DOI: 10.13382/j.jemi.B2002985

差分式小口径科氏流量计测量方法实验分析

杨辉跃 涂亚庆 彭钰钦
(陆军勤务学院 重庆 401311)

摘 要:针对小流量计量问题,阐述了一种导流管差分式设计的小口径科氏流量计,两根导流管内流体相向流动,科氏流量计测量值为两管流量之差;详细论述流量信号频率估计、相位差估计的相频匹配方法,以及对估计结果的平滑方法;在 3 种不同基础流量下开展实验研究,分析了流量计的零点稳定性、测量线性度和测量误差。实验结果表明,差分式流量计的零点与基础流量有较大关系,零点不稳定度估计为 0.539 g/min,时间差与质量流量的线性度较好,满量程精度在 0.5%以内。

关键词: 科氏流量计;频率估计;相位估计;零点稳定性
中图分类号: TH814;TN98 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 470.4017

Experimental analysis of measurement method for micro coriolis mass flowmeter with differential tubes

Yang Huiyue Tu Yaqing Peng Yuqin
(Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, China)

Abstract: To investigate the problem of small flow measurement, a micro Coriolis mass flowmeter is introduced which is designed with diversion pipe crossed. Liquid in two different tubes flows in the opposite direction. The measurement value of Coriolis mass flowmeter is the difference between the two tubes' flow. A phase-frequency matching method for frequency estimation, phase difference estimation is discussed in detail. Smoothing method for the estimation results is also put forward. Experimental research is carried out under three different basic flows. On this basis, the zero stability, linearity and measurement error of the flowmeter are analyzed. The experimental results show that the zero point of the differential flowmeter has a great relationship with the basic flow. The instability of the zero point is estimated to be 0.539 g/min, and the accuracy of the full range is within 0.5%. The mass flow has a remarkable linearity with the time difference.

Keywords: Coriolis mass flowmeter; frequency estimation; phase estimation; zero stability

0 引 言

航空航天、半导体制造、精细化工和生物医药等行业中,定量加液、混合配比的过程流量较小,精度要求高。如在血液透析中,透析过程很缓慢,因而对血液透析机的透析量计量提出了很高的精度和量程要求,是一种典型的小流量计量问题。然而由于小流量状态雷诺系数低,计量精度易受气泡和尘埃附着影响[1],同时要防止测量时流体被污染,传统的差压法、浮子法和容积法等难以满足要求。在超声流量计、热式流量计、电磁流量计和科氏流量计等新型测量技术与仪表中[2],科氏流量计能在非接触的情况下直接获得高精度质量流量,因而在小流量计量中具有比较优势[3-4]。

科氏流量计利用科里奥利效应,让流体流经振动中的导流管,产生科氏力使得导流管发生扭曲形变,由安装在导流管两端的传感器检测振动信号,通过算法计算出时间差,质量流量与时间差成正比[5]。常规科氏流量计有 DN40、DN60 等不同口径,其导流管型主要有单直管型、双 U 型设计。对于导流管的设计,两根管内流体的流

收稿日期: 2020-03-03 Received Date: 2020-03-03
*基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2003900)、国家自然科学基金(61871402)、重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0245)、重点学科建设项目资助

向一般相同,如要降低量程下限,只能缩小口径。当待测流量降到一个较低值时,如流量≤100 g/min,对导流管制造工艺提出了很高的要求。而采用差分式设计,让两根导流管内流体相向流动,各导流管内流量为基础流量,导流管内流量之差为科氏流量计测量的流量,从而可更好实现小流量测量[6]。

在科氏流量计变送器中信号处理算法方面,频率跟踪主要采用离散傅里叶变换(DFT)、自适应陷波滤波器等[7],相位差估计主要有 DFT、相关法[8-9]、滑动 Gertzel 算法[10]、负频率修正离散时间傅里叶变换(DTFT)[11]以及 Hilbert 变换法[12-14]等。这些方法各有特点,也存在各自不足,如 SGA 存在数字溢出,相关法和 Hilbert 变换法受非整周期采样影响等,在用于小相位差测量时,精度还有待进一步提高。

