

烟气流速及颗粒物浓度的光学测量方法研究

倪志波 董凤忠* 杨阳 庞涛 吴边 张志荣 曾宗泳

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 为实现基于光学方法的烟气流速和颗粒物浓度的非介入式测量, 研制了双光路对射式烟气流速测量系统, 并在工业烟道上进行了实地测试。鉴于工业烟道内气流的复杂性和多变性, 提出了一种反级串的烟气流发展模型, 并改进了数据处理方法。分析结果表明: 基于新数据处理方法测量的烟气流速, 虽然其统计平均值与皮托管的单个测量结果存在 0.7 m/s 的差异, 但两仪器测量结果的统计平均值非常一致, 均接近 7.6 m/s。当信号比较理想时, 相对于经过简单滤波后计算得到的烟气流速, 新的数据处理方法不会对烟气流速及其变化趋势造成明显改变。由烟气流速测量系统所测信号的光强起伏与颗粒物浓度存在明显的线型关系, 相关系数可达 0.97。

关键词 测量; 光强起伏; 互相关; 烟气流速; 颗粒物浓度

中图分类号 TN2; TN911.74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0108002

Study on Measurement of Flue Gas Velocity and Particulate Concentration by Optical Method

Ni Zhibo Dong Fengzhong Yang Yang Pang Tao Wu Bian
Zhang Zhirong Zeng Zongyong

(Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract In order to measure flue gas velocity and particulate concentration by optical non-intrusive method, a system is developed with double light paths structure, and is tested on industrial stack. The transmitting and collecting units locate at bilateral of the stack. The gas flow in stack is very complex and changes quickly, thus an inverse cascade model is proposed to describe the developing process of gas flow, and the data processing method for calculating flue gas velocity is improved. Analytical results indicate that, the difference of statistical mean value of flue gas velocities calculated by the new method and those measured by pitot tube at a single point is 0.7 m/s, which is larger than the expectation value, but the ensemble average velocities obtained by these two kinds of measurement are almost the same and are all about 7.6 m/s. When signals collected by our optical measuring system are perfect, the new method will not change the value of velocity and its trend is explicitly acquired after simple filter. There is clearly linear relationship between light intensity fluctuation measured by flue gas velocity measuring system and particulate concentration in stack measured by optical particle counter, and the correlation coefficient can reach 0.97.

Key words measurement; light intensity fluctuation; cross correlation; flue gas velocity; particulate concentration

OCIS codes 120.1880; 120.4640; 280.1120; 290.2200

1 引言

近 20 年来, 随着我国工业的迅速发展, 大量工业有害物质被直接排放, 对自然环境造成了严重的污染, 特别是工业废气和烟尘, 由于其可长期存在于

大气中, 所以还会对周边国家带来影响, 因此全球也日益关注我国的工业排放问题, 甚至提出无端指责。为了实现可持续发展战略和应对国际社会的指责, 我国政府加强了对污染物排放的监控。然而想要监

收稿日期: 2013-07-26; **收到修改稿日期**: 2013-08-20

基金项目: 国家 863 计划(2007AA06Z420)

作者简介: 倪志波(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事环境监测新技术及设备研发等方面的研究。

E-mail: zbni@aiofm.ac.cn

* **通信联系人**。E-mail: fzdong@aiofm.ac.cn

控工业废气和颗粒物的排放总量,排放速度(即烟气流速)的监测是必不可少的。传统的烟气流速测量设备包括皮托管、热线风速计和激光流速计等^[1-4]。皮托管和热线风速计属于介入式(接触式)测量设备,在测量的同时会干扰和破坏流场。激光流速计的主要优点在于非介入式测量、有较高的空间分辨率和快速动态响应,其局限性在于测量区域内必须存在适当的散射微粒,测量精度极易受到多种因素干扰。

光闪烁是指光通过介质后光强随时间的起伏变化,工业烟道内造成光闪烁的原因很多。光束通过烟气流时,颗粒物随机移入或移出视场可引起光闪烁^[5],但这种光闪烁仅在视场很小、光程很短、粒子直径较大、浓度较低的情况下才能被观测到。在高温烟气流中,湍流的存在会造成折射率的时空变化,使从其中穿过的光束产生闪烁效应。这种光闪烁的频率主要集中在几百赫兹以上的高频范围。颗粒物浓度场的起伏也会造成光闪烁,这种闪烁的频率主要集中在低频部分。有关文献的研究结果还表明,光闪烁的低频部分与颗粒物浓度(数密度)存在很好的线性关系,可用于颗粒物浓度测量^[6-7]。

