

# 数字信号处理技术在科氏质量流量计中的应用\*

张建国,徐科军,方正余,乐静,刘文

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

**摘要:**科氏质量流量计是目前应用范围最广、发展速度最快的流量计之一。数字信号处理技术是科氏质量流量计的核心技术,直接决定其测量精度、测量稳定性等性能指标;而流量传感器输出信号的数学模型是信号处理的依据和基础。国内外学者提出了多种信号处理方法,但是没有根据不同的信号模型和不同的应用场合对各种信号处理方法进行比较和评价。为此,根据不同数字信号处理方法的特征量提取原理,分析了其具有的优缺点。针对科氏质量流量计单相流、批料流与气液两相流测量这3种典型应用场合中存在的关键技术问题,依据随机游动信号模型、突变信号模型和自回归滑动平均(ARMA)信号模型,分别从计算精度、响应速度、收敛性、抗干扰能力和对参数变化的敏感度等方面,对不同信号处理方法进行考核和对比,确定了3种典型应用场合下,解决关键技术问题,性能最佳的数字信号处理方法。

**关键词:**科氏质量流量计;数字信号处理方法;单相流测量;批料流测量;气液两相流测量

中图分类号: TH814 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

## Applications of digital signal processing technology in Coriolis mass flowmeter

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

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

**Abstract:** Coriolis mass flowmeter is one of the most widely used and fastest growing flowmeters. Digital signal processing technology is the core of Coriolis mass flowmeter and it directly determines the measurement accuracy, measurement stability and etc. The mathematical model of sensor output signal is the basis of signal processing. Scholars at home and abroad have proposed many signal processing methods for Coriolis mass flowmeter. But there is a lack of comparison and evaluation for these signal processing methods based on different mathematical models and different applications. Therefore, the advantages and disadvantages of different signal processing methods are analyzed according to their feature extraction principles. The calculation accuracy, response rate, convergence, anti-jamming capability and sensitivity of different signal processing methods are compared and evaluated according to random walk model of single flow, mutant signal model of batch flow and ARMA signal model of gas-liquid two-phase flow. The optimized signal processing methods are determined for signal flow measurement, batch flow measurement and gas-liquid two-phase flow measurement to solve key technical issues.

**Keywords:** Coriolis mass flowmeter; digital signal processing method; single-phase flow measurement; batch flow measurement; gas-liquid two-phase measurement

## 0 引言

科里奥利质量流量计(简称科氏质量流量计)可以直接测量质量流量,同时可以测量被测流体密度等物理量,是当前发展最为迅猛的流量计之一。随着数字信号

处理技术和数字处理芯片迅速发展,目前应用数字信号处理方法、基于数字处理芯片的数字式科氏质量流量计正在逐步取代应用模拟信号处理方法、基于模拟电路的传统式科氏质量流量计<sup>[1-3]</sup>。科氏质量流量计的关键技术主要包括流量管驱动技术<sup>[4]</sup>、传感器输出信号拾取技术、现场总线通讯技术<sup>[5]</sup>和数字信号处理技术<sup>[6]</sup>等。其

中数字信号处理技术是最为核心部分,其处理结果直接决定科氏质量流量计流量测量结果,而流量测量的准确性是考核科氏质量流量计最为重要的性能指标。因此,数字信号处理方法的优劣对科氏质量流量计整体性能起着决定性的关键作用。

迄今为止,国内外学者对科氏质量流量计数字信号处理方法做了深入而广泛的研究,并提出了多种有效的数字信号处理方法。主要包括基于离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)频谱分析的信号处理方法<sup>[7-11]</sup>、基于 Goertzel 算法的信号处理方法<sup>[12-15]</sup>、基于希尔伯特变换的信号处理方法<sup>[16-18]</sup>、基于过零检测的信号处理方法<sup>[19-21]</sup>、基于正及负频率影响的离散时间傅里叶变换(discrete time Fourier transform, DTFT)信号处理方法<sup>[22-24]</sup>、基于相关法的信号处理方法<sup>[25-27]</sup>和基于正交解调的信号处理方法<sup>[28-32]</sup>等。为了对不同信号处理方法进行对比分析,文献[33]面向单相流测量,对不同相位差测量方法的性能与优缺点进行了综述,但是,未针对批料流与气液两相流下的测量需求进行分析,因此,不够全面;文献[34]对过去20年科氏质量流量计发展的各个方面进行了综述总结,包括传感器结构、传感器模型、应用市场与前景和信号处理方法等,但是,在信号处理部分仅回顾了不同方法的原理,并未给不同方法之间的相互对比的结果;文献[35]对不同信号处理方法在气液两相流下的性能进行了综述,但是,其仿真采用的信号模型仍然为单相流下的随机游动信号模型,与传感器实际输出信号相差较大,因此,其对比分析结论的可靠性有待进一步验证。

上述信号处理方法综述的对比与分析均是基于某一特定应用场合的信号数学模型进行的,随着科氏质量流量计应用范围的不断拓展,其测量应用的场合趋于多样化。而不同的测量应用场合下,由于流型变化、流体状态和干扰量的不同,使得科氏质量流量传感器输出信号呈现出不同的信号特征,输出信号具有不同的信号数学模型。科氏质量流量计应用的最终目的是对质量流量的高精度测量。不同应用场合下,由于传感器输出信号特征差异,使得科氏质量流量计对质量流量高精度测量的主要因素也发生了变化,从而存在不同的关键技术问题。流量传感器输出信号数学模型是信号处理的依据与基础,因此,根据科氏质量流量计不同应用场合下不同的信号数学模型,针对存在的不同技术问题,采用各种信号处理方法进行比较和评价具有十分重要的意义。

为了对不同数字信号处理方法进行更好的对比与评价,首先根据不同信号处理方法的测量原理,对比分析了其固有的优缺点。基于科氏质量流量计在单相流、批料流和气液两相流测量时,流量传感器输出信号的随机游动数学模型、信号突变数学模型和自回归滑动平均

(auto-regressive and moving average, ARMA)数学模型这3种不同的信号数学模型,对不同信号处理方法的计算精度、响应速度、收敛速度、抗干扰能力和敏感度等性能指标进行考核和对比。在对信号处理方法性能指标考核与对比的基础上,根据不同测量需求,为最大限度地提高科氏质量流量计测量性能,选取性能最佳的信号处理方法提供应用的依据。

## 1 相位差、频率和幅值测量方法

根据科氏质量流量计测量原理可知,流经流量管的质量流量与两路传感器输出信号时间差成正比,而时间差由相位差和频率合成。同时,频率直接反映了被测流体的密度,而信号的幅值可以反映流量管的振动情况,即是否工作在最佳振动状态。因此,对科氏质量流量传感器输出信号进行处理的关键是能否对两路信号的相位差、频率和幅值3个特征量进行准确的测量。这直接影响到科氏质量流量计在不同场合下应用的成功与否,即能否对质量流量进行高精度的测量。目前,根据信号处理域的不同,应用于科氏质量流量传感器输出信号特征量测量的方法主要分为两大类,即特征量频域测量方法和特征量时域测量方法。

### 1.1 频域测量方法

频域信号处理的核心思想是将时域信号通过傅里叶变换映射到频域中,在频域中对信号进行分析处理。根据信号变换后的傅里叶系数得出信号频率、相位和幅值信息。由于数字信号处理的均为有限长离散信号,会不可避免地遇到频谱泄露、栅栏效应等问题,导致频域处理方法的精度受到一定的影响,这些问题是频域处理方法需要进一步改进的地方。

#### 1) 基于 DFT 频谱分析的测量方法

DFT 频谱分析的基本原理是通过 DFT 变换得到信号的频谱,由于功率谱可以突出主频率,根据各次谐波上的功率谱,找到最大值,该谱线所对应的频率即为振动管的振动基频的最佳估计,再计算两路信号基频处相位得到相位差。离散傅里叶变换的方法可以有效地抑制谐波噪声和随机噪声对相位差计算的干扰,具有较高的抗干扰能力。但是,当信号为非整周期采样时,会出现频谱泄露现象,导致相位差计算精度降低。为此,徐科军等<sup>[7,36]</sup>提出了采用粗测频率与细测频率相结合的方法和加窗函数的方法,实现了对信号频率的跟踪,抑制了频谱泄露的影响,提高了相位差计算的精度。为了降低 DFT 算法的计算复杂度和提高计算的实时性, Jacobsen E 等人<sup>[37]</sup>提出了滑动的 DFT 算法。

#### 2) 基于 Goertzel 算法的测量方法

科氏质量流量管振动频率基本上在一个固定值小范

围内波动,因此,可以采用 Goertzel 算法快速地计算基频处的傅里叶系数,从而求得两路信号的相位差。此时,Goertzel 算法将谐振器的频率设为信号频率,而不是  $2\pi k/N$ ,这样就解决了非整周期采样带来的泄漏问题。同时,为了提高算法的计算精度,降低算法的计算复杂度,倪伟等人<sup>[38]</sup>提出了将格型自适应陷波滤波器与滑动 Goertzel 算法(sliding Goertzel algorithm, SGA)相结合的方法,实现了对信号频率的实时跟踪和相位差的高精度计算处理。SGA 算法存在收敛过程太长,不能实时求出相位差的缺点,为此,倪伟等人<sup>[39]</sup>提出了采用重叠的矩形窗对增强信号进行截取,通过冗余计算来消除收敛过程的影响。