本文针对一种差分式小口径科氏流量计,采用相频匹配的方法进行频率和相位差估计,在实验室环境开展实验分析。

1　差分式科氏流量计

差分管式科氏流量计仍基于科里奥利效应,利用导流管两端振动信号的时间差计算质量流量。不同的是,差分式科氏流量计的两根导流管不是平行安装的,而是在直管段末端相互扭曲焊接在一起,如图 1 所示,管内的液流流向相反,两个磁电式速度传感器对称安装在直管段末端,电磁激振器安装在两根扭曲的导流管中段。由两个速度传感器采集的信号相位差(时间差)与两根导流管的质量流量差值成正比。在交叉处激振,导流管振动近似为二阶线性振动。

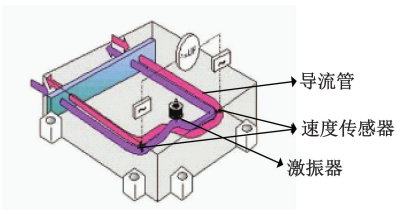

图 1　差分管式科氏流量计一次仪表

Fig. 1　Primary instrument of CMF with differential flow tubes

导流管的差分式设计,可降低流量计的量程下限。本文研究的差分式科氏流量计导流管内径为 2 mm,振动幅度在 0~2 mm,基础流量分 300、500 和 700 ml/min,差分流量范围为 1.6~60 g/min,振动信号相位差在 0°~0.05°范围内,远小于直径 50 mm 常规科氏流量计 0°~5°相位差变化范围,艾默生 CMF200 的流量范围为 2 kg/h~3 200 t/h。对比而言,本文研究的差分式流量计是一种面向小流量的流量计。如此小的振动幅值和相位差,易受环境温度、电源波动等因素干扰,对驱动控制及信号处理算法提出了跟高要求。

2　方法原理

2.1　频率跟踪

根据科氏流量计原理,振动信号频率为导流管固有频率,在工作环境相对温度时,其频率波动范围很小。考虑到 ANF 的收敛过程较长以及 DFT 方法精度不够,本文采样一种相频匹配法进行频率跟踪,算法流程如下:

1) 利用式(1)计算传感器信号 $x(n)$ 自相关序列。

$$\lambda(k)=\sum_{n=p+1}^{N-p}[x(n+k)+x(n-k)]x(n) \tag{1}$$

式中:$k=1,2,\cdots,p$,$p\leqslant[(N-1)/2]$。

2) 利用式(2)计算频率的粗估计值。

$$\omega_1=\cos^{-1}\left(\frac{b+\sqrt{b^2+8c^2}}{4c}\right)$$

$$b=\sum_{k=1}^{p-4}[\lambda_k+\lambda_{k+4}]\lambda_{k+2}$$

$$c=\sum_{k=1}^{p-4}[\lambda_{k+1}+\lambda_{k+3}]\lambda_{k+2} \tag{2}$$

3) 利用式(3)计算最终的频率估计值 $\hat{\omega}$。

$$\hat{\omega}=\omega_1+\left\{\left(\sum_{k=1}^{p}\lambda(k)\cos(k\omega_1)\sum_{k=1}^{p}\lambda(k)\sin(k\omega_1)\right)-\sum_{k=1}^{p}\lambda^2(k)\sum_{k=1}^{p}[k\cos(k\omega_1)\sin(k\omega_1)]\right\}/\left\{\left(\sum_{k=1}^{p}\lambda(k)\cdot k\sin(k\omega_1)\right)^2-\sum_{k=1}^{p}\lambda^2(k)\sum_{k=1}^{p}[k\sin(k\omega_1)]\right\}^2 \tag{3}$$

