DOI: 10.13382/j.jemi.B2002888

大口径超声波流量计内部流-声耦合特性仿真分析*

李坤鹏[1] 徐 雅[1] 谢代梁[1] 徐志鹏[1] 曹松晓[1] 胡鹤鸣[2]
(1. 浙江省流量计量技术重点实验室 中国计量大学 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘 要:为了探索工业用大口径水流量管道中超声波流量计的使用及其关键的流场-声场耦合机理,针对一 DN500 大口径超声波流量计进行了流-声耦合数值模拟研究。系统分析了大口径管道中的流场分布特性,揭示了传感器安装结构对于流场和声场带来的综合影响,给出了声波在管道流体中的传播动力学过程,通过换能器的声压接受信号结果计算得到了大口径管道内超声流量计模型的预估流速及计算偏差,其复杂的流-声耦合机理研究对超声波流量测量性能的提升具有重要意义。

关键词: 大口径管道;超声波流量计;流声耦合;模拟
中图分类号: TH814;TN64 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**: 460.40

Simulation analysis of flow-acoustic coupling characteristics of large diameter ultrasonic flowmeter

Li Kunpeng[1] Xu Ya[1] Xie Dailiang[1] Xu Zhipeng[1] Cao Songxiao[1] Hu Heming[2]
(1. Key Laboratory of Flow Measurement Technology of Zhejiang Province, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: The study of flow-acoustic coupling mechanism is crucial to the development of large diameter ultrasonic flowmeters applied in industrial piping systems. An ultrasonic flowmeter with an inner diameter of 500 mm is simulated, mainly focusing on the coupling mechanism between the flow field and acoustic field. The distribution characteristics of flow field in the ultrasonic flowmeter are analyzed. The effects on the flow field and acoustic field caused by the installing structure of transducers are revealed. The acoustic characteristic and the acoustic pressure distribution on the transducer receiver end face are shown. The flow velocity and the system deviation of the ultrasonic flowmeter are calculated by the difference in travel times between the downstream and the upstream propagations. The in-depth study of complex flow-acoustic coupling mechanism has significant meanings for the improvement of measurement performance of the ultrasonic flowmeter.

Keywords: large diameter pipe; ultrasonic flowmeter; flow-acoustic coupling mechanism; simulation

0 引 言

在冶金、石化、能源等工业领域和水利及市政工程中,用于输送流体的大口径工业管道已十分普遍,需要配备大量的流量仪表进行流量计量及贸易结算[1]。因此这些流量仪表的测量准确性密切关系到工业生产的正常运转以及贸易双方的经济社会利益。然而,特别是在大口径工业管道的流量检测中,受到管道结构尺寸及现场条件等因素的影响,其管道内部很难形成稳定均匀的流场,从而限制了仪表的选择范围并对实际测量精度造成了极大的影响,与此相关的测量问题亟待解决。

超声波流量计具测量精度高、重复性好、量程比宽、无压力损失等优点,不受流体的粘度、电导率等特性的影响,且从原理上测量精度不受管道口径的限制,越来越多的应用于大型工程中资源水与工业气体介质的流动测量领域[2]。在超声波流量计测量过程中,一般通过测量声波在流体中的传播时间差来获得流体的流量数据。理论上,声波在管道流体中的传播过程涉及到声场、流场以及温度场等多物理场的影响,特别是声场和流场之间的复

