

精确的互相关算法在超声波流速测量中的应用*

王萍^{1,2}, 万柏坤¹, 程焯²

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

2. 天津工业大学计算机技术与自动化学院, 天津 300160)

摘要: 互相关算法能够比较准确地计算出声波在流速正反2个方向上的传播时间,进而得出时间差,并根据时间差求出流体的流速。但离散的互相关函数峰值的精度取决于采样间隔的大小,间隔减小精度会相应提高,但在实际的应用中计算量也会大幅度提高。在以单片机为核心的测量仪表中,这种规模的计算通常是不会被采用的,找到一种更简便的计算方法是解决问题的关键。在离散的互相关函数峰值附近,利用抛物线算法可以得出更精确的互相关函数峰值。这种方法允许采样间隔较大,计算时间可大幅度缩短,使同一测量精度的计算时间从3.7s缩短到0.9s左右。

关键词: 互相关函数; 单片机; 超声波时差法; 抛物线算法; 流速测量

中图分类号: TP216

文献标识码: B

文章编号: 1000-9787(2007)09-0107-02

Application of accurate cross-correlation method in ultrasonic flow measurement*

WANG Ping^{1,2}, WAN Bai-kun¹, CHENG Ye²

(1. College of Precision Instrument and Opto-Electrons Engineering Tianjin University, Tianjin 300372, China;

2. College of Computer and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: The propagation time of ultrasonic in positive and negative directions of gas flow can be exactly calculated by using cross-correlation, and the time difference between the two directions can be further computed, and the velocity of gas flow can be also computed. However, because the calculation error of peak of discrete cross-correlation function depends on sample interval, decrease in interval is to increase in precision and certainly it is to increase by a long way in the quantity of calculation. In measuring instruments that are controlled by single chip computer, the method that needs huge calculation is usually not used. The key of the question is to find a relatively simple method. In the vicinity of peak of discrete cross-correlation function, a more accurate peak can be gained by utilizing parabola algorithm. The algorithm permits to have longer sample period and curtails calculating time from 3.7s to 0.9s in the same measurement precision.

Key words: cross-correlation function; single-chip computer; ultrasonic time difference method; parabola algorithm; flow rate measurement

0 引言

超声波时差法测流速的一般方法是利用计数器在流体流动的正反方向上记录从发射声波脉冲到接收声波脉冲的时间差,确定流速大小。它的缺点是在尖峰干扰严重时会产生计数错误^[1]。

利用计算采样信号与标准信号的互相关函数的方法可以将超声波信号从强干扰中准确地识别出来。互相关函数最大峰值所在的位置就是信号的传输的时间,将信号在正反2个方向的传输时间相减即可知道流速大小。由于信号数据是离散的,所以,最大峰值的准确位置与采集间隔

有关,间隔越小,准确性越高。但数据密度也越大,造成了计算量增大,实时性下降,减小计算量的方法之一是使采集间隔增大。为了在间隔较大的条件下获得最大峰值的准确位置,使用抛物线拟合的方法求出了最大峰值的准确位置,从而既减小了计算量,又能获得较高的测量精度。

1 时差法测流速的原理

如图1所示,S为上游超声波收发传感器,X为下游收发传感器,L为两传感器间距离, θ 为L与垂直方向的夹角, t_s 为声波从X→S的传播时间, t_x 为声波从S→X的传播时间,c为声速。

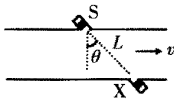


图1 时差法测流速 v 的示意图

Fig 1 Schematic diagram of measuring flow v by using time difference method

由图1可得

$$t_s = \frac{L}{c - v \sin \theta}, t_x = \frac{L}{c + v \sin \theta}$$

$$\frac{1}{t_s} - \frac{1}{t_x} = \frac{c + v \sin \theta}{L} - \frac{c - v \sin \theta}{L} = \frac{2v}{L} \sin \theta$$

$$v = \frac{L}{2 \sin \theta} \left(\frac{1}{t_s} - \frac{1}{t_x} \right), \tag{1}$$

