

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.009

# 基于最小均方自适应滤波的气固两相流参数测量方法

弋英民<sup>1</sup>, 胡香儒<sup>1</sup>, 解瑞东<sup>2</sup>, 张 良<sup>3</sup>, 孙 路<sup>4</sup>

(1. 西安理工大学 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048; 3. 西安卫星测控中心, 陕西 西安 714000; 4. 陕西科技控股集团, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 针对气固两相流参数测量中信号噪声先验知识未知的问题, 提出一种基于最小均方自适应滤波的气固两相流交流电信号处理方法, 利用浮点型 DSP-TMS320F28335 处理器采集静电传感器的交流电信号, 并对采集到的信号利用最小均方自适应滤波算法进行处理, 按照均方误差最小准则来调节滤波器权值达到最优, 实现最优滤波。最后, 在气固两相流流速测量实验平台上, 对气固两相流固相流速进行实时在线测量。实验结果验证了该方法可提高气固两相流流速的测量精确性和稳定性。

**关键词:** 气固两相流; 交流电信号; 最小均方自适应滤波

**中图分类号:** TP24      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-4710(2017)02-0175-05

## Gas-solid two-phase flow parameter measurement method based on least mean square adaptive filter

YI Yingmin<sup>1</sup>, HU Xiangru<sup>1</sup>, XIE Ruidong<sup>2</sup>, ZHANG Liang<sup>3</sup>, SUN Lu<sup>4</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 714000, China; 4. Shaanxi Science and Technology Holding Group, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In view of the problem that the prior knowledge of the signal and noise is unknown in the parameter measurement of gas-solid two-phase flow, the least mean square adaptive filtering method is used to process the of gas-solid two-phase flow alternating current signal. Using the floating point DSP-TMS320F28335 processor to collect the AC signal of the electrostatic sensor, the collected signals are processed by the least mean square adaptive filtering algorithm. The least mean square adaptive filtering algorithm adjusts the filter weight according to the minimum mean square error criterion to achieve the optimum and the optimal filtering. Finally, based on measuring the velocity of solid-phase flows in real time online on the experimental platform of gas-solid two-phase flow measurement. The experimental results show that the method can improve the accuracy and stability of gas-solid two-phase flow.

**Key words:** gas-solid two-phase flow; alternating current signal; least mean square adaptive filtering

气固两相流参数的高精度测量对于工业生产中的节能环保、生产效率以及生产安全性的提高至关重要<sup>[1]</sup>。目前, 对于静电传感器所采集到的气固两相流交流电信号的处理, 大多使用的是传统的滤波

方法, 滤波效果不理想。由于静电传感器检测到的气固两相流信号是微弱信号, 一般是微伏级, 在复杂的工业现场环境中, 微弱信号一旦受到干扰, 会导致气固两相流交流电信号信噪比降低, 而对于强噪声

**收稿日期:** 2016-10-17

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51275405); 陕西省教育厅科研计划资助项目(15JS066, 16JS069); 陕西省现代装备绿色制造协同创新中心项目(304-210891702); 西安市科技计划-高校院所人才服务企业工程资助项目

**作者简介:** 弋英民, 男, 教授, 博士, 研究方向为复杂系统建模与优化控制。E-mail: yiyim@xaut.edu.cn

背景下的信号,采用互相关算法测量气固两相流固相流速存在测量精度低的问题,因此,为了提高气固两相流参数的测量精度,需要对气固两相流交流电信号运用现代滤波方法进行处理,来提高信号的信噪比。

最小均方自适应滤波方法主要是针对信号先验知识未知、噪声统计特性变化并且强噪声背景下的信号,它能够自动地按照均方误差最小准则来调节滤波器权值达到最优,实现最佳滤波。由于气固两相流型复杂<sup>[2-4]</sup>,不能建立其数学模型,我们对于气固两相流信号的先验知识是未知的,并且工业现场环境复杂、多变,噪声干扰大,针对气固两相流信号的此类特征,本文选取了最小均方自适应滤波方法对信号进行滤波处理来得到高质量的信号,以供后面互相关算法运算得到更准确的速度值。最终,通过对比分析滤波前后的气固两相流固相流速,证明最小均方自适应滤波方法能够提高气固两相流参数测量的精度和稳定性。

