

采用互相关与自适应滤波算法测量流速的比较研究

邢文奇, 胡红利, 董军

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对气固两相流固相颗粒流速的测量问题, 讨论了可用于流速测量的互相关法和自适应滤波时延估计法. 对于安装在气力输送管道上的双电极静电传感器输出信号, 利用相关函数进行上下游电极输出信号相似性的比较, 相似性最大即相关函数取极大值时的时间延迟, 结合传感器电极间距离, 计算出固相颗粒流过传感器的平均速度, 也可以采用自适应滤波计算输出信号在上下游静电传感器间的时间延迟, 测得管道中固体颗粒的流速. 实验结果表明, 所测得的电极信号与噪声的统计特性受到了环境的影响, 互相关算法测量速度的准确性大大降低, 而自适应滤波算法由于能根据信号和噪声的相互关系不断地调整自身参数, 满足最小均方算法准则的要求, 可以精确地跟踪固相颗粒速度.

关键词: 气固两相流; 静电传感器; 互相关算法; 自适应滤波算法; 流速测量

中图分类号: TK313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)06-0111-05

Comparative Study of Cross-Correlation and Adaptive Filter for Flow Velocity Measurement

XING Wenqi, HU Hongli, DONG Jun

(State Key Laboratory of Power Equipment and Electrical Insulation, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For velocity measurements of solid-phase particles in gas-solid two-phase flow, the cross-correlation and adaptive filtering time delay estimation for measuring the velocity are discussed. For the signal outputted by the double-electrode electrostatic sensor installed in pneumatic conveying pipe, the correlation function is adopted to compare the similarity of signals outputted from upstream and downstream electrodes, and the time delay is recorded when the similarity gets the greatest or the relevant function takes the maximum. Combining the distance between electrodes of sensors, the average speed of solid-phase passing the sensors is evaluated, and adaptive filter is also used to calculate the time delay of outputting signal between electrostatic sensors upstream and downstream for obtaining the velocity of solid particles in the pipeline. The experimental results show that the statistic characteristics of measured electrode signal and noise are affected by the environments, so the accuracy of measured speed with the cross-correlation method is greatly reduced. However, the adaptive filter can constantly adjust their parameters according to the relationship between signal and noise to satisfy the least mean square algorithm.

Keywords: gas-solid two-phase flow; electrostatic sensor; cross-correlation velocity measurement; adaptive filter; velocity measurement

在电力工业中, 气固两相流参数测量对于节能 减排、提高生产效率具有重要的意义. 由于气固两相

流复杂的流动特性,使得两相流参数测量成为一项急待解决的技术难题.在气固两相流参数中,速度的测量是一个极为重要的方面^[1].

电站气力输粉是一个稀相气固两相流系统.静电传感器利用媒质流动过程中的静电现象来实现气固两相流参数的检测.基于荷电媒质与传感器电极之间静电感应机理的圆环式静电传感器具有非侵入、不磨损、不干扰流场、响应快、易安装、灵敏度高等特点,更适合于电站输粉这样的稀相条件下管道中媒质的速度测量.

在气力输送管道中颗粒与颗粒之间、颗粒与管壁之间相互接触、摩擦、分离,固体颗粒就会发生带电现象.颗粒的带电量取决于很多因素,包括颗粒的物理和化学性质,还有管道中的流动条件.当带电颗粒流过环形静电传感器时,在静电传感器周围产生的准静电场不断地发生波动,使静电传感器上产生的感应电荷也随之波动.感应电信号的波动反映了颗粒流动参数信息^[1-2].

感应电荷信号可以通过屏蔽、绝缘的电极和高性能的信号检测电路检测到,静电感应系统模型如图 1 所示.

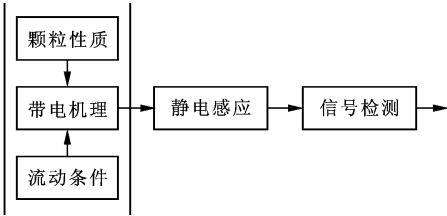


图 1 静电感应系统模型

目前,互相关^[2]及自适应滤波^[3]测速法已被应用于气固两相流速度测量领域.文献[4]在重力输送气固两相流中应用互相关算法测量速度.文献[5]在煤粉气力输送系统中应用互相关算法进行实时速度测量.文献[6]等把自适应滤波法应用于气固两相流体系固体颗粒速度的测量,分别利用仿真信号和方形管道实验平台的实测信号进行了验证,认为自适应滤波算法可以应用于气力输送管道中固体颗粒的速度测量.

