

## 激光粒度仪光学系统设计方法

于双双, 杜吉, 史宣

(天津航技术物理研究所, 天津 300192)

**摘要:** 以米氏散射理论为依据, 提出了一种可以提高激光粒度仪测量精度的光学系统设计方法。该方法设计激光粒度仪光学系统时, 光阑位置在激光粒度仪测量区域内采用变焦方式, 同时控制每个视场上光线、主光线和下光线在接收器件-环形光电探测器的位置, 控制光阑位置变焦时每个视场上光线、主光线和下光线在接收器件位置, 使测量区域内散射角相同的光线形成的弥散斑最小。光学系统对光线的会聚真实地体现了激光粒度仪的测量理论的物理意义, 提高了激光粒度仪的测量精度。

**关键词:** 激光粒度仪; 光学系统设计; 米氏理论; CODE V

**中图分类号:** TP311.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1735-05

## Particle size analyzer's optical system design

Yu Shuangshuang, Du Ji, Shi Xuan

(Tianjin Jinhang Institute of Technial Physics, Tianjin 300192, China)

**Abstract:** Based on Mie theory, an optical system design method was established which can improve the measurement accuracy of the particle size analyzer. In the particle size analyzer's optical system design process, the diaphragm within the measuring range of the sample cell used a zoom method, it not only constrained the reference rays trace data for every field point at the ring detector to make the spot diagrams minimum, but also constrained the reference rays trace data for every field point of each zoom position at the ring detector to make the spot diagrams minimum. The optical system converges rays, which truly reflects the physical meaning of the particle size analyzer's measurement theory, improves the measurement accuracy.

**Key words:** particle size analyzer; optical system design; Mie theory; CODE V

收稿日期: 2013-10-05; 修订日期: 2013-11-03

作者简介: 于双双(1985-), 女, 工程师, 主要从事光学设计方面的研究。Email: yushuang1089@sina.com

## 0 引言

1976 年斯威辛班克等人用氦氖激光器做光源、用多元环形光电探测器接收散射光能的办法实现了对粒子尺寸及其分布的测量<sup>[1]</sup>。英国 Walvern 公司将他们提出的粒子测量系统仪器化,生产马尔文激光粒度仪<sup>[2]</sup>,从此,用激光粒度仪测量粒子尺寸及分布被广泛应用。激光粒度仪具有测量速度快、动态范围大、重复性好、准确度高、分辨率高、操作简单等优点,是最先进的粒度仪,也是粒度仪发展的方向。

## 1 激光粒度仪测量原理

Mie 散射理论是激光粒度仪测量粒子大小分布的理论依据<sup>[3-6]</sup>,它用数学模型精确地描述了折射率为  $n$ ,吸收率为  $m$ ,粒径为  $d$  的球形粒子,在波长为  $\lambda$  的单色光照射下,散射光强度随散射角  $\theta$  变化的空间分布函数,即散射谱。由 Mie 散射理论可知,粒径越大,前向散射越强,后向散射越弱;随着粒径的减小,前向散射迅速减弱,后向散射逐渐增强。激光粒度仪通过测量不同散射立体角度内的光强分布,计算出被测样品的散射谱,进而计算出粒子尺寸的统计分布。图 1 是激光粒度仪原理示意图。

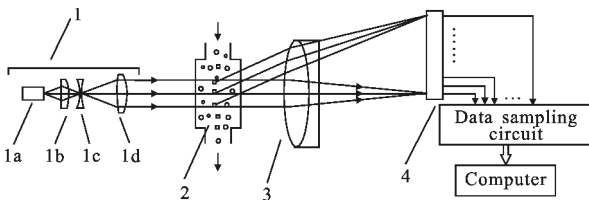


图 1 激光粒度仪原理示意图

Fig.1 Particle size analyzer schematic diagram

如图 1 所示,激光粒度仪主要由发射、测量窗口和接收三部分组成。发射部分 1 由激光器 1a 和光束整形光学系统 1b、1c、1d 组成,激光器发出的激光束经聚焦、低通滤波和准直后为激光粒度仪提供单色平行光。测量窗口 2 使被测样品在完全分散的悬浮状态下通过测量区,以便激光粒度仪获得散射光信息。接收部分由透镜 3 和环形光电探测器 4 组成,环形光电探测器位于透镜 3 的后焦面上,相同散射方向的光被聚焦在环形光电探测器的同一点上。

图 2 是环形光电探测器结构示意图,它由 32 个

同心半圆环组成,每个半圆环是一个独立的光强探测单元;光谱响应范围 450~1 000 nm;圆心位置是一个透光小孔,其后面是光电二极管,调整环形光电探测器位置,使光电二极管信号最强,这样光电探测器刚好位于透镜 3 焦平面处。



