

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407545

高速气体超声波流量计飞行时间估计算法研究*

郭 森 李 芳 赵纪元

(北京信息科技大学自动化学院 北京 100192)

摘要:高速气体流量计量如火炬气流量对于节能减排、提升企业经济效益具有重要意义。超声波流量计量程范围广,测量稳定,不受组分变化影响,是火炬气流量测量主流产品。目前该类产品基本为国外垄断,国产超声波流量计在高速气体测量时声波飞行时间波动较大,导致测量结果误差较大。为了寻找合适的声波飞行时间估计算法,在仪表厂家专业计量装置上采集了10~70 m/s的气体流速下的超声波信号,研究了包络拟合法、自相关法、互相关法、小波时频分析法4种信号处理方法。实验结果表明,小波时频分析法飞行时间估计效果较好,标准差小于9 μs ,流速增加标准差增大,高速时还存在一定波动。通过采用求平均、最小二乘法、割线斜率算法等可以消除数据波动,提高测量精度和稳定性,为提升国产超声波流量计精度提供技术基础。

关键词:火炬气;高速气体;超声波流量计;飞行时间估计;小波时频分析

中图分类号: TN911

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

Investigation of time of fly estimation algorithm for gas ultrasonic flowmeter under high speed

Guo Miao Li Fang Zhao Jiyuan

(School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: High-speed gas flow measurement, such as flare gas flow, is of great significance for energy saving and emission reduction, and for improving enterprise economic benefits. Ultrasonic flowmeter has a wide range, stable measurement, and is not affected by component changes. At present, ultrasonic flowmeter is the mainstream product of torch gas flow measurement. At present, this kind of products are basically foreign monopoly. The wave propagation time of domestic ultrasonic flowmeter fluctuates greatly in the measurement of high-speed gas, resulting in a large error of measurement results. In order to find a suitable algorithm for estimating the propagation time of sound waves, ultrasonic signals at gas flow rates ranging from 10 m/s to 70 m/s were collected from professional metering devices of instrument manufacturers. Four signal processing methods including envelope fitting method, autocorrelation method, cross-correlation method and wavelet time-frequency analysis method were studied. The experimental results show that wavelet time-frequency analysis has a good time of fly estimation effect. Standard deviation is smaller than 9 μs . But there are still fluctuations at high speeds. Averaging, least square method or secant slope method can eliminate data fluctuations and improve measurement accuracy and stability.

Keywords: flare gas; high speed gas; ultrasonic flowmeter; time of fly estimation; wavelet time-frequency analysis

0 引言

在天然气加工、炼油、石化、化工等工厂,火炬系统将无法回收和再加工的可燃/有毒气体及蒸汽收集后燃烧,是保障企业安全生产的一项重要措施。通过燃烧,火

炬将废气转化为二氧化碳和水蒸气,从而大大降低废气的的环境影响^[1]。由于环保要求,二氧化碳和其他温室气体的排放需要进行监测,因此对火炬气体的流量测量需求日益迫切。火炬气测量的难点主要有火炬管线直径大、存在污染物容易造成测量堵塞、流量量程比大等,流量计的选择必须满足压损低、适应组分变化大及流速变

化范围大等要求^[2]。

目前常见的用于火炬气流量测量的方法有超声波流量计、热式流量计、差压式流量计等。热式流量计利用流体流过外热源加热的管道时产生的温度场变化来测量流体质量流量,或利用加热流体时流体温度上升某一值所需的能量与流体质量之间的关系来测量流体质量流量。热式流量计的一个缺点是测量前需要知道所测量气体的成分。在流体成分会发生变化的炼油厂和化工厂中,从主流集管中测量火炬气排放可能是一个问题。差压式流量计基于皮托管测速原理设计,使用伯努利定理可以计算 L 型和 S 型皮托管的流量,冲击压力与静压力的差和流量的平方成正比。皮托管安装在火炬排气筒内部用于测量流量,而计算流量的差压变送器则安装在外部。为获得准确结果,皮托管必须安装在尽可能接近管道中流速平均的位置。差压式流量计量程小,在低流量和比重有变化的气体方面也有检测困难。而且,夹带液体的气体也会给检测带来问题。超声波流量计是当今火炬排气筒流量测量的领先技术,这主要是由于它们的量程大,而且具有非侵入性,测量效果稳定。

超声波流量计用于火炬气测量的另一个主要优点是量程范围广,一些超声波流量计的量程比高达 2 000 : 1。因为排气筒中的流量有时可能非常低,然而在其他时间,它可能流量又很高。超声波流量计可以轻松处理流量的低值和高值。传统流量测量技术没有任何一种能像超声波流量计一样满足火炬气测量的高要求^[3]。目前可用于火炬气流量测量的超声波流量计产品为国外产品如美国 GE 垄断,国产超声波流量计在气体速度较高时开始失效,测量结果不准确,而目前相关研究资料较少,因此有必要研究高速气体下超声波流量计延估计。

