

基于相关和 Hilbert 变换的科氏流量计相位差估计方法^{*}

沈廷鳌, 李明, 李华南, 张起欣
(陆军勤务学院 重庆 401311)

摘要:科氏流量计相位差估计方法存在计算量较大、计算复杂、实时性和计算精度较差等问题,已不能满足复杂环境高精度流量测量领域的需求。为此,提出一种基于相关和 Hilbert 变换的科氏流量计相位差估计方法。首先,采用快速傅里叶变换(FFT)对传感器信号进行频率预估计,对信号是否整周期进行判断,对非整周期的信号进行数据延拓处理;然后,对任一路传感器信号进行自相关运算得到一路同频参考信号;对3路同频信号进行 Hilbert 变换,将3路变换后的信号与变换前信号进行相关运算,再利用三角函数公式即可求出相位差。与原有方法相比,所提方法克服了非整周期采样的影响,实时性、动态性更强,相位差估计精度更高,仿真分析与实测结果均证实了所提方法的有效性和优越性。

关键词:相位差估计;相关法;Hilbert 变换;非整周期采样;科氏流量计

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

Phase difference estimation method for Coriolis mass flowmeter based on correlation and Hilbert transform

Shen Ting'ao, Li Ming, Li Hua'nan, Zhang Qixin
(Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, China)

Abstract: The phase difference estimation methods for Coriolis Mass Flowmeter are unsuitable for many high precision flow measurement areas, due to high computational load, high calculation complexity, low real-time performance, and poor accuracy. To solve these issues, a new phase difference estimation method for Coriolis mass flowmeter is proposed based on correlation and Hilbert Transform. Firstly, the signal frequency is estimated by FFT, which is used to determine the integer period of the sampling signal, and the non-integer period sampling signals need to be extended. Then, the same frequency reference signal can be generated by using auto-correlation of original signal. Then, the Hilbert Transform is conducted to these three signals, and the correlation functions of these three signals with the transformed three signals can be computed. Finally, the formula of phase difference can be obtained by utilizing the sine functions. Compared with traditional methods, the proposed method is suitable for both integer-period and non-integer-period sampling signals, and its accuracy, real-time and dynamic performance is superior. Simulations and experiment results verify the effectiveness and superiority of the proposed method.

Keywords: phase difference estimation; correlation method; Hilbert transform; non-integer period sampling; Coriolis mass flowmeter

0 引言

油料是战争的血液,面对当前能源紧张的挑战,对油料计量的要求越来越高。精确的计量有利于减少人力、

物力和财力的消耗,进而提高油料保障的速度和效率,其中,计量的方法以及所采用的仪器仪表是实现精确计量的关键因素之一。在控制科学与工程等领域,科氏流量计已成为当前研究最多、发展最为迅速、最具代表性的质量流量计之一,已在石油、化工等行业得到了广泛应用^[1-2]。

科氏流量计通过测量两路传感器输出信号之间的相

位差(时间差)来计算流体的质量流量^[3-5]。当前,科氏流量计的相位差估计方法很多。其中,频谱分析法和相关分析法是研究较多的两大类方法。频谱分析法利用傅里叶变换把时域信号变换到频域进行处理,在一定程度上可以抑制随机噪声和谐波干扰的影响,提高了相位差的估计精度。目前研究较多的频谱分析法有快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)法^[6]、离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)法^[7]、离散时间傅里叶变换(discrete-time Fourier transform, DTFT)法^[8]等。此类方法要求整周期采样,在非整周期采样条件下,通常采用插值或加窗截取的办法来抑制频谱泄露的影响,不适用于实时性要求较高的场合。相关分析法通过计算两路同频信号的延时为零时刻的互相关函数值来求解相位差。目前研究较多的相关分析法有插值法^[9]、双相关法^[10]和多重互相关法^[11]等。此类方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,具有较强地抑制噪声干扰的能力,但也无法完全消除非整周期采样对估计结果带来误差的影响,且现有方法不适用于动态相位差的计算,影响了相位差估计的实时性和精确性。