本文根据电站气力输粉速度测量的现场条件、传输管道尺寸等因素,设计了非接触式环形电极^[7-8],分别采用了互相关算法和自适应滤波算法在线进行了气固两相流固相速度的测量与分析比较,以期对以后的气固两相流的速度测量有所帮助.

1 互相关算法的流速测量

在与被测流体管道相距 L 处安置两个相同特性的传感器(A 为上游传感器和 B 为下游传感器),如图 2 所示,这两个传感器分别测量被测流体流过相应区域时所产生的随机流动静电信号 $x(t)$ 和 $y(t)$.流动静电信号是流体媒质在流动过程中某种物理特性的随机变化,它的幅值、频谱特性等与所采用的传感器工作原理、结构特性以及被测流体媒质的流动状态等有关.如果两个传感器间距离足够小,流体媒质在上下游静电传感器之间流动时,流动特性的变化较小,则近似认为随机静电信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 基本相同,只是两信号之间有一时间上的滞后 τ_0 ,如图 3 所示.将信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 作互相关运算,得出互相关函数为 R_{xy} ,则互相关函数 R_{xy} 的峰值对应的时间即为时间延迟.

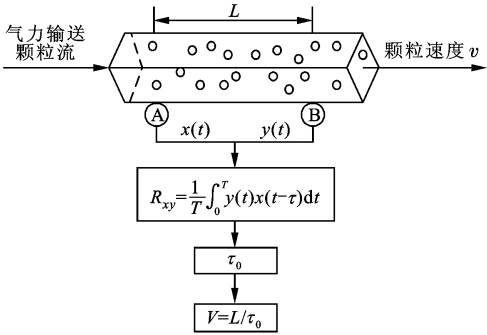


图 2 互相关算法测速原理示意图

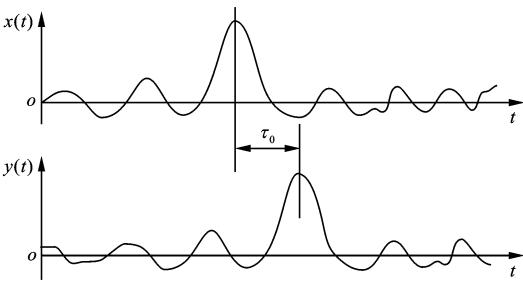


图 3 媒质流动的静电信号

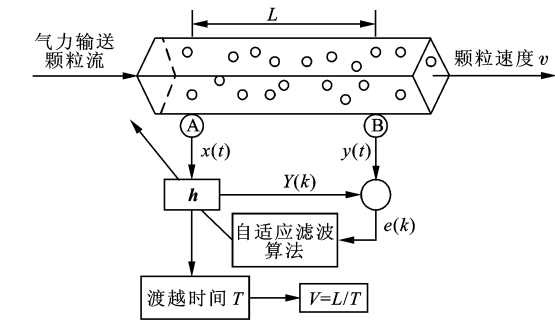
互相关函数 R_{xy} 的峰值位置所对应的时间就是两信号间滞后时间,一般称为时间延迟,由此可算出媒质颗粒的平均速度.

2 自适应滤波算法的流速测量

所谓自适应是指系统根据外部环境的变化而改变和调整其自身,使其更好地发挥作用和性能的过程.

程. 自适应时延估计基于参数模型估计理论,算法相对简单,对各种统计特性的信号和干扰噪声适应性强,能在较强的干扰背景下获得较好的时延估计^[3].

采用静电传感器,基于自适应滤波的气固两相流固体颗粒速度测量原理如图 4 所示. 自适应滤波算法不断计算误差 $e(k)$ 的最小均方和,进而不断调整滤波器参数 h . 信号的时间延迟效应转化为通过一个滤波器的效应,滤波器单位冲击响应的峰值点位置即反映出时延信息.



