

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.12.021

# 科氏质量流量计差分驱动方式研究与实验\*

方正余 徐科军 张建国 刘铮 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:**在气液两相流发生时,基于单端驱动方式的科氏质量流量变送器的驱动能量不足,从而导致流量管的振动幅值很低,流量计测量误差大,甚至无法正常工作。为此,分析单端驱动方式下变送器的驱动能力和可以提升的空间。提出差分驱动方式,增强驱动能量,且满足本质安全的要求。研制实现电路,应用于科氏质量流量变送器,分别进行气液两相流下驱动能量的对比实验和单相水流量标定实验。实验结果表明,差分驱动方式在相同流量和含气量情况下,使流量管的振动幅值几乎提升1倍;在单相水流量情况下,测量精度依然可以达到0.1级,稳定性好。

**关键词:**科氏质量流量计;气液两相流;驱动能量;差分驱动方式

**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

## Research and experiment on differential drive mode of Coriolis mass flowmeter

Fang Zhengyu Xu Kejun Zhang Jianguo Liu Zheng Liu Wen Yue Jing

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

**Abstract:** When the gas-liquid two-phase flow occurs, the drive energy of Coriolis mass flow transmitter based on single-ended drive mode is insufficient, which leads to very low of the vibration amplitude of the flow tube, very large of the measurement error of the flowmeter, and even abnormal work. Therefore, the drive capacity and its enhancing space of the transmitter based on single-ended drive mode are analyzed. A differential drive mode is proposed to enhance the drive energy and meet the requirements of intrinsically safe. The circuit is developed and used in Coriolis mass flow transmitter. The comparative experiments on two kinds of driving modes are performed under the gas-liquid two-phase flow, and the water flow calibration experiments are conducted. The experimental results show that the vibration amplitude of the flow tube is almost doubled in the same flow rate and gas volume fraction when the transmitter is based on differential drive mode. The measurement accuracy can still reach 0.1% in the case of the single-phase flow, so the differential drive mode can maintain the vibration stability of the flow tube.

**Keywords:** Coriolis mass flowmeter; gas-liquid two-phase flow; drive energy; differential drive mode

## 0 引言

科里奥利质量流量计(以下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、温度等多参数的测量,具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。科氏质量流量计由一次仪表(或称质量流量传感器)和二次仪表(或称变送器)组成。当一

次仪表的流量管振动幅值越接近最佳幅值,科氏质量流量计的测量性能越好。在两相流发生时,流量管内阻尼比会骤然增加,一般比单相流时的高出1~2个数量级<sup>[2-4]</sup>,需要很大的驱动能量才能使其在较高的幅值下振动。但是,驱动能量受到本质安全电路的限制,不可能无限制地增加,从而导致两相流下流量管的振动幅值很小,大大降低了流量管振动信号的信噪比。因此,研究变送器在满足本质安全要求的前提下提升驱动能量具有重要的意义。

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

\* 基金项目:国家自然科学基金(61573124)资助项目

针对两相流发生时的驱动问题,国内外大部分学者研究的是驱动控制方法<sup>[5-10]</sup>。其中,Shimada<sup>[5]</sup>将模拟驱动方法和基于 PLL 的数字合成驱动方法组合起来用于流量管的驱动控制。Hou 等人<sup>[6]</sup>研究了基于 DDS 和 MDAC 的数字驱动方法,可以在气液两相流发生时保持流量管的振动。陶波波等人<sup>[7]</sup>提出变传感器设定值的控制方法,在两相流发生时保持振动的稳定性,但是,没有深入研究如何提升驱动能量。Henry 等人<sup>[11]</sup>和 Zamora 等人<sup>[12]</sup>认为传感器的几何形状、流量管驱动器的数量等因素影响振动幅值的大小。他们采用 B 形双驱动器结构的传感器。双驱动器在没有超过安全栅能量限制的情况下,使驱动能量加倍,因此,流量管获得了较高幅值的振动。但是,目前 B 形科氏质量流量传感器较为少见,多数情况科氏质量流量传感器只具有单个驱动器。因此,该方法不适用于单驱动器的科氏质量流量传感器。

