

引用格式: 张伟星, 李建民, 薛鹏飞, 等. 细管道中流速的超声相关法测量[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 64-70. [ZHANG Weixing, LI Jianmin, XUE Pengfei, et al. Ultrasonic correlation measurement of fluid velocity in a fine pipeline[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1): 64-70.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.01.010

细管道中流速的超声相关法测量

张伟星¹, 李建民¹, 薛鹏飞², 侯文¹, 王高¹, 刘争光³

(1. 中北大学信息与通信工程学院, 山西太原 030051; 2. 山西省计量科学研究院, 山西太原 030032;
3. 肇庆医学高等专科学校, 广东肇庆 526020)

摘要: 针对应用常规超声波方法测量极小管径(5 mm 及以下)中流体速度的精度较低问题, 文章应用相关函数法精确测量时延, 降低噪声对测量结果的影响, 提高了极小管径中流体速度的测量精度。首先, 利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件建立管道传输模型, 然后将被顺、逆水流影响后的超声波波形数据分别导入 Matlab 软件, 用插值法处理后做相关计算, 得到较为精确的时延, 最后计算极小管径管道的流速。结果显示: 相关函数法处理插值后的仿真数据可以得到较为精确的时延, 对噪声具有一定的抑制能力。使用插值处理数据时, 插值点越多即插值点间隔时间越小, 测量精度越高, 但是插值间隔太小会导致抗干扰能力降低。

关键词: 流速; 超声波测量; 相关函数法; 细管道

中图分类号: TB559

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-01-0064-07

Ultrasonic correlation measurement of fluid velocity in a fine pipeline

ZHANG Weixing¹, LI Jianmin¹, XUE Pengfei², HOU Wen¹, WANG Gao¹, LIU Zhengguang³

(1. School of Information and Communication, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China; 2. Shanxi Institute of Metrology, Taiyuan 030032, Shanxi, China; 3. Zhaoqing Medical College, Zhaoqing 526020, Guangdong, China)

Abstract: For the low accuracy of the common ultrasonic method in measuring the flow velocity in the pipeline with a very small diameter (below 5 mm), a correlation function method, which can accurately measure the time delay and reduce the influence of noise on the measurement results, is proposed in this paper for improving the accuracy of measuring flow velocity. First, the COMSOL Multiphysics finite element simulation software is used to establish the pipeline transmission model, then the ultrasonic waveform data of forward and reverse flows are respectively introduced into Matlab, and the correlation calculation is performed by the interpolation method to obtain a more accurate time delay, and finally the flow velocity in the pipeline with very small diameter pipes is calculated. The results show that the correlation function method combined with data interpolation can obtain a more accurate time delay and has a certain ability to suppress noise; the more interpolation points, the higher the resolution, but the anti-interference ability would decrease for too dense interpolation.

Key words: fluid velocity; ultrasonic measurement; correlation function method; fine pipeline

0 引言

与孔板法、涡轮法等传统流速测量方法相比, 超声波流量计具有非侵入式测量、瞬态响应快、维护方便、适于大管径测量等优点, 已成为管道流速测量的主要方法, 广泛应用于工业、医学和民用等多个领域。随着超声波技术的迅速发展, 管道流体

的流速测量和监测取得了长足发展。有多种超声波流量计可用于测量和监测液体或气体流速^[1-3], 其中传输时差流量计适用于各种尺寸管径(9 mm~9 m)的流速测量。传输时差流量计的技术要点在于超声波在流体中传播时, 顺流和逆流产生的时间差的测量。针对小管径、低流速的情形, 采用高速数据采集电路, 对采集的回波信号进行算法处理准确查找目标波形以及计时终点方法^[4]。文献[4]中的流速测量方法对硬件电路性能要求较高。

电子技术的进步可以比较容易地处理 ns 级的时间间隔, 但是确定超声波信号到达换能器的时刻则比较困难^[5-6]。文献[7]对比了相关函数法与波包幅值法, 结果显示相关函数法精度较高, 同时解决了

收稿日期: 2019-09-23; 修回日期: 2019-11-05

基金项目: 山西省应用基础研究项目(201701D121061)

