

# 激光透射式粉尘仪的微弱信号处理研究

张 涛

(聚光科技(杭州)股份有限公司,浙江 杭州 310015)

**摘要:** 为实现在线监测粉尘浓度,设计了一个激光在线粉尘检测仪。在一个典型的烟尘排放连续监测(CEMS)系统中,激光粉尘检测距离要求达到 15 m 以上,然而半导体激光器的输出光功率在 20 mW 以下。为了从强噪声背景中提取极其微弱的反射光信号,设计了一种数字平均器以提取“nW”级别的微弱反射光信号。对原型机在不同测量距离和消光比条件下进行了性能测试。测试结果显示,使用数字平均器进行在线粉尘浓度检测,测量距离可以达到要求的 15 m,同时测量线性度优于 2%。

**关键词:** 激光透射式粉尘仪;粉尘浓度检测;弱信号检测;数字平均器

中图分类号:TH744.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)12-1453-04

## Research on weak signal detection in laser transmissiometer for dust measurements

ZHANG Tao

(FPI(Hangzhou) Stock Corporation, Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** Aiming at monitoring dust concentration on-site, an on-site laser dust concentration monitor was designed. In a typical continuous emission monitoring system (CEMS), measuring range of laser dust concentration monitor is up to 15 m, but the output optical power of LD is below 20 mW. To get the ultra-weak reflected light from strong noisy background, a digital averager was designed to refine "nW" level light signal. The performance of prototype was tested at different measuring range and different extinction. The results indicate that, using digital averager to detect dust concentration on-site, measuring range reaches desired 15 m and the linearity is better than 2%.

**Key words:** laser dust concentration monitor; dust concentration detection; weak signal detection; digital averager

## 0 引 言

工业生产中通过烟气排放的粉尘是主要的大气污染物之一,国家环保总局制定的标准中,要求烟气排放连续监测系统(CEMS)中必须对烟气中的粉尘进行连续在线监测<sup>[1]</sup>。

国内外在线测量粉尘浓度的测量方法主要有光吸收法、光散射法、称重法、B射线法等。其中采用光吸收法在线监测烟气中的粉尘具有使用方便、维护成本低、测量高浓度粉尘精度高等优点,是烟气中在线监测粉尘浓度的首选方法<sup>[2]</sup>。

本研究为实现在线监测粉尘浓度,设计一个激光在线粉尘检测仪,通过设计一种数字平均器以提取

nW 级别的微弱反射光信号。

## 1 透射式粉尘仪测量原理

透射式粉尘仪测量的原理示意图如图 1 所示,半

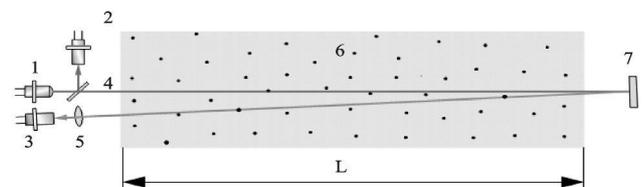


图 1 激光透射式粉尘仪测量原理示意图

1—半导体激光器(LD);2—参考光电探测器(Reference PD);3—信号光探测器;4—半透半反透镜;5—接收透镜;6—烟气;7—反射镜

导体激光器发射激光通过烟道中的烟气,激光通过含有粉尘颗粒物的烟气时被粉尘吸收、反射和散射,然后被烟道另一端安装的反射镜反射回信号光探测器监测。同时为了抵消 LD(半导体激光器)因为老化、温漂等带来的光强变化,LD 发出的激光在通过半透半反镜时,一部分光进入参考光探测器用以监视 LD 发射光强的变化。激光光束通过烟道时,由于粉尘吸收产生的光强衰减符合 Lambert-Beer 定理<sup>[3-4]</sup>。

$$I = I_0 \cdot e^{-c \cdot k \cdot L} \quad (1)$$

式中: $I_0$ —LD 的发射光强; $I$ —信号探测器的接收光强; $C$ —粉尘浓度; $k$ —消光常数; $L$ —光程(入射光和发射光经过的路程之和)。

