

一种适于时差法超声流量计的自适应采样方法

罗 永¹, 王让定¹, 姚 灵²

(1 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2 宁波水表股份有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘 要: 针对超声流量计高精度、低功耗的要求, 提出一种自适应采样方法, 克服了周期性采样的不足. 该方法以相邻二次采样的时差变化率作为动态控制采样周期的主要指标, 可根据流体流动情况自动调整采样周期. 通过对自适应和周期性采样算法的实验数据进行比较分析, 自适应采样方法不仅能在流体波动环境中显著提高计量精度, 而且还可以在流体处于稳定时降低系统功耗.

关键词: 自适应采样; 周期采样; 超声流量计; 快速跟踪

中图分类号: TH 814.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)09-0121-04

A Self-adaptive Sampling Method for Time Difference Method Ultrasonic Flow-meter

LUO Yong¹, WANG Rang-ding¹, YAO Ling²

(1 School of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2 Ningbo Water Meter CO., LTD, Ningbo 315000, China)

Abstract: For the requirements of high precision and low power in Ultrasonic Flow-meter, an self-adaptive sampling method is proposed in order to overcome the deficiency of periodic sampling. The sampling rate of change in the adjacent time difference is considered as the parameter to control sampling period, which can be adjusted automatically based on the fluid flow. Through the comparative analysis of experimental data between self-adaptive sampling and periodic sampling, adaptive sampling method can not only significantly improve the measurement accuracy in a fluid fluctuation environment, but also can reduce system power consumption while the fluid is stable.

Key words: self-adaptive sampling; periodic sampling; ultrasonic flow-meter; fast-track

1 引言

时差法超声流量计通过测量超声波在顺流与逆流传播的时间差来获取流体的流动速度信息^[1]. 测量时间差的精度影响着流量计的计量精度和性能. 由于超声流量计常工作于监视野外污水、石油管道和天然气等恶劣环境中, 管内流体易波动^[2]. 超声流量计对外界振动、流体的流动状态特别敏感, 精度普遍不高. 国内外许多学者都尝试从数字信号处理的角度来解决: 如基于 Laguerre 滤波的降噪方法、Newton 插值法等^[3-4].

本文通过对流量计的原理及传统采样方法的分析, 提出一种基于时差变化率的自适应调整采样周期的方法, 该方法可实现对流体变化的快速跟踪, 可有效提高超声流量计的计量精度.

2 时差法超声波流量计工作原理

时差法超声流量计测量原理如图 1 所示. 超声波信号在动态介质中, 顺流时信号传播速度增加, 传播时间减小, 逆流时信号传播速度减小, 传播时间增加, 从而顺逆流方向声波信号传播时间存在差值, 即时差. 时差法流量计就是根据介质的流速与时差存

收稿日期: 2012-02-15; **修回日期:** 2012-03-16

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); 浙江省新苗人才计划(2011R405056)

在线性关系原理进行测量的,只要准确测定顺逆流时间,根据流速与其线性关系,可以求出瞬时流速,进而可以求出瞬时流量^[5].

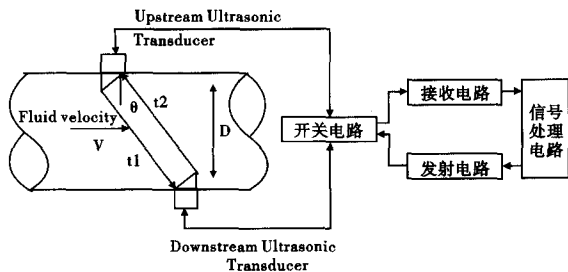


图1 时差法超声流量计原理图

图1中 t_1 为上游换能器(Upstream Ultrasonic Transducer)发射、下游换能器(Downstream Ultrasonic Transducer)接收时,超声波在管道中的传播时间,即顺流时间; t_2 为下游换能器发射、上游换能器接收时,超声波在管道中传播时间,即逆流时间; V 为液体流速; D 为管道直径; θ 为超声波进入液体的入射角.上下游超声换能器交替发射和接收超声波,得到顺逆流传播的时间差设为 ΔT ,则:

$$\begin{aligned}\Delta T &= t_2 - t_1 = \frac{D/\cos\theta}{C - V\sin\theta} - \frac{D/\cos\theta}{C + V\sin\theta} \\ &= \frac{2DV\tan\theta}{C^2 - V^2\sin^2\theta}\end{aligned}\quad (1)$$

其中 C 为超声波信号在水中的声速.因常见液体中声速大于 1000 m/s ,而液体流速小于 10 m/s ^[6],即 $C^2 \gg V^2$,式(1)可以简化为:

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

可得:

$$V \approx \frac{C^2}{2D\tan\theta} \cdot \Delta T \approx P \cdot \Delta T \quad (3)$$

其中 $P = \frac{C^2}{2D\tan\theta}$ 为常数,由式(3)可知流体的流动速率 V 与采样获得的时间差 ΔT 成线性比例的关系,采样获取时间差数据的变化反映的是流速的变化,要提高流量计的计量性能,则需提高流量计对时间差数据的采样性能.

