

声时测量精度的主要影响因素分析

周 艳, 王润田, 梁鸿翔

(中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

摘要: 针对声时测量精度提高的瓶颈问题, 从信号处理的角度, 分析了时差法液体超声波流量计中影响声时测量精度的两个主要因素, 推导了理论公式, 并给出了仿真结果。首先从单声道时差式超声波流量计测量模型出发, 介绍了该模型成立的条件, 测量原理和其声时测量中存在的问题, 然后分析了 (1) 在高斯白噪声模型下, 声时测量误差与系统信噪比的关系; (2) 采用过零检测和信号阈值法判定信号到达时刻时, 阈值对声时测量误差的影响, 并分别给出了声时测量误差与信噪比和检测阈值的关系图。

关键词: 声时测量; 信噪比; 阈值

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-02-0210-04

Analysis of main factors affecting accurate transit time measurement

ZHOU Yan, WANG Run-tian, LIANG Hong-xiang

(Shanghai Acoustics Laboratory, Acoustics Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: Two factors affecting accuracy of transit time in ultrasonic liquid flow measurement are analyzed, and the theoretical derivation is made. From the single path model, the principle and the existing problem in transit time measurement are presented. Then, the effect of system SNR on transit time measurement error in white Gaussian noise model and the effect of threshold on transit time measurement error while using zero-crossing and threshold detector are discussed. The simulation result with figures showing the above discussed effects is given.

Key words: transit time measurement; SNR; threshold

1 引 言

超声波流量计是利用传声介质流动对超声波脉冲或超声波束的信号调制作用, 并通过检测信号的变化来获得体积流量的一种计量仪表。在实际超声波流量计的设计中, 声信号传播时间的测量(即声时测量)精度是决定计量精度的关键因素, 声时测量精度与两方面因素有关, 一是用于声时测量的时标精度^[1], 二是接收信号起点检测的准确度¹。

关于时标精度, 现在的时间间隔测量芯片精度已经可以达到 ps 级, 如德国 ACAM 公司的一款芯

片 TDC-GPX 的分辨率能做到 10ps^[2]。而关于接收信号的起点检测, 由于实际中的接收信号往往是经模拟放大、滤波、整形后形成的。因此, 接收脉冲受到系统噪声、系统通带特性、整形电路的特性、声传播介质等一些因素的影响, 接收信号总是比较复杂的叠加波, 在现有的检测方法如过零检测和相关法等处理下, 接收信号起点的检测必然存在误差, 从而制约了声时测量精度的提高。因此从信号处理的角度入手, 分析声时测量的影响因素并研究相应的信号处理方法是很有意义的。本文将对该影响因素进行分析。

2 系统模型

超声波流量计的测量方法有很多种, 其中以时

收稿日期: 2007-09-10; 修回日期: 2007-12-21

作者简介: 周艳(1982-), 女, 山西人, 硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 周艳, E-mail: zhouyan05@hotmail.com

差法和多普勒法最为常见。采用单声道时差法测流量的超声波流量计工作原理如图 1 所示。

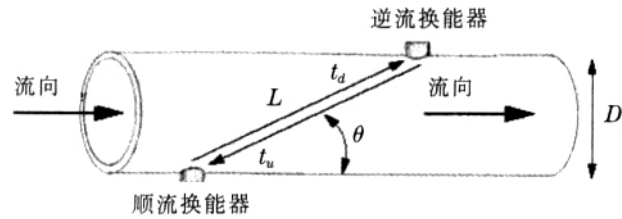


图 1 时差式超声波流量测量原理示意图
Fig.1 Principle diagram of transit time ultrasonic flow measurement

图 1 中 L 为声传播路径的长度, t_d 和 t_u 分别为顺流和逆流传播的时间间隔, D 为管道内径, θ 是声传播方向和轴向流速的夹角。它是利用一对超声波换能器相向交替(或同时)收发超声波,通过观测超声波在介质中顺流和逆流传播的时间差来间接测得流体的流速,再通过流速来计算流量的一种间接测量方法。如果管径较大时,可以增加声道数,但分析方法相同。