收稿日期: 2020-01-03 Received Date: 2020-01-03
*基金项目:国家重点研发计划(2018YFF0216001)资助项目

杂耦合作用会极大地影响超声波流量测量的性能。因此,针对超声波流量测量中涉及的流场、声场及其耦合机理的研究对于测量精度的提升具有关键性的作用。

范思航等[3]以多普勒效应为基础,通过分析声波在管道中的传播过程等,计算得到相应技术参数,设计出适用于多普勒流量计的超声换能器。赵文明等[4]详细分析了温度、管径、流速等因素对流动状态的影响,并进行相应系数修正后保证了计量精确度。Zheng 等[5]使用计算流体力学方法研究了不同换能器安装方式对超声波流量计内部流场及测量精度的影响。Raišutis[6]对探头空腔内的流场特性进行了实验研究。刘永辉等[7]研究了反射装置对超声波流量计水流特性的影响,得到反射装置参数与 K 系数及标准差之间的关系。王雪峰等[8]通过仿真与实验相结合的方法量化流场误差,并通过限定系数有效降低测量误差。赵文等[9]对一 DN70 口径的超声波流量计进行了流声耦合仿真,得到了超声探头扰流对流量测量的影响。李冬等[10]针对一款 DN50 口径的超声波流量计进行了声场和流场的模拟计算,获得了声波在流体中的传输时间差。Zheng 等[11]利用几何声学射线追踪法研究得到非均匀流场下超声信号的传播呈 S 型,且偏转量与最大马赫数有关。Bezděk 等[12]将射线追踪法与亥姆霍兹积分相结合,应用到超声流量计的数值模拟中并实验验证其有效性。Sun 等[13]提出了一种综合运用计算流体力学和声学理论的方法,深入分析了换能器附近的涡流流场及其对声传播行为和流量计性能的影响。胡鹤鸣等[14]分析了超声流量计的流量积分原理,结合数值分析理论,推导了 Gauss Jaccobi 方案和 OWICS 方案的声路高度与权重系数。汪伟等[15]针对超声流量计信号处理中难以确定特征点的问题,提出一种可变阈值过零检测的信号处理方法,准确通过特征波求得传播时间得以准确测量气体流量。

从上述研究现状可知,流场与声场的研究对超声波流量测量精度的影响极为重要。然而,目前的研究大多集中在超声波流量计的内部流场及其影响的研究,针对其中关键的流场-声场耦合机理的研究较少,特别缺乏针对诸如 DN500 以上的大口径管道超声流量测量的流声耦合问题的研究。因此,本文针对大口径管道的超声波流量测量中的声场与流场的耦合问题展开了研究,建立了超声波流量计的三维多物理场耦合模型,探索了管道内部的流场分布以及声波在管道流动中的耦合传播过程。

1　计算模型

超声波流量计的数值模拟计算包含流场和声场两部分物理场,本文采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 实现流场和声场的耦合模拟计算。如图 1 所示,所构建的计算模型为换能器斜向布置的大口径超声波流量计,管道内部流体为水,管道内径为 500 mm,长度为 2 000 mm,换能器直径为 40 mm,两个换能器以 45°声道角分布在管道两侧。流场网格在管道边界层及换能器安装结构处进行了精细化处理,声场网格的单元格大小则根据声波波长大小成一定比例确定,以确保流场和声场算法同时满足实际模拟计算的计算量和精确度要求。

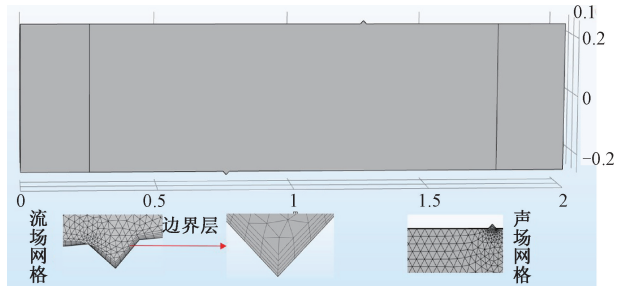

图 1　计算模型及网格示意图

Fig. 1　Calculation model and grid diagram

在研究声波与流体流动的耦合动力学行为时,一般考虑流体做稳定流动,声波传播对流体参数形成扰动[16]。超声波流量计模型中的流场采用不可压缩流动 k-ε 湍流模型计算进行稳态求解。在模型中进行瞬态高频声场仿真时,使用压力声学接口在时域求解声学波动方程来模拟瞬态声场。实际测量时,换能器探头在电压的作用下进行往复振动从而产生声波[17],并同时扮演着发射和接受声波的作用。在该计算模型中,通过在一侧的传感器探头端面施加高斯脉冲调制的正弦波信号来实现,在信号源边界指定法向速度,