作者简介: 张伟星(1993—), 男, 山西阳泉人, 硕士研究生, 研究方向为超声检测和信号处理。

通信作者: 李建民, E-mail: 765773189@qq.com

信号信噪比低无法直接读出波包峰值点的问题。文献[8]表明互相关时延估计方法能够在未进行降噪处理的情况下估计两信号序列的时延。文献[9]分析了管道中层流和湍流的流动状态。文献[10]提到近二十年来,国外的高性能微处理器技术的发展与成熟,使得超声波流量计能够实现高速和复杂的数学计算和逻辑控制,极大地简化了电路,为超声波流量计的高精度和智能化的发展提供了可靠的技术条件和多样化的平台以及广阔的发展前景。国内对超声波流量计的研究和应用已经取得较大进展,尤其在中等尺寸管径的流量测量领域日趋成熟,适用于不同气体、液体的超声波流量计相继问世,有较高的精度和稳定性。但是目前,针对细管道中流速的超声波测量的研究和应用仍不成熟,未能实现大范围的应用,仍需进一步提高超声波流量计的测量精度和稳定性。文献[11-13]分析了插值结合其他方法处理超声波数据改善测量精度的原理。

以上几种方法在大管径、高流速的情形下取得了较为理想的测量结果。在实际应用中,对细管道中流速的测量需求越来越迫切,比如医疗中的精确注射、化工行业中的精确物料添加等。但是涉及相关技术的文献较少。本文研究了在 5 mm 细管道中的流速的测量,利用多物理场有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立三维管道流流动模型,设置背景流(水)的各种属性及超声波在管道流中的传播状态,以此作为实验的基础。细管道的特点是管径小,超声波传播路程短,从而导致测量结果的稳定性和精度较差,所以难点在于如何提高测量的稳定性和精度。本文的解决方法为:(1)采用相关函数法计算时间间隔,一定程度上减少噪声的影响,提高稳定性。(2)由于细管道的流速测量对时间分辨率要求较高,达 ns 级别,否则测量结果的精度难以保证。这样高要求的时间分辨率,硬件电路中难以直接测量,或者测量设备过于昂贵。采用插值后相关法对顺、逆流波形进行处理,减小了时间轴间隔,提高了测量精度,节约了成本。传统超声波流速测量方法是使用硬件电路高频脉冲和专用时间芯片获取超声波在管道中传播的开始和终止时刻后,直接做差得到顺、逆流时延。本文截取一个周期顺、逆流超声波波形图,利用相关函数的算法使图中所有数据点均参与运算,利用 Matlab 对超声信号进行数据处理和分析,得到了较为精确的超声波顺、逆流时延,并且探索了在噪声环境下测量结果的准确性。通过以上建立仿真实验模型和数据分析,为管道流的研究和相关法处理数据提供了依据,并取得较为理想的测量结果。文中还探索了测

量稳定性与测量精度之间的关系。

1 有限元建模

COMSOL Multiphysics 软件建模流程可以概括为 (1) 声学模型:调制超声波的波形以及设置合适的频率,要求超声波波峰突出以便于后续的相关计算。由于管径小,超声波传播路程短,衰减较弱,超声波频率适当取较高的频率,穿透性好,接收波形较为理想。(2) 管道模型:主管道两端的域设置为吸收层,边界设置为硬声场边界。为了便于超声波信号传输,加装信号管,其两端分别为超声波发生器和超声波接收器。(3) 流体模型:设置主管道中流体的各种属性。(4) 流动模型:采用计算机的模拟流体的方法,模拟流体流动的特点。

由于后续主要计算超声波沿顺、逆背景流(水流)传播产生的时间差,即两个超声波波形的时延,其本质上为差分运算,信号管对称且参数完全相同,故信号管对背景流流速测量的影响极小。采用斜式换能器安装方法可以减少管壁混响而产生的失真。

1.1 管道模型

为减少输送管道的管壁对超声波信号的衰减,建模时在输送管道加装用于传播超声信号的信号管道,输送管道通径 d 为 5 mm,信号管通径为 2 mm,与主管道夹角 $\alpha=45^\circ$,管内压强设为正常大气压,背景流流速均值为 U_0 ,信号管穿过主管的距离由 L_2 表示,在任一侧延伸的部分,轴向长度为 L_1 (侧分支)。因此,信号管的总长满足 $L=2L_1+L_2$ 。由于本文采用了三维对称的几何模型,为减少计算量,建立一半管道模型如图 1 所示。

