

基于光散射法强度调制的颗粒物浓度检测技术研究

任宇超, 张 荣*

长春理工大学物理学院/光波导实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月21日

摘 要

颗粒物浓度的实时、准确测量一直是国内外研究的热点, 尤其在环境监测、工业排放和车间生产中, 抗干扰和低浓度颗粒物的有效检测技术越来越受到关注。本文提出了一种基于光散射法强度调制的颗粒物检测方法, 以解决外界环境光干扰问题。通过理论分析, 探讨了颗粒物粒径、光源波长和散射角度对散射光强度与分布的影响。在光散射法的基础上, 采用650 nm激光作为光源, 构建了光强度调制颗粒浓度检测系统。系统通过压控恒流源对激光进行12 Hz的强度调制, 并通过锁相放大器锁定同频信号并滤除散射信号。对粒径为1 μm 的单分散 SiO_2 粉末进行了浓度为25~17,500 mg/m^3 范围内的散射实验。实验结果表明, 与传统检测方法相比, 该系统显著降低了外界环境光对检测结果的干扰。

关键词

颗粒物检测, 光散射法, 光强度调制, 质量浓度

The Research on Particulate Matter Concentration Detection Technology Based on Light Scattering Intensity Modulation

Yuchao Ren, Rong Zhang*

Optical Waveguide Laboratory, School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

Real-time and accurate measurement of particulate matter concentration has been a hot research

*通讯作者。

文章引用: 任宇超, 张荣. 基于光散射法强度调制的颗粒物浓度检测技术研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 369-379. DOI: 10.12677/jsta.2025.133036

topic both domestically and internationally, especially in environmental monitoring, industrial emissions, and workshop production. Effective detection of low-concentration particles and anti-interference technology have garnered increasing attention. This paper proposes a particulate matter detection method based on light scattering intensity modulation to address the issue of external light interference. The theoretical analysis explores the effects of particle size, light source wavelength, and scattering angle on the intensity and distribution of scattered light. Based on the light scattering method, a particulate concentration detection system is constructed using a 650 nm laser as the light source. The system modulates the laser intensity at a frequency of 12 Hz using a voltage-controlled constant current source, and a phase-locked amplifier is used to lock the same-frequency signal and filter out scattering signals. Scattering experiments were conducted with monodisperse SiO₂ powder of 1 μm particle size in a concentration range of 25~17,500 mg/m³. The experimental results show that, compared to traditional detection methods, this system significantly reduces the interference of external environmental light on the detection results.

Keywords

Particulate Matter Detection, Light Scattering Method, Light Intensity Modulation, Mass Concentration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科学技术的进步和发展,在工业、气象、医学等领域中与颗粒相关的技术问题越来越受到科技人员的重视,大气颗粒物浓度水平与居民健康紧密相关[1][2],对颗粒物浓度的检测技术方法和种类层出不穷[3]-[7]。检测方法多种多样,如滤膜称重法、 β 射线等技术,但由于采样时间长、操作复杂等因素,并不适合作为颗粒物实时连续监测。同时,一些常见的颗粒物测量技术通常只针对实验室条件下研究使用,对于各种复杂的检测环境,其抗干扰性、准确性和检测范围往往无法满足检测需求,如差分迁移率法等。光散射法因其高灵敏度、低检测下限、测量速度快和实时性好等优点在环境、材料、化工等领域中被广泛应用[8][9]。但当前传统测量方法由于受到环境光中相同波长光的干扰,通常将检测系统置于密闭小空间内,尽量减少背景光的干扰,这种方法虽然有效阻隔了环境光的干扰,但无法在开放性环境中进行检测,使得检测应用受限。为了满足多环境检测需求,开放式的颗粒物浓度检测有重要的研究意义。本文针对多环境下颗粒物浓度检测需求,基于Mie式散射理论和强度调制技术提出了开放式强度调制颗粒物检测方法,拟通过对不同质量粉末的配比来模拟不同浓度的大气颗粒物,压控恒流源和信号发生器对激光进行强度调制后进行检测,最后利用锁相放大器对检测信号进行过滤,在开放式颗粒物检测中达到了较好的抗干扰目的,并有效提升了检测的浓度范围。

2. 基本原理

2.1. Mie 散射理论

光散射法利用特定波长激光照射在待测颗粒物上,散射光就涵盖了一些颗粒物的信息,散射光强与颗粒物质量浓度成正比,由于常见光源的波长与研究的微米量级的颗粒物粒径大小相当,Mie氏散射理论在这类颗粒物质量浓度的研究中得到了广泛应用[10][11]。

如图 1 所示, 入射光强为 I_0 , 波长为 λ 的光沿 z 轴入射, 一个均匀介质且表现为各向同性、粒径为 D 的球形颗粒位于坐标原点处。颗粒的粒径无量纲参量 $\alpha = \pi D/\lambda$ 。距离颗粒 r 的探测点 P , 探测点与颗粒连线与入射光方向夹角为散射角 θ 。则 P 点的散射光强 $I(\theta)$ 为[12]:

