

超声波燃气表矩形流道的雷诺修正系数仿真研究

何明昊, 杨 鸣*

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在超声波流量计测量技术中, 雷诺修正系数相关的研究对于提高计量精度有重要作用. 为研究矩形流道的雷诺修正系数与雷诺数的关系, 对矩形流道在常温常压流量较小情况下进行仿真, 结果发现: 矩形流道层流状态下的雷诺修正系数与雷诺数呈线性相关. 保持压强、体积流量不变, 在不同温度下进行仿真及拟合, 结果表明: 在不同温度下雷诺修正系数与雷诺数的线性关系依然满足. 在上述实验基础上, 对矩形流道湍流状态下的雷诺修正系数与雷诺数关系进行研究, 通过改变温度、压强和体积流量进行仿真及拟合发现, 矩形流道湍流状态下雷诺修正系数与雷诺数呈非线性相关.

关键词: 超声波燃气表; 矩形流道; 雷诺数; 雷诺修正系数

中图分类号: TH814

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 02-0025-06

近年来, 超声波燃气表的发展十分迅速. 相较于传统的燃气表, 超声波燃气表具有测量精度高、压损小、量程比大、适用气体范围广等优点^[1]. 过去超声波燃气表以圆形流道为主. 近几年, 日本松下公司率先将矩形流道应用于家用超声波燃气表中, 随后我国杭州威星、辽宁思凯等国内燃气表公司也开始研发矩形流道产品, 目前矩形流道已被大量应用于超声波燃气表. 因此, 如何提升矩形流道下燃气表的测量精度是超声波燃气表研发的关键. 雷诺修正系数是超声波燃气表中一种与流量测量精度相关的补偿系数, 对提升流量测量精度有关键作用^[2-3]. 但目前国内外关于矩形流道雷诺修正系数的研究仍较为鲜见.

本文基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)构建矩形流道模型, 通过 CFD 模拟仿真与拟合分析相结合, 研究矩形流道层流状态下雷诺修正系数与雷诺数关系、温度对矩形流道层流状态下的雷诺修正系数与雷诺数关系的影响, 以及矩形流道湍流状态下的雷诺修正系数与雷诺数关系, 以期为提高矩形流道燃气表的流量测量精度提供参考.

1 超声波流量计原理

现阶段超声波燃气表的流速测量方法以时差法为主, 在流道上下游分别安装超声波换能器, 以发射和接收换能器之间的连线作为超声波信号传播路径^[4-5]. 图 1 为时差法超声波燃气表测量原理.

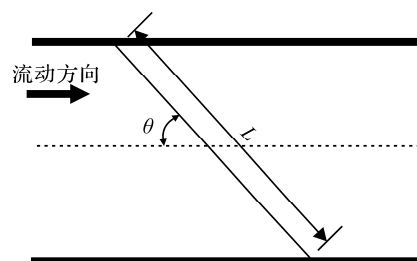


图 1 时差法超声波燃气表测量原理

超声波信号在顺流方向传播时间 t_{up} 、在逆流方向传播时间 t_{dn} 的计算公式分别为:

$$t_{up} = \frac{L}{c + V \cos \theta}, \quad (1)$$

$$t_{dn} = \frac{L}{c - V \cos \theta}, \quad (2)$$

式中: θ 为超声波传播方向与流体流动方向的夹角; c 为超声波信号传播速度; V 为流道内流体线

收稿日期: 2020-08-15.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

第一作者: 何明昊 (1995-), 男, 湖北武汉人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 超声波气体流量计. E-mail: 651944260@qq.com

*通信作者: 杨鸣 (1963-), 男, 浙江宁波人, 研究员, 主要研究方向: 超声波计量及显微图像处理. E-mail: yangming@nbu.edu.cn

流速; L 为超声波信号传播路径长度.

根据式(1)和式(2)可推得, 在不考虑流道内环境影响下, 流道内流体线流速 V 的计算公式为:

$$V = \frac{L}{(2\cos\theta)(1/t_{up} - 1/t_{dn})}. \quad (3)$$

2 矩形流道模型设置

在超声波燃气表的流量计量中, 上下游超声波换能器之间的对应区域即为声道区域, 流体在此声道区域中流动. 而圆形流道的管径较大, 声波覆盖面较小, 导致测量结果有偏差, 因此选用矩形流道, 流道狭窄, 声波能覆盖整个模型宽度, 可以更加准确地测量流体的流量.