式中 L, theta 为已知,因此,超声波测流速的关键问题是传播时间 t_s 和 t_x 的精确测量。

2 互相关检测的原理

如果存在 2 个连续的随机过程,当它们是实数且为周期函数时,2 个函数的相关函数可定义为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t-\tau) dt. \tag{2}$$

通常在计算时,由 t=0 开始,因此,式(2)可写成

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau) dt. \tag{3}$$

如果 x(t), y(t) 不是同一信号,则称 R_xy(tau) 为互相关函数^[2]。若 x(t), y(t) 是紧密相关的或十分相近的信号,则 R_xy(tau) 将会有个很突出的峰值出现。利用互相关函数检测信号,通常是在信号波形为已知的条件下进行的。将已知信号波形预存在内存中作为 y(t),实际采集的信号作为 x(t),然后将 y(t) 与 x(t) 在固定长度内进行卷积,如图 2 所示。当 tau = tau_0 时, x(t) 与 y(t) 中的信号部分重合, R_xy(tau) 有最大值,此时, x(t) 移动的距离 tau_0 即为声波传播时间,图 3 为 R_xy(tau) 的图形。

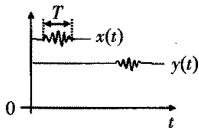


图2 卷积示意图

Fig 2 Schematic diagram of convolution

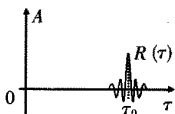


图3 R_xy(tau) 的图形

Fig 3 . Diagram of R_xy(tau)

数据处理的原则:

- a. 采集频率至少要大于 10 倍的信号频率;
- b. 积分区间 T 应包含信号特征的 90% 以上。

万方数据

离散化的互相关函数 R(tau) 的表达式如下

$$R_{xy}(\tau_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x(i\Delta)y(i\Delta - \tau_j), j=1,2,3,\dots,k, \tag{4}$$

式中 N 为积分区间的数据总数;Delta 为数据采集间隔;tau_j 为 tau 的取值序列。通常,tau_j 的取值间隔等于 Delta 的间隔,j 每变化一次,R_xy(tau_j) 就要重新计算一次,因此,R_xy(tau) 的计算量是非常大的。R_xy(tau_j) 在最大值附近的图形如图 4 所示。

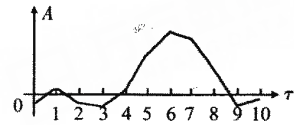


图4 离散的 R_xy(tau) 最大值图形

Fig 4 Diagram of discrete R_xy(tau) maximum

由图 4 可知,tau_n 点为最大值点,但并不很精确,如要更精确,只能增加采集密度,减少 Delta。但这样一来,计算量又太大,因此,采用一种近似于抛物线细分的方法提高检测精度。

3 抛物线顶点的计算方法

如图 5 所示,测量 3 个点,分别为 A_0(x_0, y_0), A_1(x_1, y_1), A_2(x_2, y_2), 若采样间隔为 h, 则有 x_2 = x_0 + h, x_3 = x_0 + 2h, 基于该三点函数坐标值得抛物线方程为

$$f(x) = \frac{y_0 + 2y_1 + y_2}{2h^2} x^2 - \left(\frac{3y_0 + 4y_1 - y_2}{2h} + \frac{y_0 - 2y_1 + y_2}{h^2} \cdot x_0 \right) x + \left(y_0 + \frac{y_0 - 2y_1 + y_2}{2h^2} + \frac{3y_0 - 4y_1 + y_2}{2h} x_0 \right)$$