3) 基于计及负频率影响的 DTFT 的测量方法

为了缩短 SGA 的收敛过程和提高相位差计算精度,采用离散序列傅里叶变换,同时将频谱中的负频率成分考虑进算法处理中,形成计及负频率的 DTFT 算法。DTFT 算法在计算相位差之前需要先预知信号的频率,且信号频率计算精度直接影响到相位差的计算精度。为

此,Hou Q. L. 等人<sup>[40]</sup>将格型自适应陷波器用于信号频率的实时计算与跟踪,具有较高的计算精度与跟踪速度,同时作为对信号的预处理,提高了信噪比。但是,DTFT 算法是一个逐步迭代的过程,对于一段时间内较为恒定的信号具有较高的处理精度。当信号在一段时间内发生变化或者微小波动时,DTFT 算法无法良好的处理当前动态变化的相位差,造成较大的计算误差。为此,李叶等人<sup>[41]</sup>提出了加窗滑动离散时间傅里叶变换(sliding discrete time Fourier transform, SDTFT)算法,实现了对时变信号相位差快速跟踪与测量,同时,通过递推算法减少计算量,避免了序列不断叠加出现的数据溢出问题,便于实际系统的实现。

DFT 算法、Goertzel 算法和 DTFT 算法本质上都是通过傅里叶系数来计算两路信号之间的相位差,但是这3种方法是一个逐步改进的过程,在改进的过程中,也会带来一些新的缺点。频域信号处理算法的演变改进过程如图1所示。

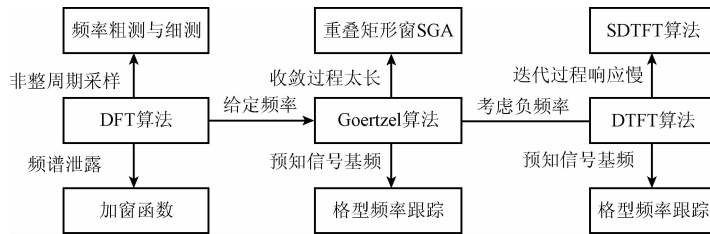


图1 频域处理方法演变与改进

Fig. 1 The evolution and improvement of frequency domain signal processing methods

1.2 时域测量方法

科氏质量流量计域信号处理方法基本原理是根据传感器输出信号所具有的时域特点,采取有针对性的分析与处理。

1) 基于希尔伯特变换的测量方法

希尔伯特变换是目前的一个研究热点,其基于科氏质量流量传感器输出信号的正弦性,通过 90°移相器,构造两路解析信号,利用正余弦信号的性质,实现对相位、频率和幅值的测量。

希尔伯特变换方法具有无需预知信号频率、无收敛过程、计算精度高等优点。但是,其抗干扰能力较弱,计算精度受噪声干扰较大,要求信号具有较高的信噪比。因此,信号的预滤波环节十分重要。杨辉跃等人<sup>[42]</sup>、黄丹平等人<sup>[43]</sup>和刘维来等人<sup>[44]</sup>分别提出了基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)降噪、基于小波变换和多相抽取滤波以及带通滤波的信号预处理方法,有效地增强了信号的信噪比,提高了相位差计算精度。

2) 基于过零检测的测量方法

过零检测算法是一种应用较早科氏质量流量计域

信号处理方法,其基本原理是通过提取周期性的过零点得到相位和频率信息。过零检测算法具有运算量小、无收敛过程和响应速度快等优点,但是由于其为时域处理方法,容易受谐波噪声和随机噪声的干扰,导致计算结果波动大。同时,过零点计算的精度直接决定了频率和相位差的计算精度。为此,侯其立等人<sup>[45]</sup>提出了将带通滤波和二次 Lagrange 插值拟合相结合的数字式过零检测方法,郑德智等人<sup>[19]</sup>提出将多抽一滤波的有限冲击响应(finite impulse response, FIR)滤波器和切比雪夫曲线拟合相结合的数字式过零检测方法,均实现了对噪声的良好抑制与过零点的精确提取,提高了频率与相位差的计算精度。

3) 基于相关法的测量方法

相关法的基本思想是在理想情况下噪声与信号之间、噪声与噪声之间是互不相关的。因此,可以通过两路信号的互相关运算实现对相位差的测量,同时可以有效的消除随机噪声的干扰。但是,相关运算是要求信号为整周期的积分运算,在实际情况下,由于环境干扰和频率波动,很难做到整周期采样,导致相关法计算相位差时产

生较大的误差。为此,杨俊等人<sup>[25]</sup>提出了一种整周期采样的调整算法,使得参与相关运算的序列尽可能的接近整周期,一定程度上克服了非整周期采样带来的计算误差。涂亚庆等人<sup>[46]</sup>提出了一种基于构造参考信号和多次相关运算的信号处理方法,可以实现任意长度序列的相关运算的相位差计算,从根本上克服了相关法中非整周期采样带来的计算误差。同时,虽然相关法可以很好地消除随机噪声的干扰,但是受谐波噪声的影响较大,需要对信号进行预处理,以消除谐波噪声对相位差计算的影响。

#### 4) 基于正交解调的测量方法

科氏质量流量传感器的信号频率随着流体密度变化而变化,因此,可以将该信号看作是调频信号,并用正交解调的方法对信号进行处理。利用一个接近信号频率的信号对传感器输出信号进行正交解调,再通过低通滤波

器,从而实现对其幅值、频率和相位同时进行跟踪计算。徐科军等人<sup>[47]</sup>的研究发现,该方法具有测频范围广、对谐波干扰抑制能力强和短时间内检测到频率偏移的优点,但是,计算的精度受随机噪声的干扰较大。同时,该方法实现的基础是对高频分量和噪声分量良好滤波,如果滤波效果不好将会带来较大的测量误差,因此,低通滤波器的设计是该方法的一个关键环节,直接决定了算法后续的处理精度。为此,徐科军等人<sup>[28]</sup>提出采用梳状滤波器与低通加窗 FIR 滤波器相结合的两级低通滤波,实现对高频谐波噪声和随机噪声的良好抑制,保证了正交解调算法的计算精度。时域信号处理方法汇总如图2所示。

上述7种科氏质量流量计信号处理方法都有各自的优点与缺点,如表1所示。

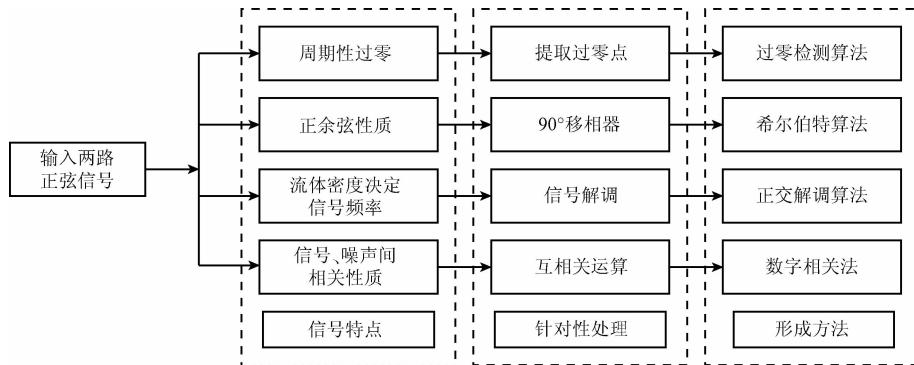


图2 时域信号处理方法汇总

Fig. 2 The induction of time domain signal processing methods

表1 各信号处理方法优缺点对比

Table 1 The advantages and disadvantages of different signal processing methods

方法	优点	缺点
DFT 频谱分析法	有效抑制谐波噪声和随机噪声干扰	需要整周期采样和频谱校正
Goertzel 算法	计算固定频率点傅里叶系数,消除了非整周期采样带来的频谱泄露	需要预知信号基频,收敛过程较长
DTFT 算法	考虑负频率对相位计算的影响,逐点输出傅里叶系数,相位差计算精度高	需要预知信号基频,迭代过程使得响应速度较慢
希尔伯特变换算法	同时跟踪频率、相位和幅值信息,无收敛过程,无迭代	易受噪声干扰,信号的信噪比要求较高,需要良好的信号预处理
过零检测算法	运算量小,无收敛过程,响应速度快	易受谐波噪声和随机噪声干扰,对过零点提取要求较高
数字相关法	有效抑制随机噪声干扰	易受谐波噪声影响,需要整周期采样
正交解调法	同时跟踪频率、相位和幅值信息,有效抑制谐波噪声,信噪比高时计算精度高	易受随机噪声干扰,对低通滤波器设计要求较高

## 2 单相流测量分析

### 2.1 随机游动时变信号模型

科氏质量流量计用于稳定单相流测量时,由于流速

变化小、流型稳定、传感器振动平稳,仿真时通常认为两路传感器输出信号为幅值和频率固定的正弦信号,在考核算法精度时常常默认为相位也是固定不变的。但是,在实际情况下,由于受到环境变化和现场工业设备干扰等因素的影响,传感器输出信号的频率、幅值和相位会在