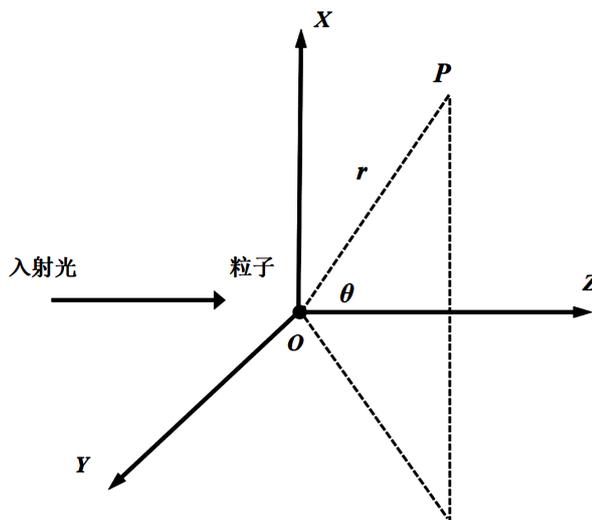


Figure 1. Schematic diagram of particle Mie scattering
图 1. 颗粒 Mie 散射示意图

$$I(\theta) = \frac{\lambda^2 I_0}{8\pi^2 r^2} [i_1(D, \lambda, m, \theta) + i_2(D, \lambda, m, \theta)] \quad (1)$$

颗粒粒径为 D 的单分散颗粒群, 假设散射区域内颗粒物总数为 N , 颗粒物的密度为 ρ , 散射区域体积为 V , 单分散颗粒群的散射光强可认为是单个颗粒物散射光强的 N 倍。颗粒物的质量浓度 C_m 为:

$$C_m = N \frac{\rho \pi \bar{D}^3}{6V} \quad (2)$$

则单分散颗粒群的散射光强可表示为:

$$I(\theta) = I_0 C_m \frac{3V \lambda^2}{4\pi^2 r^2 \rho \bar{D}^3} [i_1(D, \lambda, m, \theta) + i_2(D, \lambda, m, \theta)] \quad (3)$$

浓度和散射光强的关系为:

$$C_m = \frac{I(\theta) 4\pi^2 r^2 \rho \bar{D}^3}{3V \lambda^2 [i_1(D, \lambda, m, \theta) + i_2(D, \lambda, m, \theta)]} \quad (4)$$

由式(4)可知, 颗粒物的质量浓度与颗粒物的散射光强成正比。

2.2. 光强度调制

根据上述 Mie 式散射理论可知, 质量浓度结果应依据检测到的散射光进行分析, 能够准确有效的收集并过滤出散射信号就需要以光作为通讯载体并且抗干扰能力强的技术。能够准确有效的收集并过滤出信号就需要抗干扰能力强并且以光作为通讯载体的技术。光强度调制技术就是将传输的信息加载于激光辐射的过程, 波光信号强度随着所需频率而改变通过大气作为传输信道完成点到点的信息传输, 从而将检测到的散射光传输回来进行分析。

在发射端将调制信号注入驱动电源, 通过对电流的改变从而对激光器进行直接调制获得载波信号。根据傅里叶变换公式, 影响光波相位波形并使光子数改变与载流子数的改变都是因为调制电流的原因。但由于半导体激光器内存在本征谐振, 所以调制响应和频率有关。

把调制电流做反傅里叶变换, 代入 $\delta P_{(t)}$ 可得受调功率:

$$\delta P_{(t)} = \delta P_{(t)} \sin(\omega_m t + \theta_p) \quad (5)$$

Mie 式散射中入射光强的大小直接决定了散射光强, 而对于高斯光束, 光强在横截面上的分布是非均匀的, 通常有一个中心峰值, 然后随着离开中心逐渐减弱。对于理想的高斯光束, 光强分布 Γ_R 可以表示为:

$$I_{(r)} = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (6)$$

$I_{(r)}$ 是距离光束中心 r 处的光强, I_0 是光束中心处的最大光强, ω_0 是光束腰的半径。光束中心处的最大光强 I_0 可以通过激光器的输出功率也就是调制系统中受调功率 $\delta P_{(t)}$ 和光束腰半径 ω_0 来计算。光束中心处的最大光强就是 Mie 式散射中入射光强 I_0 , 其计算公式为:

$$I_0 = \frac{2\delta P_{(t)}}{\pi\omega_0^2} \quad (7)$$

在光电转化过程中 I_0 是以光子计算的光电探测器接收到的光强(即单位时间通过单位面积的光子数)也是经过散射后收集的散射光强。

$$I_0 = Nh\nu/At \quad (8)$$

其中 ν 代表光的频率, A 是照射区域面积, N 表示时间间隔 t 内照射到 A 上的光子总数。这个公式可以用来计算在某一特定方向上的光强。量子效率 η 表示每秒产生的光电子数与入射光量子的比值:

$$\eta = \frac{I_s/q}{N} \quad (9)$$

在发射端将调制信号注入驱动电源, 通过对电流的改变从而对激光器进行直接调制获得载波信号, 强度调制光通信系统中所采用的是正弦波调制。光强度随着调制信号的频率发生变化。光电转化过程中 I_0 是以光子计算的光电探测器接收到的光强(单位时间通过单位面积的光子数)也是经过散射后收集的散射光强。则光电探测器输出电流与光强之间的关系为[13]-[15]:

$$i_s = I_0\eta \frac{Atq}{h\nu} + n(t) \quad (10)$$

经过跨阻放大器[16]最终输出的电压信号为:

$$V_{out} = -\frac{K}{1+K} \frac{i_s R_f}{1 + \frac{R_f C_T}{K+1} S} \quad (11)$$

K 为跨阻增益, R_f 为反馈电阻, C_T 为电容, S 为拉普拉斯变换中的复频率变量。

V_{out} 经过混频和低通滤波器[17]输出的信号 V 与光强的关系可表示为:

$$V = -\frac{A}{1+A} R_f I_0 \eta \frac{Atq\lambda}{2hc} \cos(\phi) \quad (12)$$

3. 颗粒物散射特性分析

3.1. 粒径对光强分布的影响

由上述 Mie 式散射理论可知, 粒径和散射角度是导致散射光强产生变化的主要原因, 不同粒径在不同角度下的散射情况存在一定差异。下面对不同粒径在全角度的光强分布进行分析, 设定大气中颗粒以单分散颗粒群为主, 讨论散射光的特性。如图 2 所示为四种不同粒径($D=0.1\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$) 下的散射光强分布图。

