

弯管对超声波气体流量测量影响分析

李奇璇¹, 苟开海², 吴倩¹, 刘宣辰¹, 张楠琳³, 彭洁³

¹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

²中国石油天然气管道工程有限公司成都分公司, 四川 成都

³西南石油大学电气信息学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年11月19日; 录用日期: 2025年12月16日; 发布日期: 2025年12月29日

摘要

本研究针对弯管扰动导致超声波气体流量计测量精度下降的问题, 开展流场理论分析与CFD仿真研究。基于时差法测量原理, 建立流速分布与流量修正系数的数学模型, 揭示弯管二次流对流速分布非对称性的影响机制。通过ANSYS软件对DN50弯管进行流场仿真, 分析不同下游位置(1D-12D)的流速分布及相对误差变化规律。结果表明: 弯管下游1D处流速相对误差高达24.91%, 5D处趋于稳定(相对误差0.71%), 但10D后因流场恢复能力不足相对误差回升至9.26%, 证实弯管扰动会对超声波流量计测量的准确性产生直接影响。本研究为提升超声波流量计在燃气计量中的精度提供理论支持。

关键词

弯管, 超声波, 流量测量, 超声波流量计

Analysis of the Impact of Bend Pipe on Ultrasonic Gas Flow Measurement

Qixuan Li¹, Kaihai Gou², Qian Wu¹, Xuanchen Liu¹, Nanlin Zhang³, Jie Peng³

¹Petrochina Southwest Oil and Gas Field Gas Branch Company, Chengdu Sichuan

²China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Chengdu Branch, Chengdu Sichuan

³School of Electrical and Information Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Received: November 19, 2025; accepted: December 16, 2025; published: December 29, 2025

Abstract

This study addresses the issue of reduced gas measurement accuracy in ultrasonic flowmeters caused by elbow disturbances through theoretical flow field analysis and CFD simulation. Based on the time-of-flight measurement principle, a mathematical model for velocity distribution and flow

correction factors was established to reveal the mechanism by which secondary flow in elbows influences velocity distribution asymmetry. Flow field simulations of a DN50 elbow were conducted using ANSYS software to analyze velocity distribution and relative error patterns at different downstream positions (1D-12D). Results indicate: relative velocity error reaches 24.91% at 1D downstream of the bend, stabilizes at 5D (0.71% relative error), but rebounds to 9.26% beyond 10D due to insufficient flow field recovery capacity. This confirms elbow disturbances directly impact ultrasonic flowmeter measurement accuracy. This study provides theoretical support for enhancing the accuracy of ultrasonic flowmeters in gas metering applications.

Keywords

Bent Pipe, Ultrasonic, Flow Measurement, Ultrasonic Flow Meter

Copyright © 2025 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

天然气是一种清洁、低碳、高效的化石能源，在传统化石能源向可再生能源的转变过程中发挥着不可替代的缓冲作用[1]。近年来，我国天然气消费量持续攀升，2024年全国天然气表观消费量高达4260.5亿立方米，同比增长8%[2]。《2030年前碳达峰行动方案》进一步强调需通过技术创新推动天然气产业高质量发展，在此背景下，流量计量精度成为制约能源传输效率与贸易公平的核心技术瓶颈。随着全球天然气市场化改革深入推进和国际贸易体系加速耦合，市场对天然气流量计准确度提出了更高的要求[3][4]。

