

文章编号: 1001-3806(2011)03-0352-04

独立模式反演算法在激光粒度测试中的应用研究

王雪艳, 刘缠牢*

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710032)

摘要: 粒度反演算法是基于米氏散射理论的激光粒度仪的关键技术。针对独立模式迭代反演算法对噪声太敏感, 以至于在实际应用中出现粒度测量失真的问题, 提出采用5点3次数据平滑算法对其反演进行处理, 同时以 VISUAL C++ 6.0 为开发平台, 编写测试软件对算法进行仿真研究, 并与粒度真实分布进行了对比。结果表明, 特征粒径 D_{10} , D_{90} 的误差分布小于 5%, D_{50} 的误差分布小于 3%, 说明数据平滑处理后的反演结果能够反映粒度的真实分布, 解决了探测光能误差使粒度测量结果失真的难题, 基本满足了现代粉体工业粒度测量的精度高、抗干扰性能强、稳定可靠等要求。

关键词: 激光物理; 粒度测试; 粒度反演算法; 探测光能误差; 数据平滑

中图分类号: TN247; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.017

Application of independent model inverse algorithm in laser particle size measurement

WANG Xue-yan, LIU Chan-lao

(Department of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Particle size inverse algorithm is the key technology for laser particle size analyzer based on Mie theory. Because the independent model iterative inverse algorithm was so sensitive to noise that it can not be used in actual particle size measurement, five-spot triple smoothing algorithm was proposed to conduct independent model iterative inversion. With VISUAL C++ 6.0 as development platform, the software was written and simulation was carried out. The simulation result was compared with actual distribution. The distribution error of special particle size D_{10} , D_{90} was less than 5%, and the distribution error of special particle size D_{50} was less than 3%. The results show that only the inversion data after smoothing processing can reveal the actual distribution of particle size. The inversion result distortion induced by the optical energy detection error can be overcome. This algorithm can satisfy the requirements of high accuracy, anti-jamming and stability for particle size measurement in modern power industry.

Key words: laser physics; particle size measurement; particle size inverse algorithm; optical energy detection error; data smoothing

引言

基于米氏散射理论的激光粒度仪通过颗粒的散射光强来反演颗粒粒度分布, 能够实现颗粒的非接触无损检测, 具有响应快、测量范围宽、易于实现自动化和智能化等优点, 在粒度测量领域得到广泛重视, 被认为是一种最先进、最具有广泛发展前景的粒度测试方法^[1-2]。由于米氏散射核的严重病态^[3-7], 利用传统的数值方法求解具有很大困难, 因此, 粒度反演算法成为激光粒度仪的核心研究内容。

近年来, 随着国内外研究的不断深入, 多种粒度反

演算法应运而生。根据数据处理时是否事先假定粒度分布函数分为非独立模式算法和独立模式算法两大类。目前, 市场上成熟的激光粒度仪产品大都采用非独立模式算法对颗粒系进行粒度反演计算。然而, 在多数实际测量中, 预先并不知道被测颗粒系的分布规律, 有些颗粒系也很难找到一种相符的分布函数, 这就使得非独立模式反演不可靠。独立模式算法由实际探测的光能分布值来求解第一类 Fredholm 积分方程得到颗粒系的粒度分布, 理论上可以得到任意形式的粒度分布曲线, 在测量未知颗粒系的粒度分布时具有明显的优越性。因此, 使用独立模式算法已成为激光粒度仪产品的发展趋势。但独立模式算法一般情况下对噪声都非常敏感, 很难直接用于实际测量^[4-7]。作者针对独立模式迭代反演算法对噪声太敏感, 以至于在实际应用中出现粒度测量失真的问题进行研究, 分析了