本研究将公式(1)转换为粉尘浓度  $C$  的表达式,得到下式:

$$C = \frac{\ln \frac{I}{I_0}}{-k \cdot L} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,准确监测粉尘浓度  $C$  的关键是准确地检测  $I$ (反射光强)。

## 2 粉尘仪中光信号探测存在的问题

透射式粉尘仪的反射光信号探测主要面临两个问题:

首先,反射光信号十分微弱。如图 1 所示的透射式粉尘仪在实际应用中,测量光路可能长达 15 m。可以推算,考虑光程损耗、光学器件等光路损耗,发射光的光强可能最差情况下只有入射光强的  $1/10^8$ 。在线监测仪表一般要求长期连续运行,所以在线透射式粉尘仪一般选择功耗低、寿命长的 LD,发射光强  $P_0$  仅有 10 mW,这样最差情况下反射光功率仅有 100 pW。这对信号检测电路和信号处理方法都提出了挑战<sup>[5]</sup>。反射光强与测量光程之间的关系如图 2 所示。

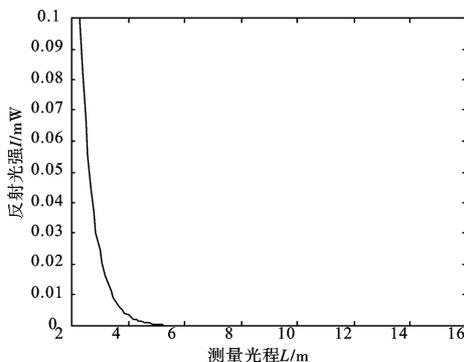


图 2 反射光强与测量光程之间的关系

其次,信号噪声大。除了反射光信号,测量路径上的背景光、烟气的流速变化带来的扰动,都会为信号检测带来噪声。本研究所需要检测的反射光信号淹没

在了噪声中。如何从这样复杂的噪声中提取反射光信号也是个很大的挑战。

## 3 采用锁相放大器的实验方案及其结果

微弱信号检测常用的方法是将信号调制到较高的调制频率  $f_{mod}$ ,通过解调  $f_{mod}$ ,将低频的待测信号检测出来。这样做的作用主要是可以避免电子器件的低频噪声、同时检测信号的带宽被压缩到调制频率  $f_{mod}$  附近。带宽的压缩和极低的低频噪声使得 SNR 大大提高,从而有可能将微弱信号从噪声背景中提取出来。

粉尘仪反射光信号的检测也是按照这个思路去选择检测方法,本研究首先想到了锁相放大器检测微弱的反射信号。采用锁相放大器的检测系统框图如图 3 所示。

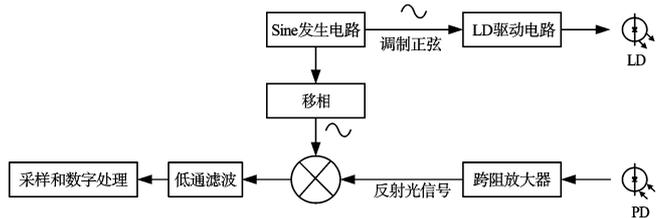


图 3 锁相放大器检测框图

实验中,本研究采用 10 kHz 正弦波调制 LD,通过锁相放大的方法检测发射信号。实验结果证明,在短光程下(<8 m)下反射信号-消光比能保持 5%以下的线性度。但在长光程下出现了反射信号与消光比(相当于粉尘浓度)之间线性度差的问题,不同光程下测得的消光比-归一化反射光强之间的关系如图 4 所示。经过分析,采用锁相放大方法时检测 SNR 差的主要原因是 LD 的  $I-P$ (调制电流与发射光功率之间)线性范围窄,而在用正弦波调制 LD 时,为保证正弦不失真,发射的调制光信号功率就变小,在光程超过 8 m 后,由于发射光功率较低,输入到信号检测通道的 SNR 过

