

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2012.05.008

基于 LED 光源的积分浊度仪的系统设计

吴玉笛, 刘建国, 陆 钊, 桂华侨, 王亚平

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 散射系数是气溶胶光学性质的重要参数之一。为了研究气溶胶光学性质, 研制了一种用于测量散射系数的积分浊度仪。介绍了该仪器的工作原理、系统结构设计, 对该仪器中最为重要的光学测量腔室和光源给出了最优的设计方案。该仪器与前向散射型能见度仪对比实验结果显示散射系数与能见度的相关系数为 0.834, 证明了本仪器的可靠性。本仪器光源稳定, 整体系统结构简单, 成本低廉, 有广阔的应用前景。

关键词: 气溶胶; 积分浊度仪; 散射系数; 系统设计; LED

中图分类号: TH74 文献标识码: A 文献编号: 1673-6141(2012)05-0370-06

System Design for Integrating Nephelometer Based on LED Light Source

WU Yu-di, LIU Jian-guo, LU Fan, GUI Hua-qiao, WANG Ya-ping

(Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Scattering coefficient is one of the most important parameters of the aerosol optical properties. A kind of integrating nephelometer for measuring scattering coefficient is developed to investigate the aerosol optical properties. Principles and the system design of the system are presented, the optimal design of the optical chamber and the light source are proposed. Experimental results show that the correlation coefficient between scattering coefficient measured by the nephelometer and visibility measured by the forward-scattering visibility sensor was 0.834. It illustrates that the system is compact, low cost and reliable.

Key words: aerosol; integrating nephelometer; scattering coefficient; system design; LED

1 引 言

大气气溶胶是由大气介质与悬浮于其中的固体或液体颗粒组成的体系。虽然大气中气溶胶粒子的含量相对较少, 但它对气候变化、大气微量

成分的循环、云的形成、能见度的改变以及人类健康有十分重要的影响。气溶胶粒子增加的直接效应是影响辐射平衡和水循环, 这两种过程都会引发气候变化^[1-2]。散射系数是气溶胶光学性质的一个重要参数, 它不仅是研究气溶胶对气候强

收稿日期: 2012-04-28; 修改日期: 2012-05-03

基金项目: 国家自然科学基金 (60908035) 资助

E-mail: ydww@aiofm.ac.cn

迫的重要影响因素之一, 也能够为细粒子粒径分布和化学组分提供重要信息, 同时散射系数也是评定灰霾天气的重要指标之一^[3]。

散射系数的测量有三种方法: 后向散射式、前向散射式、全散射式。测量全散射系数需要测量光束中所有角度上的散射光, 前两种方法是通过测量指定角度内的散射光, 然后由有限角度积分估算出全散射系数测量^[4], 如大气能见度仪, MIE 散射激光雷达等装置。本文所介绍的积分浊度仪是一种直接测量全散射系数的装置。相比较于其他测量装置, 积分浊度仪不仅可以方便地进行定标, 还可以控制采样气体成分、密度、温湿度等一系列条件, 使得测量结果更加精确、灵敏度更高、应用研究领域也更加广泛 (例如对气溶胶化学组分的研究等)。

本文根据相关原理设计研制了基于 LED 光源的积分浊度仪, 其具有工作稳定、体积小、结构简单等优点, 最终实现气溶胶散射系数的自动检测。

2 测量原理

积分浊度仪^[5]是以物质对光的消光性质和比尔-朗伯定律为基本原理的测量散射系数的仪器。利用一个发光强度为 Φ 的漫射光源从侧向射入测量气体内, 其中颗粒物或气体的散射光线经过光阑的缝隙进入光检测器 D, 测量散射角度在

$\theta_1 \sim \theta_2$ 之间的散射系数。

假设立体角为 Ω , 每一段散射体积 dV 为

$$dV = (R - x)^2 \Omega dx, \tag{1}$$

根据角度关系

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi,$$

通过几何运算 $x = y \cot \theta, dx = y \csc^2 \theta, l = y \csc \theta, \cos \varphi = \sin \theta$, 则散射体积 dV 为

$$dV = (R - y \cot \theta)^2 \Omega y \csc^2 \theta d\theta. \tag{2}$$

设 Φ 是漫射光源发光强度, φ 方向光亮度满足余弦关系, 则散射体积 dV 上的入射光强度 I 为

$$I = \Phi \sin^3 \theta y^{-3}, \tag{3}$$

体元 dV 在立体角 Ω 中产生的散射光亮度 dL 为

$$dL = I \beta(\theta) dV (R - x)^{-2} = (\Phi/y) \Omega \beta(\theta) \sin \theta d\theta, \tag{4}$$