图 2 环形光电探测器结构示意图

Fig.2 Ring photodetector schematic diagram

激光器发出的平行光被测量窗口内的粒子散射,散射光经过透镜 3 会聚后,相同散射角的光聚焦在环形光电探测器的相同位置,每个光强探测单元可以测量出一定立体角范围(大小由探测器的内、外半径之差以及透镜的焦距决定)内的散射光能量。32 个光强探测单元输出的电信号反映了散射光能分布。粒度分布不同,光能分布也不同,测量光能分布就可以计算出样品的粒度分布。在环形光电探测器结构参数不变的情况下,焦距越小,相同光强探测单元对应的散射立体角越大,能测量的粒径越小。透镜焦距不同测量范围也不同。

## 2 激光粒度仪光学系统设计

图 3 是现有激光粒度仪光学系统设计原理示意图,其特点是光学系统设计时,光阑位于透镜的前表面,根据该方法设计的激光粒度仪光学系统结构见图 4。

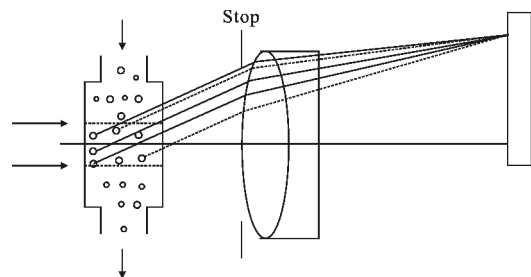


图 3 现有激光粒度仪光学系统设计原理示意图

Fig.3 Optical system design principle currently of particle size analyzer schematic diagram

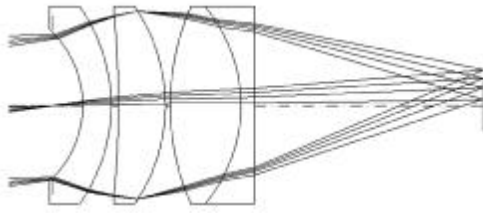


图 4 现有设计方法设计的激光粒度仪光学系统

Fig.4 Optical system currently of particle size analyzer

需要指出的是传统设计方法由于将光阑远离粒子散射区域,光阑的大小必须覆盖从粒子散射区域过来的全部光线,易导致光学系统的相对孔径大、高级像差难以控制等问题,在一定程度上会增大光学系统的设计压力。

如图 5 所示,  $s_1$  至  $s_n$  之间的轴向距离为光阑位置变焦范围,直径  $\varphi 16\text{ mm}$  的平行光通过透镜时,被透镜前  $40\sim 200\text{ mm}$  范围内的粒子散射,理想情况下,透镜前  $40\sim 200\text{ mm}$  范围内相同散射角的光聚焦在环形光电探测器的相同位置,由于透镜像差的存在,相同散射角的光线在环形光电探测器上形成一个弥散斑,弥散斑越小,系统测量精度越高。

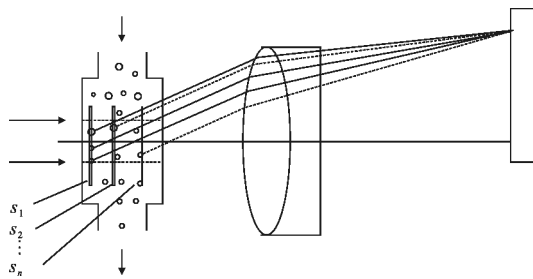


图 5 激光粒度仪光学系统设计原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of new optical system design principle of particle size analyzer

文中根据激光粒度仪测量原理的物理意义,即对无穷远进行成像,将相同角度的光线收集到探测器的同一区域。光学系统设计时,采用变焦系统设计原理,光阑位置在透镜前  $40\sim 200\text{ mm}$  范围内连续可变( $s_1\sim s_n$  之间),光学系统优化时控制相同视场不同光阑位置的上光线、主光线和下光线的位置,使透镜前不同位置粒子散射的相同散射角的光线在环形光电探测器上会聚成的弥散斑最小。

具体设计要求为:透镜焦距  $100\text{ mm}$ ;样品池位于透镜前  $200\sim 40\text{ mm}$  范围内,设计时采用 5 个变焦

位置  $200\text{ mm}$ 、 $160\text{ mm}$ 、 $120\text{ mm}$ 、 $80\text{ mm}$  和  $40\text{ mm}$  进行优化;环形光电探测器最外侧光强探测单元半径为  $15.25$ ,它是透镜的像方线视场。

