

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209448

# 上游弯管对超声波流量计精度影响及整流设计

姚爽<sup>1</sup>, 宿彬<sup>1</sup>, 杨宗良<sup>1</sup>, 程东旭<sup>2</sup>, 张凯<sup>1</sup>

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 河南中烟工业有限责任公司 郑州 450000)

**摘要:**针对上游弯管流场变化对超声波流量计测量精度的影响,利用CFD对测量管道内部流场进行数值仿真模拟,并设计整流器改善由弯管导致的明显的二次流和涡流等情况,以减小超声波流量计测量误差。研究对象为基于时差法的DN15超声波液体流量计,流量范围在0.1~1.5 m<sup>3</sup>/h内,上游弯管与流量计之间测试直管段距离为2~20D。对比超声波流量计加装整流器前后测量误差,通过实验结果验证,未整流时流量计随着直管段越短测量误差越大,安装的整流器可以改善管道内流场的速度分布,将直管段长度缩短为10D,提升超声波流量计测量误差满足在±1.5%以内,验证了数值模拟的正确性,对工程实际应用具有一定指导意义。

**关键词:**超声波流量计;时差法;数值模拟;上游弯管;整流

**中图分类号:** TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

## Influence of upstream elbow pipe on accuracy of ultrasonic flowmeter and design of rectification

Yao Shuang<sup>1</sup>, Su Bin<sup>1</sup>, Yang Zongliang<sup>1</sup>, Cheng Dongxu<sup>2</sup>, Zhang Kai<sup>1</sup>

(1. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. China Tobacco Henan Industry Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of upstream elbow pipe flow field changes on the measurement accuracy of ultrasonic flowmeter, CFD is used to numerical simulate the flow field inside the measuring pipe, and a rectifier is designed to improve the obvious secondary flow and eddy current caused by the bend, so as to reduce the measurement error of ultrasonic flowmeter. The research object is DN15 ultrasonic liquid flowmeter based on time difference method. The flow range is in the range of 0.1~1.5 m<sup>3</sup>/h. and the distance between the upstream elbow and the flowmeter is 2~20D. Compared with the measurement errors of ultrasonic flowmeter before and after installing the rectifier, The experimental results verify that the flowmeter has a greater measurement error with the shorter the straight pipe segment when the flowmeter is not rectified. The installed rectifier can improve the speed distribution of the flow field in the pipeline, shorten the length of the straight pipe section to 10D, improve the ultrasonic flowmeter measurement error to meet within ±1.5%, verify the correctness of the numerical simulation, and have certain guiding significance for the practical application of the project.

**Keywords:** ultrasonic flowmeter; the time difference method; numerical simulation; upstream elbow pipe; rectifier

## 0 引 言

超声波流量计具有非接触、精度高、智能化、压损低等优点,具有广阔的发展前景。超声波流量计精度受影响主要原因有:计量管段、流场以及回波信号质量。其中超声波回波信号是主导因素,信号采集与处理是流量计

的核心,流场不稳定对计量结果产生直接影响。采用时差法首先需要测量一对换能器对射声束线平均速度,经过修正计算得到面平均速度进而推导出流量,流量测量受涡旋产生的径向速度分量影响较明显,因此在测量时管段内部流动需充分发展。但在特定场合由于存在上游阻流件会影响管段内流场分布,增大测量误差,工业现场实际应用时90°弯管较为常见,弯管阻流件改变流场速度

分布,产生二次流对测量结果有着不可忽略的影响。王雪峰等<sup>[1]</sup>基于 CFD 与试验相结合方法研究弯管安装条件,并分析气体超声波流量测量误差影响因素,弯管与安装位置会对测量结果产生不同程度的影响。杨志超等<sup>[2]</sup>采用 CFD 方法研究平面和空间弯管存在时,下游热式气体流量计测量偏差,加入整流器对于减小测量误差有明显作用,可大大缩短直管段的长度。Piechota 等<sup>[3]</sup>通过 3 种湍流模型进行液压弯管的流动模拟与超声波流量计测量结果进行对比,讨论单个湍流模型的准确性。Yeh 等<sup>[4]</sup>通过数值模拟对非理想状态下超声波流量计进行仿真分析,得出强烈的二次流使测量准确度无法保证,传统流量系数曲线不再适用。以往的研究目的是避免安装效应对测量精度的影响,然而在某些特定应用中,由于流体通过弯管之后流场未充分发展,测量精度受上游阻流件影响很大<sup>[5]</sup>。本文研究应用 CFD 对超声波流量计上游阻流件为弯管时管段内部流场进行数值模拟,分析超声波流量计测量误差产生的来源。并设计整流器对流场进行优化,降低特定测试条件下的测量误差,提高超声波流量计对现场环境的适应性。