$\beta(\theta)$ 为散射函数, 则光电倍增管接收到的单位立体角内的光亮度 L 为

$$L = \frac{1}{\Omega} \int_{\theta_1}^{\theta_2} dL = \left(\frac{\Phi}{y}\right) \int_{\theta_1}^{\theta_2} \beta(\theta) \sin \theta d\theta, \tag{5}$$

其中积分限 θ_1, θ_2 取决于仪器的结构, 原则上积分限可以包括 $0 \sim \pi$, 则可由 L 直接得出散射系数 σ_{scat} , 即

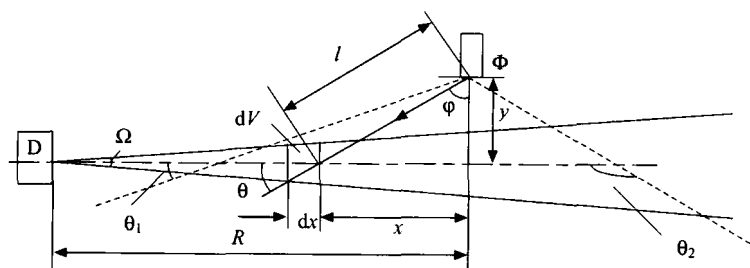


图 1 积分浊度仪基本原理

Fig.1 The principle of the integrating nephelometer

$$L = \frac{I_0}{y} \int_0^\pi \beta(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{I_0}{2\pi y} \sigma_{\text{scat}}, \quad (6)$$

但实际上积分限不能满足上述要求，一般积分限在 10° ~ 170° 内，虽然会对散射系数的测量结果造成一定影响，但是积分限外的量值很小，并且可以对其进行修正 [6]。

3 仪器设计

3.1 系统结构

本文中研制的积分浊度仪系统框图如图 2 所示。包括光学测量腔室、校准气气路(标准气体气路和零气气路)、样气气路和信号处理控制与显示电路。图中标示 1 为光源部分、2 为参比快门、3 为光阱、4 为遮光挡盘。

浊度仪测量环境大气时，风机抽取环境空气通过样气管进入光学测量腔室，流速 ~5 L/min。当仪器进行零气校准时，风机关闭，零气泵启动，将经过 0.1 μm 过滤器产生的零气(不含颗粒物的空气)从两端送入光学测量腔室，流速 ~3 L/min。当仪器进行标气校准时，风机及零气泵均关闭，标准气电磁阀打开，标准气在气瓶的压力驱动下，流速 ~3 L/min，经过 0.1 μm 过滤器过滤后从两端进入光学测量腔室。三种气路状态下由单光子光电倍增管探测到的光信号都将转化为电信号后送至微处理器进行计数、处理和显示，并将测量结

果输出到显示屏。

3.2 光源设计

积分浊度仪的研究中，曾使用过的光源包括：电子闪光灯光源、氙气闪光灯光源、卤素灯光源、激光。随着光电技术的飞速发展，LED 的亮度和稳定性得到显著提高，系统设计采用大功率 LED 作为光源，具有效率高、发热小、寿命高、维护简单等优点。其最大的优点在于波长可控，若测量多波长下的散射系数，无需在探测部分使用多个光电倍增管进行分光检测，而是直接在光源部分使用不同波长 LED 分时发光，探测区只需一个探测器即可。

LED 的功率很小，一般大功率单色 LED 功率也仅有 1~3 W，因此采用 LED 阵列作为光源，但光源的离散导致光源不能接近理想朗伯源。为了得到近似朗伯体光源，可以根据 LED 光学模型并利用数学处理方法得到精确的 LED 包封结构设计数据，通过光学仿真和样板制作能达到预期的设计效果 [7]，然而以往的设计经验表明，可以通过简化光学模型，用球面取代复杂的非球面设计或用圆弧代替曲线设计得到更快速、更好控制的 LED 模型数据。如图 3 所示，设计中，选取 LED 的波长带宽小于 20 nm，响应时间为 μs 级。选择 525 nm 单色 3 W 大功率 LED 灯珠，若需测量多波长下的散射系数，则可以选择红光 (635 nm)、

