

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104056

新型水大流量标准装置及换向性能评价技术研究^{*}

钱碧波¹ 万 勇¹ 吴 波^{1,2} 谢代梁³

(1. 广州能源检测研究院 广州 511447; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029;
3. 中国计量大学浙江省流量计量技术重点实验室 杭州 310018)

摘 要:水大流量标准装置是开展大口径流量仪表测试、确保大流量量值溯源与传递准确可靠的核心设备,换向器是影响其测量结果准确性与可靠性最关键的部件。针对现有水大流量装置存在稳定性难以保证、换向误差较大、被检仪表尺寸适应性差以及测试效率较低等诸多局限,设计并研制了一套高准确度、高流速大口径水流量标准装置及新型换向系统,装置集静态质量法、容积法和标准表法 3 种原理于一身,其最大测试管径为 DN1000、最大运行流量 10 000 m³/h、局部最高流速可达 10 m/s,整体不确定度优于 0.2% ($k=2$);分析了静态质量法水装置换向过程中液体流量的变化特征,建立了换向流量误差与计时误差关系模型,据此开展了对新型单向换向器的不确定度评价实验测试,结果表明,计时不确定度优于 8.83×10^{-6} 、测量时间总不确定度优于 9.24×10^{-6} ,量级均十分微小,该换向装置性能出色。

关键词:水大流量标准装置;新型换向系统;换向误差模型;性能评价;不确定度评定

中图分类号: TB937; TN05 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on a new type of large water flow standard facility and the performance evaluation technology of diverter

Qian Bibo¹ Wan Yong¹ Wu Bo^{1,2} Xie Dailiang³

(1. Guangzhou Institute of Energy Testing, Guangzhou 511447, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;
3. Key Laboratory of Flow Measurement Technology of Zhejiang Province, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The large water flow standard facility is the core device for carrying out large pipe diameter flow meter test and ensuring the accuracy and reliability of traceability and transmission of large water flow value, and the diverter is the most important component which affects the accuracy and reliability of the measurement results. Aiming at the limitations of the existing facilities for large water flow, such as difficult stability assurance, large reversing error, poor dimensional adaptability of the tested instrument and low test efficiency, a set of large diameter water flow standard facility with high accuracy, high velocity and a new reversing system were designed and developed. The facility has three principles of static mass method, volume method and standard meter method at the same time, and the maximum test pipe diameter is DN1000, the maximum operating flow rate is 10 000 m³/h, the local maximum flow velocity can reach 10 m/s, the overall uncertainty is better than 0.2% ($k=2$). The law of liquid quality change during the reversing process in the static mass method large flow standard facility was analyzed, and the relation model between reverse flow error and timing error is established, and finally the uncertainty evaluation test of this new type of diverter was carried out, the results show that the timing uncertainty is better than 8.83×10^{-6} and the total uncertainty of measurement time is better than 9.24×10^{-6} , and the magnitude is very small, so the performance of the diverter is excellent.

Keywords: large water flow standard facility; new reversing system; reversal error model; performance evaluation; uncertainty assessment

0 引言

社会经济的发展离不开各种大口径液体流量计的使用与支撑。近年来随着我国工农业生产、水利水电、航空航天、环境保护等各项事业的快速推进,用于贸易结算的大口径、大流量仪表数量逐年增加,水大流量计量需求巨大^[1-3]。

水大流量标准装置主要用来负责大口径流量器具的检定或校准工作,对大流量计量与测试技术的发展具有相当重要的促进作用^[4-6],一直以来备受重视。当前世界各主要发达国家都建立有相应的水大流量标准装置^[7]。由于测量范围宽、流量大,现有水大流量装置普遍存在着稳定性难以保证、换向误差较大、被检仪表尺寸适应性差以及测试效率较低等诸多问题,这些技术难题又反过来对水大流量装置的设计与建造工艺形成了制约^[8-9];特别是高精度换向器研制及性能评价技术的缺乏导致国内许多大流量装置的宣称不确定度过高,贸易结算领域相关的资源浪费及计量纠纷时有发生,严重影响了装置的实际使用效果。

