

基于后向光散射的无组织排放颗粒物质量浓度 远程测量方法

汪文涛^{1,2}, 周骛^{1,2*}, 蔡小舒^{1,2}, 秦金为^{1,2}, 黄玉虎³, 石爱军³

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093;

²上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;

³北京市环境保护科学研究院, 北京 100037

摘要 针对目前尚无有效测量建筑工地等无组织排放源排放的颗粒物质量浓度的方法的问题, 提出基于后向光散射的无组织排放颗粒物质量浓度远程测量方法, 其测量结果为柱形光束段的颗粒物质量浓度平均值。建立后向散射光能与颗粒物质量浓度、测量距离的理论模型, 搭建以半导体激光器为光源和以互补金属氧化物半导体 (CMOS) 图像传感器为探测器的便携式测量装置, 开发了图像处理程序。通过标定实验验证了颗粒物质量浓度与系统输出值之间的线性关系, 并得到了标定曲线。实验分析了较大颗粒的粒径及测量距离在 100 m 以内的变化对测量结果的影响。同时选取无组织排放源进行现场模拟测试。结果表明: 基于新方法的实验测量装置可应用于开放场地无组织排放气团中颗粒物柱浓度的远程估测。

关键词 大气光学; 后向光散射; 无组织排放; 质量浓度; 远程测量

中图分类号 X831

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1201001

Remote Measurement Method for Mass Concentration of Fugitive-Dust-Emission Particulate Based on Backward Light Scattering

Wang Wentao^{1,2}, Zhou Wu^{1,2*}, Cai Xiaoshu^{1,2}, Qin Jinwei^{1,2}, Huang Yuhu³, Shi Aijun³

¹ School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093, China;

² Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering,
Shanghai 200093, China;

³ Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China

Abstract A remote measurement method for the mass concentration of fugitive-dust-emission particulate based on backward light scattering is proposed to overcome the problem that there is no effective measurement method for the mass concentration of particulates from open and fugitive-dust-emission sources such as construction sites. The measurement result of the proposed method is the average mass concentration of particulates of the cylindrical beam segment. The established theoretical model takes into account the backscattered light energy, mass concentration of particulates, and measuring distance. A portable measuring device is developed using a semiconductor laser as a light source and complementary metal oxide semiconductor image sensor as a detector, as well as an image processing program. The linear relationship between the mass concentration of particulates and output value of the system is verified by calibration experiments, which renders the calibration curve. Effects of large particle size and measuring distance changing within 100 m on the measurement results are compared and analyzed. At the same time, the fugitive emission source is selected for actual measurement. The results show that the experimental measurement device based on the new method can be applied to the remote estimation of the mass concentration of particulates in the fugitive emission air mass in the open field.

Key words atmospheric optics; backward light scattering; fugitive dust emission; mass concentration; remote

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-07-21; 录用日期: 2019-08-14

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0211500)、国家自然科学基金(51576130)

* E-mail: zhouwu@usst.edu.cn

measurement

OCIS codes 010.1350; 010.1120; 280.3640; 040.1520

1 引言

颗粒物无组织排放是指工业产生的颗粒物不通过排烟筒或者通过低矮排烟筒的无规则排放^[1-2]或者农业生产过程中产生的颗粒污染物排放等。前人的初步调查表明,颗粒物无组织排放源具有小而散、排放不规律、质量浓度范围广、瞬发性强的特点^[3],与有组织排放(如电厂烟囱的颗粒物排放)相比,无组织排放颗粒物质量浓度的监测和治理难度更大。

目前,取样法是国内无组织排放颗粒物质量浓度的标准测量方法^[4]。北京市环境保护科学研究所的薛亦峰等^[5]和樊守彬等^[6]利用取样法对建筑施工扬尘和道路扬尘进行监测,得到了扬尘的排放特征以及排放因子等参数。取样法测量原理简单,技术比较成熟,作为一种标准的测量方法得到广泛应用。然而,这种方法前期准备时间长,操作繁琐且费时,且容易受到天气的影响,测量精度较低,不能实现在线实时监测。光透射法(消光法)是一种比较先进的测量无组织排放的方法。国外已有学者提出利用基于光透射法的光学遥感技术研究大型军事演习活动造成沙尘等无组织颗粒物排放的排放因子^[7]。国内的石鹏等^[8]提出一种利用消光法测量无组织排放烟羽不透光度的方法。光透射法测量无组织排放颗粒物质量浓度的原理简单,技术也比较成熟。但是当颗粒物质量浓度较低时,散射光的信号衰减不大,在测量过程中需要利用障碍物(建筑外墙或反射镜等)进行信号标定,故光透射法不适用于测量开放场地和野外的无组织排放源的颗粒物质量浓度。

激光的后向散射特性在测量大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的质量浓度方面有着广泛的应用。胡森等^[9]利用激光雷达的后向散射信号计算了当地大气中 PM_{2.5} 的质量浓度,但这种方法需要假设大气在水平方向是均匀的。张辉等^[10]利用自行研制的激光雷达系统对 PM_{2.5} 质量浓度进行探测,拟合了 PM_{2.5} 质量浓度与气溶胶后向散射系数之间的吸湿因子。虞历尧等^[11]利用瑞利-拉曼-米(Rayleigh-Raman-Mie)激光雷达探测了南京地区气溶胶的后向散射系数。