科氏质量流量变送器的驱动能力主要由驱动电路输出能力决定。同时,为了保证工业应用中仪表的安全,驱动电路的输出能量必须受到本质安全电路的限制,电路上表现为驱动信号经过齐纳式安全栅。目前,国内的变送器基本上采用单端驱动方式<sup>[13-16]</sup>,该种方式下两相流发生时驱动能量不足,流量管的振动幅值较低。

为此,本文首先分析采用单端驱动方式的科氏质量流量变送器的驱动能力以及存在的提升空间。针对分析的结果,提出差分驱动方式。然后,研制实现电路,并进行理论分析,得出该方式仍然满足本质安全的要求,同时可以增加驱动能量。再将其应用于变送器,进行气液两相流情况下驱动能量的对比实验,以验证差分驱动方式可以提升驱动能量;进行单相水动态标定实验,以验证差分驱动方式的稳定性。

## 1 问题分析

传统的变送器采用单端驱动方式,在气液两相流发生时,出现了驱动能量不足的问题。为了解决该问题,首先对流量计的驱动系统进行分析。该驱动系统由驱动电路、安全栅和流量管激振线圈组成,如图 1 所示。

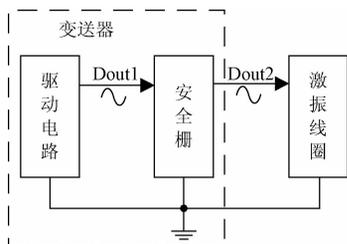


图 1 科氏质量流量计单端驱动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-ended drive mode of Coriolis mass flowmeter

变送器内部的驱动电路输出正弦驱动信号  $Dout1$ , 该信号首先经过安全栅电路变为  $Dout2$ , 然后作用到流量管激振线圈上。 $Dout1$  与  $Dout2$  的相位和频率完全相等,但是,幅值前者大于后者。单端驱动方式下驱动回路设计简单,变送器只输出一路驱动信号,另一端直接接地,激振线圈一端接受驱动信号,另一端和变送器共地。变送器的驱动能量主要与驱动系统有关系,为此,首先对国内某企业的科氏质量流量计驱动系统电路进行分析,该驱动系统部分电路如图 2 所示。

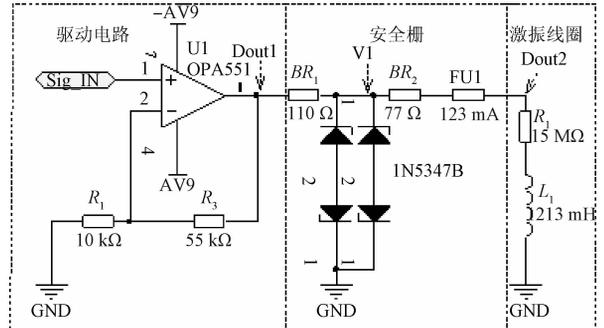


图 2 科氏质量流量计驱动系统部分电路

Fig. 2 The part circuit diagram of Coriolis mass flowmeter drive system

如图 2 所示,驱动电路部分是最后一级的功率放大电路,该电路由功率放大芯片 OPA551 和外围电阻组成。 $Sig\_IN$  信号是前级电路合成的信号,经过功率放大之后输出到安全栅。齐纳式安全栅采用反向串联稳压二极管 1N5347B 来限制驱动电压,其限制值大约是  $\pm 10.5$  V;通过限流电阻  $BR_1$  和  $BR_2$  限制驱动电流,该电阻的最大功率是 1 W;FU1 是快速熔断器,可以在意外情况发生时快速切断驱动回路。使用电阻  $R_3$  和电感  $L_1$  来代替流量管激振线圈,参数来自于艾默生 CMF025 型传感器。从安全栅限流电阻的参数可以计算出驱动电流的限制值约为 80 mA,一旦电流大于限制值,限流电阻将会被烧坏,从而切断电路;反向串联稳压管的作用是当 V1 处电压幅值大于限制值时,此处的电压将会被钳位,从而限制了变送器的驱动输出电压。