目前针对大流量装置或大口径换向器的研究多集中在测量误差、重复性和不确定度等技术指标领域,鲜有研究人员对换向流量误差产生原理及其动态变化特性进行深入探讨^[10-11]。为进一步完善和提升国内装置对于水大流量的测量能力,设计并实现了一套高准确度、高流速大口径水流量标准装置及适合该装置的新型换向系统,并建立了一套完整的换向器性能评价方法,开展了相应验证实验。

1 换向流量误差模型

水大流量标准装置是由许多配套零部件及设备组成的大型复杂机械装备,而换向器是影响其测量结果准确性与可靠性最为关键的部件^[12-13]。通常换向器在工作过程中会产生分流误差,其中除了其组成结构与工作原理之外,管路流场特性、换向重复性精度及计时仪器误差也是影响换向器性能的重要因素^[14-15]。但换向流量误差一般难以通过实验测量直接获得,目前普遍采用的方法是 ISO4185^[16]提供的利用计时器计时误差指标来间接确定。

为准确评估换向系统的换向性能,进而衡量装置整体测量水平,以静态质量法水流量装置为例,其结构示意图如图 1 所示、装置测量过程中称重容器所载流体的瞬时质量流量变化趋势如图 2 所示。

其中, $t_{D1start}$ 、 t_{D1stop} 分别表示换入开始与换入结束时刻, $t_{D0start}$ 、 t_{D0stop} 分别表示换出开始与换出结束时刻;

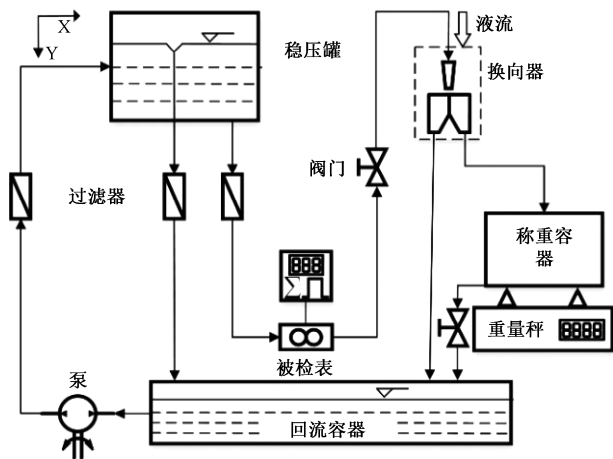


图 1 静态质量法水大流量标准装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of static mass method water large flow standard facility

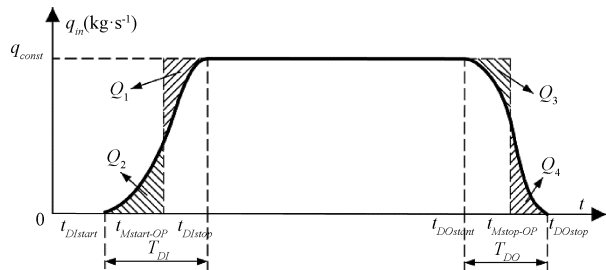


图 2 称重容器中流体瞬时质量流量变化趋势

Fig. 2 The trend chart of instantaneous mass flow of fluid in the weighing container

t_{Mstart} 、 t_{Mstop} 分别表示计时开始与计时停止时刻; T_{DI} 、 T_{DO} 分别表示换入、换出过程所需时间; q_{in} 表示任意时刻 t 称重容器中流体的瞬时质量流量, q_{const} 表示换向过程稳定状态下流体的瞬时质量流量。据此可以得到,测量过程称重容器所载液体质量为 $Q_{MWT} = \int_{t_{D1start}}^{t_{D0stop}} q_{in} dt$ 、累计计时液体质量为 $Q_{MC} = q_{in}(t_{Mstop} - t_{Mstart})$, 故换向流量误差可表示为 $Q_{ME} = Q_{MWT} - Q_{MC} = Q_2 - Q_1 + Q_4 - Q_3$ 。

