

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.012

基于气体超声波流量计的间歇激励和信号处理

田雷¹ 徐科军^{1,2} 沈子文¹ 李剑波¹ 穆立彬¹ 刘博¹

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009; 2. 工业自动化安徽省工程技术研究中心 合肥 230009)

摘要:为了提高气体超声波流量计系统的响应速度,提出一种新的基于相邻峰值最大差值的气体超声流量计信号处理方法。为了进一步提高该信号处理方法的测量精度,又提出一种新的间歇式激励方法。采用间歇式激励方法能得到相邻峰值差值较大的回波信号,并且在不同流量下,相邻峰值最大差值的相对位置始终保持不变。在实际测量中,通过回波信号中相邻峰值最大差值的位置,确定回波信号的到达时刻,进而计算出超声波传播时间,得到气体流量。将间歇式激励方法和基于相邻峰值最大差值的信号处理方法在硬件系统上进行实时实现,并进行标定实验,结果验证了激励方法配合信号处理方法的高效性。

关键词: 气体超声波流量计; 间歇式激励; 相邻峰值差值; 信号处理

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

Intermittent excitation and signal processing based on ultrasonic gas flowmeter

Tian Lei¹ Xu Kejun^{1,2} Shen Ziwen¹ Li Jianbo¹ Mu Libin¹ Liu Bo¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Engineering Technology Research Center of Industrial Automation, Hefei 230009, China)

Abstract: To raise the response speed of the ultrasonic gas flowmeter system, a new signal processing method of ultrasonic gas flowmeter is proposed according to the maximum difference value of adjacent peak. In order to improve the measurement precision of this signal processing method, a new kind of intermittent excitation method is presented. The intermittent excitation method is adopted to obtain the echo signal with the maximum difference value of adjacent peaks. The relative position of the maximum difference value of adjacent peaks in the echo signal is always the same under different flow rates. During the actual measurement, the position of the maximum difference value of adjacent peaks is utilized to determine the arrival time of the echo signal, and then the ultrasonic propagation times are calculated to obtain the gas flow rate. The intermittent excitation method and the signal processing method based on the maximum difference value of adjacent peaks are realized on the hardware system in real time. The calibration experiments are conducted to verify the effectiveness of the excitation method and the signal processing method.

Keywords: ultrasonic gas flowmeter; intermittent excitation; difference value of adjacent peak; signal processing

0 引言

气体超声波流量计具有无压损、量程比大、测量精度高、对涡流不敏感等诸多优点,被广泛应用于化工、冶金、石油、天然气贸易等多个领域,且特别适合于大口径天然气测量^[1],在西气东输和节能减排方面发挥着重要的作用。超声波流量计的测量原理主要包括时差法、相差法、

频差法和多普勒法^[2-4]。其中,时差法应用最多、效果最好^[5]。基于时差法的气体超声波流量计测量流量时,首先需要激励信号驱动发射换能器发出超声波信号,接收换能器再将接收到的超声波信号转化为回波信号,系统根据回波信号找到一个稳定的特征点来确定顺流、逆流的传播时间,进而计算气体流量^[6]。液体超声波流量计的超声波信号在液体中传播时,能量衰减较小;采用简单激励信号就能得到稳定、信噪比高的回波信号,因此,液

体超声波流量计的信号处理相对容易,相关技术已趋于成熟。但是,气体超声波流量计的超声波信号在气体中传播时,能量衰减严重^[7],得到的回波信号幅值较小,信噪比较低,容易受噪声、流量波动等影响;气体流速的增大还会使回波信号产生畸变,因此,气体超声波流量计的信号处理相对困难,相关技术并不成熟。同时,激励信号的长度、幅值等都会直接影响接收到的回波信号的品质^[8]。采用最大峰值点、最小峰值点等作为气体超声波流量计回波信号特征点的方法,存在较大的波动。而国外主要采用互相关的方法确定特征点,计算量较大^[9-10],难以保证系统的实时性。因此,寻找一种既简单又稳定的确定特征点的方法,对于气体超声波流量计的测量具有重要意义。

为了确定气体超声波流量计回波信号的特征点,文献[11]提出了基于能量变化率的信号处理方法,首先测得不同流量下的回波信号能量变化曲线,根据能量变化曲线设定能够区分特征波的阈值。实际测量时,实时求取回波信号的能量变化曲线,根据预先设定的阈值判别能量变化曲线对应的特征点。文献[12]提出了可变阈值的信号处理方法,首先测得不同流量下回波信号各峰值点的分布情况,根据分布情况设定能够将特征峰与其他峰区分开的阈值。实际测量时,根据阈值判别回波信号中的特征峰得到相应的特征点。以上两种方法都取得了较好的实验结果^[13]。但是,这两种方法都未研究与之对应的效果更佳的激励信号,并且,这两种方法都需要在测量流量之前进行阈值参数选取,操作相对复杂。