根据上述分析可知,变送器所能输出的最大驱动能量取决于安全栅的限制值。如果当前的驱动能量已经达到该限制值,那么变送器的驱动能量将无法再进行提升。从整个驱动电路来看,功率放大部分输出正弦电压信号最大幅值只有 7.2 V (OPA551 芯片不是轨到轨输出),再经过安全栅上限流电阻的分压,反向串联稳压管上 (V1 处) 的电压最大只有 4.92 V,未达到其限制值的一半;而电流有效值最大只有 10.7 mA,远远小于 80 mA。因此,变送器的驱动能量并没有达到安全栅的限制值,依然有很大的提升空间。提升变送器的驱动能量,可以提升

OPA551 芯片的供电电压,从而提升输出电压,但是,该方法涉及到整个变送器的供电方案,涉及面较广。为此,我们提出了差分驱动方式。

## 2 差分驱动方式

### 2.1 提出与实现

差分驱动方式的示意图如图3所示,变送器内部的驱动电路输出两路驱动信号  $Dout1+$  和  $Dout1-$ ,它们幅值和频率都相同,相位相差  $180^\circ$ ,组成一对差分信号,经过安全栅之后作用到激振线圈上。该方法下,整个变送器不需要改变电源设计,仅仅多输出一路反向的驱动信号,简单且容易实现。为了实现差分驱动方式,采用双运放组成的功率放大电路代替传统的单运放功率放大电路,并且对安全栅电路进行修改。

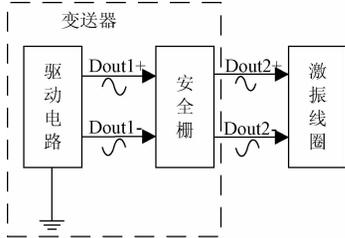


图3 差分驱动方式的示意图

Fig.3 Schematic diagram of differential drive mode

差分驱动方式下驱动系统部分电路如图4所示,前级电路合成的驱动信号  $Sig\_IN$  经过由两片 OPA551 芯片和外围电阻组成的单端转差分功率放大电路,用差分的方式进行输出。由电路原理可知,为了保证  $Dout1+$  和

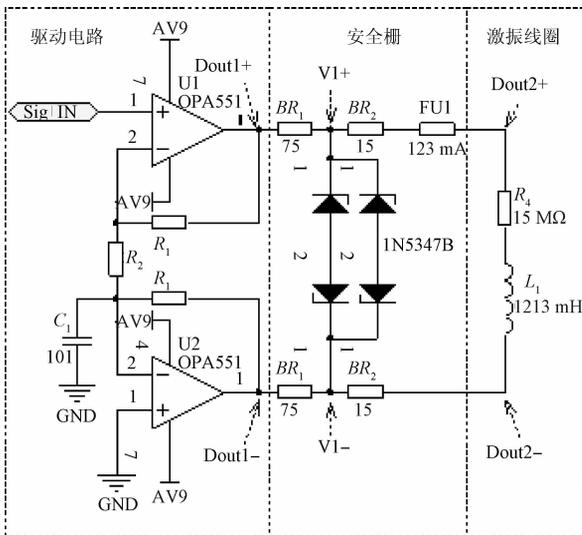


图4 差分驱动方式下部分驱动电路

Fig.4 The part circuit diagram in differential drive mode

$Dout1-$ 组成差分信号,外围电阻阻值需要保证  $R_3 = R_1 + R_2$ 。为了使激振线圈上的驱动信号为平衡的差分信号,将安全栅电路中限流电阻均分到两路驱动线上,电阻值为原来的一半,使安全栅变成对称结构,这种设计可以使差分驱动信号经过安全栅之后依然是平衡的。其次,在实现的过程中,发现差分驱动方式下驱动回路是“虚地”的状态,一旦回路中有高频干扰,该干扰信号就会在回路中来回震荡,使驱动信号上耦合很大的高频信号,最终无法使用。因此,在回路中增加了一个  $100\text{ pF}$  的电容  $C_1$ ,用于滤掉旁路电路中的高频信号。

