

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.06.019

流型频繁切换下科氏质量流量计驱动特性研究*

方正余 徐科军 张建国 侯其立 刘文乐 静

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要:在科氏质量流量计测量过程中,流量管振动幅值的控制很重要。当单相流与气液两相流频繁切换的情况发生时,使用当前的控制方法流量管会出现振动幅值大幅衰减和超调的问题。为此,设计了一套实验方案,进行实验,分析了出现该问题的原因。针对该问题,提出变驱动周期的方法和变积分限幅值的方法,在所研制的数字式科氏质量流量变送器上实时实现,并进行实验验证。实验结果表明,变驱动周期的方法有效地降低了单相流切换到气液两相流时流量管振动幅值衰减的程度,变积分限幅值的方法很好地解决了气液两相流切换到单相流时流量管振动幅值大幅超调的问题。

关键词:科氏质量流量计;单相流;气液两相流;驱动特性

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

Study on drive characteristics of Coriolis mass flowmeter under flow pattern switching frequently

Fang Zhengyu Xu Kejun Zhang Jianguo Hou Qili Liu Wen Yue Jing

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The control of vibration amplitude of flow tube is very essential for Coriolis mass flowmeter (CMF) in the application of measurement. When the single-phase flow and gas-liquid two-phase flow switch to each other frequently, the current control method would lead to a large attenuation and overshoot of vibration amplitude. Therefore, the experimental scheme is designed and conducted. The reason of the problem is analyzed, and then the variable drive cycle method and the variable integral-limiting-value method are proposed. Two methods are realized in real time on the developed digital mass flow transmitter and verified experimentally. The experimental results show that the variable drive cycle method reduces the attenuation degree of the vibration amplitude effectively when the single-phase flow switch to the gas-liquid two-phase flow, and the variable integral-limiting-value method solves the significant overshoot of the vibration amplitude well when the gas-liquid two-phase flow switch to the single-phase flow.

Keywords: Coriolis mass flowmeter; single-phase flow; gas-liquid two-phase flow; drive characteristics

1 引言

科里奥利质量流量计(简称科氏质量流量计)用于流体质量流量的直接测量,测量精度高,重复性好,而且还能同时实现流体密度测量,具有广阔应用前景^[1]。目前科氏质量流量计主要用于测量单相液体流量(简称单相流)^[2-4],但是在实际测量过程中,比如装罐过程或油料

交易等场合,经常开闭阀门或使用高压压缩空气吹洗管道^[5],管道内可能会间歇性混入气体,导致介质在单相流与气液两相流(简称两相流)这两种流型之间频繁的切换。此时,两相流是一种暂态,维持时间短且冲击性强。当含气量较高时,流量管的阻尼比会升高2个数量级以上^[5-7]。

在两相流驱动方法上, Henry 等人^[8]认为科氏质量流量计一次仪表的几何形状、流量管驱动器的数量等因

素影响振动幅值大小。他们采用 B 形双驱动器结构的传感器,使驱动能量加倍,因此流量管获得了较高幅值的振动。Micro Motion 公司在其产品白皮书中提及通过降低控制环路的设定点来减少过程波动性。当前,国内的研究重点是数字驱动^[2,4,9],数字驱动能使流量管在两相流发生时保持振动。以上均是针对平稳的两相流,而对单相流与两相流这两种流型频繁切换的情况研究甚少。当单相流切换到两相流时,传感器的阻尼比和频率瞬间发生变化,如果变送器驱动流量管的电压信号(简称驱动信号,其幅值简称驱动幅值)无法及时跟踪流量管输出信号(即流量管发生振动时,安装在其上的速度传感器的输出电压信号。该信号在下文中简称振动信号,其幅值简称振动幅值),会使振动幅值大幅衰减;当两相流切换到单相流时,由于之前处于两相流状态,驱动幅值较大,振动幅值会迅速增加甚至超调。振动幅值一旦超过 ADC 采集的电压信号满量程($\pm 5\text{ V}$),将会影响变送器内部的计算且可能损坏流量管。为了使科氏质量流量计在这两种流型频繁切换时具有较好的性能,首先需要保证其具有较好的驱动特性。因此,研究这两种流型频繁切换情况下科氏质量流量计驱动特性具有重要的意义。