超声波流量计的设计一般要求被测流体流场形态保持轴对称,并且不存在垂直于轴线方向的速度分量(即层流模型,层流模型要求雷诺数小于 2100^[3],多数流体都可满足)。几乎所有超声波流量计在这样的理想环境下都可以获得满意的效果^[4]。

图 1 模型中声时测量的原理如图 2。

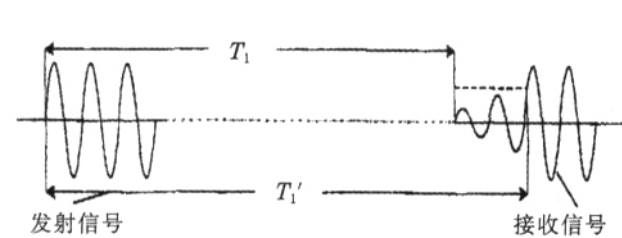


图 2 声时测量示意图
Fig.2 Diagram for transit time measurement

图 2 中 T_1 为精确的声时, T_1' 为实际测得的声时。测量原理是在发射信号时开始计时,当接收信号达到阈值之后停止计时,从而测出信号传播的时间间隔。实际测量中 T_1 与 T_1' 总是存在误差,本文就是分析造成该误差的主要原因。

3 影响因素分析

从图 2 可以看出,若系统采用过零检测法,则接收信号的幅值波动会形成漏检或者误判,从而造成误差。系统中会影响接收信号波形的因素有系统带宽、声道噪声、电噪声以及环境温度对系统电子

元件和换能器影响等,影响接收点判定的因素有判定阈值的高低、系统响应速度等。下面将分别就其中的几个方面进行具体分析。

3.1 信噪比

信噪比(SNR)是衡量系统中噪声干扰的重要指标,是影响接收信号波形的主要因素。系统中噪声的来源有电路噪声和声学噪声。在超声波流量计系统中,经过滤波等处理,可滤去除器件噪声以外的大部分噪声,而器件噪声包括热噪声和散粒噪声^[5],该类噪声是白噪声。由于接收信号有一个频率范围,所以噪声为高斯白噪声。

超声波流量计中信噪比与声时测量误差的关系式推导如下:

发射的正弦信号加上噪声后的信号^[6] $r(t)$ 为:

$$r(t) = \sqrt{S(t)} \sin \omega t + \sqrt{N(t)} \sin \theta \quad (1)$$

式中 $S(t)$ 为信号能量, $N(t)$ 为噪声信号能量, ω 为发射信号的瞬时角频率, θ 为随机角度。

对于大的信噪比,即 $\sqrt{\frac{S(t)}{N(t)}} \gg 1$ ($\text{SNR} > 20\text{dB}$)

$$r(t) = \sqrt{S(t)} \sin \omega t + \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{N(t)}{S(t)}} \sin \theta \quad (2)$$

所以,此时声时测量误差的绝对值 Δt 为

$$\Delta t \approx \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{N(t)}{S(t)}} |\sin \theta| \quad (3)$$

根据式(3),对于一定的发射信号频率,信噪比越大,声时测量误差越小。由于 θ 为随机角度,则将上式多次测量取平均得到图 3。

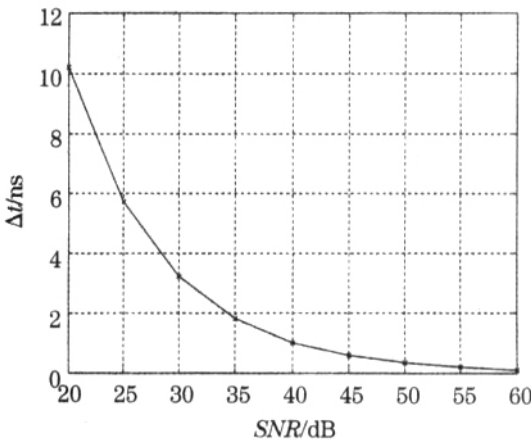


图 3 声时测量误差与信噪比的关系
Fig.3 Error variation of transit time measurement with SNR

图 3 中发射信号频率取为 1MHz。图 3 与理论分析结果一致,若要精度提高,则需要提高系统信噪比。系统中影响信噪比的因素还可能有环境声学噪声^[7],电流冲击噪声^[4]等,可以根据具体问题,通过相

