

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209142

基于陷波器和相关法的科氏流量计信号处理方法^{*}沈廷鳌¹ 黄思宇¹ 陈鹏² 陈丽薇³(1. 陆军勤务学院油料系 重庆 401311; 2. 中国空气动力研究与发展中心 绵阳 621000;
3. 四川泰利工程项目管理有限公司 成都 610023)

摘要: 科氏流量计信号处理的关键在于频率和相位差的准确估计,频率估计主要存在长时间持续跟踪精度不高的问题,相位差估计主要存在精度不够和实时性较差的问题。首先,通过引入负反馈控制,可有效解决自适应陷波器长时间持续跟踪问题,提高频率估计精度。然后,利用频率估计结果,对自适应陷波器滤波后的增强信号进行整周期数据处理。接着,对整周期数据处理后的信号进行希尔伯特变换。最后,对希尔伯特变换前后的信号进行相关运算,利用正弦公式即可求得相位差,进而求得质量流量。仿真结果表明,本文所提方法具有较高的频率和相位差估计精度,可用于科氏流量计的实时信号处理。

关键词: 科氏流量计;自适应陷波器;相关法;希尔伯特变换;频率估计;相位差估计

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

A novel CMF signal processing method based on notch filter
and correlation methodShen Ting'ao¹ Huang Siyu¹ Chen Peng² Chen Liwei³

(1. Army Logistics Academy of PLA, Chongqing 401311, China; 2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 3. Sichuan Taili Engineering Project Management Co., Ltd., Chengdu 610023, China)

Abstract: The key of Coriolis mass flowmeter signal processing depends on the accurate estimation of frequency and phase difference. Frequency estimation methods exists the problem of low tracking accuracy for a long time, and phase difference estimation methods exists the problems of insufficient accuracy and poor real-time performance. Firstly, by introducing negative feedback control, the problem of long-time continuous tracking for adaptive notch filter can be effectively solved and the accuracy of frequency estimation can be improved. Then, the frequency estimation results are used to process the whole period data of the enhanced signal filtered by the adaptive notch filter. Then, Hilbert transform is performed on the signal after the period data processing. Finally, the signals before and after Hilbert transform are correlated, and the phase difference can be obtained by sinusoidal formula, so as to obtain the mass flow. The simulation results show that the proposed method has high frequency and phase difference estimation accuracy, and can be used for real-time signal processing for Coriolis mass flowmeter.

Keywords: Coriolis mass flowmeter; adaptive notch filter; correlation method; Hilbert transform; frequency estimation; phase difference estimation

0 引言

科氏流量计可以直接高精度地测量流体质量流量,并以其独特的优势在石油、化工等行业得到了广泛的应用,是当前发展最为迅速、最具代表性的质量流量计之一^[1-3]。

科氏流量计是通过测量两路传感器输出信号之间的时

间差来计算流体质量流量的。对科氏流量计的信号进行处理,关键在于准确求出信号的频率和相位差^[4-6]。但在实际应用中,由于受管内流体流速、密度、流体脉动和流场等因素变化的影响,信号的频率、相位和幅值会随之发生随机的、不可预测的变化。为实现高精度流量测量并提高动态响应速度,要求对科氏流量计的信号频率和相位差的变化

收稿日期:2022-03-02

^{*} 基金项目:重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0628)、重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202112902)资助

进行实时、精确地跟踪。

当前,频率估计常用自适应陷波器,基于自适应陷波器的方法由于能够根据被处理信号的特点,自动调节自身模型参数,使其幅频特性的陷波频率能迅速收敛到信号基频处,并可由陷波器的参数估计出信号基频,实现频率的实时测量与跟踪而倍受国内外研究者的关注^[7-8]。

相位差估计常用频谱分析法^[9-10]和相关法^[11-13]。频谱分析法将信号变换到频域进行处理,在一定程度上能克服随机噪声和谐波干扰的影响,提高了相位差测量精度。但由于信号时域的截短效应,当计算所选取的信号序列长度不是原信号周期的整数倍时,会造成频谱泄露现象,使相位计算中存在较大误差。相关分析法利用了噪声信号通常与有效信号相关性较小,以及噪声之间互不相关的特性,具有较强抑制噪声的能力,但受非整周期采样的影响较大。

