

DOI:10.13382/j.jemi.B2508365

不同流动流态下的超声波流量计流速算法优化*

王 玥 刘 晓 东 吴 桂 峰

(扬州大学电气与能源动力工程学院 扬州 225000)

摘要: 为了降低基于传统时差法的超声波流量计在不同流态下的计算误差,本文针对流速计算提出一种新的修正方法。首先根据雷诺数(Re)将流场化为3种不同状态即层流($Re < 2000$)、过渡流($2000 < Re < 4000$)、湍流($Re > 4000$),在理想流态线速度分布公式的基础上加入修正因子来克服由于流动状态引起的误差,先将基于水循环系统和PIV系统获得的一组雷诺数为2000和一组雷诺数为4000的流速流量数据作为标定值,结合有修正因子的线速度分布公式与积分时差法得到带有修正因子的流速和流量计算方法,通过不断改变修正因子求流速与流量并与标定值进行误差计算,与标定值误差为零时的修正因子即为所求,此时层流和湍流线速度分布的修正因子分别为1.847 1和1.436 8。将修正后的层流和湍流线速度分布公式结合线性插值公式得出过渡流时的线速度分布公式从而得出过渡流时的流速和流量值。通过将除标定数据外的数据作为修正流速计算公式的验证数据,结果显示,在雷诺数2000~4000时(过渡流)的计算误差与实验误差基本在0.2%左右,高雷诺数湍流时的相对误差在0.45%左右,以上结果表明通过雷诺数分区并结合修正因子和积分时差法计算流量是有效且计算结果较精确的。

关键词: 流场状态判断;不同流态的线速度分布;积分时差法;修正因子

中图分类号: TN64;TB937

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.4030

Optimisation of flow rate algorithms for ultrasonic flow meters in different flow regimes

Wang Yue Liu Xiaodong Wu Guifeng

(School of Electrical and Energy & Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China)

Abstract: To reduce the calculation errors of ultrasonic flowmeters using the traditional time-difference method under different flow states, a correction method for flow velocity calculation is proposed. The flow field is classified into three states according to the Reynolds number (Re): laminar flow ($Re < 2000$), transitional flow ($2000 < Re < 4000$), and turbulent flow ($Re > 4000$). Correction factors are added to the linear velocity distribution formula of the ideal flow state to address errors caused by different flow states. A water circulation system and a PIV system are used to collect flow rate data at $Re = 2000$ and $Re = 4000$ as calibration values. The linear velocity distribution formula with correction factors is combined with the integral time-difference method to calculate flow velocity and rate. By adjusting the correction factors and minimizing the errors between calculated and calibrated values, the correction factors for laminar and turbulent linear velocity distributions are determined as 1.847 1 and 1.436 8, respectively. Then, linear interpolation is applied to obtain the linear velocity distribution and corresponding flow values for transitional flow. The experimental data are used for validation. Results show that the calculation error for transitional flow ($Re = 2000-4000$) is about 0.2% relative to the experimental error, and for high- Re turbulent flow, the relative error is around 0.45%. This proves that the method of combining correction factors with the integral time-difference method via Reynolds number classification is effective and yields more accurate results.

Keywords: flow field state judgement; linear velocity distribution for different flow regimes; integral time difference method; correction factor

0 引言

在工业生产的诸多环节中,如石油运输、化工流程控制等,精确测量流体流量意义重大,超声波流量计因无压力损失、测量精度高等优势,在流量测量领域应用广泛,传统测流方法在实际应用中存在明显局限,由于未考虑流体在不同流场状态下的线速度分布差异,会造成流量计算结果出现偏差,导致超声波流量计的测量精度难以适应复杂多变的工业环境需求。目前,分段线性矫正为超声波流量计常用方法^[1],但在过渡流等复杂流场状态下,线性化区段划分不足,分析准确度就很难保障^[2-4],尤其在工业领域中^[5],流体流场状态常频繁变化^[6],分段线性化方法在此类场景中就很难精准捕捉流速变化规律。

现有研究对超声波流量计精度问题展开探索,刘权等^[7]使用辅助阻抗匹配支路时差测量系统的方式提高了高温工况的测量精度与稳定性。杨瑞峰等^[8]采用带有补偿的互相关算法降低了渡越时间误差;宿彬等^[9]对各类补偿算法进行综述,梳理了由于温度导致超声波流量计计算误差。黄晓红等^[5]提出改进的 $ApFFT$ 算法,通过优化信号处理流程提升了测量精度;邵珠峰^[2]结合实验与直接数值模拟(DNS),对圆管广义过渡区流态展开研究,针对圆管面线平均速度关系进行计算,进一步为流速修正提供了理论支撑。姚灵^[1]通过区分层流与湍流状态并考虑动态适配流场变化提出修正分段线性的方法减小单声道超声水表的线性误差。但当前研究仍存在不足,比如针对湍流状态的处理方案虽精确度有所提升^[10],但是计算效率却明显下降^[11-13],在过渡流区域的流量流速计算研究较少,且精确度仍有待提高。