美国 OSI 公司 Wang 等^[8]利用折射率起伏的光闪烁原理发展了一种设备简单、能够实时在线测量流速的光学流速传感器(OFS),并已实现商业化。到目前为止,美国 OSI 是唯一生产光学流速传感器

的厂家。但是,该仪器在某些应用场合有其局限性,即:当烟气流温度分布均匀、折射率起伏很弱时,因光闪烁信号太弱而难以获得准确的烟气流速。在国内,刘和来等^[9]采用与美国 OSI 类似的结构,研制了基于折射率起伏的光闪烁烟气流速测量仪,实验结果证实其存在应用盲区。此外,国外还开发了一些利用光闪烁强度测量颗粒物浓度的仪器,如美国 BHA 公司的 CPM5000、英国 DynOptic Systems 公司的 DSL-5000 等^[10-11],但目前尚未发现用于烟气流速和颗粒物浓度同步在线测量的商业化仪器。

考虑到工业烟道的实际情况以及用于烟气流速和颗粒物浓度测量设备的发展现状,本文改进并研发了基于颗粒物浓度场光闪烁的双光路对射式烟气流速测量系统,并对数据处理方法进行了改进。通过在模拟烟道和工业烟道上开展实验,检验了系统的稳定性和数据处理算法的可靠性。在保证系统正常运行的前提下,初步获得了颗粒物浓度与光强起伏间的关系。

2 测量原理及系统简介

这里开发的双光路对射式烟气流速测量系统(以下简称光学烟气流速测量系统)的具体结构如图 1 所示。系统有信号发射单元和信号收集单元各一对,并于烟道两侧相对放置,光路沿烟道直径传输。

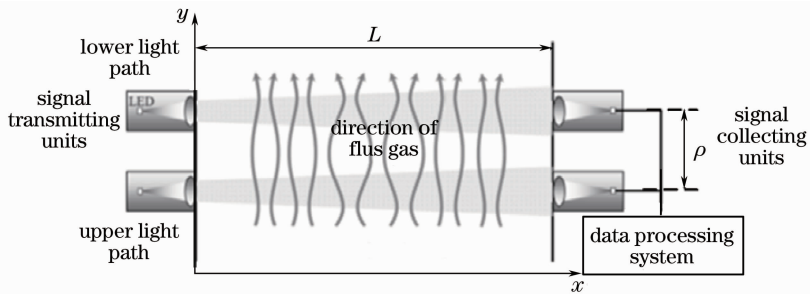


图 1 双光束对射式烟气流速测量系统结构图

Fig.1 Diagram of flue gas velocity measurement system with double light paths

假设位于上、下游的两探测器接收到的光强分别为 $I(r, t)$ 、 $I(r + \rho, t + \tau)$,其中 r 表示上游探测器的空间位置, t 表示时间, ρ 为两探测光束间的距离, τ

为烟气流在两光束之间的渡越时间。两路信号的互相关为^[12]

$$B(\rho, \tau) = [\langle I(r + \rho, t + \tau) I(r, t) \rangle - \langle I(r, t) \rangle^2] / \langle I(r, t) \rangle^2. \quad (1)$$

当上下游光路间距远小于烟道直径时,烟道内局部的烟气流速将远小于平均烟气流速,可以假设烟气在流经两探测光路的过程中是“冻结”的。

在这一假定下,下游测量点的光强可用上游 $r - \rho$ 点, $t - \tau$ 时刻的光强来表示,因此

$$B(\rho, \tau) = B(\rho - v\tau). \quad (2)$$

$B(0)$ 总是出现最大相关,因此根据上下游探测光路间的距离 ρ 和渡越时间 τ ,可计算出该时刻的烟气流速 v 。

这里所述的光学烟气流速测量系统,以颗粒物浓度场起伏引起的光闪烁为信号。若以 $\alpha(r,t)$ 表示烟气中颗粒物浓度场的消光系数,则

$$\alpha(r,t) = \langle \alpha(r,t) \rangle + \alpha'(r,t), \quad (3)$$

式中 $\langle \alpha(r,t) \rangle$ 表示消光系数的平均值, $\alpha'(r,t)$ 是消光系数的起伏量。此时,由信号探测单元获得的对数光强可以表示为

$$\ln I(t) = \ln \langle I \rangle - \int_0^L \alpha'(r,t) dx. \quad (4)$$

此时,光强起伏的互相关即为消光系数起伏量 $\alpha'(r,t)$ 的互相关,即

$$C_{\ln I}(r,\rho,t,\tau) = \left\langle \int_0^L \alpha'(r_1,t-\tau) dx_1 \int_0^L \alpha'(r_2,t) dx_2 \right\rangle. \quad (5)$$

