

# 井下注入水颗粒度在线检测光学系统优化设计

贾德利<sup>1</sup>, 王全宾<sup>1</sup>, 党博石<sup>2\*</sup>, 金思宇<sup>2,3</sup>, 刘英<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院, 北京 100083;

<sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心, 吉林 长春 130033;

<sup>3</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对当前水驱开发油田井下注入水的颗粒度难以实现外场在线检测的技术难题, 设计了一个基于光学散射原理的注入水颗粒度的在线检测光学系统。采用波长为 640 nm 的激光光束, 通过 4× 准直扩束系统获得了 8 mm 的照明孔径。利用光瞳匹配和像差平衡, 完成了直径为 42 mm 的紧凑型光学系统的优化设计, 该系统可实现 1~100 μm 粒径的井下实时在线检测。光学系统的焦距为 50 mm, 视场角为 17°, 通光口径为 8 mm, 所有视场点斑半径均小于 6 μm, 可有效避免非散射光对感光环带能量的干扰。利用样机对标准颗粒试样进行检测, 测试误差小于 5%, 满足设计要求, 从而验证了设计系统的可行性和合理性。

**关键词** 非线性光学; 光学散射; 水驱开发; 颗粒尺寸; 在线检测; 光学设计

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.191901

## Optimization Design of Optical System for On-Site Underground Injection Water Particle Size Detection

Jia Deli<sup>1</sup>, Wang Quanbin<sup>1</sup>, Dang Boshi<sup>2\*</sup>, Jin Siyu<sup>2,3</sup>, Liu Ying<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Company Limited, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup> Precision Instrument and Equipment R & D Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Aiming at the technical challenge that it is difficult to realize the on-site detection of the particle size of the underground injection water for the water-drive oilfield development, we present a design concept of an optical system based on the optical scattering principle for the on-site injection water particle size detection. Using a laser beam with a wavelength of 640 nm and a 4× collimated beam expander system, we obtain an 8 mm illumination aperture. Using pupil matching and aberration balance, we achieve the optimal design of a compact optical system with a diameter of 42 mm, which meets the particle size detection requirements in the 1–100 μm range and has the ability to realize the real time underground on-site detection. The focal length of the optical system is 50 mm, the field of view is 17°, the aperture is 8 mm, and the spot radius within the field of view is less than 6 μm, which can effectively avoid the interference of non-scattered light on the energy of the photosensitive ring. The detection of standard particle samples via prototype shows that the test accuracy is less than 5%, which meets the design requirements and thus verifies the feasibility and rationality of the designed system.

**Key words** nonlinear optics; optical scattering; water-drive development; particle size; on-site detection; optical design

**OCIS codes** 190.5890; 290.5850; 120.4570

收稿日期: 2020-01-14; 修回日期: 2020-01-19; 录用日期: 2020-02-19

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0196000)

\* E-mail: dangboshi@163.com

191901-1

# 1 引言

目前,中国原油的开采方式大多为注水开发<sup>[1-2]</sup>。利用注水设备把符合质量要求的水从注水井注入到油层,以保持油层压力,这个方法被称为油田注水,又称水驱。油田注水方式可改善开发效果,实现油田稳产,提高原油采收率。其中,注水井的质量决定油田开发效果,同时也影响油田寿命。注水井中注入水的质量由原油含量和悬浮物决定,其中悬浮颗粒的直径与含量是影响地层渗透率的主要因素,其决定了注水效率和原油采出率,没有达到注水标准 YS/T 5329-2012<sup>[3]</sup> 的注入水会导致地层岩心堵塞,致使石油采收率大幅度降低<sup>[4-5]</sup>。为了监测注入水的质量,研究者在地面井口处定期取样并进行室内检测。然而,注水井内油管各注入段易受温度、井下高压及油管腐蚀等的影响,目前关于井下注入水质量的实时在线监测研究鲜有报道。本文提出了一种水驱开发油田井下注入水质量的在线检测技术,该技术将仪器直接集成在油管内部,可以测量注水管中注入水的颗粒度,具有极强的研究意义与广泛的应用前景。