鉴于上述问题,本文围绕层流、过渡流和湍流这 3 种流态,结合积分时差法,提出一种更为优化的流量计算方法,并针对动态流场适配及误差修正展开深入研究,旨在为高精度流量测量提供理论支撑与工程解决方案。

1 修正超声波流量计流速计算方法原理

本文所阐述的方法思路如图 1 所示。首先,通过计算雷诺数对流场状态进行精确判断,并将其明确划分为层流、过渡流和湍流这 3 种类型。接着,利用实验标定值(分别包含一组湍流数据和一组层流数据),对线速度分布中的修正因子展开精确计算。随后,将经过修正的线速度分布代入积分时差法,从而计算出精确的时差。再结合流速与时差公式,进而推导出流速。在此过程中,当推导出的流速与标定值完全相同,即差值为 0 时,此时对应的修正因子即为所要求解的结果。

在成功得出层流^[14]和湍流^[10]这两种状态下的修正

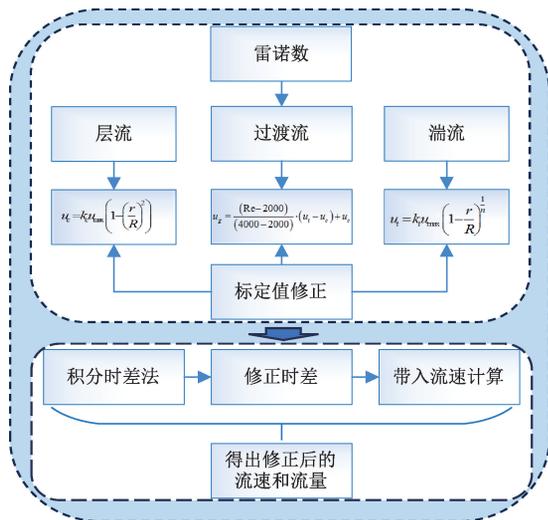


图 1 方法结构框架

Fig. 1 Methodological structural framework

线速度分布公式后,便能由线性插值法结合修正后的湍流和层流线速度分布得出过渡流线速度分布进而得出过渡流的流速和流量计算方法。具体而言,采用与前文相同的方法步骤,首先将 3 种流态下的修正后的线速度分布公式结合积分时差法计算出精确的时差,然后将该时差代入流速与时差的关系公式,由此便可得出修正后的流速和流量。

1.1 流场状态划分依据

对于不同流场状态划分使用雷诺数判断法,具体而言,当 Re 在 $0 \sim 2\,000$ 时,流场为层流状态; Re 在 $2\,000 \sim 4\,000$ 时,为过渡流状态; Re 大于 $4\,000$ 时,流场为湍流状态^[1],其计算公式为:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1)$$

其中, ρ 是流体密度, v 是平均流速, D 是管道内径, μ 是粘度系数。

1.2 不同流场线速度分布公式及修正

层流时线速度分布公式为^[14]:

$$u_c = u_{max} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (2)$$

其中, u_{max} 为管道中心最大线速度, R 为管道半径, r 为速度点到中心轴的距离。

湍流时线速度分布公式为^[10]:

$$u_c = u_{max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

当雷诺数小于 $10\,000$ 时,参数 n 可通过实验数据查询流体和管道相关几何参数得出^[15]。当雷诺数大于 $10\,000$ 时,由于参数 n 可用公式(4)所示,此公式为已知参数拟合后的近似公式。

$$n = 1.851g(\text{Re}) - 1.7 \quad (4)$$

图 2 为管道半径为 0.2 m 下层流(雷诺数 2 000)和湍流(雷诺数 4 000)的线速度分布图,使用不同流体状态线速度分布公式可考虑到不同状态下流体速度从管道中心向管壁逐渐减小的分布规律,提高流量计算在不同流场状态下的连贯性和准确性。

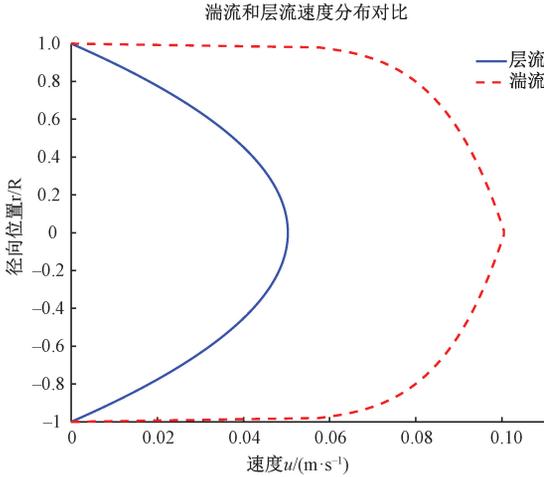


图 2 无修正下不同流态的线速度分布图
Fig. 2 Linear velocity distribution for different flow regimes without correction

经典流体力学中层流和湍流状态的线速度分布公式是被理想化的,由于其未考虑实际工业管道中流体会受管道内粗糙度、流体内部杂质和环境温度变换等复杂因素,会使实际流体的线速度分布与理论有所偏差。尤其考虑到光滑壁面和粗糙壁面对湍流流速的沿程分布造成影响,流体在湍流状态的对数区拟合函数的线性因子会随着湍流粗糙度突变发展区到湍流充分发展区的变化而变化。