若将图 1 所示质量法装置中的被检表替换为标准表,并将换向器视为检定对象,那么一次标准测量过程中称重容器所载液体质量流量变化情况如图 3 所示。

其中,令 $t_{Mstart-OP}$ 、 $t_{Mstop-OP}$ 分别表示使 Q_{ME} 取最小值时的最优计时启停时刻, t'_{Mstart} 、 t'_{Mstop} 分别表示实际计时启停时刻,则理想计时时间 $t_{ideal} = t_{Mstop-OP} - t_{Mstart-OP}$ 、实际计时时间 $t_1 = t'_{Mstop} - t'_{Mstart}$, 将 t_1 沿 x 轴平移使得 $t_{Mstart} = t'_{Mstart}$ 并引入计时误差 $\Delta t = t_{ideal} - t_1$; q_1 、 q_{1C} 、 Δq_1 分别为一次标准测量过程中管路实际瞬时质量流量、用以校准被检表瞬时质量流量与瞬时换向流量误差, m_1 、 m_{1C} 、 Δm_1 分别为一次标准测量过程称重容器实际所载液体质量、

2.4 管路系统

装置测试管径范围为 DN2~DN1000, 其中小口径或小流量采用静态质量法工作原理, 扩展不确定度优于 0.03% ($k=2$); 大流量则应用静态容积法与标准表法, 扩展不确定度分别优于 0.05% ($k=2$) 和 0.2% ($k=2$)。管路整体示意图如图 5 所示。



图 5 测试管路示意图

Fig. 5 Diagram of test pipeline

2.5 控制系统

装置控制系统主要包括变频器、计时器、流量调节阀、PLC 控制器、工控机及控制软件等, 可自动完成信号

采集、数据处理、生成并打印检测报告等内容, 有效提升了装置的智能化控制水平; 为提升装置流量稳定性, 水泵均采用稳压罐+变频调速方式、管道流量则通过各种调节阀进行控制^[17-18]。

3 装置技术指标与创新点

3.1 技术参数

装置严格依据相关检定规程设计, 具有流量测量范围宽、可检口径大、流速高、稳定性强等特点, 自动化与智能化水平较高, 部分核心技术指标如下。

1) 工作介质, 洁净水, 水源压力 0.5~0.6 MPa。

2) 检定原理, 静态质量法(小流量)、静态容积法+标准表法(中大流量)。

3) 测试管路: 管径范围 DN2~DN1000、流量范围 0.005~10 000 m³/h、局部最高流速达 10 m/s, 整体扩展不确定度优于 0.2% ($k=2$)、稳定性优于 0.1%。

4) 标准器组, 质量法电子秤规格范围为 3~15 000 kg, 准确度均优于 1/30 000; 容积法标准量器规格有 10、20、50、100 m³, 准确度优于 0.025%; 标准表法则选用若干台准确度为 0.2 级的电磁流量计, 口径规格覆盖 DN2.5~DN800。