应的信号处理方法除去其影响,从而提高信噪比。

3.2 阈 值

过零检测技术是超声脉冲波形定位的基本方法。在实际的操作过程中,过零检测^[8]一般需要和信号阈值法配合使用,当信号达到阈值之后,才启动过零检测,以免受到噪声影响。采用过零检测法时,由于不稳定的触发会造成测量精度的大幅度下降,所以为保证稳定的触发,比较器阈值应该尽可能的高一些,但该阈值也不能太高,因为接收信号(正弦脉冲)的幅度不是时间的线性函数,在一定的信噪比下,不同阈值对时间零点接收的误差不同,阈值越高,误差将越大。所以阈值的选择会影响声时测量误差,具体分析如下:

加有噪声的接收信号表达式 $r(t)$ 如式(1),由于噪声可能造成实测声时比真值滞后或提前,分析在噪声信号取最大值 U_{max} 的情况下,阈值对声时测量的影响,将式(1)写作如下形式:

$$\begin{aligned} r(t) &= \sqrt{S_{\text{max}}} \sin \omega t \pm U_{\text{max}} \\ &= \sqrt{S_{\text{max}}} \sin \omega(t \pm \Delta t_{\text{max}}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 Δt_{max} 为噪声引起的最大声时测量误差的绝对值, S_{max} 为信号能量的瞬时最大值,所以有下式:

$$U_{\text{max}} = \sqrt{S_{\text{max}}} / 10^{\text{SNR}/20} \quad (5)$$

阈值法检测法则如下:

设检测阈值为 B ($0 \leq B \leq \sqrt{S_{\text{max}}}$), 则

当 $r(t) > B$ 时,比较器输出为 1(接收到信号);

当 $r(t) < B$ 时,比较器输出为 0;

当 $r(t) = B$ 时,比较器输出不确定,此处定义为 1。

这里设检测区间为 $[0, T/4]$, T 为发射信号周期。

由于噪声的影响,实际的检测阈值 B 中包含噪声(设其真值为 B_0),结合式(4)可得:当

$$\sqrt{S_{\text{max}}} \sin \omega(t \pm \Delta t_{\text{max}}) \geq B \quad (6)$$

时,判定为接收到信号,此时测得的声时为 $t \pm \Delta t_{\text{max}}$,声时真值为 t_0 。

(1) 当信噪比一定时,声时测量误差和阈值的关系分析如下:

由式(6)可得:

$$t \pm \Delta t_{\text{max}} \geq \frac{\arcsin(B/\sqrt{S_{\text{max}}})}{\omega} \quad (7)$$

以阈值点处为例分析,设阈值点处声时的真值为 t_0 ,由式(7)得到在阈值点处,噪声引起的最大声时测量误差 Δt_{max} 与阈值 B 的关系如下:

$$t_0 \pm \Delta t_{\text{max}} = \frac{\arcsin(B/\sqrt{S_{\text{max}}})}{\omega} \quad (8)$$

所以

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{max}} &= \left| \frac{\arcsin(B/\sqrt{S_{\text{max}}})}{\omega} - t_0 \right| \\ &= \left| \frac{\arcsin((B_0 \pm U_{\text{max}})/\sqrt{S_{\text{max}}})}{\omega} - t_0 \right| \end{aligned} \quad (9)$$

