

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.017

基于回波峰值拟合的气体超声流量计信号处理

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:针对从气体超声波流量计回波信号中难以确定到达时刻,而仪表又要求具有较高实时性的问题,提出一种基于回波上升段峰值拟合的气体超声流量计信号处理方法,以及拟合峰值范围的确定方法。首先根据拟合峰值范围,在回波信号的上升阶段,选取若干个峰值点,对各峰值点进行最小二乘拟合,得到特征直线,将该直线与 X 轴的交点作为特征点,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。研制实现基于回波上升段峰值拟合的气体超声流量计,进行标定实验,以验证方法和仪表的有效性。

关键词: 气体超声波流量计; 上升段峰值; 最小二乘拟合; 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

Signal processing for ultrasonic gas flowmeter based on peak fitting of echo

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 of Anhui Province, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to determine the arrival time from the echo signal of the ultrasonic gas flowmeter and the instrument is required to have high real-time, a new signal processing method for ultrasonic gas flowmeter based on peak fitting of rising echo and a method to determine the fitting peak range are proposed. Firstly, according to the fitting peak range, several peak points are selected in the rising section of the echo signal, and they are fitted by the least squares to achieve the feature straight line. The intersection of this line and the X -axis is regarded as a feature point to determine the arrival time of the echo signal, and then the ultrasonic propagation times are calculated to obtain the gas flow rate. The ultrasonic gas flowmeter is developed to implement the signal processing method based on peak fitting of rising echo. The calibration experiments are preformed to validate the effectiveness of the methods and the meter.

Keywords: ultrasonic gas flowmeter; rising peaks; least squares fitting; signal processing

1 引言

气体超声波流量计由于其精度高、无压损、量程比大等诸多优点,被广泛应用于大口径管道的气体流量测量^[1]。气体超声波流量计信号处理方法主要包括传播时间差法、传播频率差法和多普勒法^[2]等,其中,传播时间差法是气体超声波流量计采用的最为广泛和有效的测量方法^[3]。传播时间差式气体超声流量计测量流量时,首

先需要使用激励信号驱动发射换能器产生超声波信号,然后由接收换能器将超声波信号转换为回波信号;通过测量激励信号和回波信号之间的时间差来计算出相应的顺流、逆流传播时间,进而计算体积流量。激励信号起始时刻是可以精确控制的,而回波信号到达时刻则是根据回波信号得到某一稳定的特征点来确定的^[4]。由于超声波信号在气体中传播时,其能量会衰减^[5],并且随着气体流速的增加,超声波信号的传播路径会产生偏移,这种偏移将进一步导致能量的减弱^[6],使得回波信号幅值变小,

信噪比降低,容易受噪声等干扰。而通过最小峰值点、最大峰值点等方法确定的特征点,都容易产生波动,影响流量测量的精度。

为了找到稳定的特征点,确定超声波信号的传播时间,Brassier等人^[7]在研究了超声波回波信号衰减规律以及传输管道中的噪声后,提出了基于互相关的超声波信号传播时间的计算方法。同时,德国西门子公司的Kroemer等人^[8]提出了一种过零检测和互相关相结合的方法来计算超声波信号的传播时间。但是,当时条件下,由于互相关计算量较大,其实时性很难保证。为了减少互相关算法的计算量和计算时间,日本东京计装株式会社的Sugi等人^[9]提出一种互相关衍生算法,利用加法取模运算代替原互相关算法中的乘法运算,减少运算量。但是,该算法引入了计算误差,在噪声干扰较大的情况下,容易影响测量精度。为此,沈子文等人^[10]提出了基于能量变化率的信号处理方法,汪伟等人^[11]和徐科军等人^[12]提出了可变阈值与过零检测的信号处理方法,并在基于FPGA和DSP的双核心硬件平台上实时实现,取得了较好的实验结果。

为了确定稳定的特征点,提高气体超声波流量计的系统实时性和量程比,本文提出了基于回波上升段峰值拟合的气体超声波流量计信号处理方法。在回波信号的上升阶段,选取若干个峰值点,对各峰值点进行最小二乘拟合,得到特征直线,将该直线与X轴的交点作为特征点。通过该特征点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。将该方法在基于FPGA和DSP的双核心硬件平台上实时实现,并在安徽省计量科学研究院进行气体流量的标定实验,实验结果验证了基于回波上升段峰值拟合的信号处理方法及系统的有效性。