从相关法的原理出发,为打破传统方法相位差估计精度受整周期采样条件的限制,进一步提高相位差估计精度,提出了一种基于相关和 Hilbert 变换的科氏流量计相位差估计方法,详细阐述了方法基本原理及实现步骤,并在不同信噪比、不同信号长度等条件下,分别进行了仿真分析和应用验证,以证实本文所提方法的有效性。

1 相关法分析

设离散后两路同频信号分别为:

$$x(n) = A\cos(\omega n + \theta_1) + e_1(n) \quad (1)$$

$$y(n) = B\cos(\omega n + \theta_2) + e_2(n) \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 θ_1 、 θ_2 分别为信号的幅值和初相位, $e_1(n)$ 、 $e_2(n)$ 为信号中的随机噪声。按照相关函数的定义,利用信号与噪声、噪声与噪声之间互不相关的特性,对上述两路信号进行相关运算^[12-14],则:

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \quad (3)$$

$$R_{xx}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (4)$$

$$R_{yy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n) \quad (5)$$

$R_{xy}(0)$ 、 $R_{xx}(0)$ 、 $R_{yy}(0)$ 的期望值分别为:

$$E\{R_{xy}(0)\} = \frac{AB}{2} \cos(\theta_2 - \theta_1) + \frac{AB}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + \theta_1 + \theta_2) \quad (6)$$

$$E\{R_{xx}(0)\} = \frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + 2\theta_1) \quad (7)$$

$$E\{R_{yy}(0)\} = \frac{B^2}{2} + \frac{B^2}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega n + 2\theta_2) \quad (8)$$

若定义 $\Delta\theta$ 为两路信号的相位差,则:

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 =$$

$$\arccos\left(\frac{2R_{xy}(0)}{AB}\right) = \arccos\left(\frac{R_{xy}(0)}{\sqrt{R_{xx}(0)} \sqrt{R_{yy}(0)}}\right) \quad (9)$$

式(9)即为相关法的相位差计算公式^[12-14]。

由式(6)~(8)可知,当相关长度 N 为整周期长度时,式(6)~(8)中的第 2 项均为 0,代入式(9)可准确计算出两路信号的相位差;然而,当相关长度 N 不为整周期长度时,式(6)~(8)中的第 2 项均不为 0,此时,存在 2 倍频形式的误差项,代入式(9)求得两路信号的相位差误差较大,进一步说明相关长度是否整周期长度是影响相关法相位差估计精度的主要原因^[12-14]。

2 改进方法

2.1 基本思想

相关法在进行相位差估计时,一般将信号长度作为相关长度进行计算,进而导致相关法无法实现动态相位的估计。根据上述分析可知,相关法的相位差估计精度主要受相关长度非整周期的影响。为解决上述问题,提出一种基于相关和 Hilbert 变换的科氏流量计相位差估计方法。首先,采用 FFT 对传感器信号进行频率预估计,对信号是否整周期进行判断,对非整周期的信号进行数据延拓处理;然后,对任一路传感器信号进行自相关运算,进而产生得到一路与原始信号同频的参考信号;再对 3 路同频信号进行 Hilbert 变换,使其产生 90° 相移,将 3 路变换后的信号与原 3 路信号进行相关运算,再利用三角函数公式即可求出相位差。其原理框图如图 1 所示。

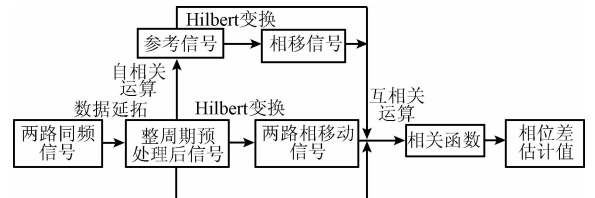


图 1 本文方法的原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed method

2.2 实现步骤

根据方法所述基本思想,方法具体实现步骤如下。

1) 整周期数据预处理

假设采样得到的两路信号序列分别为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{N-1}, x_N]$ 和 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_{N-1}, y_N]$ 。首先,采用