将(5)式化简后得

$$C_{\ln I}(l,\tau) = 2 \int_0^L (L-x) R_\alpha(x,\rho-v\tau) dx, \quad (6)$$

式中 R_α 表示消光系数的相关函数, L 表示发射端与接收端之间的距离。光学烟气流速测量系统的外观如图2所示。信号发射单元采用经高频调制的发光二极管(LED)为光源,其中心波长为632 nm。经过烟气流后的光束被信号收集单元收集,经电路放大、低通滤波后,被高性能数据采集卡采集,并由系统软件对光强信号进行分析。

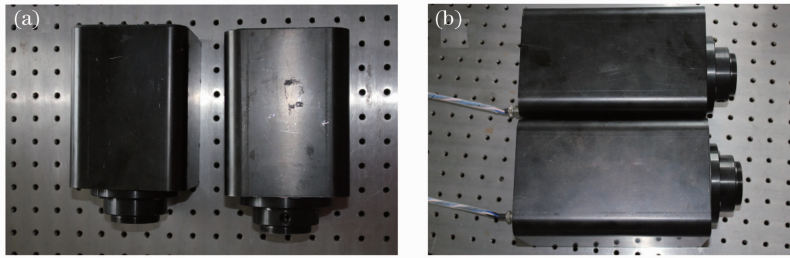


图2 烟气流速测量系统实物图。(a) 信号发射单元; (b) 信号接收单元

Fig. 2 Photos of flue gas velocity measurement system. (a) Signal transmitting unit; (b) signal collecting unit

3 颗粒物浓度场发展模型及数据处理方法的研究

在烟气排放过程中,烟道内的湍流场和颗粒物浓度场都会引起光强起伏。根据现有的湍流理论,湍流的发展过程是大湍涡不断破碎为小湍涡,小湍涡通过热能不断耗散的过程,此过程可以利用级串模型加以描述^[13]。在湍流的发展过程中,只有自身尺度可与光束直径相比拟的湍涡,才对光闪烁有明显贡献。借鉴上述理论,同样可以将烟道内的颗粒物浓度场分为若干尺度不同的团块,且假设这些团块的发展过程类似于级串模型。对于一般燃烧炉,烟气的排放均为抽取式,风机位于烟道入口附近。此时,注入烟道的初始烟气流为湍流状态,颗粒物浓度场团块的尺度较小。随着烟气流在烟道内的不断传输,烟气所含的能量不断地以热能形式消耗掉,流动状态逐渐趋于稳定,小尺度的颗粒物浓度场团块不断融合形成尺度较大的团块。一般而言,当烟气流传输距离大于烟道直径40倍时,烟气流趋于相对稳定的状态^[14]。通过上述分析可知,这里对于团块发展过程的假设是成立的,其发展过程如图3所示。鉴于颗粒物浓度场的发

展与湍流场的发展过程是相反的过程,这里定义颗粒物浓度场的发展过程为反级串模型。

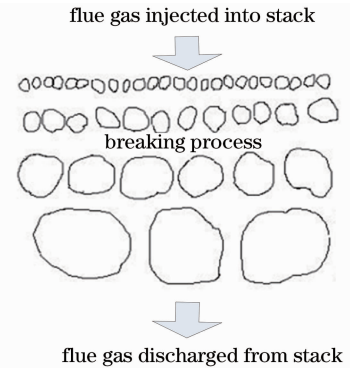


图3 颗粒物浓度场的反级串模型

Fig. 3 Reverse cascade model for particulate concentration field

利用互相关方法计算烟气流速时,通常需要对信号进行必要的滤波。由颗粒物浓度场起伏引起的光强起伏,其频率一般集中在低频部分,因此确定有效信号的频率范围是烟气流速计算过程中最重要的一步。外场实验所用烟道位于山东省潍坊市某化工厂内,烟道横截面为长方形结构,长和宽分别为

1.5 m和0.6 m。两光束的发射和接收单元沿气流方向,分别分布于宽为0.6 m的烟道侧壁中心线上,光路间距为0.3 m,系统采样频率为2500 Hz。参考两光束间的距离,可以假设对光强起伏起主要作用的是颗粒物团,其最小尺度为0.1 m,最大尺度与烟道的长或宽相当。用皮托管测量得到的烟气流速平均值一般在8 m/s左右,因此由颗粒物浓度场起伏造成的光强起伏的频率应该主要分布在5~80 Hz之间。为了尽量避免湍流场对信号的影响,在实际滤波过程中高频截止频率通常设置为20 Hz。