因此猜测层流和湍流的流体会受管道内粗糙度等复杂因素,使流速分布函数也会受到线性因子的影响。

于是在本文对于误差修正,引入修正因子 k_c 和 k_t 对两种流态的线速度分布公式进行修正,补偿理论与实际计算的差异,使计算结果更贴近实际的线速度分布情况。

此时修正后的层流和湍流线速度分布公式为:

$$u_c = k_c u_{\max} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right); u_t = k_t u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

采用线性插值法使过渡流平滑衔接层流和湍流,确保在 $\text{Re} = 2\,000$ 时完全退化为层流分布, $\text{Re} = 4\,000$ 时完全转化为湍流分布,避免跳跃突变。结合上述修正后的线速度分布可得过渡流计算公式为:

$$u_g = \frac{(\text{Re} - 2\,000)}{(4\,000 - 2\,000)} \cdot (u_t - u_c) + u_c \quad (6)$$

1.3 结合基本时差法和积分时差法计算流速及其原理验证

常见超声波流量计中,通常两个换能器可以布置成 W 型、V 型或 Z 型,这 Z 型与 W 和 V 型的区别在于超声波的传播距离。W 型和 V 型排列方式的传播距离较长,因此检测到超声波的时间也较长。但它们的测量原理是相同的,即一个传感器作为发射器,另一个作为接收器。传输时间反映流体的流速。因此,为了便于理解,本文只讨论 Z 型^[15]。

超声波流量计的基本原理如图 3 所示。传感器 P₁ 和 P₂,发送并检测一个短的声脉冲,该声脉冲的斜面为传播方向与管道轴线成 θ 角^[15]。

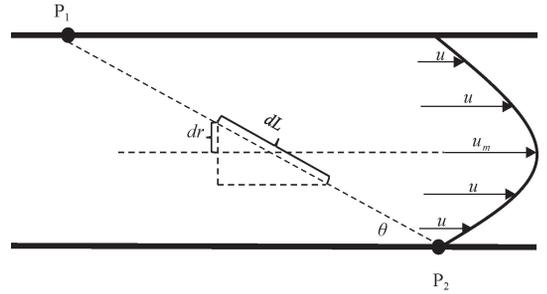


图 3 超声波流量计检测原理
Fig. 3 Ultrasonic flowmeter detection principle

其中, L 为通常代表传感器之间的直线距离(P_1 和 P_2 之间的距离), c 为超声波在流体介质中传播的速度, v 为流体介质的流速, θ 为介质流速方向与传感器连线之间的夹角, t_d 为顺流方向时间, t_u 为逆流方向时间^[15]。

由基本时差法公式^[16-18]:

$$\begin{cases} t_d = \frac{L}{c + v \cos \theta}; t_u = \frac{L}{c - v \cos \theta} \\ \Delta T = t_u - t_d \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)化简推导可得传统时差法流速计算公式:

$$v = \frac{L}{2c \cos \theta} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2} \quad (8)$$

但由于整个管道的速度分布并不均匀,速度的变化会对超声波的传播产生影响,这种通过测量超声波顺流和逆流传播的时间差,计算流体平均流速,进而得到流量值的方法误差较大。因此,式(8)中的传统时差法计算流速只能在非常薄的流体厚度内使用,因此对于厚流体层使用积分时差法。与传统方法一样的是需要计算顺流和逆流的时差,但此时要对顺逆流时间做微分处理,最后得出微分时差^[15]:

$$dT_2 - dT_1 = \frac{dL}{c - u \cos \theta} - \frac{dL}{c + u \cos \theta} \quad (9)$$

其中, dL 是在微分长度上超声波作用的距离,通过几何关系可得:

$$dL = \frac{2dr}{\sin\theta} \quad (10)$$

其中, dr 是在微分厚度上薄层厚度, R 是管道半径长度, 结合式(7)、(9)、(10)即可得出积分时差公式^[19-20]:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{2}{\sin\theta} \int_0^R \left[\frac{1}{c - u\cos\theta} - \frac{1}{c + u\cos\theta} \right] dr \quad (11)$$

通过积分得出流速与时差的关系:

$$\Delta T = L \cdot \frac{2v\cos\theta}{c^2 - u^2\cos^2\theta} \quad (12)$$

因 $v \ll c$, 所以通过近似化简得:

$$\Delta T = L \cdot \frac{2u\cos\theta}{c^2} \quad (13)$$

从而先得出流速计算近似公式:

$$u = \frac{c^2 \Delta T \sin\theta}{4R \cos\theta} \quad (14)$$

得出流速时差关系后, 通过将修正的流速分布函数代入积分时差法修正时差进而修正流速计算公式, 此方法计算的时差会考虑线速度分布不同产生的误差, 且适用于更广的流体层情况。

对于线速度分布修正因子对流速影响原理的推导, 当流体处于层流时 $u = u_c$, 当处于过渡流时 $u = u_g$, 当处于湍流时 $u = u_t$, 结合式(5)和式(11)积分化简可得层流下时差为:

$$\Delta T = \frac{2R}{u_m \sin\theta \cos\theta k_c} \int_0^1 \frac{2 - 2s^2}{\left(\frac{K}{k_c}\right)^2 - (1 - s^2)^2} ds \quad (15)$$