FFT 法对采样信号的频率或周期进行预估计,假设周期预估计结果为 $P, P \in \mathbb{Z}^+$ 可理解为一个周期的采样点数;然后,用 N 除以 P ,假设商为 k ,余数为 m 。若存在 $m = 0$,则说明相关长度和信号的整周期长度成整数倍关系,此时信号序列无需处理。若存在 $m > 0$,则说明相关长度在 $k \sim k+1$ 周期之间(即超过 k 个周期,但未达到 $k+1$ 个周期),此时需进行数据延拓处理,即根据信号周期性,分别从信号序列 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ 中查找出 $P-m$ 个数据 $[x_{(k-1)P+m+1}, \dots, x_{kP}]$ 和 $[y_{(k-1)P+m+1}, \dots, y_{kP}]$,并将其添加到原序列之后,延拓后的信号序列为整周期长度,即:

$$\mathbf{x}_e = [x_1, x_2, \dots, x_N, x_{(k-1)P+m+1}, \dots, x_{kP}] \quad (10)$$

$$\mathbf{y}_e = [y_1, y_2, \dots, y_N, y_{(k-1)P+m+1}, \dots, y_{kP}] \quad (11)$$

2) 产生同频参考信号

利用自相关原理:通过对任一路信号进行自相关运算后,可产生得到与原始信号同频的信号。设自相关后得到的同频参考信号为:

$$z(n) = C \cos(\omega_0 n + \theta_3) + e_3(n) \quad (12)$$

3) 进行 Hilbert 变换

对 $x(n)$ 、 $y(n)$ 和 $z(n)$ 分别进行 Hilbert 变换,可产生得到具有 90° 相移的 3 路相移信号:

$$x'(n) = A \sin(\omega_0 n + \theta_1) + e'_1(n) \quad (13)$$

$$y'(n) = B \sin(\omega_0 n + \theta_2) + e'_2(n) \quad (14)$$

$$z'(n) = C \sin(\omega_0 n + \theta_3) + e'_3(n) \quad (15)$$

4) 进行相关运算

对 $x(n)$ 、 $y(n)$ 、 $z(n)$ 、 $x'(n)$ 、 $y'(n)$ 、 $z'(n)$ 分别进行相关运算,得:

$$R_{xz}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z(n), R_{xz'}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x'(n)z'(n) \quad (16)$$

$$R_{xz'}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z'(n), R_{x'z}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x'(n)z(n) \quad (17)$$

$$R_{yz}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n)z(n), R_{yz'}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y'(n)z'(n) \quad (18)$$

$$R_{yz'}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n)z'(n), R_{y'z}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y'(n)z(n) \quad (19)$$

则 $R_{xz}(0)$ 、 $R_{xz'}(0)$ 、 $R_{xz'}(0)$ 、 $R_{x'z}(0)$ 、 $R_{yz}(0)$ 、 $R_{yz'}(0)$ 、 $R_{yz'}(0)$ 、 $R_{y'z}(0)$ 分别为:

$$R_{xz}(0) = \frac{AC}{2} \cos(\theta_3 - \theta_1) + \frac{AC}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega_0 n + \theta_1 + \theta_3) \quad (20)$$

$$R_{xz'}(0) = \frac{AC}{2} \cos(\theta_3 - \theta_1) - \frac{AC}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega_0 n + \theta_1 + \theta_3) \quad (21)$$

$$R_{xz'}(0) = \frac{AC}{2} \sin(\theta_3 - \theta_1) + \frac{AC}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2\omega_0 n + \theta_1 + \theta_3) \quad (22)$$

$$R_{x'z}(0) = -\frac{AC}{2} \sin(\theta_3 - \theta_1) + \frac{AC}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2\omega_0 n + \theta_1 + \theta_3) \quad (23)$$

$$R_{yz}(0) = \frac{BC}{2} \cos(\theta_3 - \theta_2) + \frac{BC}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega_0 n + \theta_2 + \theta_3) \quad (24)$$

$$R_{yz'}(0) = \frac{BC}{2} \cos(\theta_3 - \theta_2) - \frac{BC}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\omega_0 n + \theta_2 + \theta_3) \quad (25)$$

$$R_{y'z}(0) = \frac{BC}{2} \sin(\theta_3 - \theta_2) + \frac{BC}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2\omega_0 n + \theta_2 + \theta_3) \quad (26)$$

$$R_{y'z}(0) = -\frac{BC}{2} \sin(\theta_3 - \theta_2) + \frac{BC}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2\omega_0 n + \theta_2 + \theta_3) \quad (27)$$

