

超声流量计中噪声处理研究

高 燕, 胡继胜, 钱晓东

安徽职业技术学院机电工程学院, 安徽 合肥

收稿日期: 2021年9月28日; 录用日期: 2021年10月28日; 发布日期: 2021年11月5日

摘 要

本论文利用超声检测流量的原理, 结合改进的算法, 采用基于自适应滤波器的噪声消除技术, 从而将信噪比太低的微弱的有用信号从噪声干扰所淹没的环境中检测出来, 达到提高接收信号信噪比质量的目的, 为更好地测量受环境影响较大的气体和液体。超声波流量计是非接触式的, 不受流体物理性质与化学性质的影响, 在工业检测方面应用广泛, 在天然气工业领域具有广阔的应用前景, 超声流量计应用LMS算法提高了测量的精度和在恶劣环境下信号的检测能力。

关键词

超声波流量计, 检测, 噪声抑制, 自适应滤波器

Study on Noise Treatment in Ultrasonic Flowmeter

Yan Gao, Jisheng Hu, Xiaodong Qian

School of Mechatronic Engineering, Anhui Vocational and Technical College, Hefei Anhui

Received: Sep. 28th, 2021; accepted: Oct. 28th, 2021; published: Nov. 5th, 2021

Abstract

In this paper, the principle of ultrasonic flow detection, combined with the improved algorithm, and the noise elimination technology based on the adaptive filter are used to detect the weak useful signal with too low a signal-to-noise ratio from the environment submerged by noise interference. The purpose of improving the signal-to-noise ratio quality of the received signal is to better measure the gases and liquids greatly affected by the environment. The ultrasonic flowmeter is non-contact and not affected by the physical and chemical properties of the fluid. It is widely used in industrial detection. It has a promising application prospect in the field of the natural gas industry. The application of LMS algorithm in ultrasonic flowmeter improves the measurement ac-

curacy and signal detection ability in harsh environments.

Keywords

Ultrasonic Flowmeter, Detection, Noise Suppression, Adaptive Filter

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在人们日常生活和工业生产过程自动化中, 流量是需要经常测量和控制的参数之一[1]。而随着时代发展, 需要测量的流体媒质种类不断增多, 检测的对象从层流到紊流、从单相流到多相流。人们根据不同测量对象的物理性质, 利用不同的物理原理和规律, 设计制造出各种类型的流量测量仪器, 特别是超声波流量计[2], 因为是非接触式的, 不受流体物理性质与化学性质的影响, 在工业检测及生产或生活中的油、气、水等资源的计量和工艺流程的控制中广泛应用, 实现了工业生产过程的自动检测和控制。同时, 伴随科学技术的发展, 原有的流量测量手段不断得到改进和加强, 使得流量测量无论从测量对象的广泛性、工作条件的多样性, 及测量的范围和测量精度上来说, 都实现了大的跨越, 流量计在过程控制检测仪表中的重要性不断得到加强。

2. 国内外研究概况

早在 40 年前, 超声波流量计就已经研制出现, 1963 年首台工业应用样机由日本的 Tokyo Keiki 公司研制成功, 该公司是后来成立的东京 Tokimec 公司的前身, 1972 年, 纽约的 Controlotron of Hauppauge 公司率先成为第一家生产和销售超声波流量计的美国公司。二十世纪 70 年代后期和 80 年代初期, 美国的 Panametrics of Waltham 公司和法国的 Ultraflux of Poissy Cedex 公司先后开展了超声波流量计测量气体流速的研究, 气体流量计开始出现。我国为了适应西部天然气开发, 满足西气东输工程的要求, 于 2001 年编制了 GB/TR-18604《用气体超声波流量计测量天然气流量》的国家标准。同时为了验证该流量计的性能, 西南油田分公司在华阳天然气流量测试中心, 对其性能进行了系统测试, 为今后我国天然气领域流量计的推广提供宝贵经验。

新的电子技术和信号处理技术日趋发展, 世界能源供应日益紧张, 人们在不断寻求精度高, 适应性强的流量计。超声流量计出现显然有着更多更好的性能特性, 随着技术不断更新, 应用范围不断扩展, 应用越来越广泛。我国目前所使用的超声流量计约占世界使用量的 5%, 目前建设中的新疆南至上海的西气东输工程, 选择了口径为 DN 250~300 mm 的超声流量计, 超声流量计在天然气工业领域中应用前景看好, 不过为了获得更理想的测量, 超声流量计的使用仍有一些实际的问题需要解决和优化。

3. 超声波流量计测量原理[3] [4]