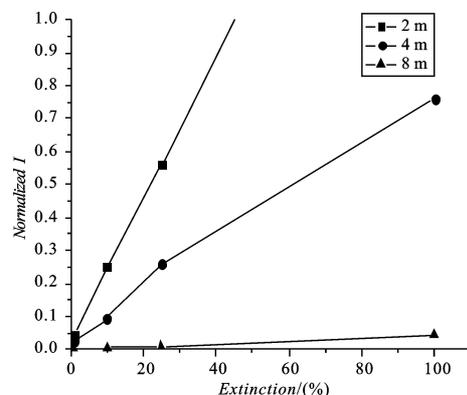


图 4 不同光程下测得的消光比 - 归一化反射光强之间的关系 (采用锁相放大方法)

低导致锁相放大器噪声过载。因此在长光程时采用锁相放大器方法检测,不满足在线粉尘检测的要求。

## 4 采用数字平均器的粉尘检测方案的设计

### 4.1 采用数字平均器改善反射光检测 SNR 理论分析

既然采用锁相放大器在长光程测量时 SNR 不佳的主要原因是发射的调制光功率不足的原因,所以必须在调制方法上想办法。

通过采用数字平均器方案可以用周期性的方波调制 LD,LD 的  $I-P$  线性范围变得不重要,LD 的发射的调制光功率可以增加至 LD 的最大输出光功率。采样周期性的方波的调制信号如图 5 所示。

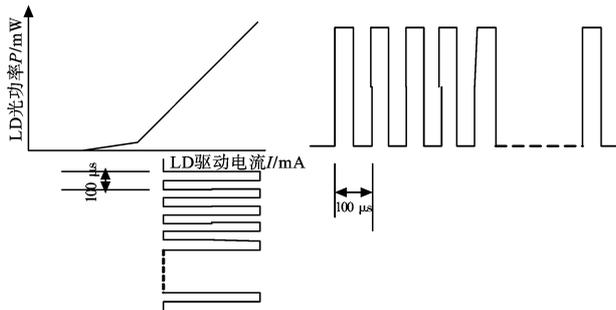


图 5 采用周期性方波调制 LD

该方案用周期性方波驱动(即用周期信号激励)LD,有两个好处:首先是将待测信号调制到高频的  $f_{mod}$  上,可以避免  $1/f$  噪声等低频噪声的影响。其次,在检测发射光的信号链设计中,可以只检测“携带”待测信号的交流分量,而背景光、粉尘扰动等这些会造成信号基线漂移的低频信号可以被方便地滤除。同时由于只需检测交流分量,检测的动态范围也会有所提高。

按照数字平均器的理论,本研究将 LD 的发射光调制到  $f_{mod}$  上后,在反射光检测时,如果用  $1/f_{mod}$  为固定采样间隔对反射光信号进行同步采样,则采样结果可以视为发射光与采样脉冲卷积的结果,即  $I(t-nT_s)=I(t) \times \delta(t-nT_s)$ 。式中:  $T_s$ —采样周期,  $T_s=1/f_{mod}$ 。采样后对采样结果进行数字平均,平均后的结果为:

$$\bar{I}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I(t) \times \delta(t-nT_s) = I(t) \times \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t-nT_s) \quad (3)$$

容易求得式(3)中的  $h(t) = \left( \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t-nT_s) \right) / N$  的幅频特性为:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{N} \frac{\sin(N\omega T/2)}{\sin(\omega T/2)} \quad (4)$$

本研究使用不同的平均次数  $N$ ,对式(4)中的频响用 Matlab 绘制幅频曲线,结果如图 6 所示,幅频响应

表现为一个梳状滤波器,且平均次数  $N$  越高,带宽越窄。可见通过数字平均后的输出集中于  $f_{mod}$  附近,通带以外的噪声得到抑制。平均次数越多,SNR 越高<sup>[6]</sup>。