本文提出基于相邻峰值最大差值的信号处理方法。实际测量时,无需提前设定阈值,直接判别回波信号中相邻峰值的最大差值即可得到相应的特征点。该方法的关键在于回波信号中存在稳定且较大的相邻峰值的最大差值,而一般的激励方法得到的回波信号中相邻峰值的最大差值都较小,且随着流动的增大,该最大值出现在回波信号中的相对位置会产生波动。因此,本文又提出一种新的间歇式激励方法。通过间歇式激励方法得到的回波信号,相邻峰值的最大差值较大,并且相邻峰值的最大差值在回波信号中的相对位置始终保持不变。构建并实现了间歇式激励方法配合基于相邻峰值的最大差值信号处理方法的气体超声流量计系统,通过标定实验,验证了该激励方法配合信号处理方法的高效性。

1 间歇式激励方法

为了提高基于相邻峰值最大差值的信号处理方法的稳定性,保证回波信号中具有稳定且较大的相邻峰值的最大差值,利用波的叠加原理,提出间歇式激励方法。分

析间歇式激励方法的原理,得出叠加波形的变化规律,进行最佳间歇范围的实验研究。

1.1 间歇式激励方法的原理

基于时差法的气体超声波流量计一般采用非编码激励和编码激励的方式^[14-18]。非编码激励包括单个或多个连续脉冲、正弦波等。虽然这些方式简单,但是,得到的回波信号中相邻峰值的差值较小,且最大差值的位置不稳定,容易受噪声、流量波动等影响。编码激励方式包括调频编码、调相编码和调幅编码。编码激励方式包含基本波形的序列组合,较为复杂,主要适用于互相关的信号处理方法^[19]。

当采用非编码激励信号激励发射换能器时,产生的超声波信号由接收换能器接收,输出的回波信号呈纺锤体形。由于超声波换能器存在阻尼特性,回波信号将经过一段时间后会衰减到零。若紧接着对发射换能器再次进行激励,接收换能器输出的回波信号就会与之前的回波信号叠加在一起,如图 1 所示。

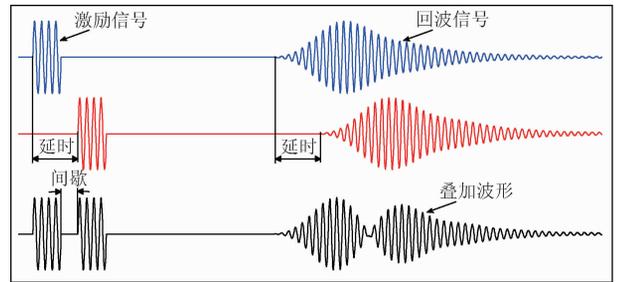


图 1 气体超声波流量计激励信号与回波信号示意图
Fig. 1 Schematic diagram of excitation and echo signal of ultrasonic gas flowmeter

如果改变两次激励的间歇宽度,会使前后两次回波信号产生不同位置的叠加。由于回波信号是周期振荡的,如果能调节两次激励信号间歇,恰好使前后两次的回波信号部分反相抵消、部分正相叠加,就能得到相邻峰值差值较大的回波信号。

间歇式激励方法正是结合了非编码激励方式简单、编码激励包含波形组合的优点,在一次完整激励中,发射前后两次相同的非编码激励信号,通过调节前后两次激励的间歇宽度,得到相邻峰值差值较大的回波信号。

1.2 叠加波形的变化规律

为了可以更加明显看出不同间歇的两次激励对应的回波信号的变化规律,采用由实验得到的单次激励的回波信号直接进行数值相加,得出相应的叠加波形,进行分析。

首先,对由电压幅值为 75 V、频率为 200 kHz(换能器的中心频率为 200 kHz)的 5 个连续正弦波激励得到的 50 组回波信号进行滤波、归一化和求平均等预处理。由

于回波信号的采样频率为 5 MHz,回波信号自身的频率为 200 kHz。因此,一个回波信号周期 T 包含 25 个采样点。然后,将得到的回波信号进行移位,与原来的回波信号进行叠加,每次移动一个采样点。通过移动不同个数的采样点,将这个两个由单独连续激励信号得到的回波信号直接进行数值相加,发现叠加的波形呈一定的周期性变化,变化的周期为 25 个采样点,与回波信号的周期相同。由于两段激励信号的相对延时时间与两次回波信号的相对延时时间相同,因此,若将回波信号分别向后移动 125、129、133、136、142 个采样点,则相应的激励信号分别延时 5、5.16、5.32、5.44、5.68 个回波信号周期,若将两次连续激励信号视为同一时域中的信号,则前后两次的激励信号的间歇分别为 0、0.16、0.32、0.44、0.68 个回波信号周期,相应的两个回波信号直接数值相加的波形,如图 2 所示,其中 T 表示回波信号周期。

