

Influence of Laser Beam Quality Factor M2 on Measurement Results of Laser Particle Sizer

Boshi Dang, Long Sui*, Ying Liu

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin
Email: dangboshi@163.com, *297490719@qq.com

Received: Aug. 23rd, 2017; accepted: Sep. 5th, 2017; published: Sep. 13th, 2017

Abstract

The laser particle size analyzer, the laser as the important component of the illumination, is a new equipment for the particle size analysis of the particle. The laser beam quality factor M2 is an evaluation standard for the quality control and aided design of the laser system. After analyzing the particle size distribution function and the working principle of laser particle sizer, the effect of laser beam quality factor M2 on the measurement results of Laser Particle Sizer is emphasized. The results show that the M2 factor mainly results from the two aspects of the beam divergence and the waist width of the beam. The simulation example analysis draws the following conclusions: The size of the beam divergence angle is proportional to the error value, that is, the smaller the divergence angle, the smaller the error. In the M2 factor selection range (1 ~ 1.8), the influence of the beam waist width on the measurement results of the instrument is negligible. Moreover, the M2 factor is directly proportional to the beam divergence angle and inversely proportional to the beam waist width. Therefore, the smaller the M2 factor, the smaller the error caused by the laser particle sizer. Therefore, it is very important to study the influence of M2 factor on the measurement result of laser particle sizer.

Keywords

Laser Particle Size Analyzer, Beam Quality Factor M2, Beam Divergence Angle, Beam Waist Width

激光光束质量因子M2对激光粒度仪测量结果的影响

党博石, 隋 龙*, 刘 英

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春
Email: dangboshi@163.com, *297490719@qq.com

*通讯作者。

收稿日期：2017年8月23日；录用日期：2017年9月5日；发布日期：2017年9月13日

摘要

激光粒度仪是新兴的颗粒物粒度分析的检测设备，其以激光器作为照明的重要组件。激光光束质量因子M2是对激光器系统进行质量监控及辅助设计的评价标准。本文在分析了颗粒粒度分布函数和激光粒度仪工作原理之后，又着重介绍了激光光束质量因子M2对激光粒度仪测量结果的影响。研究表明，M2因子主要是从光束发散角和光束束腰宽度两个方面导致仪器的测量结果产生误差。举例分析、模拟仿真得出以下结论：光束发散角的大小与误差值成正比，即发散角越小，则误差越小；在M2因子选取范围内(1~1.8)，光束束腰宽度对仪器的测量结果的影响可以忽略不计。又M2因子与光束发散角是正比关系，与光束束腰宽度成反比，因此，M2因子愈小，对激光粒度仪测量结果造成的误差就愈小。为此，研究M2因子对激光粒度仪测量结果的影响就显得尤为重要了。

关键词

激光粒度仪，光束质量因子M2，光束发散角，光束束腰宽度

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在科学研究和工业、农业生产生活等方面，许多物质均由粉状颗粒物或液体中悬浮颗粒物等形式构成。经过多年的研究探索发现，这些颗粒物的粒度分布对产品的质量和性能有显著的效用。例如：在装备制造制造业中，以液压系统[1]为例。液压系统故障70%~80%来自油液污染，尤以颗粒物污染为油液污染的重中之重。在建材、化工[2] [3] [4]等应用领域，水泥的粒度配比影响凝结时间及混凝土强度；涂料的粒度分布影响涂饰效果、表面光泽和使用寿命；玻璃的粒度影响透光率和韧性强度等等。在生活健康、安全方面，空气、饮用水以及食品中污染物颗粒的含量影响人类的身体健康，严重者甚至危及生命。因此，在上述应用领域中，相应的颗粒粒度测量就显得相当重要。有效地测量与控制颗粒粒度及其分布，对提高产品质量、降低能源消耗、控制环境污染、保护人类的健康等具有重要意义。

2. 颗粒粒度分布的理论

一般的，将颗粒粒度分布概括为两种形式，分为分布函数限定和无模式分布(又称独立分布)。由于独立分布没有固定的数学模型，因此在本文中不做描述。下面主要介绍一下分布函数。其中，正态分布、罗辛-拉姆勒分布(简称R-R分布)尤为经典。

2.1. 正态分布

最早由A.棣莫弗在求二项分布的渐近公式中得到。它是一个在数学、物理及工程等领域都非常重要的概率分布，在统计学的许多方面有着重大的影响力。同时，正态曲线呈钟型，两头低，中间高，左右对称因其曲线呈钟形，因此人们又经常称之为钟形曲线。

