

## 光全散射法在城市扬尘在线监测系统中的应用

路 广,李杏华,肖云龙

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

**摘 要:** 研究了光全散射法在大范围空间颗粒物浓度监测中的应用及实现。借助于结构设计和调制解调技术去除环境中背景光对光电转换的影响,为避免光源光强的波动对系统稳定性的干扰,采取光强反馈措施进行补偿。应用多波长消光法,结合 Lambert-Beer 定律和 Mie 散射理论,实现开放空间颗粒物浓度值的测量。将系统的计算结果和标准仪器进行实时对比,二者的 Pearson 相关系数为 0.988 9,数据有较好的一致性,系统量程可达 0~400 mg/m<sup>3</sup>,响应时间为 1 min。为大范围空间颗粒物质量浓度的监测提供了一种快速、实时的手段。

**关键词:** 光全散射法; 颗粒物浓度; Mie 散射; 在线监测

**中图分类号:** TP216.1; TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1118005

## Application of total light scattering in city dust on-line monitoring system

Lu Guang, Li Xinghua, Xiao Yunlong

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The application and implementation of total light scattering were studied to monitor particulate matter mass concentration in large areas. By means of structural design and modern technology, it removed the influence of environment background light in the process of photoelectric conversion, in order to avoid the disturbance on the system's stability because of light source intensity's fluctuation, the light intensity feedback was applied to compensate for it. Using the multiple wavelength method, combined with the Lambert-Beer law and Mie scattering theory, it implemented particle concentration detection in wide open spaces. Compared the system's calculated results with the standard instrument, the Pearson correlation coefficient is 0.988 9, it indicates that the data has good consistency, the range can reach 0–400 mg/m<sup>3</sup>, the response time is 1 min. It provides a rapid and real-time method to monitor particulate matter mass concentration in large areas.

**Key words:** total light scattering; particulate matter concentration; Mie scattering; on-line monitoring

收稿日期:2016-03-24; 修订日期:2016-04-27

基金项目:美丽天津重大工程(14ZCDGSF00028)

作者简介:路广(1990-),男,硕士生,主要从事颗粒物在线监测技术方面的研究工作。Email: lu15056048066@163.com

导师简介:李杏华(1976-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事测试及信息处理技术方面的研究工作。Email: li.xinghua@126.com

## 0 引言

扬尘是造成大气颗粒物污染的重要因素,其来源主要为建筑工地,码头堆场以及道路扬尘等,监控扬尘污染对于空气质量改善具有十分重要的参考价值。

对于颗粒物浓度检测精度要求高的场合,一般采用捕集测定法,即先用各种手段捕集空气中的悬浮颗粒物,再测定其浓度的方法。该方法的典型代表有重量法、 $\beta$ 射线吸收法、振荡天平法、电晶体法等<sup>[1]</sup>。不足之处在于工作量大、步骤繁琐,测量过程不能满足实时性的要求。

光散射法具有实时、灵敏、操作简便、安全可靠等优点,同时,还具有所需被测颗粒物物理参数少、非接触性等特点。光散射颗粒测量方法基于光的散射原理,当光束入射到颗粒物上时将向四周散射,光的各个散射参数与颗粒的粒径有密切关系,通过测量这些参数,可以得到颗粒粒径的大小和分布。光全散射法属于静态光散射法,其测量的透射光强与入射光强在同一数量级,不像其它光散射法那样需要大功率的光源和高灵敏度的接收器,并且装置结构简单,光学系统同轴布置,容易按照需要调整光程<sup>[2]</sup>。

用于测量光散射的仪器主要分成三类:光学粒子计数器、粒度计、角散射测量仪。Adams JA, Bloom SH, Chan V J 等人,在粒子计数器中使用球面反射镜,将一定立体角范围内的散射光收集起来,提高了接收效率<sup>[3]</sup>;顾芳、杨娟、卞保民等采用粒子计数器测量颗粒物质量浓度,并提出两步校正方法,解决了等价因子的不稳定性<sup>[4]</sup>;Trainoff S P 对粒度仪进行改进,为样品室设计一个充当横向和纵向镜头作用的外表面,从而减少杂散光的影响<sup>[5]</sup>;Nagura M, Ishii Y, Ikeda H 等人,通过在散射测量仪中增加温度控制模块,进一步增加粒径尺寸的测量范围,降低噪声,提高测量的重复性<sup>[6]</sup>。