由于在理论上分析这两种流型频繁切换非常复杂,所以,本文设计一套实验方案,对该情况下最严苛的两个状态,即单相流切换到两相流与两相流切换到单相流,进行研究。首先,将本课题组^[2,4,10-15]研制的变送器与型号为 CMF025 的科氏质量流量传感器相匹配,进行这两种流型切换实验。其次,根据采集的实验数据,分析原有驱动控制方法的不足,提出变驱动周期的方法和变积分限幅值的方法。最后,将方法在变送器上实现,进行实验验证,以说明所提出的控制方法的有效性。

2 单相流切换到气液两相流驱动特性

为了探究在当前驱动控制方法下,两种流型切换时的科氏质量流量计驱动特性,需要先进行实验。根据实验数据分析当前驱动控制的不足之处,从而提出相应的改进方法。

2.1 实验与分析

科氏质量流量计两相流实验装置主要由水箱、水泵、空气压缩机、科氏质量流量传感器(一次仪表)、科氏质量流量变送器(二次仪表)、气体浮子流量计、阀门及管道等组成,如图 1 所示。管道下游安装一台 Micro Motion 公司生产的科氏质量流量传感器,型号为 CMF025。该传感器作为本次实验的对象,匹配本课题组研制的变送器。

进行单相流切换到两相流实验的过程:开启阀门 3 至最大开度,再调节阀 1 开度,固定液体流量的大小,让单相水流过流量管;待流量管稳幅振动后,开启阀门 2

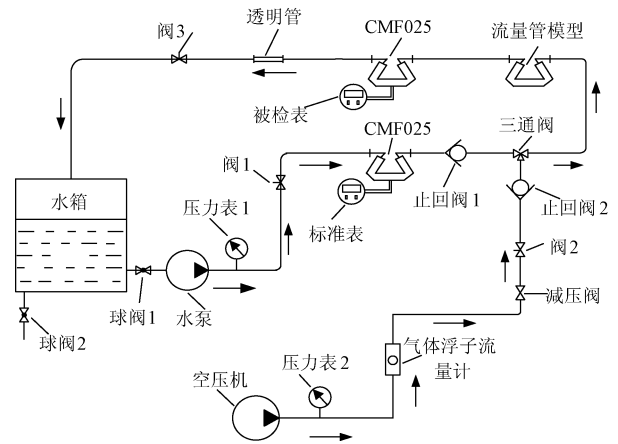


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental device

加入气体,管道内介质瞬间从单相流状态切换到两相流状态。用示波器采集的振动信号波形如图 2 所示,振动幅值的变化情况如图 3 所示。

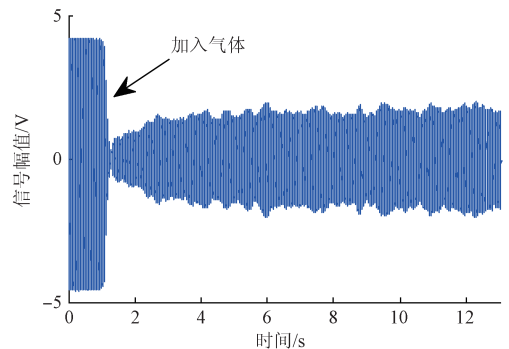


图 2 振动信号

Fig. 2 Vibration signal

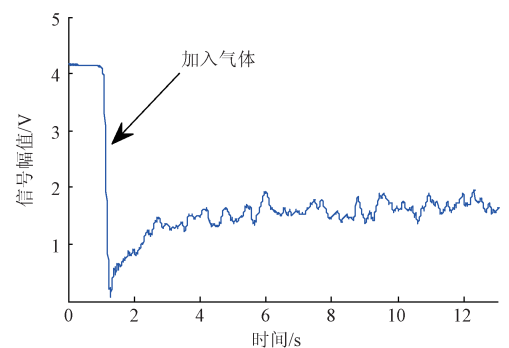


图 3 振动幅值

Fig. 3 Amplitude of vibration signal

由图 3 可知,在 0 ~ 1 s 时间内,流量管内为单相水(流量为 15.8 kg/min)。在 1 s 时,加入气体(流量为 1.0 L/min),振动幅值骤降,最小处为 74 mV(因为信号在硬件上放大了 8.95 倍,因此,实际振动幅值只有