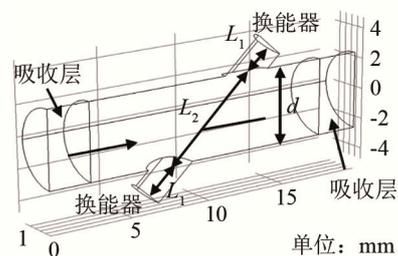


图 1 测试管道模型的示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test pipeline model

建立仿真模型后,设置计算时间步长为: $T_0/12$ 即时间步长为 $0.0333 \mu\text{s}$,仿真过程的时间范围为 $0\sim 30T_0$,模拟 30 MHz 采样频率采样,绘制点数为 361。使用基于间断伽辽金(Discontinuous Galerkin, DG)法的物理场接口时,由于过于小的网格使得计

算时间过长,故采用自由四面体网格时设置单元质量优化,以避免网格过小。网格化后的仿真模型如图2所示。

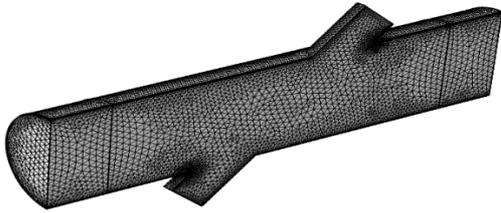


图2 测试管道模型网格化示意图

Fig.2 Schematic diagram of test pipeline model gridding

1.2 声学模型

建立声学模型:首先建立信号管两端的模拟超声波换能器,既能发射信号,又能接收信号。因此,在实际设备中,这两端既是发射器也是接收器。在当前模型中,先仅对向下游传播的超声波信号建模,向上游传播的超声波信号只需将接收器与发射器位置互换即可通过计算生成数据。超声波信号采用信号管底面边界添加法向加速度 a 来模拟。

调制超声波波形解析式为

$$y = A \sin(\omega_0 t) e^{-f_0(t-3T_0)^2} \quad (1)$$

其中: $A=0.1$ mm, 是信号振幅; 频率 $f_0=2.5$ MHz; 角速度 $\omega_0=2\pi f_0$; 信号周期为 $T_0=0.4$ μ s。此超声波信号波峰明显且单一,有利于后续的相关计算。

1.3 流体模型

为了更加接近真实情况,将背景流状态设置为充分发展的湍流,其雷诺数 $Re=5 \times 10^4$ 。利用软件中“计算流体动力学”(Computational Fluid Dynamics, CFD)模块中的“湍流, $k-\omega$ ”接口,对1.2节中的模型进行计算。流体模型主要参数如表1所示。

表1 流体模型主要属性表
Table 1 Main properties of the fluid model

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	温度/ K	管内压力/ Pa	液态水中声速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
液态水	998	239.15	1.01×10^5	1481

1.4 流动模型

有限元方法在流体力学中应用时主要采用的就是伽辽金法,伽辽金法采用微分方程对应的弱形式,其原理为通过选取有限多项式函数(又称基函数或形函数),将它们叠加,再要求结果在求解域内及边界上的加权积分(权函数为形函数本身)满足原方程,便可以得到一组易于求解的线性代数方程,且能够自动满足自然边界条件。超声波在管道流中传播的声压如图3所示。

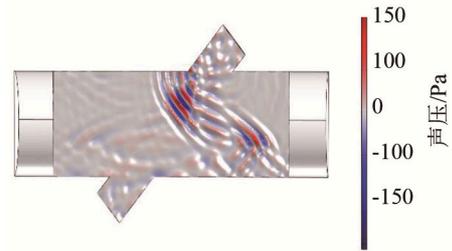


图3 超声波在管道流中传播的声压云图

Fig.3 Nephogram of the sound pressure of ultrasonic propagation in pipe flow

2 仿真结果与分析

2.1 相关函数法

利用相关函数法计算两信号的时延,其基本思想是将其中一个信号以采样间隔为时间增量,沿着时间轴平移,将平移后的信号与另一个信号做相关运算,当相关函数达到最大值时,信号移动的时间增量即为两个信号的时延。相关法计算两信号的时延还具有抗噪声干扰性质。