通过建模软件 Creo 2.0 建立矩形流道模型, 如图 2 所示. 矩形流道截面长 12 mm、宽 50 mm, 流道长度 100 mm, 隔板厚度 0.3 mm, 隔板与隔板、隔板与流道壁间隔均为 2.775 mm. 在圆形流道中, 通过安装流速分布器对流体进行整流, 可使流体分布更加均匀, 更适合测量. 而矩形流道尺寸较小, 无法安装流速分布器, 因此需要在其中安装等间距隔板以达到整流效果^[6].

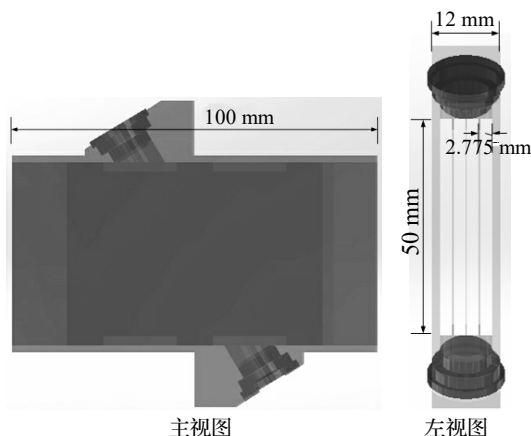


图2 矩形流道模型

雷诺数(Re)的大小决定了流体的流动状态与流速分布^[7]. 当 Re 小于 2 300 时, 流体为层流状态; 当 Re 大于 4 000 时, 流体为湍流状态; 当 Re 介于两者之间时, 为过渡状态, 一般作为湍流状态处理. Re 计算公式为:

$$Re = Vd / \eta, \quad (4)$$

式中: V 为流道内流体线流速; η 表示流体运动黏度, 与温度、压强和流体密度相关; d 为特征长度.

特征长度 d 计算公式为:

$$d = 4A / X, \quad (5)$$

式中: A 为流道截面面积; X 为流道截面周长.

本文设置的矩形流道模型适用 G6 国家标准下家用超声波燃气表, 体积流量范围为 0.06~10.00 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 流道截面面积为 $6 \times 10^{-4} \text{m}^2$, 当体积流量最大值 $Q_{\max} = 10.00 \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 由 $V_{\max} = Q_{\max} / A$ 可得流道面流速最大值 $V_{\text{Smax}} = 4.63 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 空气在常温常压下运动黏度 $\eta = 1.535 \times 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 由式(5)可知, 未添加隔板时, 矩形流道特征长度 $d = 0.039 \text{m}$. 由式(4)计算可得在体积流量为 $Q_{\max}$ 时, 流道内气体 Re 为 5 836, 此时流道内气体流动状态为湍流状态, 流动紊乱, 不利于流量测量^[8-9]. 通过在矩形流道中添加隔板, 使气体通过隔板间狭长流道后 Re 降低, 气体流动处于层流状态, 起到整流作用. 在矩形流道中等距加入 3 块隔板后, 矩形流道特征长度 d 为 0.005 2 m, 在体积流量为 $Q_{\max}$ 时, 流道内气体 Re 为 1 585, 流道内气体处于层流状态. 因此, 矩形流道在加入 3 块隔板后, 能够有效地降低气体 Re , 其流速分布如图 3 所示.

从图 3 可知, 矩形流道中气体流速分布均匀, 在隔板所划分的局部流道内气体均为层流状态, 隔板能够实现整流. 但对矩形流道应考虑中间部分流速的影响, 因此在模型线平面流道中间设置 4 段连线作为分割段(图 4).

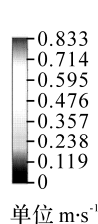


图3 矩形流道流速分布

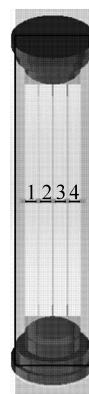


图4 矩形流道分割段

计算流体力学是流体力学与计算机的结合, 以计算机为工具, 对流体力学中非理想情况进行模拟仿真, 其结果能够直观有效地反映流体的流动状态^[10-11]. 研究雷诺修正系数需要结合流体的流动状态, 而实际流量标定装置并不能直观地反

映流道内流体的流动状态^[12].

在对上述矩形流道设置基础上进行模拟仿真. 将模型导入 FloEFD 仿真软件, 边界条件为温度 20 ℃、压强 10 kPa、入口体积流量 $6.00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 得到 4 个分割段上的流速分布(图 5).