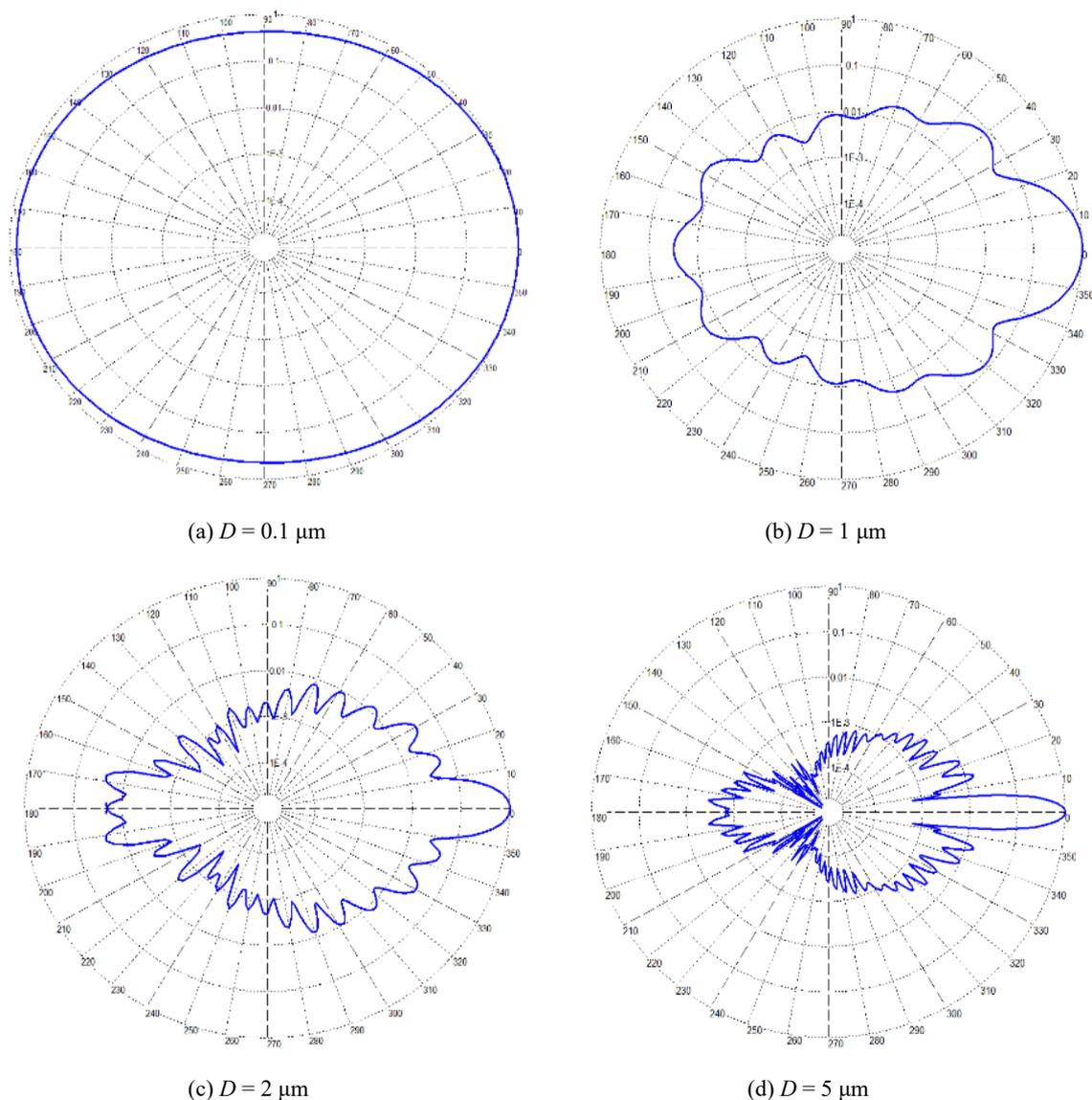


Figure 2. Scattering light intensity distribution map at different particle sizes
图 2. 不同粒径下散射光强分布图

可知在粒径较小时, 前向散射光强和后向散射光强差别较小, 光强分布趋于对称, 随着粒子粒径的增大, 光强分布的不对称性逐渐加强, 前向散射光强要比后向散射光强大的多, 并且散射光强越向前集中。

由此可知, 粒径对粒子散射光强的分布有较大的影响, 不同粒径粒子的散射光强分布情况不同, 粒径越大散射光强越大并且散射光强分布越靠前并且呈现极不均匀性。

3.2. 散射角度对光强分布的影响

当散射光强受粒径影响分布呈现极不均匀的情况下, 我们就需要对散射角进行进一步分析, 来确定合适的检测角度, 如图 3 所示为四种不同粒径($D=0.1\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$) 在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 的散射光强情况。

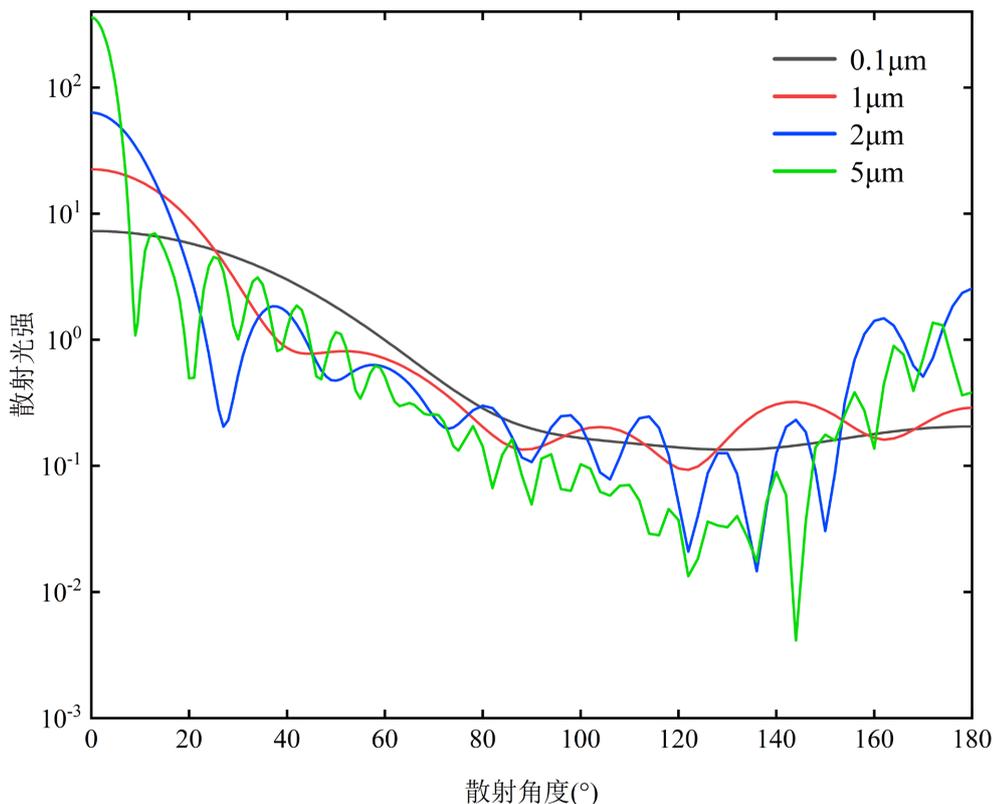


Figure 3. Scattering angle $0^\circ\sim 180^\circ$ distribution of light intensity in different particle sizes

图 3. 散射角度 $0^\circ\sim 180^\circ$ 中不同粒径散射光强分布图

由图可知当散射角度在 20° 之前, 散射光强随着粒径的增大而增大, 随着散射角度增加这种现象出现反转, 散射角从 40° 开始粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 时散射光强减弱并且逐渐小于粒径较小的颗粒, 并且在散射角到达 135° 时散射光强最低, 整体呈现中间低($60^\circ\sim 160^\circ$)两边高的特点, 而小粒径的散射光强分布较为均匀, 并没有发生振荡的现象, 从四种粒径整体来看, 前向散射远远大于其他方向散射光强度, 对于散射光强的大小前向散射($0^\circ\sim 20^\circ$)更适合作为检测角度。

