

文章编号: 1004-9037(2012)01-0121-04

粉煤灰碳含量检测仪检测算法

宋燕燕 周长林 庞学民 代攀

(解放军信息工程大学理学院, 郑州, 450001)

摘要:粉煤灰中未燃烧的碳的含量是粉煤灰利用的重要指标。对比研究FFT频域分析法、自相关检测法和基于互相关的虚拟数字锁相放大法3种算法检测粉煤灰中未燃烧的碳含量,结果表明,虚拟数字锁相放大法测量标准粉煤灰的碳含量所得数据更加准确可靠,相对误差和方差均较小,不超过4%,测量碳含量在0.5%~4%的粉煤灰样品时,光声信号电压值随碳含量变化的线性关系更加直观。虚拟数字锁相放大技术能够精确简单快捷地检测出粉煤灰中的碳含量,对于能源节约和环境保护意义重大。

关键词:粉煤灰碳含量; 自相关; 虚拟数字锁相放大

中图分类号: TP216.1

文献标识码: A

Detection Algorithm Analysis on Fly Ash Unburnt Carbon Detector

Song Yanyan, Zhou Changlin, Pang Xuemin, Dai Pan

(School of Science, Information Engineering University of PLA, Zhengzhou, 450001, China)

Abstract: Unburnt carbon detection in fly ash is the key target in fly ash using. Three algorithms are comparatively studied, i. e. , FFT frequency domain analysis, autocorrelation, virtual digital lock-in amplification based on cross-correlation. Results show that the data using virtual digital lock-in amplification measurement to detect standard fly ash carbon content is more accurate and reliable, the deviation and variance are relatively smaller, less than 3%. When measuring the carbon content fly ash sample of 0.5%—4%, a linear relation between photoacoustic signal voltage and carbon content is more intuitive and clear. Virtual digital lock-in amplifier technology can detect the unburnt carbon content in fly ash accurately, simply and fastly.

Key words: carbon in fly ash; autocorrelation; virtual digital lock-in amplification

引言

粉煤灰中未燃烧的碳的含量不仅是燃煤锅炉燃烧效率的主要衡量参数,也是粉煤灰综合利用的主要技术瓶颈,是评定粉煤灰等级的指标之一,并决定着粉煤灰的利用范围,因此如何能够准确检测粉煤灰的碳含量是粉煤灰利用的关键技术,对于能源节约和环境保护都具有十分重要的意义。

传统的检测粉煤灰碳含量的方法有“烧失法”(Loss on ignition, LOI)^[1]和热解重量分析法(Thermo gravimetric analysis, TGA)。LOI要求高温环境,存在较大系统误差,无法实现精确测量。TGA检测过程操作复杂,仪器价格昂贵,不易推广使用。

文献[2-7]提出用光声效应检测粉煤灰碳含量。它是基于光声效应原理设计了一个粉煤灰碳含量检测仪,系统由光声信号产生部分、信号滤波放大部分和DSP信号处理部分3部分组成。硬件电路框图如图1所示。

将制备好的粉煤灰样品密封在光声池中,在频率为12.5Hz的红外光照射下产生微弱的光声信号

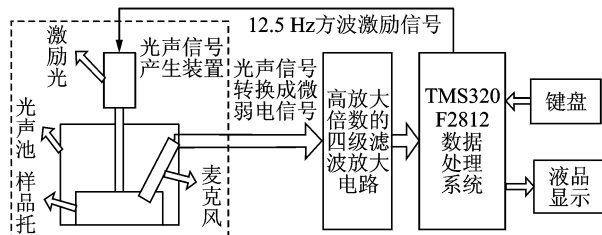


图1 粉煤灰碳含量检测仪的系统

号,由麦克风拾取并转换成电信号输出,经滤波放大电路调理后,有用信号仍然被大量的噪声所淹没,需要对其进行进一步处理。系统以 TMS320F2812 为核心处理芯片,由内部自带 12 位 AD 转换器对经滤波放大电路调理后的信号进行 A/D 采样。文中重点讨论光声信号处理部分,设计了 FFT 频域分析、自相关检测及虚拟数字锁相放大 3 种算法^[8]对淹没在噪声中的微弱光声信号进行处理,分析对比测量结果,进而得出检测粉煤灰碳含量的最优算法。

1 FFT 频域分析法检测光声信号幅值

反映粉煤灰碳含量的光声信号是一个频率为 12.5 Hz 的正弦信号,为了满足整周期采样以及采样频率与 DSP 速率的倍数关系,设定采样频率等于 32 倍信号频率,即 400 Hz,采样 5 个周期共 160 个点。