## 1 气固两相流交流电信号检测系统

气固两相流流动参数主要包括固体颗粒的速度、浓度、质量流量等。图1是气固两相流流速测量实验平台结构图,其中,虚线框内为气固两相流流速测量系统。固体颗粒在管道内自由落体,通过与空气摩擦、与管壁碰撞以及自身之间摩擦及碰撞产生静电,带电的固体颗粒流经静电传感器<sup>[5]</sup>,静电传感器感应出的交流静电信号<sup>[6]</sup>一般是微伏级,并且含有直流电信号,采用静电信号调理电路将信号调理为0~3 V之间波动的信号,这个信号就是气固两相流交流电信号,采集上下游两路气固两相流交流电信号,对其进行最小均方自适应滤波处理,得到高信噪比的信号,运用互相关算法分析信号,得出气固两相流固体颗粒流速。

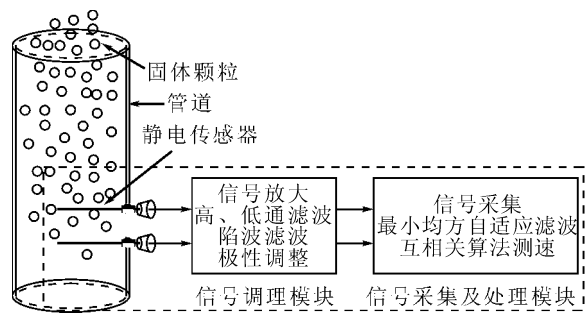


图1 气固两相流流速测量实验平台结构图

Fig. 1 Gas-solid two-phase flow velocity measurement experimental platform structure

## 2 气固两相流交流电信号最小均方自适应滤波算法

最小均方自适应滤波器<sup>[7-11]</sup>原理图如图2所示,自适应滤波器结构选择横向FIR滤波器,准则函数为均方误差最小,即 $\min E[e^2(k)]$ 。最小均方自适应滤波算法可以根据均方误差最小准则来自动调节FIR滤波器权值,直到达到最优权值,实现最佳滤波。Widrow和Hoff等人提出的基于最速下降法的最小均方自适应滤波算法中<sup>[9]</sup>,权值更新公式为:

$$\hat{\mathbf{W}}(k+1) = \hat{\mathbf{W}}(k) + 2\mu\mathbf{X}(k)e(k) \quad (1)$$

式中, $\hat{\mathbf{W}}(k)$ 表示滤波器权值序列; $\mu$ 表示步长; $\mathbf{X}(k)$ 是输入向量,在本文中为气固两相流交流电信号; $e(k)$ 是误差信号,该算法收敛的条件是 $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$ , $\lambda_{\max}$ 是输入信号自相关矩阵的最大特征值。

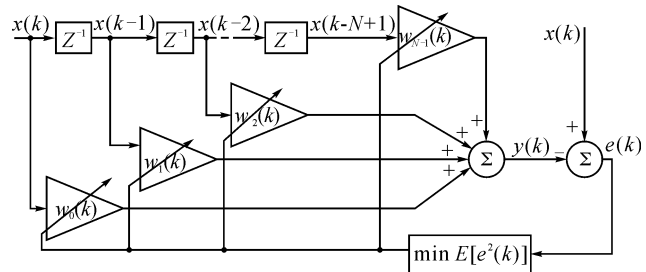


图2 最小均方自适应滤波器原理图

Fig. 2 Least mean square adaptive filter principle

最小均方自适应滤波算法流程图如图3所示,具体步骤为:

步骤1:设置初始权值序列 $\mathbf{W}(0)$ 、滤波器阶数 $N$ 、步长因子 $\mu$ 、数据长度 $n$ ;其中,滤波器阶数和步长因子对滤波效果很敏感;

步骤2:滤波器输出 $y(k) = \mathbf{X}^T(k)\hat{\mathbf{W}}(k)$ ,其中, $\mathbf{X}(k) = [x(k) \ x(k-1) \ \dots \ x(k-N+1)]^T$ 为 $k+1$ 时刻气固两相流交流电信号 $x(k+1)$ 的前 $N$ 个值, $\hat{\mathbf{W}}(k) = [\omega_0(k) \ \omega_1(k) \ \dots \ \omega_{N-1}(k)]^T$ 是 $k$ 时刻滤波器的权值序列;

步骤3:计算 $k$ 时刻误差即 $k$ 时刻气固两相流交流电信号与有限长单位冲激响应滤波器输出信号之差 $e(k) = x(k) - y(k)$ , $y(k)$ 是 $k$ 时刻气固两相流交流电信号 $\mathbf{X}(k)$ 经过有限长单位冲激响应滤波器得到的输出信号;

步骤4:最小均方自适应滤波方法的准则函数是 $\min E[e^2(k)]$ ,通过满足准则函数以获得下一时刻权值更新公式,按照权值更新公式 $\hat{\mathbf{W}}(k+1) = \hat{\mathbf{W}}(k) + 2\mu\mathbf{X}(k)e(k)$ 更新下一时刻权值;

步骤5: $k = k+1$ ,若 $k \leq n$ ,返回步骤2,否则,完

成滤波,得到滤波后的信号:

$$\mathbf{Y}=[y(k) \ y(k+1) \ \cdots \ y(k+n-1)]$$

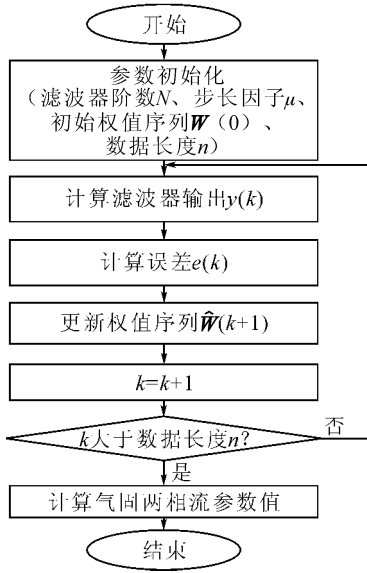


图3 最小均方自适应滤波算法流程图

Fig. 3 Least mean square adaptive filtering algorithm flow chart

### 3 基于 DSP 的气固两相流交流电信号最小均方自适应滤波实验及数据分析

本文中,信号采集处理单元采用了德州仪器(TI)的 TMS320F28335 处理器,它是一款 32 位 DSP,使用其内部的高精度 12 位 ADC 模块来采集信号调理电路输出的气固两相流交流电信号,存储在片内的 RAM 中。TMS320F28335 具有 150 MHz 的主频、乘法器和浮点运算单元,能够快速处理滤波和测量算法中大量的乘法运算,可以满足气固两相流交流电信号最小均方自适应算法以及互相关算法对数据的处理需求。

#### 3.1 基于 DSP 的气固两相流交流电信号最小均方自适应滤波实验

采用 DSP 实现气固两相流交流电信号最小均方自适应滤波算法的具体步骤如下。

步骤 1:在气固两相流流速测量实验平台上采集上下游气固两相流交流电信号序列  $\mathbf{X}(k)$ 。

步骤 2:运用本文第 2 部分所提到的最小均方自适应滤波方法,对步骤 1 中采集到的两路上下游气固两相流交流电信号序列  $\mathbf{X}(k)$ ,进行最小均方自适应滤波处理,得到滤波后的信号  $\mathbf{Y}=[y(k) \ y(k+1) \ \cdots \ y(k+n-1)]$ 。图 4 为上下游气固两相流交流电信号;图 5 为上下游气固两相流交流电信号经过最小均方自适应滤波算法处理后的信号。由图 4