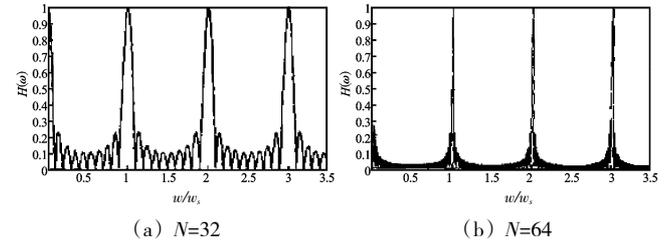


图 6 数字平均器的幅频特性

### 4.2 数字平均器的粉尘检测的信号链设计

检测信号链的设计如图 7 所示,CPLD 产生定时准确的 10 kHz 方波,该方波调制 LD 发射受调制的光信号,在通过有粉尘的烟道反射后,反射光被 PIN 管接收。然后经过跨阻放大器转换为电压信号,然后经过中心频率为 10 kHz 的带通滤波器提取载有粉尘浓度信息的信号,再通过可编程放大器后送入 ADC 中采样,在信号链中放置可编程放大器是为了在不同光程下信号链检测有更大的动态范围,ADC 的采样触发信号 CONV 由 CPLD 触发是根据 4.1 的分析,采样要与调制信号严格同步,因此调制和采样都由 CPLD 控制<sup>[7]</sup>。

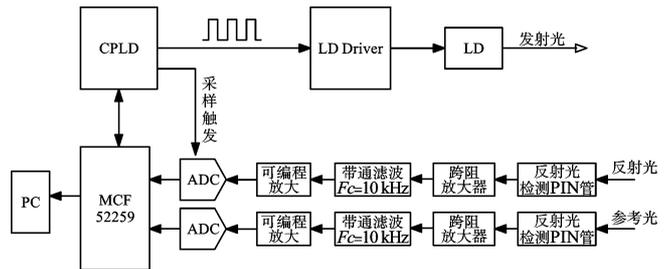


图 7 基于数字平均方法的粉尘检测的信号链框图

采样数据由 Freescale 的 32 位 ColdFire 单片机 MCF52259 接收。与此同时,参考光也通过与反射光完全相同的信号链进行采样。反射光和参考光的采样信号经过 MCF52259 作数字平均后,再用参考光信号校准反射光信号,就得到了反映粉尘浓度的发射光信号<sup>[8]</sup>。

### 4.3 数字平均器方法检测粉尘的实验及其结果

#### 4.3.1 实验系统的配置

验证数字平均方法检测粉尘的实验装置如图 8 所示,试验中本研究采用 10 kHz 的周期性方波调制 650 nm,额定光功率 15 mW 的半导体激光器,该半导体激光器自带准直透镜,可以将 LD 发出的发散的高斯光束会聚为平行光出射。经过准直后的激光光斑发光均匀,这样光束在通过长达 30 m 的光程反射后,光斑的直径仍旧可以被很好地会聚并接收。LD 发出的光束首先通过半透半反射镜,该半反镜将入射光按 1:1 的比例等分为透射光和反射光。反射光被参考 PIN 管

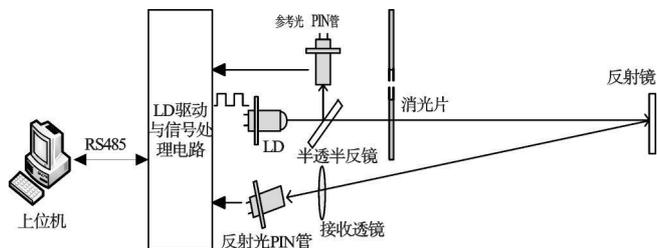


图 8 数字平均器方法检测粉尘的实验装置

接收监控光源的变化并用来校准反射光。透射光则投向远端的反射镜。为了模拟烟道中的粉尘浓度对反射光信号的影响,试验中本研究在光路中插入了分别插入了 5 种不同消光比的消光片(分别为 100%,80%,64%,25%,10%)。经过反射镜反射后,光束最终通过接收透镜会聚到反射光接收 PIN 光上。

图 8 的实验装置的电路的功能框图如图 7 所示,电路产生 10 kHz,占空比为 50%的方波调制 LD。参考光 PIN 管和接收光 PIN 光经过信号调理由 CPLD 触发同步采样。本研究采用 Freescale 的 32 位处理器 MCF52259 对参考采样信号和反射光采样信号进行数字平均后,计算出最准结果。然后本研究通过工业上常用的 RS485 接口送到 PC 上显示最后结果,同时 PC 通过 RS485 接口与处理器通讯,对平均次数、标定系数等参数进行设置。