傅里叶变换是一种将信号从时域变换到频域的变换形式,是声学、语音等信号处理领域中的重要分析工具。在一些信号检测仪器中,可直接对信号进行 FFT 运算以得到有用信号的幅频特性曲线,从中读取幅值和频率等重要信息。

对采样后的离散信号进行 32 点 FFT 分析,在 TI 的 CCS 环境下经过调试运行之后,得到有用信号的幅频特性如图 2 所示。

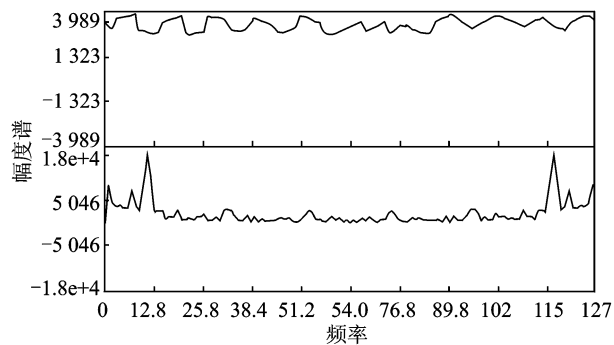


图 2 光声信号 FFT 分析的幅值谱

图 2 中,上部是光声信号经 A/D 采样之后的幅度谱,下部是光声信号经 FFT 运算之后的幅度谱。从图中可以看到,由于信号中含有大量噪声,A/D 采样后的幅度谱并没有按正弦规律变化,经过 FFT 运算后得到的幅度谱也不是理想的谱线特征,幅度在不断地变化。低频段信号主要集中在 5~12.8 Hz,12.5 Hz 左右幅值达到最大,但受噪声影响比较严重,并不能得到准确的数值。

2 自相关算法检测粉煤灰碳含量

2.1 自相关检测算法实现

对光声信号进行 160 点的采样后得到一系列离散值,将两路相同的正弦光声信号进行自相关运算^[9-10],得到相关后的峰值点在 $\text{cor}[159]$,峰值随着粉煤灰中碳含量的增加而增大。算法设计时为了提高所测数据的准确度,进行了 100 次的自相关,并对 100 次所得的 $\text{cor}[159]$ 值取平均值。图 3 是相关算法 DSP 程序实现流程图, x 和 y 为参与相关运算的两路信号,当 $x=y$ 时,完成自相关函数的计算,而当 $x \neq y$ 时,完成互相关函数的计算。通过在程序中修改相应参数,进行编译、加载、运行之后可以得到不同的实验结果。其中 Length 为输入数据长度。

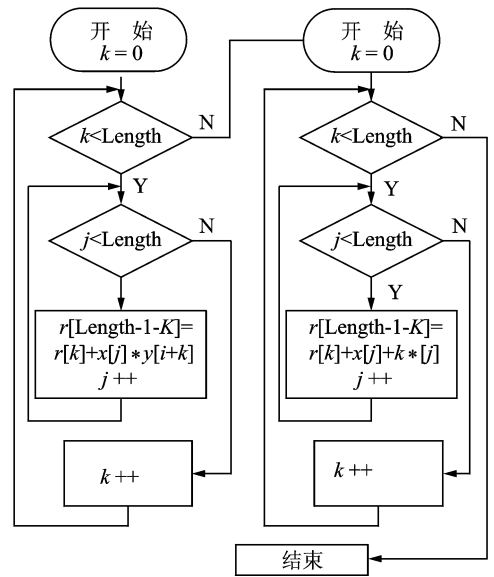


图 3 相关检测程序流程图

2.2 自相关检测结果分析

对碳含量从 0.5% 到 10% 的 20 个标准粉煤灰样品分别进行 10 次完全独立的测量,每次测量采集 10 个数据,并求平均值、方差和误差。每种样品在实验前均经过 20 min 的手工研磨。检测条件:温度 18~19℃,湿度 40%~42%RH。通过对所测数据的处理分析,在检测碳含量在 0.5%~4% 之间的粉煤灰样品时,所得光声信号电压值 U 与碳含量 n (用百分数表示)有近似线性关系,当检测的粉煤灰碳含量超过 4% 时,光声信号值开始趋于饱和,电压值与碳含量不再成线性关系增长。用最小二乘法进行线性拟合,所得结果如图 4 所示。