8.2 mV。以下均是经过放大后的幅值),几乎停振。

科氏质量流量变送器能否较好地驱动流量管主要与驱动能量、幅值控制方法和控制及时性有关。变送器使用正弦波电压驱动,其作用在驱动线圈上产生电流,电流大小和驱动能量成正比。提高驱动能量必须提高驱动电压,而变送器中的本安电路限制了驱动电压的变化范围。变送器使用带积分限幅的PI幅值控制方法。在单相切换到两相流时,驱动幅值能迅速达到最大,抑制振动幅值的衰减。因此,从驱动能量和幅值控制方法上都难以提升驱动特性。为了分析气体加入前后变送器驱动及时性的情况,对振动信号和驱动信号(幅值缩小20倍)进行观察,如图4所示。

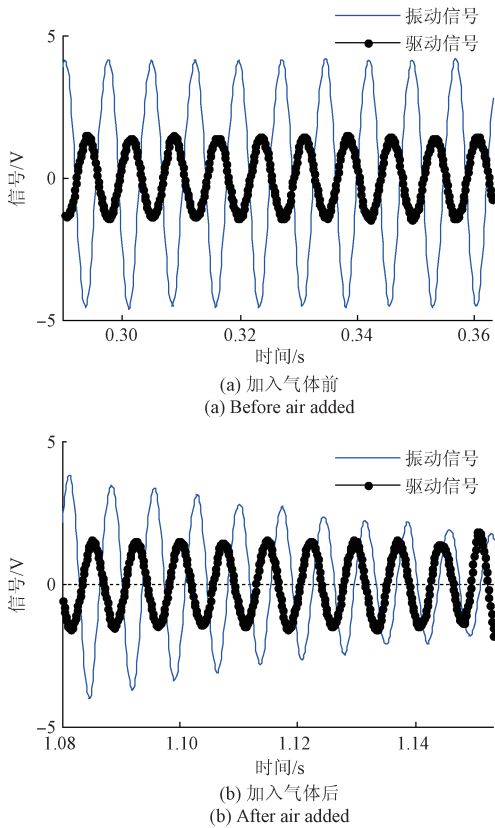


图 4 振动信号和驱动信号局部放大
Fig. 4 Partial enlargement of vibration signal and drive signal

由图 4 可知,在加入气体前,流量管振动和驱动信号均比较平稳,且维持所需的 180°相位差。在加入气体后,振动信号和驱动信号之间的相位差出现了偏移,未能较好地维持相位关系。当前驱动控制周期(即变送器改变驱动控制参数的周期,以下简称驱动周期)是 133 ms,该驱动周期下驱动信号不能及时跟踪振动信号相位的变化,导致振动幅值的衰减。为此,在同样的液体流量(15.8 kg/min)、气体流量(1.0 L/min)下,分别将驱动周期 T_d 更改为 80、53.3、26.7 及 13.3 ms(约 2 个信号周

期)进行实验,观察单相切换到两相流时的驱动效果。因为变送器 CPU 芯片运算能力有限,难以每个信号周期都进行一次驱动控制,因此,选择最小驱动周期 T_d 为 13.3 ms。在不同驱动周期 T_d 下,振动幅值的对比如图 5 所示,实验过程中驱动信号和振动信号间的相位差关系对比所图 6 所示。

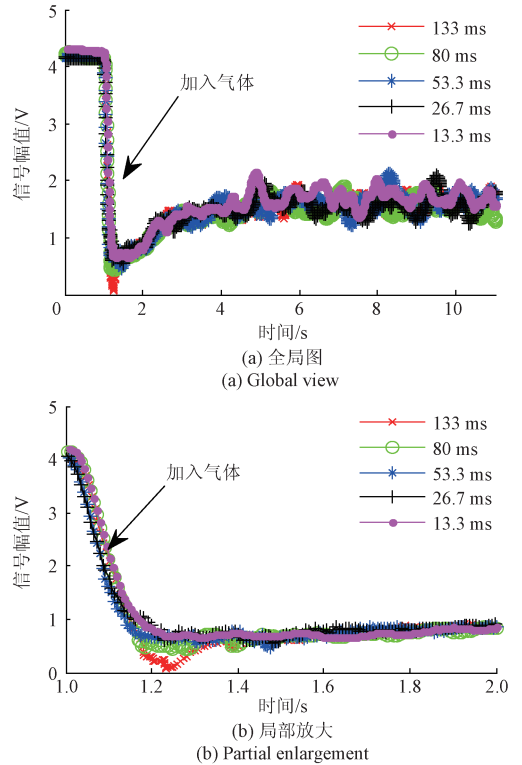
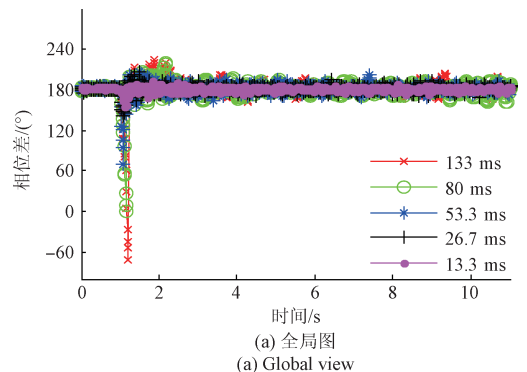


