

# 管道安装条件对超声波气体流量 测量精度影响研究

李奇璇<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 刘析<sup>1</sup>, 彭洁<sup>2</sup>, 葛亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石油天然气股份有限公司西南油气田燃气分公司, 四川 成都

<sup>2</sup>西南石油大学机电工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年6月24日; 录用日期: 2024年8月29日; 发布日期: 2024年9月5日

## 摘要

本文分析得到温度升高会影响超声波声速, 并且流场的复杂性使流量测量准确性下降。实际气体超声波流量计安装环境下流体通常处于湍流状态, 借助COMSOL软件仿真通过对弯管设置以及流量计前方直管段长度的改变, 分析得出前置弯管结构是影响流场分布的主要原因。本研究对于优化超声流量测量技术、提升工业生产和能源计量领域的测量水平具有重要意义。

## 关键词

超声波, 流量测量, 温度, 流场

# Research on the Impact of Pipeline Installation Conditions on the Accuracy of Ultrasonic Gas Flow Measurement

Qixuan Li<sup>1</sup>, Chao Wang<sup>1</sup>, Xi Liu<sup>1</sup>, Jie Peng<sup>2</sup>, Liang Ge<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Petrochina Southwest Oil and Gas Field Gas Branch Company, Sichuan Chengdu

<sup>2</sup>College of Electrical and Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu

Received: Jun. 24<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 29<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 5<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this paper, it is discovered that the rise in temperature will affect the ultrasonic velocity, and the complexity of the flow field will decrease the accuracy of the flow measurement. In the actual

文章引用: 李奇璇, 王超, 刘析, 彭洁, 葛亮. 管道安装条件对超声波气体流量测量精度影响研究[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(3): 317-323. DOI: 10.12677/jogt.2024.463039

installation environment of gas ultrasonic flowmeters, the fluid is typically in a turbulent state. Through the simulation using COMSOL software, it is analyzed that the front bending structure is the primary factor influencing the flow field distribution via the alteration of the bending pipe setting and the length of the straight pipe section in front of the flowmeter. This study holds significant importance for optimizing ultrasonic flow measurement technology and enhancing the measurement level in industrial production and energy measurement.

## Keywords

Ultrasonic Wave, Flow Measurement, Temperature, Flow Field

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国家的经济发展和科学技术的进步，对计量的要求越来越高，这也成为了日常生活和工业生产中必不可少的一环。计量结果的准确性需要精确而稳定的计量设备支持，而流量计则是最为关键的部分。流量计的种类很多，其中超声波流量计作为一种新型流量计，有着许多优势：量程比大、计量精度高、压力损失小，并且不受测量介质的限制，易安装维护，应用场合十分广泛[1]。

近年来我国大力推行清洁能源的使用，天然气得到很大的发展应用。据统计，超声波流量计的市场占有率和产值均大幅度上升，其中气体超声波流量计占有超声波流量计市场份额更是接近 70%。但是气体的超声流量测量存在传播衰减大、信号不稳定、声学噪声干扰严重等问题，严重制约了流量计的精度和稳定性。国内气体流量计的研究较少，一定程度上也限制了天然气计量的发展，本文研究管道安装条件对超声波气体流量计测量精度影响[2]。

## 2. 气体超声波流量计概述

### 2.1. 时差法测量工作原理

本文研究的测量原理是使用最为广泛的时差法，时差法超声流量计具有较高的精确度，普遍应用于气体介质测量行业。时差法气体超声波流量计的测量原理是分别测量超声波信号在流体中沿着顺流传播和沿着逆流传播所用的时间，然后通过两个时间差来通过一定关系计算获得超声波传播路径上的平均流速，最后计算得出流体流量[3]，原理示意图如图 1 所示。

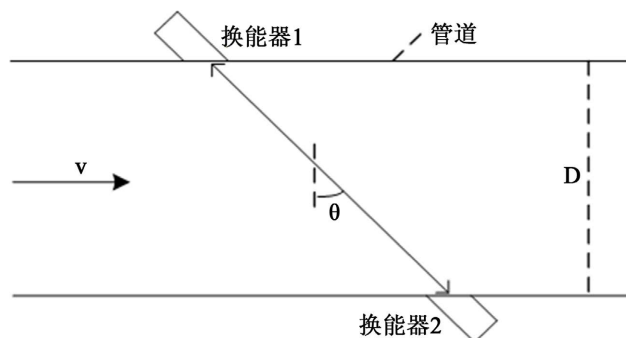
管道内气体流向由左至右，换能器 1、2 为一组探头，由于气流作用，换能器 1 发射、换能器 2 接收超声波的时间要小于换能器 2 发射、换能器 1 接收超声波的时间。