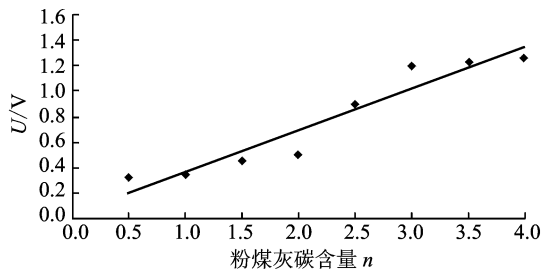


图4 自相关算法检测粉煤灰样品拟合直线图

3 虚拟数字锁相放大技术在粉煤灰碳含量检测中的应用

3.1 虚拟数字锁相放大算法实现

虚拟数字锁相放大是以互相关原理为基础、平稳随机白噪声为处理对象所设计的一种数字化同步相关检测算法^[11-13],实现被检测信号和同频参考信号的数字互相关运算。

设周期信号为 $x(t) = A\sin(2\pi f_r t + \varphi)$, $A > 0$ 为信号幅度, φ 为信号相位,在 q 个参考信号周期对 $x(t)$ 进行 $M = q \cdot N$ 次采样 (N 为周期采样点数),得到信号序列

$$x(k) = A\sin(2\pi f_r \cdot k\tau + \varphi) = A\sin\left(\frac{2\pi k}{N} + \varphi\right), k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

由DSP根据 N 来合成正弦参考序列 $x_s(k)$ 和余弦参考序列 $x_c(k)$

$$\begin{cases} x_s(k) = \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ x_c(k) = \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \end{cases} k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

$x_s(k)$ 和 $x_c(k)$ 分别相当于对正弦参考信号 $\sin(2\pi f_r t)$ 和余弦参考信号 $\cos(2\pi f_r t)$ 进行同步采样所得。按式(3,4)来计算 $x(k)$ 和 $x_s(k)$ 的互相关值 R_{Xrs} , $x(k)$ 和 $x_c(k)$ 的互相关值 R_{Xrc}

$$R_{Xrs} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x(k) \cdot r_s(k) \quad (3)$$

$$R_{Xrc} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x(k) \cdot r_c(k) \quad (4)$$

进而得到幅度值: $A = 2 \sqrt{R_{Xrs}^2 + R_{Xrc}^2}$

根据算法思想,同频参考信号由DSP根据输入信号频率内部数字合成,同时还需对合成的参考信号进行 90° 数字相移,生成另一路正交参考信号。虚拟数字锁相算法的实现主要包括参考信号产生、移相算法和数字相关运算算法等。

数字锁相大幅度放大和相位锁定原理是建立在两路参考信号同频且初始相位相差 90° 的绝对正交基础上,而决定锁定结果的一个极其重要的因素就是参考信号与输入信号的同频性。因此必须确切知道信号频率,保证输入信号频率在允许的范围内波动。同时,采样时还要满足整周期采样,并要选取合适的积分时间,以保证互相关结果的准确性。

3.2 虚拟数字锁相放大检测结果分析

测试环境与测试条件与自相关相同。利用虚拟数字锁相放大算法检测碳含量在 $0.5\% \sim 4\%$ 之间的同种粉煤灰样品,得到的光声信号电压值与碳含量之间的线性关系拟合直线图如图5所示。

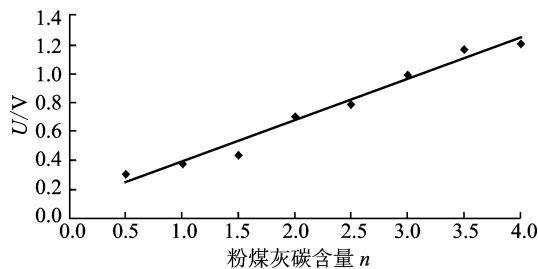


图5 虚拟数字锁相放大算法检测粉煤灰样品拟合直线

4 结 论

对比分析3种算法的检测结果,FFT算法简单易行,但测得信号频率点的幅值不稳定,误差较大,并不能有效地从噪声中提取被淹没的有用信号。利用自相关算法和虚拟数字锁相放大算法测试碳含量在 $0.5\% \sim 4\%$ 的粉煤灰样品,根据所得数据计算电压均值、方差和误差如表1所示。

表1 自相关与互相关算法检测结果对比

n/%	自相关			互相关		
	U/V	方差/%	误差/%	U/V	方差/%	误差/%
0.5	0.326	1.27	4.82	0.307	0.72	3.85
1.0	0.358	0.99	4.25	0.382	0.59	3.03
1.5	0.378	1.37	5.02	0.438	0.98	3.19
2.0	0.504	1.20	4.92	0.703	0.54	1.97
2.5	0.899	1.03	4.78	0.789	0.42	1.20
3.0	1.193	0.97	2.38	0.991	0.65	2.57
3.5	1.231	1.29	4.87	1.164	0.43	1.30
4.0	1.255	0.92	3.05	1.205	0.70	2.49