设一个信号 $x(t)$ 其中包含纯净信号 $X(t)$ 和噪声信号 $n_1(t)$, 经过延迟后的信号表示为 $y(t)$, 其中包含纯净信号 $Y(t)$ 和噪声信号 $n_2(t)$, 表达式为

$$x(t) = X(t) + n_1(t) \quad (2)$$

$$y(t) = Y(t) + n_2(t) \quad (3)$$

式(2)、(3)中的信号做相关运算,得到:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (4)$$

即:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)Y(t-\tau)dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)n_2(t-\tau)dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n_1(t)n_2(t)dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n_1(t)Y(t-\tau)dt \quad (5)$$

由于信号与噪声之间,噪声 $n_1(t)$ 与 $n_2(t)$ 之间无相关性,故式(5)后三项均为0,仅第一项即纯净信号 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 的互相关函数有非0值。这在一定程度上减小了噪声对测量结果的影响。

在实际计算机计算中需要将信号离散化便于处理,离散相关函数为

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t)y(i\Delta t - \tau) \quad (6)$$

其中: τ 为时延, Δt 为采样间隔,单位均为 s, N 为采样点数。

由于一个信号沿时间轴平移与另一个信号做相关运算时最小移动的时间为采样间隔,故采样间隔越短时延测得越精确,即通过互相关计算得到的时延分辨率由采样频率决定,但是采样频率提高空间有限,采样频率太高会导致处理数据时间增加,

处理设备储存量加大等问题^[14]。本文将采用插值后相关法提高顺逆流接收信号的采样序列的精度，进而提高时延测量的精度。

本文方法利用采集到的大部分数据来求相关函数得出时延，再对比传统门限法利用时间芯片获取超声波在管道中传播的起始与终止时刻，相减得时延。由于只用到起始与终止时刻数据，如果起始和终止点数据受噪声影响大，则结果误差相对较大，而相关函数法在计算过程用到了大部分数据点，对采样系统带来的误差进行了平均，提高了测量稳定性。此外，相关函数法对噪声还具有一定的抑制作用。

2.2 数据处理

设置背景流为液态水流，在管道中流动时为充分发展的湍流。当平均速度为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，平均流速云图如图 4 所示。主管道横截面上的流速分布曲线如图 5 所示。

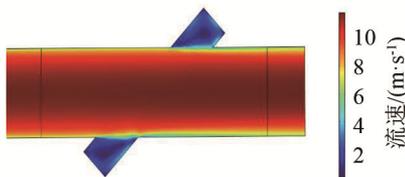


图 4 管道内平均流速云图

Fig.4 Nephogram of the average flow velocity in pipeline

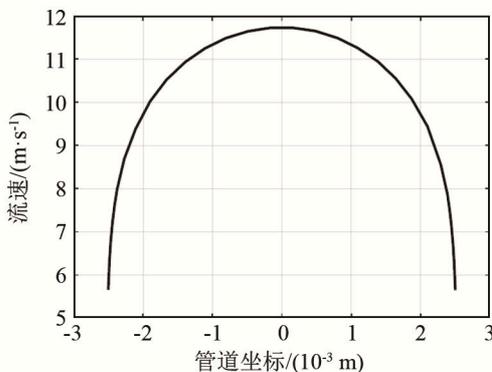


图 5 主管道横截面上的流速分布曲线

Fig.5 Flow velocity distribution curve on the cross-section of main pipeline

将模型上游信号管端设置为信号源，下游信号管端设置为接收端，接收到超声波顺水流传播的波形，然后将信号源和接收端互换，接收到超声波逆水流传播的波形，最后将超声波波形数据导入 Matlab 软件中绘制超声波沿顺、逆流方向传播的声压波形，结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出超声波沿顺、逆流传播后接收端分别接收到的波形形状基本相同，但产生一个时延 τ ，这是由于管道中流体流动对超声波传播时间产生影响导致的。由于仿真模型的计算步长以及网