超声波由 1 至 2 传播时间为  $t_1$ ：

$$t_1 = \frac{L}{c + v \cos \theta} \quad (2-1)$$

超声波由 2 至 1 传播时间  $t_2$  为：

$$t_2 = \frac{L}{c - v \cos \theta} \quad (2-2)$$



**Figure 1.** Time difference method measurement principle  
**图 1.** 时差法测量原理

上式中  $c$  为超声波在此密度条件下静态介质中的声速的数值,  $v$  为管道内气体流速的数值,  $\theta$  为管道轴线与探头端面连线的夹角(声道角),  $L$  为两换能器之间的距离(声程)。

由  $t_1$ 、 $t_2$  可得气体平均流速  $v$ :

$$v = \frac{c^2 \Delta t}{2L \cos \theta} \quad (2-3)$$

在管道内径确定后, 能得出管道的截面积  $S$ , 进一步可求流量  $Q$ :

$$Q = Sv = \frac{\pi D^2 c^2 \Delta t}{8L \cos \theta} \quad (2-4)$$

## 2.2. 影响气体超声波流量计检测精度的误差分析

分析气体超声波流量计的测量精度影响因素, 这是一个复杂的多领域学科交叉问题, 从制作到实际安装的每个环节都存在一定误差, 会对测量精度产生影响[4]。主要误差有以下方面:

### 1. 信号因素

传播时间是超声波流量计进行流量推算的主要参数之一, 流量计获得的全部流动信息都通过超声信号获得, 因此确保信号质量对于精确测量传播时间极其重要[5]。当噪音严重或者信号衰减严重时都会使声信号受损, 声波的速度测量会受到严重的影响, 并导致传播时间测量的误差和测量准确度的降低, 另外严重的湍流也会使信号失真。

### 2. 机械因素

超声波流量计中的换能器安装方式和角度、探头间的距离、管道直径等都属于机械因素, 这些因素作为参数直接或间接改变时, 将对传播时间的测量产生很大的影响。因此, 在设计气体超声波流量计结构以及实际管道安装时, 一定要提高这些因素的测量准确度。

### 3. 流场因素

在实际工业安装环境中, 由于安装效应的存在, 流动很难达到理想状态, 流动状态的改变, 会很大程度影响流量计的检测精度, 而流动状态由于很多因素有关, 其中管道流体温度的变化, 将直接改变超声波在流体中的传播速度, 影响流速分布, 影响测量精度。在安装效应带来的误差中, 上游存在弯头问题是主要部分[6]。

在实际安装环境条件下, 温度和弯管问题产生的测量误差较大, 所以本文对两者进行分析研究。

## 3. 温度影响

超声波在介质中传播是受温度影响的, 所以温度也成为影响测量精度的一个变量, 超声波声速跟温

度的关系:

$$C = C_0(1 + bT) \quad (3-1)$$

$C$  和  $C_0$  代表温度为  $t$  和  $0$  摄氏度时的声速,  $b$  为被测物体的声速温度系数。根据上述公式超声波声速与介质温度有关, 但是流体流速和时间差并不是严格意义上的正比。结合流速推导公式, 对公式(3-1)中直接测量参数引起的测量误差变化的程度进行定量分析, 得出温度引起的误差综合公式。

对流量计算公式(2-4)求偏微分得到:

$$\frac{\delta V}{\delta C} = \frac{\delta}{\delta C} \left( \frac{c^2 \Delta T}{2L \cos \theta} \right) \frac{C \Delta T}{L \cos \theta} \quad (3-2)$$

可得  $C$  的相对误差传递系数

$$\lambda_c = \frac{C}{V} \frac{\delta V}{\delta C} = 2 \quad (3-3)$$

传递系数为常数 2, 声速 1 倍的变化将引起流量测量 2 倍的误差。因此温度对超声波声速的影响将导致严重的测量误差。声程  $L$  和换能器安装角度虽然对测量精度有影响, 但这两个参数与研究温度变化无关, 所以超声波流量计的流速为:

$$V = \frac{C_0^2 (1 + bT)^2 (T_2 - T_1)}{2L \cos \theta} \quad (3-4)$$

可得温度引起测量误差综合模型:

$$Q = Sv = \frac{1}{8} \pi D C_0^2 (1 + bT)^2 (T_2 - T_1) \tan \theta \quad (3-5)$$

## 4. 管道影响

### 4.1. 充分发展的管道层流

当管道中的雷诺数  $Re$  小于 2300, 认为其中的流动属于层流状态, 此时的管道速度公式用最大流动速度表示:

$$u(r) = u_{\max} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (4-1)$$

$u_{\max}$  是最大流动速度,  $r$  是距离中心轴线的距离。

对流速进行积分并平均, 获得面平均流速:

$$u_A = \frac{\int_A u dA}{A} = \frac{\int_0^R u \times 2\pi r dr}{A} = \frac{\Delta p R^2}{8\eta l} \quad (4-2)$$

