

基于激光散射和显微放大的颗粒浓度检测装置

李娜, 文斌, 熊荣

(成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:中国近年来工业化建设加快了雾霾的生成,雾霾大大影响着人们的健康、生活和出行。当前最为严重的就是环境污染中的大气颗粒物排放的增加,加剧了雾霾天气的形成。因此颗粒物浓度的高低是评判空气质量好坏的一项重要指标。为获取更精准的空气品质参数,对空气中颗粒浓度进行实时监测是十分必要的。为此,设计了一款基于激光散射和显微放大的颗粒浓度检测装置,该装置以 Mie 散射作为理论基础,光源是半导体激光器,光照射颗粒产生的散射光在显微设备放大后进一步分析获得微粒的性质信息,同时光电传感器吸收散射光,最后由脉冲信号和光学信号共同反演出颗粒物质量浓度。对实验结果进行对比分析可知:设计的装置精准度和稳定性都能满足要求,能准确测量大气中颗粒物浓度,可实现颗粒物浓度的实时检测。

关键词:颗粒浓度检测;激光散射;显微放大;脉冲信号

中图分类号:TH741

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.03.008

0 引言

近年来,随着社会的发展、工业化建设的加快,空气污染问题慢慢突显,对人体健康、经济发展、天气气候都造成了不同程度的危害。雾霾天气是由大气颗粒物污染产生的,而形成雾霾天气的主要颗粒物是可吸入颗粒物^[1-2]。雾霾天气使能见度降低,影响视野可见度^[3]。

PM_{2.5} 即粒径小于2.5 μm的颗粒物,在这个范围及以下的可吸入颗粒物长期吸入会引发各种呼吸道疾病^[4-5]。北京监测的是PM_{2.5},并根据PM_{2.5}浓度的高低来确定该区域空气质量情况。传统的颗粒物检测方法有:筛分法、滤膜称重法^[6]、沉降法、电感应法和压电晶体法^[7]等,每一个测量方法都存在各自的优缺点。传统的检测方法所使用的仪器都比较庞大,不利于实时在线测量。而国外的一些激光粒度仪造价十分昂贵,也不便于大范围的使用。因此,开发出一种小体积、低成本、高精度的颗粒浓度检测装置十分必要。

提出一种激光散射和显微放大相结合的颗粒浓度检测装置。对直径在1~15 μm的颗粒进行光散射从而产生脉冲高度,通过显微放大后直接观测颗粒物大致的形态特征。最后将获取到的光度测量值以及计算过的脉冲信号进行分析处理,即可推出颗粒物的质量浓度。

1 激光散射基本原理

空气中分布着多种颗粒物,颗粒物粒径远小于入射光波长的微粒造成的散射称为瑞利散射^[8],这时向前散

射与向后散射形成左右对称。当颗粒物粒径与入射光波长相当的微粒造成的散射称为 Mie 散射^[9],此时向前的散射成分增加,向后的散射成分减少。Mie 散射适用于较大的颗粒物散射,采用650 nm波长的激光光源用来观测1~15 μm的颗粒物,完全满足 Mie 散射条件。

1.1 Mie 散射理论

当一束波长为λ的激光照射到距离其l米远的一个球型颗粒时,该颗粒产生的散射光强为 I_s ^[10],其运算关系如下:

$$I_s = \frac{\lambda^2 I_0 (i_1 + i_2)}{8\pi^2 l^2} \quad (1)$$

其中 I_0 为入射光强,l为激光与散射体的距离,θ为散射角。 i_1 和 i_2 分别为散射光在垂直和水平两个方向上的强度函数。

$$\begin{cases} i_1 = |S_1(m, \theta, \alpha)|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)(a_n \Pi_n + b_n T_n)}{n(n+1)} \right|^2 \\ i_2 = |S_2(m, \theta, \alpha)|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)(a_n T_n + b_n \Pi_n)}{n(n+1)} \right|^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中α为颗粒的尺度参数描述,其计算公式为 $\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$,r为颗粒的半径。m为颗粒的相对复折射率。 S_1 和 S_2 分别是散射光在垂直和水平方向上的复振幅函数。 Π_n, T_n 称为角散射系数,它们只与散射角θ有关。 a_n, b_n 称为米氏散射系数。