马尔文仪器是颗粒度检测领域的先驱者,其 Insitex 在线测量系统采用激光衍射技术,可快速测量颗粒度,但易受井下油管的尺寸以及深井高温、高压环境等的影响。为此,本文提出了一种基于光学散射原理的注入水颗粒度的检测技术<sup>[6-13]</sup>,并设计了注入水颗粒度的在线检测仪器,实现了水驱开发油田井下注入水颗粒度的在线检测,检测环境友好,检测过程安全可靠。通过对仪器参数的分析计算及光学系统的优化设计,开发了直径为 42 mm 且可直接安装于

井下油管内部并满足行业检测标准的实验样机,检测粒径的范围为 1~100  $\mu\text{m}$ ,其测量误差 $\leq 5\%$ 。

## 2 实验仿真

### 2.1 工作原理

为了实现油井井下注入水颗粒度的在线检测,要求系统的直径不能超过 42 mm,且环境适应性强,可以实现自动进/出样。设计的基于光学散射原理的颗粒度在线检测系统包括激光照明系统、进/出样系统、傅里叶变换成像系统和数据处理系统四部分。激光器发出的激光束经过光束整形系统后,具有一定光斑直径的平行光照射在样品池上,傅里叶变换成像镜组将来自不同散射方向的光线会聚到环形探测器上。样品池内的颗粒会改变平行光束的传输方向,颗粒粒径越小散射角越大。环形探测器可检测不同粒径颗粒的散射光的光强,通过反演计算可以确定不同粒径颗粒的数目或浓度。本文采用的环形探测器由 31 个同心感光半圆形环带和 30 个具有相同带宽的绝缘沟道组成,其最大环和最小环的直径分别为 30.8 mm 和 0.279 mm,中心孔径为 0.201 mm。基于探测器测得的散射光信号,通过改进的放大电路提取微弱光电流,以滤除系统和背景噪声的影响,并利用光能矩阵计算公式完成从光信号到粒度分布的反演输出。对传统遗传算法的迭代条件进行改进,得到的算法即为本文所使用的反演算法。通过寻找合适的适应度函数来修正系统误差<sup>[14]</sup>和背景噪声对测量结果的影响。结合非负最小二乘法、Chahine 算法与遗传算法,通过变异运算,实现颗粒度的精确反演计算。其原理结构如图 1 所示<sup>[15-16]</sup>。

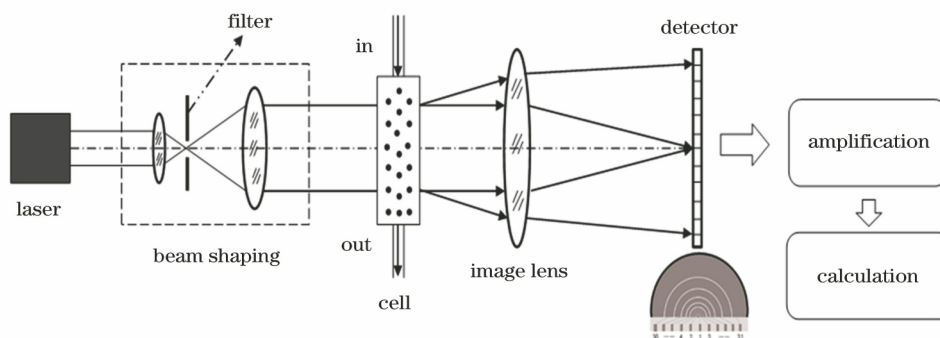


图 1 基于光学散射原理的颗粒度在线检测系统示意图

Fig. 1 Schematic of on-site particle size detection system based on optical scattering principle

在米氏散射理论中,颗粒直径与波长的比是一个重要的无量纲参数,这一参数称之为尺度系数,其定义式为

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为尺度系数; $D$  为颗粒的直径; $\lambda$  为照明光

的波长。

根据几何光学理论,可知颗粒散射角度方程为

$$\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta = \frac{r}{f}, \quad (2)$$

式中: $\theta$  为悬浮颗粒的散射角,也是傅里叶变换成像系统的视场角; $r$  为直径为  $D$  的颗粒在像面上的散射光斑的位置与环形探测器圆心间的距离; $f$  为傅里叶变换成像系统的焦距。

根据米氏散射模型进行理论计算,得到的散射光能量分布图如图 2 所示。图 2(a)所示是系统所使用的环形探测器的基本结构,包含中心单点、感光环带和绝缘沟道。其中,中心单点指的是位于环形探测器圆心处的单点探测器,它含有单一感光面,可单独计算光能分布;绝缘沟道不能进行光电转换,无法计算