使用超声波, 让其在流动的媒质中传播, 相对于固定坐标系, 超声波速度与在媒质中的传播速度是不同的, 其变化值与媒质流速有关, 因此根据超声波的速度变化可以求出媒质的流速。如图 1 超声波测量流速示意图所示, 在流体媒质中分别设置 T1 和 T2 两个超声波发射器, 在它们相同距离处分别安装两个超声波接收器 R1 和 R2, 这两对发射器和接收器组成两个通道, T1 和 R1 组成顺流通道, T2 和 R2 组

成逆流通道。当流体速度 V 为 0 时，即处于静止状态，两个通道的超声波速度相同，接收器 R1 和 R2 所接收到的信号没有差别；当流体速度 V 不为 0 时，两个通道的超声波速度相应发生变化，设 C 是相对于被测媒质静止中超声波速度，第一个通道是顺流，则超声波速度变为 $C + V$ ；第二个通道是逆流，超声波速度变为 $C - V$ 。两个接收器所接收的信号就产生与被测媒质流速有关的数值了。

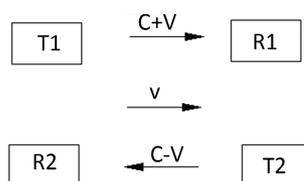


Figure 1. Schematic diagram of ultrasonic measurement flow rate
图 1. 超声波测量流速示意图

通常可采用三种不同方法来确定媒质流速：时间差法，相位差法和频率差法。以时间差法为例，若发射器和接收器距离为 D ，即只要测量超声波顺流和逆流传播的时间差 Δt ，就可以得出流体流速：

$$v = \frac{c^2}{2D} \Delta t \quad (3-1)$$

不论哪种方法，超声波流量计都是由两大部分组成：测量变换器和电子电路。测量变换器包括超声波发射器、超声波接收器，即为超声波换能器；电子电路包括超声波发射接收电路、信号处理电路等。超声波流量计发射超声波信号，接收超声波信号，对信号进行信号处理得到的媒质流速。

超声波流量计在测量时，被测介质的温度或者浓度的变化；信号处理电路的参数不对称，包括机械尺寸、电气特征不对称；流速断面的实际流速分布与理想流速分布不一致；超声波换能器发出和接收超声波在声道中多次反射等产生的误差会影响测量值，利用数字信号处理技术对接收到的信号进行处理，以达到抑制噪声，提高信噪比的目的。下面介绍了噪声消除技术在超声波流量计中应用

4. 噪声消除技术在超声波流量计中应用

4.1. 基于小波变换[5] [6] [7]的噪声消除技术在超声波流量计中应用

超声波流量计大多工作在复杂的噪声环境中，比如工业工程控制、石油天然气的开采和输送、化工制造行业等等，因此，流量测量过程中必然存在一定程度的噪声干扰，传统消除技术提出的基于小波变换的噪声抑制技术，小波变换作为一种新的信号分析和处理技术，具有多分辨率，多尺度的特点，可以用精细的时间分辨率移近观察信号，观察信号的变化，用逐渐精细的频率分辨率移远观察信号的慢变成分，结合超声信号和噪声信号的特点，从原始信号中有效分离噪声信号的分量，从而达到抑制噪声的目的。但它有一定的局限性，对信噪比太低的噪声难以消除。本论文采用基于自适应滤波器的噪声消除技术，不但可以消除有用信号频带以内的噪声，还可以在信噪比太低时，消除噪声。

4.2. 基于自适应滤波器的噪声消除技术在超声波流量计中应用[8] [9] [10]

在一些特殊情况下，比如：测量管径很大或被测媒质含有悬浮颗粒或媒质对超声衰减很大等，造成接收信号的信噪比严重下降，使用传统固定滤波器或小波变换的方法都不能达到理想的滤波效果，这时采用基于自适应滤波器的噪声消除技术可以从被噪声干扰所淹没的环境中检测和提取微弱的有用信号，从而提高信号接收的信噪比质量，本论文以 LMS 算法[1]为例，讨论自适应技术在超声流量测量中的应用。

4.2.1. LMS 自适应滤波器[11]

所谓自适应滤波，就是利用前一刻已获得的滤波器参数等结果，自动调节现有滤波器的参数，以实现最优滤波。

LMS (Least Mean Square, 简称 LMS) [12]自适应滤波器又叫最小均方自适应滤波器，用该方法可自动调节 FIR 滤波器的参数[12]，使线性组合器的输出信号与期望值之间误差的均方值最小，从而达到提高信号接收的信噪比质量。