现有的光散射法在线监测设备,大多采用切割头对空气进行抽取采样,严格控制温湿度和空气流速,在密闭环境中实现浓度测量,典型代表如 Thermo Scientific ADR-1500 区域粉尘监测仪,该方法采用角散射原理,根据样本中颗粒物散射光强度和其浓度的线性关系,仪器能提供切割点为 PM10 至

PM1 的颗粒物浓度。在扬尘监测应用的实际场合,监测范围会达到影响区域周围 20 m 的空间<sup>[7]</sup>,现有的解决方案大多是在多个位置布点,形成在线监测网络,这就造成实现的复杂性和高成本。

文中设计了针对大范围空间大浓度颗粒物的在线监测系统,主要研究如何排除开放环境中背景光和光源光强波动对系统的影响,从装置结构和信号处理两个方面进行改进,避免对空气样本进行采样,简化设备的结构,针对大范围空间颗粒物的在线监测,克服布点测量在某些场合应用的缺点。将实验结果和标准仪器进行比对,表明测量结果具有可靠性和快速性。

## 1 系统设计

### 1.1 原理

光全散射法的原理如图 1 所示。当入射光通过成分已知的颗粒物空间时,由于消光作用,造成入射光强一定程度的衰减,当颗粒物的成分和折射率已知时,衰减程度的大小只与颗粒的粒径分布和浓度有关。

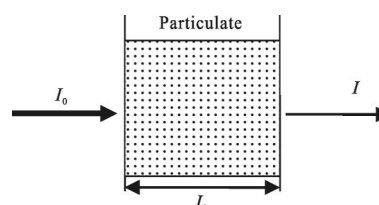


图 1 光全散射法测量原理的示意图

Fig.1 Sketch diagram of total light scattering measuring theory

根据 Lambert-Beer 定律,当一束波长为  $\lambda$  的单色光穿过厚度为  $L$  的待测颗粒系时,入射光强  $I_0(\lambda)_i$  与透射光强  $I(\lambda)_i$  之间的关系<sup>[8]</sup>为:

$$\ln \frac{I(\lambda)_i}{I_0(\lambda)_i} = -\tau L \quad (1)$$

式中: $I(\lambda)_i/I_0(\lambda)_i$  称为第  $i$  个光波长的消光值; $L$  是光程; $\tau$  为浊度,其是单位体积内所有颗粒的总消光截面<sup>[9]</sup>,用公式(2)表示:

$$\tau = \frac{3}{2} N \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{K_{\text{ext}}(\lambda, m, D)}{D} N(D) \cdot \left(\frac{1}{6} \pi D^3\right) dD \quad (2)$$

式中: $N$  表示单位体积内不同粒径的颗粒总数; $D_{\max}$  和  $D_{\min}$  分别是颗粒系粒径的上限和下限; $K_{\text{ext}}(\lambda, m, D)$  为消光系数,它是粒径  $D$ 、波长  $\lambda$  以及相对介质复折

射率  $m$  的函数,其精确值可根据 Mie 散射理论进行推导<sup>[10-12]</sup>,是颗粒系的数量频率分布。

在求解  $N(D)$  的过程中,测量误差和计算过程引入的舍入误差都会引起待测量的很大变化<sup>[13]</sup>,因而文中采用非独立模式算法<sup>[14]</sup>,预先假定待测颗粒系的数量频率分布  $N(D)$  符合双峰-对数正态分布,即用公式(3)来近似实际的粒径分布。

$$N(D) = \frac{A}{\sqrt{2\pi} \ln\sigma_1} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln D - \ln D_1}{\ln\sigma_1}\right)^2\right] + \frac{(1-A)}{\sqrt{2\pi} \ln\sigma_2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln D - \ln D_2}{\ln\sigma_2}\right)^2\right] \quad (3)$$