4. 颗粒物质量浓度光学检测方法

通过上述分析来设计适用于颗粒物检测的方案, 对于不同粒径和角度的光强分布情况, 在粒径上我们选择粒径较小散射分布相对均匀的直径为 $1\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 颗粒物进行检测, 驱动电源通过对电流的改变从而对激光器进行直接调制获得载波信号, 散射角度上选择反射光干扰较小的 25° 向散射角。图 4 为检测系统框图。

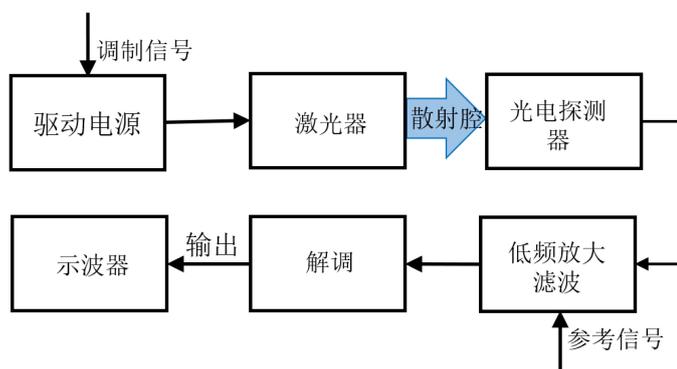


Figure 4. Schematic diagram of the light intensity modulation system
图 4. 光强度调制系统框图

4.1. 实验材料与装置

检测颗粒物浓度实验装置如图 5 所示。根据上文选择前侧向散射光较强并且光强分布均匀波长为 650 nm 的半导体激光器作为检测光源。通过压控恒流源 KW-BPVCCS0100 模块进行调制, 因为速度较高的内调制会使激光器会出现如弛豫振荡、自脉动以及多脉冲等很复杂的动态特性, 并且在调试过程中发现调制频率过高会导致度调制状态发生畸变, 最终选用符合器件的低频 12 Hz 作为光强度调制的调制频率。标准粉尘颗粒物选用超细试验粉尘型号为 SiO₂-P01 的二氧化硅超细实验室测试颗粒。散射区域为 10 mm 光程的比色皿容器, 利用凝胶为载体, 通过振荡和搅拌使粉尘颗粒物均匀分布在检测块中, 模拟粉尘颗粒在气体中的悬浮状态。通过颗粒物的透射光束经过透镜与光阑后压缩光斑[18]最后进入光陷阱, 最大程度地避免光束反射和杂散到探测区域[19], 光电探测器将收集到的光信号转化为电压信号, 实验通过光电探测器的电压信号来表征颗粒物的质量浓度。

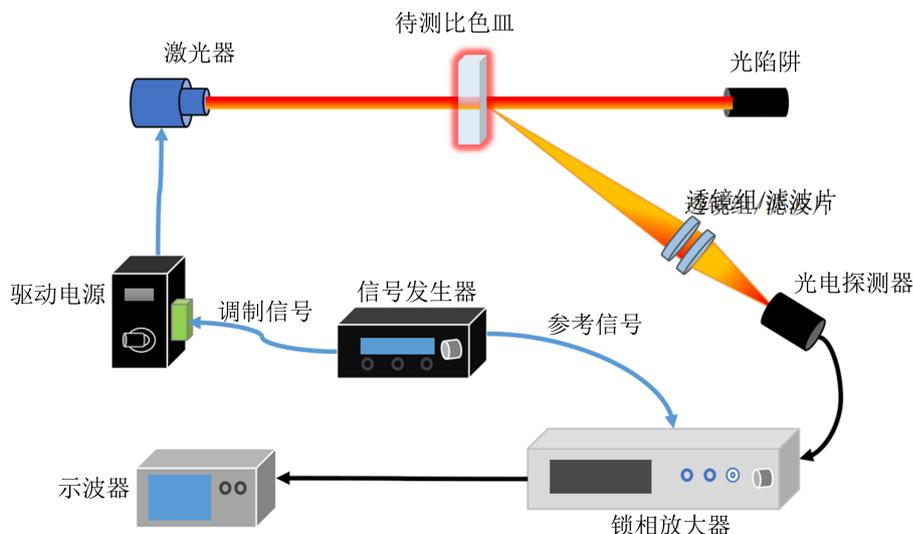


Figure 5. Schematic diagram of particulate matter detection system
图 5. 颗粒物检测系统示意图

将粒径为 1 μm 的 SiO₂ 颗粒搅拌至高透凝胶液中配置浓度为 1 mg/ml 作为原液, 再进行稀释配置成浓度梯度, 如表 1 所示。

Table 1. SiO₂ Concentration corresponding to different gradient numbers**表 1.** SiO₂ 不同梯度编号对应的浓度