## 1 测量原理与误差形成

### 1.1 时差法测量原理

时差法测量原理利用超声波在流体中顺逆流传播的时间差推导计算得到流体的流速信息<sup>[6]</sup>。如图 1 所示,  $\theta$  为换能器与管道水平方向夹角,  $L$  为两换能器对射直线距离,  $D$  为管段内径,超声波在流体静止时的传播速度为  $C_0$ ,内部流体流速为  $v_0$ <sup>[7]</sup>。

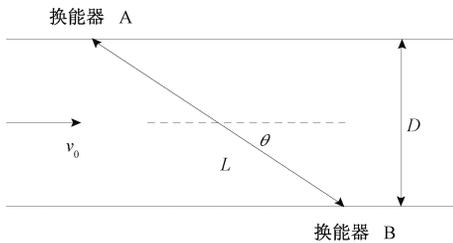


图 1 时差法流速测量原理

Fig.1 Schematic diagram of flow velocity measurement by time difference method

顺逆流超声波传播时间  $t_{12}$  和  $t_{21}$  如式(1)和(2)所示。

$$t_{12} = \frac{L}{(C_0 + v_0 \cos \theta)} \quad (1)$$

$$t_{21} = \frac{L}{(C_0 - v_0 \cos \theta)} \quad (2)$$

顺逆流传播时间差为:

$$\Delta t = t_{21} - t_{12} = \frac{2Lv_0 \cos \theta}{C_0^2 - v_0^2 \cos^2 \theta} \quad (3)$$

在液体介质中,  $C_0$  远远大于  $v_0$ , 简化  $C_0^2 - v_0^2 \cos^2 \theta \approx C_0^2$ , 且  $D = L \sin \theta$ , 推导出管道内流体流速如式(4)所示, 流量如式(5)所示。

$$v_0 = \frac{C_0^2 \tan \theta}{2D} \Delta t \quad (4)$$

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \frac{v_0}{k} \quad (5)$$

其中,  $k$  为流量修正系数。

### 1.2 流量修正系数

根据流体力学的理论分析知道流体都存在一定的粘性,其中雷诺数  $Re$  作为判断不同流体状态的表征数<sup>[8]</sup>。当  $Re < 2\ 300$  时流体处于层流状态,当  $Re > 4\ 000$  时流体处于紊流状态,  $2\ 300 \leq Re \leq 4\ 000$  则为过渡状态<sup>[9]</sup>。雷诺数表达式如下所示:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为密度,单位为:  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v$  为速度,单位为:  $\text{m}/\text{s}$ ;  $d$  为圆管直径,单位为:  $\text{m}$ ;  $\mu$  为流体的黏度,单位为:  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $Re$  为雷诺数。

流量修正系数  $k = u_L/u_A$ , 其中  $u_L$  为换能器对射直线段线平均速度,  $u_A$  为管道横截面平均速度。  $Re > 10^5$  时,  $k$  使用 Nikuradse 摩擦系数进行修正公式如式(7)所示;  $Re < 10^5$  时,  $k$  则由 Brasius 摩擦系数进行修正,公式如式(8)所示。

$$k = 1 + 0.01 \times \sqrt{6.25 + 431Re^{-0.237}} \quad (7)$$

$$k = 1.119 - 0.011 \times \log Re \quad (8)$$

式(7)和(8)是管道内流体处于充分发展条件下超声波流量计的流量修正系数表达式。实际工况条件下,上游阻流件的存在使流场并非理想状态,若用式(7)和(8)来计算修正系数将对超声波流量计测量精度产生一定程度的影响。

### 1.3 充分发展直管段测量误差

对于管道内部流体运动状态,可分为未充分发展和充分发展两种情况。充分发展指管段边界层厚度与管道直径相等,充分发展之前的未充分发展段称为初始段。流体进入直管段后都要经历起始到充分发展流动的过程<sup>[10]</sup>。起始段为  $l_e$ 。将  $l_e$  无量纲处理后是  $Re$  的函数,对于层流而言:

$$\frac{l_e}{D} = 0.06 \times Re \quad (9)$$

对于湍流而言:

$$\frac{l_e}{D} = 4.4 \times Re^{\frac{1}{6}} \quad (10)$$

如图2所示为DN15超声波流量计几何模型示意图。由于测量段存在上游阻流件,需要分析流量计前后无限长直管段时,上游弯管对流量计产生的测量误差。其中管道直径  $D = 15 \text{ mm}$ , 依据式(10)计算可得,当  $l_c = 20D$  时,管道内流体在进入流量计前可进入充分发展状态。其中流量误差定义为<sup>[10]</sup>:

$$\text{Error}\% = \frac{(Q_{\text{测量值}} - Q_{\text{真值}})}{Q_{\text{真值}}} \times 100\% \quad (11)$$