### 2.2 本安分析

差分驱动方式能否满足安全栅的要求是最终能否应用于变送器的关键。为此,对差分驱动方式进行了本安分析。如图4所示,  $Dout1+$  和  $Dout1-$  是功率放大电路两路驱动输出信号,  $V1+$  和  $V1-$  是稳压管两端电压信号,  $Dout2+$  和  $Dout2-$  是激振线圈两端电压信号。变送器在差分驱动方式下,  $Dout1+$  和  $Dout1-$  之间电压幅值最大为  $14.4\text{ V}$ 。从理论计算得出,  $V1+$  和  $V1-$  之间电压幅值最大为  $9.68\text{ V}$ ,仍然小于反向串联稳压管两端电压限制值。同时,驱动回路的电流有效值最大只有  $21.3\text{ mA}$ ,仍然小于驱动回路电流的限制值。所以,差分驱动方式满足本质安全的要求。同时,驱动回路的电流值几乎提升了1倍,从而增强了驱动能量。

## 3 实验测试

为了验证差分驱动方式可以提升变送器的驱动能量,进行了气液两相流下单端驱动和差分驱动的驱动能量对比实验;同时,为了验证差分驱动方式的驱动稳定性,对采用差分驱动方式的变送器进行了单相水流量标定实验。

### 3.1 气液两相流下驱动能量测试

科氏质量流量计气液两相流实验装置如图5所示,主要由水箱、水泵、空气压缩机、科氏质量流量传感器、科氏质量流量变送器、气体浮子流量计、阀门及管道等组成。管道上游和下游各安装一台 Micro Motion 公司生产的科氏质量流量传感器,型号为 CMF025。下游传感器作为本次实验的对象,匹配采用单端驱动方式或者差分驱动方式的变送器。

进行驱动能量测试实验的过程为:开启阀门1至最大开度,再调节阀门3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加入气体,管道内介质的状态从单相切换到气液两相流,然后用示波器采集气液两相流状态下流量管振动信号波形和驱动信号波形。为了观察驱动电流的大小,将 FLUKE 万用表串联进驱动回路中,测试驱动回路上电流的有效

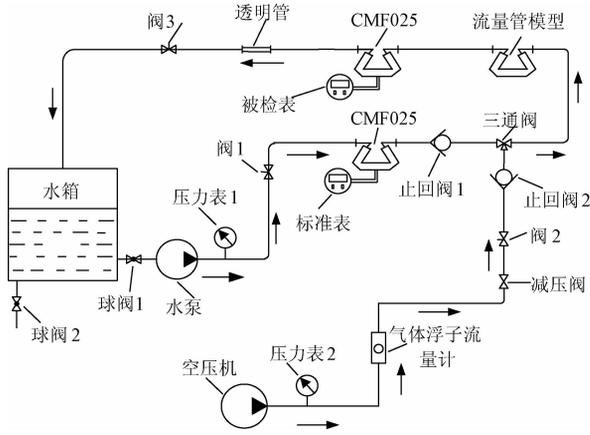


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental device

值。实验分别选取大 (16 kg/min)、中 (8 kg/min)、小 (4 kg/min) 3 个不同的液体流量,且在每个液体流量点下,分别加入 4 种不同流量的气体,从而形成 4 种不同的含气量。使用密度降来表示含气量大小。密度降的计算如下:

$$D_d = \frac{D_0 - D_g}{D_0} \quad (1)$$

式中:  $D_0$  为单相液体(水)的密度,  $D_g$  为两相时流体的混合密度。一般来说,密度降越高,代表含气量越大。变送器通过频率和温度实时计算得到密度降。

单端驱动方式和差分驱动方式时采集的驱动信号分别是图 2 中的 Dout1 和图 4 中的 Dout1 +。两种方式采集的流量管振动信号均是经过信号调理电路放大和滤波后信号,放大倍数是 9.1 倍。表 1 和表 2 分别是为不同流速和不同含气量下单端驱动方式和差分驱动方式的测试结果。

表 1 单端驱动方式的测试结果

Table 1 Test results of single-ended drive mode

流量/ (kg·min <sup>-1</sup> )	密度降/ %	振动幅值/ V	驱动幅值/ V	驱动电流有 效值/mA
16	单相流	4.12	2.85	3.06
16	3	0.56	7.30	10.68
	5	0.40	7.30	10.68
	7	0.31	7.30	10.70
	10	0.24	7.30	10.69
8	3	0.80	7.30	10.65
	5	0.62	7.30	10.64
	7	0.46	7.30	10.65
	10	0.40	7.30	10.66
4	3	1.76	7.30	10.49
	5	1.25	7.30	10.60
	7	1.20	7.30	10.55
	10	0.98	7.30	10.57