2 信号处理方法

2.1 传播时间计算

基于时差法的气体超声波流量计是通过测量顺流、逆流通道的超声波传播时间来计算气体流量的。若顺流的传播时间为 T_d ,逆流的传播时间为 T_u ,则管道中的气体在超声波传播声道上的平均流速 \bar{V} 的计算公式如下:

$$\bar{V} = \frac{L}{2 \times \cos\theta} \times \frac{T_u - T_d}{T_u \times T_d} \quad (1)$$

式中: L 表示声道长度, θ 表示换能器与气体管道之间夹角^[13]。根据气体在超声波传播声道上的平均流速 \bar{V} ,可计算出相应的气体瞬时流量 Q 。

$$Q = \bar{V} \times S \times \alpha \quad (2)$$

式中: S 表示管道横截面积, α 表示一个与声道数量、声道分布及雷诺数等因素有关的修正系数。因此,计算气

体瞬时流量 Q 的关键在于准确计算顺逆流情况下超声波的传播时间。而传播时间是指激励信号驱动发射换能器的起始时刻到接收换能器接收到回波信号的起始时刻之间的时间长度。若以任意流量Flow时,计算顺流传播时间 $T_d|_{Flow}$ 为例, $T_d|_{Flow}$ 与激励信号和回波信号的关系如图1所示。图1中, $T_d|_{Flow}$ 表示激励信号起始位置到回波信号起始位置的时间长度, $T|_{Flow}$ 表示激励信号起始位置到特征点的时间长度, T' 表示回波信号起始位置到特征点的时间长度。

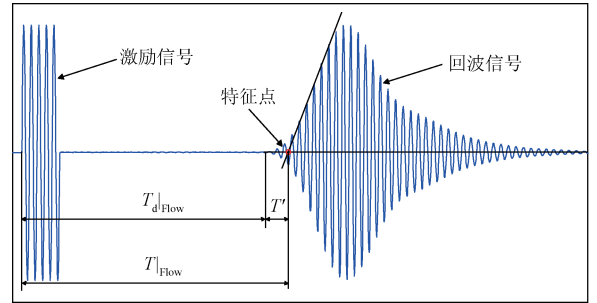


图1 激励信号和回波信号示意图

Fig. 1 Schematic diagram of excitation and echo signal

激励信号的起始时刻可以人为控制;而回波信号的起始位置没有明确的特征,且幅值较小,容易受到噪声的干扰,很难准确定位。因此,在实际测量中,需要根据回波信号找到一个稳定的特征点,通过该特征点的位置间接计算出 $T_d|_{Flow}$ 。

$$T_d|_{Flow} = T|_{Flow} - T' \quad (3)$$

由于不同环境、不同流量下的回波信号上升段轮廓保持不变,因此, $T|_{Flow}$ 和 $T_d|_{Flow}$ 之间的时间差 T' 是固定不变的,从而可以根据零流量下特征点的位置求得时间差 T' 。零流量下超声波的传播速度不受流体的影响,且超声波传播声道的长度 L 是已知的,因此,测得超声波的实际传播速度 V_s ,可直接计算出零流量下的顺流传播时间 $T_d|_{Flow=0}$ 。

$$T_d|_{Flow=0} = \frac{L}{V_s} \quad (4)$$

再实测得到零流量下激励信号的起始位置到特征点的时间长度 $T|_{Flow=0}$,则 T' 为:

$$T' = T|_{Flow=0} - T_d|_{Flow=0} \quad (5)$$

可见,气体超声波流量计信号处理的关键是根据回波信号找到一个稳定的特征点。

2.2 回波信号轮廓研究

为了根据回波信号找到一个稳定的特征点,对不同流量下多组回波信号的轮廓进行了研究。研究发现,回波信号上升阶段中间部分的峰值点不仅幅值变化率大,不易受噪声影响,而且基本分布在一条直线上。因此,若

能根据某一阈值范围 $Y_{\min} \sim Y_{\max}$,找出回波信号上升阶段的 N 个基本分布在一条直线上的峰值点,再对这 N 个峰值点进行最小二乘拟合,得到拟合直线,将该直线与 X 轴的交点作为特征点。