$$u = A\sin(\omega_0 t)\,\mathrm{e}^{-(f_0(t-3T_0)^2)} \tag{1}$$

式中:f_0 为振动频率;ω_0 为相应的角频率;T_0 为周期;A 为振动幅值。本文模型设置超声波频率为 0.1 MHz,声波速度幅值为 0.1 mm/s。

2　数值模拟计算

本文的数值模拟分为稳态流场计算和瞬态声场计算两部分。

2.1　稳态流场计算

为确保超声波流量计测量管段的流场符合正常测量情况,在流量计的前段增加长直管道作为管道流动的发展段,同时流量计下游也设定 1 000 mm 的直管段长度。模拟结果表明流量计上游长直管段的出口位置处的流速分布已获得稳定充分发展,因此将其计算获得的流场结果作为流量计计算段的入口流场条件。在本文所采用的流量范围内,该口径的管道内部流动状态为湍流,因此采用能较好地反映圆管内流场的标准 k-ε 模型对流量计上

游的长直管道进行流场模拟计算[18]。

相应地,在图 1 所示的流量计计算段三维模型中亦采用标准 $k-\varepsilon$ 模型进行流场计算,计算收敛完成后,可获得超声波在流量计管道内部传播所需的稳态背景流场。图 2 所示为流量计管道横截面的网格划分情况,模型采用 O-Grid 网格划分方式,并在管道壁面处进行了边界层网格局部加密处理,流场入口条件来自上游长直管段模型的速度场,模拟计算的收敛标准为 1×10^{-6}。

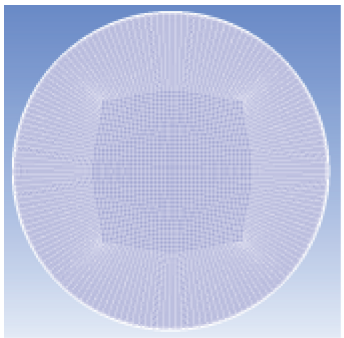

图 2 横截面网格划分结果

Fig. 2 Cross-section meshing results

2.2 瞬态声场计算

在管道流动条件下,连续性方程和动量方程可表示为:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho v)=0\\&\rho\left[\frac{\partial v}{\partial t}+(v\cdot\nabla)v\right]+\nabla p=0\end{aligned}\tag{2}$$

式中:ρ、p 和 v 分别为流场的密度、压强和速度参数。

若不考虑流体粘性及温度场梯度的影响,假设声波在管道流场中进行等熵传播,根据线性声学理论,仅考虑一阶小扰动量时,声波在流体中的传播方程可进一步表示为:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial p'}{\partial t}+(v_0\cdot\nabla)p'+\rho_0{c_0}^2\nabla\cdot v'=0\\&\frac{\partial v'}{\partial t}+(v_0\cdot\nabla)v'+(v'\cdot\nabla)v_0=-\frac{\nabla p'}{\rho_0}+\frac{\nabla p_0p'}{{\rho_0}^2{c_0}^2}\end{aligned}\tag{3}$$

式中:ρ_0、p_0 和 v_0 分别表示稳定流场条件下的密度、压强和速度参数,相应的声波传播对流体密度、压强及速度的影响分别表示为小扰动量 ρ'、p'和 v'。

基于稳态背景流场下的超声波传播方程,结合相应的声学边界条件,采用间断有限元法进行空间离散和 Runge-Kutta 格式进行时间推进。在流量计的前后端 250 mm 长度范围内设置吸收层,使传播到流量计出入口处的声波被过滤吸收。