若随机变量X服从一个位置参数为 μ 、尺度参数为 σ 的概率分布，且其函数形式为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

则这个随机变量就称为正态随机变量，正态随机变量服从的分布就称为正态分布，记作 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，读作 X 服从 $N(\mu, \sigma^2)$ ，或 X 服从正态分布。

2.2. R-R 分布

R-R 分布是由罗辛和拉姆勒在 1993 年首次提出来的，是一种概率分布函数，其函数的形式为

$$R = \exp\left[-\left(\frac{D}{X}\right)^N\right] \quad (2)$$

其中， R 代表颗粒物直径在 D 值以上的累计重量百分数， X 称为颗粒物尺寸参数，表示大于这个尺寸的颗粒在全部颗粒中的累积重量， X 的值大小总体上反映了所有颗粒物的尺寸大小； N 称为分布参数，是一无因次量，它反映了颗粒粒径的分散程度， N 越小，分散度越大， N 增大时，颗粒趋向于单分散。

3. 激光粒度仪的原理

当光束通过不均匀介质所发生的光束偏转，就是光的散射，这里产生的散射光与原光束之间的偏转角即为散射角。激光粒度仪就是以颗粒对光的散射原理为依据，可用于检测颗粒物粒度分布的分析仪器。颗粒愈大，产生的散射光的散射角愈小，反之，颗粒愈小，产生的散射光的散射角愈大。也就是，颗粒的大小与产生的散射光的散射角的大小成反比例关系。

1908 年，Mie 在电磁理论的基础上，从麦克斯韦方程出发，对于平面线偏振单色波被一个位于均匀媒质中具有任意直径和任意成分的均匀球衍射，得出了一个严格解，这就是著名的 Mie 氏理论[5]-[11]。对于球型颗粒，垂直与平行于光轴方向的光强分别为：

$$\begin{aligned} I_r &= \frac{1}{k^2 r^2} |S_1(\theta)|^2 I_0 \sin^2 \psi = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 I_0 \sin^2 \psi \\ I_l &= \frac{1}{k^2 r^2} |S_2(\theta)|^2 I_0 \sin^2 \psi = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_2 I_0 \sin^2 \psi \end{aligned} \quad (3)$$

对散射光强在所有方向上进行积分后除以颗粒的投影面积得散射系数 k_s

$$k_s = \frac{2}{\alpha^2} \cdot \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) (|a_l|^2 + |b_l|^2) \quad (4)$$

如图 1 所示，激光粒度仪[12] [13] [14] [15] [16]主要由以下几个部分组成：激光器、扩束准直光束整形系统、样品池与傅里叶透镜、探测器及计算机处理系统。来自激光发生器的窄光束，经扩束准直系统后变为平行光，照射到含有颗粒群的样品池上。颗粒群产生的散射光经傅里叶变换透镜会聚后，由放置在后焦面上的多元光电探测器组成。光电探测器由多个独立的半圆环状探测单元组成，其作用是将每个环面上的颗粒群的远场散射光转换成相应的电信号输出，电信号经放大及 A/D 转换后输入计算机。由于散射光能分布、强弱与样品池中的被测颗粒的粒径与数目有着一一对应的关系。计算机即可依据测得的各环上的散射光能值，调用事先编制好的程序，反演出颗粒尺寸分布等参数。

4. 激光光束质量因子 M2

激光光束质量是激光器的一个重要技术指标，是从质的方面来评价激光的特性。但是，较长时期以来，对光束质量一直没有确切的定义，也未建立标准的测量方法，对科研和应用都带来了不便。1988 年，

