

减少激光粒度仪系数矩阵数目的方法

郑刚 张志伟 虞先煌 王乃宁

(华东工业大学光仪教研室, 上海 200093)

提要 通过分析激光粒度仪的系数矩阵的计算公式, 指出不同焦距下的各个系数矩阵之间存在着简单的比例关系, 即可由一个焦距对应的系数矩阵推得另一个焦距的系数矩阵, 从而可减少仪器测量所需的系数矩阵数目。这一关系式已由数值计算及对标准颗粒的实测得到证实。

关键词 激光测粒仪, 系数矩阵

1 引言

在众多的颗粒粒度测量仪中, 衍射式或散射式激光测粒仪由于其具有测量速度快、重复性好、测量对象广、测粒范围宽等一系列突出优点而受到广泛应用, 是目前颗粒测量仪器中占据主导地位的一类仪器^[1]。为满足不同尺寸大小颗粒的测量要求, 激光测粒仪常配备有一组不同焦距的接收透镜(Fourier 透镜), 通常每一个透镜都有一个与之相应的系数矩阵或一组系数矩阵(在 Mie 散射式激光测粒仪中, 在同一焦距下往往有多个系数矩阵, 它们分别与被测颗粒的一种可能折射率对应。由于被测颗粒的折射率各不相同, 因此常有一组系数矩阵供用户选择), 显然 N 个透镜所需的系数矩阵则是一个透镜的 N 倍。它们存贮在计算机的硬盘或其他介质中, 占据着较大的存贮空间。此外, 系数矩阵的计算也是相当费时费力的, 例如在一台 PC286 微机上计算一个系数矩阵需几个小时至十几个小时。本文经过对系数矩阵的计算公式的分析发现, 事实上各个透镜的系数矩阵相互之间存在着一个简单的比例关系, 即可从一个透镜的系数矩阵推得另一个透镜的系数矩阵, 因此仅用一个透镜的系数矩阵就可解决任意焦距下的颗粒尺寸的求解问题。

2 理论分析

激光测粒仪的光学系统如图 1 所示, 为分析方便起见, 下面以 Fraunhofer 衍射理论为依据。

激光测粒仪的工作原理是: 当一束平行的相干激光照射被测颗粒时, 即被散射或衍射, 这些散射

光经过随后的 Fourier 透镜, 被位于透镜后焦面上的同心多元环形光电探测器接收, 最后将测得的颗粒散射光能分布与颗粒的理论光能分布(即通过 Fraunhofer 衍射理论计算得到的球形

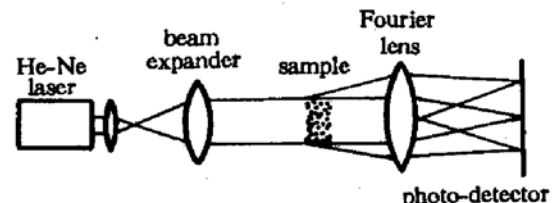


Fig. 1 Optical system of laser particle sizer

颗粒群的光能分布)进行优化比较,通过改变理论光能分布使其与实测光能分布的最佳吻合来推知被测颗粒的尺寸大小及尺寸分布^[2]。

根据夫朗和费衍射理论和巴俾涅互补定理,一个球形颗粒在透镜后焦面即在光电探测器上的衍射光强分布为

$$I = I(0)[2J_1(X)/X]^2 \quad (1)$$

式中 J_1 是第一类 1 阶 Bessel 函数,变量 $X = (\pi SD)/(\lambda f)$,其中 λ 为入射波长, S 为焦面上的半径, D 为颗粒直径, f 为透镜焦距。衍射光落在光电探测器各环上的光能分布可通过求式(1)在每个环面上的面积分得到,即

$$E_n = \int I 2\pi S dS = c[J_0^2(X_n) + J_1^2(X_n) - J_0^2(X_{n+1}) - J_1^2(X_{n+1})] \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中 $X_n = (\pi S_n D)/(\lambda f)$, n 表示光电探测器的第 n 个环。对于实际多颗粒系统,衍射光落在光靶各环上的光能分布是各个颗粒之散射光能的简单叠加,可写成矩阵形式^[2]

$$E = TW \quad (3)$$

式中 $E = (E_1, E_2, \dots, E_n)$,称之为光能分布列向量, $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$,称之为尺寸分布列向量(向量中的各个元素代表各尺寸通道中的颗粒所占的份额),而