出现微小的随机波动。为此,倪伟等人<sup>[38]</sup>提出了采用随机游动模型(random walk model, RWM)来描述科氏质量流量传感器的输出信号。

$$x(n) = A(n) \sin(\omega(n) + \varphi(n)) + \sigma_e e(n) \quad (1)$$

式中:  $e(n)$  是零均值、方差为 1 的高斯白噪声。幅值  $A(n)$ 、频率  $\omega(n)$  和相位  $\varphi(n)$  均按照随机游动模型变化,即:

$$A(n) = A(n-1) + \sigma_A e_A(n) \quad (2)$$

$$\omega(n) = \omega(n-1) + \sigma_\omega e_\omega(n) \quad (3)$$

$$\varphi(n) = \varphi(n-1) + \sigma_\phi e_\phi(n) \quad (4)$$

式中:  $e_A(n)$ 、 $e_\omega(n)$  和  $e_\phi(n)$  均为零均值、方差为 1 的高斯白噪声,其变化幅度分别由  $\sigma_A$ 、 $\sigma_\omega$  和  $\sigma_\phi$  控制,且  $e(n)$ 、 $e_A(n)$ 、 $e_\omega(n)$  和  $e_\phi(n)$  之间互不相关。

李叶等人<sup>[41]</sup>通过对平稳单相流下传感器实际输出信号的研究发现,相位变化的幅度应低于给定相位的 1%, 频率变化的幅度低于振动频率的 0.01%, 并提出了改进的随机游动模型来描述传感器输出信号。

$$\omega(n) = \lambda_\omega [\omega(n-1) + \sigma_\omega e_\omega(n)] \quad (5)$$

$$\phi(n) = \lambda_\phi [\phi(n-1) + \sigma_\phi e_\phi(n)] \quad (6)$$

式中:  $\lambda_\omega$  和  $\lambda_\phi$  分别控制  $\omega(n)$  和  $\phi(n)$  的变化幅度。

根据平稳单相流测量应用场合下科氏质量流量传感器输出信号特征与信号模型可知,信号相位差、频率和幅值 3 个特征量呈现出随机游动的特点。采用文献[48]所提的格型自适应滤波的方法对频率进行跟踪计算,跟踪测量精度优于 0.002%。此时,限制科氏质量流量计对单相流进行高精度计量的关键技术问题为:信号处理方法能否对游动的相位差进行良好的跟踪;同时,保持较高的相位差计算精度。因此,下面着重从这两个方面对不同信号处理方法进行对比分析,以得出针对单相流应用中关键技术问题解决效果最佳的信号处理方法。

### 2.2 信号处理方法应用对比

艾默生 CMF025 型科氏质量流量传感器满管振动时的信号基频为 135 Hz,因此仿真时采用 135 Hz 作为仿真信号基频。根据随机游动模型在 MATLAB 中构造两路仿真信号,仿真参数为  $f_0 = 135$  Hz,  $f_s = 2000$  Hz,  $\sigma_A = 10^{-4}$ ,  $\sigma_\omega = 10^{-6}$ ,  $\sigma_\phi = 10^{-4}$ ,  $A_0 = 1$ ,  $\Delta\varphi = 0.001$ 。

为了跟踪信号频率的变化情况为 DTFT 算法和 Goertzel 算法提供频率信息,同时,为了滤除信号中的噪声,提高信号的信噪比,首先用格型自适应滤波器对信号进行滤波预处理,得到信号的频率信息。再对滤波后的增强信号进行相位差估计的算法处理。因为格型自适应滤波器存在一定的收敛过程,因此,取 2 000 点之后的增强信号进行处理,以消除收敛过程对相位差估计的影响。

下面分别用上述的各种信号处理方法对仿真信号进行处理,并分析对比相位差估计结果,以得出在单相流随机游动模型下应用最佳的信号处理方法。

由于信号基频为 135 Hz,采样频率为 2 000 Hz,此时信号为非整周期采样,导致基于 DFT 的信号处理方法由于频谱泄露而造成算法对相位差的跟踪速度和精度较差。而基于循环移位定理的滑动 DFT 方法,由于对滑动长度  $N$  有一定的要求,即  $N$  要满足  $k = N \cdot f_0 / f_s$  其中  $K$  为第  $K$  次谐波,这一条件在实际中满足较难。因此,为了抑制 DFT 方法由于非整周期采样造成的频谱泄露,同时满足信号处理的实际要求,最终采用分段加窗的 DFT 方法对信号进行仿真处理,相位差估计结果如图 3 所示。

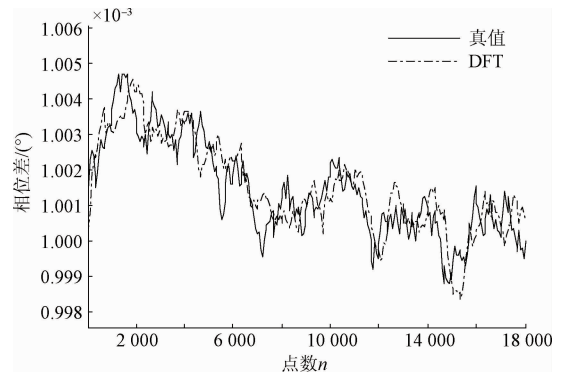


图 3 DFT 算法相位差估计结果

Fig. 3 The phase difference estimation results of DFT algorithm

由图 3 可见,分段加窗的 DFT 方法基本上可以反映相位差的变化情况。但是,由于每个分段处理周期内通过寻找功率谱峰值点的方法只能得出一个相位差信息,因此,得到的有效数据较少,使得该方法的计算整体的计算精度较低。图 3 中的虚线是将得到的有效点数横坐标拉长的显示效果,实际的有效数据只有 305 点。

采用 SGA 算法对信号进行处理,相位差估计结果如图 4 所示。

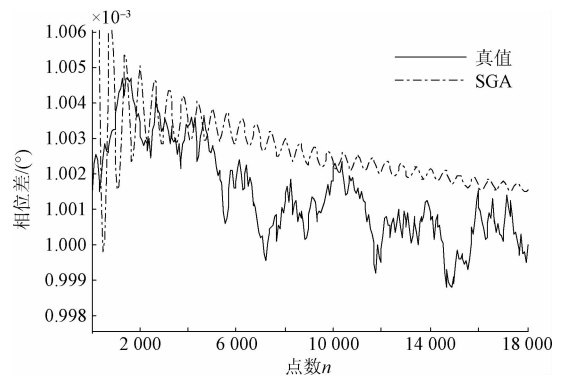


图 4 SGA 算法相位差估计结果

Fig. 4 The phase difference estimation results of SGA

由图 4 可见,SGA 算法由于未考虑到负频率的影响,算法的收敛过程较长,由于迭代过程的影响,使得算法无

法跟踪小相位的变化。为此,采用重叠矩形窗 SGA 方法通过冗余计算来抑制收敛过程对处理结果的影响。相位差估计结果如图 5 所示。

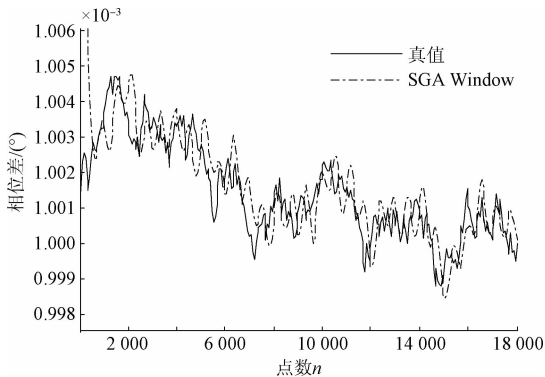


图 5 改进的 SGA 算法相位差估计结果

Fig. 5 The phase difference estimation results of improved SGA

由图 5 可见,采用重叠矩形窗冗余计算 SGA 方法,基本上抑制了算法收敛对相位差计算的影响,能够较好地反映相位差变化的情况。但是,由于 SGA 算法对小相位变化不敏感,使得计算结果波动较大,且冗余计算大大的增加了算法计算量,使得实际应用较为困难。

采用希尔伯特算法对信号进行仿真处理,相位差估计结果如图 6 所示。

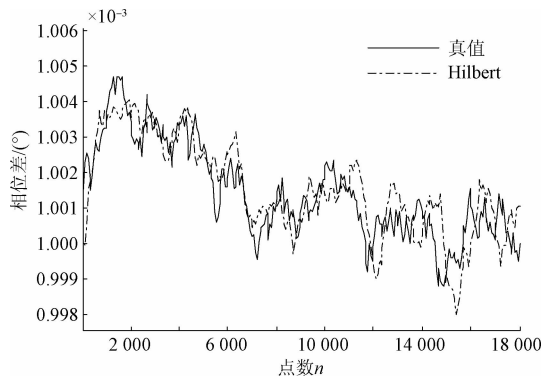


图 6 希尔伯特算法相位差估计结果

Fig. 6 The phase difference estimation results of Hilbert algorithm

由图 6 可见,希尔伯特算法基本上可以跟踪相位差变化的情况,但是由于希尔伯特变换本身的端点效应,使得变换所得的数据两端出现飞逸现象,即使通过加窗函数进行抑制,仍无法完全消除端点效应的影响,这使得计算结果有所波动,并且无法在每个点输出准确的相位差信息,减少了有效点数,使得整体的相位差处理精度受到一定的影响。