环形光电探测器有 32 个光强探测单元, CODE V 最多能设定 25 个视场,考虑激光粒度仪的实际应用情况,光学系统设计时以视场角最大的 25 个光强探测单元的中心位置对应的视场角为基准进行优化,优化完成后考察 32 个光强探测单元的光能会聚情况。由于环形光电探测器结构特殊,每个光强探测单元的面积相差很大,最外边的第 32 个光强探测单元面积是第一个光强探测单元面积的两千多倍,光学设计时应考虑各视场的权重,即面积越大,权重越大,这种权重设计也符合透镜的使用要求,表 1 是该设计方法各视场权重设定表。

表 1 各视场权重设定表

Tab.1 Set field weight

Field	Weight	Field	Weight	Field	Weight
1	1	12	12	23	23
2	2	13	13	24	24
3	3	14	14	25	25
4	4	15	15	26	26
5	5	16	16	27	27
6	6	17	17	28	28
7	7	18	18	29	29
8	8	19	19	30	30
9	9	20	20	31	31
10	10	21	21	32	32
11	11	22	22		

优化设计时控制各视场的主光线、上光线、下光线、左光线以及右光线尽可能落在光强探测单元上的中心位置,利用 CODE V 宏语言编程对光学系统进行优化,其宏命令如下。图 6 是用该方法设计的光学系统光路图。

```

for ^i 1 n
for ^j 1 m
for ^k 1 4
y r^k si f^j gi z^i>low(^j) <up(^j)
end for
end for
end for
    
```

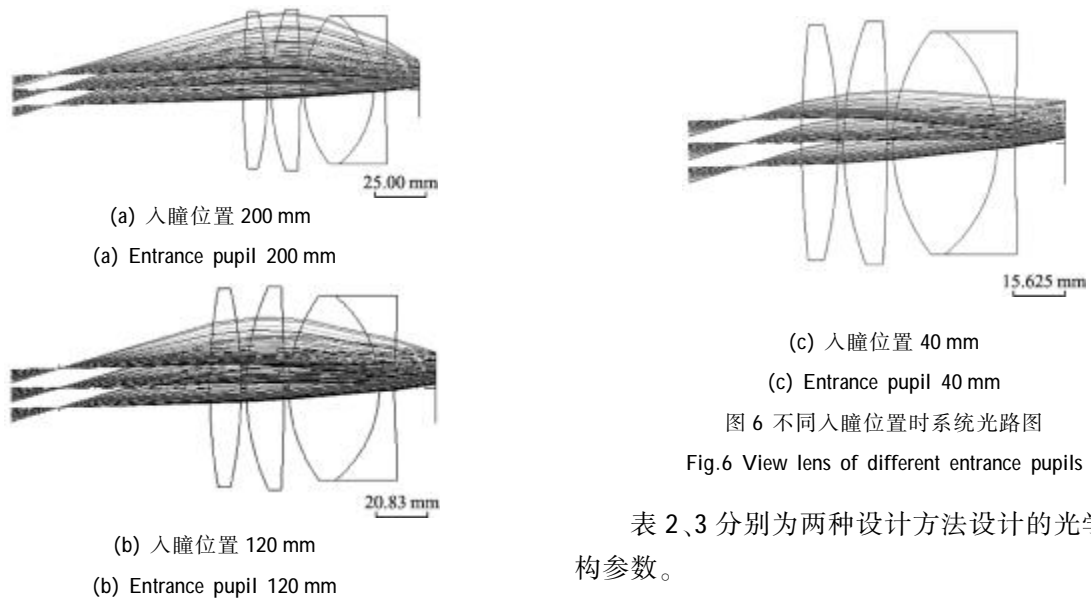


图 6 不同入瞳位置时系统光路图

Fig.6 View lens of different entrance pupils

表 2、3 分别为两种设计方法设计的光学系统结构参数。

表 2 文中方法设计的光学系统结构参数

Tab.2 Lens data of proposed design

Surface #	Surface name	Surface type	Y radius	Thickness	Glass	Refract mode	Y semi-aperture
Object		Sphere	Infinity	Infinity		Refract	
Stop		Sphere	Infinity	200.000 0		Refract	8.000 0
2		Sphere	Infinity	12.000 0	HK9L	Refract	37.643 6
3		Sphere	-234.000 0	2.000 0		Refract	38.505 6
4		Sphere	354.800 0	14.000 0	HK9L	Refract	39.000 0
5		Sphere	-354.800 0	2.000 0		Refract	39.000 0
6		Sphere	144.540 0	30.000 0	HLaF3A	Refract	38.513 3
7		Sphere	-51.500 0	6.000 0	HZF6	Refract	37.216 1
8		Sphere	Infinity	76.397 6		Refract	34.176 9
Image		Sphere	Infinity	0.000 0		Refract	15.250 0
End of data							