$x(k)$ 和 $y(k)$ 分别为上下游传感器的输出; h 为 k 个采样点时滤波器的单位冲击响应; $Y(k)$ 为上游信号经过滤波器后的输出; $e(k)$ 为 $y(k)$ 与 $Y(k)$ 间的误差

图 4 自适应滤波算法速度测量原理示意图

本文采用基于维纳滤波器理论的最小均方(LMS)算法^[6]得出时间延迟. LMS 算法的主要优点是算法简单、运算量小、易于实现. 基于 LMS 自适应时延估计算法的基本原理可以归纳为两个步骤: 首先是将时延估计问题转化为有限脉冲响应(FIR)滤波器的参数估计问题; 其次是 FIR 滤波器参数估计的自适应实现. 它包含了基于参量模型时延估计算法的基本思想, 即把时间延迟估计问题转化为一个 FIR 滤波器的参数估计问题.

滤波器参数 $h(k)$ 为 M 维向量

$$h(k) = [h_0(k), h_1(k), \dots, h_{M-1}(k)]^T$$

式中: M 为滤波器模型阶次. 滤波器输出为

$$X(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-M+1)]^T$$

$$Y(k) = h^T(k)X(k)$$

误差信号为

$$e(k) = y(k) - Y(k) = y(k) - X^T(k)h(k)$$

$h(k)$ 更新方程为

$$h(k+1) = h(k) + \mu_e(k)X(k)$$

式中: μ 为收敛系数.

对于一个 M 阶的滤波器, LMS 算法在一个周期内需要完成 $3M$ 次乘法运算和 $2M$ 次加法运算.

3 实验结果与讨论

3.1 实验装置

实验系统采用压送式气力输送装置,如图 5 所示. 实验中,用靠背管(测速管)按等环截面积法获得的平均速度作为标准流速. 实验媒质采用直径约 $0.04 \sim 0.1 \text{ mm}$ 的细沙子,实验中产生固气质量比约为 $0.5 \sim 1.0$ 的稀相气固两相流. 在管道的上下游安装了两个静电传感器,其电极的间距为 50 mm ,两路传感器输出经电荷放大、低通滤波和数据采集后分别用自适应滤波和互相关算法获得测量流速,并与标准流速进行对照. 采样速率选取 10 kHz .

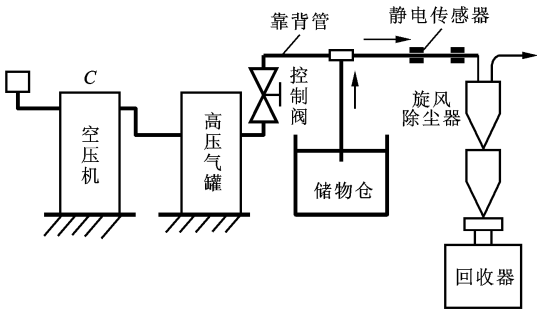


图 5 标准气力输送装置示意图

实验中陶瓷管内径 R_1 为 100 mm , 外径 R_2 为 105 mm ; 用铜皮制作的静电传感器轴向长度 W_e 为 10 mm , 厚度为 0.2 mm ; 用铜皮制作内屏蔽层, 内径为 120 mm , 轴向长度为 50 mm , 厚度为 2 mm , 如图 6 所示. 内屏蔽层外的支撑钢管同时起到了外屏蔽层作用. 在内外屏蔽层之间连接了一个跟随器, 这样在两屏蔽层之间可形成等电位, 这种结构既阻止了微弱检测信号的泄露, 也防止了由辐射、热、摩擦及电磁产生的噪声电荷进入电极系统形成干扰^[9].

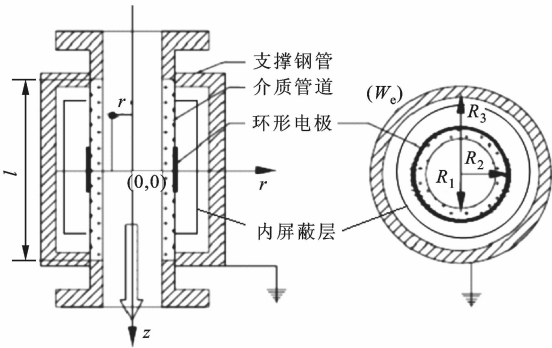


图 6 环形电极截面图

3.2 两种算法实测波形数据

(1) 互相关算法. 在上述实验装置上进行了互相

关速度测量,测得两个静电传感器的电压信号波形,如图7所示.图中给出了1 s内采集的电压信号,两路信号有着极大的相似性,只是在时间上有个延迟.然后,对所测得的两路信号进行互相关运算,得其归一化互相关函数,由互相关函数峰值点即可计算出延迟时间.