和图 5 对比分析可以看出,通过对气固两相流交流电信号进行最小均方自适应滤波处理,有效地降低了噪声的干扰,得到了高信噪比的信号,运用高信噪比的信号进行互相关运算能够得到准确的速度。图 5 较图 4 中的信号延迟特性明显,这样用图 5 的信号进行互相关运算时,能够得到准确的速度值。

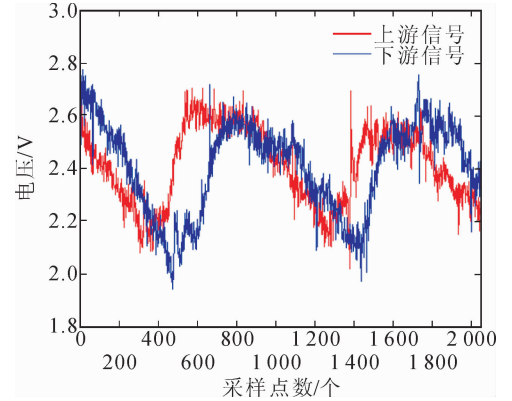


图4 上下游气固两相流交流电信号

Fig. 4 Upstream and downstream gas-solid two-phase flow alternating current signal

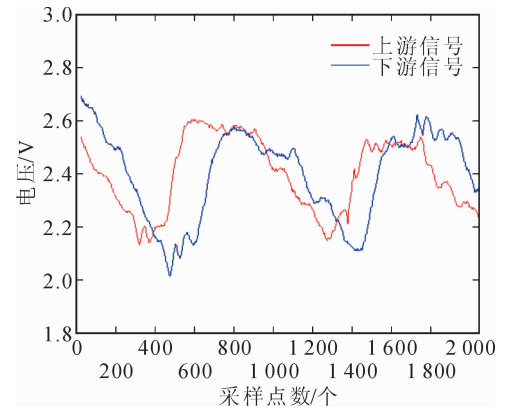


图5 滤波后上下游气固两相流交流电信号

Fig. 5 Filtered upstream and downstream gas-solid two-phase flow alternating current signal

步骤 3:对步骤 2 滤波后的信号  $\mathbf{Y}$  进行互相关运算,得出气固两相流固相速度值,以此速度值作为评价指标,分析最小均方自适应滤波算法对气固两相流流速测量精度的影响。

#### 3.2 风粉测量实验数据分析

实验室所搭建的气固两相流流速测量实验平台如图 6 所示。本实验所用的固体颗粒是沙子,具有荷电性,湿度低,无粘稠性,粒径为 0.15~1.25 mm。由于不同固体颗粒的粒性不同,所以,在实验过程中,需调节信号调理电路中的信号放大倍数,使信号在 0~3 V 之间波动,以确保信号特征完整。通过在此实验平台上测量沙子流速,对比分析加入气固两相流交流电信号最小均方自适应算法前后所得

沙子速度值,来验证该算法对气固两相流参数测量稳定性及准确性的影响。

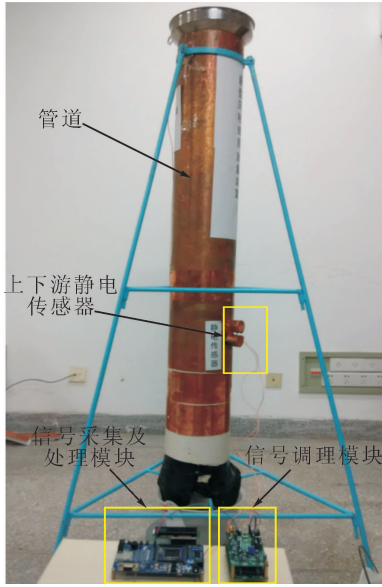


图 6 气固两相流流速测量实验平台  
Fig. 6 Gas-solid two-phase flow velocity measurement experimental platform