图4是经过20 Hz的低通滤波后,两路信号随时间的变化趋势。可以看出,两路信号具有很好的相似性。与此形成鲜明对比的是,两信号的互相关曲线变化趋势却非常差,时间延迟为0(如图5所示)。为分析上述现象出现的几率,对600组连续数据进行了分析,流速计算结果如图6所示。从600组信号的变化趋势看,每组信号都有一定的相似性,但互相关计算结果并不好。根据皮托管的测量结果,烟道内的烟气流速一般在6~10 m/s之间变化,即使将流速变化范围放宽到4~12 m/s,仍然有超过50%的计算结果与实际情况不符。

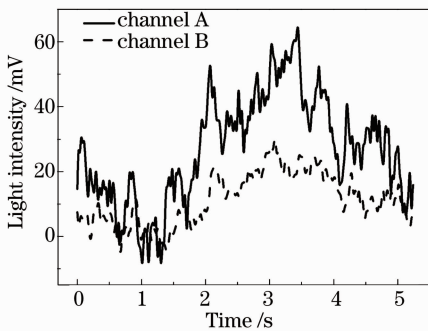


图4 20 Hz低通滤波后的信号随时间的变化
Fig. 4 Temporal variation of signal after low-pass filter with cutoff frequency of 20 Hz

鉴于上述现象,重新对各组数据进行了分析。最终发现,几乎所有计算结果出现错误的结果都有一个共同的特点,即低于5 Hz的缓变信号非常明显。与此相比,5~20 Hz之间的有用信号则弱很多。为消除缓变信号对互相关计算结果的影响,对数据预处理过程进行了相应的改进。新的数据预处理方法的核心目的在于:通过低通滤波提取截止频率不同的低频信号,从而剔除信号中的缓变量;用“零点穿越”算法对消除了低频缓变量的信号进行极化处理,将整组数据用1、0和-1等三个数值表示,进一步消除信号剧烈变化对互相关计算结果的影响。

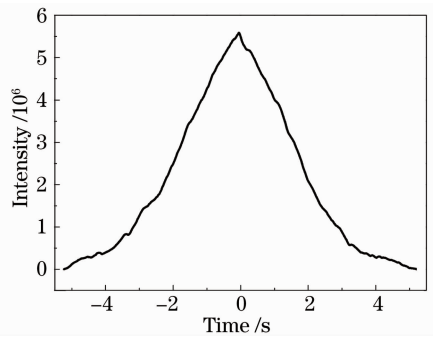


图5 信号互相关计算结果

Fig. 5 Cross-correlation results of signals

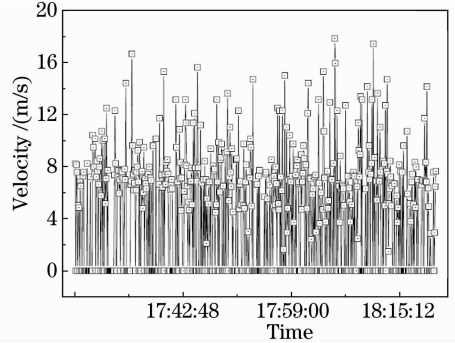


图6 经简单滤波后计算出的工业现场烟气流速随时间的变化

Fig. 6 Temporal variation of flue gas velocity in industrial stack by simple filter

4 实验结果

原始数据经过新的数据预处理方法处理后,互相关的计算结果如图7所示(图7中前600组数据与图6中使用的原始数据是完全相同的)。可以看出,在5520组数据中,仅有70多组数据超出了前面设定的烟气流速变化范围,数据处理的成功率超过98.5%。图8是用皮托管在烟道的几何中心偏左0.1 m的位置处测量,获得的烟气流速随时间的变化趋势。对比图7和图8不难发现,光学烟气流速测量系统获得烟气流速更稳定,总体趋势没有特别明显的起伏,而皮托管的测量结果则有相对明显的起伏。同时,对数据进行统计分析发现,图7中烟气流速的统计平均值为7.62 m/s,而图8的统计平均值则为8.3 m/s,即皮托管测量结果的统计平均值略大于双光束对射式烟气流速测量系统的测量结果。图7和图8中数据的标准偏差分别为1.41和1.53,结果基本一致。出现总体趋势变化和统计平均流速不一致的现象,可能是由以下原因造成的:1)对于光学烟气流速测量系统,其测量的是整个光路上烟气流速的平均值,而皮托管则属于单点式测量

设备,由于烟气入口附近风机的作用,烟道内不同位置处速度的分布不可能完全一致;2) 由于受实验现场条件的限制(工厂仅提供了两对对射的孔),导致皮托管和光学烟气流速测量系统不能同时工作,图7和图8分别是两天夜里测得的烟气流速结果,在这两个时间段内,烟气流速可能确实发生了一定的变化;3) 皮托管为介入式测量设备,其本身可能会对烟气流速产生一定的影响。