3 传统采样方式及其局限性

传统采样方式为每 T 秒进行一次测量,如图2所示.在一个动态响应周期内的工作时序如图3所示.

其中 t_1 为采样阶段、 t_2 为数据处理及计算阶段、 t_3 为系统休眠阶段.从功耗角度分析,在休眠阶段 t_3 消耗的功耗极低,而采样阶段 t_1 消耗的功耗

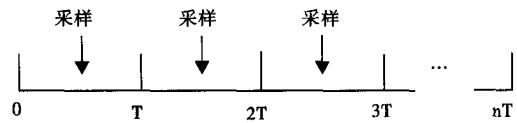


图2 传统采样方式

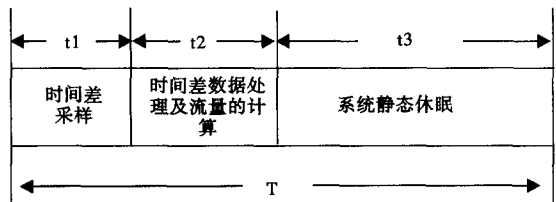


图3 一个采样周期内的工作时序

是最大的, t_2 阶段消耗的功耗介于两者之间^[6].一般情况下,在一个动态响应周期内,某一系统的 t_1 和 t_2 的值是个定值,系统的休眠时间依采样周期 T 的变化而变化.由于流量计工作环境的特殊性——测量管内流体易波动^[2],采用固定采样周期存在如下弊端:如果采样周期 T 取太小,虽然可以提升系统的测量精度,但会加重系统功耗;如果 T 取太大,会影响测量精度.可见, T 的取值在传统等间隔的采样方式中是一个极难把握的量.处理不当会严重影响系统性能.

4 自适应采样算法

4.1 自适应采样算法的描述

针对传统采样方式的不足,本文采用自适应采样的方法来动态调整时差法超声流量计采样周期,其原理框图如图4所示.基本思想是:首先进行预采样,采样数据滤波后将其存储于预先建立好的缓冲队列 Q 中,以后每次采样回来的数据都与缓冲队列的数据进行比较分析等处理,之后依时差变化率的大小来动态调整采样周期,从而实现对采样时差数据变化的快速跟踪,即对流速的快速跟踪.

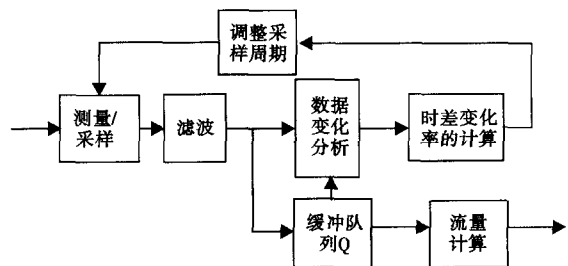


图4 自适应流体状态采样原理框图

设 $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n$ 为 n 个采样样本, $\Delta T_k, \Delta T_{k-1}$ 为最近采集的两个相邻时间差样本. 其中 ΔT_k 为本次测得的时间差, ΔT_{k-1} 为上次测得的时间

差. 设 T_{start} 为系统初始时间间隔, T_{next} 为本次测量到下次测量的时间间隔, T_{current} 为上次测量到本次测量的时间间隔, 上次测量到本次测量的时差变化绝对值为 DT , $DT = |\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|$, 则上次测量到本次测量的时差变化率

$$\Phi_k = \frac{DT}{T_{\text{current}}} = \frac{|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|}{T_{\text{current}}} \quad (4)$$

设定阈值 DT_{max} 表示相邻两次测得的时间差数据的最大变化值, 当流体采样时间差数据每变化 DT_{max} 时, 流量计应能跟踪采样, 若以 Φ_k 作为本次到下次测量时差变化率 Φ_{k+1} 的预测值, 应满足 $\Phi_k \times T_{\text{next}} \leq DT_{\text{max}}$, 即:

$$\frac{|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|}{T_{\text{current}}} \times T_{\text{next}} \leq DT_{\text{max}} \quad (5)$$

$$\text{可得: } T_{\text{next}} \leq \frac{T_{\text{current}}}{|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|} \times DT_{\text{max}} \quad (6)$$

取上式可实现流速跟踪的最大采样周期, 即:

$$T_{\text{next}} = \frac{T_{\text{current}}}{|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|} \times DT_{\text{max}} \quad (7)$$