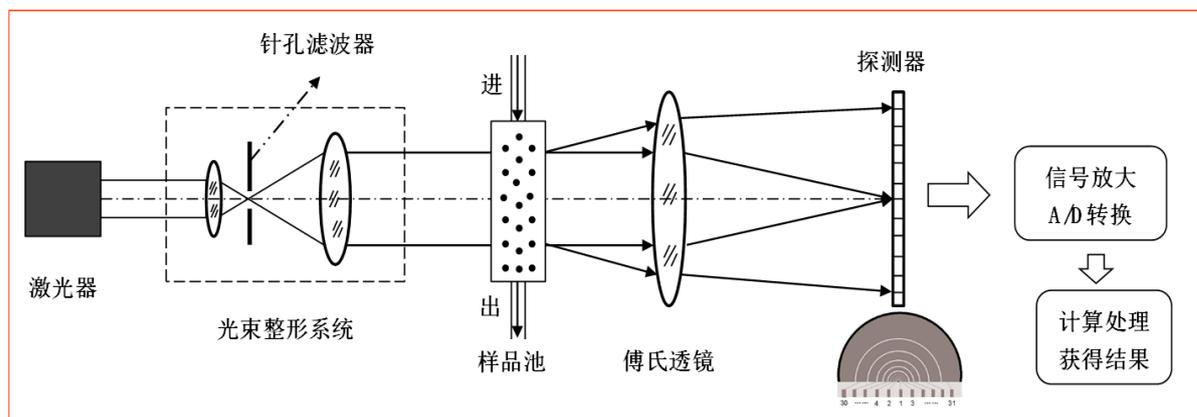


Figure 1. Sketch of optical system structure of laser particle sizer

图 1. 激光粒度仪的光学系统结构示意图

A.E.Siegman 引入了一个无量纲的量 - 光束质量因子参数, 较科学合理地描述了激光光束质量, 并被国际标准化组织 1991 年的 ISO/TC172/SC9/WG1 标准草案采纳, 激光光束质量因子的研究和测量也成为近几年研究的热点。光束质量是衡量激光光束优劣的一项重要指标。但是, 较长时间以来, 光束质量一直没有确切的定义, 也未建立标准的测量方法, 这给科研和应用都带来不便。常用来评价光束质量的方法有: 原衍射极限倍数因子、斯特列尔比、环围能量比、M2 因子或其倒数 K 因子(光束传输因子), 各种光束质量的定义对应于不同的应用目的, 所反映光束质量的侧重点也不同。激光光束质量 M2 因子被国际光学界所公认并由国际标准化组织(ISO)予以推荐。M2 因子克服了常用光束质量评价方法的局限, 用 M2 因子作为评价标准对激光器系统进行质量监控及辅助设计等具有十分重要的意义。

M2 因子的概念较早是由 M.Larry 提出的, 其定义为

$$M2 = \frac{R \times \theta}{R_0 \times \theta_0} \quad (5)$$

其中: R 为实际光束的束腰半径, R_0 为基模高斯光束的束腰半径, θ 为实际光束的远场发散角, θ_0 为基模高斯光束的远场发散角。当光束质量因子 M2 为 1 时, 具有最好的光束质量。

高阶模光束的焦斑直径和远场发散角都是单模高斯光束的 M2 倍。依据光束质量因子 M2 可以求出激光的发散角 θ 和激光束腰 d [17]

$$\theta = M2 \cdot \frac{4\lambda}{\pi D} \quad (6)$$

$$d = D/M2 \quad (7)$$

M2 因子评价方法常用于低功率激光器产生光束截面上光强分布为连续的激光光束。由于采用光束的二阶矩定义束宽, 对测量仪器要求较高。激光束的特征就可以用功率、波长、光束质量几个参数表示出来, 光束质量 M2 因子是表征激光束亮度高、空间相干性好的本质参数。将光场在空域及频域的分布来表示光束质量 M2 因子, 即 $M2 = 4\pi\sigma_s\sigma_{sv}$, 便可知道 M2 因子能够反映光场的强度分布与相位分布的特性。相对其它评价方法来说, M2 因子能较好地反映光束质量的实质, 具有较强的普适性, 并且积分地反映了光强的空间分布。

在本文中, 我们只讨论激光器的光束质量因子 M2 对激光粒度仪的影响。利用光束质量因子 M2 评价激光束的质量具有重要特点: ① M2 因子表示实际光束偏离基模高斯光束(衍射极限)的程度; ② M2 因子综合描述了光束的质量, 包括光束远场和近场特性; ③ 光束通过理想光学系统后 M2 因子不变。

5. M2 因子对激光粒度仪测量结果影响的仿真分析

光束质量因子 M2 的参数同时包含了远场和近场特性,能够综合描述光束的品质,且具有通过理想介质传输变换时不变的重要性质。对光束质量因子 M2 的表述可以归结为光束远场发散角和光束束腰宽度的表述。为此,分析 M2 因子对激光粒度仪测量结果的影响应该着重于上述两个方向。以待测颗粒直径范围 1~100 μm ,激光器波长 650 nm 为例。