为获得较好的仿真结果,对网格尺寸和时间步长等参数应根据声波参数进行严格的调试。最终模型采用四面体网格进行划分,同时将网格尺寸控制在 $\lambda/50\sim\lambda/15$ 范围内,流量计计算段的网格数量为 608 372。瞬态声场计算的时间步长为 $\Delta t=T_0/10$,计算总周期的选取应保证声波在管道中完成从发射端传感器到接收端传感器的传播。

本文的所有模拟计算均在实验室的工作站上进行,其配置为 2 个 Intel Xeon E5-4667 v4 @ 2. 20 GHz CPU 和 128 GB(16×8 GB)内存。

3 计算结果分析

3.1 流场结果

在换能器测量区域前段距离 500 mm 处的管道截面速度分布的理论结果和模拟计算结果的对比情况如图 3 所示。其中充分发展流动速度分布的理论结果采用半经验指数公式计算得到,

$$u(r)=u_{\max}[1-r/R]^{1/n}\tag{4}$$

式中:R 为管道半径;r 为距管道中心处的距离;$u_{\max}$ 为管道中心最大流速;$u(r)$ 则为距管道中心距离为 r 位置处的流速大小;指数 n 与流场的雷诺数相关,工程应用中一般可采用 $n=0.252\ 5-0.229\lg Re$ 进行计算,其中 Re 为雷诺数。对应于本模型中的雷诺数 $Re=4.966\ 2\times10^5$,其获得的理论分布曲线如图 3 所示,在该流速下采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型得到的仿真计算结果与理论结果符合,能较好的模拟圆直管段内的流速分布。当然,不可避免的是,随着管道雷诺数的增大,经验公式的速度计算值偏差将会增大,特别体现在边界层处的速度值会逐渐偏大。

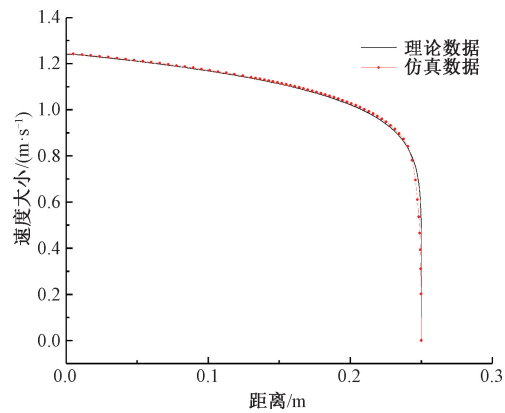

图 3 测量前段直管段径向速度分布对比

Fig. 3 Comparison of radial velocity distribution of straight pipe section before measurement

超声波流量计中的换能器安装结构对流场分布有显著的影响。由于换能器本身及其安装区域占有一定的空间大小,流场在此处通常会产生滞止、漩涡等不均匀流动

情况。此外,换能器端面各个区域的流速以及声压分布均有差异,这将导致实际测量时换能器所接收到的声场信号与其对应的流速计算区域实际产生一定的偏差,从而影响仪表流速换算结果的精度。

背景流速为 1 m/s 时对应于换能器探头端面不同区域声道线上的速度分布情况如图 4 所示。将探头端面划分为 3 个区域,取点 *B* 为端面中心,点 *A*(上游)、点 *C*(下游)距中心点 *B* 的距离分别为 13 mm,并提取出两侧换能器中对应的 *A*-*A*、*B*-*B* 和 *C*-*C* 这 3 条连线上的流速分布结果。图 4 中对换能器附近的流场区域进行放大显示,在换能器端面上不同区域产生了流速分布不均匀情况。特别是在换能器安装孔的 *A* 和 *C* 区域出现了明显的速度变化,这表明在上下游换能器的安装孔内部均产生了漩涡。