公式(3)中,预设  $D_1=2.5 \mu\text{m}$ ,  $D_2=10 \mu\text{m}$ ,是颗粒系的两个尺寸参数。 $A$  为权系数,起到平衡 2 个峰值相对大小的作用, $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 是颗粒系的两个分布参数。

在实际应用时,为了便于计算,采用颗粒体积分布代替颗粒数量分布,综合公式(1)、(2)并构造目标函数如公式(4)所示。

$$\text{OBE} = \left| \sum_{i=1}^n \ln \frac{I(\lambda)_i}{I_0(\lambda)_i} - \left[ -\frac{3}{2} \text{LN} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{K_{\text{ext}}(\lambda_i, m, D)}{D} N(D) \cdot \left(\frac{1}{6} \pi D^3\right) dD \right] \right| \quad (4)$$

在求解时,有 4 个待求解参数  $N$ 、 $A$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ ,采用多波长求解法<sup>[15]</sup>,至少需要  $n=4$ ,即系统需要采用 4 个波长的光源。采用优化算法,不断调节 4 个未知参数的值,使得由公式(4)的目标函数值为最小,此时 4 个待求解参数的值即为最优解。

求得  $N(D)$  后,再通过公式(5)就可以求得颗粒物的质量浓度  $C_m$ ,其中  $\rho$  为颗粒物的密度。

$$C_m = \rho N \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \cdot \left(\frac{1}{6} \pi D^3\right) dD \quad (5)$$

### 1.2 方案设计

系统原理如图 2 所示,颗粒物空间为室外开放空间,外界的自然光等背景光会对测量产生干扰;同时,激光器光源的光强波动也会造成测量结果不准确。针对上述问题,通过 MCU1 控制时钟及控制逻辑模块输出 TTL 调制信号到激光器调制模块,对激光器输出的光信号进行调制。光电传感器和窄带滤光片配合使用,削弱背景光对接收光强的干扰。光电传感器输出的光电流信号经过信号调理后输入 PC,来

自于激光器的光强反馈 PD 信号也输入 PC。在 PC 内,对光信号和 PD 信号进行软件解调,同时应用 PD 信号对光信号进行补偿,消除光源的光强波动对测量的影响。最后,采用多波长求解法,计算得到颗粒物的质量浓度。

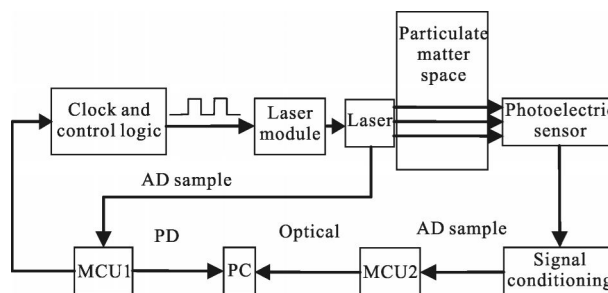


图 2 系统原理框图

Fig.2 Principle block diagram of the system

## 2 系统实现和信号处理

城市扬尘在线监测系统主要由以下 3 个部分组成:光路部分、电路部分和软件部分。光源采用上海熙隆光电科技有限公司生产的半导体激光器,为了避免四种波长的消光值过于接近而造成的求解困难,选择的波长分别为 405、520、635、780 nm,型号为 DL-405-05-T、DL-520-05-T、DL-635-05-T、DL-780-05-T,输出功率为 5 mW。光电传感器选择上海欧光电子科技有限公司生产的硅光电池,型号为 OSD100-UC,在光电池前加装了窄带滤光片,以提高信噪比。其输出的光电流进行 I/V 转换,然后通过二阶低通滤波电路滤除高频杂波信号,AD 采样后输出到 MCU,通过 RS485 总线实现与 PC 的主从应答通讯。

