

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312629

基于 DSP 的四声道超声气体流量测量技术研究*

朱燕萍¹ 王树臣² 程鹏飞² 潘金燕² 崔传金¹

(1. 华北理工大学电气工程学院 唐山 063210; 2. 徐州工程学院电气与控制工程学院 徐州 221018)

摘要: 针对超声波流量计在低流速流体测量中准确性低、可靠性低、误差大的缺陷,提出一种基于数字信号处理器(DSP)的四声道气体超声流量测量技术。首先,基于超声波流量计的测量原理选择时差法作为流量测量算法,并确定超声波流量计的声道布置方案;其次,采用数学积分法求取瞬时流量的加权系数,选取 TI 公司的 TMS320F28335 型 DSP 芯片,完成系统硬件的设计;最后,对接收信号进行滤波处理,模拟检测管道内静态和定量状态下流量情况。实验结果表明,在管道静态流量测量中各声道的平均测量误差为 0.142%、0.214%、0.278%、0.365%,误差低于±0.4%,符合标准要求。而在低流速定量测量中,样机与标准表平均误差为 0.945%,实验数据表明样机检测误差随气体流速的增大而减小,满足设计要求。

关键词: DSP;四声道;低流速;超声波流量计

中图分类号: TH8414.92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Research on ultrasonic flow measurement technology of
four-channel gas based on DSPZhu Yanping¹ Wang Shuchen² Cheng Pengfei² Pan Jinyan² Cui Chuanjin¹

(1. College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China)

Abstract: Aiming at the defects of low accuracy, low reliability and large error of ultrasonic flowmeter in low velocity fluid measurement, a four-channel gas ultrasonic flow measurement technology based on DSP is proposed. Firstly, according to the measurement principle of ultrasonic flowmeter, the time difference method is selected as the flow measurement algorithm. Secondly, the acoustic channel layout scheme of the ultrasonic flowmeter is determined, and the weighting coefficient of the instantaneous flow is calculated by using the mathematical integration method. TI's TMS320F28335 DSP chip is selected to complete the system hardware design. Finally, the received signal is filtered to simulate the flow in the pipeline under static and quantitative conditions. The experimental results show that the average measurement errors of each acoustic channel in the static flow measurement of pipeline are 0.142%, 0.217%, 0.273% and 0.362%, and the error is less than ±0.4%, which meets the standard requirements. In the quantitative measurement of low flow rate, the average error between the prototype and the standard meter is 0.945%, and the experimental data show that the prototype detection error decreases with the increase of gas flow rate, which also meets the industrial standards and meets the design requirements.

Keywords: DSP; four-channel; low flow velocity; ultrasonic flowmeter

0 引言

随着工业生产领域的快速发展,石油、天然气、供暖等领域对温度、压力和流速测量仪器的准确性和可靠性的要求显著提高。近年来,超声波流量计以其超声波传播速度

快、非接触式安装、适用范围广等优点,保证了测量结果的精确度和稳定性,快速占领了气体流量测量领域^[1]。目前,由于国外对超声波流量计的研发较早,不仅在流量测量的相关理论上有所创新,而且美国、西欧等国家已经在产品实际应用方面达到了较高普及率,依托于起步较早、工业制造

收稿日期:2023-01-13

* 基金项目:国家自然科学基金(61803154)、河北省自然科学基金(F2019209323, F2019209443)、徐州市重点研发计划(现代农业)项目(KC21135)资助

技术先进等优势,迅速占据了国内超声波流量计的主要市场。国内研发虽然起步较晚,但唐山汇中仪表有限公司、上海通优仪表有限公司等积极引进国外先进技术并进行改进后,提出了自己的主流产品,迅速打开了国内市场,不过由于起步较晚并受到技术的限制,目前超声波流量计主要应用于工业环境流量测量中,并且流量计的测量精度上还有待提高。

20 世纪 50 年代,美国学者提出了振铃法,此方法是通过多周期循环放大实现前后正逆程时差测量的,这种方法实际上是以多周期循环弥补技术的不足,在很大程度上提高了测量精度。研究人员在 1955 年提出了麦克森流量计,主要用于测量航空燃油的流量,标志着超声流量技术的研究正式从理论层面发展到实际应用中,是技术发展的一大跨越。随着集成电路技术的发展,频差法、相关法等测量技术相继出现,不同程度的提高了超声波流量计的测量精度和稳定性^[2],但这些方法在小管径小流量管道测量中仍暴露出一定的局限性。