图 5 不同控制周期下振动幅值对比
Fig. 5 Comparison of vibration amplitude with different T_d

由图 5 可知,在突然加入气体时(1s 处), T_d 为 133 ms 下振动幅值衰减最多,随着 T_d 的减小,振动幅值衰减的程度有所改善。由图 6 可知, T_d 的减小明显改善了驱动信号与振动信号所需的相位关系,提高了相位跟踪的精确性和及时性。因此,提高驱动及时性可以改善单相切换到两相流时的驱动特性。



(a) 全局图
(a) Global view

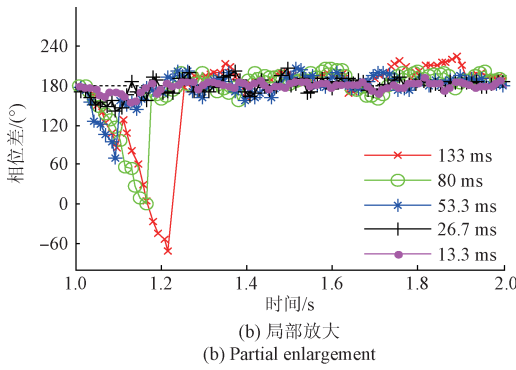


图6 不同控制周期下振动和驱动信号相位差对比

Fig. 6 Comparison of phase difference between vibration and drive signal with different Td

2.2 变驱动周期方法

在单相流下,为了保证测量精度,驱动周期尽量较大;当两相流发生时,为了减小振动幅值的衰减,驱动周期尽量小。在流型频繁切换时,为了兼顾二者的要求,提出变驱动周期的控制方法,如下式所示:

$$DriveT = \begin{cases} DriveT1, GVF < 0.1\% \\ DriveT2, GVF \geq 0.1\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: $DriveT$ 表示驱动周期的大小, GVF 表示含气量。当 $GVF \geq 0.1\%$ 时,表明单相流切换到两相流,改变驱动周期为 $DriveT2$,以满足驱动及时性需要;当 $GVF < 0.1\%$ 时,表明两相流切换到单相流,改变驱动周期为 $DriveT1$,以满足测量精度的需要,其中 $DriveT1 > DriveT2$ 。

但是,必须知道液体流量和气体流量的值,然后进行换算,才能获得 GVF 这个参数。然而,在两相流发生时,科氏质量流量计计算出的液体流量已经不准确,且需要其它的测量装置来测量气体流量。因此,变送器很难实时得到 GVF 。而随着含气量的增加,混合物流体的密度与单相流体的密度偏差越来越大,且成单调的正比关系,可以采用密度降 (density drop, Dd) 代替含气量^[10] 作为该方法的判据。在此,引出密度降的概念,如下式所示:

$$Dd = \frac{D_0 - D_l}{D_0} \quad (2)$$

式中: D_0 为单相流体的实际密度, D_l 为混合流体的密度。其计算方法如下式所示:

$$D_l = \frac{(\alpha_1 \cdot \Delta T + \alpha_2)}{f^2} + \alpha_3 + \alpha_4 \cdot \Delta T \quad (3)$$

式中: $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 为待标定密度系数, f 为振动信号频率, ΔT 为流体温度变化值。

在引出密度降的概念之后,变驱动周期的控制方法如下式所示:

$$DriveT = \begin{cases} DriveT1, Dd < 0.1\% \\ DriveT2, Dd \geq 0.1\% \end{cases} \quad (4)$$

