

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.007

超声波流量计几何尺寸检定研究*

易进平, 鲍 敏*

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对超声波流量计干标中“由于测量工具和计算方法选用不当,使得几何尺寸标定准确度下降”的问题,从测量工具和相关性的角度出发,选用内径千分尺测量了超声波流量计的声道长度、内径以及声道角,并分别计算了这3个因素的相对不确定度,最后对比了仅考虑测量重复度时计算几何尺寸总的相对误差为0.067%,考虑测量工具和相关性后总的相对误差为0.070%,得出了测量工具和测量相关性是影响几何尺寸标定准确度的重要因素。研究表明,该方法可以提高超声波流量计干标的准确度。

关键词: 超声波; 流量计; 几何尺寸检定; 标定准确度; 测量重复度; 测量工具; 测量相关性

中图分类号: TB551; TH814

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0545-04

Ultrasonic flowmeter geometric size calibration

YI Jin-ping, BAO Min

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, china)

Abstract: Aiming at this problem that the measuring tool and calculation method improper selection reduce geometric size calibration accuracy in dry calibration of ultrasonic flowmeter, the internal diameter micrometer was chosen to measure the channel length, diameter and channel angle of ultrasonic flowmeter from the angle of measuring tools and correlation. And it was calculated respectively the three factors of the relative uncertainty. Finally, it was compared with calculating relative error of 0.067% when only considering the measurement repeatability, and it's 0.070% when considering the measurement tools and correlation. So a conclusion was gotten that the measurement tools and measuring correlation were important factors affecting the geometry calibration accuracy. The results indicate that this method can improve the certainty for dry calibration.

Key words: ultrasonic; flowmeter; geometric size calibration; calibration accuracy; measurement repeatability; measuring tool; measurement correlation

0 引 言

干式标定(干标)是在无流体流动的情况下,通过对流量方程中的各个参数进行精确测量来实现流量计的标定,这些参数的测量误差直接影响到流量测量的准确度^[1]。根据贸易计量的规定,超声波流量计使用之前要经过检定或校准来确保计量单位制的统一和量值的准确、可靠。超声波流量计可动部件少,测量结果是长度和时间两个基本量的函数,其导出源的

溯源性极好,可以通过干标来确定流量计的性能^[2]。

干标在实际应用中具有其必要性,没有经过标定,并且由于用户选型的原因,导致超声波流量计在设计流量以下运行的时候,其实际的测量精度就需要探讨了^[3],测量精度误差产生的根源主要包括:几何尺寸的不确定度、时间测量的不确定、流场分布的不确定度以及温度压力等。本研究尝试从影响干标准度的其中一个影响因子—几何尺寸出发,对流量计进行几何尺寸的标定。

收稿日期: 2012-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106141)

作者简介: 易进平(1985-),男,湖北孝感人,主要从事机电控制及其自动化方面的研究. E-mail: yjp080214@yahoo.com.cn

通信联系人: 鲍 敏,男,副教授,硕士生导师. E-mail: mbao@zstu.edu.cn

在精度要求较高的流量计标定中,测量工具和测量相关性是不可忽略的因素,测量相关性是指用同一个测量工具测试两个不同量时可能产生的相互影响,从而降低几何尺寸标定的准确度。本研究在已设计的超声波流量计样机上进行流量方程的推导,分析声道长度、截面积、声道角因子对几何尺寸的影响,选用内径千分尺来测量其声道长度、内径以及声道角的尺寸。并用只考虑测量重复度(前人采用的方法)与测量工具和相关性(本研究采用的方法)两种方法计算几何尺寸标定的误差,并作对比分析。

1 流量方程推导

由于超声波会受到流体流动影响,流体流速不能简单地通过顺、逆流时间来计算。在用时差法测量过程时,声道是一条曲线^[4],表体截面图如图1所示。下面对声道路径上的平均速度 \bar{v} 进行推导。