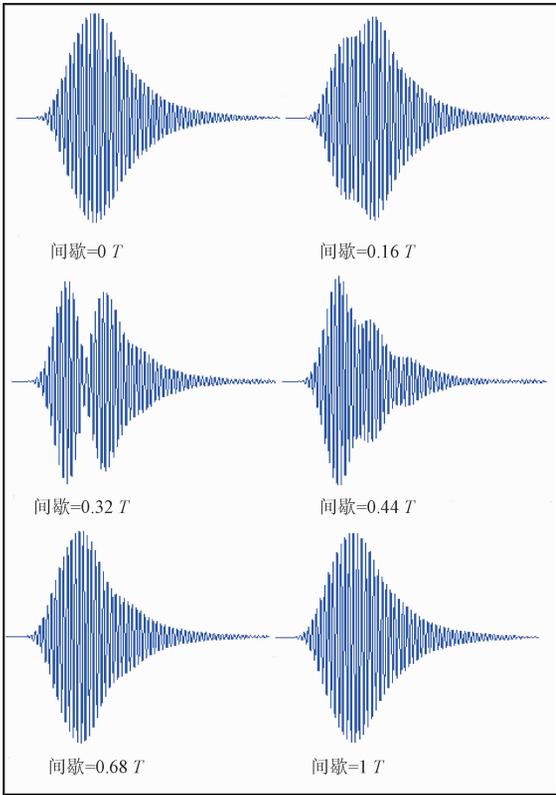


图 2 不同间歇的两个单独激励的回波信号数值相加波形
Fig. 2 Superimposed waveform of two echo signals excited individually with different intermittent width

由图 2 中的叠加波形的变化规律可知,为了得到相邻峰值之间差值较大的回波信号,间歇式激励方法的关键是:寻找前后两次连续激励的最佳间歇。由于超声波换能器不是绝对的线性元件,因此,实际中的间歇式激励信号得到的回波信号与两个单独激励的回波信号的数值叠加波形存在一定的差异,所以,无法从理论的角度直接

计算出最佳间歇的分布范围。因此,需要通过实验的方法寻找最优间歇。

1.3 最佳间歇的实验研究

为了找出间歇式激励方法中最佳间歇的分布范围,本文搭建了气体流量实验平台,进行了实验研究。零流量下的实验,得到了相邻峰值差值的变化规律,找出了最佳间歇的分布范围,验证了间歇式激励方法具有一定的通用性;不同流量下的实验,验证了不同间歇下的间歇式激励方法变化规律的一致性,同时,也验证了最佳间歇下间歇式激励方法的稳定性。

1) 实验平台

实验平台包含两台 DN 100 mm 的气体超声流量计、鼓风机、若干管道等,如图 3 所示。两台气体超声流量计中,一台为上海中核维思仪器仪表有限公司生产的 CL-2 型双声道四换能器一次反射式气体超声流量计,精度等级为 1 级,作为实验平台的参考表,即用于提供管道内气体流速的参考值;另一台为与合作企业共同研制的双声道四换能器直射式气体超声流量计,作为被检表。其中,一次仪表包含两对换能器,为双声道直射模式,换能器与管道夹角为 45°;两对换能器对称分布在 100 mm 口径的管道上,且两对换能器的连线都经过管道的中心。参考表和被检表通过若干管道串联在一起,并且在组装时严格对中,避免连接部分出现台阶及突入的垫片等扰动气流。鼓风机用于提供管道气体流量。

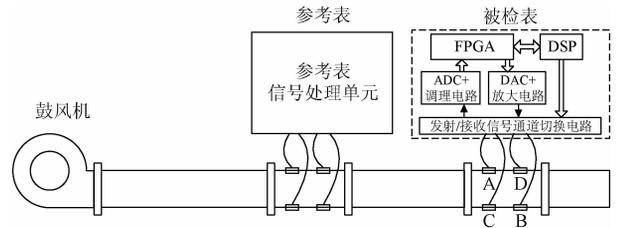


图 3 实验平台组成

Fig. 3 Schematic diagram of experimental platform constitution

以被检表为研究对象,通过零流量和不同流量下的实验,找出并验证间歇式激励方法的通用性和稳定性。其中,流量计表体、超声换能器及其安装设备由合作企业提供,而基于 FPGA 和 DSP 的双核心系统作为信号处理单元由本课题组自行研制。被检表的换能器为美国 AIRMAR 公司收发两用型压电换能器 AT200,其最大驱动电压(占空比 2% 猝发脉冲)峰峰值为 500 V,最佳工作频率为 200 kHz。在被检表的信号处理单元中,首先配置 FPGA 芯片内部 ROM 模块中存储的波形数据,由高速 DAC 模块产生激励信号,该激励信号在经过电压放大和功率放大之后,通过 DSP 控制相应发射通道选通,输出至发射换能器。然后,接收换能器产生的回波信号,通过