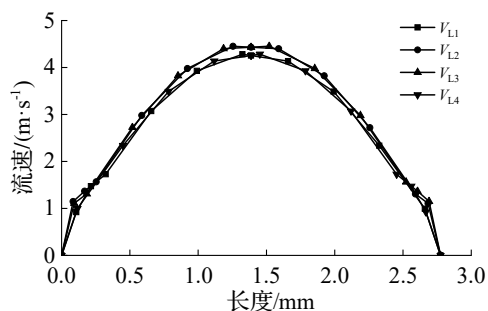


图 5 体积流量 $6.00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时流速分布

由图 5 可知, 当气体通过流道中间部分时流速达到最大值, 当气体靠近板壁时由于黏性的阻滞作用, 导致靠近板壁时流速趋近于 0. 对流速分布曲线 $V(x)$ 进行线积分, 可得气体在每个分割段上的线平均流速 V_L , 其计算公式为:

$$V_L = \int V(x) dx / l, \quad (6)$$

式中: l 为分割段长度, 其大小与隔板间距相同, 为 2.775 mm.

由式(3)计算可得理想情况下面平均流速, 而实验通过 CFD 软件模拟仿真发现, 流道中流速分布不均匀. 因此, 以图 4 中各分割段流速的平均值作为流道内气体的线平均流速 $\overline{V_L}$, 其计算公式为:

$$\overline{V_L} = (V_{L1} + V_{L2} + V_{L3} + V_{L4}) / 4, \quad (7)$$

式中: V_{L1} 、 V_{L2} 、 V_{L3} 、 V_{L4} 分别为 4 个分割段根据式(6)计算得到的每个分割段上的线平均流速.

流道的理论面平均流速 V_s 的计算公式为:

$$V_s = Q / A, \quad (8)$$

式中: Q 为流道入口体积流量; A 为流道截面面积.

在实际测量中, 流道内流体的线平均流速 $\overline{V_L}$ 与实际面平均流速 V_A 之间存在如下修正关系:

$$V_A = K_r \cdot \overline{V_L}, \quad (9)$$

式中: K_r 为雷诺修正系数, 是一种对流速测量精度的补偿系数.

经研究表明^[13], 雷诺修正系数 K_r 与 Re 存在一定关系 $K_r = f(Re)$, 对流速测量精度有影响. Re 随着流道种类、温度、压强、体积流量等因素而变

化^[14-15], 因此雷诺修正系数 K_r 与温度、压力、体积流量等因素的关系也对流速测量精度有影响. 以下通过模拟仿真与拟合分析相结合, 研究矩形流道 K_r 与 Re 的关系.

3 拟合分析

3.1 矩形流道层流状态下雷诺修正系数

当 Re 小于 2300 时, 流道中气体为层流状态, 如图 6 所示, 气体流动平稳, 流速分布均匀.

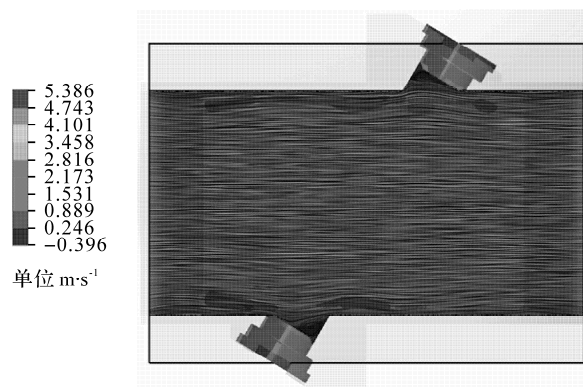


图 6 矩形流道在层流状态下的流速分布

在超声波燃气表中, 矩形流道通常用于常温常压下层流状态气体的流量测量, 根据超声波燃气表 G6 国家标准, 矩形流道体积流量范围为 $0.06 \sim 10.00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 流量测量结果主要受温度影响. 本实验通过对矩形流道在 20 ℃、10 kPa 条件下仿真, 研究矩形流道中层流状态下气体 K_r 与 Re 的关系.

设置矩形流道内压强为 10 kPa、温度为 20 ℃, 体积流量依次为 0.06、1.00、2.00、4.00、6.00、8.00、10.00 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. 根据仿真结果计算得到每组 Re 与对应 K_r 值(表 1).