过去几十年里我国天然气计量设备和技术有了显著发展，目前国内常用的天然气流量计主要包括超声波流量计、涡轮流量计和孔板流量计等[5]。其中，超声波流量计凭借其压损小、精度高、非接触式测量和测量管径范围大等优点，已经成为大流量燃气计量工业领域的主流设备[4]。由于超声波流量计直接测得的是流速，需要流量修正系数换算得到流体的体积流量，因此使用超声波流量计需要管道内流场充分发展流动。然而，在实际工程中，弯管、阀门等阻流件引发的二次流会显著破坏流场对称性，导致速度分布畸变(如外侧流速激增、涡旋形成)，进而影响超声波传播时间差的计算精度。尽管现有研究关注了直管段长度对流速分布的影响[6]，但对弯管扰动下流场动态恢复规律及误差演变机制仍缺乏系统性分析。本文通过理论建模与CFD仿真，量化弯管下游不同位置的流场扰动特征，揭示测量误差的空间依赖性，旨在为超声波流量计的安装规范优化与流场调控提供理论依据，助力天然气贸易计量体系的高精度化与标准化建设。

2. 超声波流量计测量原理

由于超声测量的原理不同，超声波流量计常用的测量方法主要有多普勒法、传播速度差法和波束偏移法等。常见的基于传播速度差法的流量计又可分为时差式、频差式和相差式三种[6][7]。本文选择时差式超声波流量计，其测量原理是利用顺、逆流条件下对超声波产生的时间差实现对流速的测量[8]。

时差法超声波流量计测量原理图如图1所示，A和B为换能器、 D 为管道直径、 L 为声道长度、 v 为背景流速、 θ 为管道径向与换能器连线角度。由下游换能器B发射脉冲信号，顺着被测气体在管道内的传播方向，再由换能器A接受信号，便可得到顺流传播时间 t_1 ；同理，由换能器A发射信号，换能器B

接受信号，得到逆流传播时间 t_2 。

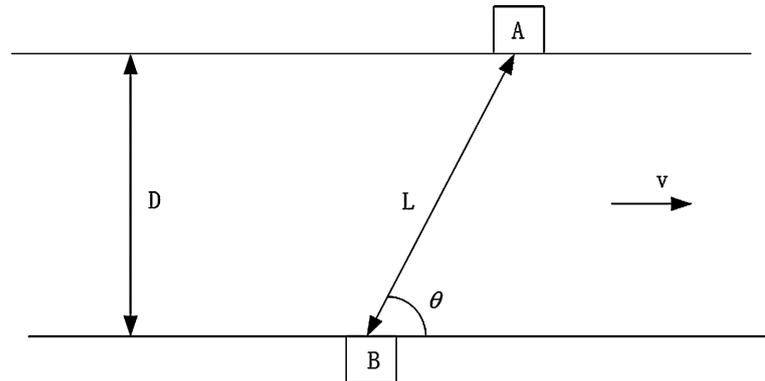


Figure 1. Schematic of time-of-flight ultrasonic flowmeter measurement principle
图 1. 时差法超声波流量计测量原理图

顺流传播时间:

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

逆流传播时间:

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

顺逆流时间差 Δt :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv \cos \theta}{c^2 - v^2 \cos^2 \theta} \quad (3)$$

超声波在空气中的传播速度通常为 340 m/s, 而管道内气体流速通常不大于 15 m/s, 因此 $c^2 \gg v^2 \cos^2 \theta$, 则可以得出管道内流速和流量分别为式(4)和式(5), 其中 k 为流量修正系数:

$$v = \frac{c^2 \Delta t}{2L \cos \theta} \quad (4)$$

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

3. 管道流场分析

时差法测量原理是基于理想流动状态, 但是在实际应用中由于管道上存在弯管、阀门等阻流件会在管道内产生非对称流场, 使得超声波流量计在实际过程中存在较大误差[9]。例如, 弯管二次流现象就是因为流体经过弯管部件时, 弯管内外侧管壁的曲率不同, 产生两种不同的离心力, 在它们的相互作用下和受到内部摩擦对流体的影响, 从而在管道截面上形成一对反向对称的涡旋[10]-[19]。