针对自适应陷波器存在难以兼顾科氏流量计信号频率收敛速度和跟踪精度的问题,相位差计算方法存在冗余计算、计算量较大、实时性和测量精度有待提高的问题,本文提出一种基于陷波器和相关法的科氏流量计信号处理方法。通过引入负反馈控制来解决自适应陷波器长时间持续跟踪问题,提高频率估计精度,充分利用频率估计结果,对自适应陷波器滤波后的增强信号进行整周期数据处理,对数据处理后的信号进行希尔伯特变换,对变换前后的信号进行相关运算,再利用正弦公式求得相位差,进而计算得到质量流量。详细阐述了方法实现的具体步骤,并用MATLAB进行仿真分析,以证实本文所提方法的有效性。

1 自适应陷波器

1.1 原理分析

自适应陷波器利用前一时刻获得的滤波器参数,对当前时刻的滤波器参数进行自动调节,以适应未知变化的信号和噪声的统计特性,最终实现最优滤波,如图1所示。

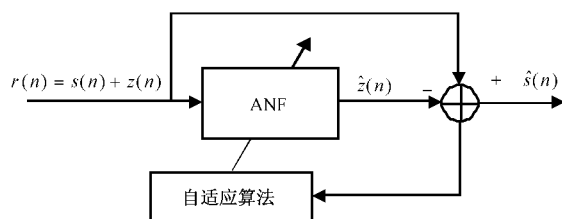


图1 自适应陷波器的结构

观测信号 $r(n) = s(n) + z(n)$ 通过自适应陷波器,滤除其中的正弦波信号 $s(n)$, 得到 $z(n)$ 的最优估计值 $\hat{z}(n)$, 然后再从 $r(n)$ 中减去 $\hat{z}(n)$, 可得 $s(n)$ 的最优估计值 $\hat{s}(n)$, 即 $\hat{s}(n) = r(n) - \hat{z}(n) = s(n) + z(n) - \hat{z}(n)$ 。若存在理想的陷波器,则有 $\hat{z}(n) = z(n)$, 使得 $\hat{s}(n) = s(n)$ 。

理想陷波器的频率特性只在陷波频率处等于1,其他处均为0。自适应陷波器可使陷波频率自动跟随输入信号

频率而变化,既可用于消除正弦干扰,也可用于检测噪声中正弦信号频率^[14]。在自适应过程中,随着收敛因子趋近于1,误差曲面将陷入局部最优,导致陷波器无法感知信号频率的变化,从而失去对信号频率变化的持续跟踪能力。

1.2 改进措施

当误差曲面陷入局部最优时,陷波器失去自适应能力^[15],此时,可通过调整陷波器参数增加陷波带宽的方法,让其重新恢复自适应能力,原理分析如下:

采用陷波器跟踪信号频率,在信号先验知识未知时,初始陷波带宽往往较大,以便能尽快捕捉到信号频率。随着陷波参数的自适应调整,收敛因子 ρ 趋近于1,陷波带宽趋近于0,误差曲面将陷入局部最优值而非全局最优值,陷波器可能锁定在一个错误频率上,此时,信号频率变化至陷波带宽之外,频率估计结果会存在较大偏差。在这种情况下,增加陷波带宽可使陷波器重新跟踪信号频率的变化,让其恢复自适应能力。此外,当陷波器锁定在正确频率时,增加陷波带宽对频率估计精度不会有太大影响,因为此时正确频率的误差曲面确保了频率是朝着原来正确方向调整的。因此,一旦收敛因子 ρ 趋近于1,可通过增加陷波带宽的方法,以确保陷波器不会锁定在一个错误频率上,进而确保陷波器的有效性。

采用增加陷波带宽的方法,能重新恢复陷波器的自适应能力,可提高收敛速度,但也会增大频率估计的方差,因为在增加陷波带宽的同时会引入部分噪声。为兼顾收敛速度和估计精度,需要增加一个频率跟踪质量评价因子,用于实时监测并自动调整陷波参数,其设计过程及原理分析如下:

输入信号为 $y(n) = c(n) + e(n)$, $c(n)$ 为正弦信号, $e(n)$ 为零均值高斯白噪声, $\hat{c}(n)$ 为滤波后的增强信号。为检测陷波器是否有效跟踪信号基频,根据 $\hat{c}(n)$ 和 $y(n)$ 的相关性,设计一个频率跟踪质量评价因子 $h(n)$, $h(n)$ 可由图2所示的0阶LMS算法在线计算得到。