表 1 20 ℃、10 kPa 条件下 Re 与 K_r 值

体积流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	Re	K_r
0.06	6.55	0.96778
1.00	164.72	0.96261
2.00	336.88	0.95770
4.00	668.66	0.94859
6.00	1008.73	0.94313
8.00	1349.68	0.93289
10.00	1691.13	0.92443

从表 1 可知, 当体积流量处于最大值 $10.00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 以下时, Re 均小于 2300, 气体处于层流状态.

通过最小二乘法拟合得出矩形流道在 20 ℃、10 kPa 条件下 K_r 与 Re 关系(图 7)。

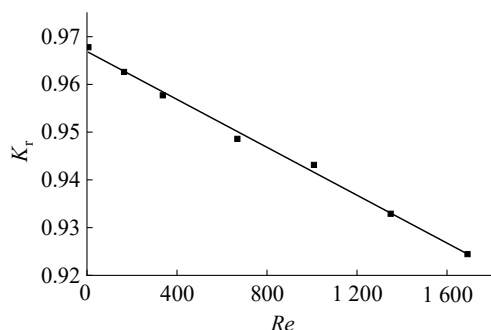


图 7 层流状态下 K_r 与 Re 关系

由图 7 拟合结果可知, K_r 与 Re 关系为:

$$K_r = -2.49 \times 10^{-5} Re + 0.9666,$$

相关系数 R^2 为 0.979, 拟合精度高. 由此可知, 矩形流道层流状态下 K_r 与 Re 呈线性负相关.

3.2 矩形流道层流状态下 K_r 对温度的适应性

在超声波燃气表中, 矩形流道的流量测量主要受温度影响^[16]. 根据式(4), Re 受运动黏度影响, 而运动黏度与温度相关, 理论上温度对层流状态下 K_r 与 Re 关系存在影响. 因此猜想: 在不同温度条件下矩形流道层流状态下 K_r 与 Re 不一定满足线性关系, 温度可能对二者的关系存在影响. 为此, 设温度 -20~60 ℃ (以 10 ℃ 为间隔)、压强 10 kPa、体积流量 0.06~10.00 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 拟合得到不同温度条件下 K_r 与 Re 关系, 如图 8 所示.

从图 8 拟合结果可知, 在不同温度条件下矩形流道层流状态中 K_r 与 Re 依然满足线性关系, 且温度影响直线斜率. 为进一步证明温度对 K_r 与 Re 关

系存在影响, 定义矩形流道面平均流速相对误差 e 的计算公式为:

$$e = (V_A - V_S) / V_S, \quad (10)$$

式中: V_A 为实际面平均流速; V_S 为理论面平均流速.

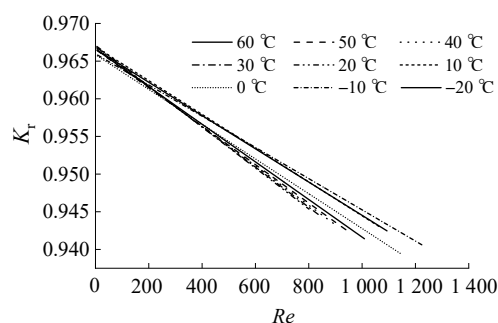


图 8 -20~60 ℃ 温度条件下 K_r 与 Re 关系

根据式(10)计算得出矩形流道在不同温度条件下不同流量时 e 值(表 2)。

在超声波燃气表中, 根据国家计量检定规程, 在 $Q_{\min} < Q < Q_i$ 时, 最大误差为 $\pm 2\%$; 当体积流量范围为 $Q_i < Q < Q_{\max}$ 时, 最大误差为 $\pm 1\%$; 当体积流量 Q_i 为 $0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时为转折点. 从表 2 数据可得在不同温度条件下的相对误差曲线(图 9)。

从图 9 可知, 在 -20~60 ℃ 温度条件下矩形流道相对误差满足测量标准. 随着矩形流道内体积流量增加, 在 $0.06 \sim 4.00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内, 不同温度下相对误差曲线皆呈上升趋势, 在 $4.00 \sim 10.00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内皆呈下降趋势, 而在不同温度条件下相对误差曲线的幅值不同, 表明温度对矩形流道层流状态下 K_r 与 Re 关系的相对误差曲线幅值存在影响.