采用过零检测算法对信号进行仿真处理,相位差估计结果如图 7 所示。

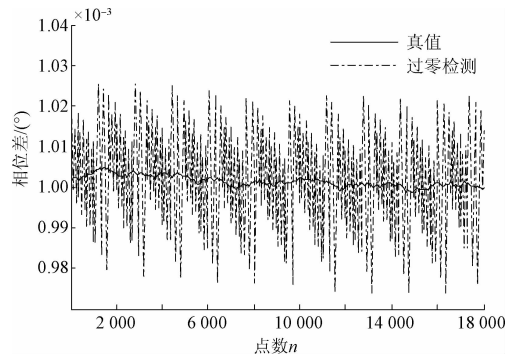


图 7 过零检测算法相位差估计结果

Fig. 7 The phase difference estimation results of zero-crossing detection algorithm

由图 7 可见,过零检测算法,受随机噪声干扰影响较大,处理所得的结果波动较大,无法实现对随机游动相位差的良好跟踪,同时由于每个信号周期只能提取两个过零点,因此只能提供两个相位差信息,有用数据较少,这些都使得过零检测算法在处理单相交流信号时精度不高。

计及负频率的 DTFT 算法对信号进行处理时,由于算法原理是逐步迭代的过程,后面信号相位差计算始终受到前面信号相位差的影响,这使得相位差的跟踪速度与精度受到的影响。仿真处理结果如图 8 所示。可见,因为算法考虑了负频率部分对相位差计算的影响,因此算法收敛速度较快。但是,由于迭代过程的影响,使得算法处理所得的相位差较为平滑,但是无法反应当前相位差真实的变化情况,带来较大的跟踪和测量误差。

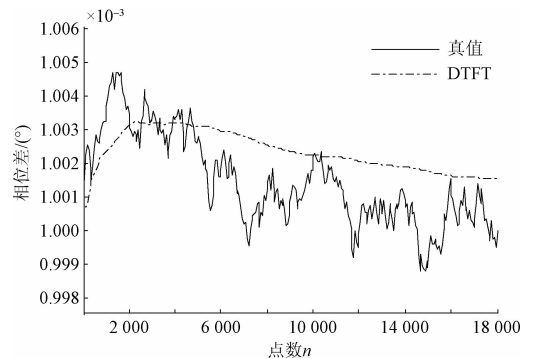


图 8 DTFT 算法相位差估计结果

Fig. 8 The phase difference estimation results of DTFT algorithm

解决该问题有两种思路:1)每隔固定的信号点数对 DTFT 算法进行重新初始化;2)采用加矩形窗的滑动 DTFT 算法。前者会导致算法需要不断的重收敛影响算法的计算精度,而后者由于采用了递推算法,无需重新收敛,在不增加算法运算量的基础上成功地提高了算法的跟踪速度与精度。SDTFT 算法的相位差结果如图 9 所示。

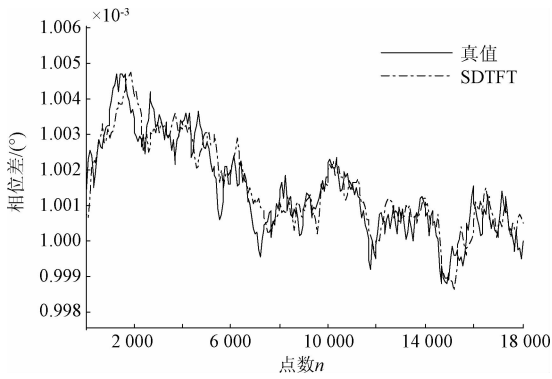


图9 SDTFT算法相位差估计结果

Fig. 9 The phase difference estimation results of SDTFT algorithm

由图9可见,SDTFT算法具有良好的跟踪速度与精度,并且由于在每个采样点都可以输出相位差信息,有效处理结果点数较多,保证了整体的相位差处理精度。

根据相关法信号处理方法的基本原理可知,由于信号的非整周期采样,会使得相关运算计算所得的相位差产生较大的误差,为了克服非整周期采样,采用了基于构造信号和多次互相关运算的信号处理方法来处理单相流信号,相位差估计结果如图10所示。

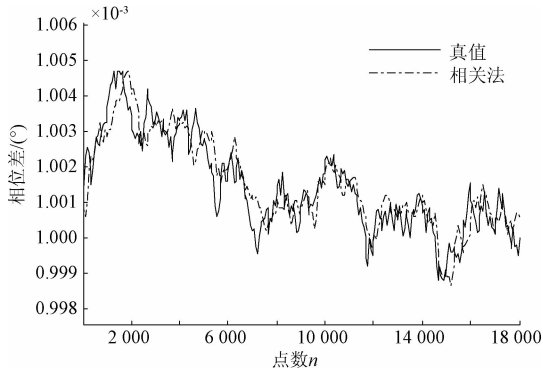


图10 相关法相位差估计结果

Fig. 10 The phase difference estimation results of correlation algorithm

由图10可见,基于构造信号和多次互相关运算的信号处理方法,克服信号非整周期采样带来的误差,可以保证对相位差的良好跟踪,同时实现了任意长度序列的相关处理运算,整体相位差处理精度较高。

采用正交解调算法对信号进行仿真处理,关键的低通滤波环节采用梳状滤波器与低通加窗FIR滤波器相结合的方式进行处理,相位差估计结果如图11所示。

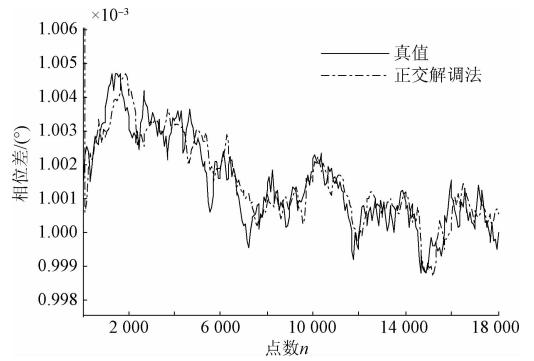


图11 正交解调法位差估计结果

Fig. 11 The phase difference estimation results of quadrature demodulation algorithm

由图11可见,正交解调算法可以实现对相位差的良好跟踪,并且在每个采样点都可以输出相位差信息,可以有效地保证整体相位差的计算精度。

通过上述的分析可知,采用重叠窗的SGA算法、SDTFT算法、基于构造信号和多次互相关运算的相关法和正交解调法具有较好的相位差跟踪处理效果,且跟踪效果相当,对比效果如图12所示。因此,着重比较这几种方法的相位差整体估算精度。

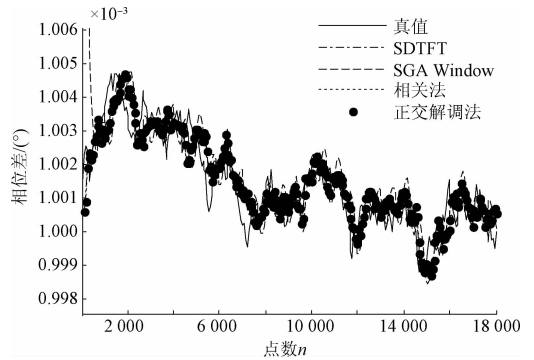


图12 相位差处理结果对比

Fig. 12 The comparison of phase difference estimation results

在 $[0.001^\circ, 1^\circ]$ 内选择几个具有代表性的相位差来对上述几种方法的整体处理精度进行考核,仿真参数与之前仿真信号相同。仿真结果数据如表1和2所示,表1采用一段数据内平均相位差的相对误差(relative error of mean value, REMV)来表示算法处理的精度,采用式(7)来进行计算。

$$REMV = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{Y}(i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y(i) \right] / \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y(i) \right) \quad (7)$$

表2采用一段数据的均方根误差(root mean squared error, RMSE)来表示算法的处理精度,采用式(8)来进行计算。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}(i) - Y(i))^2} \quad (8)$$

式(7)和(8)中的  $Y(i)$  和  $\hat{Y}(i)$  分别表示相位差的真实值和估计值。

表2 相同数据段在不同相位差下均值相对误差

Table 2 The REMV of phase differences under same data segment

(%)

给定相位差/(°)	SDTFT	SGA Window	相关法	正交解调法
0.001	0.025 647 99	0.047 076 72	0.027 216 63	0.028 189 94
0.010	0.022 826 18	0.057 719 36	0.024 049 11	0.024 801 79
0.100	0.009 172 26	0.068 019 13	0.010 311 80	0.010 995 67
1.000	0.025 559 27	0.051 426 68	0.027 008 91	0.027 910 75

表3 相同数据段在不同相位差下方误差

Table 3 The RMSE of phase differences under same data segment

(‰)

给定相位差/(°)	SDTFT	SGA Window	相关法	正交解调法
0.001	0.000 065	0.000 342	0.000 067	0.000 069
0.010	0.000 852	0.004 069	0.000 891	0.000 920
0.100	0.005 249	0.035 829	0.005 430	0.005 598
1.000	0.077 887	0.383 609	0.080 570	0.082 691

由表2和3可见,SDTFT算法、相关法和正交解调法的整体相位差估计精度相当且明显高于基于重叠窗的SGA算法。同时,由于相关法和正交解调法均需要重新构造两路正余弦信号来实现算法的相位差估计,增加了算法的计算复杂度,不利于算法在变送器中的实时实现。此外,正交解调算法低通滤波器设计的优劣程度直接关系到相位差的估计精度,这使得整套算法的估计精度多了一个不确定因素。而SDTFT算法基于原始信号本身就可实现对相位差的实时高精度估计,同时采用递推算法,使得整套算法计算复杂度较小,便于算法的实时实现。