进而求得抛物线顶点坐标为

$$x_m = x_0 + \frac{(3y_0 - 4y_1 + y_2)h}{2y_0 - 4y_1 + 2y_2}$$

$$y_m = y_0 + \frac{(3y_0 - 4y_1 + y_2)^2}{8(y_0 - 2y_1 + y_2)}$$

实际计算中,只需要知道 x_m (即 tau_m) 即可,因此, y_m 的计算可以省略。这种方法可以获得较高的计算精度,同时,也可以大量节省计算时间。

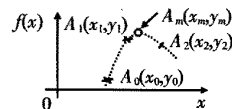


图5 抛物线法求互相关函数最大值示意图

Fig 5 Schematic diagram of determining cross-correlation function maximum by using parabola algorithm

4 测量数据与分析

在流速为 0 ~ 25 m/s 的实测值如表 1 所示。

由表 1 可看出:在流速很低时误差变大,呈现较大的非线性,其原因是由于流场分布的改变所造成,在实际应用中必须设修正系数。

(下转第 112 页)

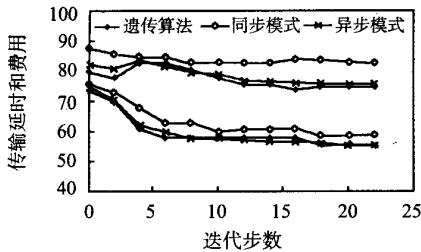


图 4 遗传算法、同步模式 PSO 和异步模式 PSO 逐次迭代时路径的传输延时和费用的变化曲线

Fig 4 Change curves of delay and cost of three algorithms respectively when iterate gradually

GA 的执行时间,如表 1 所示。

表 1 3 种算法的执行时间

Tab 1 Execute time of three algorithms

| 网络规模 | 异步模式 (ms) | 同步模式 (ms) | GA (ms) |
|------|--------------|--------------|------------|
| 30 | 114.600 | 130.330 | 143.273 |
| 60 | 315.298 | 465.900 | 502.750 |
| 90 | 719.617 | 1246.742 | 1562.437 |

从表 1 中可以看出:异步模式 PSO 算法的执行时间少于同步模式 PSO 算法、GA 的执行时间。这是由于异步模式 PSO 算法只在解空间中搜索很小的一部分,并且,PSO 种群中每个粒子行为都是并行的,能及时更新共享信息,因此,其全局搜索能力强于 GA,收敛速度也较同步模式和 GA 的快。

5 结束语

本文给出基于异步模式的 QoS 组播路由算法。实验

证明:该算法在 QoS 5 个约束条件下,其寻优效果明显优于遗传算法和同步模式的 PSO 算法;同时,异步模式算法的收敛速度与遗传算法和同步模式的相比也有显著提高,能够快速有效地找到最优解,为解决 QoS 组播路由问题提供一种新思路。

参考文献:

- [1] 陈国良. 并行计算——结构、算法、编程[M]. 北京:高等教育出版社,2003:233-237.
- [2] Chen B, Wang J P. Efficient routing and wavelength assignment for multicast in WDM networks[J]. IEEE Journal in Communications, 2002, 20(1): 97-109.
- [3] 郑彦兴, 田菁, 窦文华. 基于遗传算法的有矢量约束的多播路由计算[J]. 计算机学报, 2003, 26(6): 746-752.
- [4] Leonard B L, Akio K. A genetic algorithm based routing method using two QoS parameters[J]. IEEE Computer Society, 2002, 8(1): 7-11.
- [5] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization[J]. Natural Computing, 2002, 1(1): 235-306.
- [6] Egelis P K, Nocol V M. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization[J]. Natural Computing, 2002, 12(1): 235-306.
- [7] Waxman B M. Routing of multipoint connections[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1988, 10(6): 1617-1622.