二次流的强度可用无量纲数 Dn 表示:

$$Dn = \frac{U_s}{U_m} \quad (6)$$

其中, U_s 表示二次流的特征速度, U_m 表示主流方向的特征速度。

由式(5)可知, 二次流的强度不仅与弯管半径有关, 而且与流体流速有关。

根据流体在流动过程中受粘滞力和惯性力的影响不同,按流动状态可分为层流和湍流。其中,将雷诺数小于 2300 的流动状态称为层流,雷诺数大于 4000 的流动状态称为湍流。对于充分发展的湍流流速,本研究选择半经验的幂函数来表示:

$$v_r = v_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

其中, R 为管道半径, r 为选取的半径, n 是管道雷诺数和粗糙度的函数。对于光滑管道:

$$n = 2 \log_{10} \left(\frac{Re}{n}\right) - 0.8 \quad (8)$$

由式(7)可知,随着 n 的增加,雷诺数也逐渐增大,管道内的流速分布曲线逐渐趋于平坦。

由式(6)对管道截面上的速度分布公式进行积分:

$$v_A = \frac{1}{A} \int_A v_r dA = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} dr = \frac{2n^2}{(n+1)(n+2)} v_{\max} \quad (9)$$

超声波换能器安装在管道中部时,则声道射线上的平均速度:

$$u_L = \frac{1}{L} \int_L v_r dL = \frac{1}{R} \int_0^R v_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} dr = \frac{n}{n+1} v_{\max} \quad (10)$$

气体超声波流量计实际测量的是超声波在声道上传播的线平均速度,而非面平均流速。因此,在处理流量测量结果时,需要引入流量修正系数,将线平均速度转换为面平均速度。流量修正系数 k :

$$k = \frac{u_L}{v_A} \quad (11)$$

一般情况下,当管道内流体雷诺数 $Re > 105$ 时,系数 k 用 Nikuradse 摩擦系数进行修正,如公式(11)所示;当管道内流体雷诺数 $Re < 105$ 时,系数 k 用 Brasius 摩擦系数进行修正,如公式(12)所示。