自适应数字滤波器的基本部件如图 2 所示的自适应线性组合器构成，设其有 $M + 1$ 个输入分别为 $x(K), x(K - 1), \dots, x(K - M)$ ，则输出 $y(K)$ 是这些输入加权后的线性组合，即：

$$y(K) = \sum_{i=0}^M w_i x(K - i) \tag{4-1}$$

图中 $d(K)$ 代表所期望的相应值， $\epsilon(K)$ 是误差信号，误差信号 $\epsilon(K)$ 平方后取数学期望可得均方误差，均方误差是 W 的二次函数，具有唯一最小值。所以通过 LMS 算法可将噪声误差降到最小值。

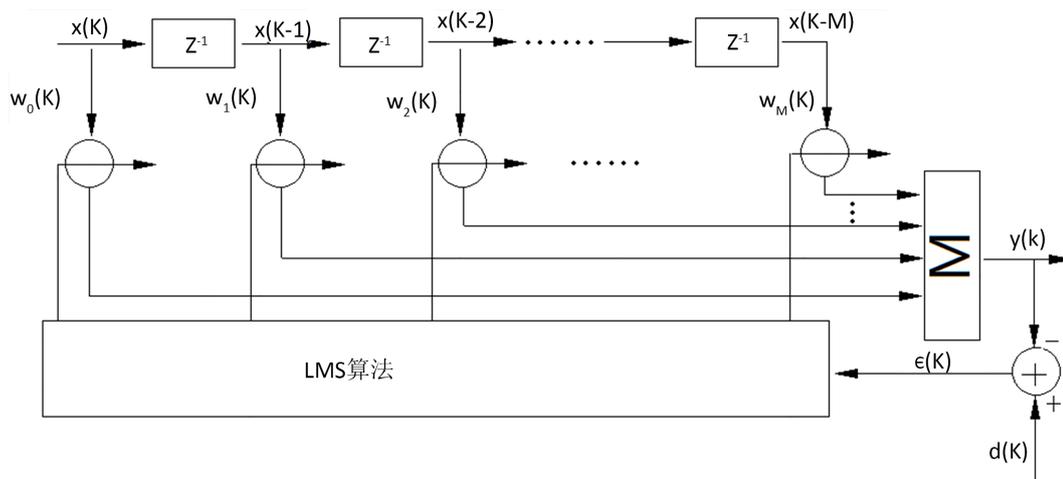


Figure 2. LMS adaptive linear combiner
图 2. LMS 自适应线性组合器

4.2.2. 自适应滤波器抵消模型原理简介

自适应滤波器的重要应用就是作噪声抵消器[13]，如图 3 自适应噪声抵消器所示，它有两个输入：主输入和参考输入。主输入为信号与噪声之和，参考输入为噪声，参考输入与信号里混合噪声相关，与需要的信号无关。

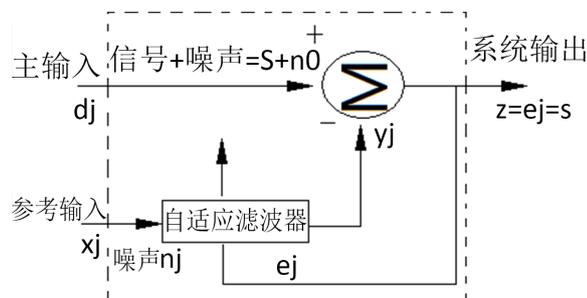


Figure 3. Adaptive noise canceller
图 3. 自适应噪声抵消器

信号从主输入自适应滤波器的 d_j 端输入, 参考输入则加在自适应滤波器的 x_j 端。图 3 的自适应滤波器反馈误差信号 e_j , 并受其控制。调整滤波器的响应, 使噪声 n_i 通过滤波器后产生的输出 y_j 尽量接近于 n_o , e_j 作为 d_j 与 y_j 之差就会接近于信号 S , 因此自适应滤波器可以用来抵消混在主输入有用信号中的噪声, 从而从系统输出有用信号 S 。

在多通道全数字超声波流量计的设计中, 当各通道交替工作时, 可选择一个不工作的空通道作为参考输入, 噪声参考信号 x_j , 通过自适应滤波器输出与 n_o 相匹配的信号 y_j , 从而达到噪声抵消的作用。

5. 自适应噪声抵消仿真结果[14] [15] [16]