2.2　相位差估计

由于差分管式科氏流量计的相位差很小,满量程在 0.05°以内,且导流管容易受外部振动等因素干扰而产生噪声,因此需要一种估计精度高,抗噪性能好,实时性高的算法。针对差分管式科氏流量计,本文采样相频匹配的相位差估计算法[15],算法流程如下。

1) 设传感器两路正弦信号:

$$\begin{cases}x(n)=A\cos(\omega t+\theta_1)\\ y(n)=A\cos(\omega t+\theta_2)\end{cases} \tag{4}$$

利用式(5)分别计算两路信号的正交分量 $\hat{x}(n)$ 和 $\hat{y}(n)$,其中 N 为信号采样长度,$b=round(2\pi/\omega)$。

$$\hat{x}(n)=\frac{x(n-b)-x(n)\cos b\omega}{\sin b\omega} \tag{5}$$

2) 根据式(5)分别计算两路正弦信号及其正交分量的互相关信号 $r_{1,N}(k)$ 和 $r_{2,N}(k)$,其中 $k=0,1,\cdots,N_0-b-1$。

$$\begin{cases} r_{1,N}(k) = \dfrac{\sum_{n=b+1}^{N_0-k} [x_N(k)y_N(n+k) + \hat{x}_N(k)\hat{y}_N(n+k)]}{N_0 - b - k} \\ r_{2,N}(k) = \dfrac{\sum_{n=b+1}^{N_0-k} [x_N(k)\hat{y}_N(n+k) - \hat{x}_N(k)y_N(n+k)]}{N_0 - b - k} \end{cases} \tag{6}$$

互相关信号 $r_{1,N}(k)$ 和 $r_{2,N}(k)$ 的期望为：

$$\begin{cases} E[r_{1,N}(k)] = AB\cos(k\omega + \theta_1) \\ E[r_{2,N}(k)] = AB\sin(k\omega + \theta_2) \end{cases} \tag{7}$$

3）计算信号相位差

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \arctan[r_{2,N}(0)/r_{1,N}(0)] \tag{8}$$

从算法步骤可见，该相位差估计算法，不受两路传感器信号幅值的影响，这在实际应用中非常有价值，因为实际二次仪表信号调理电路并不能做到两路传感器信号幅值完全一致，总会受到 PCB 布线、元器件差异等的影响。

2.3 估计结果平滑

为改善差分式流量计稳定性，对频率和相位差估计结果进行平滑处理。常用的方法有滑动平均法、加权滑动平均法和遗忘因子法等。滑动平均法不需要每次计算求和，但是需要存储最新的 m 个值；加权平均法作为滑动平均法的推广，通过调整权重可达到不同平滑效果，但是需要至少 m 次乘法运算；遗忘因子法，只需要 3 次乘法（除法），2 次加法便可得到输出，同时通过调整遗忘因子 λ 亦可实现不同的平滑效果。

遗忘因子法对过去的全部数据，以 λ 的时间序数次幂作为权系数求取平均值。$k+1$ 时刻的输出为：

$$f_{out}(k+1) = \frac{f_{in}(k+1) + \lambda f_{in}(k) + \ldots + \lambda^k f_{in}(1)}{1 + \lambda + \ldots + \lambda^k} \tag{9}$$

式中：λ 称为遗忘因子，$0 < \lambda \leqslant 1$。$k+1$ 时刻之前的数据以 λ 的速率被“遗忘”。λ 越大遗忘速度越慢，最新时刻的值影响越小，$\lambda = 1$，所有时刻的值被用来平均。其迭代公式如下：

$$\begin{cases} f_{sum}(k+1) = \lambda f_{sum}(k) + f_{in}(k+1) \\ \lambda_{sum}(k+1) = \lambda\lambda_{sum}(k) + 1 \\ f_{out}(k+1) = f_{sum}(k+1)/\lambda_{sum}(k+1) \end{cases} \tag{10}$$