装置整体结构示意图如图 6 所示。

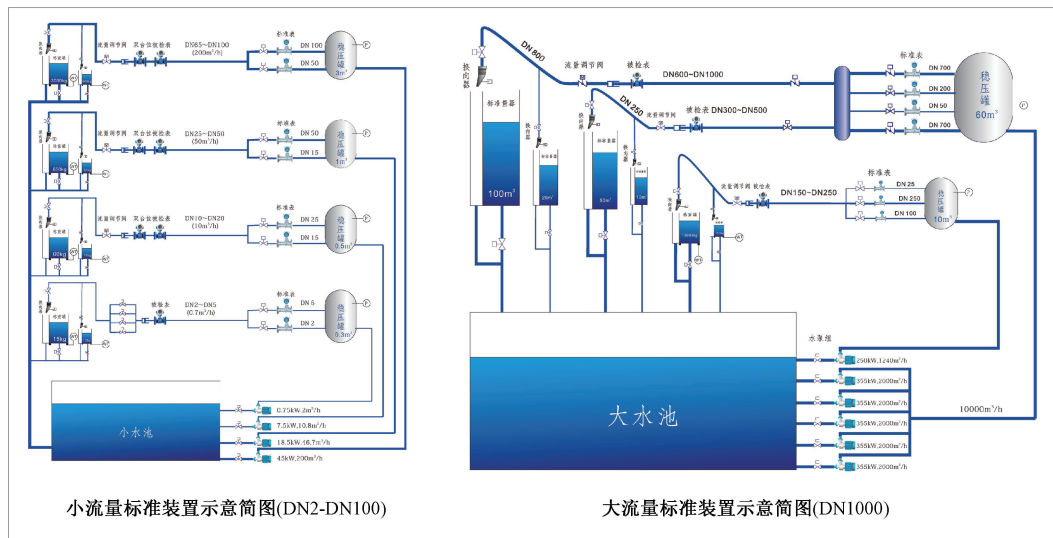


图 6 DN2~DN1000 水大流量标准装置结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of DN2 ~ DN1000 Large water flow standard facility

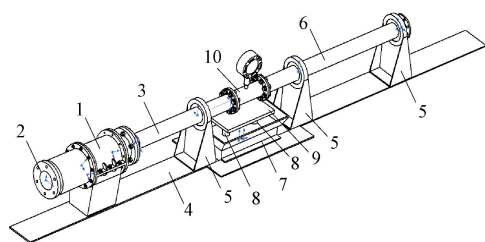
3.2 技术创新点

装置在建立过程中, 主要形成了如下 3 点技术创新内容。

1) 设计出一套高兼容性检测平台, 主要由管道运动调节机构、管道固定引导机构和升降机构组成, 可实现装置在被检流量计口径、长度、深度 3 个维度的宽范围可变, 从而简化了仪表拆装流程并提升了检定工作效率, 该

检测平台示意图如图 7 所示。

2) 设计了一种新型单向换向系统, 即喷嘴在工作状态下移动方向始终保持一致, 因而有效降低了对管路流场的影响, 并将换向引入的不确定度分量降低至 0.01% 以下, 非常适合在宽流量条件下的连续、多个换向过程。该新型换向器结构示意图如图 8 所示, 主要由一个固定喷嘴与 3 个可移动分流器组成, 结构紧凑、鲁棒性好, 其



1-运动驱动部件;2-活塞管;3-变管;4-导轨;5-管道支架;

6-直管;7-升降驱动部件;8-导管;9-托盘

图 7 高兼容性流量计检测平台结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of high compatibility flow meter test platform

中分流器 A 左出口 1 和右出口 2 分别连接分流器 B 和 C,分流器 B 左出口 1'、分流器 C 左出口 1''和分流器 B 右出口 2'、分流器 C 右出口 2''则分别下接回流容器与称重容器。

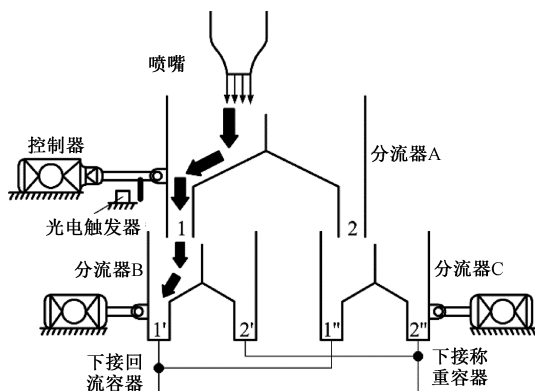


图 8 新型单向换向器结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of a new one-way diverter

$$\left\{ \begin{aligned} u_A(\Delta t) &= \frac{1}{t_{\min}} \left(\frac{\sum_{j=1}^N (\Delta t_j - \overline{\Delta t})^2}{N(N-1)} \right)^{1/2} \\ u_B(\Delta t) &= \frac{\overline{\Delta t}}{\sqrt{3} t_{\min}} = \frac{\sum_{j=1}^N \Delta t_j}{\sqrt{3} N t_{\min}} \end{aligned} \right. , t_{\min} = \min \left\{ \min_{1 \leq j \leq N} (t_{1j}), \min_{1 \leq k \leq N} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)_k \right\} \quad (6)$$

