

时差法超声流量计瞬时流速动态跟踪算法

朱莹, 王让定, 杜呈透

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 时差法超声流量计由于受到功耗的限制, 在时间差的测量中不能采用很高的采样频率。但在实际流量测量中存在着流体流速会突变的现象, 这样在低流速分辨率情况下就会引起流速测量不能实时跟踪而造成较大计量误差, 也就影响了其相应的计量精度和系统稳定性。因此对时差法超声流量计瞬时流速动态的跟踪问题进行探讨, 设计出瞬时流速动态跟踪算法。经过实验验证, 所设计的动态跟踪算法可以使超声流量计的计量精度提高 0.4% 左右, 重复性提高 0.05% 左右, 而系统功耗几乎没有大的变化。

关键词: 时差法; 超声流量计; 计量精度; 动态跟踪; 瞬时流速

中图分类号: TH814

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 01-0029-04

在节能减排的社会呼声下, 超声流量计作为一种先进的流量测量方式越来越受到广泛的关注, 但是超声流量计的计量精度和系统稳定性及功耗等主要性能指标一直是众多研发人员热切关注的问题^[1-4]。

无论是液体还是气体的流体测量, 其流速的变化都是多样和复杂的, 特别是动态测量时流体的流速是在不断变化的, 并且如果在流体中产生气泡、含有杂质、阀门开关以及受到阻力件等影响, 流速将会有大范围的波动^[5-8]。那么在流量计量的过程中, 就希望尽可能地知道每个时刻的流速, 以达到瞬时流速快速跟踪的效果。目前的流量计基本上都采用单片机控制, 计时单元要进行等间隔的数字采样, 而采样频率与系统的功耗密切相关, 所以采样间隔不能太大。在这种低的流速分辨率情况下就会引起流速测量不能实时跟踪^[9-11], 从而引起了计量误差, 也就造成超声流量计的计量精度和系统稳定性的偏差。

笔者在此对时差法超声流量计流速快速跟踪问题进行探讨, 期望在不增加系统功耗前提下, 进一步提升其计量精度和系统稳定性。

1 时差法超声流量计原理

时差法超声流量计工作原理如图 1 所示^[12-14]。图中, α 为流速方向和超声波传播方向的夹角, 顺流时 α 为锐角, 逆流时 α 为钝角。众所周知, 对于超声波信号在动态介质(流体)与静态介质(流速为零)传播速度和时间而言, 逆流时的传播速度减小, 传播时间增加, 而顺流时的传播速度增加, 而传播时间减小, 这种情况也就造成顺逆流方向超声波信号传播时间存在一个时差值。而时差法超声流量计就是准确地测定了顺逆流时间, 计算出时间差, 再根据介质的流速与时差存在一定的线性关系原理, 从而求得瞬时流速, 进而可以求出瞬时流量以及累积流量。

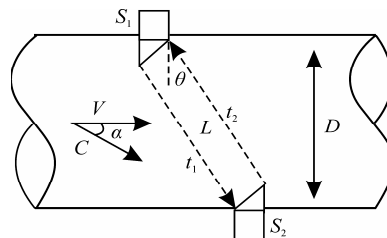


图 1 时差法超声流量计原理

收稿日期: 2013-07-20.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省优先主题重点工业项目(2010C11025); 浙江省教育厅重大科技攻关项目(ZD2009012); 宁波市重大科技攻关项目(2009B10003)。

第一作者: 朱莹(1978-), 女, 吉林长春人, 硕士/讲师, 主要研究方向: 信号与信息处理. E-mail: zhuying@nbu.edu.cn

此外, 图中的 V 表示为液体流速; D 为管道直径; θ 表示为超声波进入液体的入射角; S_1 和 S_2 分别表示 2 个超声波换能器; t_1 表示为顺流时间, 即换能器 S_1 发射、 S_2 接收时超声波在管道中的传播时间; t_2 表示为逆流时间, 即换能器 S_2 发射、 S_1 接收时超声波在管道中的传播时间。