1.2 米氏散射系数求解

a_n, b_n 称为米氏散射系数,其计算公式如下:

$$a_n = \frac{\varphi_n(\alpha) \varphi'_n(m\alpha) - m \varphi'_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)}{\xi_n(\alpha) \varphi'_n(m\alpha) - m \xi'_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)} \quad (3)$$

$$b_n = \frac{m\varphi_n(\alpha)\varphi'_n(m\alpha) - \varphi'_n(\alpha)\varphi_n(m\alpha)}{m\xi_n(\alpha)\varphi'_n(m\alpha) - \xi'_n(\alpha)\varphi_n(m\alpha)}$$

(4)

其中 $\varphi_n(\alpha), \xi_n(\alpha)$ 分别为 Bessel 函数和 Hankel 函数^[11], 已知初始值 $\varphi_0(\alpha) = \sin\alpha, \varphi_1(\alpha) = \frac{1}{x}\sin\alpha - \cos\alpha, \xi_0(\alpha) = \sin\alpha + i\cos\alpha, \xi_1(\alpha) = \frac{1}{x}\sin\alpha - \cos\alpha + i(\frac{\cos\alpha}{\alpha} + \sin\alpha)$ 。再根据以下递推公式即可算出 a_n, b_n 。

$$\varphi_n(\alpha) = \frac{2n-1}{\alpha}\varphi_{n-1}(\alpha) - \varphi_{n-2}(\alpha)$$

(5)

$$\varphi'_n(\alpha) = \varphi_{n-1}(\alpha) - \frac{n}{\alpha}\varphi_n(\alpha)$$

(6)

$$\xi_n(\alpha) = \frac{2n-1}{\alpha}\xi_{n-1}(\alpha) - \xi_{n-2}(\alpha)$$

(7)

$$\xi'_n(\alpha) = \xi_{n-1}(\alpha) - \frac{n}{\alpha}\xi_n(\alpha)$$

(8)

1.3 米氏角散射系数求解

Π_n, T_n 称为米氏角散射系数, 已知初始值 $\Pi_0=0, \Pi_1=1, T_0=1$, 其计算公式如下:

$$\Pi_n(\cos\theta) = \frac{(2n-1)\cos\theta}{n-1}\Pi_{n-1}(\cos\theta) - \frac{n}{n-1}\Pi_{n-2}(\cos\theta)$$

(9)

$$T_n(\cos\theta) = n(\cos\theta)\Pi_n - (n+1)\Pi_{n-1}$$

(10)

即将 a_n, b_n, Π_n, T_n 代入公式(1), 只需知道颗粒物的粒径大小即可获得其散射光强的角分布量^[12], 再根据算法演算, 最终得到该颗粒物的散射光强与粒径的关系。

2 方案设计

2.1 系统总体设计

基于激光散射和显微放大的颗粒浓度检测装置主要是对颗粒的浓度测量以及直接观察颗粒物的形态特征。相较于传统的间接观测, 该装置采用了直接观测法对微粒进行定性定量研究。图 1 为系统的总体设计, 共由 6 个部分组成, 包括颗粒检测装置、CCD 传感器^[13]、光电二极管、放大电路、A/D 转换电路以及 PC 机。

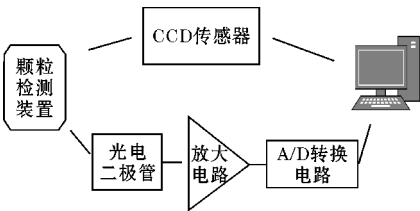


图 1 系统的总体设计

由图 1 可知, 颗粒检测装置分别通过 CCD 传感器和光电二极管将获得光学信号以及脉冲信号上传至

PC 端进行统计分析, 光电二极管通过放大电路将采集到的微弱信号进行放大处理, 为了方便实验计算, 需要将获取到的模拟信号转化成数字信号, 即通过 A/D 转换电路实现转化^[14]。对数据进行滤波、计算和查表后, 将被测颗粒的数据信息在 PC 端上显示出来。再结合 CCD 传感器通过显微放大后获取到的光学信号, 从而获取到被测颗粒的浓度信息。