但是,有研究表明,当被测流体流速超过一定范围时,回波信号会产生严重的畸变^[14]。因此,为了分析不同流量下气体超声波流量计回波信号轮廓的变化规律,得出回波信号畸变的具体特征,将不同流量(0、200、400、600、800 m³/h)下的各50组回波信号数据进行滤波、求平均和归一化等预处理。具体的步骤如下。

1) 采用四阶巴特沃斯带通滤波器对采集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。

2) 将回波信号中每一个采样点位置的50组对应的采样值进行平均,得出平均后的回波信号。

3) 通过比较平均后的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} ,将所有采样点的值除以 A_{\max} ,即得到归一化的波形。

再利用 MATLAB 中曲线拟合工具对各流量下回波信号波形 $y(n)$ 的所有峰值点进行包络线拟合,得到各流量下回波信号峰值点的包络线如图2所示。

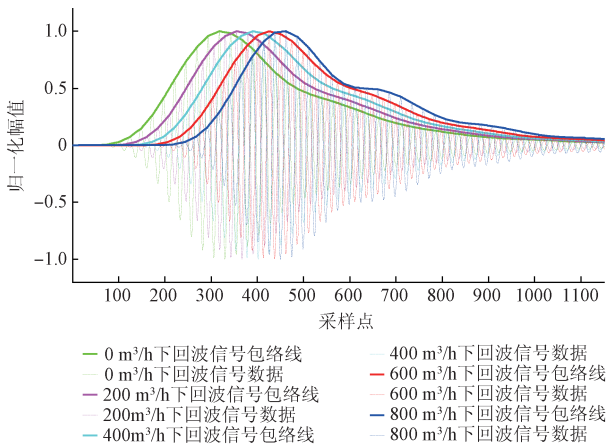


图2 不同流量下的回波信号及其包络线
Fig.2 The echo signal and its envelope under different flows

可见,随着流量的增大,回波信号的下降阶段确实发生畸变,但是,回波信号的上升阶段,由于受激励换能器的发射声波直接作用,基本不存在反射声波等影响。因此,上升阶段的波形轮廓保持不变。同时,在回波信号上升阶段的中间部分,由于其幅值变化率基本相同,该区间内有较多的峰值点分布在一条直线上。

2.3 拟合直线阈值范围确定

选择靠近回波信号最大峰值附近若干个峰值点进行直线拟合时,由于最大峰值附近的幅值变化率较低,拟合直线的斜率较小,任一峰值点出现很小的波动,都会使拟

合直线与 X 轴的交点(即特征点)发生较大波动,影响测量精度,因此,拟合直线的斜率越大,相对而言,任一峰值点出现波动时,拟合直线与 X 轴交点(即特征点)的波动会越小。选择分布在斜率最大直线上的峰值点进行直线拟合时,能有效减少特征点波动,提高测量精度。

为了得到分布在斜率最大直线上的峰值点的范围,以零流量下的回波信号为例,利用 MATLAB 中曲线拟合工具对50组预处理后的回波信号上升段的所有峰值点进行了包络曲线拟合。比较不同阶次拟合得到曲线与实际数据的误差平方和(SSE),得出采用5阶模型拟合时效果最佳,如图3所示。

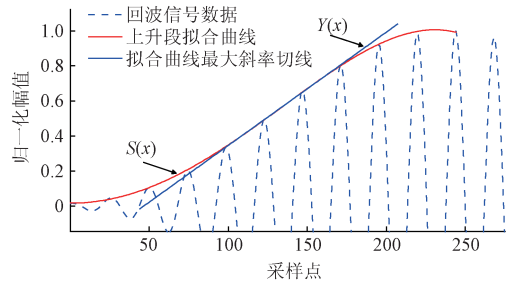


图3 回波信号上升阶段包络线及其最大斜率切线
Fig.3 The envelope of the ascending section of the echo signal and its maximum slope tangent

图3中,5阶模型拟合得到的上升段包络曲线为 $S(x)$ 。

$$S(x) = -2.1924 \times 10^{-13}x^5 + 5.7502 \times 10^{-10}x^4 - 5.0412 \times 10^{-7}x^3 + 1.5587 \times 10^{-4}x^2 - 6.6326 \times 10^{-3}x + 0.0760 \quad (6)$$