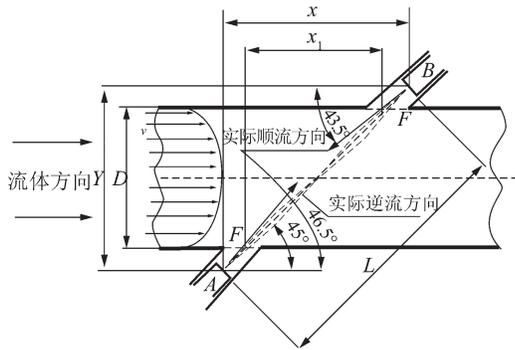


图1 表体截面图

超声波从A点沿 φ_1 方向运动至B点的时间为 t_1 , C_0 为超声波速度。沿Y轴的运行路程为:

$$Y = C_0 \sin \varphi_1 t_1 \quad (1)$$

设超声波在AE和BF段的时间为 τ , 则沿X轴的方向有:

$$\begin{aligned} X &= \int_0^{t_1} v dt = \int_0^{t_1} (c_0 \cos \varphi_1 + v_{\text{流速}}) dt = \\ &c_0 t_1 \cos \varphi_1 + \int_0^{t_1} v_{\text{流体}} dt = \\ &c_0 t_1 \cos \varphi_1 + \int_0^{t_1 - \tau} v_{\text{流体}} dt = \\ &c_0 t_1 \cos \varphi_1 + \int_E^F \frac{v_{\text{流体}}}{c_0 \sin \varphi_1} dD = \\ &= c_0 t_1 \cos \varphi_1 + \frac{\bar{v} D t_1}{Y} \end{aligned} \quad (2)$$

从图1可以看出 $X/X_1 = Y/D$, 由式(1,2)可得:

$$c_0 \cos \varphi_1 = \frac{X}{t_1} - \frac{\bar{v} X_1}{X} \quad (3)$$

由式(1,3)以及 $\cos^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_1 = 1$, 可得出:

$$c_0^2 = \left(\frac{X}{t_1} - \frac{\bar{v} X_1}{X} \right)^2 + X^2 = \frac{X^2}{t_1^2} + \frac{\bar{v}^2 X_1^2}{X^2} - 2 \frac{\bar{v} X_1}{t_1} + \frac{Y^2}{t_1^2} \quad (4)$$

$$X^2 + Y^2 = L^2 \quad (5)$$

由式(4,5)可得:

$$\frac{L}{t_1} = \left(c_0^2 - \frac{\bar{v}^2 D^2}{X} + \frac{\bar{v}^2 D^2}{L^2} \right)^{1/2} + \frac{\bar{v} D}{L} \quad (6)$$

超声波从B点运动到A点, 同理有:

$$\frac{L}{t_2} = \left(c_0^2 - \frac{\bar{v}^2 D^2}{X} + \frac{\bar{v}^2 D^2}{L^2} \right)^{1/2} - \frac{\bar{v} D}{L} \quad (7)$$

由式(6,7)得到:

$$\bar{v} = \frac{L^2(t_2 - t_1)}{2Dt_1 t_2} = \frac{Ly_e \Delta t}{2t^2} \quad (8)$$

式中: L —声道长度, Δt —时间差, $t^2 = t_1 t_2$, y_e —声道角因子。

双声道超声波流量计样机如图2所示, \bar{v} 代表两个超声波脉冲传播路径上流体线的平均速度, 通过合适的积分方式确定权重系数的大小^[5](采用 Gauss-Jacobi 公式, 由于本研究主要是几何尺寸的检定, 这里就不作推导), 从而估算整个截面的平均流速为:

$$q_v = A \sum_1^2 w_i \bar{v}_i \quad (9)$$

式中: i —声道数, w_i —不同声道的权重系数。



图2 超声波流量计样机

2 影响因素分析以及几何尺寸的标定

从式(8,9)可以看出,几何尺寸对于标不确定度的影响主要体现在截面积、声道长度、声道角因子3个因素。

2.1 截面不确定度计算

从式(9)可以看出,截面积是系统不确定度的主要来源之一,其值通过内径测量来得到,内径测量误差与管道横截面测量值误差成正比^[6]。截面的不确定度有以下几种计算方法。

2.1.1 测量方法

本研究在流量计表体靠近上游的超声传感器组、靠近下游的超声传感器组、两组超声传感器中间的3个截面从上、下、左、右4个角度用内径千分尺分别测量各个位置的内径值^[7]。