本实验中,理论上的沙子速度为沙子自管道顶端自由落体到达上下游传感器中间时的速度值,管道顶端距离上下游传感器中间长度为 1 m,则理论速度值为:

$$V = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 1} = 4.427(\text{m/s}) \quad (2)$$

图 7 和图 8 是加入滤波算法前后,实时在线测量得到的气固两相流固体颗粒速度曲线图,其中,蓝色曲线表示未加入滤波算法的速度测量值,红色曲线表示加入滤波算法的速度测量值。

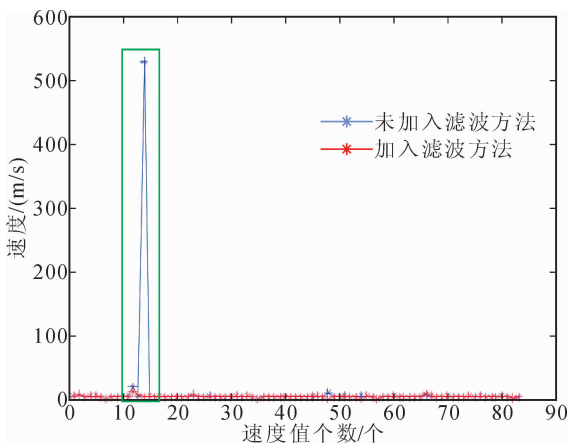


图 7 滤波前后第一组气固两相流固体颗粒流速  
Fig. 7 Velocity of solid particle in the first group of gas-solid two-phase flow before and after filtering

从图 7 绿色矩形框中标注出来的速度值可以看出,未加入滤波算法的速度测量值与理论速度偏离

程度很大,导致速度测量出现错误,造成气固两相流流速测量系统不稳定;而加入滤波算法后,降低了干扰对气固两相流信号的影响,测量出了正确的速度,提高了速度测量系统的稳定性。

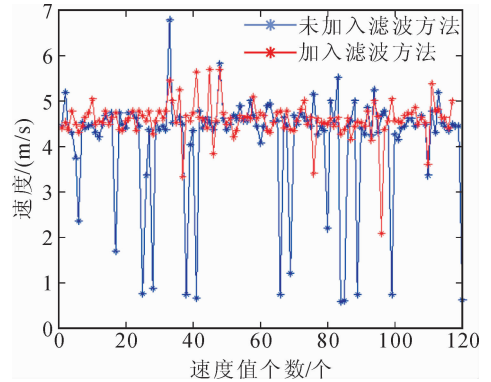


图 8 滤波前后第二组气固两相流固体颗粒流速  
Fig. 8 Velocity of solid particle in the second group of gas-solid two-phase flow before and after filtering

从图 8 可以看到,以理论速度值为中心,未加入滤波算法的速度测量值比加入滤波算法的速度测量值波动范围大,测量精度低。

通过在气固两相流流速测量实验平台上进行流速的在线测量,分别保存未加入最小均方自适应滤波算法所测的速度和加入最小均方自适应滤波算法后所测的速度,并对这些速度求期望、方差及误差,结果如表 1 和表 2 所示。由表 1 和表 2 可以看出,加入最小均方自适应滤波算法后,速度的期望更接近理论速度,速度的方差和误差也较未加入该算法所测的速度要小。通过采用最小均方自适应滤波算法处理气固两相流交流电信号,有效地降低了噪声干扰,提高了信号的质量,使得运用高信噪比的气固两相流交流电信号进行互相关运算时得到了更准确的速度,所以,该算法在很大程度上提高了气固两相流流速测量的准确性和稳定性。

表 1 滤波前后第一组速度测量值的效果

Tab. 1 Effects of the first group of velocity measurements before and after filtering