超声波流量计有两种方法,一种是多普勒法^[4-7],另一种是时差测量法,其中时差测量法用于火炬气测量。时差测量法超声波流量计同时具有发射器和接收器,它们以一定角度在管道上发射超声波信号,并测量信号传播所需的时间。时差法主要原理是当超声波束在流体中传播时,流体的流动将使传播时间产生微小变化,其传播时间的变化正比于液体的流速。零流量时,两个传感器发射和接收声波所需的时间完全相同;液体流动时,逆流方向的声波传输时间大于顺流方向的声波传输时间。赵方芳等^[8]提出改进的自适应时延估计算法,直接用粒子群搜索延迟时间,提高了时延估计精度,但是算法比较复杂,不易硬件植入。杨瑞峰等^[9]采用互相关算法检测超声波的渡越时间,但是面向的是液体计量,不是高速气体流量测量。黄晓红等^[10]提出全相位相位差时延估计方法,减小了声波传播时间测量误差,但也是面向液体流量测量。国外产品由于技术封锁,资料非常有限,因此进行高速气体超声波流量计延估计研究十分有必要。

火炬气的期望流速测量范围一般为 0~85 m/s,能够满足日常小流量和突发事件时大流量等不同工况的测量需求^[11],因此搭建了超声波流量计气体流量测量实验平台,采集 10~70 m/s 的气体流速下超声波信号,研究超声波信号的变化规律,通过包络拟合法、自相关、互相关、小波时频估计算法计算声波飞行时间,选择合适的算法,提高高速流量下声波飞行时间测量精度。

1 超声波流量计测量原理

超高速气体流量计的基本原理如图 1 所示,利用超声波的信号时延来计算气体流速,上下游超声波传感器以距离 L 、与管道夹角 θ 安装在管道上,实线箭头为正程,虚线箭头为逆程,上下游超声波传感器分别发射一个信号,由对面传感器接收,计算出正程声波传播时间 t_+ 、逆程传播时间 t_- 。假设 c 为超声波在非流动介质中声速, v 为流体介质的流动速度。

$$\begin{cases} t_+ = \frac{L}{c + v \cos \theta} \\ t_- = \frac{L}{c - v \cos \theta} \end{cases} \quad (1)$$

$$v = \frac{L}{2 \cos \theta} \left(\frac{t_- - t_+}{t_- t_+} \right) \quad (2)$$

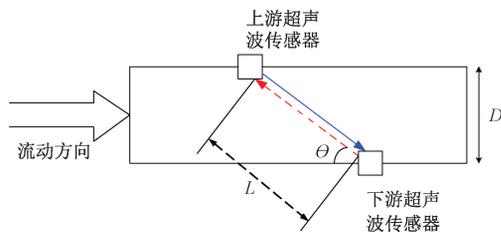


图 1 超声波流量计测量原理

Fig. 1 Principle of ultrasonic flowmeter

根据正程、逆程声波传播时间可以计算出流体速度。随着气体流速的增加,顺向传输时间会减少,而逆向传输时间会增加,从而导致顺逆时间差增大,结合式(1)、(2)可以推导出流速。因此,在实验过程中,关注的重点在于气体同一流速时,顺向传输时间与逆向传输时间的数值。明确这两个变量的数值,也就明确了被测气体的流速。

2 实验装置

在实验室由专业公司搭建了负压高速气体流量计量标准装置,如图 2 所示,主要由泵机抽取空气形成不同的流速,气体流速会随着负压的增大而增大。该装置为音速喷嘴法标准流量装置,通过音速喷嘴的组合保证流速可重复性。音速喷管气体流量标准装置是以音速喷管为

基础的标准仪表,用于检定质量流量计、速度流量计、体积流量计、转子流量计、差压流量计或其他种类的流量计,是计量检测单位和大型企业计量校准气体流量计的标准装置。根据气体动力学原理,当喷管上下游压力比达到临界状态时,喉部气流达到速度峰值,通过喷管的质量流量也达到峰值。该值仅与喷嘴入口处的参数有关,不受下游状态变化的影响。