3 实验分析

3.1 实验装置

实验装置如图 2 所示，利用陶瓷泵驱动基础流量，通过管路设计实现流量相向而流。基础流量大小与主泵转速有关，根据应用需求校定了 300、500 和 700 ml/min 共 3 类基础流量大小。差分式科氏流量计如图 3 所示，采用数字驱动，利用 DDS 合成驱动信号，设置 DDS 频率控制字范围为 8140 ~ 8 180，对应输出频率为 47.381 ~ 47.614 Hz，对一次仪表连续扫频，计算结果通过串口发送到上位机 PC 上。在实验室水流量环境开展实验测试。

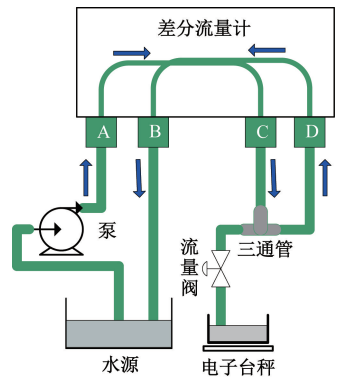

图 2 实验装置结构

Fig. 2 Experiment device

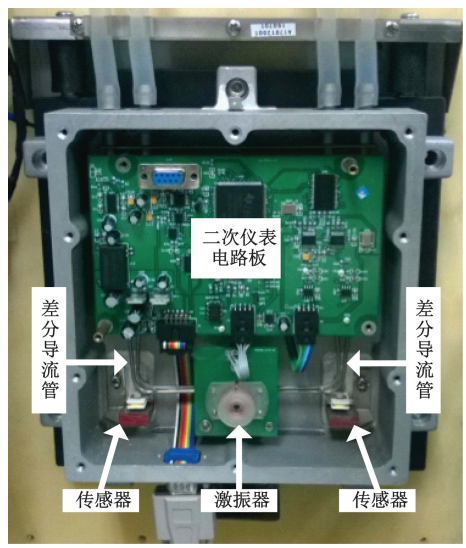

图 3 差分管式科氏流量计

Fig. 3 CMF with differential flow tubes

3.2 零点稳定性分析

零点稳定性是科氏流量计研究的难点，其影响因素复杂，有导流管的振动模态、管端固定应力、导流管刚度变化、管壁材料的腐蚀或附着、传感器与激振器安装的对称性及传感器重量的一致性等因素[16]。科氏流量计零点不稳定很难从根本上消减，对于大口径流量计，常用方法是设置流量阈值，当检测流量小于此阈值时，不显示瞬时流量或计算累积流量。但差分管式科氏流量计测量范

围非常小,零点不稳定度甚至会大于流量值,该方法不适用。

分别在 300、500、700 ml/min 的基础流量下,测试 3 h 的零点相位差、频率及幅值,结果如图 4 所示。以图 4(a)为例,上下分别对应平滑处理前后的相位差、频率及幅值测量结果。可以看出,平滑处理前三个参数的波动很大,尤其是相位差的波动在 $-2°\times10^{-3}$ ~ $2°\times10^{-3}$ 波动,而实际的流量值不会有负值。经过平滑处理后,零点相位差稳定在一个合理范围内。3 h 测量结果平均值如表 1 所示。在表 1 已将相位差转换为时间差,可见不同基础流量对应的零点时间差不同;由于采用 DDS 驱动,频率变化范围在 0.5‰以内;不同的基础流量其信号幅值略有变化,但是总体较平稳,对计算结果影响不大。