本文利用颗粒物对激光的后向散射特性建立了后向散射理论模型,以互补金属氧化物半导体

(CMOS)相机作为散射光信号接收装置,研制了一套便携式无组织排放颗粒物质量浓度测量的装置。开发了无组织排放颗粒物质量浓度在线测量系统,并通过实验证实了该方案的可行性。这为开放场地或野外的无组织排放颗粒物质量浓度监测提供了一条新途径。

2 基本原理

2.1 测量原理

工业源中无组织排放颗粒物的粒径主要在几微米到几十微米之间,颗粒粒径变化范围大,且颗粒物形貌复杂。非球形颗粒的计算很复杂,为了简化,假设无组织排放颗粒物为球形颗粒,根据 Mie 理论,单个球形颗粒的散射光强为^[12]

$$I_s = \frac{\lambda^2 I(z)}{8\pi^2 z^2} [i_1(\theta, m, D, \lambda) + i_2(\theta, m, D, \lambda)], \quad (1)$$

式中: $I(z)$ 为入射光强; λ 为波长; z 为散射光观察点与散射颗粒之间的距离; θ 为散射角; m 为颗粒相对于周围介质的折射率; D 为被测颗粒的粒径; i_1 和 i_2 均为散射强度函数。

将 CMOS 相机和激光器并排放置,如图 1 所示。当激光器照射排放颗粒时,被测颗粒对入射激光产生散射作用。相机接收柱状光束段颗粒群的某个立体角 ω 内的散射光,这些散射光经过镜头会聚后成像为明亮清晰的光斑,如图 2 所示。由于测量距离较远,将该系统近似简化为同轴采光方式^[13]。

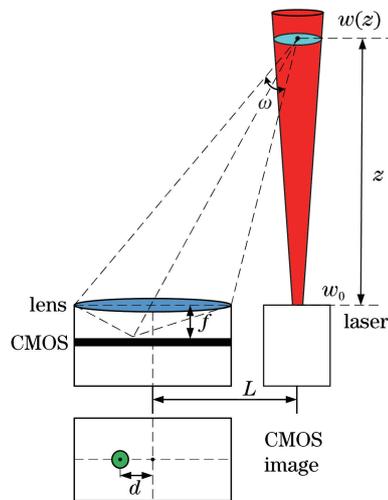


图 1 后向光散射原理图

Fig. 1 Principle of backward light scattering

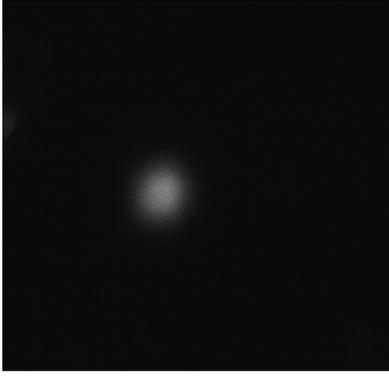


图 2 散射光斑图像

Fig. 2 Image of scattered spot

根据同轴光通量的计算方法,单个颗粒的单位立体角的散射光能为^[14]

$$dF = \frac{\lambda^2 I(z)}{8\pi^2} [i_1(\theta, m, D, \lambda) + i_2(\theta, m, D, \lambda)] d\omega, \quad (2)$$

式中: $d\omega$ 为单位立体角, $d\omega = dS \cdot z^{-2}$ 。整理(2)式,可得到相机接收到单个颗粒的散射光能为

$$F = \frac{\lambda^2 I(z)}{8\pi^2 z^2} [i_1(\theta, m, D, \lambda) + i_2(\theta, m, D, \lambda)] S_0, \quad (3)$$

式中: S_0 为相机镜头面积。在实际测量中,激光光束并不完全准直,而是随着传输距离的增加呈一种扩散的趋势。设激光在空气中的传输距离为 z ,结合激光在大气中的消光定律和简单的几何关系可以得到在截面 z 处的平均入射光强为

$$I(z) = I_0 \left[\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 \exp[-\mu(\lambda)z], \quad (4)$$

式中: I_0 为激光器出射的光强,即入射光强度; ω_0 为激光在激光器出口处的束腰半径; $\omega(z)$ 为在 z 处的光束半径; $\mu(\lambda)$ 为大气消光系数。

将(4)式代入(3)式,可以得到 z 处的单个颗粒散射光能为

$$F(z) = \frac{\lambda^2 I_0 S_0}{8\pi^2 z^2} [i_1(\theta, m, D, \lambda) + i_2(\theta, m, D, \lambda)] \left[\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 \exp[-\mu(\lambda)z]. \quad (5)$$

在颗粒物无组织排放中,颗粒物质量浓度较低且颗粒粒径较小,因此假设颗粒的散射属于不相关单散射^[15],即颗粒物的总散射光强是每个颗粒散射光强的叠加。无组织排放颗粒物的粒径分布较宽,其粒径分布很难用某一特定分布函数表示,因此本研究采用平均粒径的方法对无组织排放颗粒粒径进行分析。当测量区域颗粒物数目为 N 时,