(a) 整体实验装置
(a) Test rig

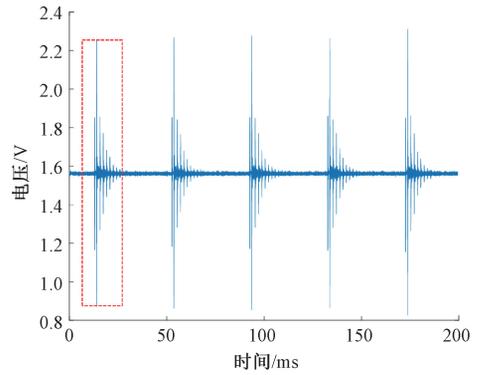


(b) 超声波流量计
(b) Ultrasonic flowmeter

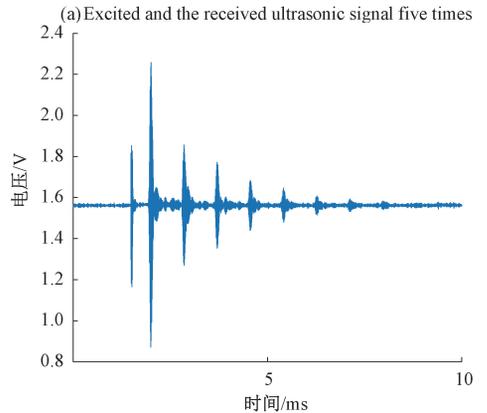
图 2 实验装置
Fig. 2 Test rig

超声波流量计上游探头重复一定次数发射一个激励波形,下游探头接收,两路传感器信号同时由美国国家仪器 USB6366 采集卡同步采样,反过来下游传感器发射上游接收也是一样。发射的信号为一定周期的 100 kHz 方波,采样频率为 2 MHz。10~70 m/s 流速下,超声波理论正程飞行时间经计算为 341~400 μs ,实际流速波动导致时间方差为 10 μs 量级,因此 2 MHz 采样频率时间分辨率为 0.5 μs ,满足时间测量精度要求。超声探头为国产厂家产品。 $D=50\text{ mm}$, $L=140\text{ mm}$, $\theta=45^\circ$ 。采集的超声波信号如图 3 所示。

图 3(a) 是采集的 5 个连续的两个超声波传感器单次激发/接收的超声波信号,图 3(b) 是图 3(a) 红色虚框的明细图,最左边两个是需要用到的信号,后面箭头所示

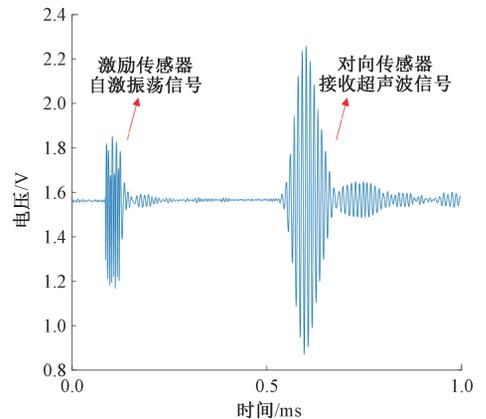


(a) 5次激发/接收的超声波信号



(b) 单次激发接收的超声波信号

(b) Received ultrasonic signal of single excitation



(c) 单次激发/接收的超声波信号局部图

(c) Local diagram of the received ultrasonic signal from a single excitation

图 3 超声波传感器接收信号

Fig. 3 Received signal of ultrasonic sensors

都是声波不断反射后又接收的信号。

图 3(c) 是图 3(b) 中前两个脉冲的局部明细图,两个波形分别是激励传感器激发一个超声波信号时本身产生的自激振荡信号和对向的超声波传感器接收的信号。传统的时延估计时从传感器激励声波开始计时,到对向传感器检测到接收声波到达某阈值时间,这种方法低速时测量稳定,高速时容易受到干扰,不稳定。图 4 为

70 m/s 流速下单次激发接收的超声波信号局部图,可以看出信号由于管路摩擦噪声、振动、气体扰动、流速较大信号吹跑引起的衰减畸变等原因,幅值发生了很大的变化,导致通过捕捉信号波形检测到达时间产生很大误差,波动较大。实验过程通过专业的风机稳定气流,同时物理隔离风机等噪声源,减少环境干扰。但是气体摩擦噪声等是无法避免的,因此需要选择合适的时延估计算法。

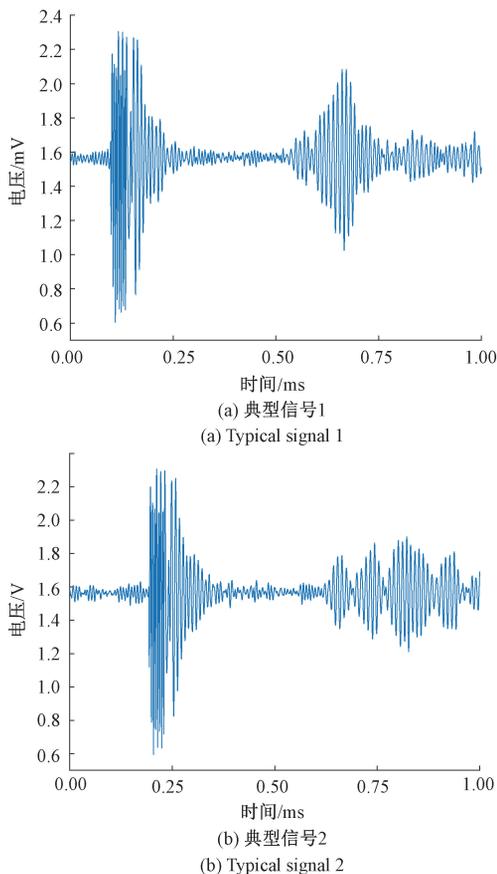


图 4 70 m/s 流速下单次激发接收的超声波信号局部图
Fig. 4 Local diagram of the received ultrasonic signal at a single excitation flow rate of 70 m/s