3 气液两相流切换到单相流驱动特性

3.1 实验与分析

在实验装置上进行两相流切换到单相流驱动特性实验。实验步骤为首先使介质形成两相流状态,步骤见上文中单相流切换到两相流实验;经过一段时间后,关闭气体,让介质恢复为单相流状态。本实验中单相水流量为 15.8 kg/min , 气体流量为 1.0 L/min 。用示波器记录驱动信号和振动信号波形,如图7所示。

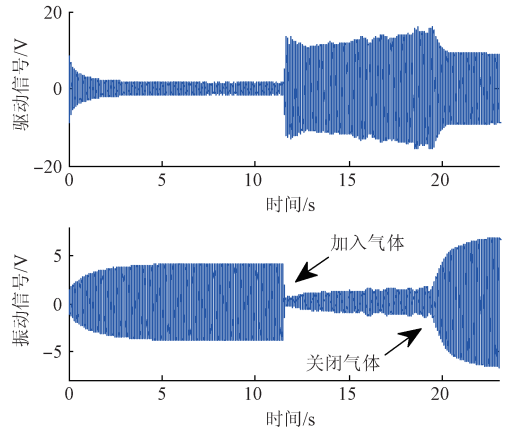


图7 在单相-两相-单相状态下驱动信号和振动信号

Fig. 7 Drive signal and vibration signal under single-two-single phase condition

由图7可知,在 19.4 s 时刻,流量管内介质由两相流恢复为单相流状态,但是振动信号幅值出现很大的超调。经过分析,在关闭气体后,PI 控制器积分环节 ui 输出过大,使驱动输出未及时回调造成了振动幅值大幅度超调。将实验过程中变送器内部计算出的振动幅值 amp 和 PI 控制器输入 e 、积分环节输出 ui 以及输出 u 数据上传至 PC,如图8所示。

在加入气体前,振动幅值稳定,积分环节输出约为 0.55 ;在加入气体后,由于 $e(k)$ 较大,积分环节会一直增大;在关闭气体后,振动幅值仍然未达到设定值,积分环节会继续增大,但是此时流量管已处于单相流状态,振动信号会迅速增大。当振动幅值达到期望值时,积分环节输出已经达到 4.2 ,这必然导致驱动输出无法及时回调。

3.2 变积分限幅值方法

针对上述现象,对现有 PI 控制器中的积分环节提出改进方法。当前积分环节已经有限幅,如下式所示:

$$ui(k) = \begin{cases} ui_{max}, ui(k) > ui_{max} \\ ui(k), -ui_{max} \leq ui(k) \leq ui_{max} \\ -ui_{max}, ui(k) < -ui_{max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ui_{max} 是积分环节输出的限幅值, $ui(k)$ 为积分环节

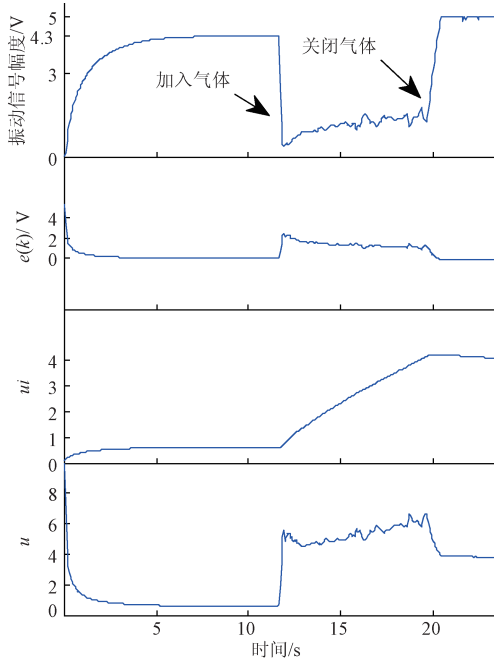


图 8 在单相-两相-单相状态下变送器内部参数
Fig. 8 Interior parameters of transducer under single-two-single phase condition