超声流量计中的顺流时间 t_1 和逆流时间 t_2 分别可用下式进行计算:

$$t_1 = \frac{D / \cos \theta}{C + V \sin \theta} + \tau, \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{D / \cos \theta}{C - V \sin \theta} + \tau, \quad (2)$$

式中, C 表示为超声波信号在水中的声速; 而 τ 为信号在换能器及硬件电路中的时间延迟。设 ΔT 为顺逆流时间差, 则:

$$\Delta T = t_2 - t_1 = \frac{D / \cos \theta}{C - V \sin \theta} - \frac{D / \cos \theta}{C + V \sin \theta} = \frac{2DV \tan \theta}{C^2 - V^2 \sin^2 \theta}. \quad (3)$$

由于常见液体中的声速要大于 $1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而液体的流速小于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 即 $C^2 \gg V^2$, 所以(3)式可以简化为:

$$\Delta T \approx \frac{2D \tan \theta}{C^2} V, \quad (4)$$

$$V \approx \frac{C^2}{2D \tan \theta} \Delta T. \quad (5)$$

通过上式可求出瞬时流量如下:

$$Q = f(\Delta T) = \frac{1}{K} S V = \frac{1}{K} \frac{\pi D^2}{4} V \approx \frac{\pi D C^2}{8 K \tan \theta} \Delta T, \quad (6)$$

式中, K 表示为流速分布修正系数; D 表示为管道直径; S 表示为管道截面积。

2 流速动态跟踪算法

由(5)式可见, 时差法超声流量计主要依靠测量上下游的传播时间差来获得流速信息, 理论上的时间差 ΔT 与流速及流量 Q 是一个线性的比例关系, 那么流量 Q 的计量精度最后可归结为时间差 ΔT 的测量准确度。由于时间差 ΔT 能准确反映流速的信息, 因此笔者设计的超声流量计快速跟踪算法主要通过对时间差 ΔT 的快速跟踪来实现。

为了降低系统的功耗, 时间差的采样率一般不会很高; 在低采样率下, 获得的数据与实际流体流速不能很好地吻合, 或者说不能实时反应流体变化情况, 所以需采用自适应采样方法来实现流体状态变化的实时跟踪。文中流体快速跟踪算法的原理如图 2 所示, 基本思想是首先建立预采样, 将采样的数据存储在样本空间, 以后每次采样回来的数据都与样本空间的数据进行比较, 依据当前采样数据与样本空间数据的大小来动态调整采样周期, 实现对流量变化的快速跟踪。达到实时跟踪流量信息的目的, 提高计量的精度。在图 2 算法中, 滤波是关键一步, 滤波器的输出直接影响了缓冲存储器的内容和比较判断的结果, 进而影响采样周期的调整。

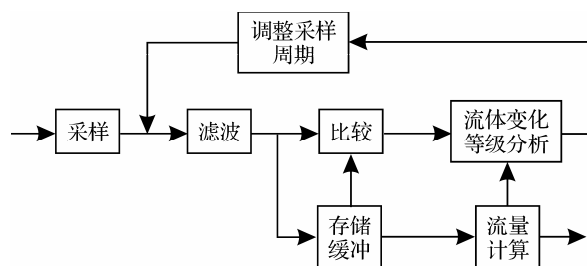


图2 瞬时流速快速跟踪算法原理

笔者在设计和实验的过程中, 验证了几种单片机数据采集系统中常用的滤波算法, 但是最终选择的滤波器是滑动平均滤波算法, 原因是其主要优点在于对周期性干扰有良好的抑制作用, 平滑度高, 当采样速度较慢时可以使系统的实时性得到保证, 但也存在着该算法对偶然出现的脉冲性干扰的抑制作用差, 不易消除由于脉冲干扰引起的采样值偏差的缺点。因此, 在滤波的后面需增加趋势判别和采样周期的调整, 具体算法如下。