通过对比分析不同算法对单相流下随机游动模型信号相位差处理结果可知,计及负频率的SDTFT算法在相位差跟踪速度与精度、相位差整体的估计精度和整套算法的计算复杂度几个方面均具有较好的性能,是单相流下性能最佳的信号处理算法。

### 3 批料流测量分析

科氏质量流量计在实际应用在除了测量稳定的单相流之外,时常用于批料流的测量,当批料流发生时,科氏质量流量传感器输出信号会呈现出与单相流不同的特征。

#### 3.1 突变信号模型

流量的突然启停是一种常见的批料流情况,例如香水装罐,压缩天然气(compressed natural gas, CNG)加气机进行加气。此时流量会突然从零流量骤增至最大流量,短时间后又从最大流量骤减至零流量。刘翠等人<sup>[49]</sup>通过对流量突然启停下传感器输出信号的研究发现,在启停的过程中传感器输出信号的相位差会发生类似阶跃

变化的突变,信号的频率也会发生一个较为缓慢的变化,这两个参数在短时变化后趋于稳定。此时对信号处理算法的动态响应速度要求较高,且算法需对频率的变化不敏感。为此,刘翠等人<sup>[49]</sup>提出了突变模型来描述批料流下传感器的输出信号,以对信号处理算法进行考核,符合实际的批料流情况。图13和14分别描述了批料流开始时传感器输出突变信号模型相位差和频率的变化情况。

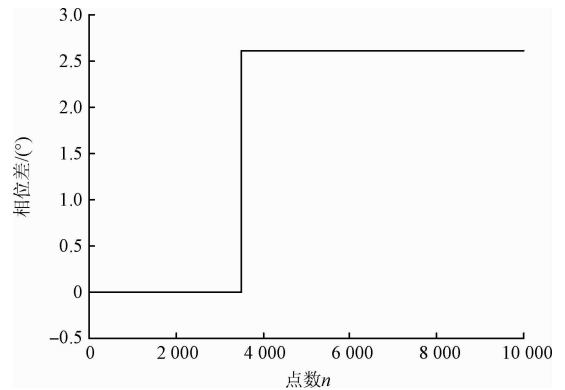


图13 相位差变化情况

Fig. 13 The variety of phase difference

根据批料流测量应用场合下科氏质量流量传感器输出信号特征与信号模型可知,流量突变时,相位差和频率均发生了不同程度的跃变。此时,限制科氏质量流量计对质量流量进行高精度计量的关键技术问题为:信号处理方法能否及时跟踪上突变的相位差与频率突变是否影响相位差处理。因此,下面着重考核不同信号处理方法的响应速度和对频率突变的敏感度,以得出针对批料流测量应用中关键技术问题解决效果最佳的信号处理方法。



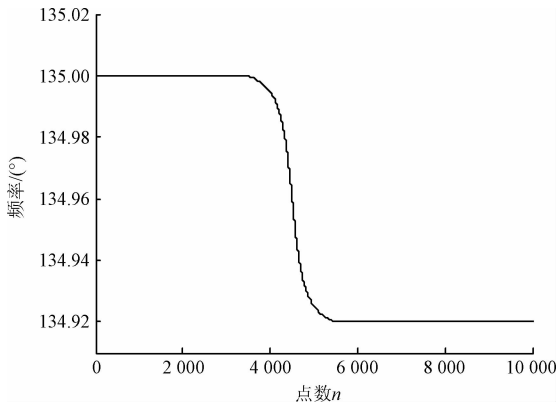


图 14 频率变化情况

Fig. 14 The variety of frequency

### 3.2 信号处理方法应用对比

基于艾默生 CMF025 型传感器满管振动时基频 135 Hz,按照突变信号模型在 MATLAB 中构造两路正弦信号,信号幅值为 1 V,采样频率为 2 kHz,采样点数为 10 000点。相位差和频率的按照图 13 和 14 所示变化。

分析发现过零检测算法相位差估算结果波动较大,DFT 算法估计所得的相位差有效数据点较少,使得这两种方法在处理批料流下突变模型信号时效果较差。因此,下面分析时这两种方法不予考虑。

首先采用各种信号处理方法对相位突变的信号进行处理,此时信号频率保持为基频 135 Hz 不变,以考各信号处理方法的响应速度。相位差估计仿真结果如图 15 所示。

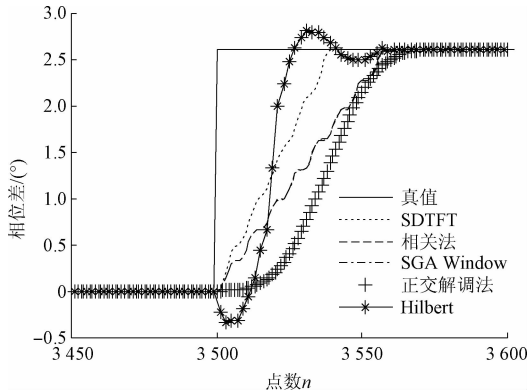


图 15 突变相位差估计结果对比

Fig. 15 The estimation results of step phase difference

由图 15 可见,各信号处理方法基本上在相位突变的后的 50 点内可以跟踪上相位变化情况。其中,SDTFT 算法和正交解调法响应速度较为突出。通过分析算法基本原理可知,SDTFT 算法、相关法和基于重叠窗的 SGA 算法的响应速度主要是受到滑动处理数组长度的影响,并且算法的计算精度与滑动数组长度成正相关的关系,因此,滑动处理数组的长度应该是算法处理精度与跟踪速

度之间的一个折中值。正交解调法的响应速度主要取决于低通滤波环节产生的滤波延迟,因此,在保证低通滤波效果的前提下,降低滤波延时可以有效的提高正交解调法处理突变信号时的响应速度。希尔伯特变换由于端点效应的存在使得相位突变时估计的相位差发生大范围振荡的现象,不适用于突变信号的相位差估计。

针对频率缓慢变化的信号,用各种处理方法进行仿真处理,此时相位差保持为 2.6°(最大流量时相位差)不变,以考核频率缓慢变化对各算法相位差估计的影响。

由于 SDTFT 算法、基于重叠窗的 SGA 算法和相关法均需要预知信号基频,因此,先采用格型自适应滤波器对信号频率进行跟踪处理,频率跟踪结果如图 16 所示。可见,在信号频率发生突变时,由于格型自适应滤波器要重新收敛到新的稳定频率点处,使得频率估计值产生了振荡,无法在频率变化的过程中实时对频率进行跟踪计算。

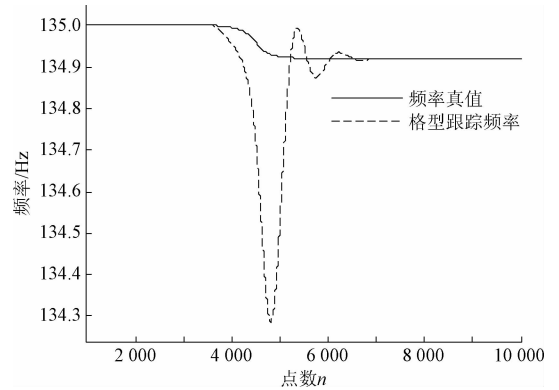


图 16 格型自适应滤波器频率跟踪结果

Fig. 16 The frequency tracking results by lattice adaptive filter

各种信号处理方法对频率突变的信号相位差估计结果如图 17 所示。

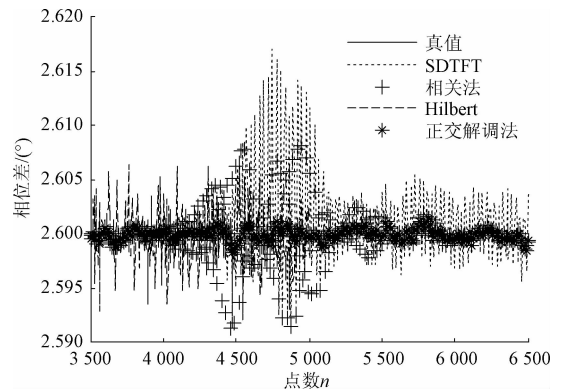


图 17 频率突变时相位差估计结果对比

Fig. 17 The phase difference estimation results under step frequency

由于基于重叠窗的SGA算法未考虑负频率的影响,信号频率变化时导致相位差估计波动太大,因此,图17中未给出其相位差估计曲线。由图17可见,由于SDTFT算法和相关法需要预知信号基频,当信号频率变化时,格型自适应滤波器无法对频率及时跟踪,使得SDTFT算法和相关法的相位差估计结果出现大幅波动情况,相位差估计精度较低。而正交解调法和希尔伯特算法,由于不依赖于信号频率的预处理,当信号频率变化后,算法的相位差估计结果仍然较为平稳,且保持较高的精度。因此,相比于SDTFT算法和相关法对频率变化的高敏感度,正交解调法和希尔伯特变换算法更加适合频率变化信号的相位差估计。同时结合对批料流突变信号模型下突变相位差的跟踪情况,正交解调法的跟踪速度与精度均优于希尔伯特算法。因此,正交解调法是处理批料流下的最佳信号处理算法。