随着高频技术芯片和数字信号处理技术的快速发展,与 DSP、现场可编程门阵列(field programmable gate arrays, FPGA)等新型电子技术相结合的超声波流量测量技术层出不穷,对超声波流量测量系统的可靠性和测量精度方面进行了多方面的改进^[3-7]。董雅琳等^[8]提出了一种基于时差法的新型超声波气体传感器的设计,通过使用小波分析和三阈值比较法对接收到的超声波信号进行校正和滤波处理。实验结果表明,该方法有效降低了由于超声波缺波产生的误差,并提高了抗噪性和稳定性。王安然等^[9]研究了一种基于全相位快速傅立叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法的超声波流量计相位检测方法,此方法是将利用差频测相技术获得的采样信号经过 FFT 计算来检测相位,经过实验对比全相 FFT,设计的超声波流量计样机的测量误差优于 1%,测量量程比为 160:1,有效实现相位检测。

本文根据超声波流量测量原理选取时差法为测量算法,设计超声波传感器的多声道布局方案,计算各通道的瞬时流量加权系数。其次,选取合适的 DSP 型号,设计流量检测硬件方案。最后,搭建模拟超声波流量检测实验平台,对检测管道静态和定量状态流量进行检测,验证实验样机的准确性。

1 多声道超声波流量计设计原理

1.1 时差法超声波流量测量原理

超声波在流体中传播时因水流方向不同,因而正向和反向传播速度也不同。时差法就是依据超声波正向顺水流速和反向逆水流速之间的时间差来获得沿声道与轴形成的平面的平均轴向速度^[10-11]。如图 1 所示,为时差法超声波流量测量原理图。

图 1 中 V 为待测流体流速,将一组超声波换能器安装在管道两侧,保持换能器 1、2 之间的连线与管道上侧边缘

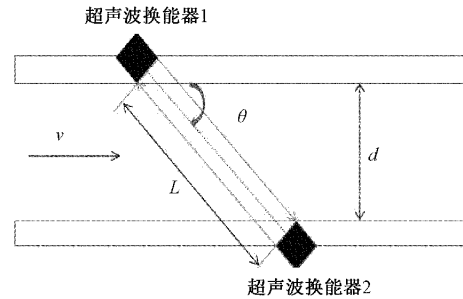


图 1 时差法原理图

夹角为 θ , 称为换能器安装角。

超声波从换能器 1 到换能器 2 顺水流渡越时间为 t_1 。同理,逆流时间 t_2 是超声波从换能器 2 发射到换能器 1 所需的时间,具体的渡越时间公式为:

$$t_1 = L/(c + v\sin\theta) + \tau \quad (1)$$

$$t_2 = L/(c - v\sin\theta) + \tau \quad (2)$$

式中: L 为超声波在两个换能器间传播声道的长度,具体表示为 $L = d/\cos\theta$; d 为渠道宽度; τ 为信号在电路和换能器传播过程中产生的时间延迟。

$$\Delta t = t_2 - t_1 = L/(c - v\sin\theta) - L/(c + v\sin\theta) = 2Lv\sin\theta/(c^2 - v^2\sin^2\theta) \quad (3)$$

则流速 v 为:

$$v = \Delta t(c^2 - v^2\sin^2\theta)/(2L\sin\theta) \quad (4)$$

由于在常见液体中声速远大于液体流速,即 $c^2 \gg v^2$, 经化简后,平均流速公式可表示为:

$$v = \Delta t c^2 / (2L\sin\theta) \quad (5)$$

由式(5)可知,超声波在两个换能器间传播声道的长度 L , 超声波换能器和管壁的夹角 θ , 传播时间差 Δt 和超声波在水中传播速度 c 是影响流速测量的重要参数。此外,在测量电路中加入共模电感以减小电磁干扰,并通过将式(5)中超声波在水中传播速度 c 消除掉,从而忽略测量流速时温度变化对精度的干扰,如式(6)所示。

$$v = \frac{h(t_1 - t_2)}{t_1 t_2 \sin 2\theta} \quad (6)$$

由于管道内流体速度分布不均匀,通过引入雷诺系数判断流体的流动状态从而对超声波流量计的误差进行校正,如式(7)所示。

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (7)$$

式中: ρ 为流体密度,单位为 kg/m^3 ; v 为管道内流体流速,单位为 m/s ; d 为管道直径长度,单位为 m ; μ 为流体粘度,单位为 $\text{pa}\cdot\text{s}$ 。