5) 求解相位差

利用正弦函数和三角公式可得:

$$R_{xz}(0) + R_{x'z'}(0) = AC \cos(\theta_3 - \theta_1) \quad (28)$$

$$R_{xz'}(0) - R_{x'z}(0) = AC \sin(\theta_3 - \theta_1) \quad (29)$$

$$R_{yz}(0) + R_{y'z'}(0) = BC \cos(\theta_3 - \theta_2) \quad (30)$$

$$R_{yz'}(0) - R_{y'z}(0) = BC \sin(\theta_3 - \theta_2) \quad (31)$$

其中:

$$\begin{aligned} \sin(\theta_2 - \theta_1) &= \sin[(\theta_3 - \theta_1) - (\theta_3 - \theta_2)] = \\ \sin(\theta_3 - \theta_1) \cos(\theta_3 - \theta_2) - \cos(\theta_3 - \theta_1) \sin(\theta_3 - \theta_2) &= \\ \frac{(R_{xz} - R_{x'z})}{AC} \cdot \frac{(R_{yz} + R_{y'z'})}{BC} - \frac{(R_{xz} + R_{x'z'})}{AC} \cdot \frac{(R_{yz'} - R_{y'z})}{BC} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \cos(\theta_2 - \theta_1) &= \cos[(\theta_3 - \theta_1) - (\theta_3 - \theta_2)] = \\ \cos(\theta_3 - \theta_1) \cos(\theta_3 - \theta_2) + \sin(\theta_3 - \theta_1) \sin(\theta_3 - \theta_2) &= \\ \frac{(R_{xz} + R_{x'z'})}{AC} \cdot \frac{(R_{yz} + R_{y'z'})}{BC} + \frac{(R_{xz'} - R_{x'z})}{AC} \cdot \frac{(R_{yz'} - R_{y'z})}{BC} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \tan(\theta_2 - \theta_1) &= \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{\cos(\theta_2 - \theta_1)} = \\ \frac{(R_{xz'} - R_{x'z})(R_{yz} + R_{y'z'}) - (R_{xz} + R_{x'z'})(R_{yz'} - R_{y'z})}{(R_{xz} + R_{x'z'})(R_{yz} + R_{y'z'}) + (R_{xz'} - R_{x'z})(R_{yz'} - R_{y'z})} \end{aligned} \quad (34)$$

则相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \theta_2 - \theta_1 = \\ \arctan \frac{(R_{xz'} - R_{x'z})(R_{yz} + R_{y'z'}) - (R_{xz} + R_{x'z'})(R_{yz'} - R_{y'z})}{(R_{xz} + R_{x'z'})(R_{yz} + R_{y'z'}) + (R_{xz'} - R_{x'z})(R_{yz'} - R_{y'z})} \end{aligned} \quad (35)$$

式(35)即为本文所提方法的相位差计算公式。与传统的相关方法相比,本文所提方法无需计算信号幅值,

且充分利用了信号间的相互关系, 所得结果不受相关长度 N 的影响, 方法更具动态性、鲁棒性和普适性。

由基本思想和实现步骤可以看出: 本文方法增加了整周期预处理环节, 主要是为了抑制 Hilbert 变换的失真问题; 增加自相关运算环节, 主要是为了引入同频参考信号。本文方法通过利用信号间的相互关系来克服非整周期采样的影响, 提高了方法的动态响应能力, 且通过信号间的多次互相关运算, 进一步消除了噪声的影响, 提高了方法的相位差估计精度。本文方法集成了数据延拓、自相关和多次互相关 3 种技术的特点和优势, 有效抑制了失真问题和噪声的影响, 提高了相位差的估计性能。