其中, $K = \frac{c}{u_m \sin\theta \cos\theta}$, $s = \frac{r}{R}$ 由于 $\left(\frac{K}{k_c}\right)^2 \gg (1 - s^2)^2$, 因此可得层流时差:

$$\Delta T = \frac{8R \cdot \cos\theta \cdot u_m \cdot k_c}{3 \cdot c^2 \cdot \sin\theta} \quad (16)$$

结合式(5)和式(11)积分化简可得湍流流下时差为:

$$\Delta T = \frac{2R}{u_m \sin\theta \cos\theta k_t} \int_0^1 \frac{2(1 - s)^{1/n}}{\left(\frac{K}{k_t}\right)^2 - (1 - s)^{2/n}} ds \quad (17)$$

由于 $\left(\frac{K}{k_t}\right)^2 \gg (1 - s^2)^{2/n}$, 因此可得湍流时差:

$$\Delta T = \frac{n}{n+1} \frac{4R \cdot u_m \cdot \cos\theta \cdot k_t}{c^2 \cdot \sin\theta} \quad (18)$$

由式(15)和式(17)积分法算出的时差与公式(13)结合可以验证, 修正因子先对时差进行修正, 进而对流速进行修正使流速计算更加精确。

对于过渡流时的流速计算可结合用标定值得出的修正因子和式(6)、(11)和(14)。

1.4 修正因子的确定方法

在湍流和层流状态下, 使用圆管 PIV (particle image velocimetry) 测量实验系统测量的流速数据^[2], 获取层流(取雷诺数 2 000 时的数据)和湍流状态(取雷诺数 4 000 时的数据)下各一组实验流速数据, 以上两组数据用来确定 k_c 和 k_t 。

结合流速计算式(14)和时差计算式(15)得出带有修正因子的层流状态下的流速, 结合流速计算式(14)和时差计算式(17)得出带有修正因子的湍流状态下的流速, 通过对比与实验流速的误差不断矫正 k_c 和 k_t 修正系数。

$$e = v_{actual} - v \quad (19)$$

当流体状态是层流时 $v = v_c$ 当流体状态是湍流时 $v = v_t$, 当 e 为 0 时对应的修正因子即为所求。

确定好湍流和层流状态的修正因子后结合式(6)、(11)和(14)即可得出过渡流下的流速。

2 实验验证与结果分析

2.1 实验装置搭建与实验数据采集

本文的实验数值采用水循环系统和 PIV 系统结合的方法获得, 不同雷诺数 ($2\,000 < Re < 20\,000$) 下的管道内平均速度数据如表 1 所示^[2], 在每个雷诺数下共统计 4 个流量值。实验管段直径 $d = 40$ mm, v 为管道内平均速度。

表 1 数据记录表
Table 1 Data logging form

Re	T/°C	v/(m/s)	实际流量记录(4次) $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$			
2 000	12	0.062	0.28	0.28	0.281	0.28
2 200	12	0.068	0.309	0.309	0.309	0.309
2 400	12	0.074	0.337	0.338	0.337	0.337
2 600	12	0.081	0.365	0.366	0.367	0.366
2 800	12	0.087	0.392	0.392	0.392	0.392
3 000	12	0.093	0.418	0.42	0.42	0.42
3 200	12	0.099	0.499	0.448	0.449	0.448
3 400	12	0.105	0.477	0.478	0.477	0.477
3 600	12	0.112	0.503	0.503	0.502	0.503
3 800	12	0.118	0.533	0.534	0.533	0.535
4 000	12	0.124	0.561	0.561	0.561	0.561
...
11 800	11.2	0.374	1.694	1.692	1.691	1.692
12 000	11.2	0.38	1.717	1.719	1.72	1.719
12 200	11.2	0.387	1.75	1.75	1.751	1.75
...
19 600	10.3	0.636	2.88	2.878	2.879	2.879
19 800	10.3	0.643	2.907	2.908	2.907	2.905
20 000	10.3	0.649	2.936	2.936	2.935	2.937

2.2 结果对比与分析

由图 4 可知为过渡流下流量与实际值的对比结果。

流量计算公式为^[15,21]：

$$Q = 3\,600 \cdot \pi R^2 v \quad (20)$$

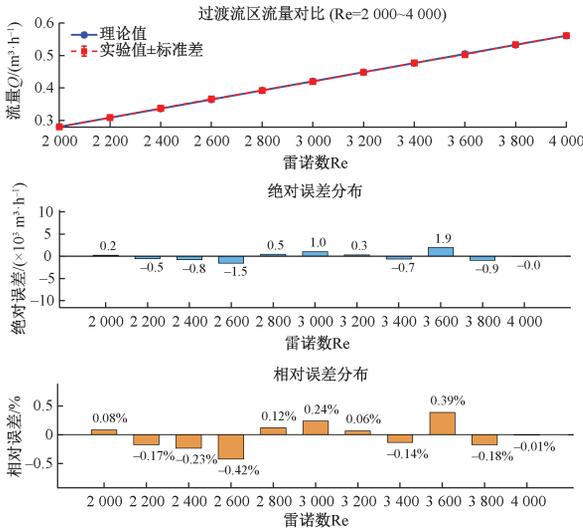


图 4 过渡流时实际值与计算值的误差对比
Fig. 4 Comparison of error between actual and calculated values at transition flow