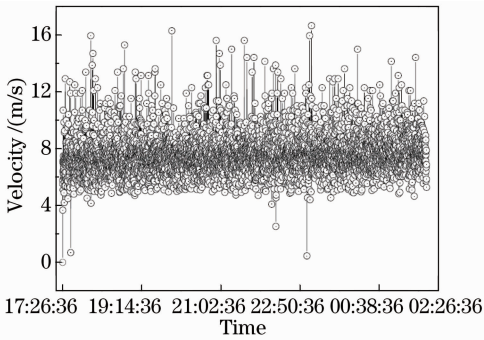


图7 光学烟气流速测量系统测量结果

Fig.7 Temporal variation of velocities measured by optical flue gas velocity measurement system

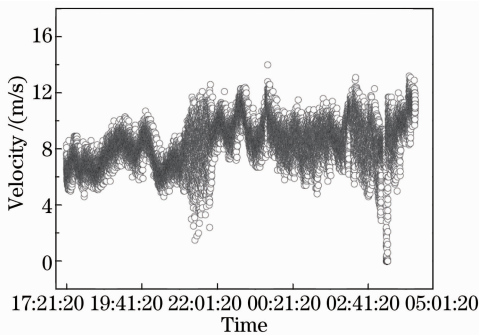


图8 皮托管测量结果

Fig.8 Temporal variation of velocities measured by pitot tube

为进一步验证前文中提到的造成皮托管与光学烟气流速测量系统测量结果不一致的第一个原因,利用皮托管对烟道内不同位置处的烟气流速进行了逐点测量。测量起始点位于烟道内距侧壁5 cm处,各测量点的间隔为10 cm,测量方向沿烟道横截面长边的轴向,结果如图9所示。由于皮托管长度的限制,最远端只能测量到135 cm处,即缺少了145 cm点上的流速测量结果。图中菱形表示各测量点上的实时流速,实心三角形为各测量点上速度的平均值。从结果可以看出,由于烟道入口处风机的存在,烟气流速呈现出类似于m型的空间分布,完全符合风机造成的效果。对各点速度做进一步的

统计平均,可得烟道内烟气流速的统计平均值为7.614 m/s,这与烟气流速测量系统获得的7.62 m/s是非常一致的。上述结果证明光学烟气流速测量系统的测量结果是准确的。

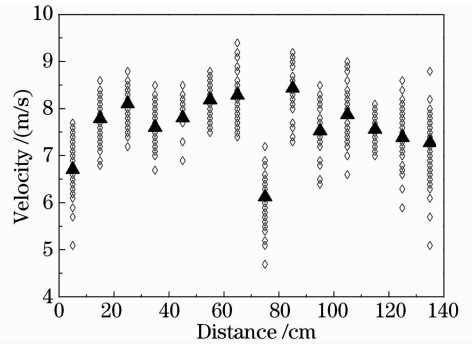


图9 工业烟道内烟气流速的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of flue gas velocity in industrial stack

为验证改进后数据预处理方法的普适性,利用该方法重新处理了实验室模拟烟道上采集到的数据。模拟烟道直径为32 cm,两光束间距为30 cm,系统采样频率为2500 Hz。必须指出的是,由于模拟烟道内的烟气流可以得到充分发展,因此原始信号相对较好,只要通过简单滤波即可计算出流速。将由新方法获得的流速结果与仅经简单滤波后获得的流速进行了对比,结果如图10所示。图10(a)的原始信号是向烟道内注入烟气得到的,其中方点线为仅简单滤波后计算出的烟气流速,三角点线是利用新的数据预处理方法得到的烟气流速。图10(b)的原始信号是向烟道内注入水汽的情况下得到的,曲线含义与图10(a)相同。比较两种方法得到的烟气流速结果可以看出,前后两次计算出的烟气流速及其变化趋势基本相同,即对于比较好的原始数据,新的数据预处理方法不会改变最终的计算结果,对于一些信号特别差的原始数据,新数据预处理方法也不起作用。以图10(b)为例,两次数据处理后得到的烟气流速的统计平均值分别为2.05 m/s和2 m/s,结果非常接近。分别对烟尘和水汽引起的光闪烁信号进行处理得到的结果说明,这里研制的光学烟气流速测量系统,不仅可以在以烟尘为信号源的烟道上工作,还可以在处理以水汽为信号源的信号。由于目前很多工厂的除尘工艺都以水除尘为主,因此烟气中不可避免地会混入大量水汽,如果烟气流速测量系统能够探测并分析水汽引起的光闪烁,则其应用范围必将得到极大拓展。