表 3 现有方法设计的光学系统结构参数

Tab.3 Lens data of currently design

Surface #	Surface name	Surface type	Y radius	Thickness	Glass	Refract mode	Y semi-aperture
Object		Sphere	Infinity	Infinity		Refract	
Stop		Sphere	Infinity	20.000 0		Refract	8.000 0
2		Sphere	-43.858 0	12.000 0	HZF6	Refract	9.937 0
3		Sphere	-72.538 3	3.000 0		Refract	40.000 0
4		Sphere	-406.236 2	20.000 0	HLaF3A	Refract	39.000 0
5		Sphere	-73.741 7	2.000 0		Refract	40.000 0
6		Sphere	104.314 2	30.000 0	HZK10L	Refract	39.000 0
7		Sphere	-65.375 4	6.000 0	HZF6	Refract	40.000 0
8		Sphere	Infinity	96.809 5 <sup>s</sup>		Refract	13.305 5
Image		Sphere	Infinity	0.000 0		Refract	15.250 0
End of data							

表4 为在相同条件下,根据透镜前 40~200 mm  
表4 两种设计方法各视场对应弥散斑大小  
(单位:mm)

Tab.4 Spot diagrams of two designs (Unit: mm)

Field	New design	Currently design
0	7.468 8e-011	1.270 8e-009
1	1.750 9e-008	2.979 6e-007
2	9.486 2e-008	0.000 002
3	2.976 8e-007	0.000 005
4	0.000 001	0.000 012
5	0.000 001	0.000 023
6	0.000 002	0.000 040
7	0.000 004	0.000 065
8	0.000 006	0.001 237
9	0.000 009	0.000 147
10	0.000 012	0.000 211
11	0.000 017	0.000 296
12	0.000 023	0.000 405
13	0.000 031	0.000 546
14	0.000 042	0.000 726
15	0.000 054	0.000 953
16	0.000 070	0.001 238
17	0.000 089	0.001 594
18	0.000 113	0.002 039
19	0.000 142	0.002 598
20	0.000 178	0.003 300
21	0.000 220	0.004 182
22	0.000 271	0.005 288
23	0.000 328	0.006 688
24	0.000 386	0.008 381
25	0.000 429	0.010 324
26	0.000 423	0.000 807
27	0.000 288	0.002 797
28	0.017 464	0.007 074
29	0.025 609	0.016 529
30	0.038 457	0.041 440
31	0.059 573	0.096 345
32	0.096 277	0.218 581

范围内被粒子散射的光在光强探测单元上的会聚位置,计算出的两个光学系统各视场弥散斑大小数据。经对比可知,采用光阑位置变焦方法设计的激光粒度仪光学系统,其弥散斑明显减小,系统测量精度高。

### 3 结论

文中通过对激光粒度仪工作原理及实际使用要求的分析,提出采用光阑位置变焦的方法设计激光粒度仪光学系统,并与常用光阑位置固定方法设计的相同光学结构型式的激光粒度光学系统进行对比。通过比较,光阑位置变焦方法设计的激光粒度仪光学系统弥散斑较小,系统测量精度较高。

### 参考文献:

- [1] Malvem Ins. Ltd. Mastersizer Instruction[Z]. 1998: 1-8.
- [2] Sun Xin, Zhang Guizhong, Jia Guangming, et al. Study of lasers sizers based on Mie scattering theory [J]. Modern Scientific Instruments, 2004, 5: 40-42. (in Chinese)  
孙昕, 张贵忠, 贾光明, 等. 基于米氏散射理论的激光粒度仪的介绍[J]. 现代科学仪器, 2004, 5: 40-42.
- [3] Bohren Craig, Huffman Donald R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. USA: John Wiley & Sons, Inc, 1998: 234-288.
- [4] Barth H G. Particle size analysis[J]. Analytical Chem, 1991, 63(2): 1-10.
- [5] Barth Howard G. Modern Methods of Particle Size Analysis [M]. USA: John Wiley & Sons, Inc, 1984: 139-140.
- [6] Meng Junhe, Zhang Zhen, Sun Xingwen. Cam optimization of a zoom lens [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(1): 51-54. (in Chinese)  
孟军和, 张振, 孙兴文. 变焦距镜头的凸轮优化设计[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(1): 51-54.