格划分的原因，绘制声压图的点数较少，图像并不平滑，不利于后续数据处理。为了得到更加平滑的声压图像，以及便于后续处理得到较为精确的时延，故采用插值法对图 6 进行插值处理。

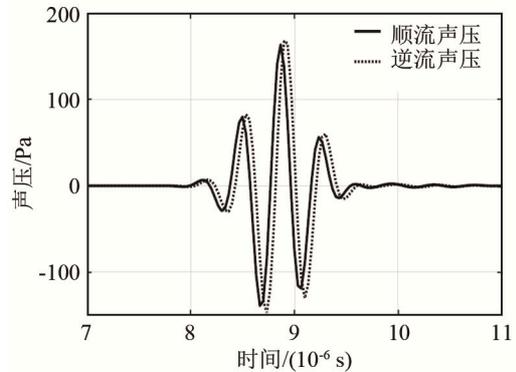


图 6 超声波沿顺、逆流方向传播的声压波形

Fig.6 Sound pressure waveforms of ultrasonic wave propagation in the downstream and countercurrent directions

COMSOL Multiphysics 软件中导出的接收信号数据绘制的图像点数为 361，文中模拟由硬件电路采集的原始数据采样间隔为 $0.0333 \mu\text{s}$ 即 33.3 ns 。如果不采用插值处理，采用文中提及的传统常规方法直接计算顺、逆流时延，这个时延必然为 33.3 ns 的整数倍，显然不满足测量精度的要求，文中采用 10 倍插值和 100 倍插值后时间间隔变为 3.33 ns 和 0.333 ns ，则时延分别为 3.33 ns 和 0.333 ns 的整数倍，满足超声波在管道中传播时间的测量需求，而这样的时间分辨率在硬件电路中难以直接测量，或者测量设备过于昂贵，而对原信号分析处理可以达到所需时间精度，节约成本。这体现了信号分析的优势处。

根据输出信号波形图选用合适的插值方法。Matlab 软件中提供的插值函数 `interp1()` 可以直接使用，并且提供了几种插值方式：分段线性插值、临近插值、球面插值、三次样条插值等。为使图像更加光滑，采用 `spline` 三次样条插值方法，其插值函数以及其一阶和二阶导函数都连续，是最光滑的插值方法。

`spline` 三次样条插值后的图像如图 7 所示。插值后用相关法求时延时，由于相邻采样点间插值函数的方程不同，采样点数又多，计算相关函数时如果使用连续函数乘积的积分，计算量就很大。为减小计算量，在完成三次样条插值后的两个采样点之间平均取 9 个点作为插值点，每个插值点的纵坐标来自于本段的插值函数方程，于是将原采样时间间隔平均划分为 10 份，则插值后时间轴时间间隔变为 3.33 ns ，即 10 倍插值。采用 100 倍插值时，原理同上。

流速设置为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 采用 spline 三次样条插值方法插值后的超声波沿顺、逆流方向传播的声压波形如图 7 所示, 可以看到图像变得比较光滑, 有利于后续研究分析。

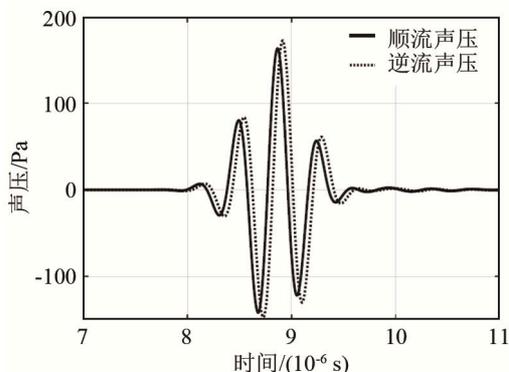


图 7 插值后的超声波沿顺、逆流方向传播的声压波形
Fig.7 Sound pressure waveforms of ultrasonic wave propagation in the downstream and countercurrent directions after interpolation

利用 Matlab 软件对发射和接收的信号做互相关计算: (1) 将两离散信号点集做互相关运算。(2) 检测互相关函数最大值点, 最大值点对应的横坐标时间即为两离散信号的延迟 τ 。