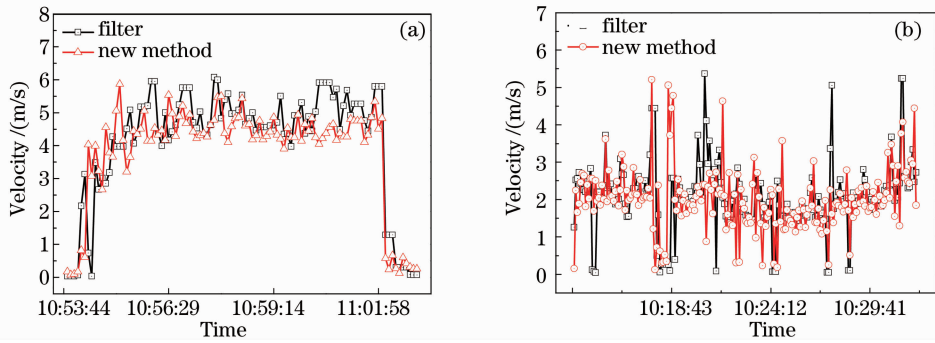


图 10 基于不同数据预处理方法的实验室烟气流速测量结果的对比。(a) 向烟道内注入烟气时的流速测量结果；(b) 向烟道内注入水汽时的流速测量结果

Fig. 10 Comparisons of flue gas velocities in simulating stack by different data processing methods.

(a) Results when particles injected into stack; (b) results when water vapor injected into stack

用于烟气流速测量的低频光强起伏是由颗粒物浓度场的起伏引起的,为检验利用光学烟气流速测量系统进行颗粒物浓度测量的可行性,这里借助自行研制的多通道光学粒子计数器,对烟道内的颗粒物浓度及颗粒物谱分布进行了连续监测。多通道光学粒子计数器共 18 个通道,可同时检测粒径在 $0.187 \sim 15.2 \mu\text{m}$ 范围的粒子,并经过 TSI 公司生产的 3321 型空气动力学粒度仪标定(该粒度仪共 51 个通道,可同时检测粒径在 $0.542 \sim 19.81 \mu\text{m}$ 范围的粒子),测量误差小于 10% ^[15-16]。利用多通道光学粒子计数器测得的不同环境下的粒子谱分布如图 11 所示,其中方点线和圆点线分别表示为合肥和工厂所在地空气中颗粒物的谱分布,三角点线表示烟道内颗粒物的谱分布。对比两地空气中颗粒物的谱分布不难发现,合肥地区空气中的颗粒物粒径主要集中在 $0.226 \sim 1.26 \mu\text{m}$ 的 8 个通道上,最大值出现在 $0.337 \mu\text{m}$ 的通道上。工业现场空气中颗粒物粒径的分布通道更广,在 $0.226 \sim 2.29 \mu\text{m}$ 的 11 个通道上均有分布,且最大值出现在 $2.29 \mu\text{m}$ 的通道上。两地空气中颗粒物谱分布的不同可能是由以下原因造成的:1) 工业现场的实验点位于烟道旁边,烟道后端安装有除尘设备,在排烟和除尘的过程中,烟尘粒子不可避免地会进入空气中;2) 合肥深处内陆地区,空气中的颗粒物属于典型的城市型气溶胶,而工业现场位于海边滩涂之上,颗粒物谱分布易受海洋型气溶胶的影响。烟道内颗粒物谱分布主要集中在 $0.84 \sim 4.88 \mu\text{m}$ 的 8 个通道上,最大值位于 $3.2 \mu\text{m}$ 的通道上,且 $2.29 \sim 4.88 \mu\text{m}$ 三个通道上的粒子数远大于其他通道上的粒子数。对比工业现场空气中颗粒物的谱分布可知,上述 3 个通道上的颗粒物主要是由燃烧产生的。在 $2.29 \mu\text{m}$ 之前的各通道上,

烟道内的颗粒物浓度均低于同地点空气中的测量结果,其原因还有待于通过实验进一步研究。

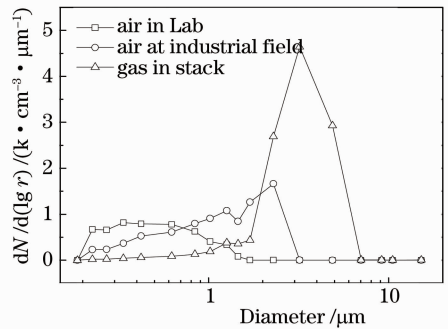
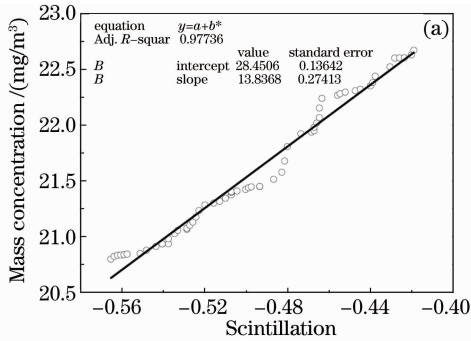