其上的光能分布;感光环带是可以进行光电转换的硅光电二极管,可计算其上的光能分布。图 2(b)所示是环形探测器所接收到的米氏散射光的光能分布,可以看出,能量呈对称分布。能量极大值<sup>[17]</sup>为

$$X_m = \alpha \sin \theta_m \approx \frac{\pi D_m r_m}{\lambda f} = 1.357, \quad (3)$$

式中: $X_m$  称为无因次准则数; $\theta_m$  为散射能量极大时的光散射角; $D_m$  为散射能量极大时对应的颗粒直径; $r_m$  为直径为  $D_m$  的颗粒在像面上的散射光斑的位置与环形探测器圆心间的距离。

由(1)~(3)式可得,悬浮颗粒的散射角为

$$\theta \approx 1.357 \frac{\lambda}{\pi D}. \quad (4)$$

由(4)式可知,颗粒粒径越小,其散射角度越大。

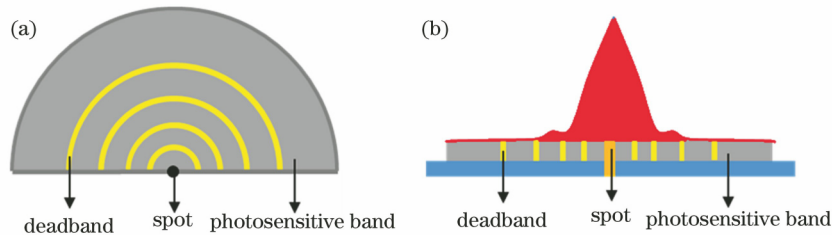


图 2 环形探测器及其接收到的米氏散射光的能量分布图。(a)环形探测器的结构示意图;

(b)米氏散射光在环形探测器上的能量分布

Fig. 2 Ring detector and Mie scattering light energy distribution. (a) Structural diagram of ring detector;

(b) Mie scattering light energy distribution at ring detector

由(3)式可得成像面上光能极大值的位置为

$$r_m = 1.357 \frac{\lambda f}{\pi D_m}. \quad (5)$$

(5)式为环形探测器感光环尺寸参数的重要设计依据,因此环形探测器感光环所对应的最小环半径  $r_{\min}$  和最大环半径  $r_{\max}$  分别为

$$r_{\min} = 1.357 \frac{\lambda f}{\pi D_{\max}}, \quad (6)$$

$$r_{\max} = 1.357 \frac{\lambda f}{\pi D_{\min}}, \quad (7)$$

式中: $D_{\max}$  为最大颗粒直径; $D_{\min}$  为最小颗粒直径。

## 2.2 光学设计

系统选用出光口径为 2 mm 的 640 nm 红光激光器作为照明光源,通过 4 倍准直扩束系统获得直径为 8 mm 的光束。为了保证系统能量得到充分利用,照明系统与傅里叶变换成像系统通过光瞳衔接,因此设定傅里叶变换成像系统的入瞳也为 8 mm。另外,系统直径不超过 42 mm,则探测器感光面的直径设定为 30 mm,即环形探测器最大环半径为 15 mm。根据注水标准 YS/T 5329-2012 中的要

求,定义待检测的最小颗粒直径为 1  $\mu\text{m}$ ,由(4)式计算得到傅里叶变换成像系统的焦距  $f \leq 52.7$  mm,因此假定傅里叶变换成像系统的焦距为 50 mm。由(2)式可得傅里叶变换成像系统的视场角为  $16.7^\circ$ ,因此设定系统视场角为  $17^\circ$ ,全靶面可清晰成像。颗粒度在线检测系统的详细参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Table 1 Parameters for optical system

Parameter	Value
Wavelength / $\mu\text{m}$	0.64
Aperture / mm	8
Focal length / mm	50
Field of view / ( $^\circ$ )	17
Image radius / mm	15

依据表 1 给出的系统参数对傅里叶变换成像系统进行优化设计。图 3 为傅里叶变换成像系统的光路图。由于样品池有一定的厚度,悬浮颗粒可能存在于样品池的任何位置,而样品散射的位置就是傅里叶变换成像系统的入瞳位置,因此整个成像过程