3 声波传播时间估计

3.1 包络拟合阈值时延估计法

包络拟合是一种用于曲线拟合的工具,可以将给定的数据点通过拟合算法得到一条平滑的曲线^[12]。在信号处理领域,曲线包络拟合是一项重要的技术,它可以用于信号的特征提取、峰值检测、调制解调等多个方面的应用。图 5 为超声波激励接收信号的拟合结果。拟合出包络之后选择阈值法到达时间差估计(图 5 中红色),可以计算出超声波传播时间。

通过对图像波形分析可知,包络拟合确实对接收波形的波峰时间信息有所帮助,但是激发波的波形由于周

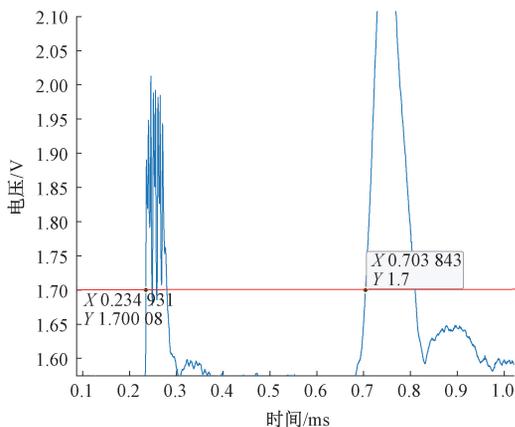


图 5 典型信号的包络拟合图

Fig. 5 Envelope fitting diagram of a typical signal

期性不够,跳动剧烈导致包络失败。由于信号波形易受噪声、振动、高速气体等干扰,因此传统包络拟合法不适合超声波流量计时延估计。赖国强等^[13]提出了在双脉冲激励条件下,使用粒子群优化算法进行回波包络上升沿拟合方法。其基本思想是检测回波包络上升沿分离时刻,从而确定与激励停止时刻相对应的超声波飞行时间测量终点时刻。该方法综合使用了回波上升沿的变化趋势信息,避免使用难于确定且易受噪声干扰的回波到达时刻进行测量,能够更精确地测量超声波飞行时间。后续可以进一步研究该方法在火炬气流量测量的应用效果。

3.2 自相关

自相关是表示信号 $x(t)$ 在任意两个不同时刻的相关程度^[14]。相似性用相关系数来衡量,相关系数越大,相关性越大。自相关系数可计算为:

$$R(k) = \frac{\sum (x(t) - \bar{x})(x(t+k) - \bar{x})}{\sum (x(t) - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: \bar{x} 是信号的均值; k 表示信号的延迟。

图 6、7 分别为 20、70 m/s 流速下图 3(c) 单次激发接收的超声波信号的自相关结果,通过自相关结果的两个波峰之间的时间差可计算出声波传播时间,计算结果表明低速时自相关运算结果较稳定,标准差 $< 5 \mu\text{s}$ 。然而高速时从图 7 可以看出,左边出现多个波束峰值,导致飞行时间估计错误,因此自相关算法不适合高流速下飞行时间估计。

3.3 互相关

互相关函数是信号分析里的概念,表示的是两个时间序列之间的相关程度,即信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 在任意两个不同时刻的取值之间的相关程度^[15]。互相关系数 R_{xy} 计算公式为:

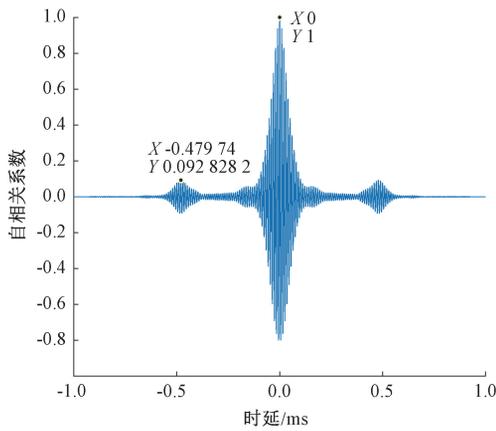


图 6 20 m/s 流速下单次激发接收的超声波信号的自相关结果

Fig. 6 Autocorrelation of the received ultrasonic signal at a flow rate of 20 m/s