其中,  $Q_{\text{测量值}}$  应用式(11)并用数值仿真 Fluent 软件计算对射声束线平均速度得到的流量测量值;  $Q_{\text{真值}}$  为输入流量的设置值。

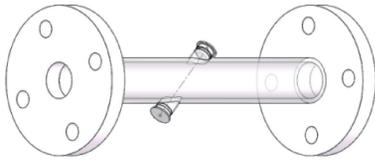


图2 DN15超声波流量计几何模型

Fig. 2 Geometric model of DN15 ultrasonic flowmeter

## 2 数值仿真

### 2.1 几何模型

首先将超声波流量计的几何模型做简化处理,以  $90^\circ$  弯管作为测量段的上游阻流件,如图3所示为弯管流场计算模型图。管道直径  $D = 15 \text{ mm}$ , 弯管曲率半径为  $R = 15 \text{ mm}$ ,  $L_0$  为弯管出口到测量管道中心之间直管段长度,  $L_0$  分别取  $2D$ 、 $4D$ 、 $8D$ 、 $10D$ 、 $20D$ 。

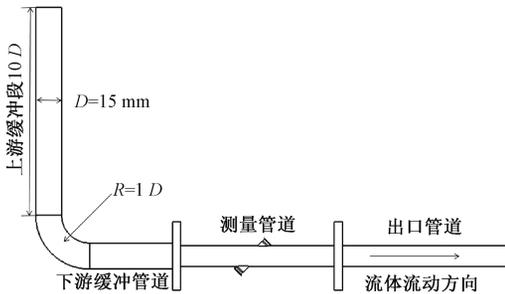


图3 弯管流场计算模型

Fig. 3 Calculation model of flow field in elbow

### 2.2 网格划分

在仿真模拟之前,先要对三维软件中画好的几何模型用 meshing 软件网格划分,对未加整流器之前的模型采用结构形网格,管道中加入整流器后采用结构化与非结构化相结合的混合网络<sup>[11]</sup>,模型分管段和整流器两部分进行网格划分。

直管段部分和弯管模型比较规则,采用结构形网络进行划分;另外设计栅格整流器内部的结构特征是不规则的,需用非结构混合网格划分;计算模型分成有整流器两种。如图4所示为弯管计算模型网格示意图。

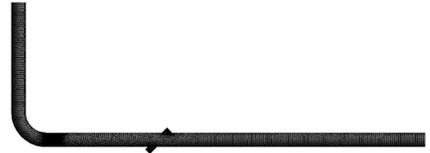


图4 弯管计算模型网格

Fig. 4 Mesh of elbow calculation model

为确保数值计算结果的准确性和有效性,需对弯管计算模型进行网格无关性验证。对加装整流器之后的弯管模型进行数值模拟,分别采用了总网格数为60万、100万和140万这3种方案,将仿真得出的模拟系数与理论系数对比。实验结果表明,60万网格模型的模拟系数与理论系数误差为0.41%,100万及140万网格数量的模型仿真结果差异不大,与理论系数误差均为0.05%。考虑到节约时间成本的原则,最终选择了计算域的网格总数为100万。

### 2.3 数值仿真方法准确性验证

一般在数值模拟之前,需验证数值仿真准确性。如图5所示理论与模拟系数进行对比。理论修正系数通过式(7)与(8)计算得到。模拟系数是通过数值模拟方法仿真计算出  $u_L$  与  $u_A$  的比值。理论与模拟系数间误差越小,数值模拟方法越准确。

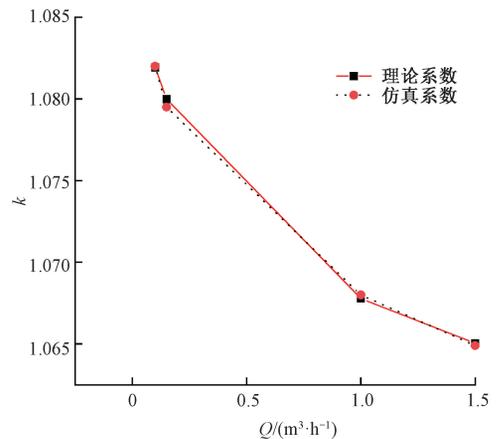


图5 理论系数与仿真系数对比曲线

Fig. 5 Comparison curve between theoretical coefficients and simulation coefficients