$\eta$  是管道雷诺数和管道粗糙度的函数, 为管道沿程阻力系数  $\lambda$  的开方。

在层流状态下, 线平均流速(图 2):

$$u_L = \frac{1}{L} \int_L u(r) dL = \frac{1}{R} u_{\max} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) dr = \frac{2}{3} u_{\max} \quad (4-3)$$

### 4.2. 充分发展的管道湍流

当管道内的雷诺数  $Re$  达到 4000 以上时, 就认为进入了湍流状态(图 3), 由于湍流状态的复杂性, 很难

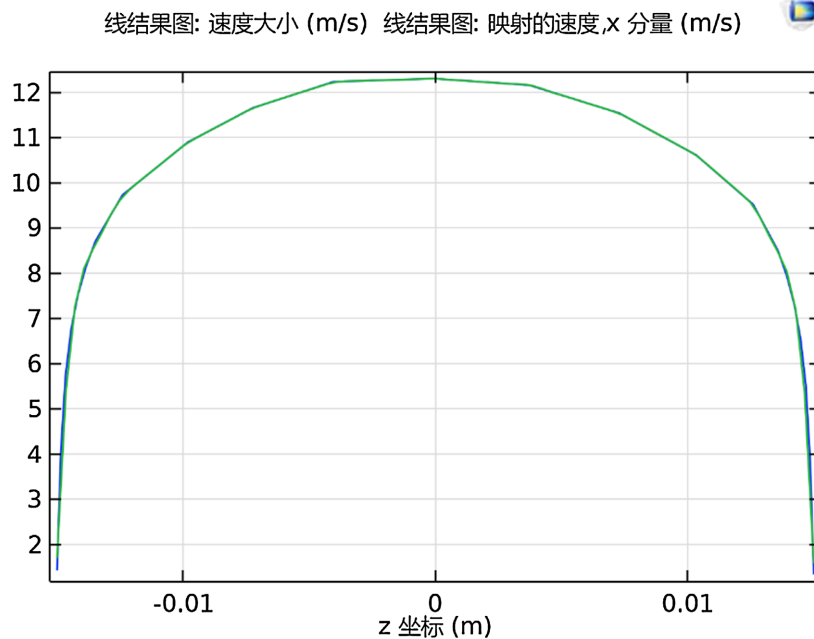


Figure 2. Face average velocity curve  
图 2. 面平均流速曲线图

用一个定义阐述其所有特征, 通常使用半经验的幂函数表示湍流速度:

$$u(r) = u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (4-4)$$

$n$  是管道雷诺数和管道粗糙度的函数, 在光滑管道中可以用普朗特方程表示:

$$n = 2 \log_{10} \left(\frac{Re}{n}\right) - 0.8 \quad (4-5)$$

对速度分布公式进行积分得到面平均流速:

$$u_A = \frac{1}{A} \int_A u(r) dA = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{n}{(n+1)(2n+1)} u_{\max} \quad (4-6)$$

若声道安装在中部, 则线平均速度为:

$$u_L = \frac{1}{L} \int_L u(r) dL = \frac{1}{R} \int_0^R u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} dr = \frac{n}{(n+1)} u_{\max} \quad (4-7)$$

### 4.3. 单弯管流动的仿真研究

一般而言, 流量仪表设计的经济流速都处于湍流状态下, 因此研究的流体都处于湍流状态下。运用 CFD 技术求解的关键是湍流模型的选择。经过大量文献和资料查阅, RANS 湍流模型中  $k-w$  因为计算量相对较小, 操作较为简单, 准确度较高, 在实际问题中得到了大量应用。

数值模拟时采用不同的流量, 通过改变入口速度的大小可以模拟不同流量点的流动特性, 研究上游有无弯头以及超声波流量计前方直管段长度分别为 10D/15D/20D 时的流场分布, 来探究 90 度弯管扰流对气体超声波流量计的测量影响(图 4)。