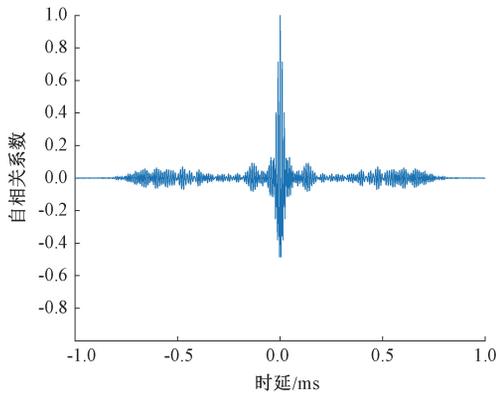


图 7 70 m/s 流速下单次激发接收的超声波信号的自相关结果

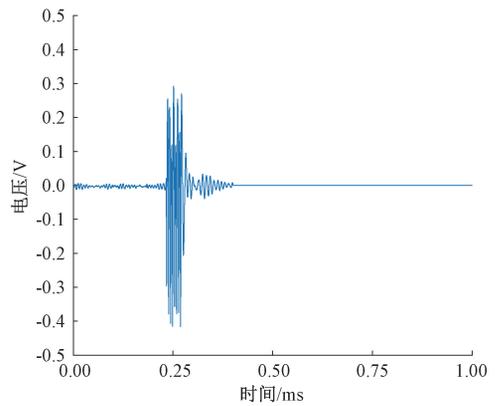
Fig. 7 Autocorrelation of the received ultrasonic signal at a flow rate of 70 m/s

$$R_{xy}(k) = \frac{\sum x(t)y(t+k)}{\sqrt{\sum x(t)^2} \sqrt{\sum y(t)^2}} \quad (4)$$

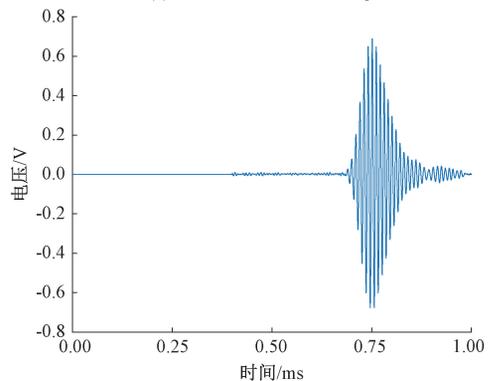
式中： k 信号时延。为了对图 3(c) 单次激发接收的超声波信号进行互相关，首先需要将其拆解为两个信号如图 8 所示。

20 和 70 m/s 流速下互相关结果如图 9 所示，可以看出低速时互相关曲线峰值点位实际时延，互相关曲线峰值比较清晰，然而高速时互相关曲线出现多个峰值，曲线不规律，容易导致时延估计错误，因此互相关算法不适用于高速下超声波传播时间估计。

郭涛等^[16]提出在过零检测的基础上结合互相关自补偿的超声波传播时间测量方法，提高测量准确度。柏思忠^[17]针对互相关检测信号存在跳波现象影响超声波



(a) 自激振荡信号
(a) Self-excited oscillation signal



(b) 接收超声波信号
(b) Received ultrasonic signal

图 8 拆解之后的超声波信号

Fig. 8 Ultrasonic signal after disassembly

传播时间测量精度问题，提出一种超声波气体流量计参考波形自动跟踪方法，计算互相关检测可信度，设置阈值，通过阈值判断接收信号是否有效。李灏等^[18]利用线性预测法滤波削弱伪峰的幅度，提高时延估计精度。相关学者提出的改进方法可以一定程度上改善波形畸变导致的互相关时延估计错误问题。

3.4 小波时频分析

小波时频分析是一种用于分析非正常信号的有效方法，它结合了傅里叶变换和短时傅里叶变换的优点，能够在时域和频域中同时观察信号。小波变换具有窗口自适应的特点，能够根据信号的不同频率成分调整时间窗口的大小，从而在高频信号处提供高时间分辨率和低频信号处提供高分辨率^[19-20]。与前述 3 种算法相比，小波时频分析法对时域波形依赖程度低，抗干扰能力强。在实际应用中，小波分析可以通过使用小波工具箱中的函数来实现，例如连续小波变换 (CWT)，这些函数能够返回不同尺度下的小波系数。通过将这些系数转换为实际的频率和时间序列，可以绘制出小波时频图，从而观察信号在不同时间和频率上的变化。图 10 为 70 m/s 流速