#### 4.3.2 实验结果及分析

为验证数字平均器检测微弱的反射光信号的效果,本研究在试验中分别改变光程(即 LD 和反射镜之间的距离)、换用不同消光比的消光片,来模拟粉尘对光束的衰减。

示波器捕捉的 LD 驱动调制信号如图 9 所示。8 m 光程下,用示波器捕捉的经过光电转换和放大后的参考光信号和粉尘光信号(即发射光信号)的双踪波形如图 10 所示。同时本研究设计了上位机软件,用以分析从 485 接口上传的数据。

不同光程下、不同消光比条件下测得的发射光信号强度如图 11 所示。图中横坐标是消光比,纵坐标是

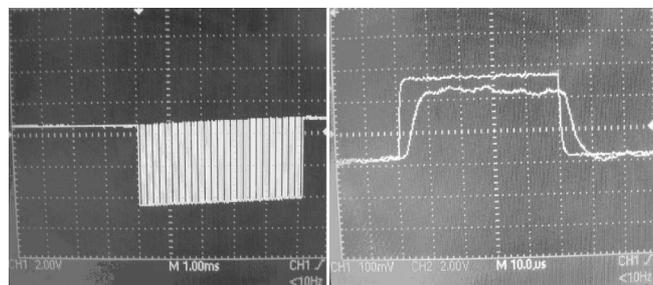


图 9 激光器调制信号  
(0.1 ms 脉宽)

图 10 参考光信号和粉尘信号  
(8 m 光程、无消光)

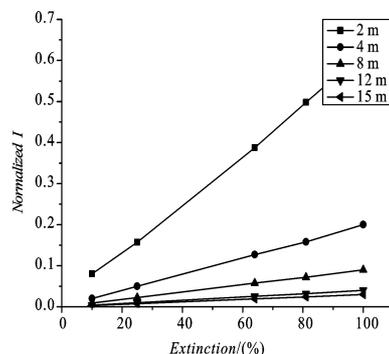


图 11 不同光程下测得的消光比 - 归一化反射光强之间的关系(采用数字平均器法)

归一化的反射光信号强度(代表粉尘浓度)。从图中可以看出,在各光程下,消光比-归一化反射光强之间的线性优于 2%,由此证明,对 LD 采用脉冲调制、并采用数字平均方法提取微弱光强信号的方法是成功的。

## 5 结束语

为了满足 15 m 长光程下检测 nW 级反射光信号的要求,本研究设计了锁相放大和数字平均器两种微弱信号处理系统对微弱的反射光信号进行检测。通过理论分析和实验,证明“对激光器进行脉冲调制、同时用数字平均器检测反射光信号”的办法既提高了发射光功率,又能在强噪声背景下提取出反射光信号,探测下限和线性度都满足了 CEMS 粉尘检测的要求。

### 参考文献(References):

- [1] SMITH S W. Digital signal processing[M]. Second Edition. San Diego, California: California Technical Publishing, 1999.
- [2] HJ/T76-200. 固定污染源排放烟气连续监测系统技术要求及检测方法[S]. 北京:国家环保总局,2001.
- [3] 杨 凯. 烟尘烟气连续自动监测系统技术现状和发展趋势[J]. 中国环境监测,2010,26(5):18-25.
- [4] 马凤斌. 烟尘浓度和粒度的消光法测量研究 [J]. 传感技术学报,2004,17(2):289-291.
- [5] DOWNEY D. In situ transmissiometer measurements for real-time monitoring of dust Ddischarge during Orchard nut harvesting [J]. **Journal of Environmental Quality**, 2008,37(2):574-581.
- [6] VARMA R. A Novel Methodology for Fugitive Dust Emission Estimation using Optical Remote Sensing [M]//Advanced Environmental Monitoring. Springer-Verlag GmbH, 2006:143-154.
- [7] Altera. MAX II device handbook[M]. Altera,2005.
- [8] Freescale. McF52259 coldfire integratod microcontroller reference manual[M]. Freescale,2009.

[编辑:李 辉]