3 实验结果

为证实本文方法的有效性, 首先在 MATLAB 环境下, 对相关法和本文方法进行了仿真比较分析。设两路信号序列为:

$$x(n) = \cos\left(\frac{2\pi n \times 100}{1500} + \frac{\pi}{6}\right) + e_1(n) \tag{36}$$

$$y(n) = \cos\left(\frac{2\pi n \times 100}{1500} + \frac{\pi}{3}\right) + e_2(n) \tag{37}$$

式中: 信号频率、采样频率分别为 100、1 500 Hz; $e_1(n)$ 和 $e_2(n)$ 均为随机产生的加性高斯白噪声信号。

3.1 不同信噪比的对比结果

为比较两种方法在不同信噪比条件下的相位差估计精度, 分别在相关长度 $N = 20$ (非整周期长度) 和 $N = 30$ (整周期长度) 两种情况下进行了 100 次随机实验, 信噪比 SNR 在 0 ~ 50 dB 变化, 对比结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 在整周期条件 ($N = 30$) 下, 相关法的相位差估计精度明显好于非整周期条件 ($N = 20$) 下的相位差估计精度; 本文方法一直处于相关法的下方, 仅在同时满足较高信噪比和整周期条件下, 相关法的相位差估计精度才接近本文方法的相位差估计精度; 本文方法不受相关长度是整周期和非整周期的影响, 均保持着较高的相位差估计精度。为此, 可以得出本文方法更具抗噪性, 且不受相关长度是否整周期的影响, 更具普适性。

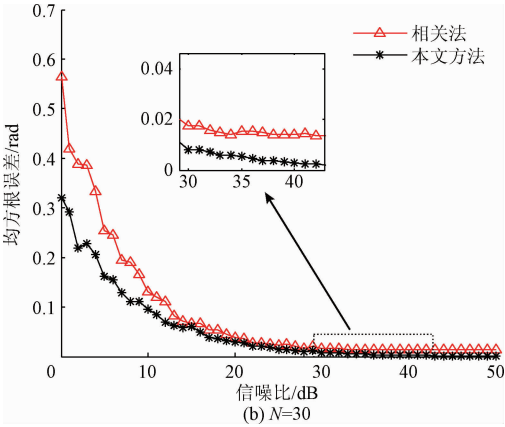
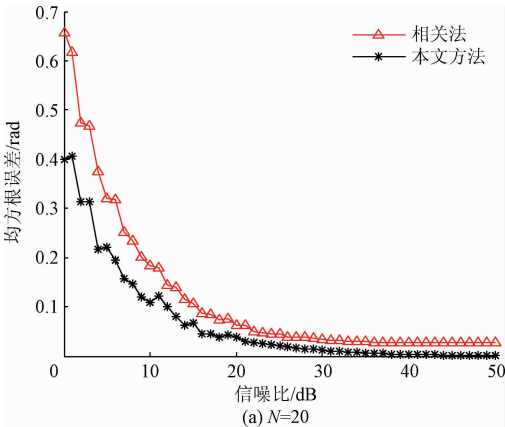


图 2 不同信噪比 SNR 条件下的相位差均方根误差
Fig. 2 RMSE of the phase difference with different SNR

3.2 不同相关长度 N 的对比结果

为比较两种方法在不同相关长度条件下的相位差估计精度, 分别在信噪比为 10 dB 和 30 dB 两种情况下进行了 100 次随机实验, 相关长度 N 在 20 ~ 60 变化, 对比结果如图 3 所示。