根据(5)式可得 CMOS 相机接收到测量区域内所有颗粒的总散射光能为

$$E(z) = N \cdot \frac{\lambda^2 I_0 S_0}{8\pi^2 z^2} [i_1(\theta, m, D, \lambda) + i_2(\theta, m, D, \lambda)] \left[\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 \exp[-\mu(\lambda)z], \quad (6)$$

式中: $N = 6VA \cdot (\pi\rho D^3)^{-1}$, $V = \pi\omega(z)^2 t$ 为测量区域体积, t 为测量区域的厚度, A 为颗粒物质量浓度, ρ 为颗粒物密度。

激光在大气传输的过程中,大气气溶胶对激光具有耗散作用。这种耗散作用主要与能见度、激光波长以及传输距离有关,一般大气消光系数的经验公式为^[16]

$$\mu(\lambda) = \frac{3.192}{V_m} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{1.3}, \quad (7)$$

式中: V_m 为能见度。本研究选取能见度 V_m 为 10 km,激光波长为 0.658 μm ,计算得到相应的消光系数为 0.2528。当最大传输距离为 100 m 时,激光在大气中传输的最小透射率为 97.5%。由此可见,在一定的测量范围内,大气气溶胶对激光的耗散作用不大,因此本研究忽略大气气溶胶对激光的衰减。

在实际测量中,散射角 θ 、入射光波长 λ 、入射光强度 I_0 、激光器端口处的束腰半径 ω_0 以及相机镜头的面积 S_0 均为定值。对于某一处的无组织排放源,颗粒物密度 ρ 可以取为 $2.5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[17]。假设颗粒在测量区域内分布均匀且组分不发生突变,则颗粒相对周围介质的折射率 m ,颗粒粒径 D 均保持不变。测量区域的厚度 t 为

$$t = \Delta z \cdot \Delta x, \quad (8)$$

式中: Δz 为当测量距离 z 时系统的距离分辨率; Δx 为图像中光斑沿竖直方向上的像素个数。实际测量时,需要将不同厚度下的散射光能折算到单位厚度下的散射光能。

定义参数

$$K_1 = \frac{3\lambda^2 \omega_0^2 I_0 S_0}{4\pi^2 D^3 \rho} [i_1(\theta, m, D, \lambda) + i_2(\theta, m, D, \lambda)], \quad (9)$$

则(6)式可以简化为

$$E(z) = \frac{K_1 t}{z^2} A. \quad (10)$$

(10)式与文献[18]中结果相吻合。通过调节相机曝光时间可以控制图像的灰度饱和状态,进而可以增大测量范围的上下限。图像灰度值与光强之间

的关系为

$$G = K_2 \cdot E(z) \cdot \tau, \quad (11)$$

式中: G 为图像平均灰度值; K_2 为相机的响应系数; τ 为相机曝光时间。

将(10)式代入(11)式中,整理可得到

$$\frac{G \cdot z^2}{\tau t} = K_1 K_2 A. \quad (12)$$

当曝光时间 τ 、测量距离 z 以及测量区域厚度 t 已知时,图像的平均灰度值 G 和单位体积的颗粒物质量浓度 A 线性相关。这里将 $Gz^2/(\tau t)$ 称为相对灰度值。

由(12)式可知,相对灰度值是测量距离 z 的函数。根据相机的成像原理,距离相机不同距离处的颗粒系的散射光斑在相机系统中成像的位置是不同的,即可以通过成像光斑的相对位置得到测量距离。根据相机成像的几何光学原理,成像光斑质心距离 CMOS 中心的像素个数 Δy 与测量距离 z 之间的关系可简化为

$$\Delta y = f \tan \alpha - \frac{Lf}{z}, \quad (13)$$

式中: L 为相机轴与激光器间的距离; f 为相机镜头焦距; α 为激光器轴与水平位置的夹角。

2.2 图像处理流程

针对上述无组织排放颗粒物质量浓度测量过程,运用一定的图像处理算法对采集得到的图像进行处理:1)对采集到的散射光斑图像进行去除背景噪声处理,运用阈值法来提取图像边缘,并建立掩模,分别得到内部灰度的平均值 G 以及光斑的质心坐标,同时也得到光斑区域的长轴和短轴的像素个数;2)根据标定的质心坐标与测量距离的关系曲线计算得到测量距离 z ,根据光斑区域长轴和短轴的距离差以及在一定测量距离下的距离分辨率计算得到测量区域的厚度 t ,再根据相机的曝光时间计算得到相对灰度值 $Gz^2/(\tau t)$;3)根据标定的相对灰度值与质量浓度的关系曲线计算得到被测颗粒系的质量浓度 A 。具体的处理流程如图 3 所示。