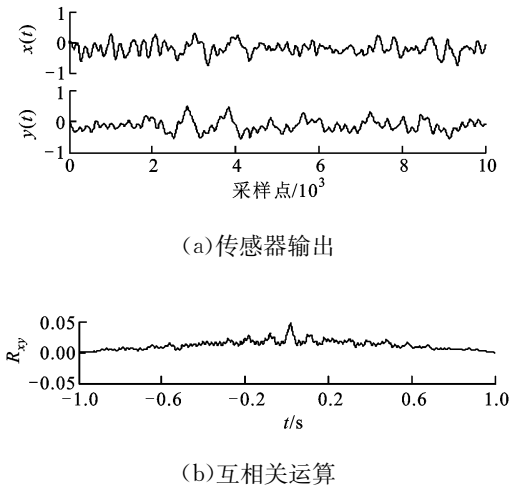


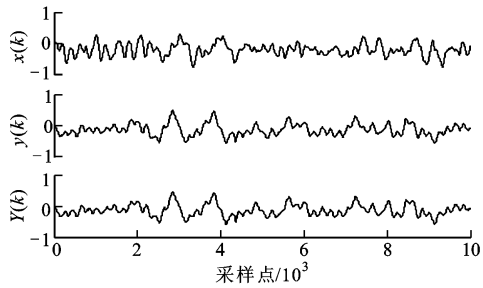
图7 两路电压信号和归一化互相关函数

(2)自适应滤波算法.模型阶次 $M=500$,数据长度截取为10 000,收敛系数 $\mu=0.001$,算法对仿真数据训练一次.设定低通滤波器的截止频率为100 Hz,实测的波形数据如图8所示,那么可由滤波器系数的最大值点处求得两路信号的时间延迟.

3.3 实验结果比较与分析

在上述实验系统上,从14~30 m/s之间取了9个不同的速度点,分别用两种算法对每个速度点测

量10次,求其平均值和标准差,数据由表1给出.根据不同速度点10次测量速度曲线,计算了总体标准差和置信度为95%的重复性,结果如表2所示.



仿真研究验证了在无噪声环境下,互相关算法和自适应算法对时延估计的精度是没有差异的,而在有噪声干扰的情况下,自适应滤波算法能够比互相关算法具有更高的精度^[10].在实际的气力输送管道上的速度测量中,由于温度、湿度、电磁、噪声等外界干扰,互相关算法抗干扰能力差,测量速度的准确性大大降低.自适应滤波算法由于对各种统计特性的信号和干扰噪声适应性强,能在较强的干扰背景下获得较好的时延估计值,因此在速度跟踪测量的时候具有更高的准确性.从表1可以看出,自适应滤波算法比互相关算法测速更精确,从表2可以看出,自适应滤波算法比互相关算法线性度和重复性都要好.这点与理论研究及仿真是一致的,即互相关算法简单易行,但抗噪声干扰能力差,而自适应滤波算法虽复杂,但抗噪声干扰能力较强,在工业环境中测量更精确.

表1 在气力输送管道上两种算法的实验比较

实验点数	标准速度 /m·s ⁻¹	互相关算法		自适应算法	
		速度均值/m·s ⁻¹	标准差	速度均值/m·s ⁻¹	标准差
1	14.4	13.7	0.23	14.0	0.22
2	15.1	14.2	0.57	14.5	0.48
3	17.7	17.2	0.26	17.3	0.18
4	19.4	19.2	0.21	19.3	0.16
5	21.1	20.4	0.36	20.7	0.28
6	22.3	21.8	0.77	22.0	0.35
7	23.8	23.7	0.43	23.7	0.24
8	24.8	24.9	0.64	24.8	0.46
9	29.1	26.6	1.58	28.3	1.01

表 2 线性度与重复性比较

算法	线性度/%	标准偏差	重复性/%
互相关	5.0	0.69	1.5
自适应滤波	1.5	0.45	1.0

4 结 论

在实际测量系统中,由于受到外界噪声及随机信号的影响,应用互相关算法测量流速受到了一定的限制,测量误差随之增大. 由于 LMS 自适应时间延迟估计对信号及噪声的统计特性无需或仅需较少的先验知识,根据信号和噪声及相互关系不断进行自动调整,从而将测量误差控制在较小的范围,故在实际工业应用中更有前景.