实验中取发射信号频率为 1MHz, S_{max} 取为 1。根据式(9)可仿真得到图 4。

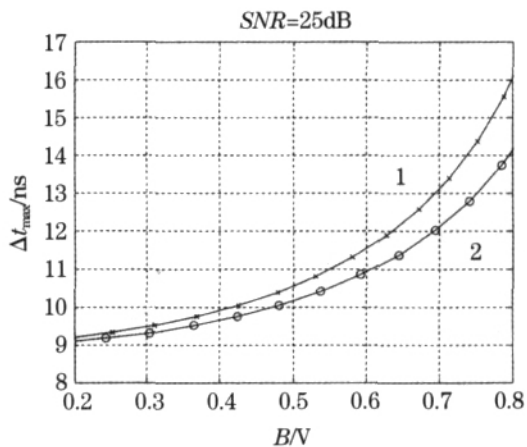


图 4 声时测量误差与阈值的关系

Fig.4 Error variation of transit time measurement with threshold

图 4 中信噪比为 25dB, 曲线 1(2) 为信号幅度减去(加上)噪声幅度的情况。从图 4 中可以看出: 当信噪比为 25dB 时, 声时测量的最小误差将在 10ns 左右。所以, 此时不论阈值如何选择, 系统的精度不会超过该值。该误差随着阈值的提高而增加, 与理论分析结果一致。

对比不同信噪比时, 声时测量误差与阈值的关系得到图 5。

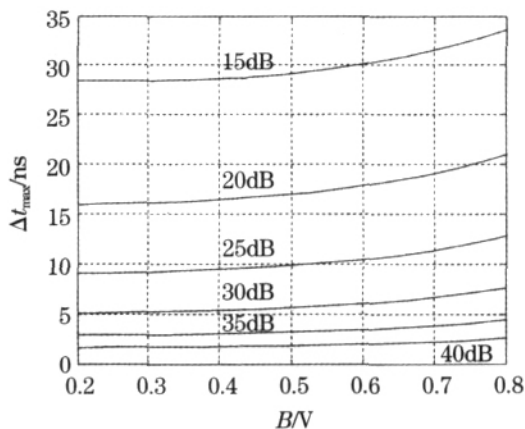


图 5 不同信噪比下, 声时测量误差与阈值的关系

Fig.5 Error variation of transit time measurement with threshold for different SNR

在 3.1 中分析信噪比和声时测量误差的关系时, 有结论为信噪比为 30dB, 系统精度可以达到 3.2ns, 但从图 5 可以看出, 在信噪比为 30dB 时, 在可选的阈值下, 测量精度达不到 3.2ns, 所以阈值对

分析声时测量精度也是很重要的。

(2) 当声时测量精度要求一定时, 信噪比与阈值的关系分析如下:

由式(4)和(5)及前述分析, 得到在阈值点处有如下关系:

$$B = B_0 \pm \sqrt{S_{\max}} / 10^{\text{SNR}/20} \quad (10)$$

若 $S_{\max}$ 为 1, 则信噪比 SNR 和阈值 B 的关系如下:

$$\text{SNR} = -20 \lg |B - B_0| \quad (11)$$

由式(11)仿真得图 6。

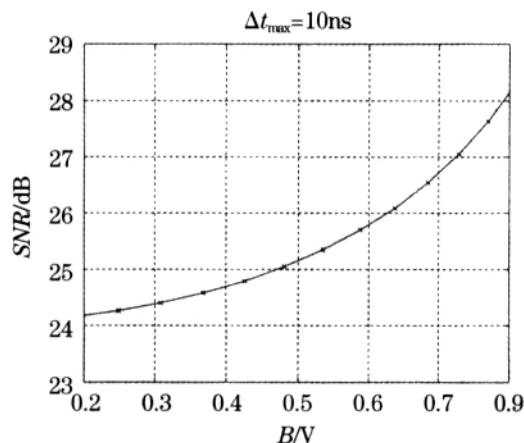


图 6 信噪比与阈值的关系

Fig.6 SNR variation with threshold

从图 6 可看出, 当声时测量精度要求一定时(图 6 中为 10ns), 阈值越高, 对信噪比的要求越高, 与图 5 的分析结果吻合。当实际系统的信噪比做到 20~30dB 时, 可取的阈值范围最大。