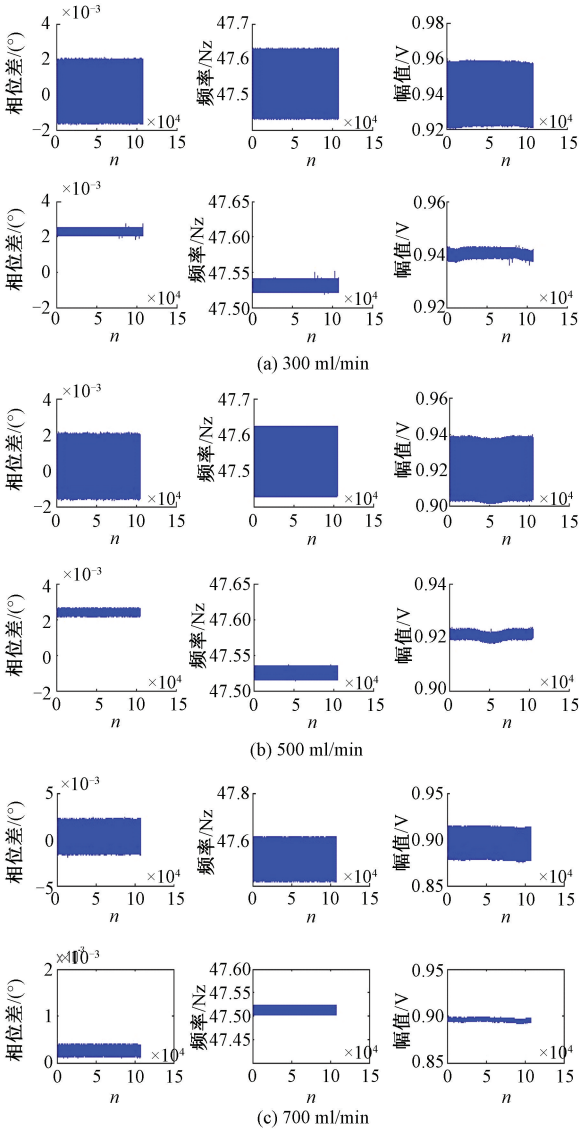

图 4　不同基础流量零点测试结果

Fig. 4　Test results of zero stability with different basic flow

表 1　零点平均值测试结果

Table 1　Test results of mean zero point

基础流量/(g·min^{-1})	时间差/s	频率/Hz	幅值/V
300	-1.413×10^{-4}	47.5321	0.940 3
500	-1.939×10^{-4}	47.5257	0.920 8
700	-2.573×10^{-4}	47.5134	0.895 9

为估计不同基础流量下零点时间差的差异水平,将 3 h 的零点时间差数据按每 10 000 个点取平均值,并利用 MATLAB 对此数据做方差分析,结果分别如表 2 和 3 所示。因子影响和随机误差平方和方差总计 6.828×10^{-8},总体自由度为 29。由于 $p<<0.01$,所以不同基础流量下零点差异极为显著。

表 2　每 10 000 点时间差平均值

Table 2　Mean time difference of every 10 000 points

实验组数	不同基础流量下时间差/($\times10^{-4}$ s)		
	300 g/min	500 g/min	700 g/min
1	−1.449	−1.912	−2.55
2	−1.331	−1.956	−2.567
3	−1.416	−1.924	−2.587
4	−1.47	−1.936	−2.601
5	−1.409	−1.96	−2.563
6	−1.432	−2.001	−2.55
7	−1.359	−1.945	−2.641
8	−1.44	−1.896	−2.601
9	−1.383	−1.935	−2.528
10	−1.475	−1.945	−2.611

表 3　方差分析表

Table 3　ANOVA table

方差来源	因子影响	随机误差
平方和	6.790×10^{-8}	3.794×10^{-10}
自由度	2	27
均方和	3.395×10^{-8}	1.405×10^{-11}
F	2416.38	
p	3.582×10^{-31}	

3.3　测量线性度分析

根据科氏流量计原理,质量流量与两路信号的时间差成正比。时间差与质量流量的线性度直接影响流量计精度。测量不同基础流量下,质量流量对应的时间差差及频率。实验时,每个流量下计算 10 000 次,记录平均值,实验结果如表 4 所示。