表 2 差分驱动方式的测试结果

Table 2 Test results of differential drive mode

流量/ (kg·min <sup>-1</sup> )	密度降/ %	振动幅值/ V	驱动幅值/ V	驱动电流有 效值/mA
16	单相流	4.09	1.29	3.04
16	3	1.44	7.27	21.39
	5	0.96	7.27	21.40
	7	0.74	7.27	21.39
	10	0.54	7.30	21.41
8	3	1.42	7.30	21.20
	5	1.19	7.30	21.24
	7	0.91	7.30	21.25
	10	0.73	7.30	21.23
4	3	2.67	6.87	19.85
	5	2.28	7.26	21.05
	7	2.06	7.30	21.05
	10	1.76	7.30	21.08

根据表 1 和表 2 的数据可以看出,当气液两相流发生时,变送器本身已经输出最大的驱动能量。在相同液体流量下,含气量越大,流量管振动幅值越低;在相同含气量下,液体流量越大,流量管振动幅值越低。从表 1 和表 2 数据对比来看,差分驱动方式下驱动回路电流有效值几乎是单端驱动时的 2 倍,相同液体流量和含气量下,流量管的振动幅值也几乎是单端驱动时的 2 倍,因此,差分驱动方式在满足本质安全要求的前提下提升了驱动能量,增大的两相流发生时流量管的振动幅值。

### 3.2 单相流下驱动稳定性测试

高精度科氏质量流量计要求系统稳定性很好,而差分驱动方式改变了原有的驱动回路,为了解是否仍然能够保证整个流量计系统的稳定,对采用差分驱动方式的变送器进行了单相水流量标定实验。

水流量标定实验装置如图 6 所示,该实验装置采用称重法测量原理,可以进行单相流和气液两相流测量实

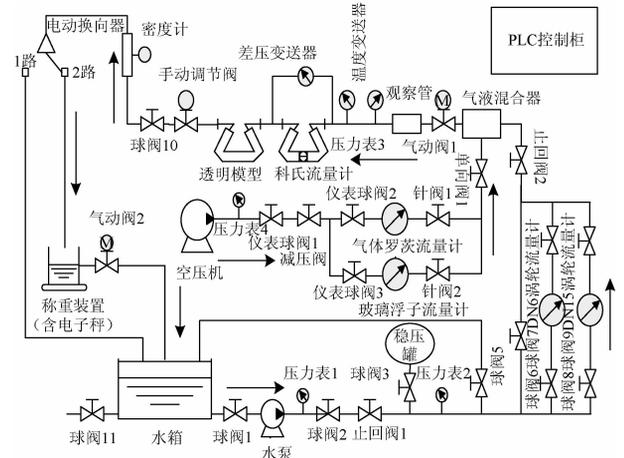


图 6 标定实验装置

Fig. 6 Experimental device of calibration

验,本次只进行单相水流量标定实验。单相水的循环通道主要由水箱、水泵、稳压罐、液体涡轮流量计、气液混合器、差压计、透明模型、被测科氏质量流量传感器、密度计、换向器、称重装置(由电子秤和称重水箱组成)、气动球阀、手动球阀和管道等组成。被测科氏质量流量传感器型号为艾默生 DN25,匹配采用差分驱动方式的变送器。整个实验装置通过 PLC 控制,以 WinCC 监控软件为上位机,调度控制各个器件。实验之前,换向器处在 1 路,水通过水路通道,流过被测科氏质量流量计,流回水箱,调节球阀 5 和手动调节阀,使水流量为合适值。开始实验时,称重装置净重值清零,换向器迅速切换至 2 路,PLC 同时采集被测科氏质量流量计输出的质量流量脉冲。实验结束时,换向器切换回 1 路,PLC 同时停止采集被测科氏质量流量计输出的质量流量脉冲,当称重装置稳定后,PLC 采集其净重值。通过比较实验过程中被测科氏质量流量计累积质量流量值和称重装置称量的累积质量,便可以得到动态标定的实验结果。本次标定实验流量设置为 120、60、30 和 12 kg/min,量程比达到 10:1。具体的测量结果如表 3 所示。