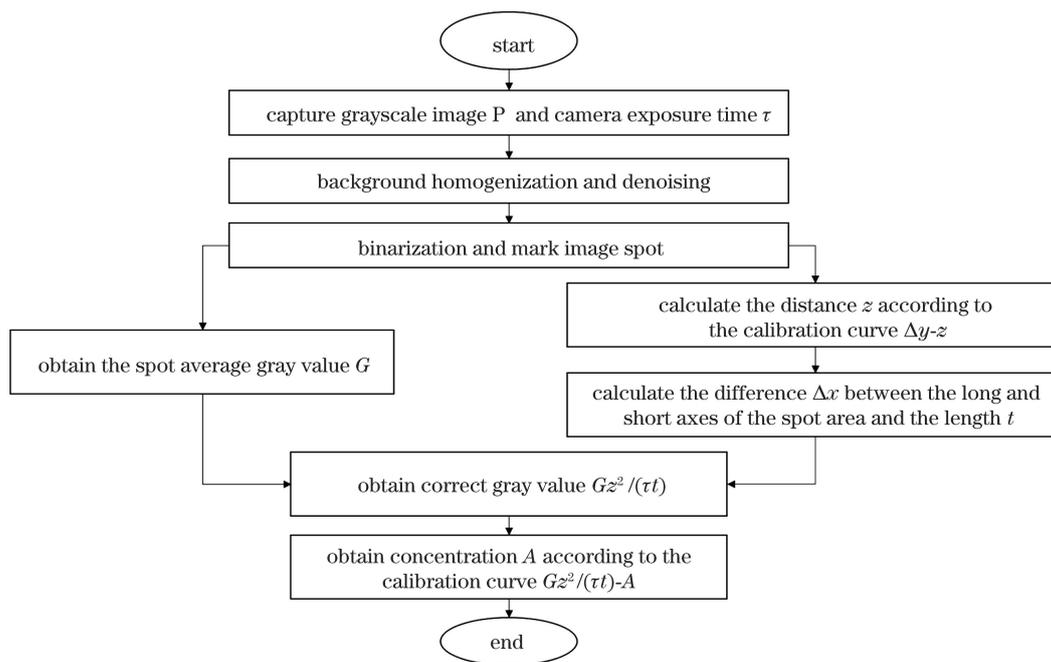


图 3 图像处理流程图

Fig. 3 Flow chart of image processing

3 测量系统及装置

无组织排放颗粒物质量浓度测量系统主要是由 CMOS 相机、可充电锂电池、偏振片以及半导体激光器(波长为 658 nm,功率为 50 mW)组成。相机与激光器并排布置,调整相机轴与激光器轴之间的距离,以保证激光的散射信号在相机视场中。调节相机的对焦功能,确保散射信号可在视野中清晰地

成像。测量装置如图 4 所示。相机采用德国 IMAGINGSOURCE 公司生产的 30×电动变焦的工业相机,型号为 DFKZ30GP031,镜头最大焦距为 129 mm,对焦范围为 0 到无穷远,像元大小为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ 。该相机的 CMOS 传感器和镜头内嵌在一起,可用软件调节相机参数。相机可以输出格式为 16 bit 的灰度图像,即使颗粒物的质量浓度较高,也不会因为散射光强信号太强而导致图像

灰度值溢出,所以可以有效提高颗粒物质量浓度测量的精度,扩大测量范围。偏振片可以有效地减弱环境杂散光的干扰。该测量仪器设计巧妙,结构紧凑,体积小,便于携带,操作方便。



图 4 便携式无组织排放颗粒物测量仪器实物图
Fig. 4 Photograph of portable measuring device for fugitive-dust-emission particulate

4 实验结果与分析

4.1 质量浓度标定结果

根据前文介绍的颗粒物质量浓度的测量原理,在光学平台上搭建颗粒物无组织排放测量实验装置。该装置主要由便携式颗粒物无组织排放测量仪器、透明玻璃容器以及计算机组成。在实验室环境中,空气中无组织排放颗粒物质量浓度及其空间分布的均匀度很难控制,故将不同质量浓度的颗粒均匀悬浮在水中,以模拟无组织排放颗粒物的分布情况。采用 CMOS 相机接收激光入射水中颗粒的散光信号。根据 Mie 散射理论,颗粒的散射光强与介质中颗粒的相对折射率有关。无组织排放颗粒物的主要成分为二氧化硅,其在空气中的相对折射率约为 1.45。实验所采用的标定颗粒为聚苯乙烯颗粒,其体积平均粒径为 $10\ \mu\text{m}$,在水中的相对折射率为 1.2,与空气中的无组织排放颗粒物的相对折射率较为接近,因此聚苯乙烯颗粒可以用来模拟无组织排放颗粒。

实验前对聚苯乙烯颗粒进行超声分散,并对定量配制的溶液进行充分搅拌,使聚苯乙烯颗粒能够均匀分布在测量区域。为减少环境中杂散光的干扰,实验在黑暗的环境下进行。在实验中,固定相机镜头到玻璃水槽的距离为 1 m,玻璃水槽的长和宽均为 0.2 m,即为测量区域的厚度。调整焦距和对焦面,使图像可以在 CMOS 芯片上清晰成像。调整相机曝光时间,确保图像的灰度值未饱和,设置相机