$$k = 1 + 0.01 \times \sqrt{6.25 + 431 Re^{-0.237}} \quad (12)$$

$$k = 1.119 - 0.011 \times \log Re \quad (13)$$

4. CFD 仿真实验

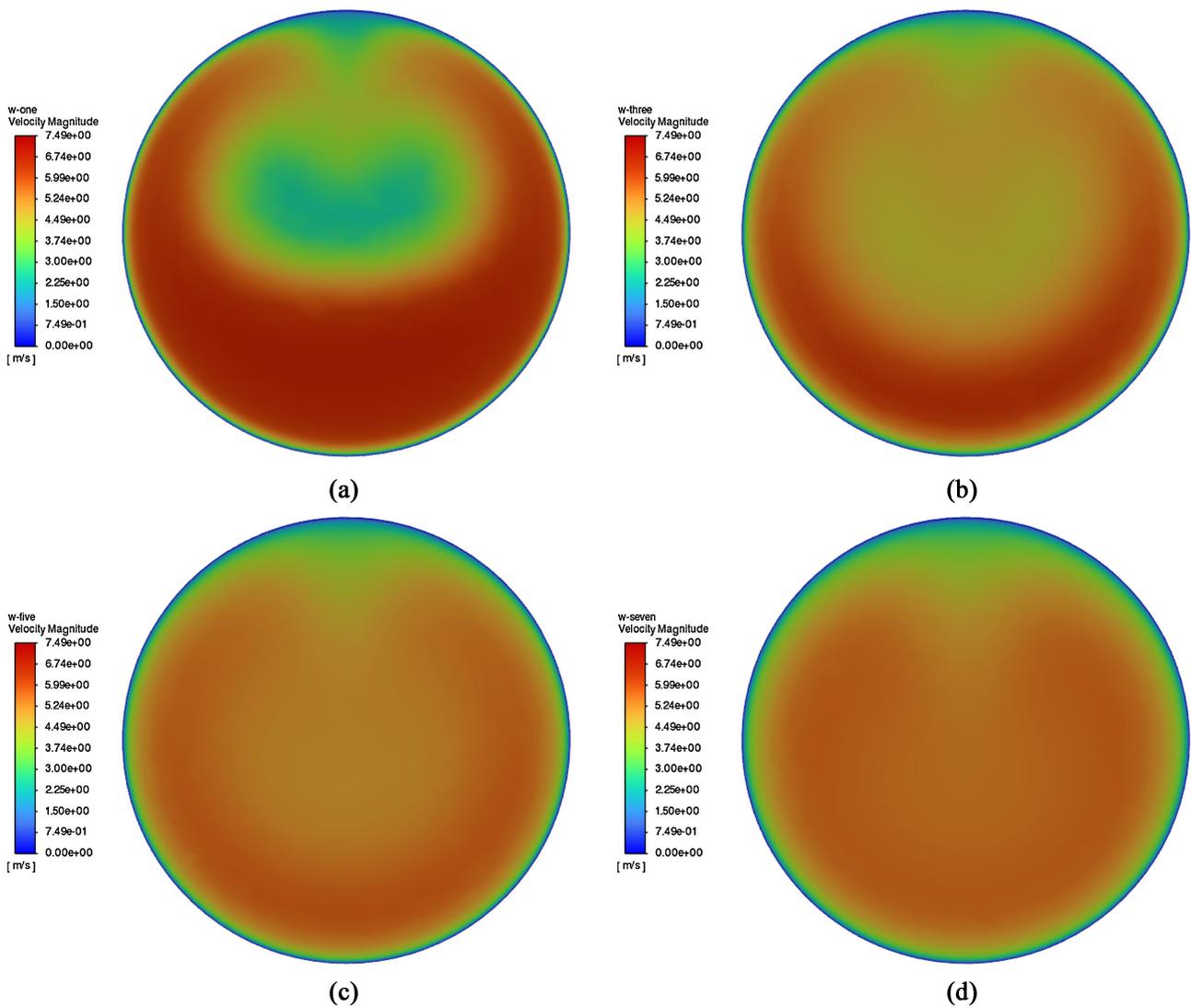
本研究选择 ANSYS 进行流体仿真,验证弯管对超声波测量的影响。首先利用 SolidWorks 软件进行 DN50 的弯管建模,并导入 mesh 模块进行网格划分。因为本研究是在湍流条件下进行的超声波气体流量测量,所以在 fluent 设置中选择 $k-\varepsilon$ 模型和 SIMPLE 算法。最后设定 5 m/s 的入口速度和 Outflow 的出口类型。分别选择下游 1D、3D、5D、7D、10D 和 12D 六个位置进行研究。其速度云图结果分别如图 2 和图 3 所示。

根据式(5)可知,流量只与管道内流速有关,因此选择利用管道内流速误差来表示流量误差。根据上述弯管不同位置流速的仿真结果,可以算出相对误差,如表 1 所示。

从图 2 可知,流体经过弯管后,管道内流速从设定的 5 m/s 上升到了 7.49 m/s,并且由于惯性作用,弯管外侧流速高于弯管内侧流速。由表 1 和图 3 可知,在 1D 和 3D 时,二次流影响速度分布,此时速度梯度较大。随着流体在直管道内继续流动,流动逐渐趋于稳定,在 5D 处,相对误差仅有 0.71%。但是从表 1 可以看出截面分布仍存在波动,在 10D 处,相对误差增大到了 9.26%。也就是说,管内流体流动对弯管的影响只有部分恢复能力。流场速度分布不均对流量计测量带来的影响是声道线的流速信息不足以