图 11 不同气体环境中的颗粒物谱分布测量结果

Fig. 11 Particulate size distribution of different air conditions

图 12 是光强起伏与颗粒物浓度间的关系,其中图 12(a)是在实验室模拟烟道上的实验结果,图 12(b)图是在工业烟道上的实验结果,光强采用对数光强起伏方差。在模拟烟道上实验时,烟道内的颗粒物浓度及谱分布是由 AE 3321 型空气动力学粒度仪测得的。光学烟气流速测量系统需要在颗粒物浓度达到一定值的情况下才能正常工作。图 13 是测量系统能够正常工作的临界条件下,烟道内颗粒物的谱分布,与此相对应的颗粒物数密度在 4600 cm^{-3} 左右,质量浓度在 20.7 mg/m^3 左右, D_p 表示颗粒物直径。受造烟设备的限制,无法产生颗粒物浓度特别高的烟气,因此可用于描绘颗粒物浓度与光强起伏的数据非常有限。在此有限的的数据范围内,对颗粒物浓度与光强起伏做线性拟合,其相关系数超过 0.97。与工业烟道相连接的锅炉是用于产生蒸汽的,并随着生产过程对蒸汽需求的不同而不断调整燃煤量,因此图 12(b)中颗粒物质量浓度的变化范围较大。此外,由于烟气流尚未经过除尘设备,因此颗粒物浓度又普遍较高,

均在 200 mg/m^3 以上。尽管颗粒物浓度变化范围较大,但与光强起伏也存在较好的线性关系,相关系数非常接近 0.97。从两次测量结果可以看出,由光学烟



气流速测量系统测得的光强起伏与颗粒物质量浓度确实存在一定的线性关系,利用现有设备有可能实现烟气流速和颗粒物浓度的同步测量。

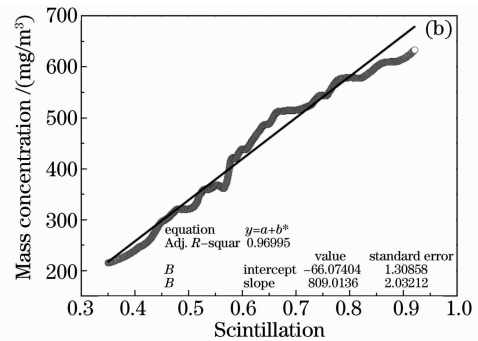


图 12 光强起伏与颗粒物浓度的线性拟合结果。(a) 模拟烟道上的测量结果;(b) 工业烟道上的测量结果

Fig. 12 Linear fitting results between optical scintillation and particulate concentration. (a) Measurement results on simulating stack; (b) measurement results on industrial stack

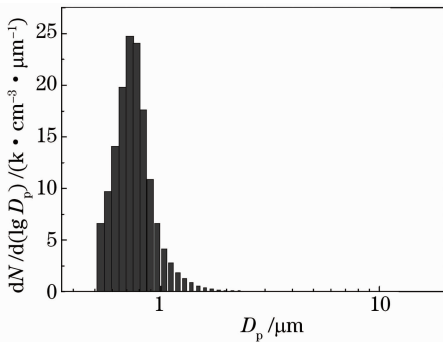


图 13 实验室模拟烟道内的颗粒物谱分布

Fig. 13 Particulate size distribution in simulating stack

5 结 论

利用工业烟道结合皮托管和多通道光学粒子计数器,对自行研制的光学烟气流速测量系统的性能进行了分析测试。鉴于工业烟道内烟气流的复杂性和多变性,借鉴湍流理论中的级串模型,提出了适用于烟道气流发展过程的反级串模型,并基于此模型改进了数据预处理方法。实验结果表明,利用光学烟气流速测量系统,结合新的数据预处理方法,基本能够实现工业烟道内烟气流速的有效测量。虽然光学烟气流速测量系统测量结果的统计平均值与皮托管单点测量结果的统计平均值存在约 0.7 m/s 的差异,但这种差异主要是由烟道内流速的空间分布不同造成的。利用皮托管在光束传播方向上进行逐点测量发现,烟道内的流速空间分布类似于 m 型,而整个路径上流速的统计平均值与光学烟气流速测量系统的测量结果基本完全一致,均接近 7.62 m/s 。利用新的数据预处理方法,分析了光学烟气流速测量系统早期在实验室模拟烟道上采集到的信号,并