表 2 不同温度条件下面平均流速的相对误差

%

温度/℃	体积流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)						
	0.06	1.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
-20	-0.1383	-0.0127	0.1786	0.1254	0.1386	0.0081	-0.1826
-10	-0.1418	-0.0362	0.0911	0.1434	0.1141	0.0021	-0.1741
0	-0.1196	-0.0361	0.0769	0.1254	0.1021	0.0045	-0.1542
10	-0.1015	-0.0329	0.0648	0.1091	0.0921	0.0065	-0.1361
20	-0.0844	-0.0289	0.0503	0.0952	0.0808	0.0097	-0.1196
30	-0.1066	0.0104	0.1103	0.1523	0.1211	0.0118	-0.1627
40	-0.2156	-0.0343	0.1422	0.2036	0.1454	-0.0093	-0.2323
50	-0.2036	-0.0551	0.1903	0.1676	0.1224	-0.0134	-0.2077
60	-0.1399	-0.0018	0.1287	0.1432	0.0376	-0.1651	-0.1977

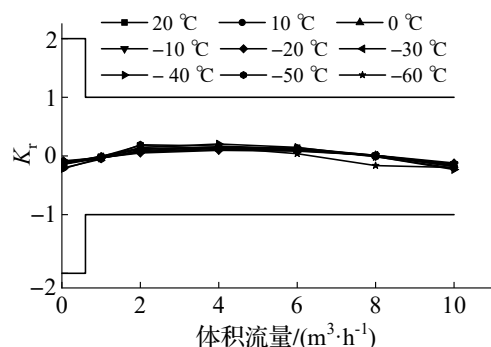


图9 矩形通道在不同温度条件下的相对误差曲线

3.3 矩形通道湍流状态下 K_r 分析

当 Re 大于 4000 时, 气体在通道中为湍流状态, 通道中存在小漩涡, 流速分布不均匀(图 10).

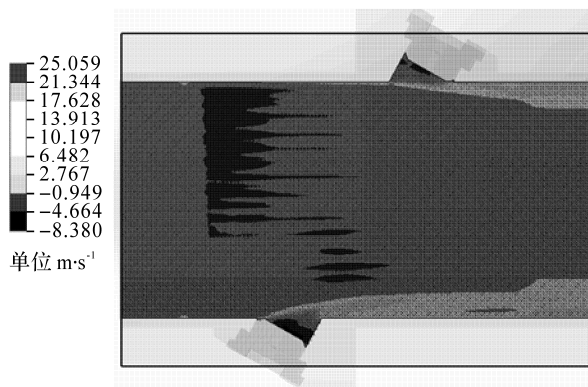


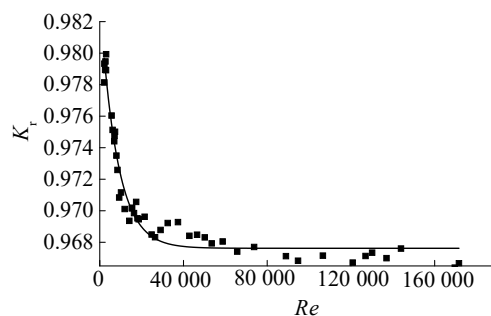
图10 矩形通道在湍流状态下的流速分布

湍流状态下的流量测量是超声波燃气表流量测量技术的关键. 在对矩形通道层流状态下 K_r 及温度适应性研究基础上, 进一步研究矩形通道湍流状态下 K_r 与 Re 关系. 通过改变温度、气体体积流量以及压强, 使通道中气体为湍流状态. 考虑到气体运输以及储存时的温度、压强条件, 因此设温度 $-20 \sim -60$ °C (以 10 °C 为间隔)、压强 $0.1 \sim 1.6$ MPa (依次取 0.1 、 0.3 、 0.5 、 0.7 、 0.9 、 1.1 、 1.3 、 1.6 MPa). 在实际测量中, 矩形通道内的气体流速不可过高, 入口最大体积流量 Q 为 $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 分别对体积流量为 Q 、 $0.70Q$ 、 $0.40Q$ 、 $0.25Q$ 、 $0.10Q$ 、 $0.05Q$ 的气体进行仿真, 得到每组 K_r 和 Re .

对矩形通道超声波流量计选取满足测量标准的计量点, 拟合得到满足最小二乘法的 K_r 与 Re , 其表达式为:

$$K_r = 0.01575e^{(-Re/8159.54)} + 0.9676.$$

函数图像如图 11 所示.