输出值。若直接减小 ui_{max} 的值,可以防止 ui 输出过大造成振动幅值大幅超调,但是 ui_{max} 的值过小会影响两相流下积分环节的输出,使得 PI 控制器不能提供较大的输出增益。因此,提出变积分限幅值的方法,积分限幅值可以根据振动幅值自适应改变,如下式所示:

$$ui_{max} = \begin{cases} ui_{max,0}, amp \leq k \cdot amp_{req} \\ ui_{max,1}, amp > k \cdot amp_{req} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ui_{max} 是改进后的积分限幅值, amp 为振动幅值, amp_{req} 为振动的期望幅值, k 为系数,且 $k > 1$ 。当 amp 未超过门限时,积分限幅值自动设置为 $ui_{max,0}$;反之,积分限幅值自动设置为 $ui_{max,1}$,且有 $ui_{max,0} > ui_{max,1}$ 。

4 实时实现与实验验证

根据经验,式(1)中 $DriveT1$ 和 $DriveT2$ 分别取 133 和 13.3 ms。式(6)中 $ui_{max,1}$ 为单相流下流量管稳幅振动时积分环节的输出值 0.55, $ui_{max,0}$ 取正常情况下的积分限幅值 5.4。考虑到流量管在起振时会有正常的超调,所以将 k 值设定为 1.05。变送器中同时实现变驱动周期的方法和变积分限幅值的方法,当流型频繁切换时,一旦检测 $Dd > 0.1\%$,立即减少驱动周期为 13.3 ms;反之,增加驱动周期到 133 ms;当振动幅值大于 1.05 倍设定幅值,立即减小积分限幅值为 0.55;反之,增加积分限幅值到 5.4。状态机如图 9 所示。

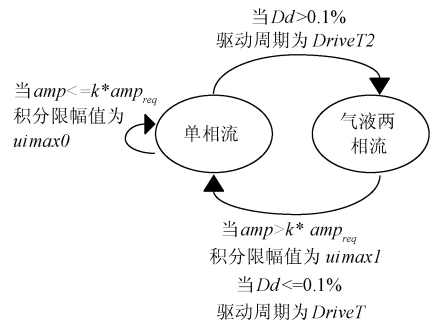
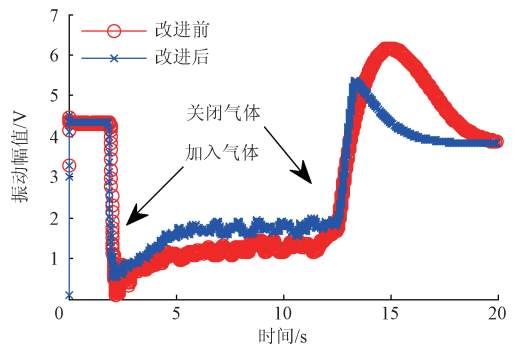


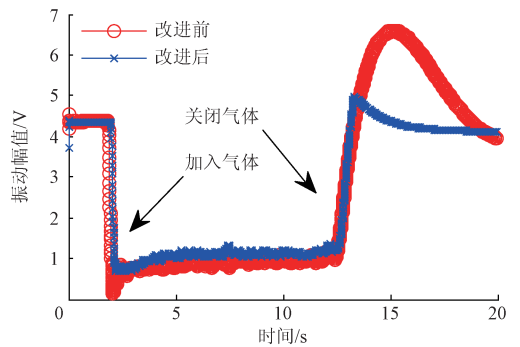
图 9 变驱动周期方法和变积分限幅值方法的状态机
Fig. 9 State machine diagram using the variable drive cycle and the variable integral-limiting-value

为了验证所提出方法的可行性,进行三组流型切换的对比实验,其中水流量固定为 15.8 kg/min,气体流量分别设置为 0.5、1 和 1.5 L/min。为了简化说明,将 133 ms 固定驱动周期和固定积分限幅值方法称为改进前的方法,变驱动周期的方法和变积分限幅值的方法称为改进后的方法。在 3 种含气量下,方法改进前后振动幅值对比如图 10(a)、(b)和(c)所示。

以水流量 15.8 kg/min 和气体流量 1 L/min 为例,当单相流切换到两相流时,改进前振动信号衰减到 0.12 V,改进后只衰减到 0.7 V;当两相流切换到单相流时,改进前振动幅值超调到 6.6 V 且超过 5 V 的时间为 4.15 s,改进后最大的超调幅值只有 4.96 V。其他两种气体流量下