其中, v 是当前状态的流速, 对于误差评定使用绝对误差和相对误差, 绝对误差计算公式与公式 (19) 相同, 相对误差为:

$$e_x = \frac{v_{actual} - v}{v_{actual}} \quad (21)$$

图 5 展示了选取雷诺数 10 000~13 000 时的计算值和实际值误差对比, 相较于雷诺数较小时的状态有所增大, 由于在湍流状态下为使计算复杂度降低, 选用了较简易的线速度分布经验公式, 而实际上湍流存在多层结构(粘性子层、缓冲层、对数律区、核心区), 由于忽略更细致的湍流结构分布状态, 使得此时误差对比第雷诺数下的误差较大^[10]。

由分段线性化计算方法^[1]可知绝对误差大多处于 1% 以上, 即使是使用矫正后的分段线性化计算流量时, 绝对误差也大多在 0.2% 以上, 但使用本文的修正方法, 可使误差大多处于 0.2% 以下, 尤其在雷诺数较小时, 绝对误差基本在 0.01% 以下。图 6 为过渡流区(雷诺数 2 000~4 000) 湍流区(11 800~12 000) 高端流区(19 800~20 000) 的流速误差分布图, 进一步验证了使用线性插值法处理过渡流状态结果也较精确。

图 7 为过渡流计算流速和实验流速相对误差对比。由于流量误差和流速误差来源不同, 流量和流速相对误差分布和数值大小不相同, 使误差大小分布不同, 但都处于较小的误差范围。

图 8 为湍流时 10 000~13 000 时的计算流速和实验流速相对误差对比。

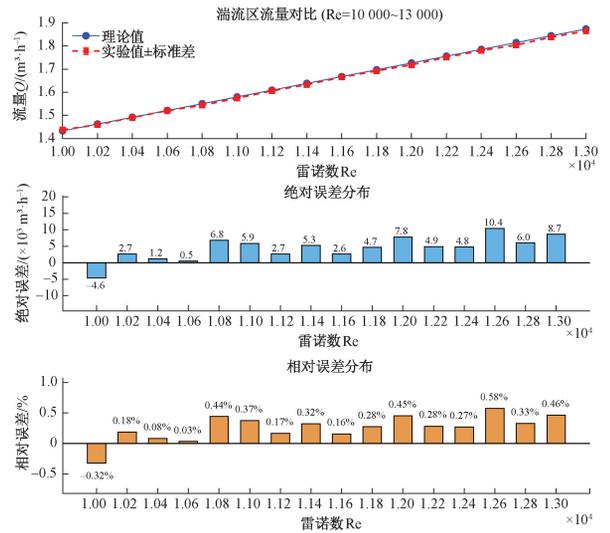


图 5 雷诺数较大时计算值与实际值误差对比
Fig. 5 Comparison of error between calculated and actual values for larger Reynolds number

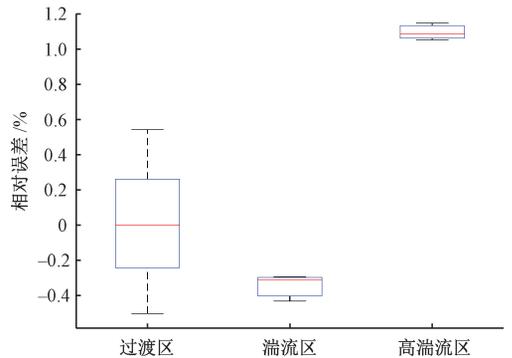


图 6 流速相对误差箱线图
Fig. 6 Box line plot of relative error in flow rate

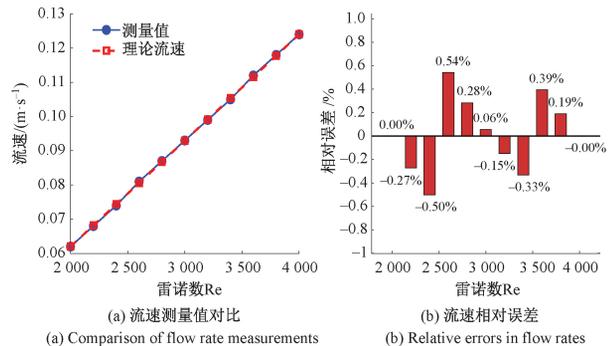


图 7 过渡流流速相对误差分布
Fig. 7 Relative error distribution of transition flow velocity

图 9 和图 10 为修正因子修正后的线速度分布图, 此时 $k_c = 1.8471, k_t = 1.4368$ 。将湍流修正因子代入后得到雷诺数为 4 000 时的线