## 4 气液两相流测量分析

目前气液两相流测量是科氏质量流量计应用的一个热点研究,并且该问题尚未得到较好的解决。气液两相流下由于气体的混入,使得流量管内的流型变化复杂,气体对传感器产生的冲击,使得传感器输出信号波动剧烈,具体表现为正弦信号的3个特征量幅值、相位和频率波动剧烈。此时,信号处理算法需要对这个3个特征量波动不敏感,才能处理气液两相流信号。同时,气液两相流下传感器阻尼比骤增,传统的模拟驱动方法下传感器出现停振,流量测量失去振动基础。为此,需要应用数字驱动方法<sup>[50]</sup>,通过快速跟踪信号幅值、相位和频率的变化情况,及时更新驱动参数,保证气液两相流下传感器不停振。此时,要求信号处理算法整体运算量小,以便对信号参数的及时跟踪。目前,气液两相流的测量误差较大,在含气量较高时测量误差可以达到50%<sup>[51-52]</sup>,为此,国内外学者采用神经网络对测量误差进行修正<sup>[53-56]</sup>,取得了较好的修正效果,修正后的测量误差在4%左右。但是,相比较于单相流和批料流测量的精度,气液两相流测量误差仍然较大。因此,针对气液两相流信号特征,对比各种信号处理方法的处理效果,找出最佳的方法。此时,测量误差仍然较大,但是可以一定程度上提高误差修正前的测量精度和增强误差的规律性,为后续的误差修正打下良好的基础,以此提高整体的测量精度。

### 4.1 ARMA 信号模型

文献[35]仍然采用随机游动模型描述气液两相流下各个信号来考察信号处理算法在气液两相流下处理效果。但是,随机游动模型幅值、频率和相位的变化情况与气液两相流下实际传感器输出信号不符,因此,需要对气液两相流下传感器输出信号进行建模,以便更好地考核各个算法的处理气液两相流信号的性能。

为此,采用课题组自行研制的变送器匹配艾默生CMF025型传感器,进行了气液两相流实验,采集了传感器实时输出信号,如图18所示。

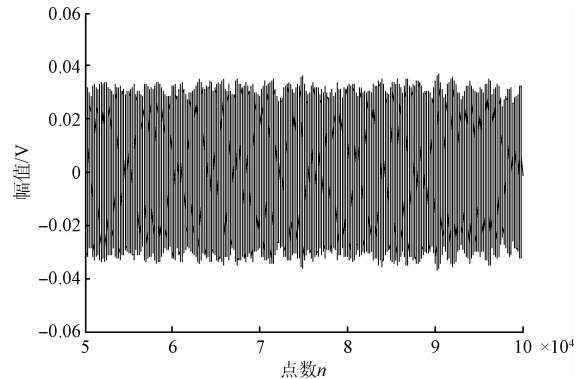


图18 气液两相流传感器输出信号

Fig. 18 The sensor output signals under gas-liquid two-phase flow

此时,水瞬时流量约为16 kg/min,密度降约为15%。分别采用对频率波动敏感度较低的过零检测算法、Hilbert算法和正交解调算法从传感器原始信号中提取幅值、频率和相位3个特征量,分别如图19~21所示。

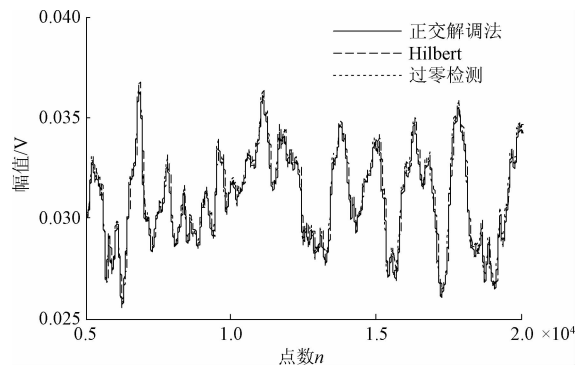


图19 信号幅值序列

Fig. 19 The amplitude sequence of output signals

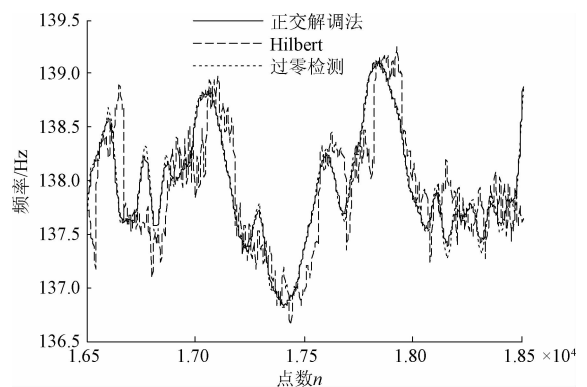


图20 信号频率序列

Fig. 20 The frequency sequence of output signals

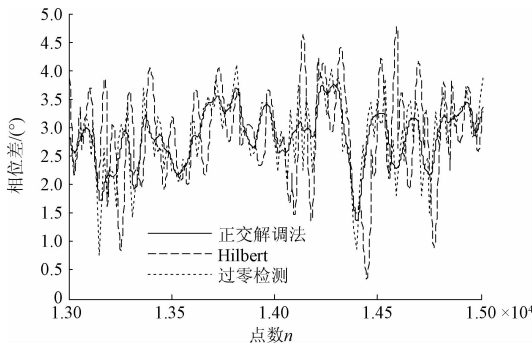


图 21 信号相位差序列

Fig. 21 The phase difference sequence of output signals

可以看出气液两相流下,无论是传感器原始输出信号,还是提取的幅值、相位差和频率序列均波动十分剧烈。正交解调算法和过零检测算法提取的幅值、相位差

和频率序列吻合度较高,希尔伯特算法由于端点效应的存在使得其提取的序列出现较大的偏差。同时,由于过零检测算法的响应速度要优于正交解调算法,在气液两相流下更能及时的反映各个特征量实时变化的情况。因此,采用过零检测算法来提取特征量序列用于后续的建模分析。采用文献[57]中时间序列建模方法,分别对提取的幅值序列、相位差序列和频率序列进行建模。建模主要分为以下几个步骤:1)先对序列进行概率密度分析,得出序列符合高斯分布;2)对序列进行单位根检验,得出序列为平稳序列,因此,可以用 ARMA 模型进行描述;3)通过相关分析,为 ARMA 模型进行定阶;4)通过最小二乘拟合得到 ARMA 模型具体的系数;5)通过残差分析和模型的过拟合来验证 ARMA 模型的正确性。

分别得到幅值序列、相位差序列和频率序列的 ARMA 模型的具体表达式为式(9)~(11)。

$$Amp_t = \frac{0.0303 + (1 + 0.7826B - 0.0821B^2 + 0.6153B^3 - 0.4167B^4)\varepsilon_{at}}{1 + 0.3241B + 0.1392B^2 - 0.0776B^3} \quad (9)$$

$$Pha_t = \frac{2.2295 + (1 - 0.4681B - 0.1402B^2 + 0.6153B^3)\varepsilon_{pt}}{1 + 1.9078B - 1.1653B^2 - 0.2521B^3} \quad (10)$$

$$Fre_t = \frac{138.2459 + (1 + 2.3512B - 2.7640B^2 + 1.8002B^3 - 0.4904B^4)\varepsilon_{ft}}{1 + 0.1973B - 0.0578B^2 + 0.5447B^3} \quad (11)$$

式中:  $B$  为迟滞算子,  $\varepsilon_{at}$ 、 $\varepsilon_{pt}$  和  $\varepsilon_{ft}$  分别是幅值序列、相位差序列和频率序列的残差序列。

根据得到的 ARMA 模型拟合的幅值序列、相位差序列和频率序列与原始序列对比如图 22 所示。

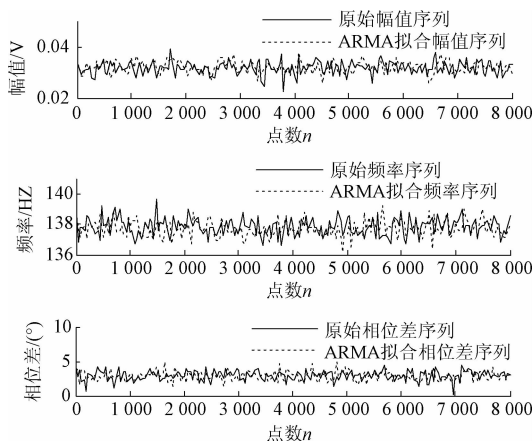


图 22 拟合序列与原始序列对比

Fig. 22 The comparison of fitted and original sequence

由图 22 可以看出,根据建模所得的 ARMA 序与原始序列的波动分布情况一致,准确的描述了原始序列所具有的特征。

根据建模所得的幅值、相位和频率的模型合成得到气液两相流下传感器输出信号,如图 23 所示。

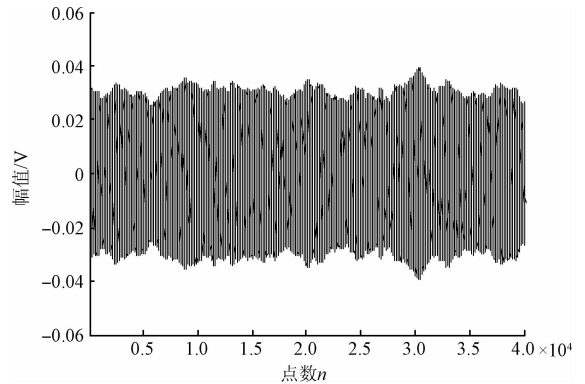


图 23 合成的气液两相流信号

Fig. 23 The synthetic gas-liquid two-phase flow

由图 23 可见,合成所得的信号与气液两相流下原始信号较为一致,可以描述气液两相流下信号所具有的特征,即幅值、相位和频率波动十分剧烈,且符合一定的波动规律。

根据气液两相流测量应用场合下科氏质量流量传感器输出信号特征与信号模型可知,信号的特征参数,即幅值、相位和频率波动十分剧烈。此时,限制科氏质量流量计对质量流量进行高精度计量的关键技术问题为:信号处理方法能否对信号特征量进行快速跟踪,以及时更新驱动信号,维持流量管的振动;同时,能否对波动剧烈的