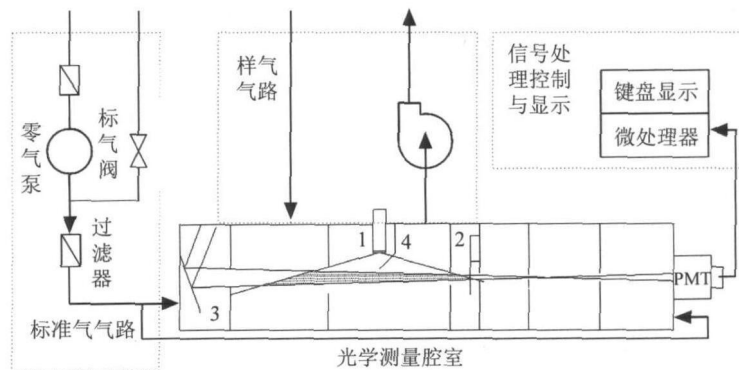


图 2 积分浊度仪系统结构框图

Fig.2 Structure diagram of the integrating nephelometer

绿光 (525 nm)、蓝光 (450 nm) 三彩 LED 灯珠, 功率为 3 W, 为了得到近似朗伯体光源, 将结构设计为半圆形 LED 阵列, 共有 5 个 LED 灯, 间隔角度为 25° , 对每个 LED 引入控制电路, 控制其电流大小, 前端用散射乳白玻璃封闭, 使光线均匀散射。

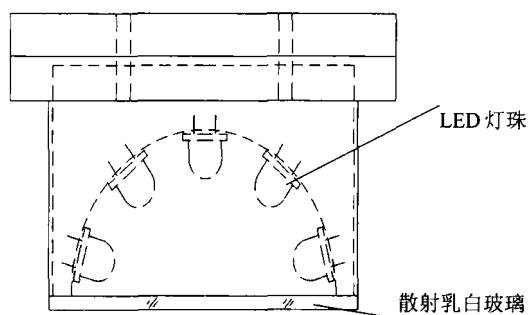


图 3 光源结构图

Fig.3 Structure diagram of the light source

3.3 光学测量腔室设计

如图 2 所示, 光学测量腔整体长约 50 cm, 由左右两个直径 8 cm 的薄壁筒和中间光源区中空立方体构成, 内壁做发黑处理, 以减少内壁的散射光。发光二极管 (LED) 阵列构成一个光强近似余弦函数的漫射光源, 从测量腔室侧向照射进入测量腔内的气体样品, 产生的散射光经过一系列光阑 (对光束或视场起限制作用的孔状屏障) 的阻隔, 只使一部分狭小体积内的气体样品的散射光到达光电倍增管, 其散射角在 $10^\circ \sim 170^\circ$ 之间 (光源处由电机带动的遮光挡盘可以把测量散射角范围改变为 $90^\circ \sim 170^\circ$ 用来测量后向散射系数)。光阑位置和孔径的确定遵循以下设计原则: 1) 光学测量气体区域要求狭长, 夹角小, 近似平行。2) 合理利用光电倍增管有效探测面。

右侧光路的光阑处装有可打开和闭合的参比快门 2。其上装有衰减片, 为仪器提供一个光源的直接参比信号, 来消除光源和光电倍增管的漂移问题, 提高仪器测量的精度。原理如式 (7), 环境大气测得的散射信号 C_m

$$C_m = \frac{C_{\text{sig}} - C_{\text{dark}}}{C_{\text{cal}} - C_{\text{dark}}}, \quad (7)$$

式中, C_{dark} 为暗计数, C_{sig} 为测量计数, C_{cal} 为参比计数。

当测量系统的响应 (或灵敏度) 由于光源强度和光电倍增管的增益发生漂移而变化时, C_{sig} 、 C_{cal} 会同时受到影响, 发生同样比例的改变, 又因为暗计数值很小, 可忽略暗计数变化的影响, 即 C_m 不会受到光源强度和光电倍增管的增益发生漂移的影响。现今, 旋转功能主要采用电机来实现, 但是在本文的积分浊度仪研制中, 只需要两个角度方向的定位, 对于旋转的转速和匀速性也没有过高的要求, 并且电机需要驱动电路, 使用电机无疑既增加了成本又增加了设计的复杂性。旋转电磁铁体积小, 只需通断电流, 就可以实现两方位的定位, 因此选择旋转电磁铁来实现参比快门的旋转功能。

光学测量腔室左右两侧分别安装光阱和光电倍增管, 光阱 3 为相对竖直面一固定倾斜角安装一个黑色反射片, 防止器壁反射形成的杂散光进入光电倍增管降低测量精度; 为测得微弱光信号, 选用光子计数方法测量光信号, 其探测灵敏度优于 10^{-17}W 。