2.1.2 模型建立

截面积计算如下:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \tag{10}$$

式中:A—截面积,D—表体内径。

2.1.3 测量不确定度的来源分析

测量不确定度的来源分析如下:

- (1) 表体直径测量的重复性;
- (2) 内径千分尺的精度。

2.1.4 测量数据

内径测量数据如表1所示。

表1 内径测量数据

测量点	测量位置	测量点的值	算术平均值	标准差 $s(x)$
上1		99.986		
下2	上游的超声传	100.015	100.004	0.018
左3	传感器组位置	100.023		
右4		99.993		
上1		99.985		
下2	下游的超声传	100.028	100.012	0.019
左3	传感器组位置	100.017		
右4		100.019		
上1		99.986		
下2	中部的超声传	100.026	100.005	0.021
左3	传感器组位置	99.987		
右4		100.021		

内径测量要求是:所有测量值中测量最不理想的两个值的相对不确定度必须在0.3%以内^[8]。从上面的测量数据可以看出,测量的最大不确定度值为 $100.028-99.895/100=0.043\%$,即测量值满足要求,计算 $A=\pi D^2/4=7\ 854.8\text{ mm}^2$ 。

2.1.5 计算合成标准相对不确定度

假设千分尺不准引入的不确定度为 $u(r)$,测量值读数引入的不确定度为 $u(\text{读数})$,考虑千分尺引入误差的直径测量引入的不确定度为 $u(D)$,截面积测量标准不确定度为 $u(A)$,截面积测量总的相对标准不确定度百分比为 $\mu(A)$;不考虑千分尺引入误差的直径测量不确定度为 $u(\bar{D})$,截面积测量标准不确定度为 $u(A)$,截面积测量总的相对标准不确定度百分比为 $\mu(A)$ 。

千分尺说明书规定允许误差极限为0.01 mm,由B类评定方法,假设为均匀分布^[9],则:

$$u(r) = 0.01/\sqrt{3} = 0.005\ 8\text{ mm} \tag{11}$$

千分尺在读数过程中会有读数误差。读数误差为千分尺精度的一般误差即为0.005 mm,由B类评定方法,假设为均匀分布,则:

$$u(\text{读数}) = 0.005/\sqrt{3} = 0.002\ 9\text{ mm} \tag{12}$$

根据上面表格标准差计算结果,取其中影响最大的一个值 $s(\bar{x})=0.021$,所以有:

$$u(D) = \sqrt{0.005\ 8^2 + 0.021^2 + 0.002\ 9^2} = 0.022\text{ mm} \tag{13}$$

则合成标准不确定度为:

$$u(A) = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial D}\right)^2} u^2(D) = 3.46\text{ mm}^2 \tag{14}$$

$$u(\bar{A}) = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial D}\right)^2} u^2(\bar{D}) = 3.30\text{ mm}^2 \tag{15}$$

所以截面的相对标准不确定度为:

$$\mu(A) = \frac{3.46}{7\ 854.8} = 0.044\% \tag{16}$$

$$\mu(\bar{A}) = \frac{3.30}{7\ 854.8} = 0.042\% \tag{17}$$

从上面计算可分析出,千分尺误差对截面的相对不确定度结果有明显的误差。在实际测量过程中,仅考虑测量重复性而不考虑测量工具的误差是不完善的。

2.2 声道长度不确定度计算

声道长度 L 是传感器前端表面之间的距离,从式(8)可看出声道长度是系统不确定度的另外一个重要来源。其直接测量比较麻烦,本研究采用间接测量方法:先安装好传感器(传感器用隔膜隔开表面,以防测量过程中弄坏传感器),用内径千分尺分别测量声道截面方向 Y (由于是双声道,有 Y_1 、 Y_2)和轴向方法 X (同理有 X_1 、 X_2)的值,再用勾股定理进行计算。

2.2.1 测量方法

分别对 X_1 、 X_2 、 Y_1 、 Y_2 测量6次。

2.2.2 模型建立

模型建立如下:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{18}$$

2.2.3 测量不确定度的来源分析

测量不确定度的来源分析如下:

- (1) 轴向方向传感器前端距离的测量误差;
- (2) 截面方向传感器前端距离的测量误差;
- (3) 内径千分尺的精度;
- (4) 截面方向与轴向方向的测量相关性。

2.2.4 测量数据

测量数据值如表2所示。

表2 X 、 Y 的测量值

i	Y_1/cm	X_1/cm	Y_2/cm	X_2/cm
1	123.956	123.946	124.036	123.949
2	123.945	123.967	123.947	123.968
3	124.064	124.054	124.034	124.034
4	124.055	123.975	124.055	124.045
5	123.967	124.027	123.967	123.977
6	124.065	124.038	124.035	124.035
算术平均值/mm	124.009	124.001	124.012	124.001
标准差 $s(\bar{x})$	0.058	0.044	0.044	0.041

2.2.5 不确定度分量

设:

$$u(\bar{X}_1) = 0.044 \text{ mm}, u(\bar{Y}_1) = 0.058 \text{ mm};$$

$$u(\bar{Y}_2) = 0.044 \text{ mm}, u(\bar{X}_2) = 0.041 \text{ mm};$$

$$L_1 = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} = 175.37 \text{ mm};$$

$$L_2 = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} = 175.37 \text{ mm}。$$

同理得到:

$$\begin{cases} u(X_1) = \sqrt{0.044^2 + 0.0058^2 + 0.029^2} = 0.044 \text{ mm} \\ u(X_2) = \sqrt{0.041^2 + 0.0058^2 + 0.029^2} = 0.042 \text{ mm} \\ u(Y_1) = \sqrt{0.058^2 + 0.0058^2 + 0.029^2} = 0.058 \text{ mm} \\ u(Y_2) = \sqrt{0.044^2 + 0.0058^2 + 0.029^2} = 0.044 \text{ mm} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $u(X_1)$ 、 $u(X_2)$ — X_1 、 X_2 测量值的不确定度;
 $u(Y_1)$ 、 $u(Y_2)$ — Y_1 、 Y_2 测量值的不确定度。

2.2.6 相关系数

相关性反映的是同一个标准测量器件测量两个不同量时可能产生的相互影响,从而带来因相关附加的不确定度值^[10-11]。在测量中使用的是同一个千分尺,因此要考虑它们间的相关性,设相关系数为 $r(\bar{X}, \bar{Y})$, 则有:

$$\begin{aligned} r(\bar{X}, \bar{Y}) &= \frac{u(\bar{X}, \bar{Y})}{u(\bar{X})u(\bar{Y})} = \\ &= \frac{1}{n(n-1)} \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{u(\bar{X})u(\bar{Y})} \end{aligned} \quad (20)$$

2.2.7 测量结果和合成标准不确定度

设考虑测量相关性的声道长度标准不确定度为 $u(L)$, 相对标准不确定度比 $\mu(L)$; 不考虑测量相关性的声道长度标准不确定度为 $u'(L)$, 相对标准不确定度比 $\mu'(L)$, 可以得到:

$$\begin{aligned} u^2(L) &= \left(\frac{\partial L}{\partial Y}\right)^2 u^2(Y) + \left(\frac{\partial L}{\partial X}\right)^2 u^2(X) + 2 \frac{\partial L}{\partial X} \frac{\partial L}{\partial Y} \\ &u(X)u(Y)r(\bar{X}, \bar{Y}) \end{aligned} \quad (21)$$

$$u'^2(L) = \left(\frac{\partial L}{\partial X}\right)^2 u^2(X) + \left(\frac{\partial L}{\partial Y}\right)^2 u^2(Y) \quad (22)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial X} = \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \\ \frac{\partial L}{\partial Y} = \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \end{cases} \quad (23)$$

由上面的式子得出:

$$u_1^2(L) = 2.91 \times 10^{-3} \text{ mm}^2, u_2^2(L) = 1.89 \times 10^{-3} \text{ mm}^2,$$

$$u_1'^2(L) = 2.65 \times 10^{-3} \text{ mm}^2, u_2'^2(L) = 1.81 \times 10^{-3} \text{ mm}^2。$$