(a) 气体流量 0.5 L/min
(a) Gas flow 0.5 L/min



(b) 气体流量 1 L/min
(b) Gas flow 1 L/min

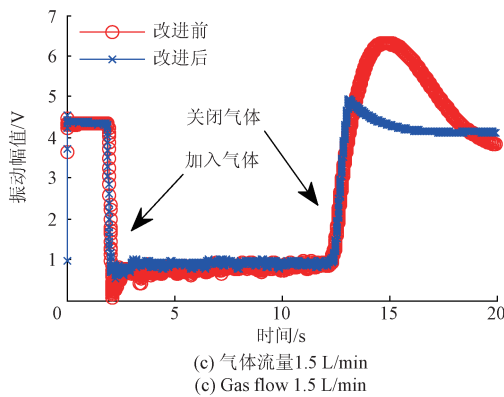


图10 改进前后振动幅值对比图(水流量 15.8 kg/min)

Fig. 10 Comparison of vibration amplitude before and after improvement

的实验均有类似的效果。因此,在流型频繁切换的情况下,所提出的变驱动周期的方法可以减小振动幅值衰减的程度;变积分限幅值的方法可以解决振动幅值大幅度超调的问题。

5 结论

进行单相流切换到两相流的实验,分析得出,是由于驱动及时性不够造成了振动幅值大幅度衰减。为了提高驱动性能,提出了变驱动周期的方法。当检测到两相流发生时,自动改变驱动周期为 13.3 ms,提高驱动及时性;当检测到单相流发生时,自动改变驱动周期为 133 ms,满足测量精度的要求。

进行两相流切换到单相流的实验,分析得出,是由于PI控制器中积分环节输出过大造成了振动幅值大幅度超调。为了对驱动输出进行合理限幅,提出变积分限幅值的方法。当振动幅值大于 1.05 倍的设定值时,积分限幅值减小到 0.55;反之,积分限幅值增加到 5.4。

将变驱动周期的方法和变积分限幅值的方法同时在变送器上实现,并且进行 3 种含气量下流型切换实验。实验结果表明,当单相流切换到两相流时,相比较于固定驱动周期方法,变驱动周期的方法使振动信号衰减到的最小幅值从 0.12 上升 0.70 V,减小了衰减程度;当两相流切换到单相流时,相比较于固定积分限幅值的方法,变积分限幅值的方法下振动信号超调到的最大幅值从 6.6 降低到 4.9 V,解决了振动幅值大幅超调的问题,使流量管快速地恢复至正常振动。

参考文献

[1] ANKLIN M, DRAHM W, RIEDER A. Coriolis mass flowmeters; Overview of the current state of the art and latest research [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(6) : 317-323.

[2] 侯其立,徐科军,李叶,等. 基于 TMS320F28335 的高精度科氏质量流量变送器研制 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12) : 2788-2795.
HOU Q L, XU K J, LI Y, et al. Development of high-accuracy Coriolis mass flow transmitter based on TMS320F28335 [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(12) : 2788 -2795.

[3] CHEN K, ZHENG D Z, FAN S C, et al. Novel Coriolis mass flowmeter signal processing algorithms based on DFT and digital correlation [C]. IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2010), 2010 : 56-60.

[4] HOU Q L, XU K J, FANG M, et al. A DSP-based signal processing method and system for CMF [J]. Measurement, 2013, 46(7) : 2184-2192.

[5] GREGORY D, WEST M, PATON R, et al. Two-phase flow metering using a large Coriolis mass flow meter applied to ship fuel bunkering [J]. Measurement and Control, 2008, 41(7) : 208- 212.

[6] HENRY M P, TOMBS M, DUTA M, et al. Two-phase flow metering of heavy oil using a Coriolis mass flow meter: A case study [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(6) : 399-413.

[7] REIZNER J. Coriolis-the almost perfect flow meter [J]. IEEE Computing & Control Engineering, 2003, 14(4) : 28- 33.

[8] HENRY M P, DUTA M D, TOMBS M S, et al. How a Coriolis mass flow meter can operate in two phase (gas / liquid) flow [C]. 4th Annual Emerging Technologies Conference, ISA EXPO, 2004.

[9] 李苗,徐科军,朱永强,等. 科氏质量流量计的 3 种驱动方法研究 [J]. 计量学报, 2011, 32(1) : 36- 39.
LI M, XU K J, ZHU Y Q, et al. Study on three driving methods of Coriolis mass flowmeter [J]. Acta Metrologica Sinicat, 2011, 32(1) : 36-39.