当流体平均流速为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 顺、逆流超声波接收信号之间相差 139 个插值间隔点(延迟点数), 插值间隔为 $3.33 \times 10^{-10} \text{ s}$, 则 $\tau = 139 \times 3.33 \times 10^{-10} \text{ s} = 4.6287 \times 10^{-8} \text{ s}$ 。设置流速值为 5、10、15、20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时对应时延计算结果如表 2 所示。

表 2 流速、插值间隔点数和时延表
Table 2 List of flow velocity, numbers of interpolation intervals and time delay

流速真值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	插值间隔点数	时延/($\times 10^{-8} \text{ s}$)
5	70	2.331 0
10	139	4.628 7
15	209	6.959 7
20	279	9.290 7

流速测量值 U_0 可由式(7)得到:

$$U_0 = \frac{L_2}{\tau \cos \alpha} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{\tau^2 c_0^2}{L_2^2}} \right) \quad (7)$$

其中: c_0 为管道流中的声速, $c_0 = 1481 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

当设置不同流速均值分别为 5、10、15、20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 由式(7)计算得到的流速测量值如表 3 所示。

由表 3 可见, 虽然流速不同, 但相对误差均小于 3%, 与一般工业仪器 4 级精度要求相当。

3 噪声对测量结果的影响

管道流体的流速测量过程中, 外界环境复杂,

表 3 流速测量结果与真值对比
Table 3 Comparison between the measured flow velocity and its true value

流速真值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流速测量值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误差/%
5	5.112 7	2.254
10	10.152 2	1.522
15	15.264 3	1.762
20	20.375 9	1.880

基于超声波非侵入式流量测量方法, 易受环境噪声影响。为探索噪声对测量结果的影响, 当流速为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 在接收信号基础上添加幅值不等的高斯白噪声。可以看到超声波形由于噪声的加入变得不规则, 添加声压均值为 5 Pa、方差为 1 Pa^2 的高斯白噪声后超声波沿顺、逆流方向传播的声压波形如图 8 所示。

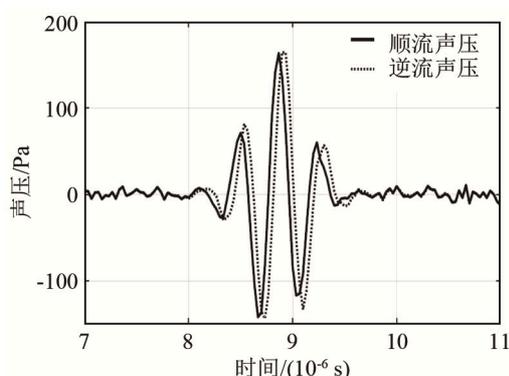


图 8 加噪声后的超声波沿顺、逆流方向传播的声压波形图
Fig.8 Sound pressure waveforms of ultrasonic wave propagation in the downstream and countercurrent directions after adding noise

对含噪波形进行插值, 噪声对不同插值倍数下的时延点数的影响如表 4~表 6 所示。

表 4 表明流速真值为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及未插值时的噪声幅值、时延、流速测量值及流速相对误差之间的关系。由于未插值时采样间隔为 $0.0333 \mu\text{s}$ 即时间分辨率为 $3.33 \times 10^{-8} \text{ s}$, 顺、逆流波形延迟点数为 1 时相关函数值最大, 即延迟时间为 $3.33 \times 10^{-8} \text{ s}$ 后计算流速测量值。由表 4 中可知, 在噪声幅值分别为 0、1、5、10 Pa 延迟点数均为 1, 流速相对误差均

表 4 流速为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时未插值的噪声幅值、时延、流速测量值及相对误差

Table 4 List of noise amplitude, time delay, measured flow velocity and its relative error when the true flow velocity is $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and without interpolation

噪声声压 /Pa	延迟点数	时延/(10^{-8} s)	流速测量值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流速相对误差/%
0	1	3.33	7.238	27.62
1	1	3.33	7.238	27.62
5	1	3.33	7.238	27.62
10	1	3.33	7.238	27.62

表 5 流速为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 10 倍插值的噪声幅值、时延、流速测量值及相对误差Table 5 List of noise amplitude, time delay, measured flow velocity and its relative error when the true flow velocity is $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and with 10 times interpolation

