

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107772

弯管下游在线校准超声流量计安装位置研究*

张东飞¹ 耿存杰¹ 李国占² 张洪军²

(1. 苏州市计量测试院 苏州 215128; 2. 中国计量大学 计量测试工程学院 杭州 310018)

摘要: 为减少现场扰流元件对超声流量计在线校准的干扰,采用大涡模拟方法研究超声流量计上游存在 90°弯头时其沿流向和周向安装位置对计量准确性的影响,获得超声流量计的最佳安装位置。结果表明,弯头导致下游发生流态畸变,超声流量计距弯头越远,其对周向安装位置的敏感度越低,修正系数最大误差由 0.11 降至 0.03;修正系数随周向安装角的变化而波动,且管内流速越高,修正系数波动幅值越小,波动幅值最大减少了 20.5%。此外,周向安装角为 0°和 180°时流量计对安装位置的敏感度较低,修正系数更接近于 1.0 且其最大误差均在 0.04 以内。研究结果有助于提高弯头扰流条件下超声流量计在线校准的准确性。

关键词: 超声流量计;在线校准;扰流;数值模拟

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Research on the install position of on-line calibration ultrasonic flowmeter downstream of an elbow

Zhang Dongfei¹ Geng Cunjie¹ Li Guozhan² Zhang Hongjun²

(1. Suzhou Institute of Metrology, Suzhou 215128, China; 2. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to reduce the interference of the on-line calibration of the ultrasonic flowmeter by the on-site spoiler, the large eddy simulation method is used to study the influence of the installation position along the flow direction and circumferential direction on the measurement accuracy when there is a 90° elbow upstream of the ultrasonic flowmeter, so as to obtain the best installation position of the ultrasonic flowmeter. The results show that the elbow causes the downstream flow pattern distortion. The farther the ultrasonic flowmeter is from the elbow, the lower its sensitivity to the circumferential installation angle, and the maximum error of the correction coefficient decreases from 0.11 to 0.03. The correction coefficient fluctuates with the change of the circumferential installation angle, and the higher the flow velocity in the pipe, the smaller the amplitude of the correction coefficient fluctuation, and the maximum fluctuation amplitude is reduced by 20.5%. In addition, when the circumferential installation angle is 0° and 180°, the sensitivity of the flowmeter to the installation position is lower, the correction coefficient is closer to 1.0, and the maximum error is within 0.04. The results are beneficial to improve the on-line calibration accuracy of the ultrasonic flowmeter under complicated flow conditions caused by the on-site spoiler.

Keywords: ultrasonic flowmeter; on-line calibration; disturbed flow; numerical simulation

0 引言

大口径流量计广泛应用于石油化工、污水处理和天然气贸易等领域的在线监测系统,其安装后一般无备用管路和不易拆卸送检,因此大多采用便携式超声流量计进行在线校准以提高计量准确性和经济效益^[1-2]。

作为速度式流量仪表,超声流量计的精度易受管内流

动状态的影响,充分发展湍流是其理想测量条件^[3]。然而,实际现场校准时因检测空间和工艺流程的限制计量管上游往往存在弯头和阀门等扰流元件,致使被测流体以畸变流动状态进入流量计,导致超声流量计的计量精度准确性下降^[4-5]。近年来,学者们采用理论分析、实验和数值模拟等手段对如何提高扰流条件下超声流量计的计量准确性进行了大量研究。韩思奇等^[6]采用雷诺平均方法研究了组合双