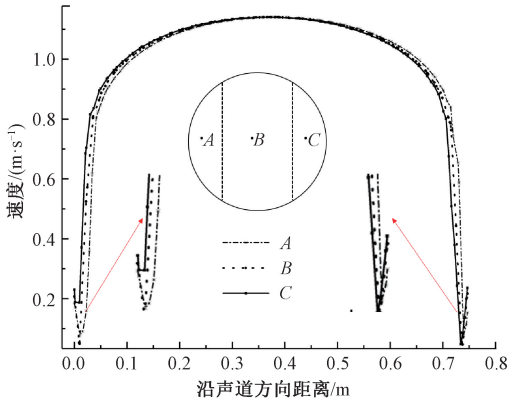

图 4　传感器端面不同区域连线上的速度分布情况

Fig. 4　The speed distribution on the connection of different areas of the sensor end face

通常来自安装孔上游管道壁面的粘性流动边界层在流经换能器安装孔结构突变时,受到剪切力的影响卷起形成涡,将会导致该区域内的速度和压力变化剧烈[19]。此外,在特定的流速和换能器安装结构条件下,该类涡可形成具有一定强度的流体动力声源,进而诱发换能器安装结构内的滞止流体振荡,产生速度和压力脉动,从而造成一定程度的噪声干扰。在较高的流速或较深的传感器安装结构下,此类噪声会更加明显[20]。因此,在实际的超声波流量计设计使用时,应针对传感器的安装结构和尺寸进行优化设计,尽量减少该类因结构突变引发的噪声干扰,从而提升传感器信号的发射和接受的精确度。

