设置为从3 000~50 000,通过改变进口速度,来研究 $Re$ 对测量精度的影响;③由于Fluent是无法将声

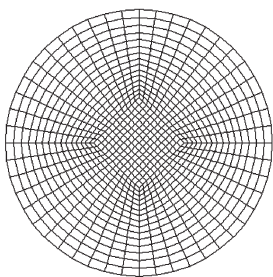


图6 面网格

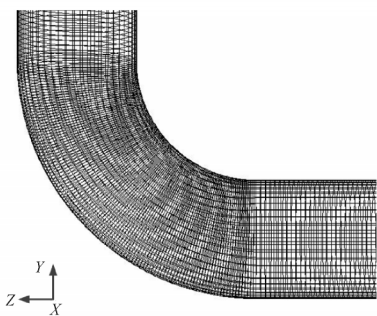


图7 体网格

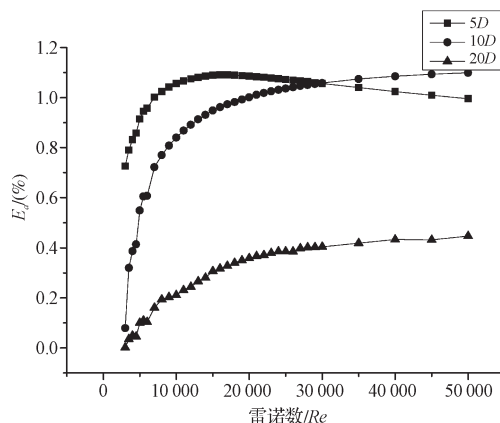
波的传播时间引入的,对于声道线上的速度,笔者采用提取声道线每个节点上的速度,然后进行线积分的方法计算。

### 3 仿真结果分析与讨论

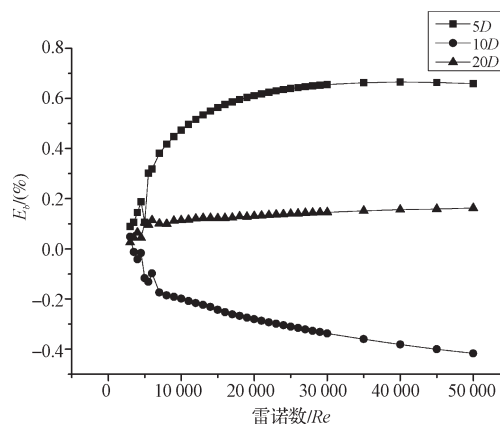
#### 3.1 误差分析与讨论

弯管下游缓冲管道各典型位置(5D, 10D, 20D)二次流垂直误差如图8(a)所示,当下游缓冲管道为5D时,二次流垂直误差基本可以分为两个阶段,起初,误差随着 $Re$ 的增大而增大,在 $Re$ 值13 000之前,增幅明显,当 $Re$ 值在13 000~16 000时,增幅趋于平缓。在经过 $Re$ 值16 000这个顶峰后,误差反而随着 $Re$ 值的增大而减小。当下游缓冲管道为10D时,误差总体上随着 $Re$ 的增大而增大,在 $Re$ 值14 000之前处于增幅明显的上升趋势,从 $Re$ 值14 000之后增幅开始减小。下游缓冲管道为20D时,误差随 $Re$ 值增大而增大,增幅缓慢,且并不十分稳定,这是由于二次流在流经20D时,已经发生衰减,二次流状态不是很稳定。二次流水平误差如图8(b)所示,其非常显著的特点是误差出现了正、负不同的情况,10D处由于 $\Delta v_1$ 比 $\Delta v_2$ 要小,测得的流速偏小,误差值变为负,而在5D和20D处, $\Delta v_1$ 和 $\Delta v_2$ 的大小关系正好相反,流速偏大,误差值为正,这表明二次流的水平误差跟安装位置有很大关系,甚至出现了误差正、负不同的情况。

对比不同下游缓冲管道,总体看来,随着流动的发展,二次流强度减弱,误差减小。但在 $Re$ 值29 000



(a) 二次流垂直误差



(b) 二次流水平误差

图8 两种二次流误差与雷诺数关系

之前,5D处的二次流垂直误差比10D处大,在 $Re$ 值29 000之后,由于变化趋势不同,10D处的误差超过了5D处的误差。可见,并不是距离上游弯管越近,误差就越大。对比两种误差可见,二次流的垂直误差总体大于二次流的水平误差。