式中: N 为实验次数; $\overline{\Delta t}$ 为连续换向 n 次时的平均计时误差; $t_{\min}$ 为最小测量时间。则由计时误差 Δt 引起的合成不确定度表达式为^[20]:

$$u(\Delta t) = \sqrt{u_A^2(\Delta t) + u_B^2(\Delta t)} \quad (7)$$

测量时间的合成不确定度可表示为^[20]:

$$u(T_M) = \sqrt{u^2(\Delta t) + u^2(\Delta t_i)} \quad (8)$$

式中: $u(\Delta t_i)$ 为计时器本身的不确定度。

设计并开展不同流量点条件下的换向器不确定度测

工作原理如下:水流自喷嘴分别经分流器 A 左出口 1、分流器 B 左出口 1'流至回流罐;依次启动气缸 C、气缸 A,计时器启动计时,液流经分流器 A 右出口 2、分流器 C 右出口 2''从回流罐被切换至称重罐,此为换入过程;依次启动气缸 B、气缸 A,再次启动气缸 C、气缸 A,计时器停止计时,液流路径再次改变,并由称重罐切换至回流罐,此为换出过程,至此一个完整的换向检定周期结束。

3) 为进一步确保装置在大流量、高流速工况下的稳定性,设计和研制一套大口径流动调整器,结合已建立的多功能稳压容器,可将装置整体流量稳定性控制在 0.1% 以内。

该调整器的结构示意图如图 9 所示,其中管道直径 $D_{\text{pipe}} = 50 \text{ mm}$ 、调整器长度 $l = 0.45 D_{\text{pipe}} = 22.5 \text{ mm}$ 、栅格宽度为 $d_{\text{grid}} = 0.075 D_{\text{pipe}} = 3.75 \text{ mm}$ 。

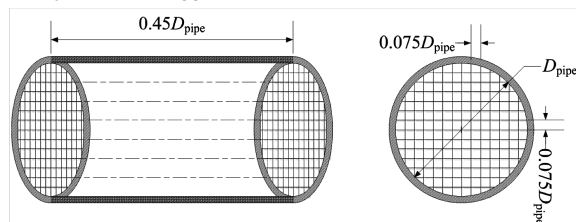


图 9 流动调整器结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the flow regulator

4 换向系统不确定度评定实验

针对所研制的新型单向换向器开展不确定度评定,其中关于 Δt 的 A 类标准不确定度与 B 类标准不确定度可分别被表示为^[19]:

试实验,实验在广州能源检测研究院液体流量实验室进行。为确保实验效果,设置其水平移动速度为 0.1 m/s,每次实验均重复 3 次测量过程,计时器本身的不确定度 $u(\Delta t_i) = 2.71 \times 10^{-6}$,具体实验及计算结果如表 1 所示。

根据表 1 数据可知,计时误差不确定度 $u(\Delta t)$ 在 $4.54 \times 10^{-6} \sim 8.83 \times 10^{-6}$ 、测量时间总不确定度 $u(T_M)$ 被控制在 $5.29 \times 10^{-6} \sim 9.24 \times 10^{-6}$,与计时器本身不确定度值属于同一量级,基本可忽略,故可知研制的新型单向换向装置工作误差较小、性能优良。