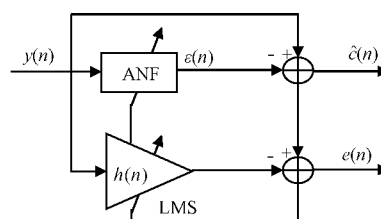


图2 改进的自适应陷波器结构

由上述分析可知,改进算法在原有算法的基础上,只是引进了一个频率跟踪质量评价因子,用于实时监测并自动调整陷波参数,本文仅是借鉴了反馈控制的思想,来提高频率估计精度,并没有增加算法的计算量。

2 相关法

2.1 原理分析

两路同频正弦信号为:

$$\begin{aligned} x(n) &= A \cos(\omega \cdot n + \theta_1) \\ y(n) &= B \cos(\omega \cdot n + \theta_2) \end{aligned}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 θ_1 、 θ_2 分别为两路信号的幅值和初相位, ω 为信号频率。

根据相关运算可计算得:

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) = \frac{AB}{2} \cos(\theta_2 - \theta_1) + \frac{AB}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + \theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

$$R_{xx}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) = \frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + 2\theta_1) \quad (3)$$

$$R_{yy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n) = \frac{B^2}{2} + \frac{B^2}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + 2\theta_2) \quad (4)$$

定义 $\Delta\theta$ 为两路信号的相位差, 则:

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \arccos\left(\frac{2R_{xy}(0)}{AB}\right) = \arccos\left(\frac{R_{xy}(0)}{\sqrt{R_{xx}(0)} \sqrt{R_{yy}(0)}}\right) \quad (5)$$

式(5)即为相关法的相位差计算公式。由上述过程推导可以看出, 当相关长度 N 不为整周期时, 式中下划线部分均不为 0, 即存在误差, 代入相关法的相位差计算公式也会产生较大误差, 进而说明相关法相位差测量存在误差的主要原因是相关长度不与信号的整周期相匹配。

2.2 延拓处理

利用自适应陷波器对信号频率或者周期进行估计, 周期结果设为 P , $P \in \mathbb{Z}^+$ 为一个周期的采样点数, N 除以 P 的高是 k , 余数为 m 。若 $m=0$, 则相关长度与信号的整周期相匹配, 成整数倍关系, 此时数据无需处理。若 $m>0$, 说明相关长度超过 k 个周期但未达到 $k+1$ 个周期, 此时可分两种情况进行数据处理:

1) 进行数据的剔除, 即根据信号的周期性, 从采样数据 x, y 中剔除整周期数据外的 m 个数据 $[x_{kP+1}, \dots, x_{kP+m}]$, $[y_{kP+1}, \dots, y_{kP+m}]$, 使相关长度为整周期, 剔除数据后的信号序列为:

$$x_e = [x_1, x_2, \dots, x_{kP}], y_e = [y_1, y_2, \dots, y_{kP}] \quad (6)$$

2) 进行数据的延拓, 即根据信号的周期性, 从采样数据 x, y 中查找 $P-m$ 个数据 $[x_{(k-1)P+m+1}, \dots, x_{kP}]$, $[y_{(k-1)P+m+1}, \dots, y_{kP}]$, 将其合并到原数据序列 x, y 之后, 使相关长度为整周期, 数据延拓后的信号序列为:

$$\begin{aligned} x_e &= [x_1, x_2, \dots, x_N, x_{(k-1)P+m+1}, \dots, x_{kP}], \\ y_e &= [y_1, y_2, \dots, y_N, y_{(k-1)P+m+1}, \dots, y_{kP}] \end{aligned} \quad (7)$$

针对短时信号, 由于获得信号的采样数据点数较少, 通过数据剔除调整信号序列为整周期的办法可提高方法测量精度, 但会减少数据本身所带有的信息量; 采用数据延拓的办法, 在原有数据点数的基础上, 增加了数据的信息量, 在

提高方法精度的同时, 也可提高方法的抗噪性。采用延拓或者剔除处理, 应根据实际采集数据情况而定, 剔除处理更适于数据较多情况, 而延拓处理更适于短时信号情况。

2.3 相关运算

进行上述整周期数据延拓处理的目的是, 使信号长度调整为整周期, 以便于进行 Hilbert 变换的时候, 有效解决其端点问题。需要指出的是, 数据延拓处理既可以运用原始信号进行延拓处理, 也可以用自适应陷波器滤波后的信号进行延拓处理。相比而言, 采用陷波器滤波后的信号进行延拓处理, 然后再进行 Hilbert 变换, 取得的效果会更好。