### 2.4 数值计算

本文数学模型为 SIMPLE 算法,流体介质为常温常压下水,入口为 Velocity-inlet,出口为 Outflow。仿真流量

点选为  $Q_1 = 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_2 = 0.15 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_3 = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_4 = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 对应入口速度分别为 0.157、0.236、1.572 和 2.358 m/s。对于流量点  $Q_1$  选用层流 Laminar 模型。流量点  $Q_2$  为过渡区域, 用 SST  $k\text{-}\omega$  模型。大流量点  $Q_3$  与  $Q_4$  选用湍流模型, 定义收敛残差为  $1 \times 10^{-6}$  [12]。

### 3 数值模拟结果分析

#### 3.1 计算结果与分析

如图 6 所示为管道内部横截面速度云图。图 6 中所展示的流量点的速度, 均为  $Q = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ 。弯管与流量计之间直管段分别取  $L_0 = 2D, 4D, 6D, 8D, 10D$  和  $20D$ 。

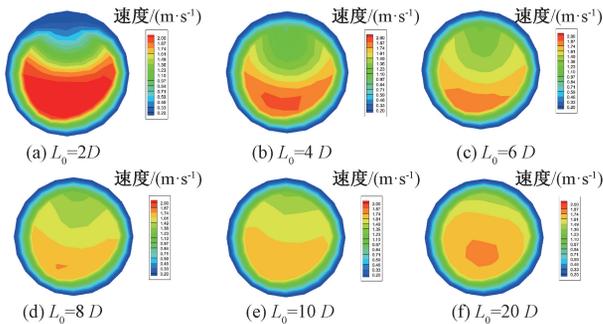


图 6 测量段横向截面速度等值线

Fig. 6 Velocity contour of transverse section of measuring section

仿真结果说明,  $L_0 = 2D$  和  $4D$  时, 二次流影响速度分布情况, 此时速度梯度较大。弯管与测量段间距增大, 速度场分布均匀性有所增强, 但仍存在径向速度的影响 [1]。说明随着直管段长度增加测量误差逐渐减小。

使用数值模拟计算流量计对射声束线平均速度。式 (11) 可以计算单弯管产生的流量相对误差。如表 1 所示为弯管未加装整流器时流量误差。

表 1 弯管未加装整流器流量误差

Table 1 Flow error of elbow without rectifier

流量 $/( \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} )$	2D /%	4D /%	8D /%	10D /%	20D /%
0.10	17.68	-13.5	-5.92	-4.45	0.55
0.15	-17.53	-14.39	-6.54	-4.97	-0.25
1.00	-18.97	-15.99	-8.84	-7.06	-2.89
1.50	-18.76	-16.37	-9.01	-7.61	-3.23

如表 1 所示, 在弯管与测量段间距较小, 弯管段内会产生强烈二次流, 对测量准确度影响最高可达 18.97%。直管段增至 8D 后, 二次流对测量精度影响降低至 10%

内。如图 7 所示为弯管流量测量相对误差。横轴为流量, 纵轴为相对误差。

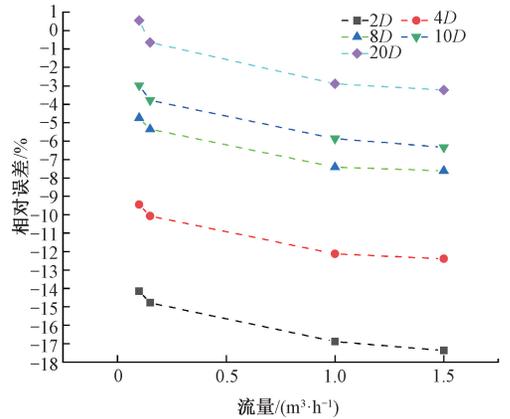


图 7 弯管流量测量相对误差

Fig. 7 Relative error of elbow flow measurement

由图 7 可得, 流量为  $0.1 \sim 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 距离  $L_0$  越小误差越大。  $L_0$  相同, 则相对流量误差曲线趋于直线。随着流量的增加, 相对流量误差总体上趋于增加 [13]。观察这几个测量段的等值线图可以看到, 在这一距离段的流体分布不均匀, 流体分布中存在涡流或二次流现象。