为了得到上升阶段轮廓曲线的变化率,对曲线 $S(x)$ 进行一次求导,得:

$$S(x)' = -1.0962 \times 10^{-12}x^4 + 2.3001 \times 10^{-9}x^3 - 1.5124 \times 10^{-6}x^2 - 3.1174 \times 10^{-4}x - 6.6326 \times 10^{-3} \quad (7)$$

为了得到上升阶段轮廓曲线的最大变化率,即斜率最大的切线,通过 MATLAB 中的 MAX 函数,找出上升阶段轮廓曲线一次导数 $S(x)'$ 的最大值,得到曲线 $S(x)$ 对应的斜率最大的切线 $Y(x)$ 。

$$Y(x) = 6.5987 \times 10^{-3}x - 0.3248 \quad (8)$$

为了得到分布在斜率最大的直线上的峰值点的范围,设定差值参数 δ ,根据式(9)得出对应 x 的范围。

$$|S(x) - Y(x)| \leq \delta \quad (9)$$

具体的步骤:首先令 $S(x) - Y(x) = \delta$,用 MATLAB 解方程,得出对应上升阶段轮廓曲线上的阈值下限横坐标 X_{\min} 。然后,令 $S(x) - Y(x) = -\delta$,用 MATLAB 解方程,得出对应上升阶段轮廓曲线上的阈值上限横坐标 X_{\max} 。再将上、下限横坐标 X_{\min} 、 X_{\max} 代入式(8),可得出 y 的范围

为 $Y_{\min} \sim Y_{\max}$, 即为拟合直线峰值点的阈值范围。

为了降低单个峰值波动对拟合直线带来的影响, 增大确定特征点的稳定性, 阈值的范围不宜过小。并且, 回波信号峰值较小、峰值较大处相邻峰值差距较小, 幅值变化率较小, 容易受噪声影响, 因此, 阈值的范围应选择回波信号上升阶段的中间部分。综上所述, 差值参数 δ 应折中选取。经过实验发现, 将差值参数 δ 设置为 0.01 时, 任意流量下, 都能得到较好的实验结果。

2.4 特征点的确定

特征点的具体计算步骤: 首先, 根据确定的阈值范围 $Y_{\min} \sim Y_{\max}$, 找出回波信号上升阶段的 N 个峰值点。由于 $Y_{\min} \sim Y_{\max}$ 始终处于回波信号上升阶段的中间部分, 而中间部分的点基本位于一条直线上, 因此, N 的大小对于直线拟合基本没有影响。

若设第 $k(k=1, 2, \dots, N)$ 个峰值点坐标为 (x_k, y_k) , 则可计算出拟合直线斜率参数 A 。

$$A = \frac{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2} \tag{10}$$

再计算出拟合直线截距参数 B 。

$$B = \bar{y} - A\bar{x} \tag{11}$$

式中: \bar{x}, \bar{y} 分别表示 N 个峰值点横坐标和纵坐标的平均值。

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \tag{12}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k \tag{13}$$

从而得到拟合直线 $y = Ax + B$, 即可得到该直线与 X 轴的交点 $(-B/A, 0)$, 该交点即为回波信号的特征点, 如图 4 所示。再通过式(1)~(3)便可计算气体流量。

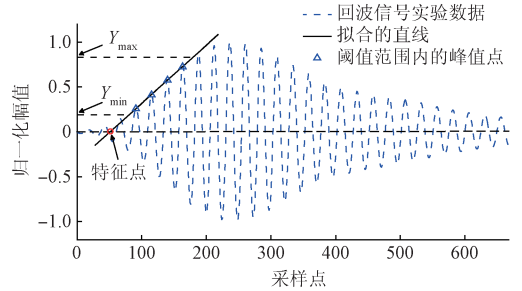


图4 方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the method

3 信号处理系统

3.1 系统的硬件组成

为了提高气体超声波流量计系统的实时性, 增强硬件电路的灵活性, 采用 DSP 和 FPGA 组成双核心硬件系统来实现信号激励和处理。其中, FPGA 采用 Altera 公司的 Cyclone II 系列的 EP2C8Q208C8N 芯片, DSP 采用 TI 公司 C2000 系列的 TMS320F28335 芯片。DSP 与 FPGA 之间有相应的连线, 进行数据和指令的传输。主要的硬件电路模块包括 DSP 最小系统、FPGA 最小系统、激励信号产生与放大电路、回波信号调理与采样电路、激励/回波信号通道切换电路以及一次仪表, 如图 5 所示。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