对延拓后的数据进行 x_e 和 y_e 进行 Hilbert 变换得到 x'_e 和 y'_e , 利用相关运算可得:

$$R_{x_e y_e}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_e(n)y_e(n) \quad (8)$$

$$R_{x_e y'_e}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_e(n)y'_e(n) \quad (9)$$

$$R_{x'_e y_e}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x'_e(n)y_e(n) \quad (10)$$

$$R_{x'_e y'_e}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x'_e(n)y'_e(n) \quad (11)$$

则期望值对应为:

$$E\{R_{x_e y_e}(0)\} = \frac{AB}{2} \cos(\theta_2 - \theta_1) + \frac{AB}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + \theta_1 + \theta_2) \quad (12)$$

$$E\{R_{x_e y'_e}(0)\} = \frac{AB}{2} \sin(\theta_2 - \theta_1) + \frac{AB}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2\omega n + \theta_1 + \theta_2) \quad (13)$$

$$E\{R_{x'_e y_e}(0)\} = -\frac{AB}{2} \sin(\theta_2 - \theta_1) + \frac{AB}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2\omega n + \theta_1 + \theta_2) \quad (14)$$

$$E\{R_{x'_e y'_e}(0)\} = \frac{AB}{2} \cos(\theta_2 - \theta_1) - \frac{AB}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + \theta_1 + \theta_2) \quad (15)$$

$$E\{R_{x_e y'_e}(0) - R_{x'_e y_e}(0)\} = AB \sin(\theta_2 - \theta_1) \quad (16)$$

$$E\{R_{x_e y_e}(0) + R_{x'_e y'_e}(0)\} = AB \cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (17)$$

通过正弦公式可得两路信号的相位差 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{R_{x_e y'_e}(0) - R_{x'_e y_e}(0)}{R_{x_e y_e}(0) + R_{x'_e y'_e}(0)}\right) \quad (18)$$

通过上述推导过程可以看出, 所提方法有效解决了相关法受非整周期长度的影响, 不存在测量误差, 大幅提升了相关法的相位差测量精度。

2.4 实现步骤

本文所提方法的技术路线如图 3 所示。

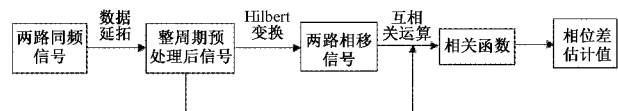


图 3 方法技术路线

归纳起来,其实现步骤如下:

- 1) 采用改进算法的陷波器估计信号频率;
- 2) 对滤波后的增强信号进行整周期延拓处理;
- 3) 对延拓处理后的信号进行 Hilbert 变换;
- 4) 对变换前后的延拓信号进行相关运算;
- 5) 利用式(18)求得相位差。

3 仿真分析

3.1 频率估计结果

针对自适应陷波器存在长时间持续跟踪精度较差的问题,提出了增加监测因子的改进措施,适用于任何一种自适应陷波器,为证实所提方法的有效性,选择格型陷波器^[13]进行测试分析,信号模型参数如文献[14]所示,仿真结果如图4和5所示。