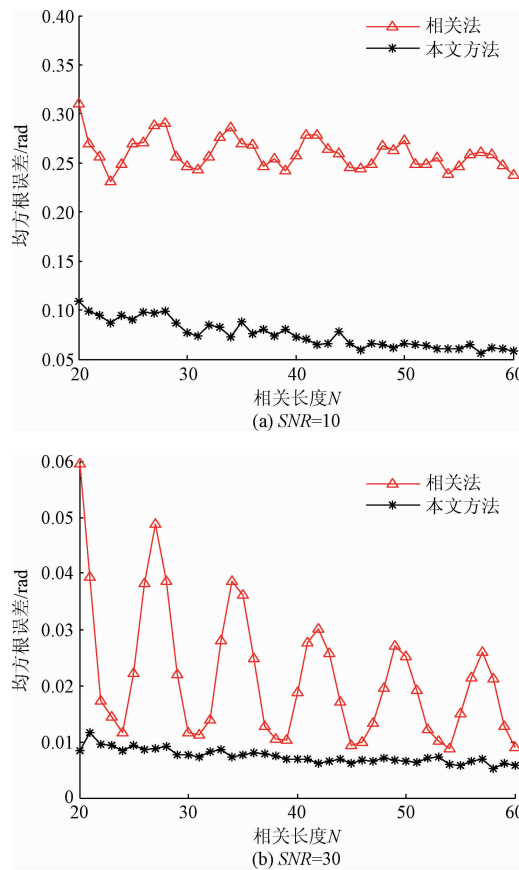


图 3 不同相关长度条件下的相位差均方根误差
Fig. 3 RMSE of phase difference with different correlation length

由图3可知,相关法的相位差均方根误差曲线是震荡变化的,当相关长度为整周期长度时,相关法的相位差估计精度达到最优值,说明相关法与选取的相关长度有关,要求相关长度与信号整周期长度成整数倍关系;本文方法的相位差均方根误差近似为一条直线,说明本文方法不受采样是否整周期长度的影响,均保持着较高的相位差估计精度。

此外,由图3还可以看出,相关法受相关长度是否整周期长度的影响,在低信噪比条件下,相关法受噪声的影响大于相关长度非整周期的影响;在较高信噪比条件下,相关法受噪声的影响小于相关长度非整周期的影响。同时,增加相关长度可提高相关法的相位差估计精度,但当相关长度增加到一定数量时,再增加相关长度也不会明显改善相关法的相位差估计精度。与相关法相比,本文方法不受相关长度是否整周期长度的影响,更具抗噪性、相位差估计精度更高。

综上分析可得,本文方法克服了相关法相位差估计中相关长度需与整周期相匹配这一限制条件,选取相关长度为两点也可实现相位差的准确估计,提高了方法的动态性能;本文方法利用信号与噪声互不相关的特性,通过多次相关运算,进一步提高了方法的抗噪性。

3.3 工程应用

为进一步证实本文方法的实际效果,利用图4所示的科氏流量计实验平台进行应用验证。由于现有的相关方法不能实现动态相位估计,目前科氏流量计常用的相位差估计方法还是频谱分析法,如SGA法(slide Goertzel algorithm)^[15]、DTFT法^[16]。为此,本文选择SGA法、DTFT法和本文方法进行比较说明。流量计的振动频率为200 Hz,采样频率为20 kHz,流量测量范围为0.01~500 kg·min⁻¹。其中,F200S为进口流量计,精度为0.1%;TQ-884为国产流量计,精度为0.2%。由于进口流量计精度较高,且进口流量计无法拆封,而国产流量计便于拆封,于是将F200S作为标准流量计,将TQ-884作为实验流量计。电子秤选用的是FS3198-A2,其测量范围为0~1 000 kg,精度为±0.01 kg。