在 Matlab 环境下, 采用 LMS 自适应算法, 对超声流量测量中的噪声抵消情况进行仿真。主输入信号里的有用信号 S 采用实测的超声波流量计的回波信号, 采样频率为 120 MHz。噪声信号 n_o 和 n_i 分别利用噪声源信号 $n(K)$ 通过不同方式延迟后形成, 而 $n(K)$ 是利用 Matlab 内部函数产生的噪声信号。 $n(K)$ 与噪声信号 n_o 和 n_i 的关系是:

$$n_o = 0.4n(K) + 0.2n(K-1) + 0.2n(K-2) + 0.2n(K-3)$$

$$n_i = 0.4n(K) + 0.3n(K-1) + 0.2n(K-2) + 0.1n(K-3)$$

仿真的结果如图 4 所示, 它是通过采用 LMS 算法对超声回波信号进行滤波的结果, 可以看出信号有着非常快的收敛速度和有着非常好的除噪能力。

另外, 通过 LMS 算法得滤波后的信噪比的大小, 令输入 $SNR = 10 \lg(S^2/\sigma^2)$, 输出 $SNR = 10 \lg(S^2/\sigma_0^2)$, 这里 S^2 为有用回波信号的均方值, σ^2 为输入噪声信号的方差, σ_0^2 为输出噪声信号的方差。在上面进行仿真中, 输出 SNR 为 7.33 db, 滤波效果较好, 算法简单, 计算时间短。

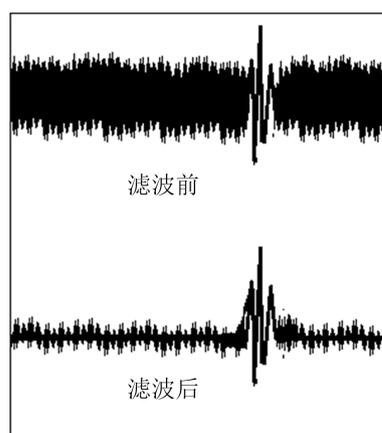


Figure 4. Filtering effect diagram of LMS algorithm

图 4. LMS 算法滤波效果图

仿真结果表明: 将自适应噪声抵消器应用于超声波流量检测, 可以取得良好的效果, 特别是在干扰处于非平稳情况下, 其抗干扰的效果更为明显。

6. 总结

超声流量计测量流量是超声技术在工业测量方面发展较早的应用之一, 因超声的一系列优良特性, 该领域的发展正呈现不断加速的势头。本论文将自适应滤波方法应用到超声流量计的检测中, 可以高效地检测受干扰后的信号, 提高了整个系统检测信号的能力。在应用 LMS 算法中, 还需结合实际硬件系统

的运算能力进一步研究算法实现的可能性和算法优化的方法，以提高测量的精度和在恶劣环境下信号检测能力。

参考文献

- [1] 罗杰·C.贝克. 流量测量手册: 工业设计、工作原理、性能和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- [2] 白宏. 降低噪声对气体超声波流量计影响的措施[J]. 煤气与热力, 2017, 37(9): 29-31.
- [3] 邵欣, 檀盼龙, 高杰, 等. 超声波流量计的测量噪声滤波方法研究[J]. 信息通信, 2016(11): 1-2.
- [4] 李方圆, 江涛. 超声流量计噪声控制技术及应用[J]. 天然气与石油, 2014, 32(3): 60-62.
- [5] 潘良, 张天瑶, 梁铭珊, 等. 基于小波变换的抑制复位噪声技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 231-235.
- [6] 牛宏侠, 张肇鑫, 宁正, 等. 基于小波变换的阈值自适应寻优去噪方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(2): 33-36.
- [7] 陈清江, 石小涵, 柴昱洲. 基于小波变换与卷积神经网络的图像去噪算法[J]. 应用光学, 2020, 41(2): 288-295.
- [8] 廖畅, 山拜·达拉拜. 基于自适应滤波的多模噪声抑制研究[J]. 计算机仿真, 2012(4): 189-191.
- [9] 官慧峰, 曹丽. 自适应滤波在超声气体流量计信号去噪中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 159-162.
- [10] 林善明, 孙海华, 金纪东, 等. 模糊自适应滤波器在电磁超声检测中的研究[J]. 计算机工程与设计, 2011(3): 1123-1125.
- [11] 赵方芳, 朱强, 夏飞. 超声波流量计的自适应时延估计法研究及应用[J]. 仪表技术, 2018(4): 8-12.
- [12] 曹亚丽. 自适应滤波器中 LMS 算法的应用[J]. 仪器仪表学报, 2005(z2): 452-454.
- [13] 甄蜀春, 等. 低信噪比下的一种信号检测方法[J]. 现代雷达, 2001(5): 32-44.
- [14] 蔡武昌, 等. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 163-168.
- [15] 吴小培, 等. 基于小波变换的脑电瞬态信号检测[J]. 数据采集与处理, 2001, 16(1): 86-89.
- [16] 何振亚. 自适应信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 21-119.