3.2　声场结果

背景流速为 1 m/s 时,在不同时刻下超声波在管道内部的传播过程如图 5 所示。

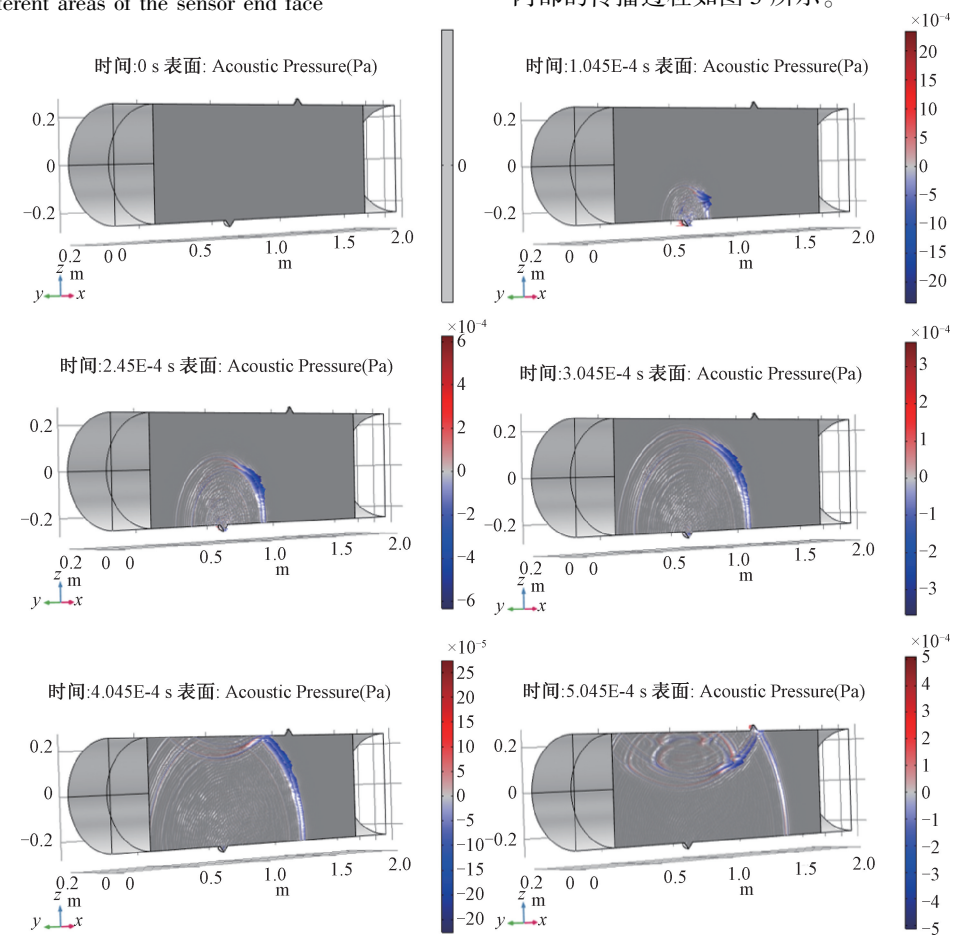

图 5　声波的瞬态传播过程

Fig. 5　Transient propagation of sound waves

随着传播时间的推移,声波以球面波的形式传递。如图 5 中 4.045×10^{-4} s 时刻的声压情况,声波在管道壁面处发生初次反射,并与原始发射声波产生叠加。在 5.045×10^{-4} s 时刻,声波传递至传感器安装结构处并与经管道壁面反射的声波进行复杂的叠加。从图中一系列不同时刻的传播过程可看出,声波在管道内部壁面和传感器安装结构处发生多次反射,并与原始声波信号叠加,这将导致接收端所接受的实际信号产生一定的误差,从而不可避免的影响传播时间的确定。在实际的流量计设计中,一般可通过信号采集电路的调制进一步消除声波反射带来的部分影响。

流场背景流速为 5 m/s 时声波传播至管道中心处和声波到达接收端探头时接收端探头端面的声压分布对比情况如图 6 所示。在整个声波传播周期中,接收端探头端面各区域声压大小并非均匀分布。当声波信号传递至接收端时,其端面周边区域的声压较大,而在端面中心偏流动下游的位置处形成一个声压较低的区域。这主要是由于该区域流场所形成的漩涡以及声波在壁面产生的反射影响综合叠加导致。

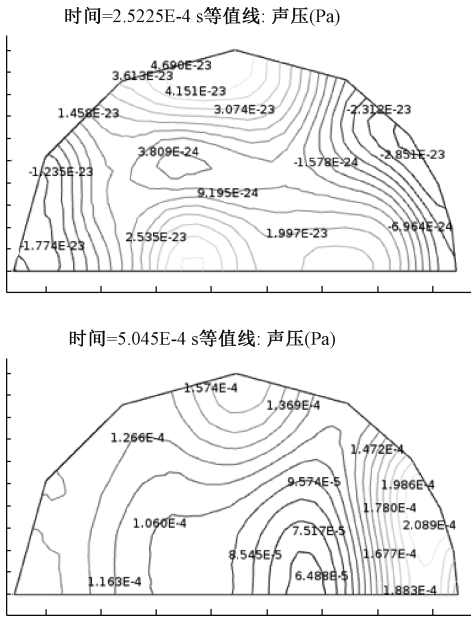

图 6 顺流传播中段和末段时探头声压分布

Fig. 6 The sound pressure distribution of the probe in the middle and last stages of downstream propagation

背景流速为 5 m/s 时声波在顺逆流条件下两侧传感器探头分别接收到的声压信号如图 7 所示。受到管道流速与超声波传递速度叠加的影响,声波在顺流传播条件下比逆流条件下能更早的到达换能器,因此,顺流、逆流两种条件下的传播时间差即可换算为管道的流速。因本文模型中测量介质为水,此时背景流速 u_0 远小于声波在水中的传播速度 c(1 481 m/s),流速大小可以进一步简化为:

$$v' = \frac{\Delta t \cdot c^2}{2\ L\cos\theta} \tag{7}$$

式中:L 代表声道线长度;θ 为换能器安装倾角。由模拟结果取得的时差 Δt 代入其中,可得流速 v' 的大小。当背景流速为 5 m/s 时,声场仿真计算取得的 $\Delta t = 2.4\times10^{-6}$ s,L=747.11 mm,求得 v'=4.982 m/s,相应的计算偏差为−0.36%。