(a) 实物照片
(a) Physical photo

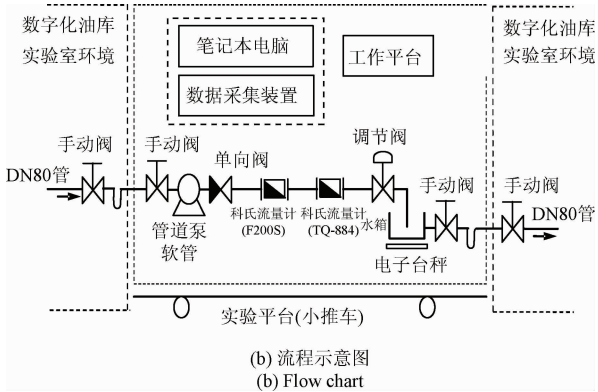


图4 科氏流量计实验平台

Fig. 4 Coriolis mass flowmeter platform

为充分比较本文方法、SGA法和DTFT法的性能,首先将上述3种方法在计算机上利用MATLAB软件进行仿真分析;然后,利用数据采集装置采集标准流量计F200S的流量数据,将采集的数据也在计算机上利用MATLAB软件对3种方法进行比较分析;最后,将3种方法分别嵌入到实验流量计TQ-884的变送器里,与标准流量计F200S进行在线测试比较。由于SGA法收敛较慢,选取2 000~20 000的采样点进行比较分析。仿真测试结果如图5所示,离线测试结果如图6所示,在线测试结果如图7和表1所示。

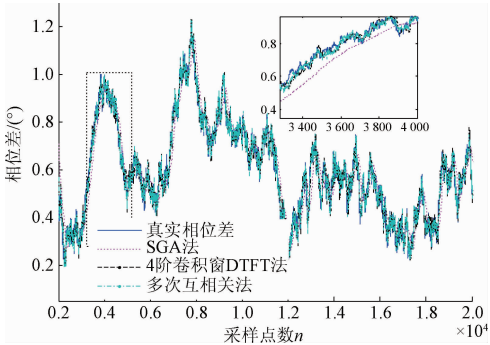


图5 三种方法的相位差估计曲线

Fig. 5 Phase differences estimated by three methods

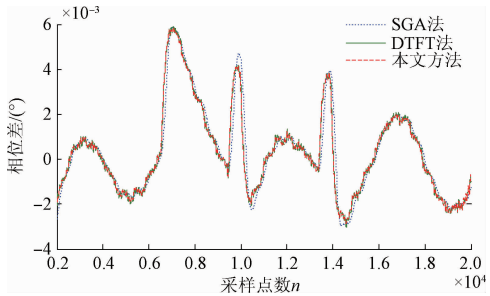


图6 非平稳流量为0~105.2 kg·min⁻¹时的
相位差估计曲线

Fig. 6 Phase differences estimated by three methods
at 0~105.2 kg·min⁻¹ flowrate

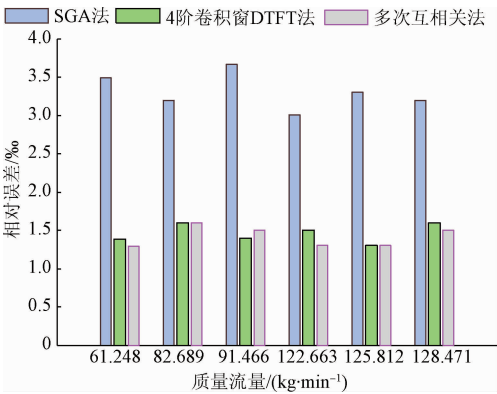


图 7 三种方法的流量测量误差

Fig. 7 Flow measurement errors estimated by the three phase difference estimation methods

表 1 三种相位差估计方法的对比实验结果

Table 1 Experimental results estimated by the three phase difference estimation methods

标准变送器	(kg·min ⁻¹)		
	SGA 法	DTFT 法	本文方法
61.248	61.462	61.333	61.327
82.689	82.953	82.821	82.821
91.466	91.801	91.594	91.603
122.663	123.031	122.847	122.822
125.812	126.227	125.975	125.975
128.471	128.882	128.676	128.663

结合图 5~7 和表 1 可以看出,3 种方法的估计曲线趋势是一致的,可以较好地反映出真实相位差的实际情况;SGA 法由于算法复杂且存在收敛过程,导致方法跟踪存在一定的滞后,而本文所提方法与 DTFT 法基本重合,充分说明本文方法也具有较高的相位差估计精度,实时性和动态性均较好,也进一步证实了本文方法在实际工程应用中的可行性和有效性。另需说明的是,相关法无法实现动态相位估计,但经过本文改进后,可应用于科氏流量计相位差的动态估计,且估计精度与当前应用较多的 DTFT 法相当,为科氏流量计的相位差估计提出了一种新的方法。此外,DTFT 法需预知信号频率,而本文方法无需预知信号频率,且利用两点数据即可实现相位差的动态估计,计算量更小,实时性更好。