利用 MATLAB 线性回归计算 3 种基础流量下线性度,线性拟合结果如图 5 所示,线性回归计算结果如表 5 所示。可以看出,3 种基础流量下时间差与质量流量的线性度很好,尤其是表 5 中判定系数 R^2 非常接近于 1 且 F 检验概率值 p 远小于显著性水平 α,说明回归模型的拟合程度非常高,回归方程高度显著。

表 4 不同基础流量时间差及频率测试结果

Table 4 Test results of frequency and time difference with different basic flows

质量流量/(g·min^{-1})	基础流量 300 ml/min		基础流量 500 ml/min		基础流量 700 ml/min	
	时间差/s	频率/Hz	时间差/s	频率/Hz	时间差/s	频率/Hz
0	-1.363×10^{-4}	47.515 1	-1.901×10^{-4}	47.514 3	-2.650×10^{-4}	47.513 5
0.5	-1.324×10^{-4}	47.514 8	-1.894×10^{-4}	47.514 3	-2.549×10^{-4}	47.513 5
0.833	-1.126×10^{-4}	47.514 8	-1.814×10^{-4}	47.514 1	-2.469×10^{-4}	47.513 4
1.333	-1.117×10^{-4}	47.514 8	-1.715×10^{-4}	47.514 4	-2.341×10^{-4}	47.513 4
1.667	-1.104×10^{-4}	47.514 9	-1.637×10^{-4}	47.514 1	-2.266×10^{-4}	47.513 4
3.333	-7.375×10^{-5}	47.514 9	-1.279×10^{-4}	47.514 2	-1.904×10^{-4}	47.513 4
8.333	3.546×10^{-5}	47.515 1	-1.678×10^{-5}	47.514 2	-7.717×10^{-5}	47.513 4
11.667	1.120×10^{-4}	47.515 2	5.541×10^{-5}	47.514 3	-3.954×10^{-6}	47.513 3
16.667	2.201×10^{-4}	47.515 1	1.664×10^{-4}	47.514 3	1.088×10^{-4}	47.513 3
25	4.087×10^{-4}	47.515 1	3.524×10^{-4}	47.514 1	2.959×10^{-4}	47.513 2
33.333	5.925×10^{-4}	47.515 1	5.375×10^{-4}	47.514 3	4.823×10^{-4}	47.513 2
41.667	7.804×10^{-4}	47.515 2	7.282×10^{-4}	47.514 2	6.707×10^{-4}	47.5135
50	9.645×10^{-4}	47.515 2	9.117×10^{-4}	47.514 1	8.537×10^{-4}	47.513 4

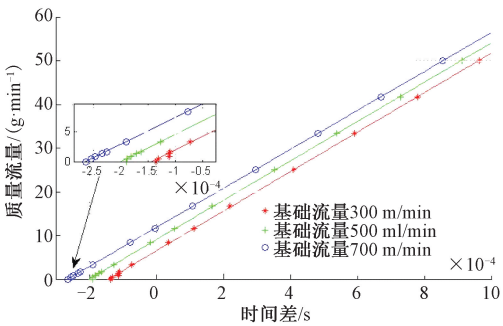

图 5 线性拟合

Fig. 5 Linear fitting chart

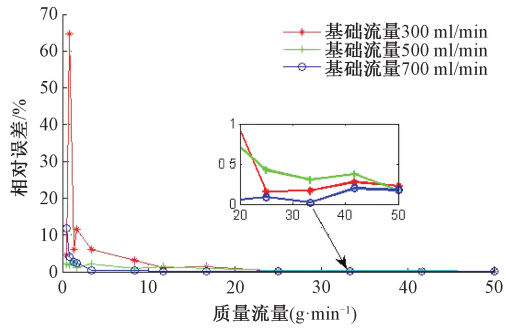

图 6 相对误差曲线

Fig. 6 The curve of the relative error

表 5 线性回归结果

Table 5 Linear regression analysis

基础流量/(ml·min^{-1})		300	500	700
拟合系数	$k\times10^4$	4.525 0	4.504 4	4.462 6
	$b\times10^4$	0.000 6	0.000 9	0.001 2
判定系数 R^2		0.999 8	0.999 9	0.999 9
F		6 136.3	122 490	1 610 280
P		0	0	0
回归方差		0.058 1	0.029 1	0.002 2
显著性		$\alpha=0.01$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.01$