将结果与经简单滤波后获得的流速结果进行了对比,发现两次结果在数值和变化趋势上都具有非常好的一致性,进一步证明经改进的数据预处理方法是可靠的。对实验室模拟烟道和工业烟道上光强起伏与颗粒物质量浓度关系的分析结果均表明,当颗粒物浓度满足光学烟气流速测量系统正常工作的阈值时,光强闪烁与颗粒物浓度具有较好的线性关系,相关系数均超过 0.969。上述分析说明,将光学烟气流速测量系统与新的数据预处理方法相结合,可以实现烟气流速的快速测量,并有可能实现颗粒物浓度的同步测量。当然,颗粒物浓度与光强起伏间的关系还需要通过理论和实验的进一步验证,这些工作将在今后逐一开展。

参 考 文 献

- 1 Bengt J Andersson. On measurement of velocity by pitot tube [J]. Arkiv för Matematik, 1958, 3(5): 391-394.
- 2 P C Stainback, K A Nagabushana. Review of hot-wire anemometry techniques and the range of their applicability for various flows [J]. ASME Electron J Fluids Eng, 1993, 167: 93-133.
- 3 M K Denham, P Briard, M A Patrick. A directionally-sensitive laser anemometer for velocity measurements in highly turbulent flows [J]. J Phys E: Sci Instrum, 1975, 8(8): 681-683.
- 4 Yang Liu, Hong Wei, Wang Chuan, et al.. Flow velocity measurement based on speckle in optical coherence tomography [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0504002.
杨柳,洪威,王川,等.基于光学相干层析散斑的流速测量方法[J].中国激光,2012,39(5):0504002.
- 5 Chen Jun, Shen Jianqi. Transmission fluctuation spectrometry in time domain [J]. J University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26(6): 503-508.
陈俊,沈建琪.时间域内的消光起伏光谱法[J].上海理工大学学报,2004,26(6):503-508.
- 6 Chen Anshi, Hao Jiming, Zhou Zhongping, et al.. Theoretical solutions for particulate scintillation monitors [J]. Opt Commun,

- 1999, 166(1-6): 15-20.
- 7 Chen Anshi, Hao Jiming, Zhou Zhongping, *et al.*. Particulate concentration measured from scattered light fluctuations[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(10): 689-691.
 - 8 Ting-I Wang, G R Ochs, R S Lawrence. Wind measurements by the temporal cross-correlation of the optical scintillations[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(23): 4073-4081.
 - 9 Liu Helai, Zeng Zongyong, Liu Wenqing. The study of stack gas velocity measurement using optical signal cross-correlation method[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(6): 920-925.
刘和来, 曾宗泳, 刘文清. 光学信号互相关法烟气流速测量的研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(6): 920-925.
 - 10 Ralph Roberson. Status of EPA's Continuous Particulate Mass (PM) Monitor Demonstrations [OL]. <http://www.rmb-consulting.com/denpaper/rldenpa.htm>, 1977.
 - 11 Dyn Optics Systems Ltd. DSL-5000 Particulate Monitor-Instruction Manual [OL]. <http://www.airmet.com.au/admin/Products/DownloadProductFile.aspx?FileTitle=Brochure&-uniqueName=dsl-5000.pdf>
 - 12 Zhang Chunxiang, Yang Lin, Hui Hongchao, *et al.*. Repeatability of transmittance and reflectance measurement of two path and correlation system[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0908008.
张春香, 杨琳, 惠宏超, 等. 双光路自相关系统透反射率的重复精度测试[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0908008.
 - 13 Rao Ruizhong. *Light Propagation in Turbulent Atmosphere*[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005. 60.
饶瑞中. *光在湍流大气中的传播*[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005. 60.
 - 14 Wang Wenhui. *Research of Large Diameter Pipe Flow Measurement* [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011. 13-16.
王文辉. *大管径管道流量测量方法研究*[D]. 北京: 华北电力大学, 2011, 13-16.
 - 15 Li Xuebin, Gong Chunwen, Li Chao, *et al.*. Retrieving mass concentration of aerosol particles using dual-scattering-angle optical particle counter [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(6): 444-447.
李学彬, 宫纯文, 李超, 等. 利用双角度光学粒子计数器测量大气气溶胶质量浓度[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(6): 444-447.
 - 16 Huang Yinbo, Huang Honglian, Han Yong, *et al.*. Measurement and model analysis of the aerosol optical properties in the regions of Hefei and southeast coast [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 423-433.
黄印博, 黄红莲, 韩永, 等. 合肥、东南沿海地区气溶胶光学特性测量及模式分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(6): 423-433.

栏目编辑:何卓铭