作者简介: 王雪艳 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为测控技术与智能仪器。

* 通讯联系人。E-mail: lcl0123@sohu.com

收稿日期: 2010-07-21; 收到修改稿日期: 2010-09-07

探测光能分布的复杂性,提出对反演结果进行平滑处理。研究表明,该方法行之有效,解决了探测光能误差使反演失真的难题。

1 激光粒度仪的基本原理

激光粒度仪的基本装置见图1。激光器产生单色

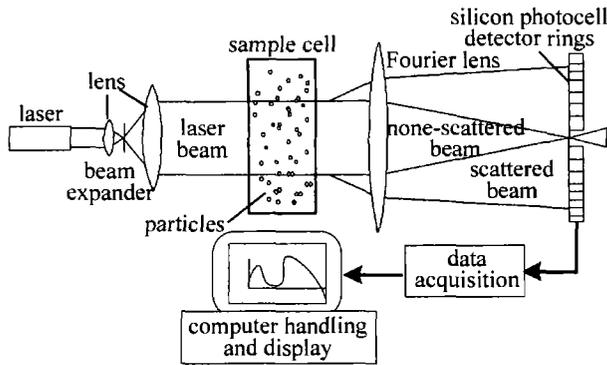


Fig.1 Schematic drawing of principle of particle size measurement by laser
相干性极好的激光,经聚焦、滤波、扩束准直系统后,得到扩展的、用于照明散射颗粒的理想光束,该光束和分散好的颗粒在样品池内相互作用产生的散射光,经傅里叶透镜会聚在位于透镜焦平面的环形光电探测器上,根据米氏散射理论,这里散射光强的空间分布对应颗粒粒度分布。该探测器是由一系列独立的同心环带组成,能将投射到其上的光信号转变为电信号,数据采集送入计算机,按事先设计的计算程序进行数据处理,最终得到颗粒粒度分布。

米氏散射理论在原则上能够解释各类颗粒的散射规律,可用于任何尺寸段颗粒的测量。根据该理论,颗粒系的粒度分布与散射光强之间的关系表示为^[8]:

$$E = \frac{3\lambda^2 I_0}{2\pi^2 \rho} \sum_{j=1}^n \frac{W_j}{d_j^3} \int_{\theta_{l,in}}^{\theta_{l,out}} (i_1 + i_2) \sin\theta d\theta \quad (1)$$

式中,λ 为入射光波长, I₀ 为入射光强, ρ 为被测颗粒密度, c = $\frac{3\lambda^2 I_0}{2\pi^2 \rho}$ 为常数, 令 c = 1, 并不影响测量结果, i₁ 和 i₂ 是散射强度函数, 分别表示平行和垂直于散射面的强度分量, θ_{l,in} 和 θ_{l,out} 分别表示探测器第 l 环内外径对应的散射角, (1) 式可简写成 E = TW, 其中, E = (E₁, E₂, ..., E_n)^T 是光能分布列向量, 上标 T 表示转置, 每一元素代表光电探测器每一环上所测得的光能量; W = (W₁, W₂, ..., W_n)^T 是粒度分布列向量, 表示把颗粒系的粒度分成 n 个级; T 是光能系数矩阵, 表征颗粒在探测器环上的散射能量分布系数, T_{l,j} 的物理意义是: 直径为 d_j 的颗粒所产生的散射光落在多元探测器第 i 环上的光能量:

$$T_{l,j} = \frac{1}{d_j^3} \int_{\theta_{l,out}}^{\theta_{l,in}} (i_1 + i_2) \sin\theta d\theta \quad (2)$$

2 典型独立模式迭代反演算法

独立模式迭代反演算法在未知颗粒系的测量中有独到优势,反演精度高,因此对噪声都非常敏感,这就对粒度测量系统的多元光电探测器各个环的散射光能量的探测精度和计算程序设计要求较高。

2.1 Chahine 迭代算法

Chahine 迭代算法是一个针对反问题的有效算法^[9]。该算法的特点是收敛速度很快,经过一定次数的迭代之后就能得到一个稳定的解^[4-5]。算法描述如下。

初始化粒度分布列向量 W⁽⁰⁾ 的迭代格式为:

$$W^{(k+1)} = c^{(k)} \cdot W^{(k)} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} c^{(k)} = (T^T * r^{(k)}) ./ \text{sum}(T) \\ r^{(k)} = E ./ E^{(k)} \\ E^{(k)} = TW^{(k)} \end{cases} \quad (4)$$

式中, k 表示迭代次数, * 表示将向量对应元素相乘, ./ 表示将向量对应元素相除, sum(T) 表示将矩阵 T 的相同列所有元素相加所得到的行向量。该算法计算过程实际上是将原始分布进行整形,而且整形时所乘的系数都大于 0,因此,该方法得到的值自然满足非负条件。

2.2 最小均方算法

最小均方算法^[10-11] (least mean square, LMS) 描述如下。初始化粒度分布列向量 W⁽⁰⁾ 的迭代格式如下:

$$W^{(k+1)} = W^{(k)} + \mu T^T (E - TW^{(k)}) \quad (5)$$

式中, μ 表示加速收敛因子。由于该算法不保证迭代结果的非负性,在实际应用中需要加入非负限制 W^(k+1) = abs(W^(k))^[11], 其中 abs 表示求绝对值。