DSP 控制相应接收通道选通,经过调理电路之后,由高速 ADC 模块按照 FPGA 芯片提供的时钟速率进行数据采集与转换,转换的码值经过 FPGA 芯片缓存之后传递至 DSP 芯片,最终由 DSP 芯片完成数字信号处理和气体流量计算。为了便于分析回波信号的特征,在被检表的信号处理单元中,将回波信号调理电路的电压增益设置为固定值,并且通过配置 DSP 芯片的串口模块将回波的波形数据上传至上位机。

由气体超声流量计工作原理可知,被检表需要依次完成 4 个换能器的激励与接收,才能实现 1 次完整的流量测量。为后续方便,不妨假设 4 个换能器分别标记为 A、B、C 和 D,其中, A 与 B、C 与 D 分别构成换能器对,并且定义换能器 A 发射, B 接收为 1 通道;换能器 C 发射, D 接收为 2 通道;换能器 B 发射, A 接收为 3 通道;换能器 D 发射, C 接收为 4 通道^[11]。

2) 零流量下的实验

为了得出回波信号中相邻峰值的最大差值的变化规律,找到最佳间歇,进行零流量下改变间歇宽度的实验。已知叠加波形的变化满足一定的周期性,因此,将间歇的变化范围设置为一个回波信号周期。

采用与换能器的最佳工作频率相同的 5 个连续正弦波作为激励信号时,激励效果最佳,具有最高的能量转换率,能得到稳定性最高的回波信号^[14]。因此,将 5 个正弦波作为间歇式激励方法中的一种基本信号进行实验。此外,为了保证回波信号具有较高的信噪比,也采用 5 个方波和 5 个三角波作为基本波形,比较不同通道换能器、不同激励信号的变化规律。以上 3 种激励信号的电压幅值都设置为 75 V,频率都设置为 200 kHz,与换能器的最佳工作频率相同。

将流量设为 0,通过改变 FPGA 芯片内部调用 ROM 模块中存储的波形数据的时间间隔,从而改变激励信号间歇的宽度。将 FPGA 的时钟设为 80 MHz,每改变 1 次间歇,即增加 1 个时钟周期长度(约为 12.5 ns),回波信号的频率为 200 kHz,周期为 5 ms。因此,间歇的步长约为 1/400 个回波信号周期。将上述不同间歇宽度的不同激励信号输出至发射换能器的输入端,对应的接收换能器产生不同的回波信号,在经过调理、采集之后送入 DSP,并且最终通过 DSP 的串口模块上传至上位机。

通过 MATLAB 对上传的数据进行如下处理。

首先,采用四阶巴特沃斯带通滤波器对上传的回波信号数据进行滤波处理,回波信号的频率为 200 kHz,通带范围为 120 ~ 280 kHz。然后,通过比较一个回波信号中所有采样点的大小,找出回波信号的最大峰值 A_{\max} ,将所有采样点的值 $x(n)$ 除以 A_{\max} ,即得到归一化的波形 $y(n)$ 。

$$y(n) = \frac{x(n)}{A_{\max}} \quad (1)$$

再通过比较 3 个连续采样点的中间点是否为 3 个采样点的最大值,找出回波信号中各峰值 A_x ,通过后一个峰值,减前一个峰值,得出相邻峰值之间的差值为 ΔA ,则:

$$\Delta A = A_{x+1} - A_x \quad (2)$$

通过比较各相邻峰值的差值大小,找出最大差值 ΔA_{\max} ,则:

$$\Delta A_{\max} = \max(A_{x+1} - A_x) \quad (3)$$

重复以上步骤,找出不同间歇下,各回波信号相邻峰值的最大差值。

当间歇设为 0 时,采用 5 个正弦波对应的间歇式激励方法得到的回波信号归一化后的波形如图 4 所示。红色部分是相邻峰值的最大差值 ΔA_{\max} 。

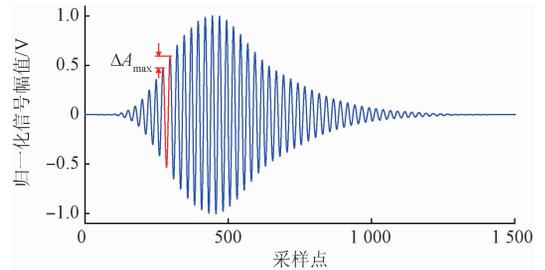


图 4 间歇宽度为 0 时回波信号归一化波形 ($\Delta A_{\max} = 0.09$)

Fig. 4 The normalized waveform of echo signal when the intermittent width is 0 ($\Delta A_{\max} = 0.09$)

当间歇设置为 1.7 μs ,即 1/3 左右个回波信号周期时,采用 5 个正弦波对应的间歇式激励方法得到的回波信号归一化后的波形如图 5 所示。

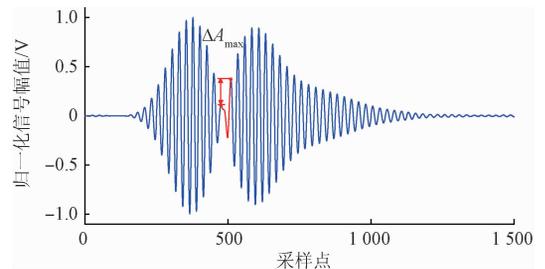


图 5 间歇宽度为 1.7 μs 时回波信号归一化波形 ($\Delta A_{\max} = 0.29$)