5.1. 激光光束远场发散角

一般激光器通常都是高斯光束,它在传播方向上有一个位置处的光斑直径最小,称为腰斑,其他位置处的光斑直径都比腰斑大,但激光的发散角一般都很小,在毫弧度的量级。激光粒度仪是根据不同直径大小的颗粒的散射光的散射角不同来测量待测样品中的颗粒粒度分布的。因此,当激光器存在一定的激光光束远场发散角时,必将引入一定的杂散光误差。接下来主要针对激光光束远场发散角对整个激光粒度仪系统引入的杂散光误差情况进行分析。

单模激光器的光束质量因子 M2 取值范围在 1~1.8 之间,当 M2 因子为 1 时,激光器工作模式为基模,即有最好的光束质量。首先,选取激光光束质量因子 M2 为 1.5 (一般的单模激光器的 M2 因子均 ≤ 1.5),由公式(6)可知,此时的光束远场发散角为 0.6 mrad。又待测颗粒直径范围为 1~100 μm 。在图 2 中,模拟待测颗粒粒度分布满足分别 D50 为 5 μm 时,不同分布函数(正态分布和 R-R 分布)引起的,对激光粒度仪测量结果有影响的杂散光误差曲线。

如图 2 所示,黑色实线表示的是正态分布,红色虚线表示的是 R-R 分布。当激光光束远场发散角为 0.6 mrad 时,颗粒粒度分布为正态分布,其杂散光误差最大值约为 0.5%;颗粒粒度分布为 R-R 分布,其杂散光误差数值均小于 1.0%。由此可以看出,当作为激光粒度仪的入射光源的激光光束有一定的远场发散角时,其造成的杂散光误差与颗粒粒度分布的形式有关。

其次,假如待测颗粒直径范围仍为 1~100 μm ,当激光光束质量因子 M2 在 1~1.8 范围内变化时,相应的光束远场发散角在 0.4~0.72 mrad 范围内变化,杂散光误差的关系曲线如图 3 所示。图 a 中粒度分布函数为正态分布,图 b 中粒度分布函数为 R-R 分布。对比分析图 3 所示曲线趋势,得出结论:当激光光束远场发散角越小时,其杂散光误差越小。

5.2. 激光光束束腰宽度

在本文中,只讨论激光器空间模式是基模的情况。基模的振幅分布为

$$u_{00}(x, y, z) = c_{00} \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} \cdot e^{-i \left[k \left(z + \frac{x^2+y^2}{2R(z)} \right) - \arctan \frac{z}{f} \right]} \quad (7)$$

在任意一横截面上,振幅的横向分布是高斯型的,即:在中心轴上,振幅达到极大值;在轴外,振幅随中心轴距离的平方指数衰减。激光粒度仪是以到达探测器表面的颗粒散射光能量为基准,通过反演算法计算得出待测颗粒样品中的颗粒粒度分布的。

激光光束束腰宽度是衡量激光光源光场横向分布的重要指标,可以用其表示激光光源在照明目标面上的光强分布情况——激光光源的均匀度。为此,当作为初始光源的激光器的光斑不均匀时,同样会导致系统中的误差的生成。

若理想光学系统中的单模高斯光束质量因子 M2 为 1,选取因子 M2 为 1.5,则计算得出的激光光源均匀度为 45%,待测颗粒直径仍为 1~100 μm ,则图 4 表示的是不同颗粒分布时的系统误差情况。在图 4 中,黑色实线是均匀光源,红色虚线是不均匀光源,可以看出:均匀光源与不均匀光源对粒度分布结果