风粉速度测量	期望	方差	误差/(m/s)
未加入滤波算法	11.509 7	$3.248 1 \times 10^3$	7.082 7
加入本文滤波算法	4.924 6	2.462 7	0.497 6

表 2 滤波前后第二组速度测量值的效果

Tab. 2 Effects of the second group of velocity measurements before and after filtering

风粉速度测量	期望	方差	误差/(m/s)
未加入滤波算法	4.131 5	1.451 0	0.295 5
加入本文滤波算法	4.564 4	0.170 0	0.137 4

## 4 结 语

本文通过加入最小均方自适应滤波算法对气固两相流交流电信号进行处理,来提高气固两相流参数(固相颗粒流速)在线测量的准确性和稳定性。利用浮点型 DSP-TMS320F28335 处理器实现了对气固两相流交流电信号最小均方自适应滤波处理,并在气固两相流流速测量实验平台上进行实时在线测量,之后对比分析了加入本文滤波算法前后所测量的速度值。实验结果表明,加入最小均方自适应滤波算法提高了气固两相流参数测量的准确性和稳定性。

### 参考文献:

[1] 赵钦新,周屈兰. 工业锅炉节能减排现状、存在问题及对策 [J]. 工业锅炉, 2010(1): 1-6.  
ZHAO Qinxin, ZHOU Qulan. Solutions, questions and status of China's industrial boiler [J]. Industrial Boiler, 2010(1): 1-6.

[2] 刘兴斌,卢静,王延军,等. 多传感器数据融合技术在多相流领域研究进展 [J]. 石油管材与仪器, 2016, 2(1): 6-9.  
LIU Xingbin, LU Jing, WANG Yanjun, et al. Research progress of multi-sensor data fusion technology in multiphase flow [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2016, 2(1): 6-9.

[3] TAN Chao, DONG Feng. Parameters measurement for multiphase flow process [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1923-1932.

[4] 孙晨,陈凌珊,汤晨旭. 气固两相流模型在流场分析中的研究进展 [J]. 上海工程技术大学学报, 2011, 25(1): 49-53.  
SUN Chen, CHEN Lingshan, TANG Chenxu. Study and development of gas-solid two-phase flow model in flow field analysis [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2011, 25(1): 49-53.

[5] 阚哲,邵富群,李庆华. 基于静电传感器气/固两相流流速互相关测量 [J]. 石油化工高等学校学报, 2012, 25(6): 78-82.  
KAN Zhe, SHAO Fuqun, LI Qinghua. Flow velocity measurements of gas-solid two phase flow with electrostatic sensors and cross-correlation method [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2012, 25(6): 78-82.

[6] 汪宗林,常小军. 交流电荷感应技术在风粉在线测量中的应用 [J]. 电力技术, 2010, 19(15/16): 12-15.  
WANG Zonglin, CHANG Xiaojun. Application of AC inductive charge technique for air flow and coal dust on-line measurement [J]. Electric Power Technology, 2010, 19(15/16): 12-15.

[7] 曹亚丽. 自适应滤波器中LMS算法的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 452-454.  
CAO Yali. The application of LMS algorithm in adaptive filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 452-454.

[8] SHARMA D, KAUR R. Improvement in convergence speed and stability of least mean square and normalized least mean square algorithm [C]// Computing for Sustainable Global Development, 2015 2nd International Conference on New Delhi, 2015: 1496-1500.

[9] MEHER P, PARK S. Critical-Path analysis and low-complexity implementation of the LMS adaptive algorithm [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(3): 778-788.

[10] QIAN Y. A new variable step size algorithm applied in LMS adaptive signal processing [C]// 2016 Chinese Control and Decision Conference, Yinchuan, 2016: 4326-4329.

[11] BISMOR D. LMS algorithm step size adjustment for fast convergence [J]. Archives of Acoustics, 2012, 37(1): 31-40.

(责任编辑 周 蓓)