信号进行较为良好的处理测量。因此,下面着重对不同信号处理方法的相位差处理效果与特征参数更新的及时性进行对比分析,以得出针对气液两相流测量应用中解决关键技术问题性能最佳的信号处理方法。

#### 4.2 信号处理方法应用对比

根据气液两相流特征参数符合 ARMA 模型,在 MATLAB 中构造两路传感器输出信号

$$x_1 = A_i \cos\left(2 \cdot \pi \sum_{i=1}^n \text{Fre}_i / F_s + \frac{1}{2} \text{Pha}_i\right) \quad (12)$$

$$x_2 = A_i \cos\left(2 \cdot \pi \sum_{i=1}^n \text{Fre}_i / F_s - \frac{1}{2} \text{Pha}_i\right) \quad (13)$$

式中:  $Amp_i$ 、 $\text{Fre}_i$  和  $\text{Pha}_i$  均符合 ARMA 模型。

由于气液两相流下信号频率波动剧烈,此时,对频率变化较为敏感的信号处理方法如 DTFT 算法、SGA 算法、相关算法在估计相位差时会产生非常大的误差,因此,下面着重分析考核估算相位差不受频率影响的希尔伯特算法、过零检测算法和正交解调算法性能。

分别采用希尔伯特算法、过零检测算法和正交解调算法对构造信号进行相位差估计,处理结果如图 24 所示。

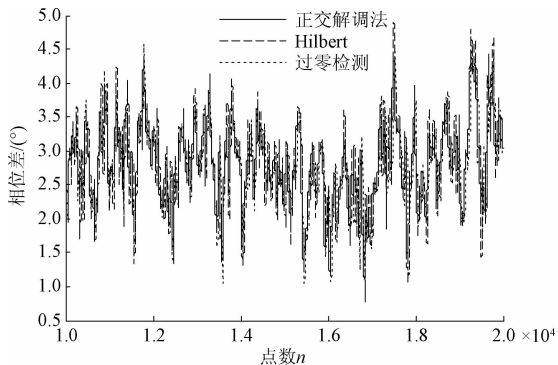


图 24 相位差估计结果对比

Fig. 24 The comparison of phase difference estimation results

由图 24 可见,3 种算法在处理气液两相流信号时,估计所得的相位差在波动范围和重合度上都是较为一致的。对比一段时间内估计相位差累计值与相位差真值累计值(对应于变送器实际应用时的累积流量的误差),分别得到正交解调算法、希尔伯特算法和过零检测算法的相位差估计相对误差为  $-5.677\%$ 、 $-5.776\%$ 、 $-5.563\%$ 。过零检测算法相位差估计精度略优于其他两种算法。同时,为了实现对流量管的数字驱动,需要在算法估算相位差的同时还能对频率和幅值进行跟踪估计,同时为了保证参数更新的快速性,要求算法的运算量足够的小。相比于正交解调算法,过零检测算法没有低通滤波环节,具有更快的响应速度可以及时反映特征量实时变化情况。

希尔伯特算法在实时实现时,运算复杂、运算量大、无法保证参数的及时更新,导致数字驱动效果较差。而过零检测算法运算简单,易于实现,可以保证驱动参数的及时更新,提升数字驱动效果,一定程度上提高了气液两相下输出信号的信噪比,有利于改善整体的测量精度。因此,针对气液两相流下信号特点和数字驱动的要求,过零检测算法为性能最佳的信号处理算法。

## 5 结 论

为了寻求在不同应用场合下性能最佳的科氏质量流量计信号处理方法,分析了几种不同信号处理方法的特征量(相位、频率和幅值)提取基本原理,并且指出了不同方法内在的优缺点以及改进措施,为信号处理方法的实际应用提供了参考。

针对单相流测量应用场合,基于随机游动信号模型,针对应用中存在的波动相位差跟踪性能和整体的相位差估算精度这两个关键技术问题,分别对不同信号处理方法进行了考核,得出 SDTFT 算法在处理单相流信号时具有最佳性能,为实现科氏质量流量计更好地对单相流测量提供依据。

针对批料流测量应用场合,基于突变信号模型,针对应用中存在的突变相位差的响应速度和频率缓慢突变的影响这两个关键技术问题,分别对不同信号处理方法进行了考核,得出正交解调算法在处理批料信号时具有最佳性能,为科氏质量流量计更好地适用于批料流测量应用提供依据。

针对气液两相流测量应用场合,在分析气液两相流传感器信号特点的基础上,建立了正弦信号幅值、频率和相位 3 个关键特征量的 ARMA 模型。基于 ARMA 信号模型,针对应用中存在的相位差估计和数字驱动实时实现这两个关键技术问题,分别对不同信号处理方法进行了考核,得出过零检测算法在处理气液两相流信号时具有最佳性能,为科氏质量流量计在气液两相流应用时,进一步实现较为可靠的流量测量提供了依据。

## 参考文献

- [1] 张瀚,徐科军. 新型数字式科氏质量流量变送器[J]. 自动化仪表,2005,26(1):25-28.  
ZHANG H, XU K J. A new digital coriolis mass flow transmitter [J]. Process automation instrumentation, 2005, 26(1): 25-28.
- [2] 郑德智,樊尚春,邢维巍. 数字科氏质量流量计闭环系统及信号解算[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(6):623-626.  
ZHENG D ZH, FAN SH CH, XING W W. Novel closed loop system and output signal processing of digital Coriolis

- mass flowmeter [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(6):623-626.
- [3] 郑德智,樊尚春. DSP在科氏质量流量计中的应用[J]. 测控技术, 2004, 23(3):21-23.  
ZHENG D ZH, FAN SH CH. Application of digital signal processor in coriolis mass flow meter [J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(3):21-23.
- [4] 李苗,徐科军,朱永强,等. 科氏质量流量计的三种驱动方法研究[J]. 计量学报, 2011, 32(1):36-39.  
LI M, XU K J, ZHU Y Q, et al. Studies on three driving methods of coriolis mass flowmeter[J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(1):36-39.
- [5] 贾路尧,满庆丰,耿春明,等. 现场总线在科里奥利粉料流量测控系统的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2014(1):77-78.  
JIA L Y, MAN Q F, GENG CH M, et al. Fieldbus technology in coriolis powder measuring meter [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(1):77-78.
- [6] HENRY M P, CLARKE D W, ARCHER N, et al. A self validating digital Coriolis mass flow meter: An overview [J]. Control Engineering Practice, 2000, 8(5):487-506.
- [7] 徐科军,吕迅竑,陈荣保. 基于DFT的科氏流量计信号处理方法[J]. 中国科技大学学报, 1998, 28(8):180-183.  
XU K J, LV X H, CHEN R B. A processing method based on DFT for CMF's signals[J]. Journal of China University of Science and Technology, 1998, 28(8):180-183.
- [8] ROMANO P. Coriolis mass flow rate meter having a substantially increased noise immunity. US Patent No. 4934196[P]. 1990-06-19.
- [9] 于翠欣,徐科军,刘家军. 基于DFT的科里奥利质量流量计信号处理方法的改进[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2000, 23(6):935-939.  
YU C X, XU K J, LIU J J. An improvement of signal processing method based on DFT for Coriolis mass flowmeter[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2000, 23(6):935-939.
- [10] 徐科军,于翠欣,苏建徽,等. 科氏质量流量计数字信号处理系统, 中国:ZL 00108414.3[P]. 2002-12-04.  
XU K J, YU C X, SU J H, et al. Digital signal processing system of coriolis mass flowmeter, China, ZL 00108414.3[P]. 2002-12-04.
- [11] 杨俊,关可,梁佳. DFT变换方法在科氏质量流量计相位差检测中的应用研究[J]. 传感器技术学报, 2006, 19(6):2654-2657.
- YANG J, GUAN K, LIANG J. DFT in the research of phase difference measurement in coriolis mass flow meter [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(6):2654-2657.
- [12] CHICHARO J F, KILANI M T. A sliding goertzel algorithm[J]. Signal Processing, 1996, 52:283-297.
- [13] 徐科军,徐文福. 基于AFF和SGA的科氏质量流量计信号处理方法[J]. 计量学报, 2007, 28(1):48-51.  
XU K J, XU W F. A Signal processing method based on aff and sga for coriolis mass flowmeter [J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(1):48-51.
- [14] 徐科军,徐文福. 基于AFF和SGA的科氏质量流量计数字信号处理系统, 中国:ZL03108944.5[P]. 2005-03-23.  
XU K J, XU W F. A digital signal processing system based on AFF and SGA for coriolis mass flowmeter, China, ZL03108944.5[P]. 2005-03-23.
- [15] 朱志海,徐科军,杨双龙. 面向时变信号模型的科氏质量流量传感器信号处理方法的实现与测试[J]. 计量学报, 2010, 31(4):325-329.  
ZHU ZH H, XU K J, YANG SH L. Implementation and test of signal processing method of coriolis mass flow sensor for time-varying signal model [J]. Acta Metrologica Sinica, 2010, 31(4):325-329.
- [16] UEHARA A, HASHIZUME T, WAKUI T, et al. Diagnosis of aerated flow at water line with coriolis flowmeter using hilbert transform [C]. SICE Annual Conference, 2010:1682-1687.
- [17] 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 and implementation of signal processing method for coriolis mass flowmeter based on hilbert transform [J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(3):309-314.
- [18] 林伟,蔡选宪. 基于格型陷波器和Hilbert变换的科里奥利质量流量计信号处理方法[J]. 电子器件, 2014, 37(1):63-66.  
LIN W, CAI X X. Phase difference measuring method based on adaptive lattice notch filter and hilbert transform for coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(1):63-66.
- [19] 郑德智,樊尚春,邢维巍. 科氏质量流量计相位差检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(5):441-443.  
ZHENG D ZH, FAN SH CH, XING W W. The novel method of phase difference detection in coriolis mass

- flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005,26(5):441-443.
- [20] 刘翠,侯其立,熊文军. 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. Implementation of high-precision zero-crossing detection algorithm for micro-bend type Coriolis mass flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014,28(6):675-682.
- [21] 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 Instrument, 2014, 28(10):1130-1139.
- [22] 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):539-541.  
ZHANG H T, TU Y Q. New signal processing method with negative frequency contribution for Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007,28(3):539-541.
- [23] 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.
- [24] TU Y Q, ZHANG H T. Method for CMF signal processing based on the recursive DTFT algorithm with negative frequency contribution[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57 ( 11 ): 2647-2654.
- [25] 杨俊,武奇生,孙宏琦. 基于相关法的相位差检测方法在科氏质量流量计中的应用研究[J]. 传感器技术学报,2007,20(1):138-145.  
YANG J, WU Q SH, SUN H Y. Study on using correlation to detect phase difference in coriolis flow meter [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(1):138-145.
- [26] SHEN Y, TU Y Q. Correlation theory-based signal processing method for CMF signals [J]. Measurement Science and Technology,2016,27(6):065006.
- [27] 杨俊,陈明,全猛. 科氏质量流量计相位差检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2004(增刊1):965-977.  
YANG J, CHEN M, TONG M. Study on detection and calibration algorithm of coriolis mass flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2004 (Suppl.1):965-977.
- [28] 徐科军,徐文福. 基于正交解调的科里奥利质量流量计信号处理方法研究[J]. 仪器仪表学报,2005,26(1):23-27.  
XU K J, XU W F. Research on signal processing method based on quadrature demodulation for coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005,26(1):23-27.
- [29] DIETMA S. Measurement and operation circuit of Coriolis-type mass flowmeter, US patent, US6073495 [P]. 1998-03-16.
- [30] HENERY M P. Digital measurementx, US Patent Application, US20020038186[P]. 2002-03-28.
- [31] 宋长宝,李志刚,竺小松. 基于数字正交变换的相位差测量方法及误差分析[J]. 电路与系统学报,2006,11(1):143-146.  
SONG CH B, LI ZH G, ZHU X S. A method & error analysis of phase difference measurement based on digital quadrature transformation [J]. Journal of Circuits and Systems, 2006,11(1):143-146.
- [32] HENRY M P. Digital measurement, US Patent Application, US20020038186[P]. 2002-03-28.
- [33] PENG Y, TU Y Q, XIE M, et al. Analysis of phase difference tracking methods for signal of coriolis mass flowmeter[C]. Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation,2012:4368-4373.
- [34] WANG T, BAKER R. Coriolis flowmeters: A review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions [J]. Flow Measurement and Instrument, 2014, 40 ( 12 ): 99-123.
- [35] LI M, HENRY M. Signal processing methods for coriolis mass flow metering in two-phase flow conditions [C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2016:690-695.
- [36] 徐科军,倪伟. 一种科里奥利质量流量计的信号处理方法[J]. 计量学报,2001,22(4):254-287.  
XU K J, NI W. A new signal processing method for coriolis mass flowmeter [J]. Acta Metrologica Sinica, 2001,22(4):254-257.
- [37] JACOBSEN E, LYONS R. The sliding DFT[J]. Signal Processing Magazine IEEE,2003,20(2):74-80.
- [38] 倪伟,徐科军. 基于时变信号模型的科里奥利质量流量计信号处理方法[J]. 仪器仪表学报,2005,26(4):358-364.  
NI W, XU K J. A signal processing method for coriolis mass flowmeter based on time-varying signal model[J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(4): 358-364.
- [39] 倪伟,徐科军. 一种改进的基于时变信号模型的科里奥利质量流量计信号处理方法[C]. 第五届全球智能控制与自动化大会 WCICA, 2004:3787-3790.  
NI W, XU K J. An improved signal processing method for coriolis mass flowmeter based on time-varying signal model [C]. The 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004:3787-3790.
- [40] 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.
- [41] 李叶,徐科军,朱志海,等. 面向时变的科里奥利质量流量计信号处理的方法研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2010, 32(1): 8-14.  
LI Y, XU K J, ZHU ZH H, et al. Study and implementation of processing method for time-varying signal of coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 32(1): 8-14.
- [42] 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): 2101-2106.  
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): 2101-2106.
- [43] 黄丹平,汪俊其,于少东,等. 基于小波变换和改进Hilbert变换对科氏质量流量计信号处理[J]. 中国测试, 2016, 42(6): 37-41.  
HUANG D P, WANG J Q, YU SH D, et al. Signal processing of coriolis mass flow meters based on wavelet transform and improved Hilbert transform [J]. China Measurement & Test, 2016, 42(6): 37-41.
- [44] 刘维来,赵璐,王克逸,等. 基于希尔伯特变换的科氏流量计信号处理[J]. 计量学报, 2013, 34(5): 446-451.  
LIU W L, ZHAO L, WANG K Y, et al. Signal processing for coriolis mass flowmeter based on Hilbert transform [J]. Acta Metrologica Sinica, 2013, 34(5): 446-451.
- [45] 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 Instrument, 2011, 25(6): 540-545.
- [46] 涂亚庆,沈廷鳌,李明,等. 基于多次互相关的非整周期信号相位差测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1578-1585.  
TU Y Q, SHEN T AO, LI M, et al. Research on phase difference measurement algorithm for non-integer period sampling signal based on multi-layer correlation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1578-1585.
- [47] 徐科军,张瀚. 一种科氏流量计的数字信号处理与驱动方法研究[J]. 计量学报, 2004, 25(4): 339-343.  
XU K J, ZHANG H. A study on the digital signal processing and driving method for coriolis mass flowmeter [J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, 25(4): 339-343.
- [48] 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.
- [49] 刘翠,徐科军,侯其立,等. 适用于频繁启停流量测量的科氏质量流量计信号处理方法[J]. 计量学报, 2014, 35(3): 242-247.  
LIU C, XU K J, HOU Q L, et al. Signal processing methods of coriolis mass flowmeter for measurement of the frequent starting and stopping flow [J]. Acta Metrologica Sinica, 2014, 35(3): 242-247.
- [50] HOU Q L, XU K J, FANG M, et al. Development of Coriolis mass flowmeter with digital drive and signal processing technology [J]. ISA Transaction, 2013, 53(5): 692-700.
- [51] 董帅,徐科军,侯其立,等. 微弯型科氏质量流量计测量气-液两相流研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1972-1977.  
DONG SH, XU K J, HOU Q L, et al. Study on measuring gas-liquid two-phase flow with micro-bend type Coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 1972-1977.
- [52] 陶波波,侯其立,石岩,等. 科氏质量流量计测量含气液体流量的方法与实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1796-1802.  
TAO B B, HOU Q L, SHI Y, et al. Method and implementation of measuring liquid flow mixed with gas for coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1796-1802.

- [53] LARI V A, SHABANINIA F. Error correction of a Coriolis mass flow meter in two-phase flow measurement using Neuro-Fuzzy [ C ]. IEEE 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing( AISP), 2012: 611-616.
- [54] HENRY M P, LAFUENT M J D. Correcting for twophase flow in a digital flowmeter, U. S, Patent 9,021,892 [ P ]. 2015.
- [55] 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.
- [56] WANG L J, LIU J Y, YAN Y, et al. Gas-liquid two-phase flow measurement using coriolis flowmeters incorporating neural networks [ C ]. Instrumentation & Measurement Technology Conference, 2016:1-5.
- [57] ZHANG J G, XU K J, DONG S, et al. Mathematical model of time difference for Coriolis flow sensor output signals under gas-liquid two-phase flow [ J ]. Measurement, 2017, 95(1):345-354.

## 作者简介



**张建国**, 2015 年于合肥工业大学获工学学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为 DSP 应用技术。

E-mail: 15256005930@163.com

**Zhang Jianguo** received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2015.

Now he is a M. Sc. candidate in Hefei University of Technology.

His main research interest is DSP application technology.



**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 his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 1988. Now he is a professor in Hefei University of Technology. His main research interests include sensor technology, automatic instrument, and digital signal processing.