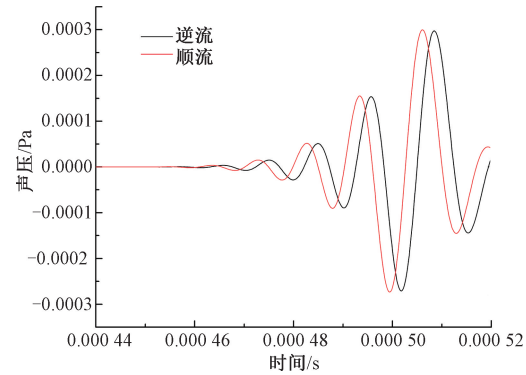

图 7 背景流速 5 m/s 时顺、逆流传播声压随时间的变化

Fig. 7 Time-dependent change of sound pressure propagating forward and backward when the background velocity is 5 m/s

4 结 论

为了更直观的分析大口径超声波流量计中的流声耦合现象,建立了一个 DN500 口径的超声波流量计流场-声场耦合模型并进行仿真计算与分析,获得了流场的分布特性以及与其耦合的声波的传播动力学过程。该模型计算结果可反映出声波在管道内部的传播过程中,在管道壁面以及换能器安装结构处产生了多次的反射与叠加,这会影响声压接受信号的准确性。此外,换能器安装造成的管道结构突变使得壁面的流动边界层脱落形成漩涡,从而导致流速分布不均匀情况发生,甚至可能产生一定强度的流动噪声,对探头声波的发射和接收造成干扰,这对流量测量的影响也不可忽略。仿真计算结果显示在背景流速为 5 m/s 时,该模型得到计算偏差约为 −0.36%。

参考文献

[1] 陈满堂, 姜渭宇, 刘伟光,等. 用于航空燃油流量测量的 V 锥流量计的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8): 1167-1174.
CHEN M T, JIANG W Y, LIU W G, et al. Research on V cone flowmeter used for jet fuel flowrate measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8): 1167-1174.

[2] 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.
TANG X Y,ZHANG H J,XIE X, et al. Model simulation and experimental research of acoustic-plane installation angle of multi-path ultrasonic gas flowmeter[J]. Journal of Central South University (Science and Technology) 2017, 48(7):1923-1929.

[3] 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. Investigation and application of transducer of ultrasonic Doppler flowmeter. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014,33(2):84-88.

[4] 赵文明, 邵仙鹤, 王玲, 等. 超声波流量测量影响因素的研究[J]. 自动化仪表, 2012, 33(9): 80-82.
ZHAO W M,SHAO X H,WANG L, et al. Research on the influencing factors to ultrasonic flow measurement [J]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33 (9): 80-82.

[5] ZHENG D D,ZHANG P Y, XU T S. Study of acoustic transducer protrusion and recess effects on ultrasonic flowmeter measurement by numerical simulation [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2011, 22(5): 488-493.

[6] RAIŠUTIS R. Investigation of the flow velocity profile in a metering section of an invasive ultrasonic flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(4): 201-6.

[7] 刘永辉, 杜广生, 陶莉莉, 等. 反射装置对超声波流量计水流特性影响的研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1183-8.
LIU Y H, DU G SH, TAO L L, et al. Study on the influence of ultrasonic reflection device on the flow characteristics of ultrasonic flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32 (5): 1183-1188.

[8] 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. Model simulation and error quantitative analysis of pipeline of ultrasonic gas flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2009,30(12): 2612-2618.

[9] 赵文, 胡鹤鸣, 樊尚春. 超声流量计探头扰流影响的流声耦合研究[J]. 测控技术, 2018, 37(5): 88-91,99.
ZHAO W, HU H M, FAN SH CH. Research in flow-acoustic coupling of transducer disturbing effect on ultrasonic flowmeter [J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(5): 88-91,99.