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{N1} & t_{N2} & \dots & t_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

称之为系数矩阵, T 中各元素为

$$t_{ni} = \frac{1}{D_i} [J_0^2(X_n, i) + J_1^2(X_n, i) - J_0^2(X_{n+1}, i) - J_1^2(X_{n+1}, i)] \quad (5)$$

$$\text{式中} \quad X_n, i = (\pi S_n D_i)/(\lambda f) \quad (6)$$

由式(3)可见,对于一个确定的被测颗粒系,其在光电探测器上的光能分布完全由系数矩阵确定。因为 T 与透镜焦距有关,因此每个透镜都有一个相应的系数矩阵(如果采用 Mie 理论,那么 T 除与 f 有关外,还与被测颗粒的折射率有关^[3],在同一焦距下取多少个折射率,就有多少个 T 矩阵)。通常,测粒仪就是将每个焦距下的系数矩阵同时存于硬盘之中的。事实上,仪器中光电探测器的几何尺寸 S_n 及 Fourier 透镜的焦距 f 是定值,式(5)、(6)中的尺寸 D_i 也是定值,它们满足下式^[2,4]

$$\frac{\pi D_i S_n}{\lambda f} = C = 1.357$$

由上式得 $D_i = (\lambda f C)/(\pi S_n)$,代入式(5)、(6)得

$$t_{ni} = \frac{K}{f} \left[J_0^2\left(\frac{S_n}{S_i} C\right) + J_1^2\left(\frac{S_n}{S_i} C\right) - J_0^2\left(\frac{S_{n+1}}{S_i} C\right) - J_1^2\left(\frac{S_{n+1}}{S_i} C\right) \right] = F \left[\frac{S_n}{S_i} \frac{C}{f} \right] \quad (7)$$

式中 K 为常数。由上式显然可见,不同焦距的系数矩阵相互之间仅相差一个倍数,例如 f_1 的系数矩阵与 f_2 的系数矩阵,它们的关系为

$$(t_{ni})_{f_2} = \frac{f_1}{f_2} (t_{ni})_{f_1} \quad (8)$$

因此,测粒仪中只要已知一个焦距对应的系数矩阵,其他焦距的系数矩阵简单地就是该矩阵与它们焦距比的乘积,即测粒仪仅需存贮一个焦距对应的系数矩阵。从而使它的存贮空间及计算

时间都大为减少,十分有利于便携式激光粒度仪的进一步简化与应用(对用 Mie 散射理论的激光粒度仪这些优点尤为明显)。

3 数值计算及实验验证

为验证上述理论分析的正确性,用式(5)对 Fourier 透镜的几个常用焦距($f = 63 \text{ mm}$, 100 mm , 300 mm , 600 mm , 1000 mm)的系数矩阵分别进行了实算,并比较了它们之间的关系,结果表明式(8)成立。由于系数矩阵至少是 15×15 阶矩阵,为节省篇幅,本文仅列出部分焦距的前 4 行 4 列,以供比较,如表 1 所示。由表显然可见式(8)精确成立。表 2 列出了对 7 种标准颗粒的实测结果,其中前 5 种由核工业部第 5 研究所生产,它们符合 GBWE 标准,后 2 种由美国 Duke 公司生产。测量时采用 $f = 100 \text{ mm}$ 的 Fourier 透镜,而计算时采用 $f = 63 \text{ mm}$ 的系数矩阵并乘以相应的系数 $63/100 = 0.63$,可见仪器有很高的测量精度,这也从实验的角度证实了本文理论分析的正确性。需要指出的是,上述实测结果与采用 $f = 100 \text{ mm}$ 的系数矩阵所得的结果相同。