收稿日期:2021-09-03

* 基金项目:国家自然科学基金青年项目(12002335)、浙江省自然科学基金探索项目(LQ20E060006)资助

弯管及收缩管对双声道超声流量计的影响规律,发现最佳安装角为 45° 和最优声道距管道截面中心 0.225 倍管径。陈利琼等^[7]也采用数值模拟方法研究了弯头对超声流量计性能的影响,发现弯头弯曲角度越大、曲率半径越小,对流量计的干扰越强。吴波等^[8]则实验研究了闸阀对外夹式与插入式超声流量计性能的影响,指出多声道布置能显著提高插入式流量计的抗扰流性能。贾惠片等^[9-10]研究了流体流速对超声波偏移的影响规律,提出了利用折射角正切值与超声波传播时间的关系曲线对测量结果进行校准,以提高超声流量计的计量精度,后来进一步针对难于穿透的复合管道设计了超声流量计的收发电路。李冬等^[11-12]采用声-固耦合方法研究了超声波流量计的发射装置,建议将不锈钢作为反射装置的材料,之后进一步研究了发射柱结构参数对水流特性的影响,提出了加装导流片改善反射柱周围流场的均匀性。张亮等^[13]则实验研究了探头安装位置对斜插式超声流量计性能的影响,并给出部分修正公式。杨瑞峰等^[14]从超声波的渡越时间出发,应用互相关算法降低计算时间误差,从而提高计量精度。综上所述,学者们从声道布置、电路设计、探头结构和算法等方面提出了超声流量计的改进措施,有效提高了超声流量计的计量精度和拓宽了其使用范围。随着工业界对流量计准确性要求的不断提高,实际现场条件下超声流量计在线校准日益重要,但现场复杂扰流元件对超声流量计在线校准具有显著干扰,而且相关研究相对较少。

鉴于此,本文从实际在线校准现场出发,以单反射式超声流量计为对象,采用高精度的大涡模拟方法研究 90° 弯头扰流工况下超声流量计沿管道流向和周向安装位置对其计量性能的影响规律,结合修正系数探索流量计沿流向和周向的最佳安装位置,从而为优化超声流量计在线校准方法和提高计量精度提供理论依据。

1 超声流量计工作原理

图1所示为单反射式超声流量计的工作原理,其利用超声波在流动流体中顺向和逆向传播的声速差与流体速度的关系来计算流体流量^[15-17]。

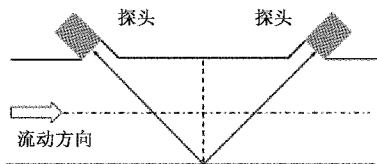


图1 单反射式超声流量计工作原理

2 物理模型与边界条件

如图2(a)所示,以曲率半径为 $1.0d$ 的 90° 弯头作为研究对象,分别建立管道内径 $d=1\ 000\text{ mm}$ 的计量管,弯头上游直管段长度为 $5.0d$ 以避免进口边界条件对数值模拟的影响,弯头下游直管段长度为 $20.0d$ 以避免出口边界对

数值模拟的影响。超声流量计沿流向分别安装在 $1.0d\sim 5.0d$ 位置处,以研究流向安装位置对其计量性能的影响。超声流量计绕管道轴线每隔 45° 进行转动,共8个周向安装角 β ,其中声道位于 $x-z$ 平面内时周向安装角 $\beta=0^\circ$,以研究周向安装角 β 对超声流量计计量性能的影响。