对于样本 $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n$, 其均值 $\overline{\Delta T}$ 为:

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (8)$$

最小平均绝对误差(MAD)为:

$$\text{MAD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta T_i - \overline{\Delta T}| \quad (9)$$

MAD 同样反映的是测量时差的变化, 与 DT 为同一数量级. 实际测试中发现取动态阈值 MAD 来代替 DT_{max} 具有更好的效果, 式(7)可转化为:

$$T_{\text{next}} = \frac{T_{\text{current}}}{|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|} \times DT_{\text{max}} \quad (10)$$

当相邻两次采样时差的变化 $|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|$ 非常小时, 时差变化率 $\frac{|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|}{T_{\text{current}}}$ 也非常小, 导致

下一次测量周期 $T_{\text{next}} = \frac{\text{MAD}}{|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|} \times T_{\text{current}}$ 可能

趋于无穷大. 相反, 当流体波动很大, 相邻两次采样时差的变化 $|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|$ 非常大时, 时差变化率 $\frac{|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|}{T_{\text{current}}}$ 也非常大, 导致下一次测量周期 T_{next}

$= \frac{\text{MAD}}{|\Delta T_k - \Delta T_{k-1}|} \times T_{\text{current}}$ 非常小, 这将使流量计的采样频率急剧增加, 极大加重了系统功耗. 针对该问题, 假定一个对时差采样的最大采样周期 T_{max} 和最小采样周期 T_{min} . 当计算出来的采样周期 $T_{\text{next}} > T_{\text{max}}$ 或 $T_{\text{next}} < T_{\text{min}}$ 时都视为不可接受, 并将采样周期 $T_{\text{next}} > T_{\text{max}}$ 时的 T_{next} 置为 T_{max} , $T_{\text{next}} < T_{\text{min}}$ 时的

T_{next} 置为 T_{min} , 并作为下一次采样周期.

4.2 算法的具体实现

自适应采样的实现流程图如图5所示. 其具体步骤如下:

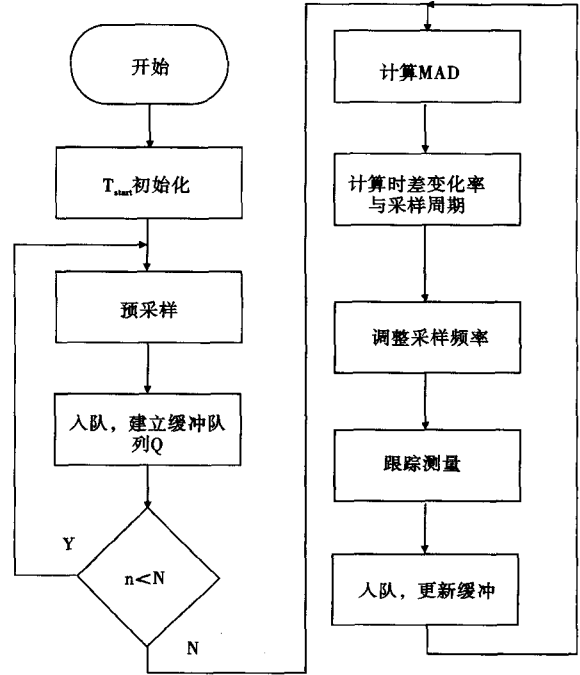


图5 算法实现流程图

Step1: 依流量计准确度等级初始化 T_{start} , 并作为初始采样周期, 后期的采样周期由式(10)计算所得.

Step2: 以 T_{start} 为采样周期预采样 n 次, 获取 n 个时间差样本 $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n$, 并填充缓冲队列 Q . n 在精度要求与 CPU 计算量之间取一个理想值.

Step3: 对样本数据 $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n$ 由公式(9)计算出 MAD 的值.

Step4: 依 $\Delta T_k, \Delta T_{k-1}, T_{\text{current}}$ 的值由公式(4)计算出采样时差变化率, 并结合 MAD 的值由式(10)求得下一次采样周期 T_{next} .

Step5: 对 T_{next} 进行判断, 若 $T_{\text{next}} > T_{\text{max}}$, 则 $T_{\text{next}} = T_{\text{max}}$, 若 $T_{\text{next}} < T_{\text{min}}$, 则 $T_{\text{next}} = T_{\text{min}}$.

Step6: 以 T_{next} 为新的采样周期进行采样, 将得到的数据压入缓冲队列 Q , 每次压入的数据将自动覆盖最旧的样本数据.

Step7: 转向 Step3 进行下一轮的延时采样.

可见, 自适应采样算法在实现过程中不涉及复杂的运算, 具有计算复杂度低和速度快的特点.