曝光时间 τ 为 20 ms,帧率为 15 frame/s,对每种质量浓度的溶液拍摄 60 张散射图像,采集图像时间为 4 s。

采集得到的颗粒后向散射图像如图 5 所示,图像中上、下两个明亮的光斑为激光照射在玻璃容器的前、后壁面上产生的反射光斑,此现象在实际测量过程中是不会出现的。两个明亮光斑中间的灰色区域即为玻璃容器中颗粒物的散射光斑,如图 5 中的四边形区域所示。提取每张图像的中间灰色区域的灰度平均值,对采集到的 60 张图像求和再取平均。采用最小二乘法对经过曝光时间、测量距离以及测量区域厚度修正后的相对灰度值与颗粒物的质量浓度进行拟合,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,相对灰度值与颗粒物的质量浓度呈正比关系,与理论推导的结果保持一致,得到的拟合公式为 $Gz^2/(\tau t) = 0.6251 \cdot A + 8.4096$,拟合因子 R^2 在 0.98 以上。

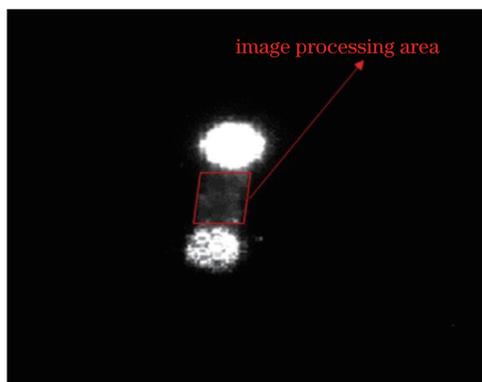


图 5 典型颗粒物后向光散射图像
Fig. 5 Typical image of backward light scattering of particulate

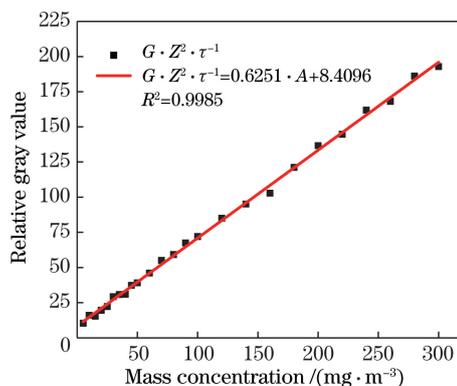


图 6 浓度与相对灰度值拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve of concentration and relative gray value

理论上,散射光的能量与质量浓度的拟合曲线的截距应该为 0,即当颗粒物质量浓度为 0 时,散射

光强也应该为 0。但是在实际测量中,溶液中存在杂质颗粒、环境中的杂散光、CMOS 相机的噪声及暗电流等因素都会影响散射光的信号,导致图 6 中拟合曲线的截距大于 0。

4.2 测量距离的影响

将漫反射板放置在不同距离处,利用光学漫反射板产生的反射光斑作为比较稳定的测量对象。调整合适的曝光时间,保证 CMOS 相机接收到的散射光信号未饱和。保持相机焦距不变,调整对焦面,使图像能够在 CMOS 上清晰地成像。采集图像,同时记录下漫反射板与测量仪器间的距离,逐渐增加测量距离,直至测量距离为 100 m。实验选在夜间室外进行。

通过图像处理得到不同距离处漫反射板反射光斑的平均灰度值,测量结果如图 7 所示。由理论推导可知,相机所接收的光强与测量距离的平方成反比。在图 7 中,纵坐标为修正灰度值,横坐标为测量距离。可以看出,在经过测量距离的修正之后,测量值始终在平均值上下波动。理论上,图中各点应该落在一条水平线上。但是,在每次实验过程中,漫反射板与测量系统的相对位置未能完全相同。此外,测量过程中仍然存在杂散光。这些因素导致测量值在平均值附近波动。

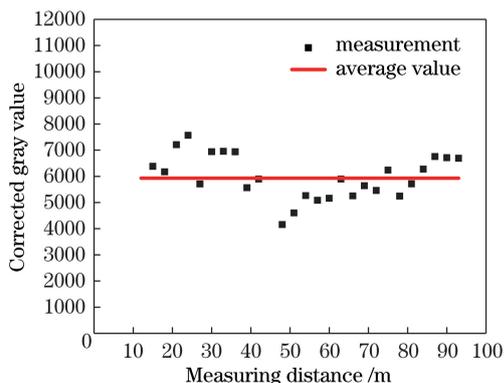


图 7 修正灰度值与测量距离的关系

Fig. 7 Corrected gray value as a function of measuring distance

提取不同测量距离下图像光斑在 CMOS 上的质心坐标,得到质心坐标到 CMOS 中心的像素个数 Δy 。通过拟合可得到 Δy 与测量距离的倒数 z^{-1} 之间的关系,如图 8 所示。拟合结果与(13)式相符合,拟合得到的二者之间的关系为 $\Delta y = 381.32 - 1614.7 \cdot z^{-1}$,拟合因子在 0.99 以上。在此基础上,只需要知道光斑的质心坐标便可以根据拟合公式计算得到所对应的测量距离。当测量距离在 0.1 ~