#### 3.2 加装整流器改善测量准确度

根据以上分析, 弯管内会产生二次流和涡流, 对测量精度有显著影响。为减少测量误差, 整流器置于管入口处 [14]。栅格整流器由等截面的矩形、圆形管构成。整流器控制流量, 使速度平行管道轴线。将大涡流分裂成小涡流, 提高测量准确度。

如图 8 所示为栅格整流器几何结构示意图。整流器总长 15 mm, 栅格大小为  $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 。在弯管下游出口处安装栅格整流器。仿真流量点同样选取为  $Q_1 = 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_2 = 0.15 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_3 = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q_4 = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。如表 2 所示为加装整流器后流量测试误差。

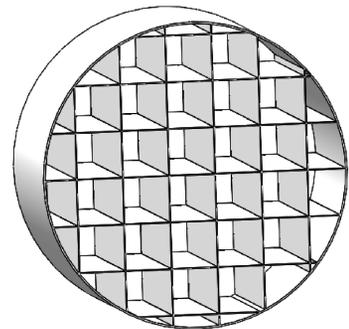


图 8 栅格整流器几何模型

Fig. 8 Geometric model of cellular rectifier

表2 弯管加装整流器流量误差

Table 2 Flow error of rectifier installed in elbow

流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	2D /%	4D /%	8D /%	10D /%	20D /%
0.10	-5.92	-1.51	0.55	1.14	-1.22
0.15	-6.54	-2.61	-0.65	-0.25	0.14
1.00	-5.75	-3.84	-2.77	-1.99	-1.69
1.50	-5.86	-3.95	-2.92	-2.24	-1.96

如图9所示为弯管加装整流器前后流量误差对比。间距 $L_0$ 为2D、4D和8D,对比加装整流器前后的流量误差。

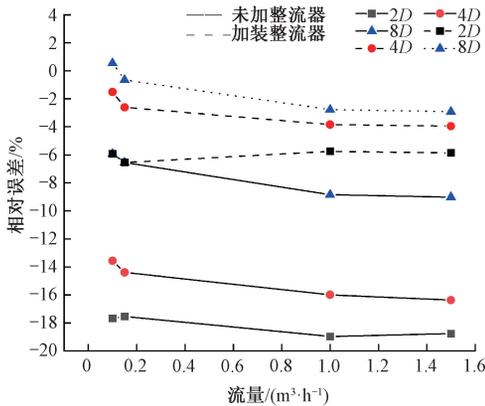


图9 弯管加装整流器前后流量误差对比

Fig. 9 Comparison of flow error before and after the installation of rectifiers in elbows

由图9可知安装整流器后流量误差比未安装整流器要小。距离 $L_0$ 越小,测量误差减小的越明显,整流器稳定效果越显著。如图10所示为4个流量点下测量段对射声束速度分布图,对比分析加装整流器前后速度分布。距离 $L_0$ 为2D,流量为 $Q_1 = 0.1 m^3/h$ 、 $Q_2 = 0.15 m^3/h$ 、 $Q_3 = 1 m^3/h$ 、 $Q_4 = 1.5 m^3/h$ 。

无整流器时弯管本身阻流导致径向速度的产生,速度分布不均匀。加装整流器时线速度分布较为均匀<sup>[16]</sup>,测量精度有所提高,这与图9中得出的结论一致。

### 3.3 栅格整流器在管道内压损分析

压损(压力损失)实质上反映流体流经整流器所消耗的机械能<sup>[17]</sup>,压损较大时会影响实际测量结果,所以要保证加装整流器后压损不至于过大。

加装栅格整流器后对整流器入口和流量计入口两端压力进行数值模拟,两端全压差即为压损。如图11所示为压损-流量曲线图。横坐标为流量值,单位为 $m^3/h$ 。纵轴为压差,单位为kPa。不同曲线表示,在不同间距下,压损与流量的对应关系<sup>[18]</sup>。