4 实验验证

2011 年 7 月 26 日, 在合肥科学岛进行了 24 h 的观测实验, 观测点位于合肥市西郊董铺岛上, 距离市中心直线距离约为 14 km。本次实验观测仪器安放在中科院安徽光学精密机械研究所综合楼 ($31^\circ 54' \text{N}$, $117^\circ 09' \text{E}$)。其中, 积分浊度仪、大气能见度仪均放置于 7 楼楼顶, 探头距离地面高度约为 24 m。

4.1 仪器标定

实验前对仪器进行了标定实验, 方法如下: 基于一定范围内散射系数变化对光强的线性响应这一假设, 测量已知散射系数的标准气 (CO_2 、 CCl_2F_2 等) 和零气 (洁净空气) 的散射光信号作为线性标定点, 再通过测量环境大气的散射光信号来计算环境大气的散射系数, 最后从中扣除零气的散射系数得到环境空气中气溶胶粒子的散射系

数 [6]。

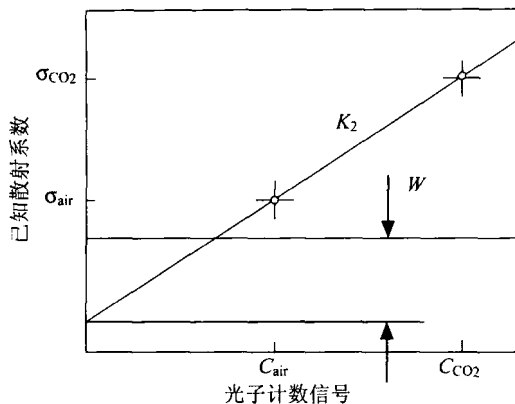


图 4 积分浊度仪标定原理图

Fig.4 Calibration diagram of the integrating nephelometer

图 4 中标定直线的斜率 K_2 由测得的散射光子计数信号与标气、零气的已知散射系数决定 (本文中标准气使用 CO_2 气体)

$$K_2 = \frac{\sigma_{\text{CO}_2} - \sigma_{\text{air}}}{C_{\text{CO}_2} - C_{\text{air}}}, \quad (8)$$

图 4 中纵坐标方向的零点偏移值 W

$$W = K_2 C_{\text{air}} - \sigma_{\text{air}}, \quad (9)$$

反映了测量时无空气条件下完全由器壁散射光形成的仪器零点信号, 其大小反映了测量腔室器壁杂散光影响的强弱。

环境大气的散射系数可以求出

$$\sigma_{\text{scat}} = K_2 C_m - W, \quad (10)$$

式中, C_m 为环境大气测得的散射信号。

大气散射系数再扣除空气瑞利散射系数 σ_{air} 则可求出大气气溶胶散射系数

$$\sigma_{\text{sp}} = K_2 C_m - W - \sigma_{\text{air}}. \quad (11)$$

4.2 仪器的可靠性验证

浊度计测量的是一定控制条件下 (如室内温度、相对干的湿度) 气溶胶的散射系数 σ_{sp} , 而前向散射式能见度仪, 它测量的是前向某个角度的散射系数, 根据这个角度上的散射系数与散射系

数 σ_{sp} 的比例关系再算出气溶胶散射系数 σ_{sp} , 最后加上空气的分子散射再换算为能见度。所以本文采用设计的积分浊度仪和能见度仪进行对比实验, 来验证浊度仪的可靠性 [8]。实验结果如图 5 所示。

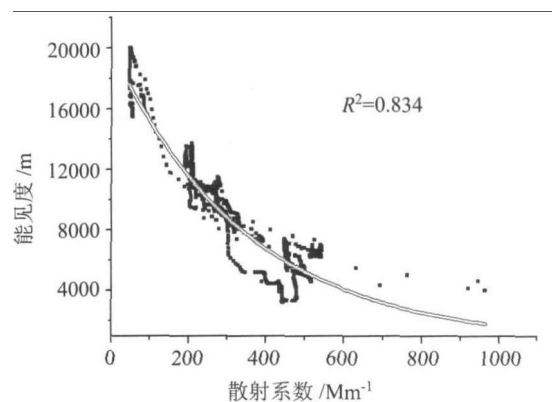


图 5 散射系数与能见度的关系

Fig.5 The relationship between aerosol scattering coefficient and visibility

由图 5 可以看出, 能见度和散射系数呈指数关系, 这和丁峰 [9] 给出的能见度与散射系数的关系是一致的, 本仪器和能见度仪测量值的相关系数为 0.834, 在能见度较好 (大于 10 km) 的时候, 测量值和拟合值更为接近。