最后,结合式(5)和求得各通道的权值,通过式(8)即可得到所测四声道的加权平均流速。

$$v_{area} = \sum_{i=1}^N w_i v_i \quad (8)$$

式中: N 为声道数目; w_i 为每个声道的权重系数; v_i 为每个声道的平均流速。

1.2 传感器声道布局

在工业生产领域,传统的单声道布局方案因测量精度低,限制性大等缺点,逐渐被规划合理的多声道设计方案所取代。多声道布局方案在保证提高测量精度的前提下大大提高了超声波流量计的抗干扰性能^[12-14]。设计的多声道布局方案通过对管道内流体波动产生的误差进行补偿,降低流体波动对检测精度的影响^[15]。多声道超声波传感器有3种常用的布局方案,即交叉布置、平行布置和网络布置^[16]。平行布置方式可以从4个不同的流层反映流速情况,交叉布置方式通过两个交叉声道取平均值获得的流速能更真实的反映整个截面的流速情况,而网络布置方式多应用于实验室研究,实用性差。为了保证超声波的传播效率,传感器采用交叉平行布置方式安装,如图2所示。

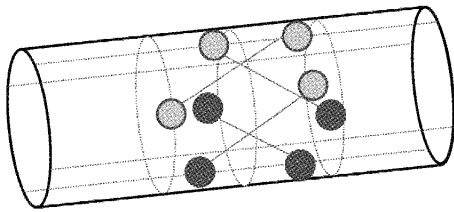


图2 四声道超声波流量计传感器布局图

1) 加权系数

基于时差法测量原理进行传感器安装布局,声道分布在弦线上,从管道的横向方向上彼此平行。综合计算得出第*i*个弦向声道的表达式,其中沿轴线方向的平均流速 $V_i(r_i)$ 为:

$$V_i(r_i) = \frac{L_i(r_i)}{2\cos\theta} \cdot \frac{\Delta t_i}{t_{Vi}(t_{Vi} + \Delta t_i)} \quad (9)$$

式中: $L_i(r_i)$ 为第*i*个弦向通道的声程; θ 为轴向与弦向夹角; Δt_i 为顺向和逆向传播时差; t_{Vi} 为超声波在第*i*个弦向通道顺向传播时间。

采用加权法融合各通道的平均流速,最后获得的是超声波实际流速^[17],截面平均流速表达式为:

$$V = \sum_{i=1}^N w_i V_i(r_i) \quad (10)$$

其中, w_i 为第*i*个弦向通道的加权系数,数值随声道不同而变化。通常,圆形管道中,在偏离轴线距离为*r*处弦向声道的流速被定义为*v(r)*,此时,管道内流体的流速*V*为*v(r)*在管道横截面上的积分,即:

$$V = \frac{1}{S} \iint_S v(r) dS \quad (11)$$

$$S = \pi R^2$$

取计算结果的离散值,声道分布在管道偏轴线 $r_i(i = 1, 2, 3, \dots)$ 处,即需要在计算得出的管道位置处安装一对超声波探头,布置多个测量节点以实现多声道超声波流量测量方案。

2) Gauss-Legendre 数值积分

首先需要以高斯数值积分的性质为基础考虑它的一般

形式。若高斯数值型积分形式为:

$$\int_a^b \rho(x) f(x) dx = \sum_{i=1}^N W_i f(x_i) \quad (12)$$

则其必定有一组 $x_0, x_1, \dots, x_N \in [a, b]$ 的节点,使其有 $2N+1$ 次代数精度。

计算步骤如下:

(1)构造正交多项式。

(2)求解高斯节点,假设*N*次正交多项式的数值为0,此时的高斯节点就是根,传感器的位置分布关系为 r_i/R 。

(3)计算权值 W_i ,用解线性方程组的方法求解。分别取 $f(x) = 1, x, \dots, x^{N-1}$,使得积分公式成立,得到以下方程组。

$$\begin{aligned} \int_a^b \rho(x) dx &= W_1 + W_2 + \dots + W_N \\ \int_a^b \rho(x) x dx &= W_1 x + W_2 x + \dots + W_N x \\ \int_a^b \rho(x) x^2 dx &= W_1 x^2 + W_2 x^2 + \dots + W_N x^2 \\ \int_a^b \rho(x) x^3 dx &= W_1 x^3 + W_2 x^3 + \dots + W_N x^3 \\ &\dots \\ \int_a^b \rho(x) x^{N-1} dx &= W_1 x^{N-1} + W_2 x^{N-1} + \dots + W_N x^{N-1} \end{aligned} \quad (13)$$