2.2 改进前的颗粒浓度检测装置

改进前的颗粒浓度检测装置如图 2 所示。该装置根据所测颗粒物的粒径大小, 最终选择波长为 650 nm 的半导体激光, 选择半导体激光器的原因是因为其相较于 He-Ne 激光器^[15]成本低, 与白色光源相比其光敏区光强比较均匀。激光通过准直镜和聚焦镜穿过样本池, 样本池通过抽气装置使颗粒能够自由地穿过腔体。连接着聚焦镜和光阑的光电二极管会接收颗粒产生的散射光, 多余的散射光则会被光吸收单元吸收。然后光电二极管在经过放大和模数转换最终获取到被测颗粒的浓度信息。

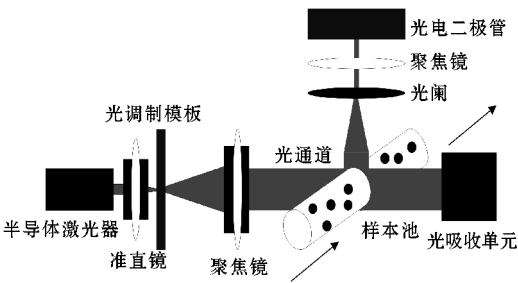


图 2 改进前的颗粒浓度检测装置

2.3 改进后的颗粒浓度检测装置

改进后的颗粒浓度检测装置如图 3 所示, 该装置采用的光源仍然是波长为 650 nm 的半导体激光器。相对于改进前的颗粒浓度检测装置, 增加了一个采集装置, 该采集装置是由显微镜和 CCD 传感器构成。改进前的检测装置只能获取到颗粒的浓度信息, 改进后的检测装置在之前的基础上不仅可以获得颗粒的浓度信息, 还可以方便研究人员直接通过 PC 机看到颗粒穿过微粒腔时留下的光影信息。CCD 捕捉到放大后粒子图像, 然后经过图像处理获取到更准确的数据。

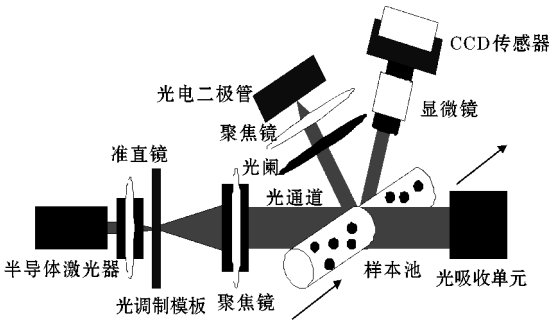


图 3 改进后的颗粒浓度检测装置

3 结果分析

3.1 脉冲信号分析

实验采用的颗粒浓度范围是 40 ~ 1400 mg/m³, 根据浓度范围提取了几个样本浓度分别为 40 mg/m³, 100 mg/m³, 300 mg/m³, 400 mg/m³, 570 mg/m³, 780 mg/m³ 以及 1336 mg/m³。由于光电二极管采集到的信号中会有杂散光和电噪声引起的背景噪声。如图 4 所示, 此时试验的浓度为 100 mg/m³, 由于颗粒物浓度过低再加上噪声的影响, 光电二极管接收到的散射光信号极少, 只有几个脉冲信号, 这是由粒径较大的颗粒物产生。

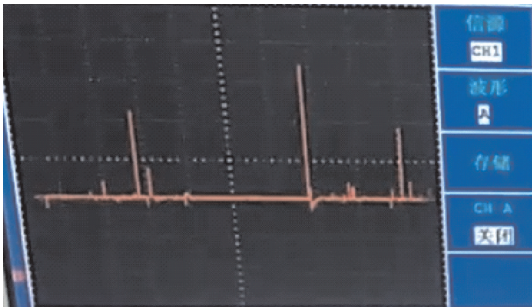


图4 颗粒浓度为 100 mg/m³ 的脉冲信号

为进一步观测颗粒通过光电传感器产生的脉冲信号, 分别提高颗粒浓度为 780 mg/m³ 及 1336 mg/m³, 此时可以清楚地看见脉冲信号振幅情况。实验结果如图 5 和图 6 所示。在高浓度下, 测量光度信号可以直观地看出脉冲信号的变化, 在低浓度下, 只有粒径较大的