[10] HOU Q L, XU K J, FANG M, et al. Gas-liquid two-phase flow correction method for digital CMF [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(10) : 2396- 2404.

[11] 李苗,徐科军,侯其立,等. 数字科氏质量流量计正负阶跃交替激励启振方法 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1) : 172-177.
LI M, XU K J, HOU Q L, et al. Startup method of digital Coriolis mass flowmeter using alternative exciting of positive-negative step signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1) : 172-177.

[12] HOU Q L, XU K J, FANG M, et al. Development of Coriolis mass flowmeter with digital drive and signal

processing technology [J]. ISA Transactions, 2013, 52(5):692-700.

- [13] 熊文军,徐科军,方敏,等. 科氏流量计一次仪表与变送器匹配方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2012, 26(6):521-528.

XIONG W J, XU K J, FANG M, et al. Study on matching method of primary meter and transmitter in Coriolis mass flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012,26(6):521-528.

- [14] 刘翠,侯其立,熊文军,等. 面向微弯型科氏质量流量计的高精度过零检测算法实现[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(6):675-682.

LIU C, HOU Q L, XIONG W J, et al. Implementation of high-precision zero-crossing detection algorithm for micro-bend type Coriolis mass flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(6):675-682.

- [15] 李祥刚,徐科军. 科氏质量流量管非线性幅值控制方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2009,23(6):82-86.

LI X G, XU K J. Research on non-linear amplitude control method of Coriolis mass flow-tube [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009,23(6): 82-86.

作者简介



方正余,2015 年于合肥工业大学获得学士学位,现为合肥工业大学电气与自动化工程学院 DSP 实验室硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统及其应用。

E-mail:15255170894@163.com

Fang Zhengyu received B. Sc. from Hefei University of Technology in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in DSP Laboratory, School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology. His main research interest is embedded systems and applications.



徐科军(通讯作者),1988 年于中国矿业大学获得博士学位,现为合肥工业大学教授,博士生导师,主要研究方向为传感器技术、自动化仪表和数字信号处理。

E-mail:dsplab@hfut.edu.cn

Xu Kejun (Corresponding author) received Ph. D. in electrical engineering and automation from China University of Mining and Technology in 1988. He is a professor at Hefei University of Technology. His research interests are in the areas of the sensor technology, process instrumentation, and digital signal processing.

高通公司选择是德科技为其 5G 测试方案合作伙伴

是德科技将提供可灵活扩展和功能强大的 5G 设计和测试解决方案
满足 5G 从原型设计到最终标准化的要求

新闻要点:

- 是德科技和高通科技合作测试第五代移动通信芯片组
- 是德科技为协议和射频验证提供从设计到测试的解决方案

是德科技公司 (NYSE:KEYS) 近日宣布与美国高通公司旗下的子公司 Qualcomm Technologies 协作,推动其第五代移动通信(5G)技术的实现。是德科技拥有全面的设计和测试工具,能够支持为下一代蜂窝设备开发芯片组。

基于是德科技新 UXM 5G 无线测试平台,是德科技最新的 5G 网络基站模拟解决方案系列帮助高通公司验证其 5G 芯片组技术和高层协议。是德科技的可扩展解决方案同时支持 6 GHz 频段以下和毫米波频段,使高通公司能够对其芯片的性能进行深入分析,克服在 5G 试验阶段可能出现的潜在风险与技术挑战。

是德科技副总裁兼无线测试事业部总经理 Satish

Dhanasekaran 表示:“随着 3GPP 加速制定 5G NR 非独立组网规范,是德科技很高兴与高通科技公司合作,帮助他们实施 5G 项目的协议和射频流程。从 5G 的原型设计到最终的标准制定,是德科技的软件和硬件平台能够为业界提供卓越的 5G 设计和测试解决方案,满足可扩展性和功能需求。”

高通科技公司工程设计副总裁 Jon Detra 补充道:“我们非常激动能够与是德科技公司合作,共同努力为行业实现 5G 技术。是德科技的解决方案将加速实现我们的商业化战略。”

更多信息

关于 5G 网络仿真解决方案的更多信息,请参见 www.keysight.com/find/5G-protocol。浏览产品图片,请访问 www.keysight.com/find/5G-protocol-images。观看是德科技 5G 网络仿真解决方案的视频演示,请访问 YouTube。