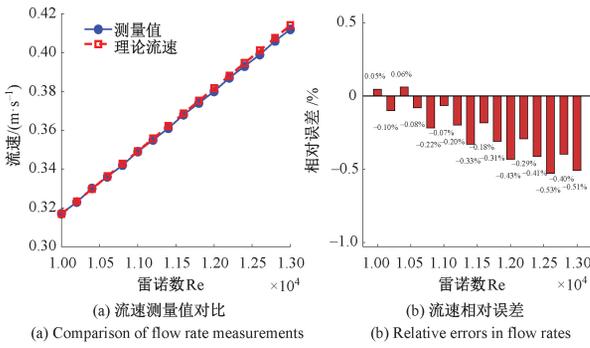


图 8 湍流流速相对误差分布

Fig. 8 Relative error distribution of turbulent flow velocity

速度分布如图 9 所示。

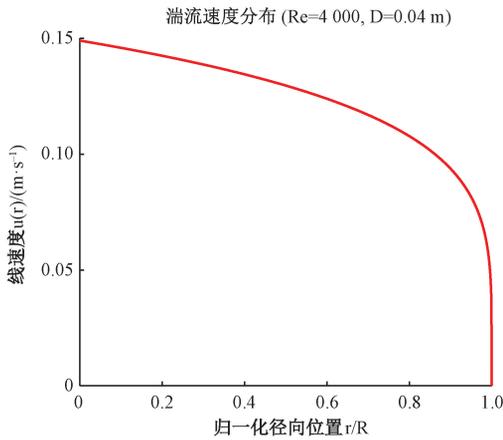


图 9 湍流线速度分布

Fig. 9 Turbulent linear velocity distribution

将层流修正因子代入后得到雷诺数为 2 000 时的线速度分布如图 10 所示。

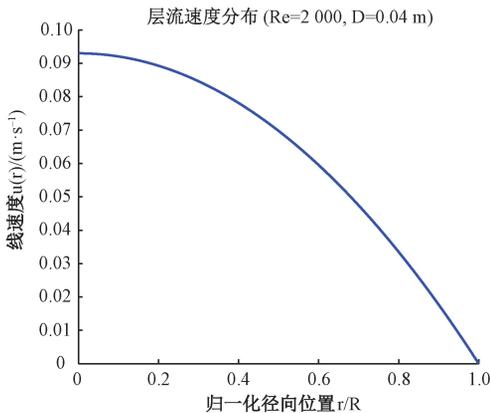


图 10 层流线速度分布

Fig. 10 Laminar flow linear velocity distribution

线性插值法的处理方式得出过渡流的线速度分布图如图 11 所示。

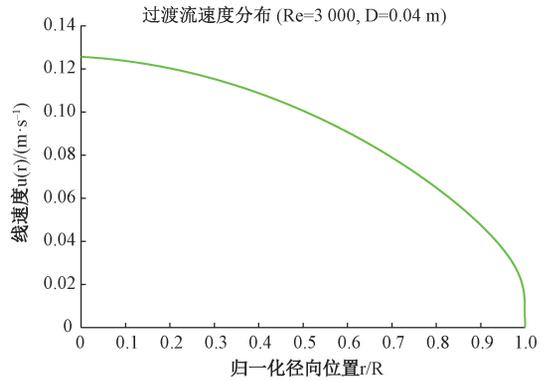


图 11 过渡流线速度分布图

Fig. 11 Transitional flow line velocity distribution

使用雷诺数 2 000 和 4 000 时的实验数据标定,得出修正因子后综合本文方法,可得出流速和流量随雷诺数的变化图像如图 12 所示。

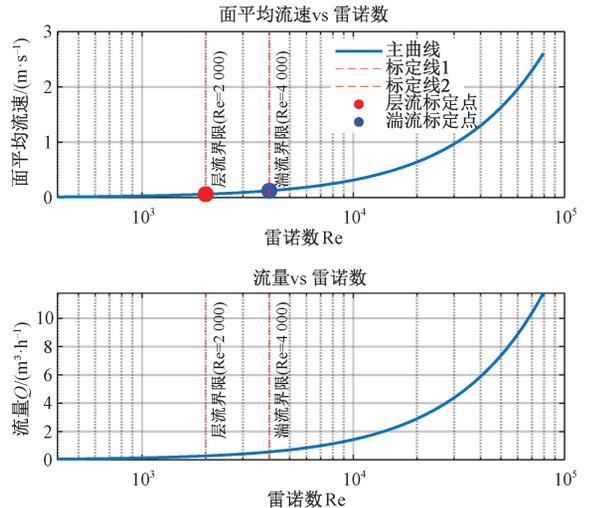


图 12 流速和流量随雷诺数变化曲线

Fig. 12 Curves of flow rate and flow rate with Reynolds number

将实验结果与修正速度公式的预测结果进行比较,以证明流速修正公式的有效性^[22]。图 13 显示了本研究获得的管道剖面速度,y 坐标为标准化速度,x 坐标为归一化向量位置(R 为管道半径, r 为到管道中心的距离)。图 13 与 Westerwell^[23]的实验结果对比误差较小,因此本研究的结果是有效的。