由表中数据可知虚拟数字锁相放大算法测得的数据更加准确可靠,误差和方差均相对较小,测量碳含量在 $0.5\% \sim 4\%$ 的粉煤灰样品时,光声信号

电压值随碳含量变化的线性关系更加直观明了,利用这种方法检测粉煤灰碳含量是可行的。

根据最小二乘法拟合出的线性关系曲线,用得到的线性回归系数对本文所设计的粉煤灰碳含量检测仪进行标定,标定后的仪器即可用来测量其他碳含量的同种粉煤灰(与标准粉煤灰煤质相同)。当碳含量超过4%时,光声信号达到饱和,需要用碳酸钙粉末对粉煤灰样品进行稀释,把样品稀释到0.5%~4%的线性范围内。

在实际应用中,由于不同产地粉煤灰材料的性质差别很大,每标定一种粉煤灰样品就可以建立碳含量和光声信号的线性关系方程,这样便可以建立不同产地不同燃烧条件下粉煤灰样品的相关数据库,数据库可移植至DSP芯片中,如果待测粉煤灰样品的标定信息已经入库,便可直接对仪器进行标定,而无需再制备标准样品找出线性方程。检测仪可脱离计算机独立测量,可以制成便携式产品,使用简便快捷。

参考文献:

[1] Brown R C, Dykstra J R. Systematic errors in the use of loss-on-ignition to measure unburned carbon in fly ash [J]. Fuel, 1995, 74(4): 570-574.

[2] Waller D J. Measurement of unburned carbon in fly ash using infrared photoacoustic [D]. Ames, USA: Iowa State University, 1995.

[3] Waller D J, Brown R C. Photoacoustic response of unburned carbon in fly ash to infrared radiation [J]. Fuel, 1996, 75(13): 1568-1574.

[4] Fan M H, Brown R C. Precision and accuracy of photoacoustic measurements of unburned carbon in fly ash [J]. Fuel, 2001, 80(11): 1545-1554.

[5] Sathanathana V T, Mohammad K P. Prediction of unburnt carbon in tangentially fired boiler using Indian coals [J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 28(16): 28.

[6] 赵元黎, 袁斌, 宁继英, 等. 应用光声效应检测粉煤灰中碳含量仪器的研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2002, 39(6): 16-17.

Zhao Yuanli, Yuan Bin, Ning Jiying, et al. Study of instrument using photoacoustic technology to measure unburnt carbon in fly ash [J]. Instrument Technique and Sensor, 2002, 39(6): 16-17.

[7] 赵元黎, 宁继英, 袁斌, 等. 应用光声效应检测粉煤灰中的碳含量 [J]. 光学技术, 2003, 29(1): 42-43.

Zhao Yuanli, Ning Jiying, Yuan Bin, et al. Measuring unburnt carbon in fly ash by photoacoustic response [J]. Optical Technique, 2003, 29(1): 42-43.

[8] 高晋占. 微弱信号检测 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 154-275.

Gao Jinzhan. Detection of weak signals [M]. Beijing: Qinghua University Publishing, 2004: 154-275.

[9] 朱平, 刘光达, 田磊, 等. 光纤瓦斯气体检测中锁相放大器设计应用 [J]. 仪表技术与传感器, 2007, 44(3): 49-51.

Zhu Ping, Liu Guangda, Tian Lei, et al. Design and application of lock-in amplifier in fiber optic gas detection [J]. Instrument Technique and Sensor, 2007, 44(3): 49-51.

[10] 朱虹, 林君, 吴忠杰, 等. 近红外光谱仪中的数字锁相技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1258-1261.

Zhu Hong, Lin Jun, Wu Zhongjie, et al. Study on digital lock-in amplifier in NIR spectrometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10): 1258-1261.

[11] Barrag'an L A, Artigas J I, Alonso R, et al. A modular, low-cost, digital signal processor based lock-in card for measuring optical attenuation [J]. Rev Sci Instrum, 2001, 72(1): 247-51.

[12] 胡绍明, 张广发. 一种基于DSP和采样ADC的数字锁相放大器 [J]. 数据采集与处理, 2000, 15(2): 222-225.

Hu Shaoming, Zhang Guangfa. Digital lock-in amplifier based on DSP and sampling ADC [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2000, 15(2): 222-225.

[13] Moe Andrew E, Marx Steve R, Bhinderwala Iqbal, et al. A miniaturized lock-in amplifier design suitable for impedance measurements in cells [J]. IEEE, 2004, 2(4): 215-218.

作者简介: 宋燕燕(1984-), 女, 助教, 研究方向: 信号与信息处理及智能仪器, E-mail: songyanyan1125@163.com; 周长林(1961-), 男, 副教授, 研究方向: 数字信号处理、测控技术、电磁兼容; 庞学民(1963-), 男, 副教授, 研究方向: 可编程逻辑器件及信息处理; 代攀(1983-), 男, 硕士生, 研究方向: 信息处理。