浓度 mg/m ³	编号	0	1	2	3	4	5	6
低浓度	0	0	25	50	75	100	125	150
高浓度			1500	2000	2500	3000	3500	4000
极高浓度			5000	7500	10,000	12,500	15,000	17,500

4.2. 实验结果与分析

图 6(a)是经过光强度调制下波长为 650 nm 激光穿过浓度范围为 25~150 mg/m³ 不同浓度时光电探测器的电压与颗粒物质量浓度之间的关系, 纵坐标表示归一化的电压, 为了探究强度调制对检测抗干扰性和灵敏度的提升, 分析了有/无强度调制情况下探测器电压和颗粒物质量浓度的关系和关联度。图 6(b)分别展示了有强度调制、黑暗密闭环境下无强度调制和开放有环境光无强度调制情况下三种电压与质量浓度的相关性, 可以看出相同的有环境光并且开放环境下在加入强度调制后的电压和质量浓度关系呈现较好的线性关系, 并且上升趋势平稳均匀, 表现出了较好的相关性, 拟合度 R² 大于 0.98; 而未加入强度调制的电压检测到的电压均值较高, 这种情况归因于开放环境下, 环境中相同波长的光也混入了信号光中, 造成了检测光强要大于散射光强的现象, 另外一方面电压与浓度相关性很差, 在浓度逐渐增加的情况下电压出现了较大的波动, 这明显是外界环境光对检测造成了较大干扰, 破坏了光强与浓度的线性关系。

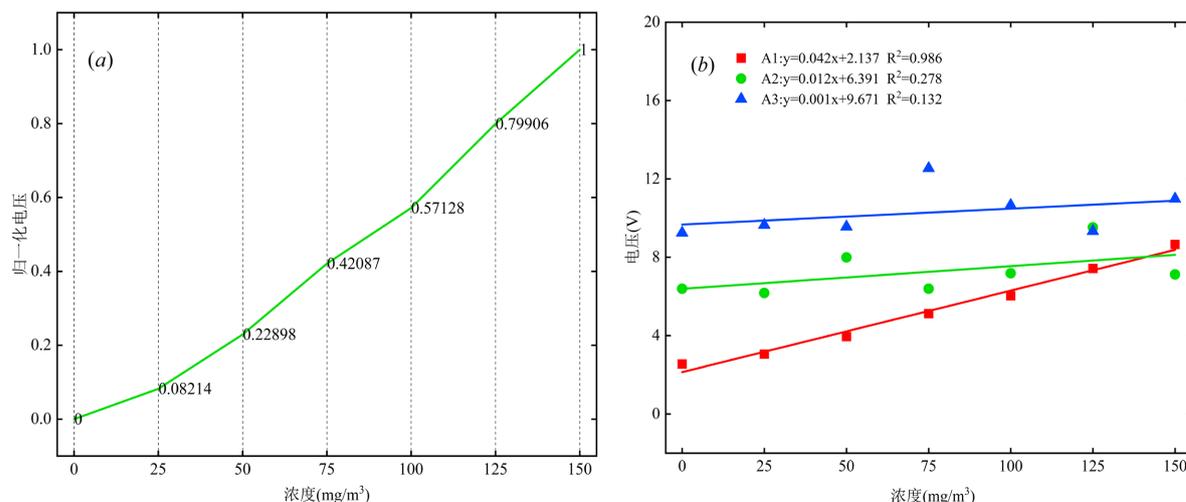


Figure 6. (a) Relationship between voltage signal of photodetector and mass concentration under intensity modulation, (b) Relationship between voltage signal and mass concentration under different detection methods

图 6. (a) 强度调制下光电探测器电压信号与质量浓度的关系, (b) 不同检测方式下电压信号与质量浓度的关系

而在暗黑环境无调制条件下检测数值与实际质量浓度的相关性依旧较差, 此时电压的变化呈现非线性, 且伴随浓度增加的响应不均匀, 反映出系统在无调制条件下对浓度变化的敏感性不足, 这说明未经过调制在检测中背景噪声、微弱杂散光对检测的影响较为明显, 探测器输出的不确定性也随之增加, 导致信号质量下降, 呈现不出较好的线性关系, 拟合度 R² 小于 0.3。这种结果表明, 该强度调制检测系统

可以对标准粉尘颗粒物的质量浓度进行测定, 并且对于检测有较好的抗干扰能力, 检测灵敏度较高, 系统的信号检测能力和稳定性受到显著提升。

为了验证系统的实际检测范围, 图 7(a)和图 7(c)分别展示了两种较高浓度范围下浓度和探测器电压的关系, 纵坐标表示各自归一化的电压, 图 7(b)和图 7(d)则分析了电压与实际浓度的相关性, 验证高浓度下的准确性。