Figure 2. Velocity contour map of the curved pipe
图 2. 弯管流速云图



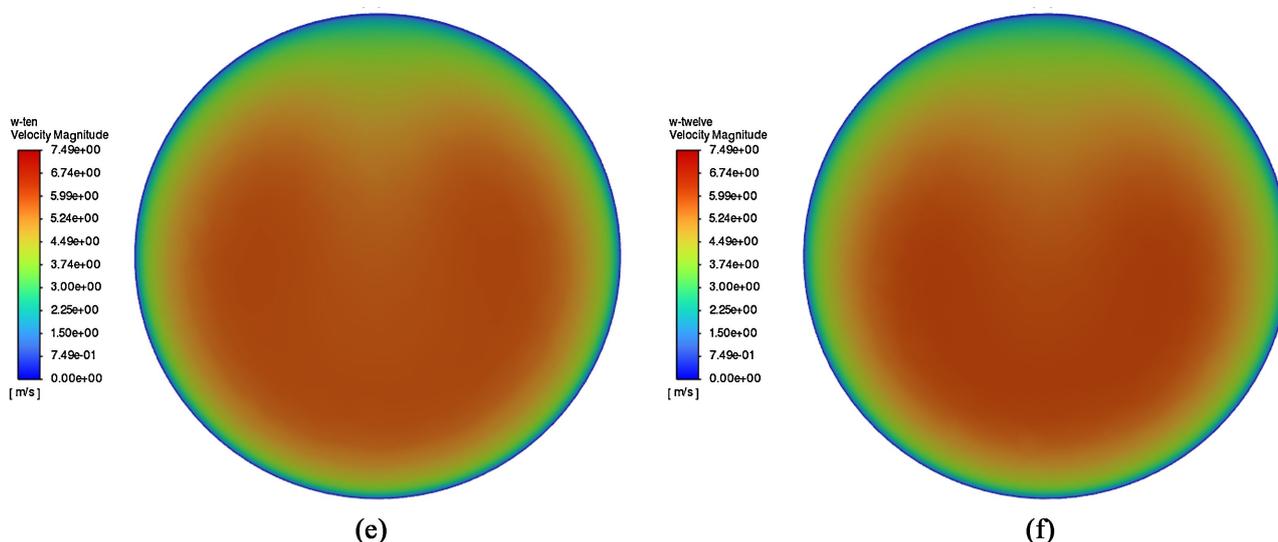


Figure 3. Velocity distribution contour maps at different downstream locations. (a) Downstream 1D; (b) Downstream 3D; (c) Downstream 5D; (d) Downstream 7D; (e) Downstream 10D; (f) Downstream 12D

图 3. 下游不同位置流速分布云图。(a) 下游 1D 处; (b) 下游 3D 处; (c) 下游 5D 处; (d) 下游 7D 处; (e) 下游 10D 处; (f) 下游 12D 处

Table 1. Velocity and relative error at different positions of elbow

表 1. 弯管不同位置流速及相对误差

入口流速(m/s)	测量位置	测量流速(m/s)	相对误差(%)
5	1D	6.2456	24.91%
	3D	5.8902	17.80%
	5D	5.0356	0.71%
	7D	5.2622	5.24%
	10D	5.4632	9.26%
	12D	5.4844	9.69%

代表整个截面的流速，从而导致测量偏差。

通过仿真分析可知，随着距弯管距离的增加，弯管对流动的影响逐渐减弱。但当弯管对管内流场影响作用较大时，就难以消除这部分影响。因此在实际工程中，建议安装整流器来稳定流场，以此消除弯管对超声波气体流量计测量精度的影响。

5. 结论

本研究通过理论分析与 CFD 仿真验证，揭示了弯管对超声波流量计测量精度的关键影响机制：弯管引发的二次流导致流场分布非对称，外侧流速显著高于内侧，使得声道线平均速度偏离真实面平均速度。仿真结果表明，下游 1D 处流速相对误差高达 24.91%，5D 处因流场短暂稳定误差降至 0.71%，但 10D 后受惯性残余扰动影响误差回升至 9.26%，证实弯管扰动对超声波流量计测量精度有直接影响，且弯管扰动影响不能随着直管道长度的增加而完全消除。因此建议在实际应用中使用整流器来减少弯管对流场的影响，以确保超声波流量测量的准确性。