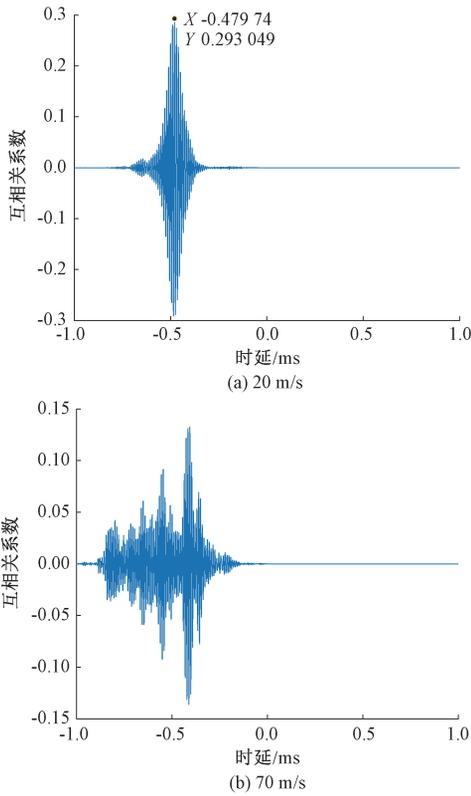


图 9 不同流速下超声波信号互相关结果
Fig. 9 Cross-correlation results of ultrasonic signals at different flow rates

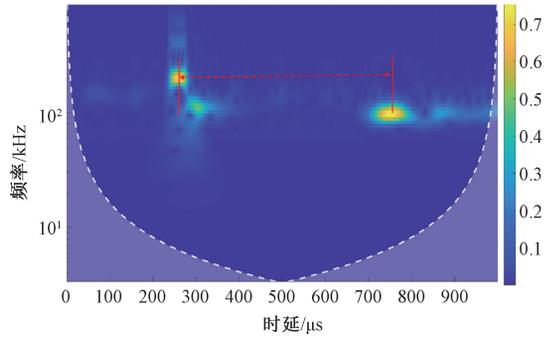


图 10 小波时频分析结果

Fig. 10 Wavelet time-frequency analysis results

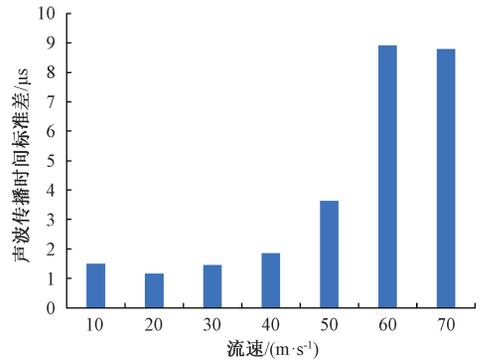


图 11 不同流速下小波时频分析计算的声波传播时间标准差

Fig. 11 The standard deviation of acoustic propagation time calculated by wavelet time-frequency analysis at different velocities

下小波时频分析结果,从两个能量最高点(箭头)可计算出时延。可以看出小波视频分析结果可以避免噪声扰动的干扰,准确识别出激发时间点和接收时间点。运用小波时频分析计算 10~70 m/s 流速下声波正程声波传播时间 10 次,其标准差如图 11 所示。可以看出随着流速的增加标准差逐渐增大,流速较大时,标准差在 8 μs 左右,这对于精确流量计量仍然是不能接受的。因此需要通过取平均的方式消除波动。图 12 为 70 m/s 流速下小波时频分析测量的声波传播时间及平均值。

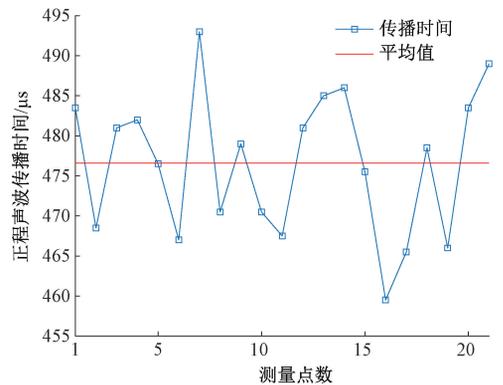


图 12 70 m/s 流速下小波时频分析测量的声波飞行时间及平均值

Fig. 12 Acoustic propagation time and average value measured by wavelet time-frequency analysis at 70 m/s flow rate

高气体流速下导致的飞行时间测量波动暂时是无法消除的,国内外超声波流量计都有这个问题,小波时频分析通过频率识别激励波,已经是较好的方法,在此基础上可以采用割线斜率法^[21]筛选出合适的飞行时间,取平均值,再通过最小二乘法提高流速测量精度。

最小二乘法是一种通过最小化测量残差平方和来确定最优模型参数的方法。其基本原理是找到一组参数,使得模型预测值与实际观测值之间的误差平方和最小化。目的是尽量减小误差的影响,提高测量结果的精度。最小二乘法原理如下^[22]:以正程时间为例,在多个流速下(v_1, \dots, v_m)多次测量超声波传播时间(t_1, \dots, t_m),取平均值代入式(5),使预测误差(e_1, \dots, e_m)最小时的等效声