### 2.1 背景光的处理

由于测量的是开放空间,实际接收到的光信号中既有有效信号又有背景光信号,背景光来源主要包括外界自然光和人造光源,这些光源的特点是光强在一定时间内(系统的采样周期为 1 min)缓慢变化或是固定不变的,因此,系统从结构设计和信号处理两个方面来应对背景光的干扰。

系统接收装置的结构如图 3 所示,入射光依次经过聚焦镜、窄带滤光片,最后照射到硅光电池上。将光电池和整套装置密封到一起,减少背景光进入接收装置。

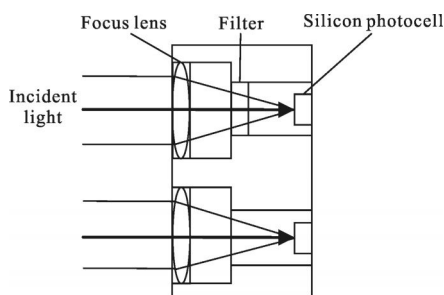


图 3 接收装置的结构图

Fig.3 Receiver structure

采用以上结构设计后,仍然会有对应滤光片波段的背景光进入系统。进一步地,对激光器输出的初始光信号进行 TTL 调制,光信号一个周期内的高电平包含有效信号和背景光信号,低电平只包含背景光信号,依据公式(6)进行差值运算,可以消除背景光的干扰。

$$l_r = (l_{r,h} + \Delta l) - (l_{r,l} + \Delta l) = l_{r,h} - l_{r,l} \quad (6)$$

式中: $l_r$  为光信号的有效值; $l_{r,h}$  为光信号初始高电平值; $l_{r,l}=0$  为光信号初始低电平值; $\Delta l$  为背景值。

### 2.2 光源波动的处理

激光器自身在室内 2 h 的功率稳定性 < 3%,但由于系统需要在室外长时间连续工作,光源的输出光强除了自身波动外,还会受到外界环境因素的影响,设置 PD 信号实时反馈激光光源的输出光强值。

针对激光器实际测量的数据,依据公式(7)采用 PD 信号对接收的光信号进行反馈补偿,实测光信号室内 12 h 的功率稳定性 < 1%,可以满足系统测量的要求。

$$\Delta l_r = \frac{\sigma_r}{\sigma_{PD}} \Delta l_{PD} \quad (7)$$

式中: $\Delta l_r$  为光信号的补偿值; $\sigma_r/\sigma_{PD}$  为光信号标准差与 PD 信号标准差的比值; $\Delta l_{PD}$  为 PD 信号的变化值。

## 3 系统测试和分析

应用气体池模拟封闭的环境空间,进行相关实验。气体池为圆柱体,顶部开孔可以进出气体,气体池体积约为 0.25 m<sup>3</sup>。参照的标准仪器选择 Thermo Scientific ADR-1500 区域粉尘监测仪,其浓度测量范围为 0.001~400 mg/m<sup>3</sup>,准确度为读数的 ±5%,精确度为读数的 ±2%。

实验装置示意图如图 4 所示,在气体池内放置

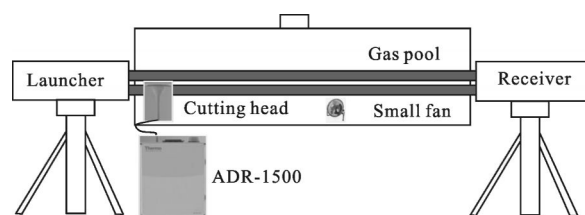


图 4 实验装置示意图

Fig.4 Experimental device schematic diagram

小风扇,加速内部气体的流动,促进颗粒物均匀分布。ADR-1500 自动监测与颗粒物在线监测系统同步进行测试,ADR-1500 的切割头放置在气体池内部,采样入口与颗粒物在线监测系统的光路处在同一高度,水平距离尽量小。