表 1 换向装置性能评价测试实验结果

Table 1 Performance evaluation test results of the diverter

$q/(L \cdot \min^{-1})$	$\Delta t/s$	$t_{\min}/s$	$u_A(\Delta t)$	$u_B(\Delta t)$	$u(\Delta t)$	$u(T_M)$
200	2.34×10^{-4}	60.000 8	3.95×10^{-6}	2.25×10^{-6}	4.54×10^{-6}	5.29×10^{-6}
400	1.18×10^{-4}	60.001 87	4.73×10^{-6}	1.14×10^{-6}	4.86×10^{-6}	5.57×10^{-6}
600	1.21×10^{-4}	59.996 4	5.96×10^{-6}	1.16×10^{-6}	6.07×10^{-6}	6.64×10^{-6}
800	6.3×10^{-5}	59.998 24	6.32×10^{-6}	6.1×10^{-7}	6.34×10^{-6}	6.7×10^{-6}
1000	3.5×10^{-5}	59.998 15	7.08×10^{-6}	3.4×10^{-7}	7.09×10^{-6}	7.59×10^{-6}
1200	-4.8×10^{-5}	60.003 24	6.47×10^{-6}	-4.6×10^{-7}	6.48×10^{-6}	7.03×10^{-6}
1400	-1.24×10^{-4}	59.997 85	7.29×10^{-6}	-1.19×10^{-6}	7.39×10^{-6}	7.87×10^{-6}
1600	2.42×10^{-4}	60.004 71	6.74×10^{-6}	2.33×10^{-6}	7.13×10^{-6}	7.62×10^{-6}
1800	1.68×10^{-4}	60.001 79	7.95×10^{-6}	1.62×10^{-6}	8.11×10^{-6}	8.55×10^{-6}
2000	-3.94×10^{-4}	59.998 39	7.98×10^{-6}	-3.79×10^{-6}	8.83×10^{-6}	9.24×10^{-6}
2200	-2.01×10^{-4}	59.998 03	7.56×10^{-6}	-1.93×10^{-6}	7.79×10^{-6}	8.25×10^{-6}

5 结 论

为解决目前国内外普遍的换向器性能评估与溯源难题,提升水大流量装置测量能力,设计并研制了一套高精度、高流速大口径水流量标准装置及适合该装置的新型换向系统,搭建了实流测试平台,并对换向器的性能进行了较为全面的评价工作。

1)以静态质量法水装置为例,探究了装置使用中称重容器所载液体质量流量的变化特性,建立了换向流量误差模型,为开展换向装置性能评价工作提供了理论基础。

2)研制的水大流量标准装置具有静态质量法、容积法、标准表法 3 种工作原理,可检管径范围 DN2 ~ DN1000、流量范围 0.005~10 000 m³/h、整体不确定度优于 0.2%($k=2$);采用了高流速及稳流设计技术,最高局部流速达 10 m/s,流动稳定性优于 0.1%。

3)设计并开发一种新型单向换向系统,开展了相应验证实验测试,其中计时不确定度优于 8.83×10^{-6} 、测量时间总不确定度优于 9.24×10^{-6} ,量级均十分微小、有效降低了换向过程对流量测量的影响,故该换向装置性能出色,值得进一步推广使用。

参考文献

[1] 朱雷,张建光,廖翠林,等. 水量计量检定和溯源技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016.

ZHU L, ZHANG J G, LIAO C L, et al. Water Flow Measurement Verification and Traceability Technology[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2016.

[2] 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.

ZHANG L, MENG T, WANG CH, et al. Probe

installation effects on the accuracy of feed thru ultrasonic flowmeters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(10): 2307-2314.

[3] 王兴国,张路鑫,尧亮富,等. 管道内流体流量的超声多普勒测量[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(10): 96-103.

WANG X G, ZHANG L X, YAO L F, et al. Measurement of pipeline flow using ultrasonic Doppler method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 96-103.

[4] 李高峰,王宏伟,陈娟,等. 水流量标准装置的设计与应用[J]. 计量技术,2017(8): 49-50.

LI G F, WANG H W, CHEN J, et al. Design and application of water flow standard facility [J]. Measurement Technique, 2017(8): 49-50.

[5] 李宝,许文达,辛龙海,等. 大口径冷热水流量标准装置的研制[J]. 工业计量,2018,28(2): 11-14.

LI B, XU W D, XIN L H, et al. Development of large diameter flow standard facility for cold and hot water[J]. Industrial Measurement, 2018, 28(2): 11-14.

[6] 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.

LI D, SUN J T, DU G SH, et al. Study on the flow characteristics of ultrasonic flowmeter with different structure parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 945-951.

[7] JAISWAL S K, YADAV S, BANDYOPADHYAY A K, et al. Global water flow measurement and calibration facilities: Review of methods and instrumentations[J]. Mapan, 2012, 27(2): 63-76.