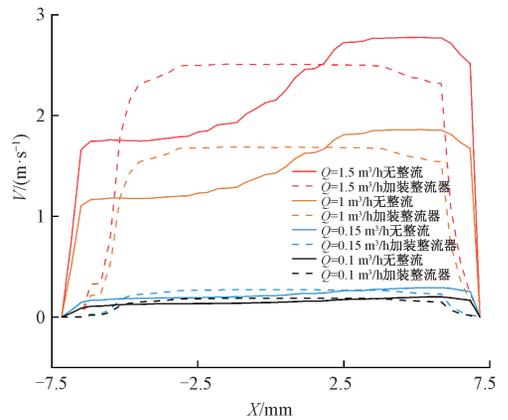


图10 测量段对射线上线速度分布图

Fig. 10 Distribution of velocity on the line of the measuring section to the ray

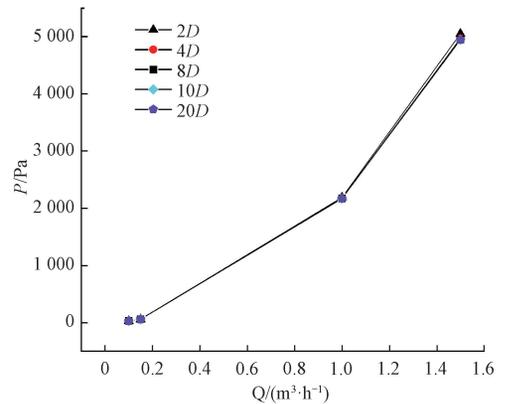


图11 栅格整流器压损—流量曲线

Fig. 11 Cellular Rectifier Pressure Loss-Flow Curve

从图11可知,当距离一定,若流量增大,则压损逐渐增大。当流量一定,若阻流件与流量计间距越小,则压降越大。总而言之,在 $0.1 \sim 1.5 m^3/h$ 流量范围时,5 kPa左右为最大压损,0.3 MPa左右为供水压力。结论得出栅格整流器压降符合现行应用标准,不影响管道测量。

### 3.4 实测实验与分析

为验证本文数值模拟结果的正确性,搭建实验平台进行流量实验测量,3D打印栅格整流器如图12所示,实验平台由水泵,水箱,调节阀、节流阀,若干长度管道(2~20D),1级标准表,被检超声波流量计,栅格整流器组成。实验平台如图13所示。

根据《JJG-162-2009 冷水水表检定规程》,流量点确定为 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 和 $Q_4$ ,分别为0.1、0.15、1和 $1.5 m^3/h$ 。共测试4个流量点,对每个流量点测试6次,对6次相对示值误差求平均,如表3所示为弯管未加装整流器瞬时流量误差。

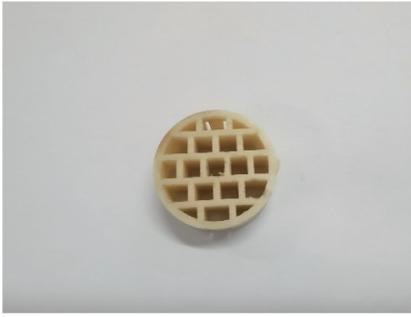


图 12 栅格整流器实物  
Fig. 12 grid rectifier object

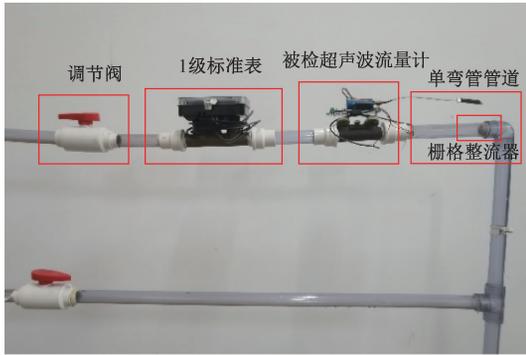


图 13 实验平台  
Fig. 13 Experimental platform

如表 3 所示,弯管未加整流时,弯管与测量段距离  $L_0$  为  $2D$  时,瞬时流量误差最高可达 18.20%,  $L_0$  越长瞬时流量误差越小。如表 4 所示,弯管加整流时,弯管与测量段距离  $L_0$  为  $2D$  时,瞬时流量误差降低到 6% 以内,整流器对改善流场降低测量误差起到了作用。

表 3 弯管未加整流器瞬时流量误差

Table 3 Instantaneous flow error of elbow without rectifier

流量 $/(m^3 \cdot h^{-1})$	2D /%	4D /%	8D /%	10D /%	20D /%
0.10	-16.67	-12.33	-5.40	-4.20	-1.33
0.15	-17.40	-12.59	-5.89	-4.57	-0.80
1.00	-17.71	-14.94	-8.04	-6.64	-1.03
1.50	-18.20	-15.79	-8.49	-7.02	-1.27

如图 14 所示为弯管加装整流器前后瞬时流量误差对比。间距  $L_0$  为  $2D$ 、 $4D$  和  $8D$ 。可知安装整流器后瞬时流量误差范围比未安装整流器要小 6%。由图 14 显示距离  $L_0$  越小,加装整流器对降低误差效果越显著,与数值模拟得出的误差范围相差无几。

表 4 弯管加整流器瞬时流量误差  
Table 4 Instantaneous flow error of rectifier installed in elbow