Fig. 5 The normalized waveform of echo signal when the intermittent width is 1.7 μs ($\Delta A_{\max} = 0.29$)

在不同间歇下,采用 5 个正弦波对应的间歇式激励方法得到 10 组回波信号数据,将 10 组回波信号中每一个采样点位置的采样值相加后求平均,再对平均后的回波信号进行归一化,找出 4 个通道的回波信号各相邻峰值的最大差值,得出其随着间歇增大的变化规律,如图 6 所示。由于数据量过大,此图中采用每间隔 8 个步长取一点进行绘图,即一个通道对应 50 个数据点。

从图6中可以明显看出,若以在间歇为0时,得到的回波信号相邻峰值的最大差值 ΔA_{\max} 的2倍作为标准,可得最佳间歇的分布范围约为 $1.5 \sim 2.0 \mu\text{s}$;同时,4个通道的变化规律相同,说明间歇式激励方式针对不同换能器满足一定的通用性。

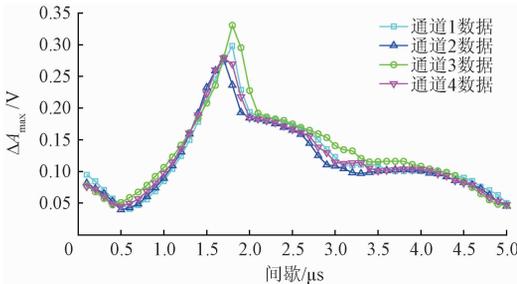


图6 零流量相同激励不同通道各间歇下回波信号相邻峰值的最大差值分布

Fig.6 The distribution of the maximum difference value of adjacent peaks of the echo signal under zero flow rate, the same excitation, different channels, different intermittent

采用上述相同步骤,将不同激励对应的间歇式激励方法得到的回波信号进行相应处理,找出每组回波信号相邻峰值的最大差值 ΔA_{\max} 。由于4个通道的变化规律相同,因此,采用1通道为例,如图7所示。由于数据量过大,此图中采用每间隔8个步长取一点进行绘图,即一种激励对应50个数据点。

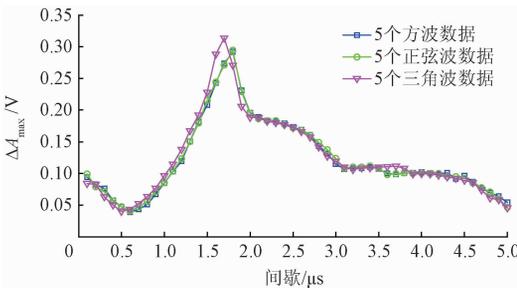


图7 零流量下不同激励同一通道各间歇下回波信号相邻峰值的最大差值分布

Fig.7 The distribution of the maximum difference value of adjacent peaks of the echo signal under zero flow rate, the same channels, different excitation, different intermittent

从图7可以明显看出,最佳间歇的分布范围约为 $1.5 \sim 2.0 \mu\text{s}$ 。同时,3种基本波形的变化规律相同,说明间歇式激励方式针对不同基本波形满足一定的通用性。

3) 不同流量下的实验

为了验证在不同流量下,不同间歇的间歇式激励方法得到的回波信号变化规律的一致性和最佳间歇范围内的间歇式激励方法得到的回波信号的稳定性,我们进行了不同流量下的实验。由于该实验是为了测试在不同流

量下,回波信号的一致性和稳定性,因此,需要在相同条件下进行实验,实验中采用相同的鼓风机作为气源、1级精度气体超声流量计作为参考表是满足要求的。

实验中,通过移动鼓风机出风口与管道入口的相对位置,即可改变管道内的气体流速,从而提供不同的管道气体流量(参考表示数分别为 $0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 \text{ m}^3/\text{h}$)。当保持一个流量点不变的情况下发射不同间歇宽度的激励信号产生不同的回波信号。改变鼓风机提供的流量大小,采得不同流量下的各10组不同间歇的实验数据,间歇的步长约为 $1/400$ 个回波信号周期。将采得的实验数据进行滤波、求平均、归一化后,找出回波信号各相邻峰值的最大差值。由于4个通道变化规律相同,为了方便说明,选用1通道为例。如图8所示,同一通道,在不同流量下,改变间歇式激励方法的间歇宽度,得到的回波信号相邻峰值的最大差值 ΔA_{\max} 分布。