当 $x = r/R, \rho(x) = 1$ 时, $f(x) = R^2(1-x^2)^{1/2}V(Rx)$,根据Legendre多项式一般形式,化简为: $P_n(x) = (1/2^n n!) (d^n/dx^n)[(x^2-1)^n]$ 。

$[-1, 1]$ 上带权 $\rho(x) = 1$ 的正交多项式即为Legendre多项式。利用线性方程组求解的方法,计算得出了设置不同节点数和对应加权系数之间的关系表达式,多声道超声波流量计的传感器对应的分布位置与其加权系数如表1所示。

表1 分布位置与加权系数

声道数	Gauss-Legendre 数值积分	
	分布位置 r_i/R	加权系数 W_i
2 声道	± 0.5274	F_i
	± 0.7386	$0.5456 F_i$
3 声道	0.0000	$0.8799 F_i$
	± 0.8526	$0.3469 F_i$
4 声道	± 0.4500	$0.6523 F_i$
	± 0.9152	$0.2467 F_i$
5 声道	± 0.5473	$0.4736 F_i$
	0.0000	$0.5689 F_i$
6 声道	± 0.9215	$0.1613 F_i$
	± 0.6742	$0.3518 F_i$
	± 0.2368	$0.3759 F_i$

选用 TI 公司的 TMS320F28335 处理芯片,根据超声波在传播过程中的衰减与发射频率有关这一理论,频率较低的超声波虽传播距离远、衰减缓慢,但是容易受到噪声的干扰。然而,高频率的超声波对硬件电路及处理芯片的要求过高,目前国内技术还无法满足高频率超声波的需求。因此,设定合适的超声波发射频率对实验结果的可信度十分重要。根据国内外相关设计和经验,本文将超声波传感器的发射频率设定为 1 MHz^[18-21]。考虑到流体的流速是对称式分布的,所以多声道超声波流量计通常采用 2、4、6 偶数声道布置方案来测量弦向声道从而计算流速。且超声波流量计的设计中,测量精度虽会随着声道数的增加而有所提高,但相应的制造成本也会增加,不利于大批量的生产应用^[22]。经实验探究,三声道的测量精度在 0.4% 左右,五声道的测量精度保持在 0.3% 左右^[23],且测量精度在声道数量增加到 4 后就不再有明显的提高,综合生产成本、技术要求等多方面考量,本文采用四声道布置方案,计算出的加权系数为 0.109 6、0.390 4、0.390 4、0.109 6。

2 系统硬件设计

如图 3 所示,为超声波流量计的总体设计图,主要由以下几个模块组成:TMS320F28335 最小系统板,超声波信号发射和接收模块,收发切换模块,高速信息数据采集模块等。传感器采用多脉冲方波作为激励信号,通过脉宽调制(pulse width modulation, PWM)产生占空比为 50% 频率为 1 MHz 的方波。DSP 芯片选用的 TMS320F28335 型,该芯片不仅具有强大的定点数字计算能力和丰富的片上集成外设,还同时具有 DSP 和微控制单元(microcontroller unit, MCU)两种类型芯片的优点,在工业检测和数字信号处理等嵌入式系统的开发中具有广阔的发展前景^[24]。

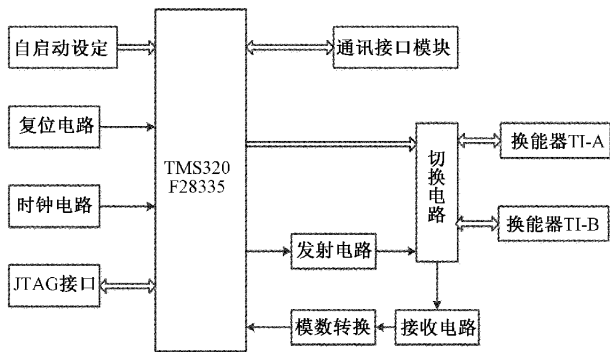


图 3 系统硬件设计方案

如图 4 所示,为基于时差法设计的正逆程切换电路。四声道超声波流量计的设计需要在每条声道中安放两个超声波传感器,即 T1-A 和 T1-B,当传感器 T1-A 发射超声波,T1-B 接收信号时处于正程测量状态;当传感器 T1-B 发射超声波,T1-A 接收信号时处于逆程测量状态。

系统工作过程:

1) 首先,TMS320F28335 最小系统板发射脉冲信号,信号

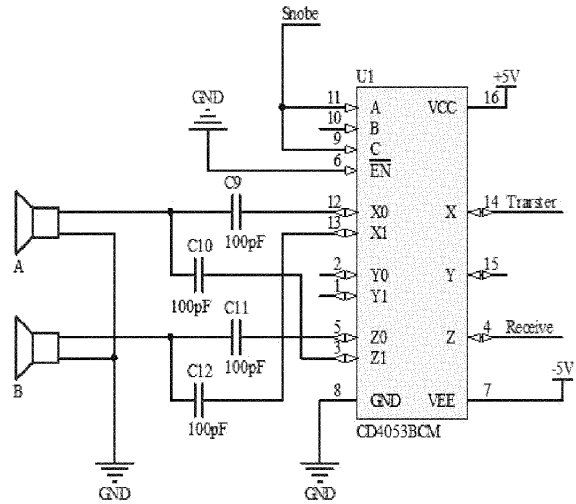


图 4 正逆程切换电路

经发射电路放大缓冲,驱动超声波换能器 TI-A 发送超声波。

2) 超声波换能器 TI-B 接收超声波信号后,信号经接收放大电路送到 AD 转换器进行数据转换,同时 TMS320F28335 启动 DMA,读取 AD 的转换结果,当 DMA 读完一帧数据后,此时中断指令被触发。

3) 在中断过程中,开关切换电路切换两个传感器的发送和接收顺序,并采集和存储另一个流向的数据,4 个通道数据经接收存储之后,对这 4 组数据进行信号处理和融合计算,最终得到流量值,传输到 LCD12864 液晶数据显示模块。

3 系统算法实现

3.1 FFT 基本原理

傅里叶分析是频谱分析技术的理论基础,傅里叶分析既可以应用于连续信号分析也可以用于离散信号分析处理^[25]。快速傅里叶变换是一种利用计算机处理减少计算量的运算,从而实现高效率的数据处理,简称 FFT,该算法使得傅里叶分析在实际应用中成为可能。

根据傅里叶变换的采样定理,采样信号的频谱是以 f_s 为周期进行周期延拓而形成的原始模拟信号的频谱。为了减小采集信号的误差,需要调整模拟信号的带宽,避免频谱混叠,即要保证最高频率 $f_c \leq f_s/2$ 。如式(14)所示。

$$\begin{cases} X_a(j\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x_a(t) e^{-j\Omega t} dt \\ x_a(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_a(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega \end{cases} \quad (14)$$

数字信号处理主要是对信号的处理,需要对模拟信号 $x_a(t)$ 采样,得到时域离散信号 $x(n)$,再将傅里叶变换处理后的公式进行无限长序列变换得到式(15)所示。

$$\begin{cases} X(k) = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ x(n) = IDFT[X(k)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W_N^{-kn}, n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (15)$$

$x(n)$ 为有限长度为 M 的序列, $N(M \geq N)$ 为DFT的区间长度。应用FFT处理序列,首先要获得一个 N 个采样点的有限长序列,其值为2的整数次幂,对这 N 个采样点进行FFT运算后会得到 N 个复数形式的点,这 N 个点对应着频域中每次的采样点,每个点的绝对值就是该频域信号下的幅度特性,相位值为频率分量信号相位。如图5所示,为FFT处理效果图。

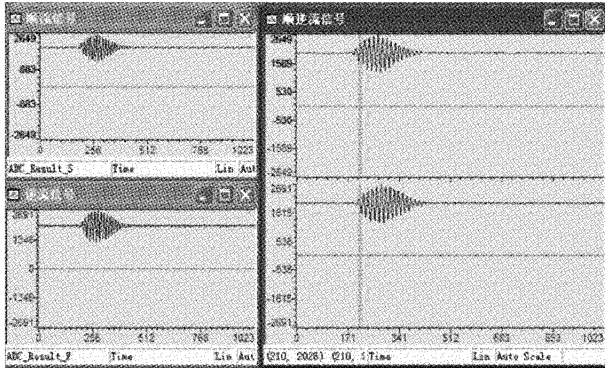


图5 FFT处理效果

采用阈值检测和过零检测相结合的方法对信号渡越时间测量技术进行了改进,如果检测中接收到的信号超过设定的阈值,则将同时段波形的下一个过零点的值作为测量到达时刻。通常情况下,声波在传播过程中会有一定的传输时间,传输时间的实际值与算法求得的值之间会存在一定的差异,为声道延时。如图6所示,为将两种检测方法结合测量的单声道顺逆流到达时间测量信息图,图中可以清晰的看到声道的正逆程时间差,数据采集模块将测量得到的顺逆流到达时刻的数据传输给F28335芯片,经时差法运算得到该声道的瞬时流速,之后由高斯勒让德声道融合算法将四声道获得的数据融合,最后传输到显示屏上显示。