波路径长度 L 和系统时延 τ 的值就是最终值。

$$\begin{cases} t_1 = \frac{L}{c + v_1 \cos \theta} + \tau + e_1 \\ t_2 = \frac{L}{c + v_2 \cos \theta} + \tau + e_2 \\ \vdots \\ t_m = \frac{L}{c + v_m \cos \theta} + \tau + e_m \end{cases} \quad (5)$$

通过最小二乘优化算法估计式(5)中的两个目标参数,等效声波路径长度 \hat{L} 和系统时延 τ 根据式(6)、(7)获得。

$$\begin{bmatrix} \hat{L} \\ \tau \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{X} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1/(c + v_1 \cos \theta) & 1 \\ 1/(c + v_2 \cos \theta) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 1/(c + v_m \cos \theta) & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

割线斜率法通过将测量的超声波传播时间由低到高按序排列,寻找具有最小斜率和最大可能分布的飞行时间对应的割线,通过在测量数据中筛选出实际信号没有吹跑受干扰下测量准确的飞行时间来减少数据波动、提高测量精度,具体操作过程和精度有待进一步研究。当前流量测量装置流体仅仅是空气,成分单一,实际火炬气体成分复杂,测量环境恶劣,后续需要进一步研究小波时频分析法在超声波流量计测量实际火炬气测量时的效果。实际火炬气测量下的信号特征和波形还有待进一步研究,目前装置先解决高速下流速测量问题难题。对比信号的分析结果,小波时频法是最简单可靠的方法。其他方法特别容易受到时域波形的干扰。而流速较大时对波形干扰是不可避免的,因此从频域进行识别是比较合适的。

4 结 论

飞行时间估计对于使用超声波流量计测量高流速气体如火炬气的流量至关重要,高流速时声波信号容易受到噪声、振动、气流扰动、信号衰减等因素影响,导致传统阈值捕捉、自相关、互相关算法在高速时误差较大,小波时频分析法能够一定程度上克服干扰,提高测量精度。为了进一步提高高流速时飞行时间估计精度和稳定度,可以采用求平均值、最小二乘法、割线斜率法等方法。研究有助于提升国产超声波流量计的性能,提升国产仪表的竞争力。

参考文献

[1] 郭建光. 超声波流量计在测量火炬气中的应用[J].

化工自动化及仪表, 2018, 45(11): 851-853.

GUO J G. Application of ultrasonic flow meter in measuring torch gas [J]. Chemical Automation and Instrumentation, 2018, 45(11): 851-853.

[2] 王黎. 超声波流量计在硫磺回收装置中的应用[J]. 石油化工自动化, 2009, 45(3): 66-68.

WANG Y. Application of ultrasonic flow meter in sulfur recovery unit [J]. Automation in Petro-chemical Industry, 2009, 45(3): 66-68.

[3] 达里尔·贝洛克. 超声波流量计在火炬气测量中的应用[J]. 石油化工自动化, 2006, 42(3): 86-87.

DARRYL B. Application of ultrasonic flow meter in torch gas measurement [J]. Automation in Petro-chemical Industry, 2006, 42(3): 86-87.

[4] 李晓强, 高丽红, 王正垠. 一种高精度超声波流量计时间测量方法[J]. 计量技术, 2004(6): 6-7, 12.

LI X Q, GAO L H, WANG ZH Y. A high-precision ultrasonic flowmeter time measurement method [J]. Metrology Technology, 2004(6): 6-7, 12.

[5] 刘晓宇, 杨江. 时间比例放大技术在超声波流量计中的应用[J]. 传感技术学报, 2007, 20(2): 454-457.

LIU X Y, YANG J. Application of time scale amplifying in ultrasonic flowmeter [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(2): 454-457.

[6] 刘秀红, 田志宏, 果红军. 超声波流量计的低功耗高精度时间测量方法[J]. 仪表技术与传感器, 2009(10): 43-44, 51.

LIU X H, TIAN ZH H, GUO H J. Low power and high precision time measurement method of ultrasonic flow meter [J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(10): 43-44, 51.

[7] 杨亚, 王让定, 姚灵, 等. 时差法超声波流量计中时间间隔测量及误差分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2012, 25(4): 35-39.

YANG Y, WANG R D, YAO L, et al. Measurement on time-interval in transit-time ultrasonic flowmeter and error analysis [J]. Journal of Ningbo University (NSEE), 2012, 25(4): 35-39.

[8] 赵方芳, 朱强, 夏飞. 超声波流量计的自适应时延估计法研究及应用[J]. 仪表技术, 2018(4): 8-12, 17.

ZHAO F F, ZHU Q, XI F. Research and application of adaptive time delay estimation for the ultrasonic flow meter [J]. Instrumentation Technology, 2018(4): 8-12, 17.