5 实验结果分析

以 DN100 时差法超声流量计为测试平台,选取常用流量点 $Q_3 = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ 为测试点,在某流量计仪表公司的水流量标定车间进行试验. 固定周期采样参数:采样周期 1 秒. 自适应采样参数:初始采样周期 $T_s = 1$ 秒、最大采样周期 $T_{\max} = 2$ 秒、最小采样周期 $T_{\min} = 0.2$ 秒、存储缓冲队列 Q 长度 $n = 64$. 在流体稳定与突变状态下,分别对两种方法比较分析结果如下:

(1) 流体稳定状态下,两种算法性能比较如图 6 所示. 这里取控制水流稳定状态下,30 秒内的数据进行分析. 在这段时间内,周期采样由于每隔 1 秒采样一次所以共进行了 30 次采样,而自适应采样由于水流稳定自动降低了采样频率共进行了 12 次采样,减少了 18 次采样,但从图 6 上可以看到自适应采样与周期性采样获得的时间差特性非常吻合,两曲线最大距离也只有 3 微秒,可见在水流稳定状态下自适应采样能获得与周期性采样相似的测量精度,但 MCU 工作量更小,仪表功耗更低.

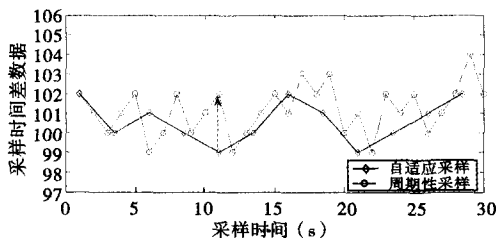


图 6 流体稳定下两种算法结果对比

(2) 流体突变状态下,两种算法性能比较如图 7 所示. 这里通过控制水阀,使水流处于波动状态,对 10 秒内测得的数据进行分析,周期采样每隔一秒测一次共进行了 10 次,而自适应算法由于水流不稳定自动提高了采样频率共进行了 22 次,比周期性采样多 12 次. 图 7 中自适应采样与周期性采样的时间差特性曲线相差较大,最大达 $7 \mu\text{s}$,这是由于周期性采样不能根据水流情况自动调整采样频率而导致对水流跟踪能力较差的结果. 自适应采样则能很好地跟踪水流的变化,获得比周期性采样算法更好的跟踪性能,有利于超声流量计的精度提升.

6 结束语

基于时间差变化率的自适应采样算法能根据时差变化率自动调整流量计的采样周期. (1) 当流体处于稳定状态时,时差变化率小,流量计只需低频率采

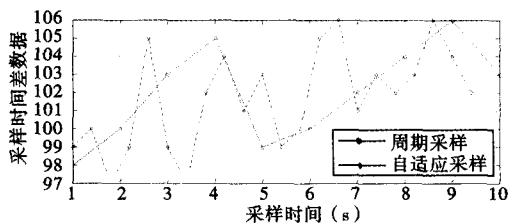


图 7 流体波动下两种算法结果对比

样就能准确计法,自适应算法能够自动降低采样频率,用较低的采样频率获得和周期性采样相同的计量精度;(2) 当流体处于波动状态时,时差变化率大,流量计需用较高的采样频率才能很好地跟踪流体的变化,实现准确计量. 自适应算法能够自动提高采样频率,可更好地跟踪流体的变化,获得比周期性采样更好的计量精度.

总体上,流量计中流体处于稳定状态时间多,自适应算法比周期性算法采样工作量大大减少,系统功耗降低,而且在流体波动时计量性能更佳.

参考文献:

- [1] 段允,王让定,朱莹,等. 一种抑制时差法超声流量计静态漂移的方法[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(8): 205-209.
- [2] 姚灵. 电子水表传感与信号处理技术[M]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
- [3] 刘丽君,鲍敏,沈卫平. 基于 Laguerre 滤波的超声波流量计降噪方法研究[J]. 机电工程, 2009, 26(4): 54-56.
- [4] Liu Q, Wang R D, Zhu Y. et al. An algorithm to eliminate stochastic jump measurement of Ultrasonic Flow-meter with time difference method[C]// Manufacturing Systems and Industry Application, 2010: 414-421.
- [5] 刘存,黄建军. 流量测量方法的几点改进[J]. 沈阳工业大学学报, 2002, 24(2): 113-115.
- [6] Liu Q, Wang R D, Chen C G. Design and implementation of low-power time difference Ultrasonic Flow-meter[C]// proceedings of the 3th International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2011: 469-476.

作者简介:

罗永男, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为数字信号处理.

王让定 男, (1962-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为嵌入式系统开发与应用.

姚灵 男, (1953-), 教授级高工. 研究方向为水计量技术.