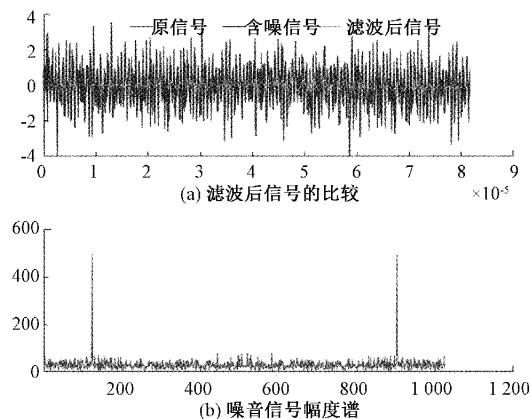


图6 单声道渡越时间检测

3.2 多通道测量算法实现

由于每对超声波换能器在各自通道测得的传输时间和时差有所不同,所以本文采取先计算各通道的瞬时流速,最后通过加权数据融合的方式得到管道内流体的四声道平均

流速和平均瞬时流量。每个测量通道测量周期结束后,按顺序切换测量通道。如图7所示,为算法切换流程。

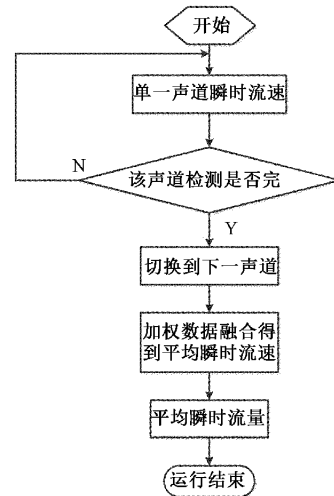


图7 算法切换流程

4 实验结果及分析

在实验室中模拟大空间、低流速的工业生产环境,设计实验室原型机,分别测量管道静态流速和低流速。然后,将实验测得数据与标准单声道超声波流量计测得的结果进行对照分析,并对设计的超声波流量计样机精度进行评估。设计的实验平台由气体输入部分、气体整流器、上下游管道、流量计样机、标准表、对照表和液晶显示器等组成。

如图8所示,可以看出测试实验平台的组成关系和测试流程。实验选用口径为DN200的测试管道,由鼓风机和变频器组成气体输送部分,选用空气作为测量流体介质,由鼓风机将空气导入实验管道,变频器调节管道中气体的流速,调节气体流量范围大致为 $0 \sim 800 \text{ m}^3/\text{h}$,并在鼓风机出口处安装整流器使空气能够均匀的沿轴线方向流动。

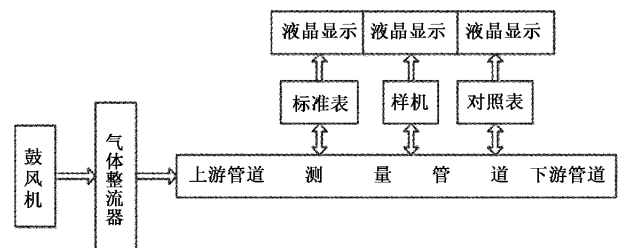


图8 测试实验平台及测试流程

4.1 管道静态测量分析

在测得实验结果后需按国家标准超声波流量计检定规程确定准确度等级,使得最大允许误差符合国家标准规定数值;在测量低流速或静态时(即 $q_{\min} \leq q \leq q_t$ 时),误差率不能大于标准值的两倍;测量气体时, $q_t \leq 3 \text{ m/s}$;测量液体时, $q_t \leq 0.3 \text{ m/s}$ 。管道静态测量是为了检测设计实验平台的稳定性,是确保测试设备符合生产标准的重要检测手段。

实验中将测管道两端口完全封闭以减小管道内气流细微波动对实验测试系统的干扰。因实际静态空气流速受环境噪声、电路延时,硬件安装等诸多因素影响难以达到理论流速值 0,采取多次测量取平均值的方式提高样机测量精度。如表 2 所示,为实际静态流速测量值。可以看出各个声道

实际测量平均值分别为 0.001 42、0.002 14、0.002 78 和 0.003 65,与标准表涡轮流量计的数值比较,误差为 0.142%、0.214%、0.278%、0.365%。实验测得的数据低于±0.4%的误差率,基本符合设计要求。另外由图 9 也可以看出来四声道融合后的平均流速误差也满足基本需要。