[10] 李冬, 耿介, 杜广生, 等. 稳态背景流场下超声波流量计内瞬态声场分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1802-1808.
LI D, GENG J, DU G SH, et al. Transient analysis of acoustic characteristic in ultrasonic flowmeter under stationary background flow [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31 (11): 1802-1808.

[11] ZHENG D, MEI J, WANG M. Improvement of gas ultrasonic flowmeter measurement non-linearity based on ray tracing method [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2016, 10(6): 602-606.

[12] MICHAL B, HERMANN L, ALFRED R, et al. A coupled finite-element, boundary-integral method for simulating ultrasonic flowmeters[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2007, 54(3):636-646.

[13] SUN Y, ZHANG T, ZHENG D. New analysis scheme of flow-acoustic coupling for gas ultrasonic flowmeter with vortex near the transducer [J]. Sensors, 2018, 18(4):1151.

[14] 胡鹤鸣, 王池, 孟涛. 多声路超声流量计积分方法及其准确度分析[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(6): 1218-1223.
HU H M,WANG CH,MENG T. Integration method of multi-chord ultrasonic flowmeter and its accuracy analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(6): 1218-1223.

[15] 汪伟, 徐科军, 方敏, 等. 一种气体超声波流量计信号处理方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1365-73.
WANG W,XU K J,FANG M, et al. Study of a signal processing method for gas ultrasonic flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1365-73.

[16] 陈勇. 基于 Fourier-Bessel 级数的声波传播多场耦合理论与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学,2013.
CHEN Y. Fourier-Bessel series on the theory and application of coupled multiphysics in wave propagation[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2013.

[17] 孙景峰, 刘慧英, 舒蓉, 等. 超声换能器时频域特性校准系统研究与实现[J]. 电子测量技术, 2016, 39(9):158-164.
SUN J F, LIU H Y, SHU R, et al. Research and implementation of frequency domain characteristic calibration system for ultrasonic flowmeter[J]. Electronic

Measurement Technology, 2016, 39(9): 158-164.

[18] 周志军, 林震, 周俊虎, 等. 不同湍流模型在管道流动阻力计算中的应用和比较[J]. 热力发电, 2007, 36(1): 18-23.
ZHOU ZH J, LIN ZH, ZHOU J H, et al. Application of different turbulent models in calculation of flow resistance in pipelines and comparison the thereof[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(1): 18-23.

[19] SUN D M, XU Y, CHEN H, et al. A mean flow acoustic engine capable of wind energy harvesting[J]. Energy Conversion and Management, 2012 (63): 101-105.

[20] SUN D M, XU Y, CHEN H J, et al. Acoustic characteristics of a mean flow acoustic engine capable of wind energy harvesting: Effect of resonator tube length[J]. Energy, 2013, 55: 361-368.

作者简介

李坤鹏, 2017 年于安徽工程大学机电学院获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为超声波流量测量。
E-mail: likunpeng95@163.com

Li Kunpeng received his B. Sc. degree from College of Mechanical & Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at China Jiliang University. His main research interest includes ultrasonic flow measurement.

徐雅(通信作者), 2017 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为超声波流量测量、低温流动及传热机理。
E-mail: xuya@cjlu.edu.cn

Xu Ya (Corresponding author) received Ph. D. from Zhejiang University in 2017. She is currently a lecturer and M. Sc. supervisor at China Jiliang University. Her main research interests include ultrasonic flow measurement, low-temperature flow and heat transfer mechanism.

谢代梁, 现为中国计量大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为检测技术、流量测量与传感技术和多相流测量技术。
E-mail: dlxie@cjlu.edu.cn

Xie Dailiang is a professor and M. Sc. supervisor at China Jiliang University. His main research interests include detection technology, flow measurement and sensing technology, and multi-phase flow measurement technology.