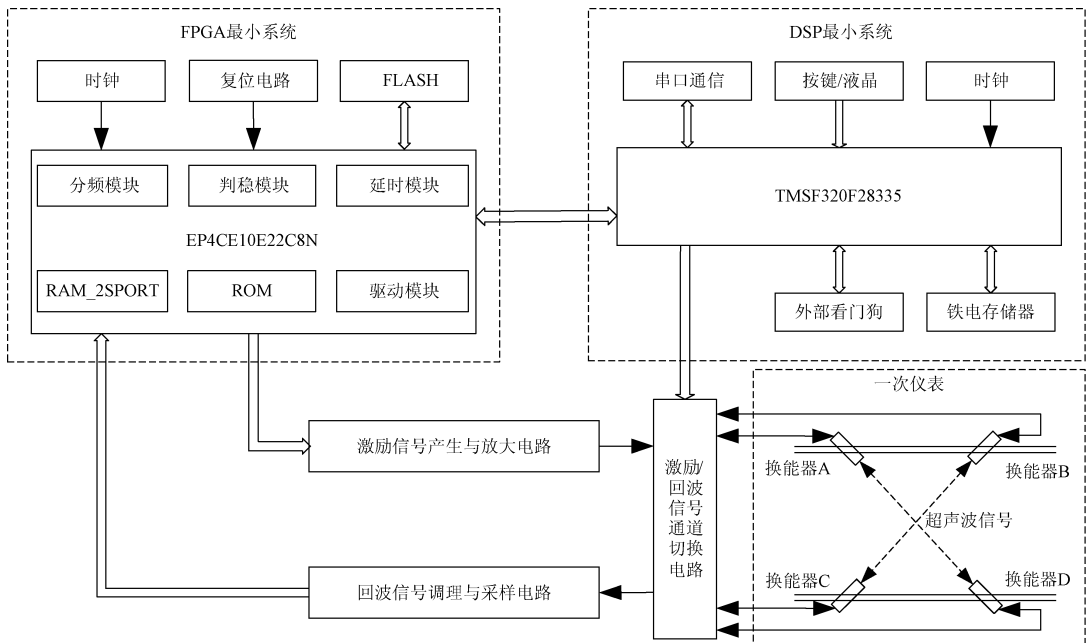


图5 系统硬件组成

Fig. 5 Block diagram of system hardware

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截面的圆心。

3.2 系统的软件及其工作过程

气体超声波流量计的软件系统包括 FPGA 部分和 DSP 部分。FPGA 主要控制激励信号的数模转化以及回

波信号的高频采样, DSP 主要负责测量过程的控制以及对回波采样信号的数字化处理等功能^[15]。因此, 系统以 DSP 为主核心, FPGA 配合 DSP 主监控程序合理有序地调用各个功能模块, 以实现相应功能, 完成流量测量任务。系统的主要工作流程如图 6 所示。