颗粒可以被检测出来; 当浓度提高, 噪声对颗粒散射光的影响仍然存在, 但可暂时忽略不计。

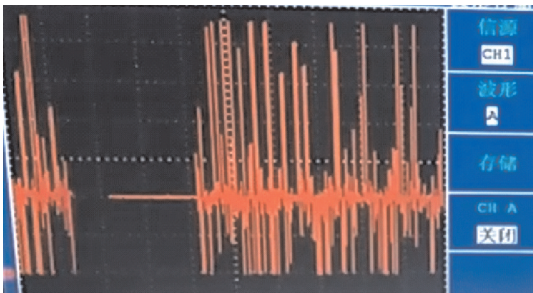


图5 颗粒浓度为 780 mg/m³ 的脉冲信号

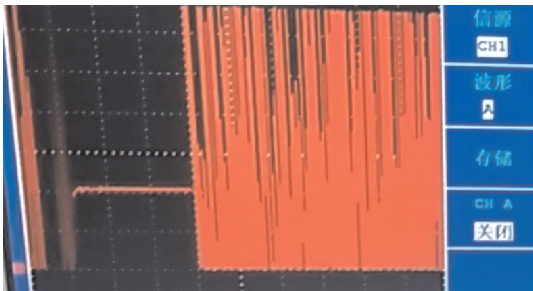


图6 颗粒浓度为 1336 mg/m³ 的脉冲信号

3.2 颗粒浓度测量结果与稳定性分析

由于易受空气中微小颗粒物的影响, 实验在完全封闭的试验箱中进行。为验证实验结果的准确性, 以“攀腾”公司的浓度检测仪作为标准, 对不用浓度的颗粒物进行测量。随着时间推移, 颗粒浓度逐渐减小, 可以直观地检测出微粒的浓度值。与“攀腾”检测仪器的颗粒浓度测量结果对比如表 1 所示。

表1 与“攀腾”颗粒浓度测量结果对比

| 自研仪器 | | | | “攀腾”仪器 | | | |
|------|----------------------------|------|----------------------------|--------|----------------------------|------|----------------------------|
| 时间/s | 颗粒物浓度/(mg/m ³) | 时间/s | 颗粒物浓度/(mg/m ³) | 时间/s | 颗粒物浓度/(mg/m ³) | 时间/s | 颗粒物浓度/(mg/m ³) |
| 1 | 1752 | 25 | 1137 | 1 | 1960 | 25 | 1098 |
| 5 | 1844 | 30 | 973 | 5 | 2047 | 30 | 947 |
| 10 | 1537 | 40 | 547 | 10 | 1480 | 40 | 530 |
| 20 | 1325 | 60 | 283 | 20 | 1380 | 60 | 288 |

由表 1 可知, 前 10 s 内两种仪器测量结果相差偏大, 但在 10 s 之后趋于平稳。这种偏差出现的原因在于实验仪器在刚开始测量时启动较慢, 尚未对试验箱中的颗粒物进行检测。但此情况对实验结果影响不

大, 最终结果与“攀腾”检测仪测量的结果基本一致。为了测量该仪器的稳定性, 进行了 4 次试验并与“攀腾”公司的浓度检测仪作对比, 其稳定性测量结果如表 2 所示。

表2 颗粒浓度检测仪稳定性对比

| 时间/s | 1#自研仪器稳定系数 | 2#自研仪器稳定系数 | 3#自研仪器稳定系数 | 4#自研仪器稳定系数 | “攀腾”仪器稳定系数 |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 10 | 72 | 72 | 69 | 74 | 70 |
| 25 | 76 | 72 | 69 | 72 | 72 |
| 45 | 75 | 73 | 70 | 76 | 72 |
| 60 | 72 | 71 | 71 | 72 | 70 |