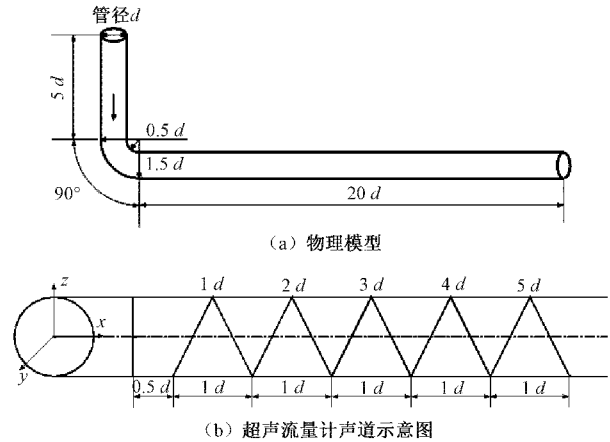


图2 物理模型与超声流量计声道示意图

采用ANSYS ICEM CFD软件对物理模型进行结构化网格划分,而且对管道壁面附近以及弯头进行网格加密处理,网格数量约为300万。基于ANSYS Fluent软件,采用大涡模拟方法对计量管内的流场进行仿真计算,流体介质为液态水,计量管入口边界为充分发展湍流条件,管道横截面平均速度 u_0 分别为 $0.5、1.0、1.5$ 和 2.0 m/s ,计量管出口边界为压力出口条件,静压为环境大气压。亚格子模型选择WALE模型,压力-速度耦合选择Simple方法,动量项选择中心差分格式,时间项选择二阶隐式格式,时间步长设为 $1.0\times 10^{-4}\text{ s}\sim 4.0\times 10^{-4}\text{ s}$,待流场达到准稳态后进行统计平均以获得更为丰富的流场信息。

为验证本文所用大涡模拟方法的准确性,图3所示为某多孔孔板流量计的实验数据与大涡模拟结果的对比曲线。由图3可知,定流量工况下,多孔孔板流量计的差压随着流量的增加而迅速增大,而且大涡模拟结果与实验数据吻合较好,由此可知本文所用大涡模拟方法能较好地预测管道内的湍流流动。需要注意的是,虽然多孔孔板流量计

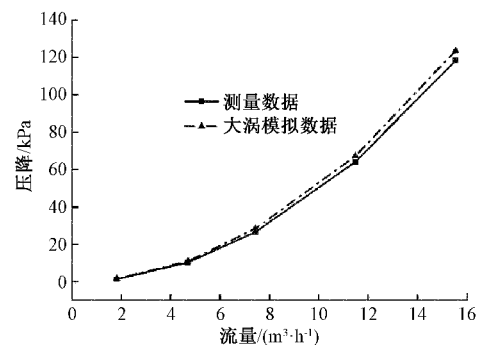


图3 定流量工况下多孔孔板流量计的差压

物理模型与本文 90°弯头模型有所不同,但在一定程度上也能证明本文对 90°弯管湍流流动的大涡模拟结果是准确的。

3 结果与讨论

3.1 流向安装位置对超声流量计性能的影响

本节在管道入口平均速度 $u_0 = 1.0 \text{ m/s}$ 条件下,研究超声流量计沿流向安装位置对其计量性能的影响。

图 4 所示为弯头下游管道纵截面上的瞬时流向速度云图。由图 4 可知,流体进入弯头时因受离心力的作用产生涡流,导致流体高速区严重偏离管道中心,且此涡流向下游传播较远的距离,可见距弯头较远下游管道内依然存在离散的高速区。此外,虽然管道 $x-z$ 截面内流向速度沿流向存在无序的高速区,但流向速度整体上关于管道轴线对称分布。

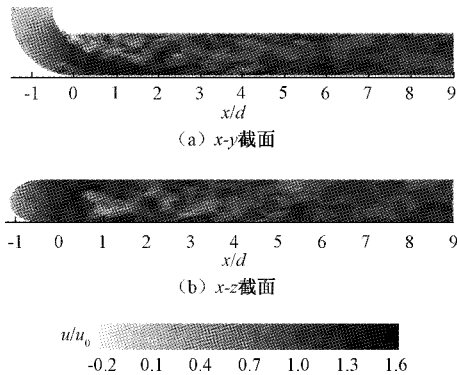
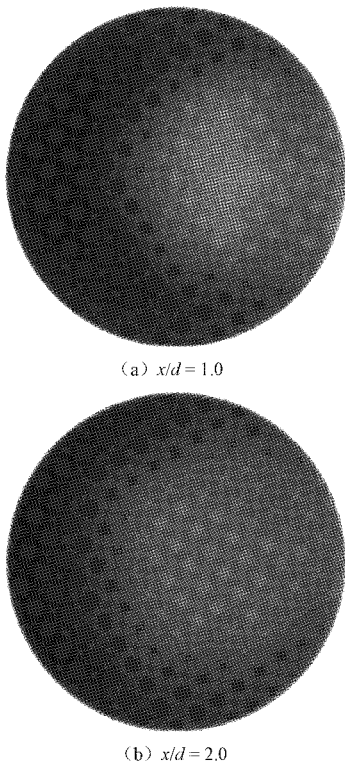