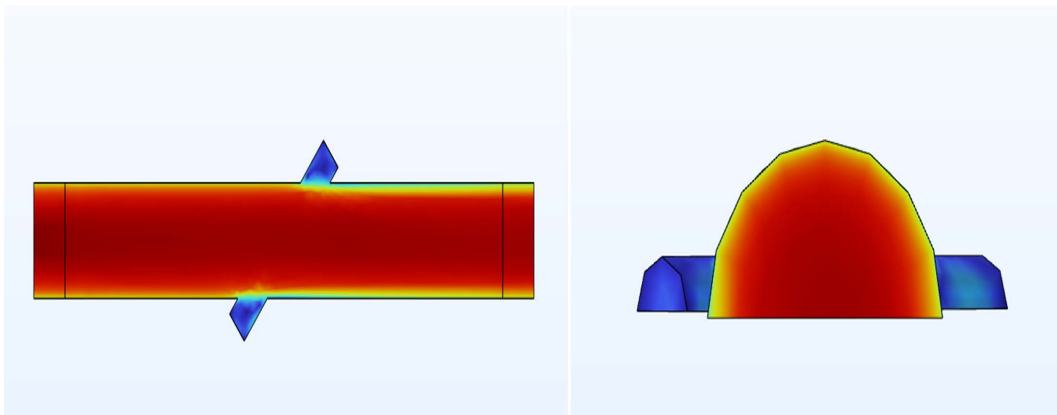


Figure 3. Flow velocity profile in pipeline

图 3. 管道内流速分布图

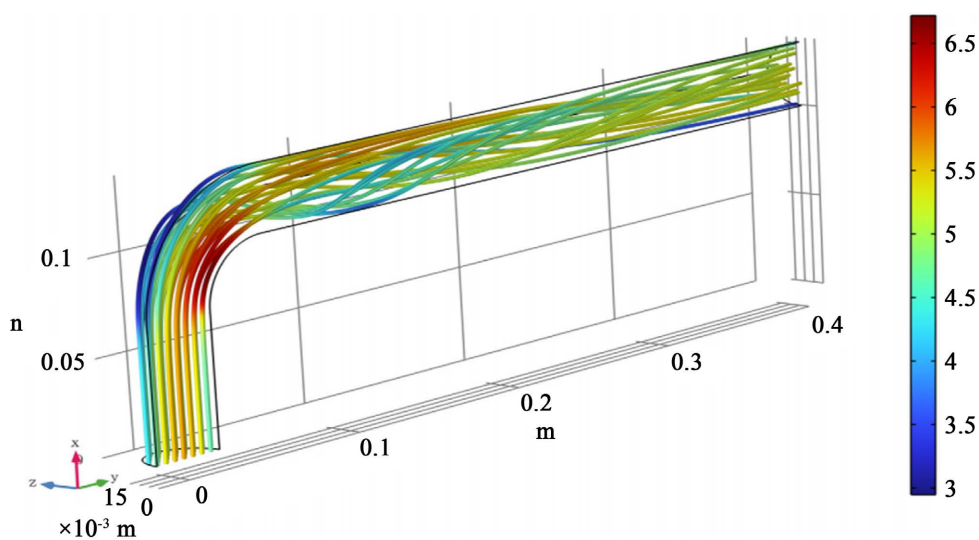


Figure 4. Curved pipe flow field distribution diagram

图 4. 弯管流场分布图

## 5. 结论

本文用理论推导和数值模拟结合的方法,借助 COMSOL 软件推演实际安装条件,分析得到温度升高会影响声速的测量,并且流场的复杂性使流速测量准确性下降。温度的变化,使介质中的声速发生改变,进而使流速测量发生较大偏差。实际安装环境下流体通常处于湍流状态,复杂的流场分布使得超声波流量计测得的线平均速度与实际面平均速度有较大偏差,影响了测量精度。同时,通过对弯管设置的有无以及流量计前方直管段长度的改变,分析得出前置弯管结构是影响流场分布的主要原因[7]-[12]。

## 参考文献

- [1] 卜庆超. 超声波流量计精度的影响因素研究[J]. 科技与创新, 2023(21): 102-104.
- [2] 唐晓宇. 多声道超声波气体流量检测技术仿真与实验研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [3] 刘祥. 基于时差法的超声波流量检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [4] 朱义德. 超声波流量测量技术及精度补偿方法研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2021.

- 
- [5] 衣海英. 影响超声波流量计测量准确度的因素探讨[C]//山东计量测试学会. 山东省优秀计量学术论文选编(2011年度). 北京: 中国科学技术出版社, 2012: 5.
- [6] 郭心伟. 优化结构改善气体流量计流场适应性的相关研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2021.
- [7] 赵俊杰. 天然气能量计量的必要性与可行性[J]. 化工管理, 2023(17): 41-43.
- [8] Zheng, D.D., Zhao, D. and Mei, J.Q. (2015) Improved Numerical Integration Method for Flowrate of Ultrasonic Flowmeter Based on Gauss Quadrature for Non-Ideal Flow Fields. *Flow Measurement and Instrumentation*, **41**, 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.005>
- [9] Zhou, H.L., Ji, T., Wang, R.C., *et al.* (2018) Multipath Ultrasonic Gas Flowmeter Based on Multiple Reference Waves. *Ultrasonics*, **82**, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.07.010>
- [10] 陈红. 上游弯管对超声波流量计测量误差的影响[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 中国计量学院, 2015.
- [11] 刘阳. 超声波流量检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2017.
- [12] 张淞. 超声波流量计在气体计量中的应用策略[J]. 石化技术, 2023, 30(11): 20-22.