参考文献

- [1] 李乔楚, 罗平亚, 张鹏. 中国天然气供需安全影响因素系统结构分析[J]. 世界石油工业, 2025, 32(2): 1-12.
- [2] 高芸, 王蓓, 胡逸丹, 于智博. 2024 年中国天然气发展述评及 2025 年展望[J]. 国际石油经济, 2025, 33(2): 55-67.
- [3] 裴锐. 天然气能量计量核查系统的研究与应用[J]. 中国仪器仪表, 2024(9): 29-33.
- [4] 邱绍东, 徐旷宇. 管道天然气超声流量计的检测方法研究[J]. 中国检验检测, 2024, 32(5): 35-40+60.
- [5] 陈志刚, 马瑾, 康国强, 等. 国产超声波流量计在天然气贸易计量中的应用[J]. 石油工程建设, 2025, 51(1): 68-71.
- [6] 常青, 杨晓明. 管道内天然气流态对时差法超声波流量计测量准确性影响的分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(12): 112-114.
- [7] 冯启航. 基于超声波时差法的微小管径流量检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
- [8] 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.
- [9] 李季, 章吉刚, 汪志远, 等. 超声波流量计整流器优化设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2024(1): 38-41+56.
- [10] 厉胜男. 气体超声波流量计流场分析及整流器设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [11] Ge, L., Wei, Y., Min, C., Yang, Q. and Tian, G. (2025) Research Status and Prospect of Intelligent Wells Reservoir Monitoring Technology. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1-43. <https://doi.org/10.1080/10589759.2025.2528931>
- [12] 葛亮, 李朋, 王飞, 钱浩, 卓勇, 廖聪冲. 天然气加臭剂加注技术现状及展望[J]. 天然工业, 2025, 45(5): 162-173.
- [13] Wang, S., Ge, L., Tian, G., Wei, G., Xiao, X. and Zou, M. (2025) Research Progress on Optimization Techniques for Electromagnetic Flowmeters: A Review. *IEEE Sensors Journal*, **25**, 14557-14574. <https://doi.org/10.1109/jsen.2025.3552894>
- [14] Xiao, G.Q., Lai, X., Ge, L., He, Y. and Teng, Y. (2025) Intelligent Tetrahydrothiophene Gas Detection Based on Electrochemical Sensor Array. *Review of Scientific Instruments*, **96**, Article 035104. <https://doi.org/10.1063/5.0226213>
- [15] Ge, L., Liu, Z., Liu, S., Xiao, X., Yuan, Y. and Yin, Z. (2025) Electromagnetic Tomography for Multiphase Flow in the Downhole Annulus. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **74**, 1-13. <https://doi.org/10.1109/tim.2025.3548206>
- [16] Ge, L., Liu, Y.Y., Gao, Y., Xiao, X.T., Wu, J.Y. and Hu, W. (2025) Improving Acoustic Localization Using Time Delay Estimation of Wave Reflection in Buried Pipelines. *Measurement*, **242**, Article 116157. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116157>
- [17] Ge, L., He, Y., Tian, G., Wei, G., Ahmed, J., Deng, H., *et al.* (2019) Measurement of Annular Flow for Drilling Engineering by Electromagnetic Flowmeter Based on Double-Frequency Excitation. *Journal of Sensors*, **2019**, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/4090632>
- [18] Ge, L., He, Y., Wang, Q., Hu, Z., Gan, F.J. and Wei, G. (2019) Research on Oil-Well Tubing Damage Monitoring of Intelligent Well Based on FSM Technology. *Insight*, **61**, 458-464. <https://doi.org/10.1784/insi.2019.61.8.458>
- [19] Ge, L., Deng, H.X., Wang, Q., Hu, Z. and Li, J.L. (2019) Study of the Influence of Temperature on the Measurement Accuracy of Transit-Time Ultrasonic Flowmeters. *Sensor Review*, **39**, 269-276. <https://doi.org/10.1108/sr-01-2018-0005>