### 3.1 稳定性实验

为了验证系统长时间工作的稳定性,将气体池密封,进行长时间测量。系统发射和接收装置间的有效光程为 3 m,测试时间为 12 h,输出周期设定为一分钟给出一个 PM10 的浓度值。实验装置实物图如图 5 所示。

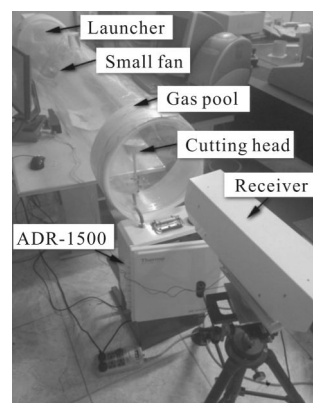


图 5 实验装置

Fig.5 Experimental device

相同采样时间段内,采用 ADR-1500 自动监测的数据作为标准数据,对系统的测试数据进行校准,得到以下测量结果如图 6 所示。

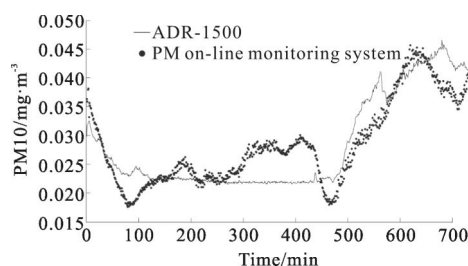


图 6 室内稳定性试验

Fig.6 Indoor stability test

从图 6 可以看出,系统数据长时间变化趋势与 ADR-1500 的一致。系统的测量结果代表了有效光程 (3 m) 范围内颗粒物浓度的平均效果,而 ADR-1500 的结果代表了采样点处的颗粒物浓度,所以系统的局部波形会和 ADR-1500 的有差别。

### 3.2 烟雾实验

使用香烟烟雾模拟一定粒径分布、较大浓度的颗粒物样本,验证检测数据的可靠性。在气体池的顶端点燃一只香烟,将气体池封闭,小风扇连续转动,待香烟燃尽时,将顶端的开孔打开,烟雾缓慢逸散。重复一次上述操作,实验结果如图 7 所示。

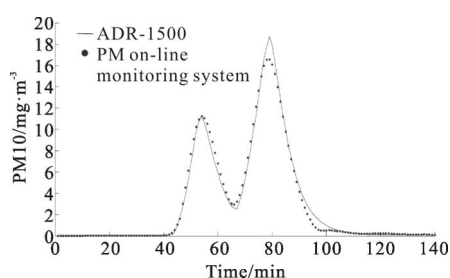


图 7 烟雾实验  
Fig.7 Smoke test

从图 7 中可以看出,PM10 浓度的两个峰值分别对应两次香烟燃尽的时刻,颗粒物在线监测系统的 PM10 浓度和 ADR-1500 的基本一致,验证了检测数据的可靠性。

将 ADR-1500 测量数据和颗粒物在线监测仪测量数据进行一元线性回归,结果如图 8 所示。拟合直线的斜率  $k$  为 0.988 3,截距  $b$  为 0.034 76。Pearson 相关系数为 0.988 9,表明数据具有较好的一致性。由实验数据计算可得,系统的量程可达 0~400 mg/m<sup>3</sup>。

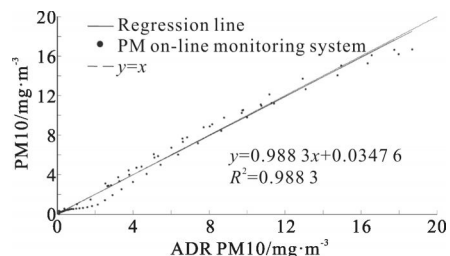


图 8 烟雾试验散点图

Fig.8 Smoke test scattering diagram

## 4 结论

相比现有的测量方法和仪器,系统结构简单,对

密闭性要求低,不需要采样,结果反映了浮游状态下颗粒物的浓度值,测试距离可调,最大设置为 20 m。系统采用调制解调技术和光源 PD 反馈补偿,烟雾试验表明系统的测量结果与 ADR-1500 具有较好的一致性,能够反映大范围空间的颗粒物浓度。