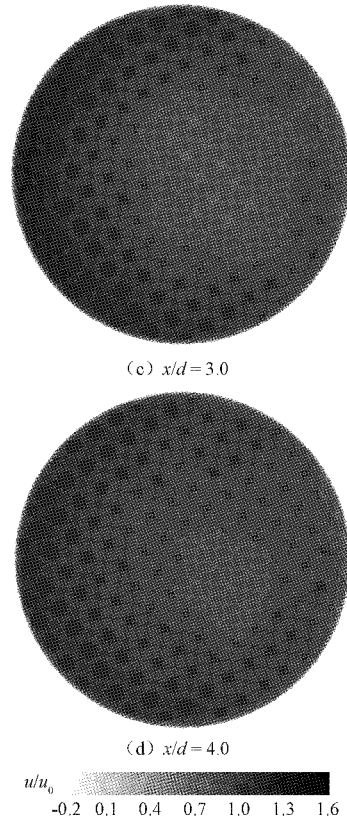
图 4 弯头下游管道内的瞬时流向速度云图

图 5 所示为弯头下游不同流向位置处横截面上的时均流向速度云图。由图 5 可知,流体流经弯头后向管道外侧



(a) $x/d = 1.0$

(b) $x/d = 2.0$



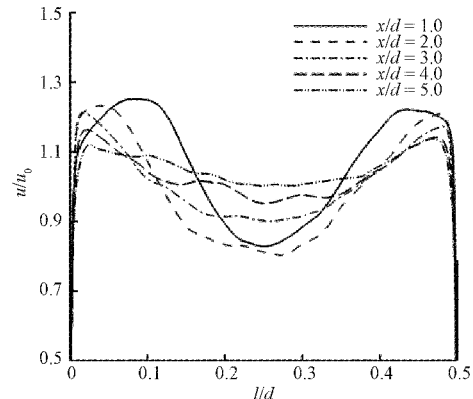
(c) $x/d = 3.0$

(d) $x/d = 4.0$

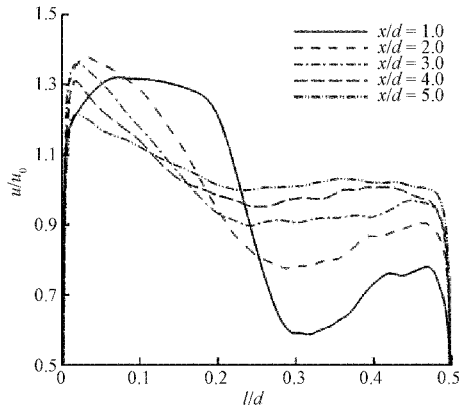
图 5 弯头下游横截面上的时均流向速度云图

汇聚形成高速区,而管道内侧则形成低速区,导致管道内流体发生严重流态畸变,从而干扰超声流量计的计量性能。沿流向发展,高速区的范围逐渐缩小且流向速度减小,使得横截面上的流速分布趋于均匀即趋于充分发展状态。

图 6 所示为弯头下游不同流向位置处超声流量计声道上的速度分布对比。由图 6 可知,随着流向位置的增大,超声流量计声道上速度分布的均匀性逐渐增强,即管道内流态畸变逐渐得到缓解,从而减少了对超声流量计的干扰。此外, $\beta = 90^\circ$ 时超声流量计声道上速度分布的畸变程度明显高于 $\beta = 0^\circ$ 。