- [9] 杨瑞峰, 朱义德, 郭晨霞, 等. 互相关渡越时间超声波流量计精度补偿 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 63-67.
YANG R F, ZHU Y D, GUO CH X, et al. Accuracy compensation of cross-correlation transit time ultrasonic flowmeter [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(5): 63-67.
- [10] 黄晓红, 许先凤. 基于全相位的超声波流量计延估计 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(36): 211-215.
HUANG X H, XU X F. Time delay estimation of ultrasonic flowmeter based on all-phase [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(36): 211-215.
- [11] 何胜利, 陈辰. 基于超声流量计的天然气火炬气流量测量技术研究 [J]. 中国测试, 2024, 50 (S1): 266-271.
HE SH L, CHEN CH. Research on gas flow measurement technology of natural gas flare based on ultrasonic flowmeter [J]. China Measurement & Test, 2024, 50(S1): 266-271.
- [12] 张伦, 徐科军, 穆立彬, 等. 基于超声回波信号包络拟合的信号处理方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 194-201.
ZHANG L, XU K J, MU L B, et al. Signal processing method based on ultrasonic echo signal envelope fitting [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 194-201.
- [13] 赖国强, 石为人, 熊庆宇, 等. 基于回波包络上升沿拟合的超声波飞行时间测量方法 [J]. 传感技术学报, 2014, 27(7): 922-927.
LAI G Q, SHI W R, XIONG Q Y, et al. A measurement method based on fitting the rising edge of echo envelop for ultrasonic time-of-flight [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(7): 922-927.
- [14] 单泽彪, 徐恩达, 张旭, 等. 基于高阶累积量 ESPRIT 算法的指数衰减正弦信号参数估计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 187-194.
SHAN Z B, XU EN D, ZHANG X, et al. Parameter estimation of exponentially decayed sinusoidal signals based on high-order cumulant ESPRIT algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 187-194.
- [15] 万倪, 钱相臣, 闫勇. 多相流互相关测速算法综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 1-11.
WAN N, QIAN X CH, YAN Y. Review of cross-correlation velocimetry algorithms for multiphase flow measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 1-11.
- [16] 郭涛, 王志强, 李成. 时差法超声波流量计测量精度的补偿方法 [J]. 应用声学, 2021, 40(2): 269-273.
GUO T, WANG ZH Q, LI CH. Compensation method for measuring accuracy of transit-time ultrasonic flowmeter [J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40(2): 269-273.
- [17] 柏思忠. 矿用超声波气体流量计参考波形自动跟踪方法 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(4): 38-43, 59.
BAI S ZH. Automatic tracking method of reference waveform of mine ultrasonic gas flowmeter [J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(4): 38-43, 59.
- [18] 李颢, 陈励军. 互相关法时延估计中的多径抑制方法 [J]. 声学技术, 2013, 32(5): 421-425.
LI H, CHEN L J. The multipath effect eliminating technique for time delay estimation of cross-correlation method [J]. Technical Acoustics, 2013, 32 (5): 421-425.
- [19] 余慧敏, 朱姣姿. 基于新模式-小波包分解的超宽带雷达生命体征信号去噪算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3): 143-151.
YU H M, ZHU J Z. Ultra-wideband radar vital signs signal denoising algorithm based on new mode-wavelet packet analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 143-151.
- [20] 佟欣, 王佰艺, 李鑫宇, 等. 热辅助条件下微织构刀具铣削力预测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 274-287.
TONG X, WANG B Y, LI X Y, et al. Research on the prediction method of milling force for micro-textured tools under thermally-assisted conditions [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 274-287.
- [21] FOLKESTAD T, MYLVAGANAM K S, BERSAAS S L, et al. Chirp excitation of ultrasonic probe for high-rangeability gas flowmetering [C]. IEEE Ultrasonics Symposium. IEEE, 1989.
- [22] 郭森, 闫勇, 卢钢, 等. 基于低频声波的空气温度测量研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 75-83.
GUO M, YAN Y, LU G, et al. Research on air temperature measurement using low frequency sound waves [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 75-83.

作者简介



郭森, 2012 年于华北电力大学(北京)获得学士学位, 2019 年于华北电力大学(北京)获得博士学位, 现为北京信息科技大学副教授, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: guomiao@bistu.edu.cn

Guo Miao received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2012, Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2019. Now he is a teacher in Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include measurement technology and automatic device.



赵纪元(通信作者), 1997 年于西安交通大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为高端制造装备及自动化、质量监测与控制、RAMS 分析与评估等。

E-mail: jiyuan.zhao@bistu.edu.cn

Zhao Jiyuan (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Xi'an JiaoTong University in 1997. Now he is a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include high-end manufacturing equipment and automation, quality monitoring and control, RAMS analysis and evaluation.