第一步, 趋势判别:

假设最近 3 次的实际测量值分别为 X_1 、 X_2 和 X_3 (X_3 是最近的一次测量值), 将这些值存储在存储缓冲器中, 并设趋势值为 X 。

(1) 如果 $|X_3 - X_2| > |X_2 - X_1|$, 并超过阈值, 则 $X = |X_3 - X_2| / 3$;

(2) 如果 $|X_3 - X_2| > |X_2 - X_1|$, 但是没有超过阈值, 则 $X = |X_3 - X_2| / 4$;

(3) 如果 $|X_3 - X_2| < |X_2 - X_1|$, 并超过阈值, 则 $X = |X_3 - X_2| / 5$;

(4) 如果 $|X_3 - X_2| < |X_2 - X_1|$, 但是没有阈值, 则 $X = |X_3 - X_2|/4$.

第二步: 采样周期的调整, 设上一次的采样周期为 T , 以 T 的整数倍为调整点(有增加也有减少):

(1) 当 $0.5T < X < T$ 时, 采样周期不变;

(2) 当 $T < X < 0.5T$ 时, 采样周期增加 1 倍;

(3) 当 $1.5T < X < 2T$ 时, 采样周期提高 2 倍, 以此类推.

3 实验结果及分析

经过实际测量, 图 3 为精度对比实验结果, 图 4 为重复性实验结果对比.

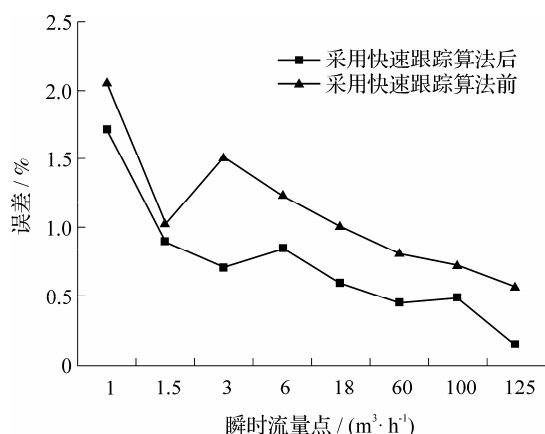


图 3 采用流体快速跟踪算法前后精度对比实验结果

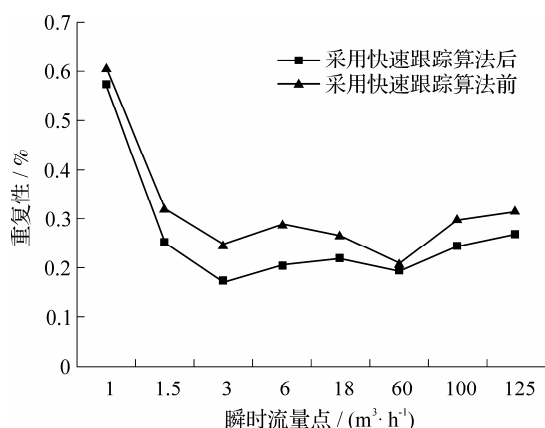


图 4 采用流体快速跟踪算法前后重复性对比实验结果

从以上实验结果可以看出, 采用流体快速跟踪算法后, 超声流量计的计量精度提高 0.4% 左右, 重复性提高 0.05% 左右, 而重复性恰恰是反映系统稳定性一个重要性能指标. 功耗增加的很少, 基本可以忽略. 当流速连续上升或者连续下降时, 这种算法也会减少测量次数; 而当流速稳定时, 经过计

算后的数据会在稳定值附近小范围震荡.