图中可以看出数据有些离散, 这主要可能是由以下原因造成。能见度仪是开放式光路, 能见度受多种外界参数的影响, 比如受湿度、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 等影响, 这些关系呈负相关 [10], 杂散光和背景光都对测量值也有影响 [11]。本仪器测量的是散射系数, 会在测量前对采样气体进行湿度控制, 使相对湿度保持在 50% 以内, 相比能见度仪测量, 相对湿度的影响较小, 而且是密闭室测量, 可以排除杂散光影响。

5 结论

本文设计了基于 LED 光源的积分浊度仪, 采用零气和标气进行标定, 加入参比快门用来消除光源漂移, 并采用光子计数技术进行探测。并在设计中引入了 LED 阵列做为光源, 为了克服光强分布的离散性, 将结构设计为半圆形 LED 阵列, 从

而达到近似朗伯体光源。通过对比实验, 证明仪器对气溶胶散射系数的测量是稳定、可靠的。后期将在本文研制的浊度仪上设置温湿度传感器、压力传感器, 对测量进行实时监控和补偿, 以获得更加精确的测量结果。

参考文献:

- [1] Liu Yi, Wang Mingxing, Zhang Renjian. The present status of aerosol research in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(4): 406-414(in Chinese).
刘毅, 王明星, 张仁健. 中国气溶胶研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 1999, 4(4): 406-414.
- [2] Han Yong, Wang Tijian, Rao Ruizhong, et al. Progress in the study of physic-optics characteristics of atmospheric aerosols [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(11): 7396-7407(in Chinese).
韩永, 王体健, 饶瑞中. 大气气溶胶物理光学特性研究进展 [J]. *物理学报*, 2008, 57(11): 7396-7407.
- [3] Quinn P K, Coffman D J, Kapustin V N, et al. Aerosol optical properties in the marine boundary layer during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE-1) and the underlying chemical and physical aerosol properties [J]. *Geophys. Res.*, 1998, 103(D13): 16547-16563.
- [4] Bi Kai. *Analysis on Variation of Atmospheric Visibility in Shanghai Pudong 2009* [D]. Beijing: Master's Thesis of Chinese Academy of Meteorological Sciences. 2011: 19-24(in Chinese).
毕凯. 2009 年上海浦东新区大气能见度变化的研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院硕士论文. 2011: 19-24.
- [5] Beuttell R G, Brewer A W. Instruments for the measurement of the visual range [J]. *Sci. Instrum.*, 1949, 26(11): 357-359.
- [6] Anderson T L, Covert D S, Marshall S F, et al. Performance characteristics of a high-sensitivity, three-wavelength, total scatter/backscatter nephelometer [J]. *Atmos. Ocean. Tech.*, 1996, 13(5): 967-986.
- [7] Xia Xunli, Yu Binhai, Mai Zhenqiang. Design on approximate Lambertian LED opto lens configuration [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010, 25(1): 22-25(in Chinese).
夏勋力, 余彬海, 麦镇强. 近朗伯光型 LED 透镜的光学设计 [J]. *光电技术应用*, 2010, 25(1): 22-25.
- [8] Lu Hui, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, et al. Aerosol scattering properties in the Hinterland of Taklimakan Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(3): 665-666(in Chinese).
陆辉, 魏文寿, 刘明哲, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地大气气溶胶散射特征研究 [J]. *中国沙漠*, 2010, 30(3): 665-666.
- [9] Ding Feng. *Observational Study of Atmospheric Aerosol Scattering Characteristics in Northern Suburb of Nanjing* [D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing University of Information Science & Technology, 2011: 32-38(in Chinese).
丁峰. 南京北郊气溶胶粒子的光学散射特性观测研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学硕士论文, 2011: 32-38.
- [10] Ma Xiaoxi. *The Characteristics of Autumn Visibility in Yangtze Delta and Its Influence Factors Analysis* [D]. Shenyang: Master's Thesis of Northeastern University, 2008: 39-47(in Chinese).
马晓溪. 长三角区域秋季能见度特征及影响因子分析 [D]. 沈阳: 东北大学硕士论文, 2008: 39-47.
- [11] Cheng Yin, Lu Yihuai, Lian Cuihua, et al. Investigation on the forward-scattering visibility sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(1): 59-61(in Chinese).
程寅, 陆亦怀, 连翠华, 等. 前向散射型能见度仪的研制 [J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(1): 59-61.

作者简介: 吴玉笛 (1987-), 女, 安徽合肥人, 研究生, 主要研究方向为环境光学监测技术。