噪声声压/ Pa	延迟 点数	时延/ (10^{-8} s)	流速测量值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流速相对 误差/%
0	15.0	4.995	10.955 5	9.555
1	15.0	4.995	10.955 5	9.555
5	15.0	4.995	10.955 5	9.555
10	11.5	3.829 5	8.399 3	16.007

表 6 流速为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 100 倍插值时的噪声幅值、时延、流速测量值及相对误差Table 6 List of noise amplitude, time delay, measured flow velocity and its relative error when the true flow velocity is $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and with 100 times interpolation

噪声幅值/ Pa	延迟 点数	时延/ (10^{-8} s)	流速测量值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流速相对误差/ %
0	139.0	4.628 70	10.152 2	1.522
1	139.0	4.628 70	10.152 2	1.522
5	139.2	4.635 36	10.166 8	1.668
10	102.2	3.403 26	7.464 5	25.355

为 27.62%，未受噪声影响。

表 5 表明流速真值为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及 10 倍插值时的噪声幅值、时延、流速测量值及相对误差之间的关系。插值后时间间隔为 $0.003\ 33 \mu\text{s}$ ，即时间分辨率为 $3.33 \times 10^{-9} \text{ s}$ 。添加幅值为 0、1、5 Pa 的白噪声后平均延迟点数为 15，流速相对误差为 9.555%，添加幅值为 10 Pa 白噪声后平均延迟点数变为 11.5，流速相对误差为 16.007%，说明幅值为 10 Pa 的白噪声对测量时延产生影响。

表 6 表明流速真值为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及 100 倍插值时的噪声幅值、时延、流速测量值及流速相对误差之间的关系。插值后时间间隔为 $0.000\ 333 \mu\text{s}$ ，即时间分辨率为 $3.33 \times 10^{-10} \text{ s}$ 。添加幅值为 0、1 Pa 的白噪声后平均延迟点数为 139，流速相对误差为 1.522%，添加幅值为 5 Pa 白噪声后平均延迟点数变为 139.2，流速相对误差为 1.668%，说明幅值 5 Pa 白噪声对测量时间延时产生微弱影响。添加幅值为 10 Pa 白噪声后平均延迟点数变为 102.2，流速相对误差为 25.355%，说明幅值为 10 Pa 的白噪声对测量时延产生较大影响。

为了排除单次实验带来的偏差，表中时延点数均为 10 次实验的平均值。通过表 4、表 5 和表 6 中的对比可以得出，利用相关数法计算时延对噪声具有一定的抑制能力。但是随着噪声幅值的增加，插值的倍数越高，噪声对测量结果的影响越大，测量结果对噪声越敏感，噪声对时延产生影响后，噪声幅值越高会造成测量结果产生偏差越大。

以上实验结果表明，相关法处理数据，可以对一定幅值的高斯白噪声产生抑制效果，提高测量准确性。在工程实践中，已经存在多种较为成熟的抑制白噪声的方法，这些方法要比单一使用本文的相关法效果要好很多，在实际测量中可以先使用多次平均等手段降低白噪声对波形的影响，再使用本文的方法进行测量效果会更好，由于本文主要研究相关函数法在细管道中流速测量的优势，对噪声的抑制是其优势之一，故用其他联合降噪方法此处不再讨论。