受测量原理和系统稳定性的影响,系统对于大浓度颗粒物有较好的响应。此外,由于接收装置中的硅光电池在外界温度变化剧烈时会出现较大漂移,所以现阶段只进行了相关的室内实验,针对这些方面的改进将是下一步的工作重点。

### 参考文献:

- [1] Liu Hongli, Zhang Wei, Li Changxi. Detection of the concentration and size distribution of indoor inhaled particulate matters [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(2): 340-344. (in Chinese)  
刘红丽, 张伟, 李昌禧. 室内可吸入颗粒物浓度与粒径分布检测方法的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(2): 340-344.
- [2] Tang Hong. Study of inversion algorithm of particle size distribution using total light scattering method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)  
唐红. 光全散射法颗粒粒径分布反演算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [3] Adams J A, Bloom S H, Chan V J, et al. Systems and methods for a multiple angle light scattering (MALS) instrument having two-dimensional detector array: U. S. Patent 8, 085, 399[P]. 2011-12-27.
- [4] Gu Fang, Yang Juan, Bian Baomin, et al. A model for aerosol mass concentration using an optical particle counter [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(3): 214-217.
- [5] Trainoff S P. Method and apparatus for measuring the scattered light signals from a liquid sample: U. S. Patent 7, 982, 875[P]. 2011-7-19.
- [6] Nagura M, Ishii Y, Ikeda H, et al. Particle size distribution analyzer: U. S. Patent 7, 499, 809[P]. 2009-3-3.
- [7] Tian Gang, Huang Yuhu, Fan Shoubin, et al. Dust Pollution Control[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013: 314. (in Chinese)  
田刚, 黄玉虎, 樊守彬, 等. 扬尘污染控制[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 314.
- [8] Xiao Shaorong, Wang Kun, Liu Juan, et al. Detection of atmospheric aerosol concentration and detection system design

- [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 633–638. (in Chinese)  
肖韶荣, 汪坤, 刘娟. 大气气溶胶浓度检测及检测系统设计[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 633–638.
- [9] Sui Guorong, Cheng Li, Chen Baoxue. Measurement of particles by optical fiber coupling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2844–2853. (in Chinese)  
隋国荣, 程利, 陈抱雪. 用光纤耦合法实现颗粒测量[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2844–2853.
- [10] Zhang Xuehai, Wei Heli. Forward scattering properties of spherical particles based on the geometrical optics method and Mie scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1485–1490. (in Chinese)  
张学海, 魏合理. 基于用几何光学和米散射法的球形粒子前向散射特性计算研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1485–1490.
- [11] Shi Zhenhua, Lin Guanyu, Wang Shurong, et al. Numerical analysis of small particle measurement based on the theory of laser scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2189–2194. (in Chinese)  
石振华, 林冠宇, 王淑荣, 等. 基于激光散射理论的微小颗粒测量的数值分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2189–2194.
- [12] Chen Huimin, Liu Xinyang. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system in water fog [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 626–631. (in Chinese)  
陈慧敏, 刘新阳. 收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 626–631.
- [13] Xiao Tingyan, Yu Shengen, Wang Yanfei. The Numerical Solution of the Inverse Problem [M]. Beijing: Science Press, 2003: 37–44. (in Chinese)  
肖庭延, 于慎根, 王彦飞. 反问题的数值解法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 37–44.
- [14] Sun Xiaogang, Tang Hong, Yuan Gunbin. Determination of the particle size range in the visible spectrum from spectral extinction measurements [J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, 18(11): 3572–3582.
- [15] Zhu Jianing, Chen Baoxue, Sui Guorong, et al. Research of improved measurement of particle size distribution with total light scattering method[J]. *Optical Instruments*, 2010, 32(3): 23–27. (in Chinese)  
朱嘉宁, 陈抱雪, 隋国荣, 等. 光全散射法颗粒粒径分布测量的改进研究[J]. 光学仪器, 2010, 32(3): 23–27.