表 3 单相水动态质量法标定实验测试数据  
Table 3 Calibration test data of dynamic quality  
method of single-phase water

瞬时流量/ (kg·min <sup>-1</sup> )	测量值/ kg	标准值/ kg	误差/ %	平均误 差/%	重复性/ %
125.0	35.348	35.356	-0.023	0.032	0.016
	35.336	35.344	-0.023		
	35.336	35.354	-0.051		
61.1	35.563	35.560	0.008	0.010	0.014
	35.593	35.584	0.025		
	35.555	35.556	-0.003		
30.6	35.695	35.678	0.048	0.035	0.028
	35.727	35.708	0.053		
	35.669	35.668	0.003		
12.0	35.096	35.088	0.023	0.004	0.028
	35.004	34.998	0.017		
	34.966	34.976	-0.029		
124.8	35.378	35.376	0.006	-0.023	0.028
	35.382	35.390	-0.023		
	35.350	35.368	-0.051		

由表 3 数据可见,测量误差均在 0.1% 以内,重复性 0.03% 以内,达到了 0.1 级的测量精度。因此,采用差分驱动方式时,变送器驱动稳定性很好。

## 4 结 论

对采用单端驱动方式的科氏质量流量变送器的驱动能力进行分析,发现其驱动电压未达到安全栅电压限制

值的一半,驱动电流远远小于安全栅电流的限制值。因此,依然具有很大的提升空间。

为了提升变送器的驱动能量,提出了差分驱动方式。研制相应的实现电路,并进行理论分析。分析结果显示,差分驱动方式依然满足本质安全的要求,并且能将变送器的驱动能量提升 1 倍。将电路应用到变送器中,实现变送器的差分驱动方式。

进行了气液两相流情况下驱动能量的对比实验。实验结果表明,在气液两相流发生时,基于差分驱动方式的变送器驱动回路电流有效值是基于单端驱动方式时的 2 倍,相同流量和相同含气量下,流量管振动幅值也几乎是单端驱动时的两倍。因此,差分驱动方式增加了变送器的驱动能量,增大了两相流发生时流量管的振动幅值。

对采用差分驱动方式的变送器进行单相水流量标定实验,实验结果表明,在单相水流量下测量精度为 0.1 级,重复性误差小于 0.03%。因此,采用差分驱动方式的变送器稳定性很好。

## 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] 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 & Control, 2008, 41(7): 208-212.
- [3] 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.
- [4] REIZNER J. Coriolis-the almost perfect flow meter [J]. IEEE Computing & Control Engineering, 2003, 14(4): 28-33.
- [5] SHIMADA H. Coriolis flowmeter [P]. US Patent, No. 2010/0268484A1.
- [6] 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.
- [7] 陶波波,徐科军,侯其立,等.变传感器设定值的科氏质量流量管控制方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 712-720.
- [8] TAO B B, XU K J, HOU Q L, et al. Variable sensor-setting-value based control method for Coriolis Mass flowtube flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 712-720.
- [9] HENRY M P, ZAMORA M E. Startup techniques for

- adigital flowmeter [ P ]. US Patent, No. 2011/0185820 A1.
- [ 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 ] 李苗, 徐科军, 侯其立, 朱永强, 李叶. 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. 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.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] ZAMORA M E, HENRY M P. An FPGA implementation of a digital Coriolis mass flow metering drive system [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7) : 2820-2831.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 侯其立, 徐科军, 李叶, 等. 用于微弯型科氏质量流量计的数字变送器研制 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(6) : 540-545.  
HOU Q L, XU K J, LI Y, et al. Development of digital transmitter for micro-bend type Coriolis mass flowmeter [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2011, 25(6) : 540-545.
- [ 16 ] 石岩, 侯其立, 刘翠, 等. 基于 DSP 的直管式科氏质量流量变送器研制 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10) : 1130-1139.  
SHI Y, HOU Q L, LIU C, et al. Development of straight-tube type Coriolis mass flow transmitter based on DSP [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(10) : 1130-1139.

### 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 Hefei University of Technology. His main research interest is embedded system and its applications.



**徐科军** (通信作者), 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 now. His research interests are in the areas of the sensor technology, process instrumentation, and digital signal processing.