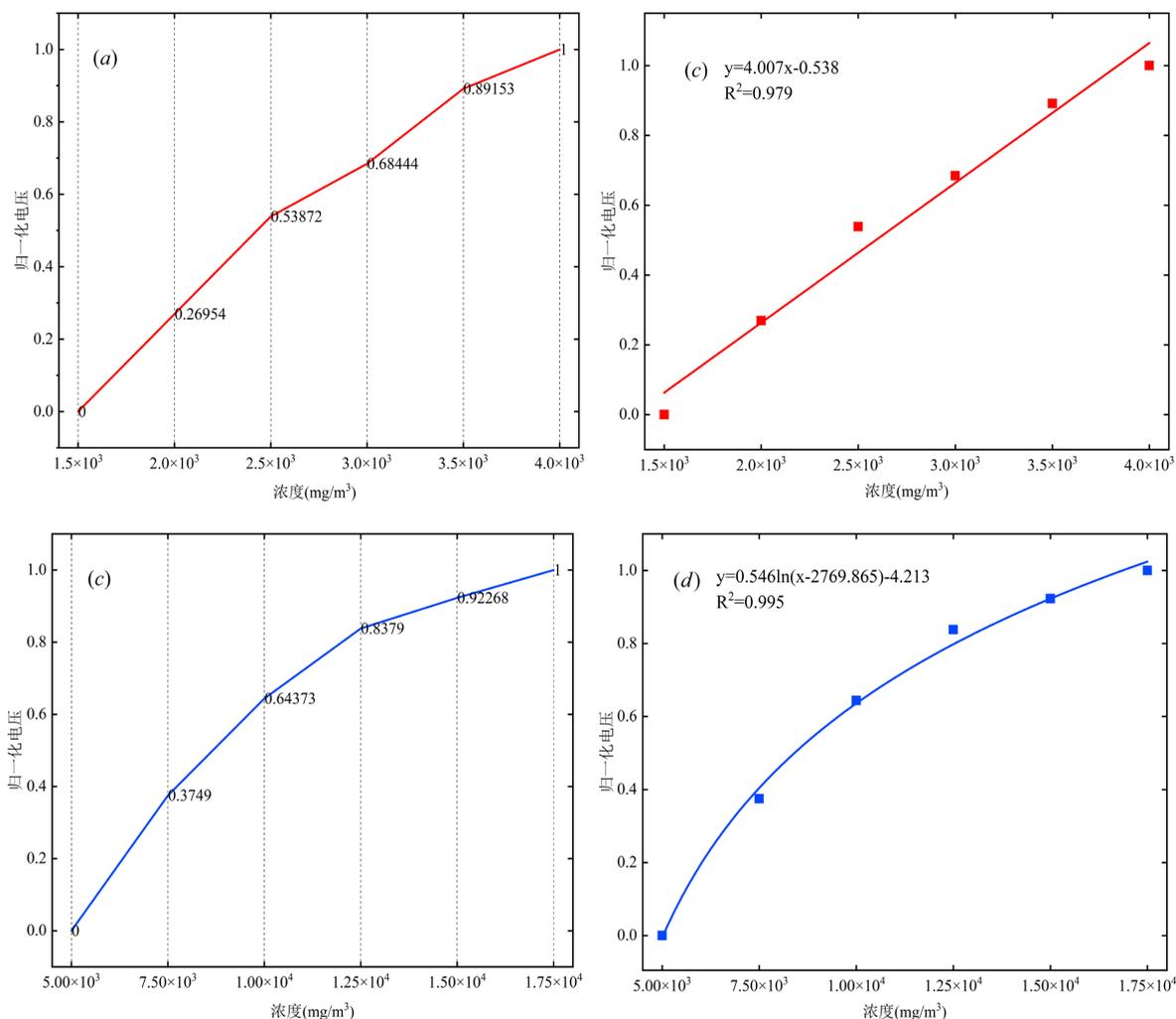


Figure 7. (a) and (c) Between the detector voltage and the mass concentration at different concentrations; (b) and (d) Correlation between voltage and mass concentration at different concentrations

图 7. (a) (c)不同浓度下探测器电压与质量浓度的关系; (b) (d)不同浓度下电压与质量浓度的相关性

可以看出浓度范围在 $1500\sim 4000\text{ mg/m}^3$ 时检测电压随着质量浓度的增大而增大, 并且呈现较好的线性关系, 线性拟合度 R^2 大于 0.97; 而在极高浓度范围 $5000\sim 17,500\text{ mg/m}^3$ 时, 随着浓度的上升电压增加的幅度逐渐下降, 上升趋势减弱, 整体呈现对数函数关系, 并不是中低浓度时的线性关系, 造成该现象的原因是由于随着颗粒物浓度的增加, 颗粒物之间距离逐渐减小, 导致部分散射光被其他颗粒物吸收或发生二次散射, 每个增加的颗粒对散射光强度的贡献变小, 削弱了散射光强度的增幅[20], 使得图 7(c)中电压增加逐渐减缓, 最终趋于饱和。选用粉尘质量浓度检测仪对实际配比的颗粒物粉尘进行检测, 与同范围浓度下的拟合曲线数值比较。