3.4 测量误差分析

为分析流量计精度,考虑实验装置下的信号时间差与质量流量线性度非常好,以试验系统陶瓷泵流量作为标准流量,以线性拟合的结果作为二次仪表系数,粗略分析二次仪表精度。即以线性回归残差作为误差,得测量结果的相对误差曲线如图 6 所示。由图 6 可见,在质量流量较小时,相对误差较大,随着质量流量增加,相对误差迅速减小,这与理论误差基本一致。

通常以“量程误差加零点不稳定度”的方式表征流量计误差,本文以 3 种基础流量下的最大残差作为零点不稳定度,差分管式科氏流量计二次仪表零点不稳定度估计为 0.539 g/min,满量程精度在 0.5%以内,所以基本误差约为±0.539 g/min±0.5%×流量。需要注意的是,这个结果仅是在较简易的实验装置上通过数据分析得来的,而不是通过高精度的标定系统确定的。因此,从统计意义上来看,本文设计的二次仪表可满足血液透析机的使用要求。理论上,未来标定系统的建立可显著降低二次仪表基本误差。

4 结 论

小流量测量在诸多领域有广泛的应用需求,本文针对一种导流管差分式设计的小口径科氏流量计,以相频匹配方法进行频率和相位差估计,实验分析了流量计零点稳定性、测量线性度和测量误差,得到以下结论。

1)导流管的差分式设计可从理论上降低流量计量程下限,降低小流量测量中对管径和流速控制的要求。

2)差分式科氏流量计零点值与基础流量有加大关系,在流量标定和计量中需要考虑。采用相频匹配法测量频率和相位差,经遗忘加权平滑后可一定程度改善稳定性;

3)本文研究的差分式流量计测量线性度较高;基本测量误差约为±0.539 g/min±0.5%×流量,能基本满足透析机的应用需求;当然,测量结果还需进一步标定,测量精度还有提升空间,这与导流管制造工艺、驱动控制、测量方法以及试验装置和环境等有关系,是项目组下一步研究的方向。

参考文献

[1] 马亚朋, 石础, 罗宇,等. 科氏流量计气-液两相流的数值模拟[J]. 计量学报, 2018,39(5): 663-667.
MA Y P, SHI CH, LUO Y, et al. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in Coriolis flowmeter[J]. Acta Metrologica Sinica,2018,39(5):663-667.

[2] 黄超,毛谦敏,李中阳. 基于双速度探头的微小流量热式气体流量计[J]. 仪表技术与传感器,2019(4): 40-43.
HUANG CH, MAO Q M, LI ZH Y. Micro flow thermal gas flowmeter based on dual speed probes [J]. Instrument Technique and Sensor,2019(4):40-43.

[3] 王叶斌, 陈邵有. 微流量计量方法研究[J]. 测试技术学报, 2011,25(1):17-21.
WANG Y B, CHEN SH Y. Research on micro-flow measurement methods [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2011,25(1):17-21.

[4] HWAN L S, PARK S, LEE J, et al. Practical methodology for in situ measurement of micro flow rates using laser diode absorption sensors [J]. Metrologia, 2019,56(4):045010.

[5] 杨辉跃,涂亚庆,毛育文. 科氏质量流量计振动幅值的仿人智能控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2019,40(5): 119-123.
YANG H Y, TU Y Q, MAO Y W. Human-simulated intelligent control method for vibration amplitude of Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(5): 119-123.

[6] 牟泽龙,涂亚庆,陈鹏,等. 基于 DSP 的小流量科氏流量计二次仪表设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2018,37(8):109-111,119.
MOU Z L, TU Y Q, CHEN P, et al. Design and implementation of secondary meter for low flow Coriolis mass flowmeter based on DSP [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018,37(8): 109-111,119.