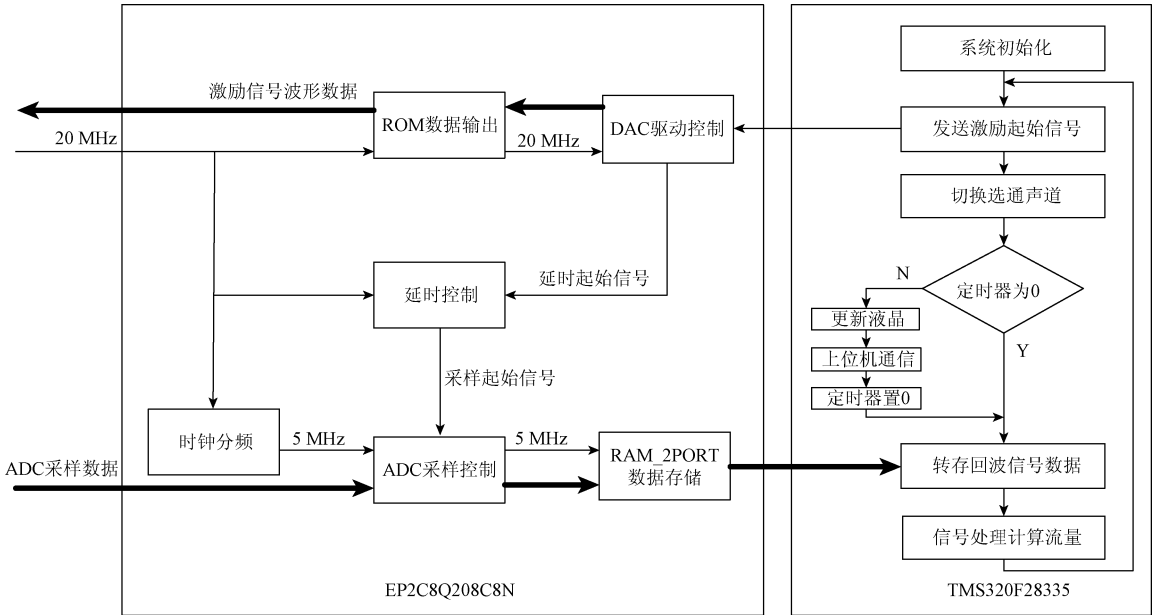


图 6 系统流程

Fig. 6 Flow chart of the system

具体的工作步骤: 系统上电后, FPGA 进行初始化, 建立相应的电路结构, 并等待 DSP 发送激励起始信号; 同时, DSP 对相应的 GPIO 口进行分配, 完成定时器中断初始化、液晶显示初始化、从铁电模块内读取累积流量、初始化流量计各项参数等各项系统初始化任务。然后, DSP 通知 FPGA 发送激励起始信号, 接着, DSP 切换相应的激励、回波信号选通声道。FPGA 收到激励起始信号后, 向延时控制模块发送延时起始信号, 开始延时计数, 并通过 DAC 驱动控制模块控制 DAC 将内部预存的波形数据转化为模拟信号, 经电压放大后加载到发射换能器上。发射换能器产生的超声波信号, 在气体介质中传播一定时间后, 由接收换能器转化为电信号, 经过回波信号调理电路放大、滤波后被 FPGA 控制的 ADC 以 5 MHz 的频率进行采样。采样的起始时刻由 FPGA 内部相应的延时计数模块决定, 采样结果存放在 FPGA 内部的双口 RAM 中。采样完成后, FPGA 向 DSP 发送转存起始信号。DSP 收到该信号后, 开始转存 FPGA 中存储的一次回波信号的采样数据。转存完成后, 对回波信号数据进行滤波、归一化处理, 并采用本文的信号处理方法完成 1 次顺流或逆流传播时间的计算, 循环完成 4 次上述过程, 可以得到 4 个声道的传播时间, 从而完成一次瞬时流

量的计算, 再根据计算出的瞬时流量进一步计算出累积流量。同时, 系统会定时检测中断, 当定时器标志位为 0 时, DSP 就会将结果实时显示在液晶上, 并完成与上位机的通讯等。此外, 看门狗模块会实时监控系统运行状态, 防止程序跑飞, 增加系统的可靠性。

4 实验标定

为了考核基于回波上升段峰值拟合的气体超声波流量计系统的测量精度, 在安徽省计量科学研究院进行了实流标定实验。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设为 5 000 pulse/m³, 具体的实验步骤如下。

1) 将标定装置的流量设为 0。首先, 测得超声波的实际传播速度 V_s , 再测量零流量下激励信号的起始位置到特征点的时间长度 $T|_{Flow=0}$, 与计算出零流量下的顺流传播时间 $T_d|_{Flow=0}$ 相减, 得出恒定不变的时间差 T' , 代入该仪表中。再对被检气体超声波流量计进行零点修正。

2) 将标定装置的流量设置为 $400 \text{ m}^3/\text{h}$, 根据标定装置的流量结果与被检气体超声波流量计的流量结果的比值, 得到初步的被检气体超声波流量计系数 F , 代入该仪表中。