3 结 论

本研究首次提出使用修正因子动态标定与积分时差法结合求流速和流量的方法,构建了流态自适应的

将修正后的层流和湍流线速度分布函数结合过渡流

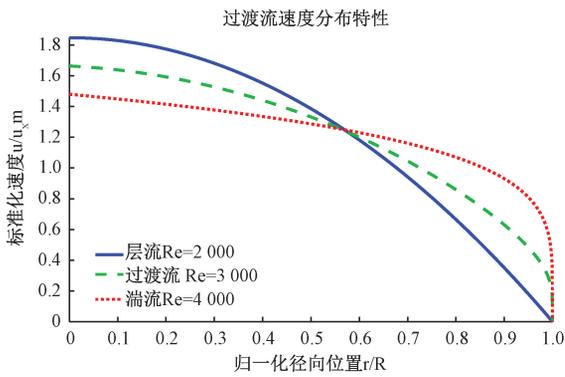


图 13 不同雷诺数下的管道剖面速

Fig. 13 Pipe profile velocity at different Reynolds numbers

超声波流量计算模型。其中标定值使用 PIV 系统和水循环系统中湍流和层流中的各一组数据进行双参数修正 (k_c 和 k_i), 利用修正后两流动状态的线速度分布结合线性插值算法得出过渡流线速度分布, 实现复杂流态的无间断测量, 对于这种基于雷诺数分区的自适应流速修正方法, 通过理论推导、数值建模与实验验证得出以下结论:

1) 通过雷诺数精准划分层流 ($Re < 2000$)、过渡流 ($2000 \leq Re \leq 4000$) 和湍流 ($Re > 4000$) 状态, 结合带修正因子的线速度分布 (层流 $k_c = 1.847$, 湍流 $k_i = 1.4368$) 再推导出过渡流线速度分布, 最后结合积分时差法计算不同流态下的流速和流量值的方法, 显著改善了计算精度。与实验值对比后发现, 该方法在过渡流区域的绝对误差可控制在 0.2% 左右, 较传统分段线性法提升约 80%, 且在高雷诺数湍流下流量误差也仅在 0.45% 左右, 降低了计算复杂度的同时还能使计算结果较准确。

2) 通过结合修正后的层流和湍流线速度分布公式, 再使用两者线性插值确定过渡流速分布公式, 从而得出 3 种流态下流量和流速计算的方法, 有效地扩展了超声波流量计的测量范围。此外, 还证明了线性插值算法连接层流与湍流处理过渡流状态的线速度分布是一种合理的手段, 并且已被证明具有良好的性能, 解决了传统技术中由于过渡流状态导致“阶跃误差”和混沌状态下难以进行准确计算的挑战。

3) 通过 PIV 系统和水循环系统中的实验值作为标定值判断修正因子, 不仅使用的数据量较少, 还能使超声波流量计的测量精度达到 PIV 系统和水循环系统结合测量的精度。

参考文献

[1] 姚灵, 王让定, 左富强, 等. 单声道超声水表测量特性分段校正方法的研究 [J]. 计量学报, 2013, 34(5): 441-445.
YAO L, WANG R D, ZUO F Q, et al. Research on

segmental correction method of measurement characteristics of monoacoustic ultrasonic water meter [J]. Journal of Metrology, 2013, 34(5): 441-445.

- [2] 邵珠峰. 圆管广义过渡区流态的实验和 DNS 研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
SHAO ZH F. Experimental and DNS study of the flow regime in the generalised transition region of a circular tube [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [3] 王芳芳, 曾云, 张振凯, 等. 大管径超声波测流误差的影响因素及修正分析 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 146-153.
WANG F F, ZENG Y, ZHANG ZH K, et al. Influencing factors and correction analysis of ultrasonic flow measurement error in large pipe diameter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 146-153.
- [4] 范思航, 时文娟, 黄艳芝, 等. 超声波多普勒流量计换能器的研究与应用 [J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 84-88.
FAN S H, SHI W J, HUANG Y ZH, et al. Research and application of ultrasonic Doppler flowmeter transducer [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(2): 84-88.
- [5] 黄晓红, 尹扬帆, 许先凤, 等. 改进的 ApFFT 算法及其在超声波流量计中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(11): 44-49.
HUANG X H, YIN Y F, XU X F, et al. Improved ApFFT algorithm and its application in ultrasonic flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(11): 44-49.
- [6] 李冬, 孙建亭, 杜广生, 等. 结构参数对超声波流量计水流特性影响的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 945-951.
LI D, SUN J T, DU G SH, et al. Research on the influence of structural parameters on the water flow characteristics of ultrasonic flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 945-951.
- [7] 刘权, 赵俊奎, 曹建元, 等. 基于辅助阻抗匹配支路的超声波时差测量系统 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 179-187.
LIU Q, ZHAO J K, CAO J Y, et al. Ultrasonic time difference measurement system based on auxiliary impedance matching branch [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 179-187.
- [8] 杨瑞峰, 朱义德, 郭晨霞, 等. 互相关渡越时间超声波流量计精度补偿 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(5):