存在多个光阑位置,如样品池(cell)内前表面1号位置、样品池中间位置、样品池内后表面2号位置等。不同的光阑(L)位置会导致系统具有不同的像差分布,为了使不同光阑位置处都有良好的成像效果,系统采用多重优化结构。傅里叶变换成像系统采用双镜组结构,前组用于压缩系统口径,后组用于平衡初高级像差,系统外径为30.5 mm,长度为83 mm,不同光阑位置处不同视场点斑的几何半径均小于6  $\mu\text{m}$ ,如图4所示。

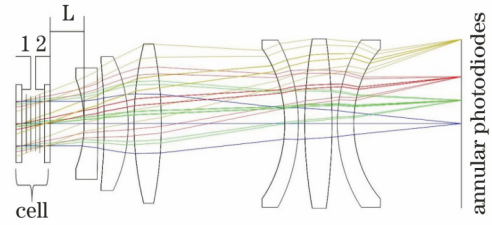
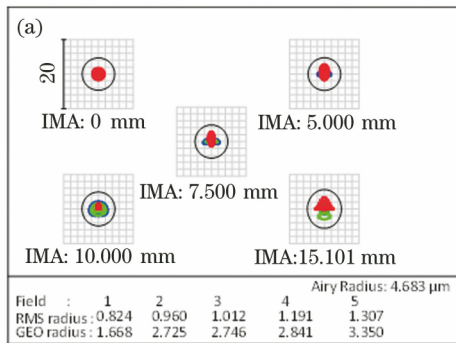


图3 傅里叶变换成像系统的光路图

Fig. 3 Light path map of Fourier transformation imaging system

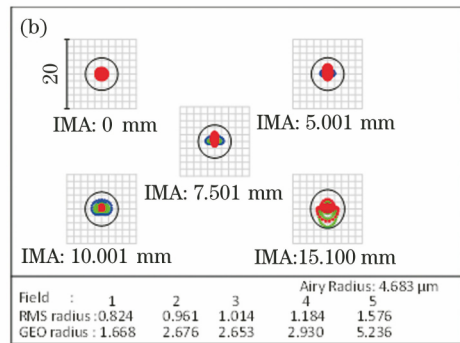


图4 不同光阑位置下的点斑图。(a) 1号位置;(b) 2号位置

Fig. 4 Spot pattern under each aperture position. (a) No.1 position; (b) No.2 position

### 2.3 理论算法

图5是根据米氏散射理论模拟的平面光照射单一粒径球体时散射光的光强分布。可以看出,散射光光强在空间区域的分布会出现一系列极大和极小的峰值。散射光光强的大小与粒径、折射率以及散射角等参数有关,大颗粒的散射角小,小颗粒的散射角大。

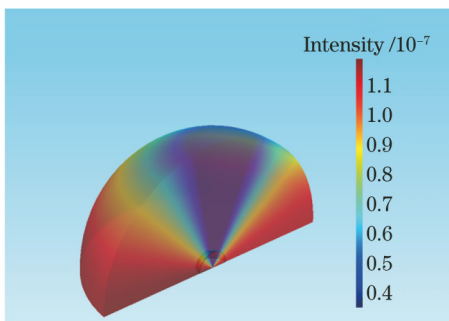


图5 球形颗粒散射光的光强分布

Fig. 5 Intensity distribution of light scattered by spherical particles

在不考虑复散射的情况下,对于多粒径颗粒群,散射光强则为不同空间处各粒子散射光光强的非相干叠加。由于环形探测器共有 $N$ 个感光环带,则将颗粒群的粒径范围分成 $N$ 个闭合区间。假设第 $i$ 个粒径区间的颗粒直径为 $D_i$ ,直径为 $D_i$ 的颗粒在

环形探测器第 $i$ 环上的散射光能量为 $E_i$ ,则有

$$E_i = \frac{W_i}{D_i^3} \int_{\theta_{i,\text{in}}}^{\theta_{i,\text{out}}} (i_1 + i_2) \sin \theta d\theta, \quad (8)$$

式中: $i_1$ 和 $i_2$ 为垂直和平行于散射面的散射强度函数; $W_i$ 为第 $i$ 个粒径区间内的粒子百分比; $\theta_{i,\text{in}}$ 和 $\theta_{i,\text{out}}$ 分别为第 $i$ 个感光环带内外径处对应的散射角。