作者简介:

王洪斌(1966-),男,黑龙江人,教授,博士,研究方向为机器人控制技术,计算机控制技术。

(上接第 108 页)

表 1 流速为 0~25 m/s 时的实测值

Tab 1 Measured value at flowing speed of 0~25 m/s

| 标准流速(m/s) | 实测流速(m/s) | 示值误差(%) |
|-----------|-----------|---------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1.06 | 1.03 | -2.80 |
| 5.21 | 5.28 | 1.54 |
| 10.11 | 10.26 | 1.48 |
| 20.07 | 20.20 | 0.65 |
| 25.43 | 25.53 | 0.39 |

上述数据是在采样时间间隔为 0.33 μs 得出的结果。采集数据长度为 450 个,标准信号数据长度为 255 个,卷积长度最大为 194 个点(一般在 64~128 点之间),运算时间为 0.82 s, CPU 主频为 50 MHz。

5 结束语

互相关算法在超声波流速测量中可以较准确地求出声万方数据

波在正逆 2 个流向上的时间差,但其精确度取决于采样间隔的大小,间隔越小计算精度越高,但需要处理的数据量也就越大。由于单片机速度和存储空间的限制,不能处理太多的数据;否则,实时性太差,还要外扩 RAM。适当加大采集间隔,利用三点确定抛物线顶点的方法,可以较快地求出互相关函数的最大值,且精度较高,因此,可以利用普通的 51 系列单片机来完成复杂的运算^[3]。

参考文献:

- [1] 李小京,王萍,卢景山. 将匹配原理用于超声波测气体流速[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(9): 66-68.
- [2] 徐苓安. 相关流量测量技术[M]. 天津:天津大学出版社, 1988:11-61.
- [3] 王萍,李小京,卢景山. 电容式电磁流量转换器的设计[J]. 化工自动化及仪表, 2003, 30(1): 63-65.

作者简介:

王萍(1961-),女,吉林省海龙人,博士研究生,教授,研究方向为自动检测、计算机控制理论及应用。

精确的互相关算法在超声波流速测量中的应用

作者: [王萍](#), [万柏坤](#), [程焯](#), [WANG Ping](#), [WAN Bai-kun](#), [CHENG Ye](#)
 作者单位: [王萍, WANG Ping \(天津大学, 精密仪器与光电子工程学院, 天津, 300072; 天津工业大学, 计算机技术与自动化学院, 天津, 300160\)](#), [万柏坤, WAN Bai-kun \(天津大学, 精密仪器与光电子工程学院, 天津, 300072\)](#), [程焯, CHENG Ye \(天津工业大学, 计算机技术与自动化学院, 天津, 300160\)](#)
 刊名: [传感器与微系统](#) **PKU**
 英文刊名: [TRANSDUCER AND MICROSYSTEM TECHNOLOGIES](#)
 年, 卷(期): 2007, 26(9)
 引用次数: 3次

参考文献(3条)

1. 李小京, [王萍](#), [卢景山](#) [将匹配原理用于超声波测气体流速](#) [期刊论文]-[传感器与微系统](#) 2006(9)
2. [徐苓安](#) [相关流量测量技术](#) 1988
3. [王萍](#), [李小京](#), [卢景山](#) [电容式电磁流量转换器设计](#) [期刊论文]-[化工自动化及仪表](#) 2003(1)

相似文献(5条)