表 2 静态流速测量值

瞬时流速	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均 (10 ⁻³ m/s)
声道 A	1.3	1.4	1.6	1.2	1.6	1.3	1.4	1.5	1.4	1.5	1.42
声道 B	1.8	2.1	2.0	1.7	3.6	2.4	2.1	1.8	1.8	2.1	2.14
声道 C	2.5	3.3	2.7	2.5	2.9	2.7	2.8	2.9	2.8	2.7	2.78
声道 D	3.4	3.7	3.6	3.8	3.5	3.8	3.9	3.6	3.5	3.7	3.65
加权平均 流速	2.193 84	2.667 12	2.404 8	2.187 68	3.096 56	2.55	2.493 84	2.393 84	2.332 88	2.443 84	2.476 44
标准表	0.1	0.1	1.2	0.1	1.3	1.2	0.1	0.1	0.1	1.3	0.1
超声波 对照表	2.6	2.8	3.1	3.0	3.4	3.1	2.9	2.4	2.8	3.0	2.91
样机与对 照表对比	-0.406 16	-0.132 88	-0.695 2	-0.812 32	-0.303 44	-0.55	-0.406 16	-0.006 16	-0.467 12	-0.556 16	-0.433 56

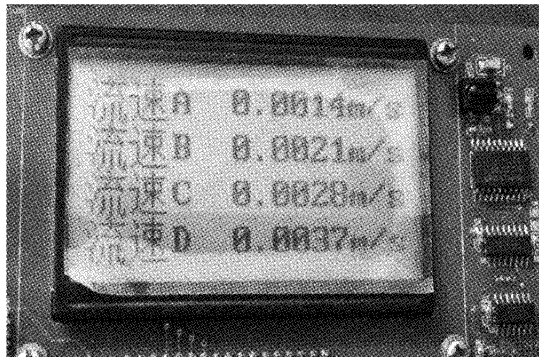


图 9 测试实验四声道瞬时流速

4.2 低流速流量测量分析

利用鼓风机将空气导入偏心转子,调节转子槽叶片间容积,从而实现吸入、压缩和排出空气的原理,用来模拟低流速实验装置中的原始气流,随之通过整流器对其整流来稳定气流,并安装变频器以调节测量管道内气流的大小模拟所需的低流速管道。在距测试流量计样机大于 10D(D 为管道直径)的距离处安装整流器,防止两者间相互干扰。

首先,调节鼓风机的转速将气体流速流量调节至规定值,直到系统稳定运行;然后分别将标准流量计和设计的流量计样机所测的数据记录下来,具体数据如表 3 所示。根据低流速实验表中测量数据可知,设计样机的测量误差

表 3 低流速实验测量值

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8
标准表/(m·s ⁻¹)	0.301	0.421	0.520	0.601	0.721	0.906	1.101	2.013
样机流量计/(m·s ⁻¹)	0.295	0.416	0.515	0.605	0.726	0.913	1.108	2.026
样机与标准表误差/%	-1.99	-1.19	-0.96	+0.67	+0.69	+0.77	+0.64	+0.65
对照表	0.307	0.427	0.524	0.615	0.732	0.920	1.111	2.028
与对照表对比	0.012	0.011	0.009	0.010	0.006	0.007	0.003	0.002

会随着气体流速的增大而逐渐减小,实现了预期的满足大空间低流速气体流量流速测量的设计要求。

5 结 论

为了提高超声波流量计在大空间、低流速条件下气体流速及其流量的测量精度和可靠性,设计了基于 DSP 的四

声道超声气体流量样机,根据时差法流量测量原理提出了超声波流量计的整体设计方案,并采用阈值检测和过零检测相结合的方法对信号渡越时间测量技术进行了改进;然后设计了气体流速流量测量的实验装置,完成了不同流速下数据的采集和分析;最后,结合静态和低流速状态下的实验结果分析,获得的静态管道流量测量的各声道的平均

测量误差低于 $\pm 0.4\%$,符合标准要求。低流速定量测量的实验数据表明样机检测误差随气体流速的增大而减小,同样符合行业标准。本文为大空间、低流速气体流量流速测量提供了理论支持。