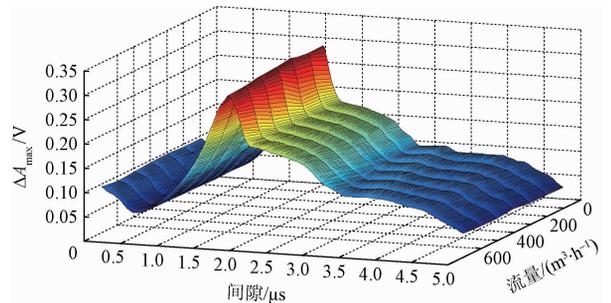


图8 1通道不同流量各间歇宽度下回波信号相邻峰值的最大差值分布

Fig.8 The distribution of the maximum difference value of adjacent peaks of the echo signal under the first channels, different flow rates, different intermittent

从图8中可以明显看出,不同流量下,回波信号各相邻峰值的最大差值 ΔA_{\max} 的变化规律近似相同,说明不同间歇的间歇式激励方式在各流量下得到的回波信号具有良好的 consistency。

由于最佳间歇的范围为 $1.5 \sim 2.0 \mu\text{s}$,因此,选择间歇宽度 $1.5 \mu\text{s}$ 为例,分别采得不同流量(参考表示数分别为 $0, 200, 400, 600 \text{ m}^3/\text{h}$)该间歇下间歇式激励信号得到的各50组回波信号。由于4个通道的变化规律相同,选择1通道为例,对 $0 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量下采得的回波信号进行滤波、归一化等预处理,并根据图4中介绍的处理步骤,用MATLAB找出回波信号中的各峰值点,如图9所示。

从图9中可知,相邻峰值的最大差值对应的两个峰值点都出现在波峰的第2次上升阶段,如图9中方框所示。因此,为了便于观察,分别截取各流量下,回波信号中如图9方框中所示的各峰值点,如图10所示。

经过实验发现,随着流量的变化,回波信号中的最大峰值点和中间凹陷处的最小峰值点都会发生波动,但是,

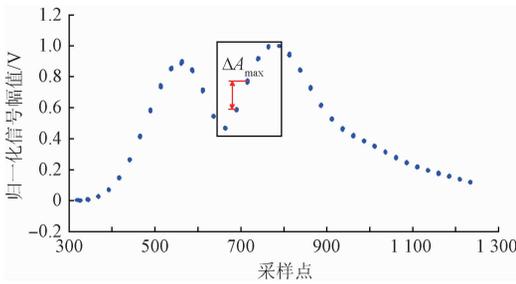


图 9 0 m³/h 流量下回波信号对应的各峰值点

Fig. 9 Corresponding peak-points of the echo signal under zero flow rate

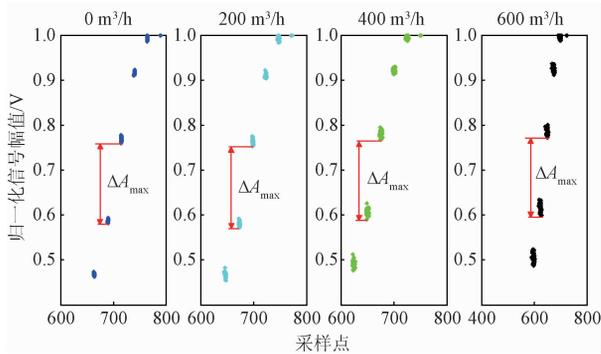


图 10 不同流量下回波信号相邻峰值最大差值对应的峰值点

Fig. 10 Corresponding peak-points of the maximum difference value of adjacent peaks of the echo signal under different flow rates

相邻峰值的最大差值始终出现在回波信号中的两个相同峰值点上。因此,说明不同流量下的回波信号中相邻峰值的最大差值相对位置始终保持不变,为配合相邻峰值最大差值的信号处理方法奠定了基础。

2 相邻峰值最大差值的信号处理方法

相邻峰值最大差值的信号处理方法是通过对相邻峰值最大差值的位置进行回波信号定位,确定顺逆流的传播时间,进而计算流量的。计算一次传播时间,需要气体超声波流量计发射一次激励信号,并采集完一次回波信号的所有数据,再对一次回波信号的所有数据进行处理才能得到。在 DSP 程序中实时实现的相邻峰值最大差值的信号处理方法的步骤是:首先,采用四阶巴特沃斯带通滤波器对采集的一次回波信号数据进行实时的带通滤波处理,通带范围为 120 ~ 280 kHz。然后,找出回波信号的最大峰值 A_{max} ,将所有采样点的值 $x(n)$ 除以 A_{max} ,即得到归一化的波形 $y(n)$ 。为了降低运算量,设定一个阈值范围,从归一化的回波信号幅值大于 0.5 处开始,比较 3