5. 结论

本文利用光散射法和光强度调制技术建立了颗粒物浓度检测系统, 首先从理论上分析了光强度调制、光电转化以及信号的相关解调的过程。并利用模拟仿真对光源波长、颗粒物粒径对于散射光分布的影响进行了分析; 随着粒径的增大, 散射光强整体呈现数量级的增加。并且散射光强会随着入射光波长的增加而增大, 波长对光强的影响在同一粒径下比较明显, 在粒径较小时, 波长对散射光强的影响较大。粒径越大散射光强分布的振荡越明显, 而短波长同样要比长波长使得散射光强的振荡幅度更大。实验上搭建了颗粒物浓度测量装置, 对于不同质量浓度的标准粉尘颗粒物进行了散射实验, 并利用光强度调制技术对检测的干扰和噪声进行过滤, 有效提升了检测系统的抗干扰能力和检测范围; 实验结果表明, 在引入强度调制的情况下, 在浓度范围在 25~7000 mg/m³ 下颗粒物质量浓度与探测器电压呈现出良好的线性关系, 整体线性拟合度 R² 大于 0.97, 而在浓度过高时(浓度大于等于 10,000 mg/m³)颗粒物之间发生二次或多次散射, 每个增加的颗粒对散射光强度的贡献变小, 整体表现为对数增长, 但检测电压与质量浓度相关性依旧很好, 线性拟合的 R² 大于 0.99。因此该强度调制技术加入系统中后能够增强系统对颗粒物浓度变化的响应能力, 并显著减少外部环境光和噪声对检测信号的干扰。由于实验使用的标准粉末和所用仪器存在差异, 并且在浓度差值较大时探测器动态响应不同, 需要调整灵敏度并根据实际颗粒物浓度情况来标定测量的电压值与质量浓度值之间的变换参数。本文的理论和实验研究为大气颗粒物质量浓度的检测技术提供了参考。

参考文献

- [1] Seaton, A., Godden, D., MacNee, W. and Donaldson, K. (1995) Particulate Air Pollution and Acute Health Effects. *The Lancet*, **345**, 176-178. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(95\)90173-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(95)90173-6)
- [2] Cheng, Z., Jiang, J., Fajardo, O., Wang, S. and Hao, J. (2013) Characteristics and Health Impacts of Particulate Matter Pollution in China (2001-2011). *Atmospheric Environment*, **65**, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.022>
- [3] Pramod, K., Baron, P.A. and Willeke, K. (2011) *Aerosol Measurement Principles, Techniques, and Applications*. John Wiley & Sons.
- [4] 金汉. 光散射法测量木粉尘浓度的影响因素与校正方案研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 中国计量大学, 2021.
- [5] 童祐嵩. 颗粒粒度与比表面测量原理[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- [6] Hauck, H., Berner, A., Gomiscek, B., Stopper, S., Puxbaum, H., Kundi, M., *et al.* (2004) On the Equivalence of Gravitimetric PM Data with TEOM and Beta-Attenuation Measurements. *Journal of Aerosol Science*, **35**, 1135-1149. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.04.004>
- [7] Jones, N.C., Thornton, C.A., Mark, D. and Harrison, R.M. (2000) Indoor/Outdoor Relationships of Particulate Matter in Domestic Homes with Roadside, Urban and Rural Locations. *Atmospheric Environment*, **34**, 2603-2612. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(99\)00489-6](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(99)00489-6)
- [8] 崔九思, 王钦源, 王汉平. 大气污染监测方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997.
- [9] 潘为刚, 肖海荣. 全自动激光粒度仪的研制[J]. 微计算机信息, 2008, 24(19): 185-186.
- [10] 顾芳. 单粒子光散射法测量悬浮颗粒物质量浓度的理论模型及应用[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [11] 陈庭将. 光散射法在颗粒测量技术中的应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [12] Mie, G. (1908) Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*, **330**, 377-445. <https://doi.org/10.1002/andp.19083300302>
- [13] 陈栋. 颗粒特性对光散射法在线测量颗粒物质量浓度的影响研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [14] 李继强. LC25W-A 型激光器调制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [15] 李洋. 大功率半导体激光器调制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2013.

- [16] 章周敏. 10Gbps 高灵敏度跨阻放大器设计[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门理工学院, 2022.
- [17] 丁书亚. 基于FPGA的数字锁相放大器设计及其在波长调制光谱中的应用[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2023.
- [18] 钟现奎. 基于光散射法的大气气溶胶粒径测量关键技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.
- [19] 韩金克. 激光散射法在线测量颗粒物质量浓度研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [20] 李宗. 基于双波长光散射的烟雾颗粒物检测方法及装置研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022.