图11 湍流状态下 K_r 与 Re 关系曲线

从图 11 可知, 测量点均匀分布在图形线条两侧, 相关系数 $R^2=0.986$, 拟合效果良好. 数据点 Re 在 $0 \sim 180\,000$ 之间, 范围广泛. K_r 随 Re 增加呈大幅降低趋势, 当 Re 大于 $20\,000$ 时, 随 Re 升高而趋于稳定, 表明矩形通道湍流状态下 K_r 与 Re 呈非线性相关.

4 结论

(1)矩形通道层流状态下 K_r 与 Re 呈线性负相关, 在本文设定条件下其关系方程为:

$$K_r = -2.49 \times 10^{-5} Re + 0.9666.$$

(2)矩形通道层流状态下 K_r 与 Re 关系受温度影响, 但依然满足线性相关, 温度影响 K_r 与 Re 关系直线的斜率, 以及相对误差曲线的幅值.

(3)矩形通道湍流状态下 K_r 与 Re 呈非线性相关, K_r 随 Re 增加呈大幅降低趋势, 并在 Re 大于 $20\,000$ 后, 随 Re 升高趋于稳定, 在本文设定条件下其关系方程为:

$$K_r = 0.01575e^{(-Re/8159.54)} + 0.9676.$$

参考文献:

- [1] 王雪峰. 基于时差法气体超声波流量计的关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [2] 汪晓凌, 黄江涛. 改善超声波气体流量计测量精度的方法研究[J]. 轻工科技, 2012, 28(9):124-125.
- [3] 唐晓宇, 张宏建, 谢翔, 等. 多声道超声波气体流量计声平面安装角度对测量影响的模型仿真和实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(7):1923-1929.
- [4] 檀盼龙, 韩思奇. 时差法超声波流量测量技术研究现状与应用[J]. 无线互联科技, 2018, 15(16):31-32.
- [5] 杜晓泽, 刘胜祥. 时差法超声波流量计流量系数影响因素分析[J]. 工业计量, 2019, 29(2):14-15; 38.
- [6] 陈浩, 杨鸣. 超声波流量计双弯管流场整直问题的研

- 究[J]. 现代科学仪器, 2019(4):5-9.
- [7] 孔祥强, 郭璇, 杜广生, 等. 基于CFD的超声波气表结构与流动特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 220-227.
- [8] 孙望, 王鲁海, 王兆杰, 等. 基于PIV测量的超声波流量计内流场特性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(6):695-702.
- [9] 林棋, 陈子鑫, 张义勇, 等. 超声波流量计概述及流场数值模拟研究[J]. 石油工业技术监督, 2018, 34(11): 43-47.
- [10] 贺胜, 彭黎辉, 仲里敏. 基于CFD的超声波流量计最优声道位置研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4):852-856.
- [11] 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.
- [12] Mousavi S F, Hashemabadi S H, Jamali J. Calculation of geometric flow profile correction factor for ultrasonic flow meter using semi-3D simulation technique[J]. Ultrasonics, 2020, 106:106165.
- [13] 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, 2004.
- [14] 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.
- [15] 陈炜刚. 气体超声波流量计非理想流场分析与补偿方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [16] 李跃忠. 多声道超声波气体流量测量关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.

Simulation research on Reynolds correction coefficient of rectangular flow channel of ultrasonic gas meter

HE Minghao, YANG Ming*

(Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In the measurement technology of ultrasonic flowmeter, the research on the Reynolds correction coefficient plays an important role in improving the measurement accuracy. In order to study the relationship between Reynolds correction coefficient and Reynolds number of the gas in rectangular channel under laminar flow condition, the rectangular flow channel is simulated under the condition of small flow at normal temperature and pressure. Based on the analysis of the fitting results, the conclusion is drawn that the Reynolds correction coefficient of the gas in laminar flow in the rectangular flow channel is linearly related to the Reynolds number. By keeping the pressure and volume flow constant, multiple sets of simulation and fitting experiments are carried out at different temperatures. The results show that the linear correlation between the Reynolds correction coefficient and the Reynolds number is still satisfied at different temperatures. On the basis of the above experiments, the relation between the Reynolds correction coefficient and the Reynolds number of the gas in the rectangular flow channel in the turbulent state is studied. Through simulation and fitting by changing the temperature, pressure and volume flow, it is concluded that the Reynolds correction coefficient of the gas in turbulent flow in the rectangular flow channel is nonlinearly related to the Reynolds number.

Key words: ultrasonic gas meter; rectangular flow channel; Reynolds number; Reynolds correction coefficient

(责任编辑 史小丽)