个连续采样点的中间点是否为 3 个采样点的最大值,找出回波信号中的各峰值 A_x 。同时,通过比较找到的各峰值点的大小,找出各峰值点对应的第 2 次上升阶段,即如图 9 方框中所示的各峰值点,找到最大值处停止。然后,截取出第 2 次上升阶段的各峰值点,用后一个峰值减前一个峰值的方法,得到各相邻峰值的差值 ΔA 。最后,比较各相邻峰值的差值大小,得到相邻峰值的最大差值 ΔA_{max} 。通过相邻峰值的最大差值 ΔA_{max} 的位置,确定顺逆流的传播时间,进而计算流量。

相邻峰值最大差值的信号处理的前提是:回波信号中相邻峰值的最大差值 ΔA_{max} 的相对位置固定不变。而从第 2 节不同流量下的实验结果可见,不同流量下的回波信号中相邻峰值的最大差值 ΔA_{max} 相对位置始终保持不变。因此,最佳间歇下的间歇式激励方法配合相邻峰值最大差值的信号处理方法能得到较好的效果。

3 实验标定

为了考核间歇式激励方法配合相邻峰值最大差值的信号处理方法的气体超声流量计系统的测量精度,在安徽省计量科学研究院进行了标定实验。标定系统由标定装置、100 mm 管径的双声道被检气体超声波流量计和气体管道组成。标定装置为音速喷嘴,准确度等级为 0.25 级。将研制的被检气体超声波流量计连接到标定系统中,由标定装置提供不同大小的气体流量。被检气体超声波流量计的标准脉冲系数 K 设为 5 000 f/m^3 。根据超声流量计检定规程^[20],测试被检气体超声波流量计如表 1 中所示的 4 个流量点的测量结果,以评定该仪表的性能指标。其中,每个流量点重复测量 3 次,每次的测量时间为 60 s。具体标定结果如表 1 所示。

表 1 标定结果

Table 1 Calibration results

流量点/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	实际脉冲系数/ m^{-3}	平均实际 脉冲系数/ m^{-3}	平均实际 脉冲系数 误差/%	重复性/ %
31.93	4 993.4	4 989.1	-0.22	0.08
	4 988.6			
	4 985.3			
	4 993.2			
86.96	4 996.3	4 995.4	-0.11	0.04
	4 996.6			
	5 003.0			
	5 003.6			
341.71	5 003.6	5 003.7	+0.07	0.02
	5 004.6			
	5 010.5			
	5 003.6			
851.07	5 003.6	5 006.6	+0.13	0.07
	5 005.8			

超声流量计检定规程要求1级精度气体超声波流量计流量范围大于3 m/s(约85 m³/h)时,平均实际脉冲系数误差小于±1%,重复性小于0.2%;流量范围小于3 m/s(约85 m³/h)时,平均实际脉冲系数误差小于±2%,重复性小于0.4%^[20]。从表1可知,最大平均实际脉冲系数误差为+0.13%,最大重复性误差为0.07%。实验结果表明,间歇式激励方法配合相邻峰值最大差值的信号处理方法的气体超声流量计系统的测量精度满足超声流量计检定规程对1级精度气体超声波流量计的相关要求。并且,其采用的相邻峰值最大差值的信号处理方法计算简单,能保证气体超声波流量计系统具有更高的实时性,同时,实验结果远优于1级精度气体超声波流量计的相关要求,验证了激励方法配合信号处理方法的高效性。

4 结 论

针对气体超声波流量计回波信号能量衰减严重,难以确定到达时刻,而系统又要求具有较高实时性的问题,提出了一种新的基于相邻峰值最大差值的气体超声流量计信号处理方法。该方法简单有效,测量精度高,并且计算量小,能有效地提高系统的实时性。

为了提高基于相邻峰值最大差值的信号处理方法的测量精度,提出一种新的、与之配合的间歇式激励方法。该方法结合非编码激励方式简单、编码激励包含波形组合的优点,可以将回波信号中相邻峰值最大差值提高两倍以上,有效减少噪声、流量波动引起的测量误差。使用该激励方法配合基于相邻峰值最大差值的气体超声流量计信号处理方法,能得到更佳的测量效果。

为了寻找间歇式激励方法的最佳间歇范围,通过将非编码激励方法得到的回波信号数据进行数值相加,得出了叠加波形的变化规律,为寻找间歇式激励的最佳间歇范围提供理论性指导;并搭建气体流量实验平台,通过实验方法找到了最佳间歇的范围,并通过大量的实验数据分析,验证了间歇式激励方法的通用性和稳定性。

构建并实现了间歇式激励方法配合基于相邻峰值最大差值的信号处理方法的气体超声流量计系统,并在安徽省计量科学研究院进行了标定实验,实验结果验证了该系统的有效性。

由于超声波换能器都具有阻尼特性,因此,不同的超声波换能器都可采用上述方法。同时,不同中心频率换能器、不同安装倾斜角和不同管径的一次仪表都可根据本文提供的方法步骤,找出对应间歇式激励方法的最佳间歇。此外,在长期的实际应用中,应定期检测超声波换能器性能,注意超声波换能器的老化等问题。