3) 分别将标定装置的流量设为 $30、60、100、200、300、400、500、600、700、800、900、1\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ 共 12 个流量点, 可得到不同流量点下被检气体超声波流量计的实际脉冲系数(又称脉冲当量) $K_i (i=1, 2, \dots, 12)$ 。将实际脉冲系数 K_i 与标准脉冲系数 K 进行对比, 得到被检气体超声波流量计实测流量点 $Flow_i$ 下的相对误差 e_i 。

$$e_i = \frac{K_i - K}{K_i} \quad (14)$$

根据被检气体超声波流量计实测流量点 $Flow_i$ 和与之对应的相对误差 e_i 进行分段插值, 得到被检气体超声波流量计各流量区间内任意流量点 $Flow$ 的相对误差 e 。

$$e = e_{i-1} + \frac{(e_i - e_{i-1}) \times (Flow - Flow_{i-1})}{Flow_i - Flow_{i-1}} \quad (15)$$

根据各流量区间内任意流量点 $Flow$ 的相对误差 e , 对被检气体超声波流量计的计算结果进行精确修正, 得到修正后的流量值 $Flows$ 。

$$Flows = Flow - e \times Flow \quad (16)$$

4) 经过误差修正后, 根据超声流量计检定规程^[16], 测试被检气体超声波流量计在 $30、85、400、1\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ 这 4 个流量点附近的测量结果, 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 。实际流量与实际脉冲系数成对应关系, 因此, 在标定中一般采用实际脉冲系数反映标定结果。若 K_{mn} 表示第 $m (m=1, 2, 3, 4)$ 个流量点的第 $n (n=1, 2, 3)$ 次实际脉冲系数。根据实际脉冲系数 K_{mn} , 可得到的第 $m (m=1, 2, 3, 4)$ 个流量点的平均实际脉冲系数 $\overline{K_{mn}}$ 。

$$\overline{K_{mn}} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 K_{mn} \quad (17)$$

再根据标定装置第 $m (m=1, 2, 3, 4)$ 个流量点的第 $n (n=1, 2, 3)$ 次实际脉冲系数 K_{mn} , 可得到第 $m (m=1, 2, 3, 4)$ 个流量点的第 $n (n=1, 2, 3)$ 次的实际脉冲系数误差 E_{mn} 。

$$E_{mn} = \frac{K_{mn} - K}{K} \times 100\% \quad (18)$$

根据实际脉冲系数误差 E_{mn} , 可进一步得出第 $m (m=1, 2, 3, 4)$ 个流量点的平均实际脉冲系数误差 E_m 。

$$\overline{E_m} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 E_{mn} \quad (19)$$

根据平均实际脉冲系数误差 $\overline{E_m}$, 可得第 $m (m=1, 2, 3, 4)$ 个流量点重复性 $(E_r)_m$ 。

$$(E_r)_m = \left[\frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 (E_{mn} - \overline{E_m})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

最终标定结果如表 1 所示。

表 1 标定结果

Table 1 Calibration results

流量点/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	实际脉冲系 数系数/ 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/ %
	4 989.3			
31.84	4 973.4	4 982.5	-0.349	0.16
	4 984.9			
	5 012.9			
86.74	5 004.6	5 005.1	+0.103	0.15
	4 997.9			
	5 005.2			
404.12	5 002.8	5 005.4	+0.108	0.05
	5 008.3			
	5 006.1			
1007.44	5 006.3	5 006.3	+0.126	0.00
	5 006.4			

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不小于 3 m/s ($85 \text{ m}^3/\text{h}$) 时, 平均实际脉冲系数误差小于 $\pm 1\%$, 重复性误差小于 0.2% ; 流量范围小于 3 m/s ($85 \text{ m}^3/\text{h}$) 时, 平均实际脉冲系数误差小于 $\pm 2\%$, 重复性误差小于 0.4% ^[16]。从表 1 可知, 最大平均实际脉冲系数误差为 -0.349% , 最大重复性误差为 0.16% 。实验结果表明, 基于回波上升段峰值拟合的气体超声波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。同时, 由于大流量时, 回波信号衰减严重, 容易受噪声干扰, 使得气体超声波流量计可测的最大流量受限, 处于国际领先地位的 Daniel 等公司的同类仪表的最大流量为 $850 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[17]。而基于回波上升段峰值拟合的气体超声波流量计信号处理方法不仅计算简单, 能保证气体超声波流量计系统具有较高的实时性, 并且, 其最大可测流量为 $1\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$, 有效提高了气体超声波流量计可测的最大流量。

5 结论

提出一种基于回波上升段峰值拟合的气体超声波流量计信号处理方法, 并给出该信号处理方法的计算步骤。该方法计算简单, 能保证系统具有较高的实时性; 同时, 能保证气体超声波流量计系统满足较高的测量精度, 并且有效地扩大了气体超声波流量计的测量范围。