[7] CHEN N, FAN S C, ZHENG D Z. A phase difference measurement method based on the extended kalman filter for Coriolis mass flowmeters[J]. Measurement Science Review, 2019, 19(2): 48-52.

[8] TU Y Q, SHEN Y L. Phase correction autocorrelation-based frequency estimation method for sinusoidal signal[J]. Signal Processing, 2017, 130: 183-189.

[9] SHEN Y L, TU Y Q. Correlation theory-based signal processing method for CMF signals [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(6): 1-7.

[10] 乐静,徐科军,刘文,等. 面向不同应用的两种科氏质量流量计信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018,32(5):97-106.
LE J, XU K J, LIU W, et al. Two Coriolis mass flowmeter signal processing methods for different applications[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32(5):97-106.

[11] 张海涛,涂亚庆. 计及负频率影响的科里奥利质量流量计信号处理方法[J]. 仪器仪表学报,2007,28(3): 539-544.
ZHANG H T, TU T Q. New signal processing method with negative frequency contribution for Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(3): 539-544.

[12] 杨辉跃,涂亚庆,张海涛,等. 一种基于 SVD 和 Hilbert 变换的科氏流量计相位差测量方法[J]. 仪器仪表学报,2012, 33(9): 2101-2107.
YANG H Y, TU Y Q, ZHANG H T, et al. Phase difference measuring method based on SVD and Hilbert transform for Coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33 (9): 2101-2107.

[13] 张建国,徐科军,董帅,等. 基于希尔伯特变换的科氏质量流量计信号处理方法研究与实现[J]. 计量学报, 2017,38(3):309-314.
ZHANG J G, XU K J, DONG SH, et al. Study ang implementation of signal processing method for Coriolis mass flowmeter based on Hilbert transform [J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(3): 309-314

[14] 杨辉跃,涂亚庆,毛育文. 科氏流量计相位差估计的 ap-Hilbert 法[J]. 仪器仪表学报,2019, 40(1):38-45.
YANG H Y, TU Y Q, MAO Y W. Ap-Hilbert method for phase difference estimation of Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):38-45.

[15] 沈艳林, 姬海君, 李治源,等. 时变信号相位差估计的相频匹配方法[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(12):54-57.
SHEN Y L,JI H J, LI ZH Y, et al. Phase and frequency matching method based on phase difference estimation for

time-varying signals[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019,38(12):54-57.

[16] 陈鹏,涂亚庆,杨辉跃,等. 差分式科氏流量计测量原理和零点不稳定及补偿分析[J]. 传感器与微系统, 2017,36(1):61-63,70.
CHEN P, TU Y Q, YANG H Y, et al. Analysis on measurement principle and instability and compensation of zero point for differential Coriolis mass flowmeter[J]. Transducer and Microsystem Technolosies,2017,36(1):61-63,70.

作者简介

杨辉跃,分别在 2009 年、2012 年和 2015 年于后勤工程学院获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为陆军勤务学院讲师,主要研究方向为智能检测与仪表、数字信号处理。
E-mail:huiyue_yang@163.com

Yang Huiyue received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. all from Logistical Engineering University in 2009, 2012 and 2015, respectively. Now he is a lecturer at Army Logistics University of PLA. His main research interests include intelligent detection and instrumentation, signal processing.

涂亚庆,分别在 1984 年于成都科技大学获得学士学位,1991 年和 1994 年于重庆大学获得硕士学位和博士学位,现为陆军勤务学院教授,主要研究方向为智能检测与仪表、智能自动化系统。
E-mail:yq.tu@163.com

Tu Yaqing received B. Sc. from Chengdu University of Science and Technology in 1984, M. Sc. and Ph. D. both from Chongqing University in 1991 and 1994, respectively. Now he is a professor at Army Logistics University of PLA. His main research interests include intelligent detection and instrumentation, intelligent automation system.