参考文献:

[1] 李良. 气固两相流静电相关流速测量研究[D]. 天津: 天津大学,2008.

[2] YAN Y, XU L J, LEE P. Mass flow measurement of fine particles in a pneumatic suspension using electrostatic sensing and neural network techniques[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(6):2330-2334.

[3] REED F A, FEINTUCH P L, BERSHAD N J. Time delay estimation using the LMS adaptive filter; static behavior[J]. IEEE Trans ASSP, 1981, 29(3): 561-570.

[4] GREENY R G, RAHMATZ M F, DUTTONY K, et al. Velocity and massflow rate profiles of dry powders in a gravity drop conveyor using an electrodynamic tomography system[J]. Meas Sci Technol, 1997 (8): 429-436.

[5] WOODHEAD S R, AMADI-ECHENDU J E. Solid phase velocity measurements utilising electrostatic sensors and cross correlation signal processing[C]// 1995 IEEE Instrumentation/Masurement Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 774-777.

[6] 张岩,牛跃华,彭黎辉,等,基于自适应滤波的气/固两相流固体颗粒速度测量方法[J]. 仪器仪表学报,2007, 28(11):1927-1930.

ZHANG Yan, NIU Yuehua,PENG Lihui. et al. Particle velocity measurement in gas/solid two-phase flow through adaptive filtering[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2007,28(11):1927-1930.

[7] XU Chuanlong, WANG Shimin,TANG Guanhua, et al. Sensing characteristics of electrostatic inductive sensor for flow parameters measurement of pneumatically conveyed particles[J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(9): 582-592.

[8] GAJEWSKI J B. Non-contact electrostatic flow probes for measuring the flow rate and charge in the two-phase gas-solids flow[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(7): 2262-2270.

[9] HU H L, XU T M, HUI S E. A novel capacitive system for concentration measurement of pneumatically conveyed pulverized fuel at power stations[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(2): 727-735.

[10] ZETTERBERG V,PETTERSSON M I, CLAESSION I. Comparison between whitened generalized cross correlation and adaptive filter for time delay estimation with scattered arrays for passive positioning of moving targets in Baltic Sea shallow waters[EB/OL]. [2010-11-22]. [http://www.bth.se/fou/forskininfo.nsf/0/18a4483930d1e0b7c125710d002b847b/\\$FILE/050415-12.pdf](http://www.bth.se/fou/forskininfo.nsf/0/18a4483930d1e0b7c125710d002b847b/$FILE/050415-12.pdf).

[本刊相关文献链接]

正方形小通道内不同性质溶液氮气两相流型. 西安交通大学学报,2011,45(1):26-30.

低质量流速垂直和倾斜并联内螺旋管两相流不稳定性研究. 西安交通大学学报,2010,44(1):17-21.

低质量流速垂直并联内螺旋管中两相流不稳定性试验研究. 西安交通大学学报,2009,43(7):36-39.

正方形截面直通道内二次流现象的实验研究. 西安交通大学学报,2009,43(7):83-87.

多相流体流量测量的采样分流方法. 西安交通大学学报, 2009,43(1):103-107.

同轴送粉喷嘴气固两相流流场的数值模拟. 西安交通大学学报,2008,42(9):1169-1173.

制冷系统中水平管降膜式蒸发器内部流动数值模拟. 西安交通大学学报,2008,42(3):318-322.

间冷式冰箱冷冻室粒子图像速度场测量和数值模拟. 西安交通大学学报,2008,42(3):323-326.

间冷式冰箱冷藏室内流场的粒子图像速度场实验研究. 西安交通大学学报,2007,41(9):1075-1079.

具有截面自然对流通道内湍流换热的直接数值模拟. 西安交通大学学报,2007,41(3):367-371.

板翅式换热器封头内部流场的测量与改进研究. 西安交通大学学报,2006,40(1):10-13.

(编辑 杜秀杰)