分析了不同流量下气体超声波流量计回波信号轮廓的变化规律, 得出了回波信号畸变的具体特征和上升阶段轮廓保持不变的特性。建立了回波信号上升阶段轮廓的数学模型。给出了最小二乘拟合峰值点范围的确定方法, 并通过实验验证了确定最小二乘拟合峰值点范围的

最佳差值参数。

在基于 FPGA 和 DSP 的双核心硬件系统上,实时实现了基于回波上升段峰值拟合的信号处理方法。并且,能够实时完成瞬时流量测量、累积流量计算、流量信息显示等功能。在安徽省计量科学研究院进行了标定实验,结果证明了基于回波上升段峰值拟合的信号处理方法和系统的有效性。

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] 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.
- [3] LYNNWORTH L C, LIU Y. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955-2005 [J]. Ultrasonics, 2007, 44(4):e1371-e1378.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] MYLVAGANAM K S. High-rangeability ultrasonic gas flowmeter for monitoring flare gas[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1989, 36(2):144-149.
- [7] 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.
- [8] KROEMER N, FREUND A. Method for measuring the time of flight of electric, electromagnetic or acoustic signals [P]. EP0797105, 2004.
- [9] SUGI T, SASAKI T. Ultrasonic flow meter [P]. US7299150, 2007.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 徐科军, 方敏, 汪伟, 等. 一种基于 FPGA 和 DSP 的气体超声流量计 [P]. CN 104697593 A, 2015.
XU K J, FANG M, WANG W, et al. One kind of gas ultrasonic flowmeter based on FPGA and DSP [P]. CN 104697593 A, 2015.
- [13] CHEN Q, LI W, WU J. Realization of a multipath ultrasonic gas flowmeter based on transit-time technique[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1):285-290.
- [14] SABATINI A M. A digital-signal-processing technique for ultrasonic signal modeling and classification[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2001, 50(1):15-21.
- [15] 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.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家计量检定规程: 超声流量计, JJG1030—2007[S]. 2007. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. National verification regulation: Ultrasonic flowmeter, JJG1030—2007[S]. 2007.
- [17] EMERSON ELECTRIC CO. Daniel ultrasonic flow meters-model 3411 and 3412 gas ultrasonic meter data sheet [EB/OL]. [2016-11-29]. <http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/daniel/Flow/ultrasonics/Pages/Ultrasonic3411-3412.aspx>

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

罗德与施瓦茨公司支撑中国移动完成业界首次5G毫米波器件评估测试

为满足未来5G网络超高速率的业务需求,业界纷纷启动5G毫米波基站研发。目前5G毫米波基站所需的器件成熟度较低,且缺乏满足5G信号特征的毫米波器件测试系统,导致产业界无法对5G毫米波器件进行深入、全面和有效的评测。

为加速推进5G毫米波器件成熟,中国移动依托5G联合创新中心,联合罗德与施瓦茨公司定制开发业界首套5G毫米波器件测试系统。该测试系统主要包括R&S SMW200A矢量信号发生器和R&S FSW矢量信号分析仪。其中,R&S SMW200A可输出高达40 GHz频率、800 MHz带宽的64QAM调制信号,该调制信号在满足5G毫米波基站信号峰均比要求的同时,仍具有优良的EVM(矢量幅度误差)和ACLR(邻道泄露比)。R&S FSW可以支持高达2 GHz的分析带宽以及出色的性能指标,以

确保测试结果的高可信度。该测试系统还可以支持对被测功放器件进行DPD(数字预失真)校正,使对功放的评估更加贴近其真实应用时的性能表现。基于该测试系统,可有效解决单音信号无法准确评估器件真实性能的问题。

日前,中国移动已通过该系统对业界26 GHz和39 GHz的功放、低噪放和变频器等5G毫米波器件进行了全面测试,测试指标涵盖频段、带宽、输出功率、增益、噪声系数、ACLR(邻道泄露比)、EVM(矢量幅度误差)以及功放效率等。通过此次测试,合作双方全面掌握了毫米波器件产业的最新水平,探索出产业推进的后续方向,并建立了一套完善的5G毫米波器件评估方法,为后续5G毫米波基站产品研发奠定了坚实的基础。