对比不同声时测量精度要求时, 信噪比和阈值的关系得到图 7。

如图 7 所示, 声时测量精度要求越高, 则系统对信噪比的要求越高。当要求声时测量的最大误差不超过 1ns 时, 系统信噪比的最低要求为 44dB。

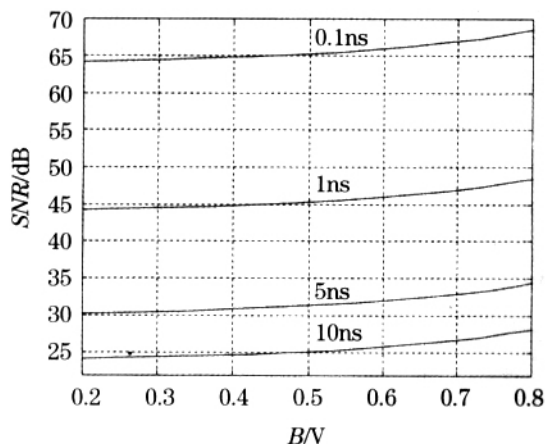


图 7 不同声时测量精度要求下, 信噪比和阈值的关系

Fig.7 SNR variation with threshold for different transit time measurement error

4 结束语

本文分析了影响超声波流量计声时测量精度的两个主要因素: 信噪比和检测阈值, 对每个因素进行了量化分析。影响声时测量的因素还有系统通带特性, 换能器指向性等, 有待继续分析。

本文关于影响因素的分析是对声时测量而言的, 对于声时测量精度要求较高的应用来说, 由于测量数值小且测量总是分时进行的, 所以绝对声时的变化也是影响流量计计量精度的重要因素, 引起绝对声时变化的因素也有很多, 如温度, 在有温度变化或者剧烈变化时, 温度梯度会影响介质中的声速^[8]、换能器的共振频率^[9]、管径伸缩^[10]等, 从而引起绝对声时的变化。影响因素还有压力等, 这些有待进一步分析。

参考文献

- [1] 孙杰, 潘继飞. 高精度声时测量方法综述[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(2): 145-148.
SUN Jie, PAN Jifei. Methods of high precision time-interval measurement[J]. Computer Measurement & Control, 2007, 15(2): 145-148.
- [2] TDC-GPX: Ultra-high Performance 8 channel time to digital converter[Z]. ACAM mess-electronic, 2006.
- [3] 王松岭. 流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
WANG Songling. Hydrodynamics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [4] 鲍敏. 影响气体超声波流量计计量精度的主要因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
BAO Min. Research of main factors in accurate measurements in ultrasonic gas flowmeter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [5] Bonnie Baker. Noise analysis in operational amplifier circuits[Z]. Texas Instruments, 2007.
- [6] N Roosnek. Novel digital signal processing techniques for ultrasonic gas flow measurements[J]. Flow Measurement and Instrumentation (S0955-5986). 2000, 11: 89-99.
- [7] Brassier P, Hosten B, Vulovic F. High-frequency transducers and correlation method to enhance ultrasonic gas flow metering[J]. Flow Measurement and Instrumentation (S0955-5986) 2001, 12: 201-211.
- [8] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
WANG Dezhaoh, SHANG Erchang. Hydroacoustics[M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [9] Takamoto M, Ishikama H, Shimizu K, Monji H, Matsui G. New measurement method for very low liquid Flow Rates Using Ultrasound[J]. Flow Measurement and Instrumentation (S0955-5986), 2001, 12: 267-273.
- [10] V Pavlovic, etc. Ultrasonic Pulse-phase method applied in fluid flow measurement[R]. IEE Proc-Sci. Meas. Technol. 1996, 143(5): 327-333.
- [11] Sanjit K. Mitra 著. 孙洪, 余翔宇译. 数字信号处理实验指导书(MATLAB 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
Sanjit K Mitra, SUN Hong, YU Xiangyu. translator. Digital signal processing laboratory using MATLAB[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.