(a) 周向安装角 $\beta = 0^\circ$



(b) 周向安装角 $\beta=90^\circ$

图 6 弯头下游不同流向位置处声道上的流向速度分布

图 7 所示为修正系数 K 随超声流量计流向位置的变化趋势,修正系数 K 为声道线平均速度与管道横截面平均速度的比值。由图 7 可知,除周向安装角 β 为 0° 和 180° 外,修正系数 K 随着超声流量计流向安装位置的增大而显著增大,表明超声流量计流向安装位置较为敏感。此外,随着超声流量计流向安装位置的增大,不同周向安装角条件下修正系数 K 间的差值逐渐减小即最大差值由 0.11 逐渐减小至 0.03,表明超声流量计安装位置距弯头越远,其计量性能对周向安装角的敏感度越低。由此可知,本文所得研究结果可指导工作人员根据实际校准现场情况选择超声流量计的最佳流向安装位置,从而最大限度地减少现场弯头对超声流量计的干扰。

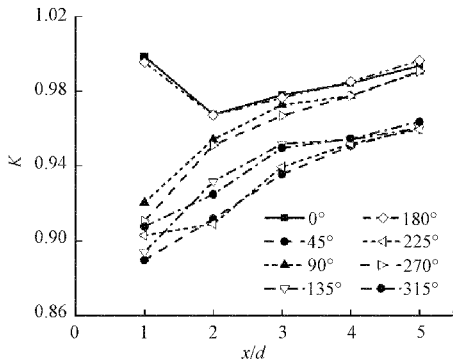
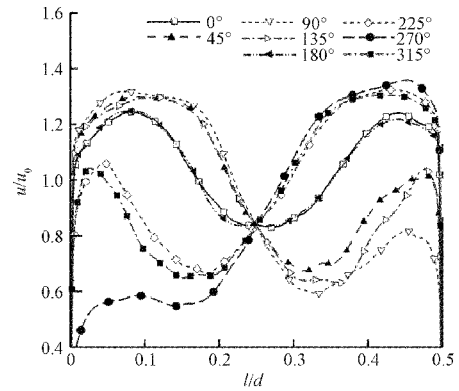


图 7 修正系数 K 随声道流向位置变化趋势

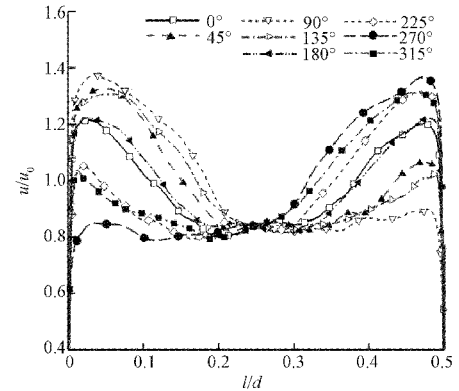
3.2 周向安装角对超声流量计性能的影响

本节研究不同流向位置处超声流量计沿周向安装位置对其计量性能的影响。

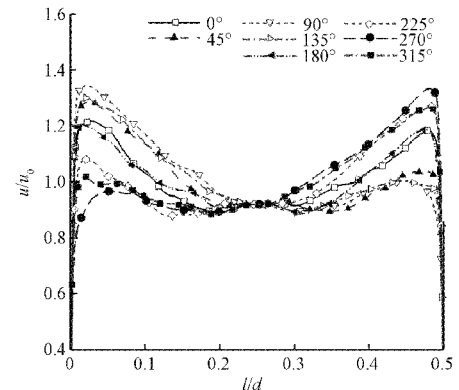
图 8 所示为不同周向安装角时超声流量计声道上的时均流向速度分布。从图 8 中可以看出,由于流体流经弯头后发生严重流态畸变,可见 $x/d=1.0$ 处声道上的流速分布极其不均,且周向安装角 $\beta=45^\circ, 90^\circ$ 与 135° 声道上的速度和 $\beta=225^\circ, 270^\circ$ 与 315° 声道上的速度呈反对称分布,而周向安装角 $\beta=0^\circ$ 和 180° 声道上的速度呈对称分布。沿着流向发展,超声流量计声道上的速度依然关于周向安装角呈对