对(8)式进行离散化处理,得

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_j \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,j} & \cdots & A_{1,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{j,1} & \cdots & A_{j,j} & \cdots & A_{j,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{N,1} & \cdots & A_{N,j} & \cdots & A_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_j \\ \vdots \\ W_N \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $E_j$ 为探测器第 $j$ 环收集的光能量; $W_j$ 为第 $j$ 个粒径区间内的粒子数百分比; $A_{j,j}$ 为光能分布系数矩阵元。

光能系数矩阵仅与探测器设计参数以及测量物质折射率有关,根据本文的系统设计参量,计算出归一化的光能系数,如图6所示。

### 2.4 实验验证

图7(a)为采用定心装调技术组装而成的傅里叶变换成像镜头,图7(b)为镜头的成像效果,可以

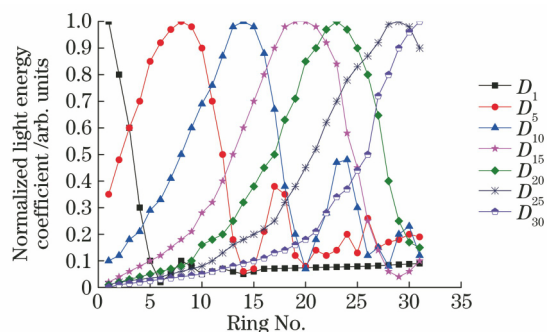


图6 归一化光能系数

Fig. 6 Normalized light energy coefficient

看出,该傅里叶变换成像镜头具备良好的同轴度。

图8所示为原理样机,样机总口径为42 mm,

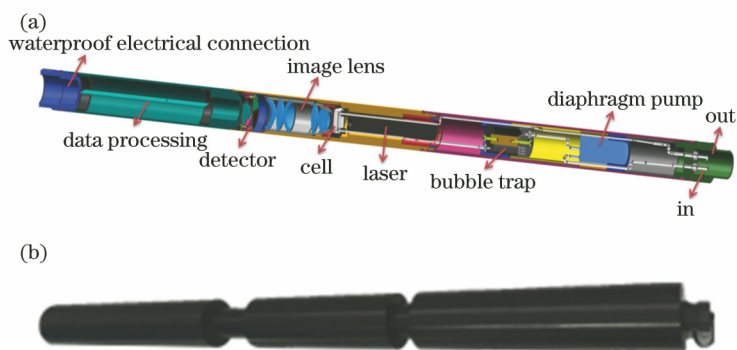


图8 原理样机。(a)结构;(b)实物

Fig. 8 Principle prototype. (a) Structure; (b) object

利用颗粒粒径为 5.0, 10.9, 27.0  $\mu\text{m}$  的聚苯乙烯二乙烯基苯标准液配备样品溶液,对原理样机进行测试。测试结果如表 2 所示。从测试结果可以看出,待测颗粒直径越小时,测试误差越大;原理样机的测试误差在 5% 以内,满足油井注入水测试精度的要求。

表2 原理样机的测试误差

Table 2 Test errors of principle prototype

Standard value / $\mu\text{m}$	Measurement value / $\mu\text{m}$	Error / %
5.0	5.23	4.6
10.9	11.22	2.9
27.0	27.19	0.7

### 3 结 论

通过分析计算系统的参数和对结构进行优化设计,完成了焦距为 50 mm、光学系统直径为 30.6 mm 的傅里叶变换成像系统优化设计。该系统可测试 1 ~ 100  $\mu\text{m}$  的粒径分布,且在不同光阑位置处均成像良好,中心点斑半径均小于 6  $\mu\text{m}$ ,远小于环形探测

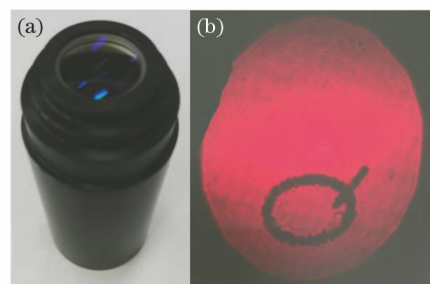


图7 傅里叶变换成像镜头。(a)实物;(b)成像效果

Fig. 7 Fourier transformation imaging lens. (a) Object;