参考文献

- [1] HAUPTMANN P, HOPPE N, PUTTMER A. Review article: Application of ultrasonic sensors in the process industry[J]. *Measurement Science & Technology*, 2002, 13(8):R73-R83.
- [2] OHMURO Y. Ultrasonic flowmeter compatible with both of pulse Doppler method and propagation time difference method, method and program for automatically selecting the measurement method in the flowmeter, and electronic device for the flowmeter; EP, EP1719979[P]. 2006.
- [3] 范思航, 时文娟, 黄艳芝, 等. 超声波多普勒流量计换能器的研究与应用[J]. *国外电子测量技术*, 2014, 33(2):84-88.
FAN S H, SHI W J, HUANG Y ZH, et al. Investigation and application of transducer of ultrasonic Doppler flowmeter [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2014, 33(2):84-88.
- [4] NOBLE F W. Dual frequency ultrasonic fluid flowmeter[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1968, 39(9):1327-1331.
- [5] LYNNWORTH L C, LIU Y. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955-2005 [J]. *Ultrasonics*, 2007, 44 (Suppl 1):e1371-e1378.
- [6] ZHU W J, XU K J, FANG M, et al. Mathematical modeling of ultrasonic gas flow meter based on experimental data in three steps[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2016, 65(8):1-13.
- [7] PETCULESCU A, HALL B, FRAENZLE R, et al. A prototype acoustic gas sensor based on attenuation[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120(4):1779-1782.
- [8] GRIMALDI U, PARVIS M. Enhancing ultrasonic sensor performance by optimization of the driving signal[J]. *Measurement*, 1995, 14(3-4):219-228.
- [9] BRASSIER P, HOSTENB, VULOVIC F. High-frequency transducers and correlation method to enhance ultrasonic gas flow metering [J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2001, 12(3):201-211.
- [10] SUGI T, SASAKI T. Ultrasonic flow meter: US, US7299150[P]. 2007.
- [11] 沈子文, 徐科军, 方敏, 等. 基于能量变化率的气体超声波流量计信号处理方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(9):2138-2144.
SHEN Z W, XU K J, FANG M, et al. Rate of energy based signal processing method of ultrasonic gas flowmeter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(9):2138-2144.
- [12] 汪伟, 徐科军, 方敏, 等. 一种气体超声波流量计信

- 号处理方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9):1365-1373.
- WANG W, XU K J, FANG M, et al. Study of a signal processing method for gas ultrasonic flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9):1365-1373.
- [13] 徐科军, 方敏, 汪伟, 等. 一种基于 FPGA 和 DSP 的气体超声流量计, CN 104697593 A[P]. 2015.
- XU K J, FANG M, WANG W, et al. One kind of gas ultrasonic flowmeter based on FPGA and DSP, CN 104697593 A[P]. 2015.
- [14] FANG M, XU K J, ZHU W J, et al. Energy transfer model and its applications of ultrasonic gas flow-meter under static and dynamic flow rates [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(1):015107.
- [15] TANISAWA S, HIROSE H. Study on a gas FM ultrasonic flow rate sensor for a small diameter pipe[C]. SICE 2004 Annual Conference, 2004.
- [16] NOWICKI A, KLIMONDA Z, LEWANDOWSKI M, et al. Comparison of sound fields generated by different coded excitations--experimental results[J]. Ultrasonics, 2006, 44(1):121-129.
- [17] RICCI M, SENNI L, BURRASCANO P. Exploiting pseudorandom sequences to enhance noise immunity for air-coupled ultrasonic nondestructive testing [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(11):2905-2915.
- [18] YAO Z J, GAO T, MA H R, et al. Optimized pseudorandom BASK emission sequences for ultrasonic multi-life location system [J]. Advanced Materials Research, 2011(268-270):1850-1855.
- [19] 刘洲洲, 张亚杰. 伪随机码相关检测的 MDS-MAP 定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2):245-

250.

LIU ZH ZH, ZHANG Y J. MDS-MAP localization algorithm based on pseudo random code correlation detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2):245-250.

- [20] JJG1030—2007. 超声流量计, 中华人民共和国国家计量检定规程[S]. 国家质量监督检验检疫总局, 2007. JJG1030—2007. Ultrasonic flowmeter, national verification regulation [S]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China, 2007.

作者简介



田雷, 2015 年于合肥工业大学获得工学学士学位, 现为合肥工业大学电气与自动化工程学院 DSP 实验室硕士研究生, 主要研究方向为数字信号处理。

E-mail: hfuttl@163.com

Tian Lei received B. Sc. from Hefei University of Technology in 2015. He is currently a M. Sc. candidate in DSP Laboratory, School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology. His main research interest is digital signal processing.



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 Ph. D. from China University of Mining and Technology in 1988. He is a professor at Hefei University of Technology. His research interests are in the areas of sensor technology, process instrumentation, and digital signal processing.