Table 1 Calculation results of the coefficient matrix

$f = 101.5 \text{ mm}$				$f = 298.5 \text{ mm}$				$f = 612 \text{ mm}$			
T_1				T_2				T_3			
0.4926	0.9012	1.521	2.490	0.1676	0.3063	0.5174	0.8469	0.08169	0.1495	0.2522	0.4129
0.829	1.516	2.557	4.184	0.2820	0.5156	0.8698	1.423	0.1375	0.2514	0.4241	0.6939
1.034	1.891	3.190	5.216	0.3518	0.6434	1.085	1.774	0.1715	0.3137	0.5290	0.8650
1.300	2.377	4.006	6.544	0.4423	0.8084	1.363	2.226	0.2156	0.3942	0.6643	1.085
				$T_2 = f_1/f_2 T_1$				$T_3 = f_1/f_3 T_1$			

Table 2 Experimental results of standard latex sphere

Latex sphere	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
Normal D_m (μm)	3.36	5.02	10.14	16.32	20.46	5.1	9.0
Measured D_{32} (μm)	3.48	4.86	9.70	16.10	20.96	5.16	9.19
Error (%)	3.6	3.2	4.3	1.3	2.4	1.2	2.1

参 考 文 献

- 1 H. G. Barth, S. T. Sun. Particle Size Analysis. *Analytical Chem.*, 1991, **63**(2): 1R~10R
- 2 H. G. Barth. Modern methods of particle sizer analysis, New York: John Willey & Sons, 1984. 135~151
- 3 Zheng Gang *et al.*. Improving the accuracy of laser particle sizer with Mie scattering theory. *Chinese Journal of Lasers (E. E.)*, 1992, **1**(5): 423~428
- 4 郑 刚 等. 减少光靶环数提高激光测粒仪的计算速度. *中国激光*, 1993, **20**(9): 658~662

A Method for Reducing the Number of Coefficient Matrix in Laser Particle Sizer

Zheng Gang Zhang Zhiwei Yu Xianhuang Wang Naining

(East China University of Technology, Shanghai 200093)

Abstract Through analysis of the coefficient matrix formula in the laser particle sizer, a simple relational expression between coefficient matrixs, which relate to the focus of the Fourier lens, is derived, so that an arbitrary matrix can be derived from another one. By using this relational expression the number of the coefficient matrix can be obviously reduced. The expression is verified through the numerical caculations and experimental measurements for the standard latex spheres.

Key words laser particle sizer, coefficient matrix

无光学系统 LD 泵浦 Nd : YAG 微片激光器*

在研究单纵模 LD 泵浦微片激光器的过程中,我们于 1994 年 6 月 3 日实现了无光学系统 LD 泵浦 Nd : YAG 微片激光器的室温连续运转。采用本所研制的高功率半导体激光器列阵器件 F-S1-940311-5,输出波长 803 nm。所用的 Nd : YAG 微片厚度 700 μm ,面积 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 。在输入端镀有对 810 nm 的增透膜和对 1.06 μm 的高反膜,在输出端镀有对 810 nm 的高反膜,对 1.06 μm 的反射率约为 99%。在管芯烧焊好后,仔细地将 Nd : YAG 微片装在管芯的前面,并兼作窗口。管芯与微片之间的距离没有测量,估计为 100 μm 量级。由于不用光学系统,与文献[1]中的实验系统相比,器件体积大大缩小了。整个器件与半导体激光器一样大。输出光束的性质与文献[1]类似;输出波长 1.064 μm ,单横模,单纵模,有良好的方向性,发散角 $\sim 2 \text{ mrad}$,输出功率(CW)大于 10 mW 等。这种新型激光器的实现在我国尚属首次。目前,我们还在进行仔细的工艺研究,以进一步提高该激光器的性能。

参 考 文 献

- 1 Zhenguo Shan *et al.*. LD Pumped Nd : YAG microchip lasers. *Chinese J. of Laser*, 1993, B2(4) : 289

(中国科学院上海光机所 单振国 屠玉珍 印 苏 黄国松
收稿日期: 1994 年 9 月 21 日)