#### 3.2 误差修正

实际测量场合下,流量计本身就是测量流速的,所以事先并不知道弯管下游的二次流强度,这导致研究人员在知道误差规律的情况下无法得知实际误差。针对该情况,结合流体经过弯管后的特点,本研究在流体弯管出口处的顶端和底端各设置一压力测试点,得到其出口处的压力差以反映二次流的强度。雷诺数与弯管出口压力如图9所示。由图9可见,压力差随着雷诺数的增大而增大,在实际安装场合,管道模型固定,由此,压力差可用来反映二次流的强度。将雷诺数用压力差表示,得到压力差跟二次流的垂直误差和水平误差的关系。将两种误差结合,可得二次流的总误差 $E_{\text{总}}$ :

$$E_{\text{总}} = E_a + E_b - E_a \times E_b \quad (9)$$

压力差与总误差关系图如图10所示。最终通过



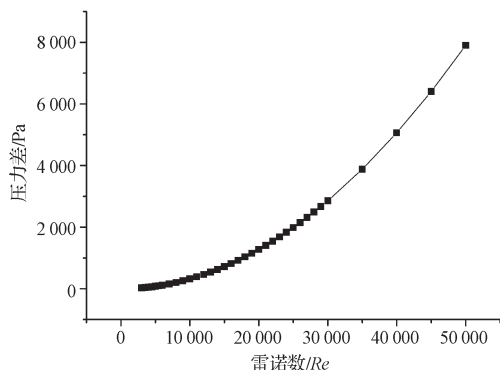


图9 雷诺数与弯管出口压力

压力差来对弯管二次流误差进行修正,得出压力差与修正系数关系图,如图11所示。

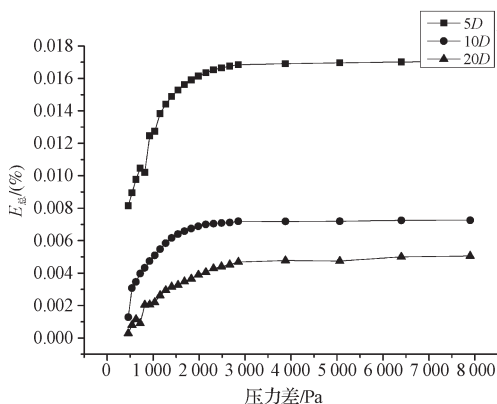


图10 压力差与二次流总误差关系图

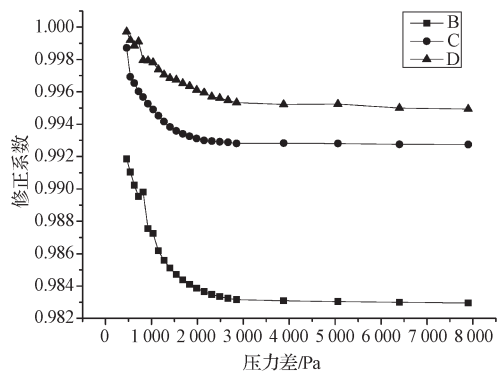


图11 压力差与修正系数关系图

## 4 结束语

本研究采用数值仿真对中小口径90°弯管流场下游二次流误差进行了分析,分析了流场安装效应对于超声波流量计的影响,本研究的研究方法和结果可为

其他超声波流量计的设计优化和实际安装提供一定的参考,主要得到以下结论:

(1) 流体流经弯管后,在弯管下游产生强烈的径向二次流,由于二次流径向分速度对超声波流量计声道线的作用,产生了误差。其中,因流量计无法测得二次流垂直方向的速度而产生的为二次流的垂直误差,受到二次流水平反向速度作用产生的为二次流的水平误差。同时本研究得出了两种误差的计算公式;

(2) 本研究选择流量计安装的典型位置作为测量管道,定量地分析了不同雷诺数下测量管道的误差规律。只需知道管道半径和弯管的曲率半径的比值,不同雷诺数下的测量结果就可以用来推广;

(3) 为解决在实际测量中无法得知二次流强度的问题,本研究借鉴弯管流量计通过流体惯性产生压差的测量原理,提出测量弯管出口处顶端和底端压力差来表示二次流强度的方法,通过压力差对二次流误差进行修正。

## 参考文献(References):

- [1] 熊光德. 新型天然气超声波流量计量技术[J]. 天然气与石油, 2002(2): 57-61.
- [2] 周爱国, 阮杰阳, 刘凯, 等. 超声波流量计影响因素的分析及对策[J]. 中国工程机械学报, 2009(4): 469-473.
- [3] HILGENSTOCK A, ERNST R. Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamic-CFD vs experiments [J]. *Flow measurement and instrumentation*, 1996, 7(3): 161-171.
- [4] BARTON N A, BOAM D. Velocity distribution effects on ultrasonic flowmeters- part determination by computational and experimental methods [R]. Report No. 20022/72, National Engineering Laboratory, 2002.
- [5] HALTTNEN J. Installation effects on ultrasonic and electromagnetic flowmeters: a model-based approach [J]. *Flow Meas. Instrum*, 1990(1): 287-292.
- [6] CARLANDER C, DELSING J. Installation effects on an ultrasonic flow meter with implications for self diagnostics [J]. *Flow Meas. Instrum*, 2000(11): 109-122.
- [7] 鲍敏. 影响气体超声波流量计计量精度的主要因素研究[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学系, 2004.
- [8] 郑丹丹, 张朋勇, 孙立军, 等. 单弯管下游超声流量计的安装和测量性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2010(7): 1601-1607.

[编辑: 李辉]

## 本文引用格式:

吴春华, 鲍敏. 超声波流量计的弯管误差分析及修正研究[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 175-179.

WU Chun-hua, BAO Min. Bending pipe error analysis and correction of ultrasonic flowmeter[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(2): 175-179.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>