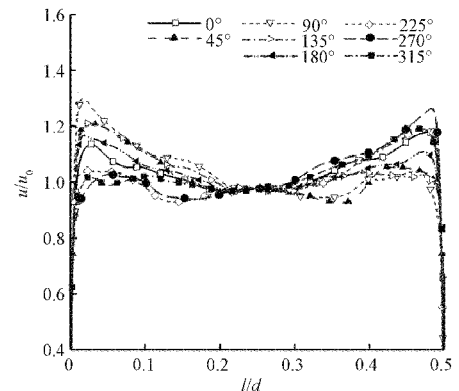
(a) 流向位置 $x/d=1.0$



(b) 流向位置 $x/d=2.0$



(c) 流向位置 $x/d=3.0$



(d) 流向位置 $x/d=4.0$

图 8 不同周向安装角时声道上的时均速度分布 ($u_0=1.0$ m/s)

称与反对称分布,但其分布的均匀性逐渐升高。 $x/d=4.0$ 处超声流量计声道上的速度分布较为均匀,尤其是周向安装角 $\beta=0^\circ$ 和 180° 。由此可知,周向安装角为 0° 和 180° 能够在一定程度上减少弯管引起的流态畸变对超声流量计计量性能的干扰。

图 9 所示为修正系数 K 随超声流量计周向安装角 β 的变化趋势。由图 9 可知,在 $x/d=1.0$ 处修正系数 K 随周向安装角 β 剧烈变化即超声流量计对周向安装位置较为敏感,但流向距离逐渐增大,修正系数 K 随周向安装角 β 的波动幅值逐渐减小。此外,随着管道内流向速度的增加,修正系数 K 逐渐趋于 1.0,而且修正系数 K 随周向安装角 β 的波动幅值减小,最大波动误差由 0.118 57 降至 0.094 28,减少了 20.5%,即管道内流向速度越大,超声流量计对周向安装位置的敏感度越低。此外,周向安装角 β 为 0° 和 180° 时修正系数最接近于 1.0,而且稳定性较好,最大误差均在 0.04 以内,即超声流量计计量准确性较高。由此可知,本文所得研究结果可以帮助工作人员根据校准现场情况选择超声流量计的最佳周向安装位置,从而减少弯头对超声流量计的不利影响。

综上所述,与以往超声流量计的改进措施^[9-14]相比,本文从实际校准现场出发,研究了现场扰流弯头对超声流量计的影响规律,所得成果可在不增加任何辅助装置和成本的情况下,指导工作人员根据实际现场情况优化超声流量计在线校准安装方法以提高计量的准确性。

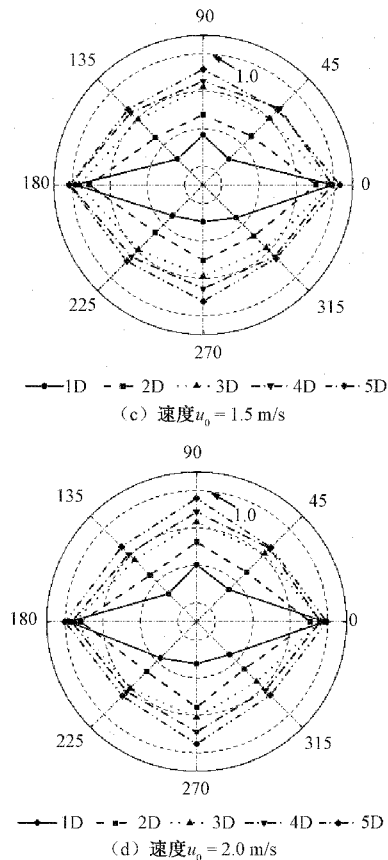
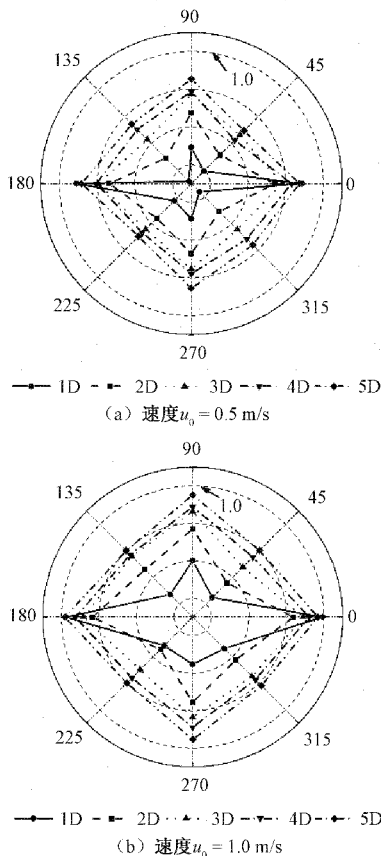