(b) imaging effect

长度为 544 mm,主要由隔膜泵、除泡器、激光器、样品池、傅里叶变换成像镜头、光电探测器、数据采集系统、防水电气接口等部件组成。

器中心开孔半径,非散射光难以打到探测器的感光环上,极大地降低了系统的装调难度。通过配置标准样品液,完成了原理样机的性能测试。测试结果表明,准确性测试误差在 5% 以内。该技术为油田井下注入水质量的在线实时监测提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang S Z, Zhao Z X, Zhang M C. Analysis of factors affected on residual oil of low permeability reservoirs developed by water flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 1987, 14(4): 83-88. 张盛宗, 赵子先, 张茂昌. 低渗透油田注水开发后影响残余油的因素分析[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(4): 83-88.
- [2] Yuan C Z. Influence of injected water on fractured-vuggy core permeability in Tahe oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(3): 108-110, 118. 袁长忠. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏回注水水质指标对渗透率的影响[J]. 油气地质与采收率, 2014,



- 21(3): 108-110, 118.
- [3] National Energy Administration. Water quality standard and practice for analysis of oilfield injecting waters in clastic reservoirs: YS/T 5329-2012 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.  
国家能源局. 碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法: YS/T 5329-2012[S]. 北京:石油工业出版社, 2012.
- [4] He J, Jia B X, Xu H T, et al. The latest development and trend of profile control and water plugging technology[J]. Qinghai Shiyou, 2011, 29(3): 100-101.  
何佳, 贾碧霞, 徐海涛, 等. 调剖堵水技术最新进展及发展趋势[J]. 青海石油, 2011, 29(3): 100-101.
- [5] Wu S Y. Screening of the methods to improve oil recovery for ultra-high water-cut oilfield [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2015: 11-20.  
伍世英. 特高含水油田提高采收率方法筛选[D]. 荆州: 长江大学, 2015: 11-20.
- [6] Cornillault J. Particle size analyzer [J]. Applied Optics, 1972, 11(2): 265-268.
- [7] Takeo T, Hattori H. Particle sizing with a laser interferometer for spheres having sizes of several wavelengths[J]. Proceedings of SPIE, 1989, 1121: 499-503.
- [8] Dan Hirleman E, Oechsle V, Chigier N A. Response characteristics of laser diffraction particle size analyzers: optical sample volume extent and lens effects [J]. Optical Engineering, 1984, 23(5): 235610.
- [9] Xu F, Cai X S, Shen J Q. Approximation of Mie theory and its application in particle size measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1464-1469.  
徐峰, 蔡小舒, 沈嘉祺. 米氏理论的近似及在粒度测量中的应用[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1464-1469.
- [10] Cai Y, Su M X, Cai X S. Method for mixed-particle classification based on convolutional neural network [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712002.  
蔡杨, 苏明旭, 蔡小舒. 基于卷积神经网络的混合颗粒分类法研究[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712002.
- [11] Hu H, Zhang F G, Lü Q N, et al. Measurement upper limit of laser particle size analyzer[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0429001.  
胡华, 张福根, 吕且妮, 等. 激光粒度仪的测量上限[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0429001.
- [12] Zhang J, Cai X S, Zhou W. Nanoparticle size distribution inversion algorithm in image dynamic light scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0929001.  
张杰, 蔡小舒, 周骛. 图像动态光散射法纳米颗粒粒度分布反演算法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0929001.
- [13] Ge B Z, Pan L C, Zhang F G, et al. Abnormal moving of scattered energy distribution and its effect on particle size analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0629001.  
葛宝臻, 潘林超, 张福根, 等. 颗粒散射光能分布的反常移动及其对粒度分析的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0629001.
- [14] Dang B S, Sui L, Liu Y. Influence of laser beam quality factor M2 on measurement results of laser particle sizer[J]. Applied Physics, 2017, 7(9): 270-276.  
党博石, 隋龙, 刘英. 激光光束质量因子 M2 对激光粒度仪测量结果的影响[J]. 应用物理, 2017, 7(9): 270-276.
- [15] Yu S S, Du J, Shi X. Particle size analyzer's optical system design[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1735-1739.  
于双双, 杜吉, 史宣. 激光粒度仪光学系统设计方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1735-1739.
- [16] Shen S W. Research of laser particle sizer based on scattering theory[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 29-34.  
沈少伟. 基于散射原理的激光粒度测试仪研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 29-34.
- [17] Wang X Y. Research on particle size test algorithm based on Mie theory[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2011: 24-26.  
王雪艳. 基于米氏散射理论的粒度测试算法研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2011: 24-26.