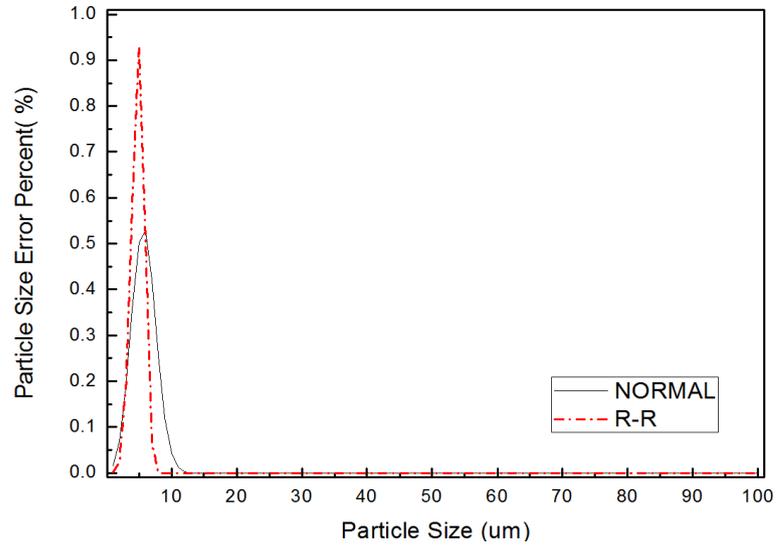


Figure 2. Error curve of stray light
图 2. 杂散光误差曲线

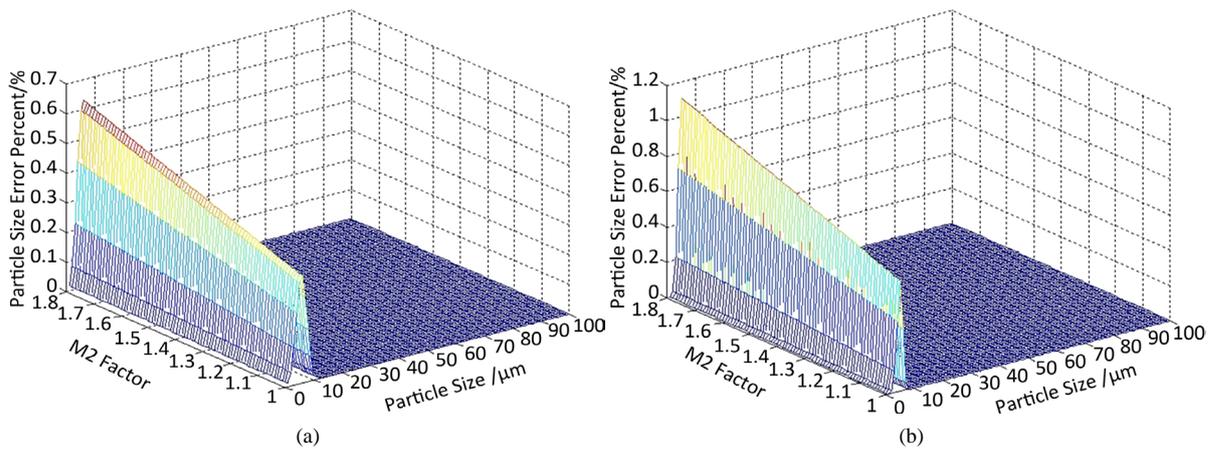


Figure 3. Error curve of stray light; (a) Normal distribution, (b) R-R distribution
图 3. 杂散光误差关系曲线; (a) 正态分布, (b) R-R 分布

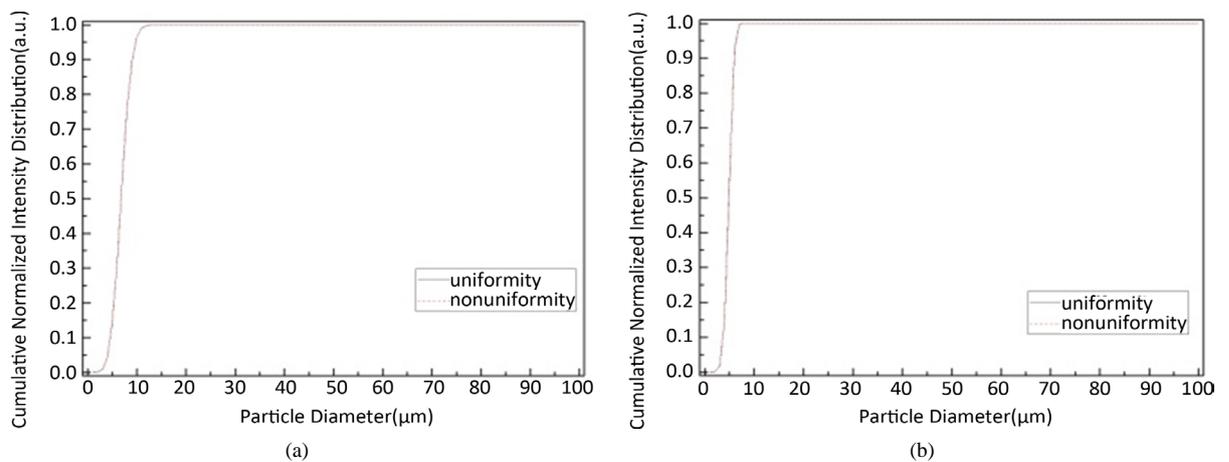


Figure 4. Influence of uniformity of light source on measurement results; (a) Normal distribution, (b) R-R distribution
图 4. 光源均匀性对测量结果的影响; (a) 正态分布, (b) R-R 分布