结果显示所得结果在一个稳定的区间波动,与“攀腾”浓度检测仪的误差相差不大。因此提出的测量方法完全可以在工业上应用,并且满足造价低、精度高等要求。

4 结束语

设计了一款结合激光散射和显微放大的颗粒浓度检测装置,以颗粒物的散射信号作为依据,由脉冲信号和光学信号共同反演出颗粒物质量浓度。通过与“攀腾”公司的浓度检测仪对比分析:文中设计的装置在精准度和稳定性方面都能满足要求,对大气中颗粒物浓度能准确测量,并为环境保护做出一定的贡献。

此外,根据实验过程分析,装置在光吸收单元仍有待提高。今后,将重点对杂散光吸收做进一步完善,再结合视角识别算法来进行优化,并选用多种不同的颗粒物来实验,以提高该装置的精确度。

致谢:感谢成都市科技局科技项目(2019-YF05-00919-SN)对本文的资助

参考文献:

- [1] Michael B, Cabmen A, Teresa I F, et al. Air pollution and retained particles in the lung[J]. Environmental Health Perspectives, 2001, 109(10): 1039-1043.
- [2] 潘本锋,汪巍,李亮,等.我国大中型城市秋冬季节雾霾天气污染特征与成因分析[J].环境与可持续发展,2013,38(1):33-36.
- [3] 张大年.城市大气可吸入颗粒物的研究[J].上

海环境科学,1999(4):154-157.

- [4] 张鑫鹏,贺庆,刘佳,等.光度计与颗粒计数相结合的颗粒质量浓度检测方法研究[J].半导体光电,2018,39(3):431-434.
- [5] 陈敏燕,黄依璐,樊劫,等.环境PM_{2.5}对慢性阻塞性肺疾病的致病机制研究[J].健康研究,2019(5):537-541.
- [6] 冯健儿,韩鹏.基于滤膜称重法的大气颗粒物自动监测仪[J].计算机与现代化,2013(7):94-97.
- [7] 陈绍娟.石英压电晶体法测定大气飘尘浓度[J].环境科学与技术,1985(1):19-20.
- [8] 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.
- [9] 周鑫.光散射法PM_{2.5}传感器的性能比对及优化[J].环境与健康杂志,2016,33(8):739-743.
- [10] 林宏.海洋悬浮粒子的米氏散射特性及布里渊散射特性研究[D].武汉:华中科技大学,2007:23-24.
- [11] 谢家亮.激光散射信号与大气颗粒测量技术研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2016.
- [12] 项建胜,何俊华. Mie 光散射理论的数值计算方法[J].应用光学,2007(3):363-366.
- [13] 沈飘海.基于FPGA的线阵CCD图像采集与处理系统设计[D].武汉:湖北工业大学,2017.
- [14] 蒋云志,周汉义,占小奇.一种单片机双极模拟信号A/D转换的电路设计[J].电子科技,2014,27(4):121-123.
- [15] 左春英,张欣艳,陈佰树,等. He-Ne 激光辐照种子光强的研究与设计[J].新农业,2017(7):4-6.

Particle Concentration Detection Device based on Laser Scattering and Microscopic Amplification

LI Na, WEN Bin, XIONG Rong

(College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In recent years, China's industrialization has accelerated the formation of haze, which greatly affects people's health, life and travel. At present, the most serious problem is the increase of atmospheric particulate matter emission in environmental pollution, which aggravates the formation of haze weather. Therefore, the concentration of particulate matter is an important index to judge the quality of air. In order to obtain more accurate air quality parameters, it is necessary to monitor the concentration of air particles in real time. To this end, the paper designed a particle concentration detection device based on laser scattering and microscopic magnification, the device is based on the theory of the Mie scattering, whose source is semiconductor laser light source, scattered light produced by the scattered light particles can furtherly analyze the characteristics and information of particles after amplifying by micro devices. At the same time, the photoelectric sensor is absorbing scattered light, and the quality concentration of particle is inverted by the pulse signal and the optical signal finally. A comparative analysis of the experimental results shows that the device designed in this paper can meet the requirements in terms of accuracy and stability, accurately measure the concentration of particles in the atmosphere, and realize real-time detection of the concentration of particles.

Keywords: particle concentration detection; laser light scattering; microscopic magnification; the pulse signal