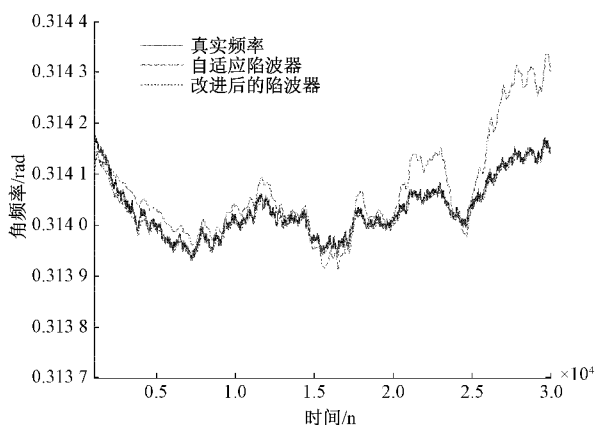


图4 自适应陷波器改进前后的频率估计结果

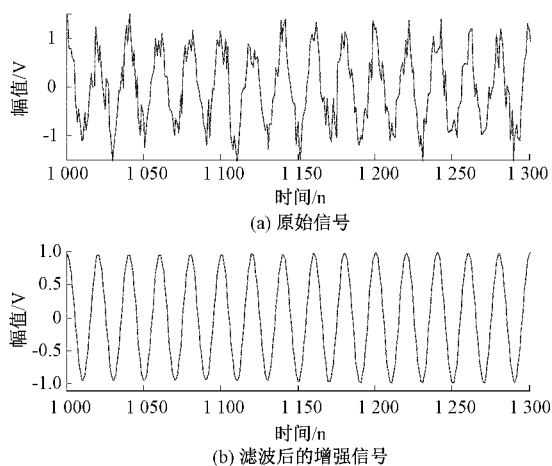


图5 自适应陷波器的滤波效果

由图4可以看出,改进措施有效解决了频率估计长时间持续跟踪精度较差的问题,自适应陷波器可以始终保持着较高的频率估计精度。

由图5可以看出,自适应陷波器具有较好的滤波效果,即使在信噪比较低(SNR=10 dB)的时候也能取得较好的

效果。采用滤波后的信号进行整周期数据延拓处理和 Hilbert 变换,将极大地改善后续相位差估计结果。

3.2 相位差估计结果

为证实本文所提方法不受相关长度的影响,在信噪比 SNR=25 dB 情况下,对相关长度 N 在 20~60 之间变化的测试结果如图6所示。由图6可以看出,本文所提方法始终保持较高的相位差估计精度,不受相关长度是否整周期的影响,而传统的相关法受相关长度是否整周期的影响,与前述理论分析中式(2)~(5)所述一致。

为进一步证实本文所提方法在不同信噪比情况下的相位差估计效果,选取非整周期相关长度进行测试,结果如图7所示。由图7可以看出,本文所提方法始终保持着比传统方法较高的相位差估计精度,随着信噪比的不断增大,相位差估计精度也会不断提高,但当信噪比增加到一定程度时,再增加信噪比所提高的相位差估计效果也较为有限。

综合图6和7可以得出,本文所提方法有效克服了传统相关法受相关长度非整周期的影响,明显提升了相位差估计精度。即使相关长度 $N=2$ 时,也可用于相位差估计,可有效提高相位差估计的实时性和动态特性,非常适用于科氏流量计的信号处理。

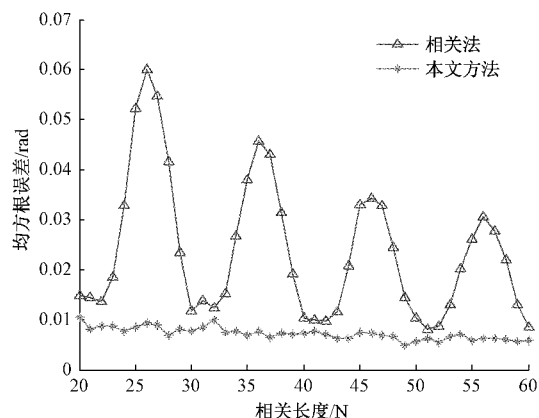


图6 不同相关长度下的相位差估计结果

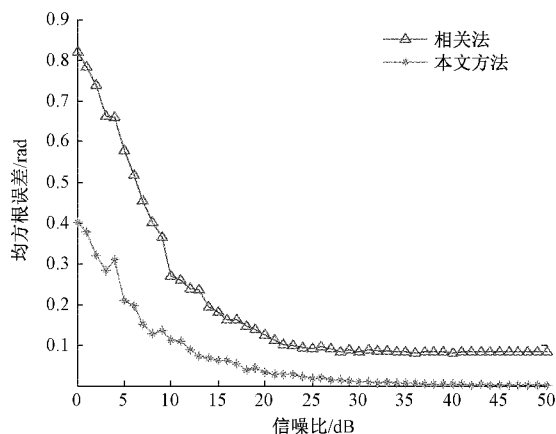


图7 不同信噪比下的相位差估计结果

3.3 工程应用

应用科氏流量计实验平台对所提方法进行实验验证,实验平台如图 8 所示,流量计频率为 146 Hz,采样频率为 10 kHz。实际采集罗斯蒙特 F200S 型流量计信号进行分析,用所提算法进行数据处理,并用标准水箱电子秤的结果作为理论参考值进行比较。