即有:

$$\begin{cases} \mu_1(L) = \frac{u_1(L)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0.031\% \\ \mu_2(L) = \frac{u_2(L)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0.025\% \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \mu_1'(L) = \frac{u_1'(L)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0.029\% \\ \mu_2'(L) = \frac{u_2'(L)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0.024\% \end{cases} \quad (25)$$

设考虑测量相关性的声道角因子标准不确定度为 $u(y_\varphi)$, 相对标准不确定度为 $\mu(y_\varphi)$; 不考虑测量相关性的声道角因子标准不确定度为 $u'(y_\varphi)$, 相对标准不确定度为 $\mu'(y_\varphi)$ 。

同理:

$$\begin{cases} \mu(y_{\varphi_1}) = \frac{u(y_{\varphi_1})X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0.029\% \\ \mu(y_{\varphi_2}) = \frac{u(y_{\varphi_2})X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0.024\% \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \mu'(y_{\varphi_1}) = \frac{u'(y_{\varphi_1})X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0.028\% \\ \mu'(y_{\varphi_2}) = \frac{u'(y_{\varphi_2})X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 0.023\% \end{cases} \quad (27)$$

通过上面分析可知,考虑相关性和不考虑相关性得出的误差值有一定的差别。

2.3 几何尺寸总的标准不确定度标定

由式(7,8)进行微分,可以得到体积流量的测量相对不确定度分布:

$$\frac{\delta q_v}{q_v} = \frac{\delta A}{A} + \sum_{i=1}^2 \left[\frac{\delta w_i}{w_i} + \frac{\delta L_i}{L_i} + \frac{\delta y_{\varphi_i}}{y_{\varphi_i}} + \frac{\delta \Delta t_i}{\Delta t_i} - 2 \frac{\delta t_i}{t_i} \right] \quad (28)$$

从上式分析得出几何尺寸的相对不确定度影响为:

$$\mu(\text{几何}) = \sqrt{\mu^2(A) + \sum_{i=1}^2 (\mu_i^2(L) + \mu^2(y_{\varphi_i}))} = 0.070\% \quad (29)$$

$$\mu'(\text{几何}) = \sqrt{\mu^2(A) + \sum_{i=1}^2 (\mu_i'^2(L) + \mu^2(y_{\varphi_i}))} = 0.067\% \quad (30)$$

式中: $\mu(\text{几何})$ — 考虑测量工具和相关性的几何尺寸总的相对不确定度, $\mu'(\text{几何})$ — 不考虑测量工具和相关性的几何尺寸总的相对不确定度, i — 声道数。

3 数据分析

由上面的计算数据可以得出,考虑测量工具和相关性后,截面积的不确定度从 0.042% 增加到 0.044%;

(下转第 573 页)

其他组合,相应磨削功率曲线(如图4所示)与参数 $A_1B_1C_2D_2$ 功率变化曲线图(如图5所示)相比较,其功率曲线平稳磨削,磨削的质量也明显优于后者。本研究依据圆度检验结果确定 $A_1B_1C_2D_2$ 参数组合磨削效果较好,确定选用该组磨削参数和功率参考上线。

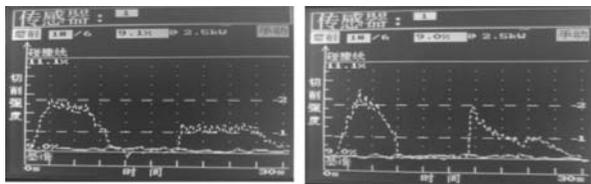


图4 磨削功率曲线 图5 参数 $A_1B_1C_2D_2$ 功率变化曲线

3 结束语

本研究构建了基于功率检测技术的磨削实时监控系統,通过采用检测磨床砂轮主轴功率的方法,实现了对磨削过程的实时监控。通过采用监控磨削过程及修正磨削工艺,得出了试件的磨削工艺优化参数和功率监控参考线。同时结合功率波形曲线对实验数据分析,确定了实验条件下的磨削参数和控制参考线,实现了从实时磨削过程上对磨削质量和磨削效率的监控。

通过磨削实验,首先,笔者确定了优化的小孔内圆磨削参数,提高了磨削质量;其次,通过磨削自动对刀、碰撞保护功能的实现,提高了磨削过程的自动化程度。

(上接第548页)