流量 $(m^3 \cdot h^{-1})$	2D /%	4D /%	8D /%	10D /%	20D /%
0.10	-4.24	-2.13	0.71	1.13	-1.07
0.15	-5.40	-2.22	-0.68	-0.65	-1.11
1.00	-5.36	-3.06	-2.19	-0.40	0.16
1.50	-5.60	-4.02	-2.24	-0.52	0.08

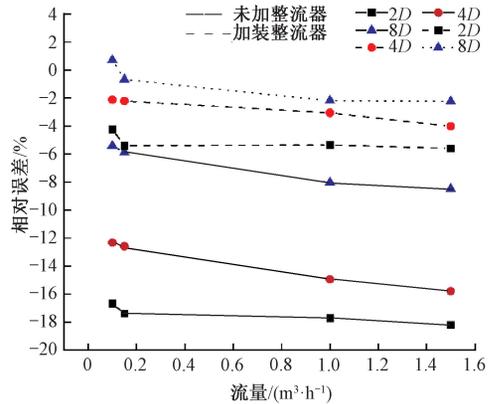


图 14 弯管加装整流器前后流量误差对比  
Fig. 14 Comparison of flow error before and after the installation of rectifiers in elbows

如图 15 所示,通过实验得出,安装整流器后直管段  $L_0$  长度由  $20D$  缩短为  $10D$  时,未加整流的流量计流量示值误差降低到 1.5 级瞬时流量相对误差线内,与数值模拟结果相吻合,验证了数值模拟结果的正确性。

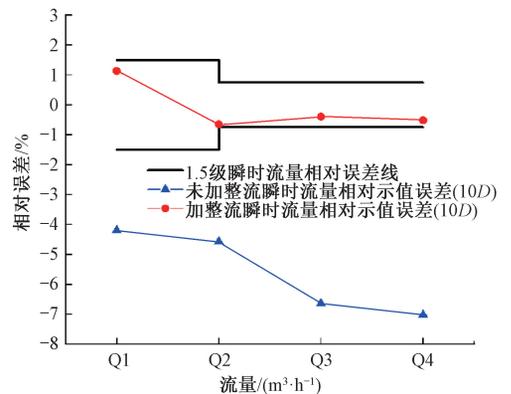


图 15 弯管加装整流器前后 10D 流量误差对比  
Fig. 15 Comparison of 10D flow error before and after installing rectifier in elbow

## 4 结 论

本文对上游弯管对超声波流量计管段内部流场进行数值模拟研究,得出 $90^\circ$ 弯管会对超声波流量计测量误差产生影响,设计并安装栅格整流器改善内部流场速度分布。实验结果表明:存在上游弯管时,超声波流量计随着弯管出口直管段长度的增加,测量误差逐渐减小,由 $2D$ 时的18%左右减小到 $20D$ 时的3.5%以内,加装整流器后在7%以下。通过实验实测数据验证,相比未加整流器测量误差范围减小6%。加装栅格整流器可有效降低管道流体状态扰动对测量误差的影响,从而减小前直管段的设计长度到 $10D$ ,并改善了流量计的综合适应性。