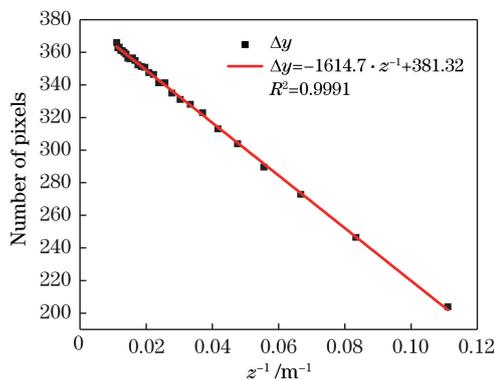


图 8 测量距离标定曲线

Fig. 8 Calibration curve of measuring distance

100 m 范围内时,该拟合公式都是适用的。

实际上,CMOS 是由一系列具有一定大小的像元组成的。当两个成像光斑之间的距离小于或等于一个像元尺寸时,相机便不能将这两个光斑区别开来,此时这两个光斑之间的实际距离叫作测量系统的距离分辨率。通过计算得到:测量系统在 100 m 时,距离分辨率达到最大,最大值为 5 m。由于距离分辨率的存在,测量距离的误差最终会导致颗粒物质量浓度的计算误差,由原理推导公式可知,相机所接收的散射光强与测量距离的平方呈反比,故可以通过理论计算得到由测量距离误差导致的颗粒物质量浓度的相对误差,表达式为

$$\Delta = \frac{|z^2 - (z + \Delta z)^2|}{z^2}, \quad (14)$$

式中: Δz 为距离分辨率(可以由图 8 中的拟合公式求导得到)。计算得到不同测量距离下由距离分辨率导致的测量结果的相对误差如图 9 所示。从图 9 可以看出,当光斑质心到 CMOS 的中心距离增大时,即当测量距离增大时,其引起的相对误差增大,最大相对误差不超过 10%。

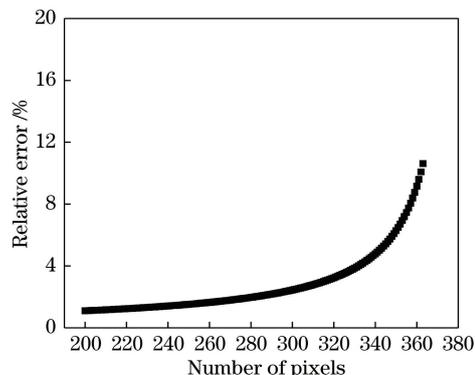


图 9 颗粒物质量浓度的相对误差与距离分辨率之间的关系
Fig. 9 Relative error of mass concentration of particulates as a function of distance resolution

4.3 颗粒粒径的影响

在无组织排放中,测量的位置主要位于排放源的出口附近,其中较大粒径的颗粒还未来得及沉降,故无组织排放中颗粒物的粒径分布较为广泛。文献[19-20]表明,无组织排放颗粒的粒径主要在 $0.01\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间,其中粒径的峰值大部分集中在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间。因此,研究颗粒物粒径,特别是较大颗粒物粒径,对散射光强的影响十分必要。

通过理论模拟得到颗粒系的后向散射光强与颗粒系的平均粒径之间的关系如图 10 所示。图 10 中的曲线表明:在相同的质量浓度下,当粒径在 $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ 之间时,颗粒物粒径的变化对散射光强的影响较大;当颗粒物粒径大于 $10\ \mu\text{m}$ 时,随着颗粒粒径的逐渐增大,散射光强的变化较小。因此,可认为无组织排放中大颗粒的粒径变化对测量结果的影响不大。

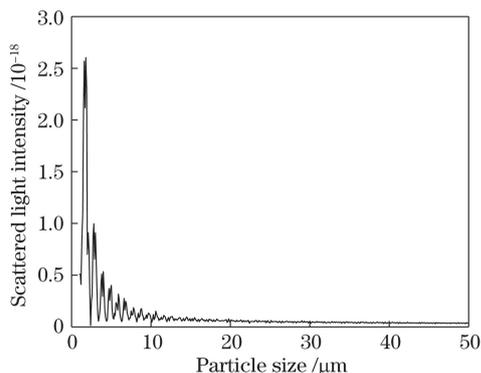


图 10 颗粒粒径与散射光强关系曲线

Fig. 10 Particle size as a function of scattered light intensity

采用平均粒径为 $20\ \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯颗粒,配制一系列已知浓度的样品溶液以模拟不同质量浓度的无组织排放烟尘,利用上述测量装置进行测量。根据图 6 中标定曲线,得到不同质量浓度的测量值及相对误差,如图 11 所示,其中平均误差为 6.67% ,最大误差不超过 20% 。