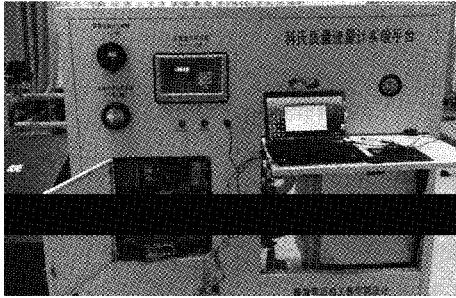


图 8 科氏流量计实验平台

表 1 为本文方法在 4 种不同平稳流量情况下计算得到的时间差估计均值。可以看出本文所提方法的计算结果与理论值较为接近,具有较高的测量精度,适用于科氏流量计的信号处理。

表 1 不同流量情况下的时间差估计值

| 不同流量/ ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$) | 理论时间 差值/ μs | 本文方法 时间差值/ μs |
|--|---------------------------|-----------------------------|
| 0.40 | 3.12 | 3.13 |
| 2.28 | 16.50 | 16.53 |
| 5.88 | 42.50 | 42.57 |
| 8.50 | 60.78 | 60.86 |

4 结 论

针对科氏流量计信号的频率和相位差估计问题,提出了一种基于陷波器和相关法的科氏流量计信号处理方法。通过引入负反馈控制来解决自适应陷波器长时间持续跟踪问题,提高频率估计精度,充分利用频率估计结果,对自适应陷波器滤波后的增强信号进行整周期数据处理,对数据处理后的信号进行希尔伯特变换,对变换前后的信号进行相关运算,再利用正弦公式计算相位差,进而可求得质量流量。仿真结果表明,本文方法具有较高的频率估计精度和滤波效果,相位差估计不受相关长度的影响,可用于科氏流量计的实时信号处理。

参考文献

[1] BASSE N T. A review of the theory of Coriolis flowmeter measurement errors due to entrained particles[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 37: 107-118.
 [2] SHEN T A, TU Y Q, ZHANG H T. A novel time varying signal processing method for Coriolis mass

flowmeter [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(6): 065116.

- [3] CHEN N, FAN S, ZHENG D. A phase difference measurement method based on strong tracking filter for Coriolis mass flowmeter[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(7): 075003.
 [4] 沈廷鳌,管金发,罗媛媛,等. 流量仪表的几种测量方法分析及改进措施[J]. 电子测量技术, 2019, 42(11): 61-64.
 [5] 沈廷鳌,涂亚庆,李明,等. 基于一类新窗的滑动 DTFT 高精度相位差测量算法及分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1302-1309.
 [6] 沈廷鳌,李明,张起欣,等. 基于相关和 Hilbert 变换的科氏流量计相位差估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 2908-2914.
 [7] SHEN T, LI H, ZHANG Q, et al. A novel adaptive frequency estimation algorithm based on interpolation FFT and improved adaptive notch filter [J]. Measurement Science Review, 2017, 17(1): 48.
 [8] ABDOUSH Y, GARCIA M J A, CORAZZA G E. Adaptive instantaneous frequency estimation based on time-frequency distributions with derivative approximation [J]. Signal Processing, 2019, 160: 99-105.
 [9] 沈廷鳌,管金发,华卫星,等. 基于 FFT 的极端频率信号相位差测量方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 6-10.
 [10] SHEN T, CHEN L, GUAN J, et al. A new sliding discrete Fourier transform phase difference measurement method for extreme frequency signals [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(1): 015103.
 [11] VUCIJAK N M, SARANOVAC L V. A simple algorithm for the estimation of phase difference between two sinusoidal voltages [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(12): 3152-3158.
 [12] 郑胜峰,陈素明,狄金海,等. 一种基于多重互相关的相位差测量新方法[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(1): 34-40.
 [13] 沈廷鳌,涂亚庆,刘翔宇,等. 基于相关原理的非整周期信号相位差测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2153-2160.
 [14] 徐科军,倪伟,陈智渊. 基于时变信号模型和格型陷波器的科氏流量计信号处理方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 596-601.
 [15] TA M, THAI H, DEBRUNNER V. Stochastic search methods to improve the convergence of adaptive notch filters[C]. 2009 IEEE 13th Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop, IEEE, 2009: 78-83.

作者简介

沈廷鳌,博士,讲师,主要研究方向为信号处理、仪表检测技术。

E-mail: 279522560@qq.com