图 9 修正系数 K 随周向安装角 β 的变化趋势

4 结 论

本文采用大涡模拟方法研究了 90° 弯头下游单反射式超声流量计内部流场的演化机制,量化分析了流量计沿流向和周向安装位置对其计量精度的影响,以减少现场弯头对流量计在线校准的干扰。初步发现 90° 弯头下游管内流体发生流态畸变,导致声道上的流速分布不均,从而修正系数随着流向安装位置的增大而波动,但随着流向安装位置的增大,不同周向安装角时修正系数间的差值随之减小。此外,修正系数也随着周向安装角的变化而显著波动,而且管道内流速增大,修正系数随之增大且对周向安装角的敏感度下降。研究结果对于在线校准超声流量计的现场安装具有一定的指导作用,后续将进一步研究空间双弯头、三通和阀门等扰流件对超声流量计的影响,为优化超声流量计在线校准方法提供更为全面的科学依据。

参 考 文 献

- [1] 周文辉. 废水监测用流量计在线检测中存在的问题及解决方法[J]. 计量技术, 2020, 2: 69-71.
- [2] 张强. 超声流量计在线校准方法探讨[J]. 中国计量, 2021, 3: 117-118.
- [3] 陈红, 聂西利, 丁渊明. 超声波流量计整流器设计及验证[J]. 自动化仪表, 2018, 39(7): 91-93.

- [4] 李宁, 向德华, 周艳, 等. 污水排放大口径流量计现场检测技术的研究[J]. 计量科学技术, 2020, 6: 8-11.
- [5] 郑丹丹, 王蜜, 孙彦招. 速度分布对气体超声流量计声传播规律的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(11): 1169-1175.
- [6] 韩思奇, 邵欣, 檀盼龙, 等. 基于 FLUENT 下双声道超声波流量计最优声道研究[J]. 中国测试, 2018, 44(8): 140-146.
- [7] 陈利琼, 谢虹雅, 孙靖云, 等. 基于 CFD 的气体超声流量计计量准确性研究[J]. 中国测试, 2019, 45(7): 87-91.
- [8] 吴波, 李晶晶, 李晓鹏 等. 阀门扰流条件下外夹式与插入式多声道超声流量计性能对比[J]. 计量科学与技术, 2020, 8: 34-39.
- [9] 贾惠芹, 王成云, 张铁煜, 等. 非接触式超声波流量计收发电路的设计与性能分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 123-132.
- [10] 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.
- [11] 李冬, 苑修乐, 杜广生, 等. 超声波流量计中反射装置的声-固耦合分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1945-1952.
- [12] 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.
- [13] 张亮, 孟涛, 王池, 等. 斜插式超声流量计探头插入深度影响实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(10): 2307-2314.
- [14] 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.
- [15] 任晓晔, 陈晓, 郭妍. 超声波测风换能器对风速的影响研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(7): 118-124.
- [16] 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.
- [17] 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.

作者简介

张东飞, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为流量计量。

E-mail: zhangdf@szjl.com.cn

耿存杰, 硕士, 工程师, 主要研究方向为流量计量。

E-mail: gengcj@szjl.com.cn

李国占(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为流量计量和计算流体力学。

E-mail: liguoquan@cjlu.edu.cn

张洪军, 博士, 教授, 主要研究方向为流量计量。

E-mail: zhanghongjun@cjlu.edu.cn