### 参考文献

- [1] 王雪峰,唐祯安. 超声波气体流量计的管道模型仿真和误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(12): 2612-2618.  
WANG X F, TANG ZH AN. Pipeline model simulation and error analysis of ultrasonic gas flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(12): 2612-2618.
- [2] 杨志超,王清平,张凯,等. 弯管对热式气体流量计测量误差的影响[C]. 仪器仪表学报, 2015, 36(增刊): 304-308.  
YANG ZH CH, WANG Q P, ZHANG K, et al. Influence of elbow on measurement error of thermal gas flowmeter [C]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(Supplement): 304-308.
- [3] PIECHOTA P, SYNOWIEC P, ANDRUSZKIEWICZ A, et al. Selection of the relevant turbulence model in a CFD simulation of a flow disturbed by hydraulic elbow—Comparative analysis of the simulation with measurements results obtained by the ultrasonic flowmeter[J]. Journal of Thermal Science, 2018, 27(5): 413-420.
- [4] YE H T T, ESPINA P I. Special ultrasonic flowmeters for in-situdiagnosis of swirl and cross flow [C]. Proceedings of Asme Fedsm 2001, New Orleans, Louisiana, 2011: 110-112.
- [5] HLGENSTOCK A, ERNST R. Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1996, 7(3-4): 161-171.
- [6] 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 CH H, BAO M. Analysis and correction of bending error of ultrasonic flowmeter [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2015, 32(2): 175-179.
- [7] 邵欣,王涛,高芦宝,等. 基于CFD的超声波气体流量计过渡区内流场检测优化研究[J]. 中国测试, 2021, 47(10): 114-122.  
SHAO X, WANG T, GAO L B, et al. Optimization of flow field detection in the transition zone of ultrasonic gas flowmeter based on CFD [J]. China Test, 2021, 47(10): 114-122.
- [8] 苏宝焕,吕薇,齐国利,等. 上游弯管对工业锅炉水流量测量准确性的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(6): 18-23.  
SU B H, LYU W, QI G L, et al. Influence of upstream elbow on the accuracy of industrial boiler water flow measurement [J]. Harbin University of Science and Technology, 2018, 23(6): 18-23.
- [9] 陈红. 上游弯管对超声波流量计测量误差的影响[D]. 杭州:中国计量学院, 2014.  
CHEN H. Influence of upstream elbow on measurement error of ultrasonic flowmeter [D]. Hangzhou: China Institute of Metrology, 2014.
- [10] 何钟宁. 大型泵站钟形进水渠道三维数值模拟与试验研究[D]. 扬州:扬州大学, 2007.  
HE ZH N. Three-dimensional numerical simulation and experimental research on bell-shaped inlet channel of large pumping station [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2007.
- [11] 李跃忠,李昌禧. 多声道超声气体流量计的建模与仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006(4): 39-41, 55.  
LI Y ZH, LI CH X. Modeling and simulation of multi-channel ultrasonic gas flowmeter [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006(4): 39-41, 55.
- [12] 何存富,刘飞,张力新,等. 多声道超声流量计在弯管段安装的适应性研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1): 6-12.  
HE C F, LIU F, ZHANG L X, et al. Study on the adaptability of multi-channel ultrasonic flowmeter installation in elbow section [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(1): 6-12.
- [13] 邵家存,严微微,林景殿,等. 气体涡轮流量计后导流

体结构优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 46-53.

SHAO J C, YAN W W, LIN J D, et al. Optimal design of the structure of the rear guide fluid of the gas turbine flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 46-53.

- [14] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

FEI Y T. Error theory and data processing[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010.

- [15] 梁国伟, 蔡武昌. 流量测量技术及仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

LIANG G W, CAI W CH. Flow measurement technology and instrument [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002.

- [16] 徐静勇, 李斌, 时慧, 等. 基于 FLUENT 技术的热式质量流量计的仿真及实验的研究[J]. 科技传播, 2012(4): 121-122, 66.

XU J Y, LI B, SHI H, et al. Simulation and experimental study of thermal mass flowmeter based on FLUENT technology [J]. Science and Technology Communication, 2012(4): 121-122, 66.

- [17] 姚平. 复杂流场下气体超声波流量计测量精度提升方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

YAO P. Measurement accuracy improvement method of gas ultrasonic flowmeter under complex flow field [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

- [18] 陈红, 聂西利, 丁渊明. 超声波流量计整流器设计及验证[J]. 自动化仪表, 2018, 39(7): 91-93, 102.

CHEN H, NIE X L, DING Y M. Design and verification of ultrasonic flowmeter rectifier [J]. Automation Instrumentation, 2018, 39(7): 91-93, 102.

## 作者简介



姚爽, 2019 年于安徽工程大学机电工程学院获得学士学位, 现为中国计量大学研究生。主要研究方向是超声波技术、流体流量测量技术、物联网和智能仪器。

E-mail: ys479433087@163.com

**Yao Shuang** received a B. Sc. degree from the College of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University in 2019, He is currently a master student at China Jiliang University. His main research interests are ultrasonic technology, fluid flow measurement technology, internet of things and intelligent instrument.



程东旭, 2012 年于河南大学获得学士学位, 2015 年于中国计量大学获得硕士学位, 现为河南中烟工业有限责任公司工程师, 主要研究方向为烟草计量。

E-mail: cchhddxx@163.com

**Cheng Dongxu** received a B. Sc. degree from Henan University in 2012 and a M. Sc. degree from China University of Metrology in 2015. He is now an engineer of China Tobacco Henan Industry Co., Ltd. His main research direction is tobacco metrology.



张凯(通信作者), 2007 年在浙江大学流体力学博士学位。主要研究方向是流量测量设备开发、微流控芯片和物联网。

E-mail: zkzb3026@yahoo.com

**Zhang Kai** (Corresponding author) received a Ph. D. in fluid mechanics from Zhejiang University in 2007. His main research directions are flow measurement device development, microfluidic chips, and the internet of things.