参考文献

- [1] 王芳芳,曾云,张振凯,等.大管径超声波测流误差的影响因素及修正分析[J].仪器仪表学报,2019,40(3):146-153.
- [2] MASSAAD J, VAN NEER P L M J, VAN WILLIGEN D M, et al. Exploiting nonlinear wave propagation to improve the precision of ultrasonic flow meters[J]. Ultrasonics,2021,116:106476.
- [3] 葛健炎,丁煜.基于STM32和FPGA的超声波气体流量计[J].仪表技术与传感器,2020(10):29-32.
- [4] 杨兵吗,崔永俊.基于TDC-GP2的高精度超声波流量计的设计[J].电子器件,2016,39(2):447-452.
- [5] 贾惠芹,王成云,张铁煜,等.非接触式超声波流量计收发电路的设计与性能分析[J].电子测量与仪器学报,2020,34(9):123-132.
- [6] MA J, XU K J, JIANG Z, et al. Applications of digital signal processing methods in TOF calculation of ultrasonic gas flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2021,79:101932.
- [7] 田雷,徐科军,沈子文,等.基于气体超声波流量计的间歇激励和信号处理[J].电子测量与仪器学报,2017,31(11):1774-1781.
- [8] 董雅琳,裴小静,刘涛,等.管道传输气体超声波流量计的新设计方法[J].控制工程,2020,27(12):2210-2218.
- [9] 王安然,赵伟国,汤建斌.基于全相位FFT超声波流量计的相位检测方法研究[J].传感技术学报,2020,33(12):1686-1690.
- [10] 贾惠芹,王成云,党瑞荣.流体流速对超声波流量测量精度的影响及校准[J].仪器仪表学报,2020,41(7):1-8.
- [11] MURAKAWA H, ICHIMURA S, SUGIMOTO K, et al. Evaluation method of transit time difference for clamp-on ultrasonic flowmeters in two-phase flows [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2020,112:109957.
- [12] 张彦楠,杨彬.加权数据融合方法在多声道超声波流量计测量中的应用[J].传感技术学报,2017,30(12):1959-1964.
- [13] TANG X Y, XIE X, ZHANG H J, et al. Data integration for multi-path ultrasonic flowmeter based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. IET Science, Measurement & Technology,2015,9(8):909-920.
- [14] 马雪林,徐雅,谢代梁,等.多声道超声波流量计内部流-声耦合特性仿真分析[J].中国测试,2021,47(5):123-128.
- [15] 刘博,徐科军,穆立彬,等.基于Kalman滤波的气体超声波流量计融合方法[J].计量学报,2018,39(6):868-873.
- [16] LI H Y, ZHANG J M, LIU B, et al. Research on filed flowrate measuring technology of stack gas for stationary emission source[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2018,170(3):032055.
- [17] 赵伟国,卜勤超,姚海滨,等.基于双声道的低压超声气体流量计数据融合方法[J].计量学报,2021,42(7):873-878.
- [18] 姚爽,宿彬,杨宗良,等.上游弯管对超声波流量计精度影响及整流设计[J].仪器仪表学报,2022,43(5):102-109.
- [19] 王安然,蒋延付,郑博文,等.一种基于电容积分的时差法超声波流量计飞行时间测量方法[J].中国测试,2021,47(8):44-50.
- [20] PAPATHANASIOU P, KISSLING B, BERBERIG O, et al. Flow disturbance compensation calculated with flow simulations for ultrasonic clamp-on flowmeters with optimized path arrangement [J]. Flow Measurement and Instrumentation,2022,85:102167.
- [21] ZHU K, CHEN X Y, Qu M J, et al. An ultrasonic flowmeter for liquid flow measurement in small pipes using AlN piezoelectric micromachined ultrasonic transducer arrays[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering,2022,30(12):125010.
- [22] 江圳,徐科军,马杰,等.基于动态可变阈值的低功耗单声道气体超声波流量计[J].计量学报,2022,43(3):360-369.
- [23] 张彦楠.基于FPGA的多声道超声波气体流量计的研究与设计[D].天津:河北工业大学,2019.
- [24] 王伟,王静文.TMS320F28335 DSP芯片高可靠电源管理电路设计[J].测控技术,2018,37(10):78-80.
- [25] 韩建,姜明达,张凯,等.基于干涉条纹傅里叶分析技术对接光栅调整偏角的计算分析[J].中国激光,2021,48(3):126-135.

作者简介

朱燕萍,硕士研究生,主要从事光电检测技术及仪器等方面的研究。

E-mail: YanpingZhu2021@163.com

王树臣(通信作者),教授,硕士生导师,主要从事光电检测技术及仪器等方面的研究。

E-mail: wsc1967@xzit.edu.cn