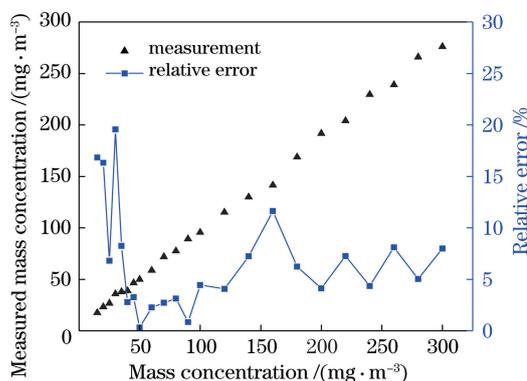


图 11 质量浓度测量结果及相对误差

Fig. 11 Measurement results of mass concentration and relative error

4.4 无组织排放源测量结果

测量地点选择在上海市某工业厂区内,将测量装置放置于地面,利用该测量系统对厂区内某低矮排气筒的烟尘废气从产生到消散的变化过程进行测量。

测量时间选择在夜晚,测量位置为无组织排放源出口位置。测量装置距离楼房的水平距离为 $100\ \text{m}$,楼房的高度为 $15\ \text{m}$,计算得到实际的测量距离为 $101\ \text{m}$ 。测量仪器的曝光时间为 $826\ \text{ms}$,采集一段时间内的所有图像。图 12(a)为无组织排放源排放的颗粒物的后向散射光斑图像,图 12(b)为相同曝光时间下激光在大气传输中的背景图像,两种情况下图像的灰度值均未达到饱和。分别对每张图像进行处理,图像处理的软件平台为 MATLAB R2014b,硬件平台为普通个人计算机(CPU 主频为 $2.40\ \text{GHz}$,内存为 $8\ \text{GB}$),处理每张图像可得到一个数据,用时 $0.04\ \text{s}$ 。统计得到该段时间内该无组织排放源产生颗粒物质量浓度的变化情况如图 13 所示。该曲线较好地反映了无组织排放源在该时间段内颗粒物质量浓度由低逐渐升高随后又逐渐降低的过程,即表示了烟尘从产生到最终消散的整个变化过程。在该时间段内,颗粒物质量浓度的最大值为

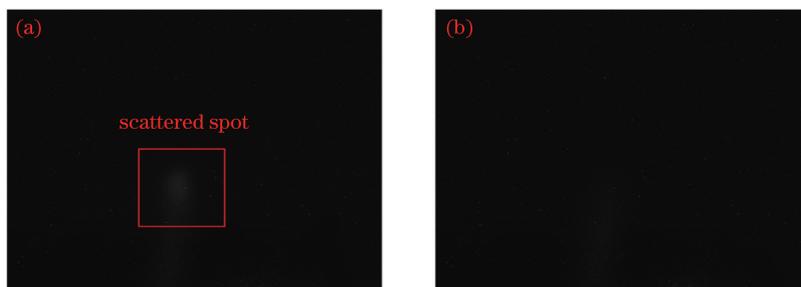


图 12 采集图像。(a) 无组织排放颗粒物散射光斑图像;(b) 背景图像

Fig. 12 Collected images. (a) Image of scattered spot of fugitive-dust-emission particulate; (b) image of background

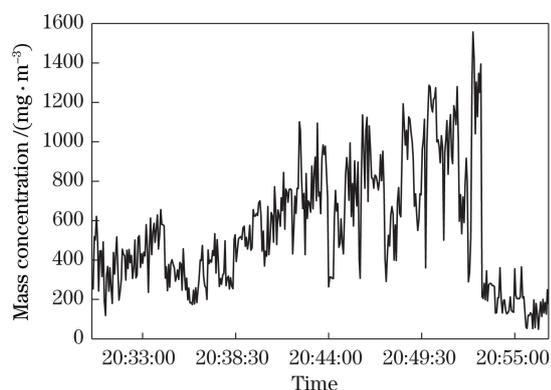


图 13 无组织排放质量浓度测量结果

Fig. 13 Measurement results of mass concentration for fugitive dust emission

1556 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 最小值为 $50\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为 $556\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由于测量时外界风向多变, 测量所得颗粒物质量浓度的曲线产生了一定幅度的波动。实际测量结果表明, 该测量系统可对质量浓度变化较大的无组织排放颗粒进行实时在线测量。

5 结 论

提出了一种能够实时远程在线测量无组织排放颗粒物质量浓度的方法。与传统测量方法相比, 该测量方法具有测量装置简单、操作方便以及可远程实时测量等优点, 为开放场地或野外无组织排放颗粒物烟羽快速监测提供了一条新途径。所检测信号体现柱形光束段测量区域的颗粒物的后向光散射总体效应, 通过标定对应到该区域颗粒物质量浓度。理论推导的结果显示相对灰度值与颗粒物的质量浓度呈正比关系。通过实验对上述理论推导的结果加以验证。拟合得到相对灰度值与颗粒物质量浓度之间的关系式, 理论分析并且实验验证了测量距离和颗粒粒径对测量结果的影响。选取无组织排放源进行实际测量, 测量得到某一时段该无组织排放源的最高浓度是最低浓度的 30 倍之多, 单个数据处理时间仅需 0.04 s。实地测量的结果表明该测量系统可以实现对质量浓度变化较大的无组织排放颗粒物烟羽远程实时测量。

在实际测量中, 由于不同种类的无组织排放颗粒物折射率不同, 目前尚无一种全面的拟合模型。在下一步工作中, 将充分调研无组织排放颗粒物的种类, 建立不同的拟合模型。同时, 将与其他仪器的测量结果进行比较, 确定本文所提方法的不确定度, 使其测量结果更加严谨、准确。