的影响在 10^{-16} 量级, 可以忽略不计。

6. 结论

本文着重分析激光光束质量因子 $M2$ 对激光粒度仪的测量造成的影响。激光光束质量因子 $M2$ 是一种评价激光器质量的主要标准。它描述了光束的质量, 包括光束远场和近场特性。首先, 激光光束质量因子 $M2$ 作用于激光光束远场, 导致激光光束远场发散角的产生, 进而扩展到激光粒度仪中探测器接收到的散射光信号的角度, 在光学系统中引入了杂散光误差。该误差与颗粒物粒度分布形式有直接关系: 当颗粒粒度分布为正态分布或 $R-R$ 分布时, 系统测量误差均小于 1%, 可以忽略。其次, 激光光束质量因子 $M2$ 会使激光光束束腰宽度发生改变, 从而顺延到了激光光束均匀度和激光光场分布的变化, 系统测量误差在 10^{-16} 量级, 不予考虑。

近年来激光粒度测量技术发展迅速, 激光粒度仪作为颗粒物粒度检测的新型设备, 它因其具有测试范围广、适用范围广、重复性高、操作简单、测量速度快、可以实现实时在线测量等特点, 在建材、化工、冶金、能源、食品、地质、航空航天等领域拥有极为广泛的应用。而激光器是激光粒度仪的重要组成部分, 因此, 探究激光光束质量因子 $M2$ 对激光粒度仪的影响, 具有十分深远的意义。

参考文献 (References)

- [1] 姜靓. 马尔文激光粒度分析仪在油品研究中的应用[J]. 现代科学仪器, 2004(6): 48-50.
- [2] 胡如静. 激光粒度分析仪在水泥生产过程中的应用实践[J]. 科技信息(学术研究), 2008(14): 242-243.
- [3] 张永刚, 黄宁, 周湘玲, 等. 激光粒度仪在涂料分析测试中的应用[J]. 中国涂料, 2009, 24(7): 31-35.
- [4] 孙云栋. 激光粒度分析仪对玻璃纤维原料颗粒度分析的指导作用[J]. 玻璃纤维, 2015(6): 27-31.
- [5] 任智斌, 卢振武, 刘玉玲, 李凤有, 曹召良, 孙强. Mie 理论归一化散射光强的研究[J]. 光电子激光, 2003, 14(1): 83-85.
- [6] 孙国正, 孙强, 任智斌. 基于 Mie 散射理论的微球体颗粒半径分析[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 495-498.
- [7] 项建胜, 何俊华. Mie 光散射理论的数值计算方法[J]. 应用光学, 2008, 28(3): 363-366.
- [8] 朱震, 叶茂, 陆勇, 陆永刚, 胡涛, 王式民. 光散射粒度测量中 Mie 理论的高精度算法[J]. 光电子激光, 1999, 10(2): 135-138.
- [9] 王清华, 张颖颖, 来建成, 李振华, 贺安之. Mie 理论在生物组织散射特性分析中的应用[J]. 物理学报, 2007, 56(2): 1203-1027.
- [10] 袁易君, 任德明, 胡孝勇. Mie 理论递推公式计算散射相位函数[J]. 光散射学报, 2006, 17(4): 366-371.
- [11] 王式民, 朱震, 叶茂, 陆勇, 陆永刚, 徐益谦. 光散射粒度测量中 Mie 理论两种改进的数值计算方法[J]. 计量学报, 1999, 20(4): 279-285.
- [12] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 粒度分析理论技术进展及其应用[J]. 世界地质, 2005, 24(2): 203-207.
- [13] 雷国良, 张虎才, 张文翔, 等. Mastersize 2000 型激光粒度仪分析数据可靠性检验及意义[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 531-539.
- [14] 付海龙. LS13320 激光粒度分析仪的应用[J]. 中国高新技术企业, 2007(12): 100.
- [15] 陈秀法, 冯秀丽, 刘冬雁, 等. 激光粒度分析与传统粒度分析方法相关对比[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(4): 608-614.
- [16] 周素红, 陈蒙. LA-920 激光粒度分析仪的应用[J]. 现代科学仪器, 2003(5): 49-51.
- [17] 曾秉斌, 徐德衍, 王润文. 激光光束质量因子 $M2$ 的物理概念与测试方法[J]. 应用激光, 1994, 14(3): 104-108.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：app@hanspub.org