1. 期刊论文 [张维君](#), [李树良](#) [工业炉膛温度声学测量系统](#) -[微计算机应用](#) 2004, 25(3)
 本文基于炉膛温度声学测量原理和测量装置结构, 给出一种工业炉膛温度测量装置的实现方法. 该装置由嵌入式单片机系统完成声波信号的发送和采集, 通过以太网进行单片机和微机间的通信, 利用声学测量技术, 得到精确的声波传播时间, 以此重建炉膛的温度场.
2. 期刊论文 [喻彬](#), [孙士平](#), [Yu Bin](#), [Sun Shiping](#) [基于相关检测的漏点定位系统设计](#) -[国外电子测量技术](#) 2006, 25(10)
 利用管道泄漏时产生频率相对稳定的振动现象的特点, 使用互相关函数峰值跟踪系统的设计原理, 结合单片机系统, 设计使用方便的泄漏点定位测试系统. 该系统首先将振动传感器信号转化为频率信号, 由单片机及其辅助模块对频率信号进行计数、计算并显示结果. 该系统能有效地抑制噪声, 快捷而准确地检测到漏点位置, 且可以自评定测量结果是否准确.
3. 期刊论文 [潘仲明](#), [简盈](#), [王跃科](#), [Pan Zhongming](#), [Jian Ying](#), [Wang Yueke](#) [基于两步相关法的大量程超声波测距技术](#) -[电子测量与仪器学报](#) 2006, 20(5)
 在许多超声波测距算法中, 互相关函数法是一种既适合于低信噪比信号, 又适合于采用低采样速率的最佳算法. 但是, 超声波换能器的作用距离越长, 所需的采样数据量也就越大, 相应的计算时间也将随之急剧增加. 为了解决这一问题, 提出了一种粗、精两步相关法来计算互相关函数, 并由此确定超声波的射程时间, 它显著地减少了超声波测距系统的数据处理时间, 使得可以采用普通单片机来实现大量程超声波测距系统.
4. 学位论文 [郭东亮](#) [光系统杂光测试仪的设计](#) 1998
 杂(散)光是影响光学系统成像质量的重要因素之一. "黑斑法"是目前广泛采用的杂光测试技术. 该文系统分析与讨论了黑斑法测量杂光原理, 在此基础上, 用物和接收器互相关函数分析了黑斑尺寸、接收小孔光阑尺寸以及黑斑照度对杂光测量的影响. 测试仪器正迅速地向着智能化方向发展, 它们不仅可以进行测量, 而且能存储信号和处理数据, 并能接受外部控制指令. 该文对杂光测试装置进行了较大改进: 采用新型测试电路、单片机测试与控制系统, 并进行了接口和软件的设计.
5. 学位论文 [李殿华](#) [声学法测温中的声波飞渡时间测量](#) 2006
 近年来, 基于声层析成像的温度场检测技术逐渐被应用于工业炉炉内温度的测量中, 并得到了快速的发展. 本文对层析成像技术进行了简要介绍, 对国内外声学高温计的研究现状做了概述, 阐述了声学测温的基本原理, 制定了声层析成像温度场检测系统的整体方案, 确定了采用互相关函数分析的方法对声波飞渡时间进行测量. 重点论述了声层析成像温度场检测系统中的关键——声波飞渡时间的测量. 本文分别以白噪声及扫频信号为信号源, 采用计算机仿真软件MATLAB, 对声波在声发射端和接收端之间的飞渡时间的互相关估计进行了计算机仿真研究. 分析比较了信噪比、采样点数、采样频率取不同值时的相关系数曲线, 探讨了上述参数对飞行时间互相关测量精度的影响. 研究表明: 采用白噪声或扫频信号作为信号源, 应用互相关法测量声波飞渡时间具有很好的抗干扰能力, 在采样点数及采样间隔选取适当的时候会得到满意的结果. 本文设计了以白噪声为声源, 单片机控制的声学温度场检测系统下位机, 实现了声波飞渡时间的互相关测量. 对下位机系统进行了实验室测试, 测试了在同一温度下声波飞渡时间与声波传播距离的关系, 结果表明飞渡时间测量值与传播距离呈线性关系; 测试了传播距离一定时声波飞渡时间与室温间的关系, 结果表明声波飞渡时间随着室温的升高而减小, 符合声速与气体介质温度间关系. 下位机初步实验结果表明, 所采取的声源和信号处理方法可实现声波飞渡时间及声波飞行路径上平均温度的测量. 论文还介绍了下位机硬件电路的各部分组成及软件程序流程图.

引证文献(3条)

1. [牛培峰](#), [化克](#), [张现平](#) [基于信息融合技术的锅炉飞灰含碳量测控系统](#) [期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 2009(6)
2. [牛培峰](#), [化克](#), [张现平](#) [多传感器数据融合技术在锅炉热效率计算中应用研究](#) [期刊论文]-[燕山大学学报](#) 2009(1)
3. [李增志](#), [黄峰](#) [三步相关法确定伪随机码超声波测距的相关峰值](#) [期刊论文]-[传感器世界](#) 2009(7)