4 结 论

传统的相关方法相位差估计精度受相关长度是否整周期的影响,不能实现动态相位估计,进而导致无法应用

于科氏流量计的相位差估计。本文在相关法的基础上进行改进,提出了一种基于相关和 Hilbert 变换的科氏流量计相位差估计方法,详细阐述了方法的基本思想及实现步骤,并给出了仿真分析和工程应用实例。实验结果表明:本文方法相位差估计中相关长度的选取不受整周期条件的限制,利用两点数据即可实现相位差的动态估计,计算量更小、实时性更好;本文方法无需预知信号频率,抗噪性更强、普适性更好;仿真分析和工程应用实例均证实了本文方法的可行性和有效性。

参考文献

[1] MASAHIRO K. A mathematical model and error analysis of Coriolis mass flowmeters [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2011, 60 (4): 1163-1174.

[2] BASSE N T. A review of the theory of Coriolis flowmeter measurement errors due to entrained particles [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 37(6): 107-118.

[3] XING L CH, GENG Y F, HUA CH Q, et al. A combination method for metering gas-liquid two-phase flows of low liquid loading applying ultrasonic and Coriolis flowmeters [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 37(6): 135-143.

[4] 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.

[5] 张建国,徐科军,方正余,等. 气液两相流下微弯型科氏质量流量计信号建模 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 870-877.

ZHANG J G, XU K J, FANG ZH Y, et al. Signal modeling for micro-bend type Coriolis mass flowmeter under gas-liquid two-phase flow[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 870-877.

[6] 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 Y Q. New signal processing method with negative frequency contribution for Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(3): 539-544.

[7] CHEN K, ZHENG D ZH, FAN SH CH, et al. Novel coriolis mass flowmeter signal processing algorithms based on DFT and digital correlation [C]. Industrial Electronics & Applications, 2010: 56-60.

- [8] SHEN T A, TU Y Q, LI M, et al. A new phase difference measurement algorithm for extreme frequency signals based on discrete time Fourier transform with negative frequency contribution [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(1): 015104.
- [9] 杨艾兵, 张锡恩, 郭利. 相关原理在测试领域的应用分析[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(13): 3249-3251.
YANG AI B, ZHANG X EN, GUO L. Analysis of correlation theory applied in testing area[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(13): 3249-3251.
- [10] 李建民, 赵鹏, 侯文, 等. 基于相关理论的相位差算法的误差研究[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(6): 616-619.
LI J M, ZHAO P, HOU W, et al. Research on error of phase difference algorithm based on correlation theory[J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2009, 30(6): 616-619.
- [11] 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.
ZHENG SH F, CHEN S M, DI J H, et al. Phase difference measurement of sinusoidal signal based on multi-layer cross-correlation[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2012, 32(1): 34-40.
- [12] 沈廷鳌, 涂亚庆, 李明, 等. 数据延拓式相关的相位差测量方法及验证[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1331-1337.
SHEN T AO, TU Y Q, LI M, et al. Research and validation on improved correlation method for phase difference measurement based on data extension[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1331-1337.
- [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.
SHEN T AO, TU Y Q, LIU X Y, et al. Research on phase difference measurement for non-integer period sampling signal based on correlation theory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 2153-2160.
- [14] 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.
- [15] 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.
XU K J, NI W, CHEN ZH Y. A signal processing method for Coriolis mass flowmeter based on time-varying signal model and lattice notch filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(2): 596-601.
- [16] 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的处理方法研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(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, 31(1): 8-14.

作者简介



沈廷鳌, 2008 年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 分别在 2011 年和 2015 年于后勤工程学院获得硕士学位和博士学位, 现为陆军勤务学院讲师, 主要研究方向为信号处理、智能检测与仪表。

E-mail: peoplesta@sina.com

Shen Ting'ao received his B. Sc. degree from China University of Petroleum (Huadong) in 2008, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Logistical Engineering University in 2011 and 2015, respectively. Now he is a lecturer in Army Logistics University of PLA. His main research interests include signal processing, intelligent detection and instrumentation.