[8] MENG T, FAN S, WANG C, et al. Influence analysis of fluctuation parameters on flow stability based on uncertainty method [J]. Review of Scientific

- Instruments, 2018, 89(5):055005.
- [9] MENG T, FAN S, WANG C, et al. A flow stability evaluation method based on flow-pressure correlation. Flow Measurement and Instrumentation[J], 2018(64): 155-163.
- [10] 于陆军,赵伟,舒心,等. 液体流量标准装置稳定性计算方法的实验研究与分析[J]. 计量技术, 2020(1): 28-31.
YU L J, ZHAO W, SHU X, et al. Experimental study and analysis of stability calculation method of liquid flow standard facility [J]. Measurement Technique, 2020(1): 28-31.
- [11] 马龙博,郑建英,赵建亮. 液体流量标准装置中开式换向器测量误差实验研究[J]. 自动化仪表, 2015(4): 60-62, 67.
MA L B, ZHENG J Y, ZHAO J L. Experimental research on the measurement error caused by open type commutator in the liquid flow calibration facilities [J]. Process Automation Instrumentation, 2015(4): 60-62, 67.
- [12] 李昊予,孟涛,樊尚春,等. 基于伺服电机的流量标准装置换向器精度的研究[J]. 测控技术, 2019, 38(1): 13-18.
LI H Y, MENG T, FAN SH CH, et al. Research on diverter of flow standard facility based on servo motor[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(1): 13-18.
- [13] 马龙博,郑建英,赵建亮. 液体流量标准装置中开式换向器测量误差模型研究[J]. 传感技术学报, 2015(4): 515-520.
MA L B, ZHENG J Y, ZHAO J L. Research on the flow measurement error model of the diverter in the liquid flow calibration facilities[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015(4): 515-520.
- [14] 王兴国,张路鑫,尧亮富,等. 管道内流体流量的超声多普勒测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 96-103.
WNAG X G, ZHANG L X, YAO L F, et al. Measurement of pipeline flow using ultrasonic Doppler method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 96-103.
- [15] 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.
LI D, SUN J T, DU G SH, et al. Study on the flow characteristics of ultrasonic flow meter with different structure parameters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 945-951.
- [16] ISO 4185. Measurement of liquid flow in closed conduits—Weighing methods[S]. 1980.
- [17] 孙梅娟,张涛,罗翼. 流量标准装置监控系统[J]. 电子测量技术, 2006(4): 141-142.
SUN M J, ZHANG T, LUO Y. Monitor and control system of flow rate standard facility [J]. Electronic Measurement Technology, 2006(4): 141-142.
- [18] 潘云飞,罗德章,刘桂雄. 换入换出不同向型换向装置换向流量误差分析[J]. 中国测试, 2015, 41(6): 18-21.
PAN Y F, LUO D ZH, LIU G X. Relative error analysis of the diverting flow volume of different-direction diverters[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(6): 18-21.
- [19] ISO/IEC GUIDE98-3. Uncertainty of measurement—Part 3: guide to the expression of uncertainty in measurement[S]. 2008.
- [20] ISO 5168. Measurement of liquid flow in closed conduits—Procedure for the evaluation of uncertainties[S]. 2005.

作者简介



钱碧波, 2013 年于湖北大学获得硕士学位, 现为广州能源检测研究院工程师, 主要研究方向为液体流量计量、在线计量检定技术、能源计量等。

E-mail: qbjy@163.com

Qian Bibo received his M. Sc. degree from Hubei University in 2013. Now he is an engineer at Guangzhou Institute of Energy Testing. His main research interests include liquid flow measurement, on-line metrological verification technology, energy measurement, etc.



吴波, 2017 年于中国石油大学(北京)获得硕士学位, 现为广州能源检测研究院工程师, 主要研究方向为超声波流量检测、水大流量装置性能优化与提升。

E-mail: 18802044280@163.com

Wu Bo received his M. Sc. degree from China University of Petroleum (Beijing) in 2017. Now he is an engineer at Guangzhou Institute of Energy Testing. His main research interests include ultrasonic flow detection, large water flow standard facility performance optimization and improvement.



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.