- 63-67.
YANG R F, ZHU Y D, GUO CH X, et al. Compensation of accuracy of ultrasonic flowmeter with inter-crossing time [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(5):63-67.
- [9] 宿彬,张鹏飞,程东旭,等. 超声波流量计温度补偿算法研究综述[J]. *现代电子技术*, 2023, 46(13):115-120.
SU B, ZHANG P F, CHENG D X, et al. Research review on temperature compensation algorithm of ultrasonic flowmeter[J]. *Modern Electronic Technology*, 2023, 46(13):115-120.
- [10] 李森. 幂律流体圆管湍流流动的大涡模拟[D]. 大庆:东北石油大学, 2020.
LI M. Large eddy simulation of turbulent flow in a circular tube with power-law fluid[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [11] LIU B, XU K J, MU L B, et al. Echo energy integral based signal processing method for ultrasonic gas flow meter[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 277:181-189.
- [12] ZHOU J, WANG P, WANG R, et al. Signal processing method of ultrasonic gas flowmeter based on transit-time mathematical characteristics [J]. *Measurement*, 2025, 239:115485.
- [13] SMITH L, GREENSHIELDS D, BURTON R, et al. Simultaneous data acquisition for improved performance in transit time difference ultrasonic flowmeters[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2023, 91:102345.
- [14] 袁晓明,朱轩,侯振兴,等. 基于 Fluent 的圆管层流仿真研究[J]. *机床与液压*, 2019, 47(11):155-158, 187.
YUAN X M, ZHU X, HOU ZH X, et al. Fluent-based simulation study of laminar flow in circular tube [J]. *Machine Tools and Hydraulics*, 2019, 47(11):155-158, 187.
- [15] ZHANG H, GUO C, LIN J. Effects of velocity profiles on measuring accuracy of transit-time ultrasonic flowmeter[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(8):1648.
- [16] 李季,章吉刚. 气体超声流量测量中的补偿算法及实现[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2024(4):110-113, 119.
LI J, ZHANG J G. Compensation algorithm and implementation in gas ultrasonic flow measurement [J]. *Industrial Instrumentation and Automation Device*, 2024(4):110-113, 119.
- [17] 张兴红,李三,侯翔宇. 采用曲面拟合算法的超声波流量计研究[J]. *机械设计与制造*, 2025(1):31-35.
ZHANG X H, LI S, HOU X Y. Research on ultrasonic flowmeter using surface fitting algorithm [J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2025(1):31-35.
- [18] 贾惠芹,王成云,党瑞荣. 流体流速对超声波流量测量精度的影响及校准[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(7):1-8.
JIA H Q, WANG CH Y, DANG R R. Influence of fluid flow velocity on ultrasonic flow measurement accuracy and calibration [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(7):1-8.
- [19] ZHENG D, ZHAO D, MEI J. Improved numerical integration method for flowrate of ultrasonic flowmeter based on Gauss quadrature for non-ideal flow fields [J]. *Flow measurement and Instrumentation*, 2015, 41:28-35.
- [20] GUO S, XIANG N, LI B, et al. Integration method of multipath ultrasonic flowmeter based on velocity distribution [J]. *Measurement*, 2023, 207:112388.
- [21] FERRARI A, PIZZO P, RUNDO M. Modelling and experimental studies on a proportional valve using an innovative dynamic flow-rate measurement in fluid power systems [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, 232(13):2404-2418.
- [22] ZHENG G L, GUANG SH D, ZHU F S, et al. Measurement of transitional flow in pipes using ultrasonic flowmeters [J]. *Fluid Dynamics Research*, 2014, 46(5):055501.
- [23] WESTERWEEL J, DRAAD A A, VAN DER HOEVEN J G T, et al. Measurement of fully-developed turbulent pipe flow with digital particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 1996, 20(3):165-177.

作者简介



王玥,现为扬州大学本科生,主要研究方向为流体力学与传感器技术、电力电子与能源系统、无人机控制系统与自主导航。

E-mail:2574414382@qq.com

Wang Yue is now an undergraduate student at Yangzhou University. Her main research interests include fluid mechanics and sensor technology, power electronics and energy systems, unmanned aerial vehicle control systems and autonomous navigation.



刘晓东(通信作者),2016年于河北农业大学获得学士学位,2018年于中国农业大学获得硕士学位,2023年于中国农业大学获得博士学位。现为扬州大学讲师,主要研究方向为流体机械内流场的测试方法和理论。

E-mail: 2427817067@qq.com

Liu Xiaodong (Corresponding author) received the B. Sc. degree from Hebei Agricultural University in 2016, the M. Sc. degree from China Agricultural University in 2018, and the Ph. D. degree from China Agricultural University in 2023. He is now a lecturer at Yangzhou University. His main research interests

include the testing methods and theories of flow field in fluid machinery.



吴桂峰,1997年于东南大学获得学士学位,2006年于东南大学获得硕士学位。现为扬州大学副教授,主要研究方向为智能感知与系统、能源互联网等。

E-mail: ydgfwu@163.com

Wu Guifeng received the B. Sc. degree in 1997 and the M. S. degree in 2006, both from Southeast University, Nanjing, China. He is now an Associate Professor at Yangzhou University. His research interests include intelligent sensing and systems, and the energy internet, etc.