4 结 论

本文在前人对管道流速研究的基础上，针对细管道中流速的超声测量中的诸多难点如：超声波在管道中传播路径短，时间间隔短，对数据分析精度要求较高，易受噪声影响等，提出了一种可行的测量方法。本文所做的主要工作是利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件建立管道流仿真模型和声学模型等，采用相关函数法对仿真得到的数据进行分析 and 计算，其相对于其他数据处理方法精度较高。为测试相关法的抗干扰能力，加入不同均值的高斯白噪声。实验表明，相关函数法具有一定抗干扰能力，可以在一定程度上降低噪声干扰带来的流量计算误差。实验和数据处理结果表明，对细管道中流速的测量时使用插值后的相关法具有稳定性并能改善测量精度。值得注意的是，实际测量中，采集卡的时间基准电路自身也存在误差，采用插值方法提高精度无法超越此时基电路误差，所以可用的插值倍数是有限的，不能随意插值获取高精度。本文方法用于改善超声波延时估计精度，为细管道中流速的测量提供一种技术参考。但是作为流速测量系统，还有许多其他的误差来源有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] CHHANTYAL K, JONDAHL M H, VIUMDAL H, et al. Up-stream ultrasonic level based soft sensing of volumetric flow of non-Newtonian fluids in open venturi channels[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(12): 5002-5013.
- [2] JIANG Y D, WANG B L, LI X, et al. A model-based hybrid ultrasonic gas flowmeter[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11): 4443-4452.
- [3] LIU B, XU K J, MU L B, et al. Echo energy integral based signal processing method for ultrasonic gas flow meter[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 277: 181-189.
- [4] 仲崇庆. 小管径、低流速液压系统的超声波流量/压力测量研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
ZHONG Chongqing. Study on the integrated measurement of flow and pressure in the hydraulic system of small diameter and

- low flow velocity based on ultrasonic wave[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [5] 张涛, 蒲诚, 赵宇洋. 传播时间法超声流量计信号处理技术进展述评[J]. 化工自动化及仪表, 2009, **36**(4): 1-7.
ZHANG Tao, PU Cheng, ZHAO Yuyang. Review of the signal processing techniques in transit-time ultrasonic flowmeters[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2009, **36**(4): 1-7.
- [6] RAJITA G, MANDAL N. Review on transit time ultrasonic flowmeter[C]//2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC). Kolkata, India. IEEE, 2016: 88-92.
- [7] 张易农, 张克, 宋振华, 等. 相关函数算法在超声导波计量管道内液体流速中的应用[J]. 声学技术, 2017, **36**(4): 353-356.
ZHANG Yinong, ZHANG Ke, SONG Zhenhua, et al. Application of correlation function method to ultrasonic guided wave measurement of liquid flow rate in cylindrical pipeline[J]. Technical Acoustics, 2017, **36**(4): 353-356.
- [8] 苗锦, 刘志强, 张跟鹏. 基于互相关的时延估计方法及其精度分析[J]. 舰船电子工程, 2008, **28**(6): 98-100.
MIAO Jin, LIU Zhiqiang, ZHANG Genpeng. Cross correlation method and precision analysis of time-delay estimation[J]. Ship Electronic Engineering, 2008, **28**(6): 98-100.
- [9] ZHANG H, GUO C W, LIN J. Effects of velocity profiles on measuring accuracy of transit-time ultrasonic flowmeter[J]. Applied Sciences, 2019, **9**(8): 1648.
- [10] 金松日. 一种小管径超声波流量计的设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
JIN Songri. A design of ultrasonic flowmeter for small diameter[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [11] 巢旭, 华云松, 吴莹. 基于相关峰值插值法的超声应力测量[J]. 仪表技术与传感器, 2014(2): 96-98.
CHAO Xu, HUA Yunsong, WU Ying. Research on ultrasonic stress measurement based on correlation peak interpolation[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(2): 96-98.
- [12] 杨亦春, 马驰州, 李晓东, 等. 相关峰细化的精确时延估计快速算法研究[J]. 声学学报, 2003, **28**(2): 159-166.
YANG Yichun, MA Chizhou, LI Xiaodong, et al. Algorithm study of fast and accurate time-delay estimation with fine interpolation of correlation peak[J]. Acta Acustica, 2003, **28**(2): 159-166.
- [13] 张学森, 冯海泓, 黄敏燕, 等. 两步法提高时延差估计精度的分析和实验验证[J]. 声学学报, 2013, **38**(2): 153-159.
ZHANG Xuesen, FENG Haihong, HUANG Minyan, et al. Analysis and experimental verification on improving time-delay difference estimation accuracy with two-step algorithm[J]. Acta Acustica, 2013, **38**(2): 153-159.
- [14] 张岭旭, 朱志军. 数字相关法测时差的工程实现[J]. 航天电子对抗, 2006, **22**(6): 39-43.
ZHANG Lingxu, ZHU Zhijun. Engineering realization of measuring time-delay by digital correlation[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2006, **22**(6): 39-43.