文中算法最大的优势在于当流体流速变化时, 即在上升或下降的过程中可以及时地跟踪上流体流速的变化趋势, 从而减少了连续测量的次数. 在静态时利用“滑动平均滤波算法”确实可以跟踪到流量的微小变化的趋势, 但是对于波动较大的情况就不在胜任了, 这时“瞬时流速快速跟踪算法”将能更好的发挥作用; 特别是在流速发生突变的情况下, 该算法会跟踪流速一定时间内的突变规律以及流体流速变化的趋势. 当然本算法当外界干扰较大时, 测量次数骤升, 但误差会得到保证.

对于功耗的测试而言, 在文献[5]中已经详细的阐述过基于 MSP430F449 单片机的时差法超声流量计系统, 平均电流为 $320.12 \mu\text{A}$, 在此开发系统基础上, 采用了本文的流速快速跟踪算法后, 平均电流为 $340.02 \mu\text{A}$, 可见该算法对系统功耗的影响很微小.

4 总结

总结了几种单片机数据采集系统中常用的滤波算法, 针对超声流量计的瞬时流速快速跟踪的问题, 进行实验研究, 设计出瞬时流速快速跟踪算法, 现场动态测试结果表明, 该算法能取得较好的动态跟踪效果, 提高了超声流量计的计量精度, 也提高了系统的稳定性.

参考文献:

- [1] Izquierdo M A G, Hernandez M G, Graullera O. Ululate LG time-frequency Wiener filtering for structural noise reduction[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1):259-261.
- [2] Sabatini A M. A digital-signal-processing technique for ultrasonic signal modeling and classification[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(1):15-21.
- [3] 姜勇. 时差法超声波流量计设计与研发[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] Moteji R, Fakeuchi S, Sato T. Widebeam ultrasonic flometer[J]. Ultrasonics Symposium, 2000:331-336.
- [5] 宁晨, 顾宇, 周康源. 新型高精度超声波流量计的设计[J]. 声学技术, 2003, 22(4):251-261.
- [6] Liu Qiang, Wang Rangding, Chen Changgen. Design and implementation of low-power time difference ultrasonic flow-meter[C]. The 3rd International Asia Conference on

- Informatics in Control, Automation and Robotics, 2011: 469-475.
- [7] 刘存, 黄建军. 时差法超声流量计的几点改进[J]. 沈阳工业大学学报, 2002, 24(2):113-115.
- [8] 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.
- [9] Yin Junfei, Lloyd P M, Falconer R A. Tidal flow local mean velocities in noisy signals[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12(2):25-28.
- [10] Willatzen M, Kamath H. Nonlinearities in ultrasonic flow measurement[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2008, 19:79-84.
- [11] 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [12] 杨亚, 王让定, 姚灵, 等. 时差法超声波流量计中时间间隔测量及误差分析[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2012, 25(4):35-39.
- [13] Luntta E, Halttunen J. Neural network approach to ultrasonic flow measurements[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1999, 10(2):35-43.
- [14] Bockhoven C J, Henkes A W M. Effect of wall roughness changes on ultrasonic gasflowmeters[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12:219-229.

A Dynamic Tracking Method for Instantaneous Velocity of the Time Difference Ultrasonic Flowmeter

ZHU Ying, WANG Rang-ding, DU Cheng-tou

(Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Due to the limitations of power consumption, the time difference measurement of transit-time ultrasonic flow meter can not be used at a high sampling frequency. But sometimes the fluid flow rate varies suddenly when being measured, causing the velocity measurement not to be real-time tracking in the case of low velocity resolution, thus greatly affecting the measurement accuracy and system stability of the ultrasonic flow meter. In this paper, the velocity tracking problem of the transit-time ultrasonic flow meter is investigated, and the instantaneous velocity dynamic tracking algorithm is developed. The experiments show that the dynamic tracking algorithm can raise the precision of the time difference ultrasonic flow meter by about 0.4%, and the repeatability by about 0.05%, with the system power consumption being virtually unchanged.

Key words: time difference method; ultrasonic flow-meter; measurement precision; instantaneous velocity; dynamic tracking

(责任编辑 章践立)