参 考 文 献

- [1] National environmental protection agency. Integrated emission standards for atmospheric pollutants: GB 16297-1996 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997.
国家环境保护总局. 大气污染物综合排放标准: GB 16297-1996 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [2] National environmental protection agency, Compilation of air and waste gas monitoring and analysis methods. Air and waste gas monitoring and analysis method [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.
国家环境保护总局, 空气和废气监测分析方法编委会. 空气和废气监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [3] Che F, Zhang G N, Gu Y Y, *et al.* Study on domestic and foreign fugitive emission standards of particulate matters for industrial sources [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, 9(6): 34-40.
车飞, 张国宁, 顾闫悦, 等. 国内外工业源颗粒物无组织排放控制标准研究 [J]. 中国环境管理, 2017, 9(6): 34-40.
- [4] National environmental protection agency. Technical guidelines for fugitive emissions monitoring of air pollutants: HJ/T 55-2000 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
国家环境保护总局. 大气污染物无组织排放监测技术导则: HJ/T 55-2000 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [5] Xue Y F, Zhou Z, Huang Y H, *et al.* Fugitive dust emission characteristics from building construction sites of Beijing [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2231-2237.
薛亦峰, 周震, 黄玉虎, 等. 北京市建筑施工扬尘排放特征 [J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2231-2237.
- [6] Fan S B, Yang T, Wang K, *et al.* Methods and application of road fugitive dust emission factor localization [J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1664-1669.
樊守彬, 杨涛, 王凯, 等. 道路扬尘排放因子建立方法与应用 [J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1664-1669.
- [7] Varma R M, Hashmonay R A, Du K, *et al.* A novel method to quantify fugitive dust emissions using optical remote sensing [M] // Kim Y J, Platt U. Advanced environmental monitoring. Dordrecht: Springer, 2008: 143-154.
- [8] Shi P, Du K. Laser measuring method and device for opacity of particulate matter plume: 201110442838.2 [P]. 2013-07-03.

- 石鹏, 杜可. 无组织排放颗粒物烟羽不透光度的激光测量方法和装置: 201110442838.2[P]. 2013-07-03.
- [9] Hu M, Xie J L, Wu D F, *et al.* Measurement of PM 2.5 concentration based on the charge-coupled device backward scattering lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0201002.
胡淼, 谢家亮, 吴端法, 等. 基于 CCD 后向散射激光信号的 PM 2.5 测量研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0201002.
- [10] Zhang H, Tao Z M, Ma X M, *et al.* Fitting of hygroscopic factor between PM_{2.5} mass concentration and aerosol backscattering coefficient in Hefei area [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0704006.
张辉, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 合肥地区 PM_{2.5} 质量浓度与气溶胶后向散射系数之间吸湿因子的拟合 [J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0704006.
- [11] Yu L Y, Cao N W, Shen J. Detection of tropospheric aerosol optical properties by Rayleigh-Raman-Mie lidar in the northern suburb of Nanjing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110102.
虞历尧, 曹念文, 沈吉. Rayleigh-Raman-Mie 激光雷达探测南京北郊对流层气溶胶光学特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110102.
- [12] Wang N N. Measurement techniques for optical particle sizing and its applications [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000: 145-148.
王乃宁. 颗粒粒径的光学测量技术及应用 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 145-148.
- [13] Wang J H, Xu G D, Wang N N. Mathematical model of calculating the flux of laser scattering by single particle in arbitrary directions [J]. *Applied Laser*, 1995, 15(2): 79-80, 78.
王建华, 徐贯东, 王乃宁. 单个颗粒激光散射在任意方向光通量计算的数学模型 [J]. *应用激光*, 1995, 15(2): 79-80, 78.
- [14] Pike E R. The theory of light scattering [M]// Cummins H Z, Pike E R. Photon correlation and light beating spectroscopy. NATO advanced study institutes series (series B: physics). Boston, MA: Springer, 1974, 3: 9-39.
- [15] Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation [M]. New York: Academic Press, 1969: 20-53.
- [16] Li L F. The study of atmospheric aerosol particles scattering impact on laser propagation in the atmosphere [D]. Taiyuan: North University of China, 2013: 46-53.
李丽芳. 大气气溶胶粒子散射对激光大气传输影响的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013: 46-53.
- [17] Shi P, Du K, Mu C, *et al.* Measurement method of fugitive dust mass emissions from construction activities using vertical-scanning lidar system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0301005.
石鹏, 杜可, 穆超, 等. 垂直扫描激光雷达观测建筑场地无组织扬尘方法 [J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0301005.
- [18] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [19] Wang Z, Hua L, Hu Y Q, *et al.* Diameter distribution of particles from fugitive emission sources in Beijing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(2): 75-78.
王铮, 华蕾, 胡月琪, 等. 北京市无组织排放源颗粒物的粒度分布 [J]. *中国环境监测*, 2007, 23(2): 75-78.
- [20] Huang Y M, Shu J, Gu Y. Comparison of two analysis methods of fugitive road dust size in Shanghai city [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2007(6): 37-43.
黄嫣旻, 束炯, 顾莹. 上海道路扬尘粒径两种分析方法的比较 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2007(6): 37-43.