2个声道长度的不确定度分别从0.029%增加到0.031%,0.024%增加到0.025%;2个声道角因子的不确定度分别从0.028%增加到0.029%,0.023%增加到0.024%。从而得到仅考虑重复度的几何尺寸总的不确定度为0.067%,相比考虑测量工具误差和相关性后几何尺寸总的不确定度为0.070%。实际过程中测量工具和测量相关性是会带入误差的,有考虑计算的必要性。

4 结束语

本研究以已设计的超声波流量计样机为基础,进行了几何尺寸的标定。研究表明,该方法可以提高干标的准确度。

综合以上分析结果可知,在仅考虑测量重复度的基础上,考虑测量工具和测量相关性使超声波流量计几何尺寸标定的相对误差变大,因此,实际工程中进行流量计几何尺寸标定时,为提高标定准确度研究者需要考虑测量工具和测量相关性的影响。并且该方法在后续研究中需要得到实际验证。

参考文献(References):

[1] 鲍敏. 影响气体超声波流量计计量精度的主要因素研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学系,2004.

监控系统的实时反馈磨削状态保证了小孔内圆磨床加工精度的稳定和效率,对提高磨削过程的稳定性及磨削效率有很大帮助。

参考文献(References):

[1] 沙杰,蔡干,曹志中. 中小孔磨削高精度内圆磨床设计[J]. 制造技术与机床,2005(2):29-31.
 [2] 翁德玮,邵华,王海丽. 多传感器刀具状态监控系统[J]. 机械制造,2004,42(6):11-14.
 [3] 张凯,彭龔,罗春彬. 基于MSP430的机床功率监控系统设计[J]. 机械工程与自动化,2010(1):77-78.
 [4] 储晓承. 开放式CNC机床加工过程状态监测技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学机械电子工程学院,2011.
 [5] 陈庄,刘飞. 一种功率传感型内圆磨削加工的自适应控制策略[J]. 重庆大学学报:自然科学报,1997,20(3):1-7.
 [6] 鲁险峰. 磨削过程状态信息与产品质量信息融合技术研究[D]. 北京:北京工业大学机械工程学院,2009.
 [7] 初秀民,万剑,吴青. 基于HCS08单片机的多路功率监控系统设计[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(2):223-226.
 [8] 石向宇,张敏霞. 轴承内圆磨床单片机控制系统[J]. 青岛建筑工程学院学报,2001,22(1):43-45.
 [9] 吴剑峰,沙杰. 基于人机界面的高精度数控内圆磨床伺服系统构成与控制[J]. 机电工程技术,2009,38(10):50-51,74.
 [10] 杜云海,马东晓. 内圆磨削参数优化的模拟计算分析[J]. 河南科学,1994,12(1):56-60.

[编辑:张翔]

[2] 赵毅. 气体超声波流量计在天然气流量计量中的应用研究[J]. 化学工程与装备,2010(3):62-65.
 [3] LANSING J. Benefits of Flow Calibrating Ultrasonic Meters [C]. AGA Operations Conference, 2002, Chicago, 2002.
 [4] 王铭学. 基于DSP的超声波气体流量测量系统的研究[D]. 杭州:浙江大学信息科学与工程学院,2008.
 [5] 李跃忠. 多声道超声波气体流量测量关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学控制科学与工程系,2009.
 [6] 柯飞. 超声波流量计的结构是影响其性能的关键要素[J]. 国外油田工程,1999(6):36-39.
 [7] DRENTHEN J G, BOER G D. The manufacturing of ultrasonic gas flow meters[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001(1):89-99.
 [8] British Standards Institute Staff. Measurement of fluid flow in closed conduits—Methods using transit-time ultrasonic flowmeters[M]. BSI Standards, 1999.
 [9] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 北京:中国计量出版社,2009.
 [10] 程杰,李福成. 浅谈超声波流量计的使用[J]. 现代制造技术与装备,2012(4):42.
 [11] 王卓. 一个关于测量不确定度相关性示例的探讨[J]. 计量技术,2012,21(9):66-68.

[编辑:张翔]