3 数据平滑处理算法

平滑处理在科学研究中广泛使用,它可以减少测量误差带来的影响,尤其被用于无法利用多次重复测量来得到其平均值的情况和当因变量随自变量有陡然变化的那些测量段,例如寻找峰位、峰值或拐点等工作。

关于数据平滑处理的算法很多,如 7 点 2 次平滑, 5 点 3 次平滑, Vondrak 平滑, 高斯权函数平滑, 样条逼近等等。下面介绍作者研究使用的 5 点 3 次平滑算法。

5 点 3 次平滑是利用最小二乘法原理对离散数据进行 3 次最小二乘多项式平滑的方法^[12-13]。若平滑处理测量数据 y_i (i = 0, 1, ..., n), 则有 5 点 3 次平滑公

$$\hat{y}_i = \frac{1}{35} (-3y_{i-2} + 12y_{i-1} + 17y_i + 12y_{i+1} - 3y_{i+2}) \quad (6)$$

在 n + 1 个测量数据中, i 分别为 0, 1, n - 1, n 4 个点的

平滑公式应为:

$$\begin{cases} \hat{y}_0 = \frac{1}{70}(69y_0 + 4y_1 - 6y_2 + 4y_3 - y_4) \\ \hat{y}_1 = \frac{1}{35}(2y_0 + 27y_1 + 12y_2 - 8y_3 + 2y_4) \\ \hat{y}_{n-1} = \frac{1}{35}(2y_{n-4} - 8y_{n-3} + 12y_{n-2} + 27y_{n-1} + 2y_n) \\ \hat{y}_n = \frac{1}{70}(-y_{n-4} + 4y_{n-3} - 6y_{n-2} + 4y_{n-1} + 69y_n) \end{cases} \quad (7)$$

该算法简单,可以避免计算过程中算法本身的误差引入。但在探测光能误差较大的情况下,需要反复使用才能达到去噪目的。

4 算法仿真研究

对算法的仿真研究从实际出发,可以不受物理条件局限进行各因素试验,有利于分析基于米氏散射理论的粒度测试反演各方面存在的问题,以便改进用于实际测量。本文中用 C++ 语言在 VISUAL C++ 6.0 平台上编写测试程序进行了仿真。

考虑到仿真结果的可比性,基本模拟条件应一致。下面模拟了透镜焦距 75mm、激光波长 650nm、颗粒相对复折射率 $m = 1.596 + 0.1i$ 、粒径分布范围在 $0.1\mu\text{m} \sim 110\mu\text{m}$ 的颗粒系的散射模型。数值模拟光能列向量引入 2% ~ 5% 的随机误差,反演级数与探测器环数相等,取为 63 环,代表粒径按对数等间隔原则选取。假设粒度分布服从 Rosin-Rammler (R-R) 函数的单峰和多峰分布。

4.1 散射光能分布特征模拟

根据米氏散射模型及环形探测器尺寸参量,对单个颗粒的散射光落在环形探测器上的光能量进行数值模拟,如图 2 所示,图中横轴代表探测器环数 L ,纵轴代表归一化的光能量值 E/l , d 代表颗粒粒径。

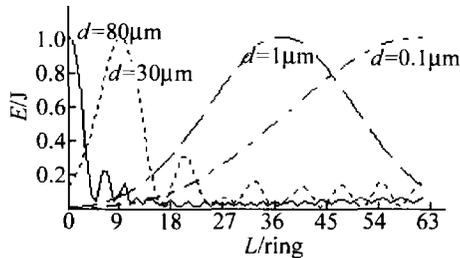


Fig. 2 Distribution of scattered light energy of particles with different sizes on detector

从图 2 可知,不同粒径颗粒的散射光在探测器不同环上的分布比率不同,随着粒径的增大,其散射光的峰值位置由外环向内环移动,也就是说随着粒径增大散射光从以外环为主的分布转变为以内环为主的分布。一般测试对象为多分散系颗粒,探测器探测的光能为各粒径颗粒的散射叠加,因此光能分布相当复杂。

独立模式迭代算法在没有噪声的情况下性能良好,但实际应用中从数据采集卡获取的光能数据都是有噪声的。光能采集误差分为粗大误差、系统误差和随机误差。粗大误差易于剔除,系统误差通过仪器检校来消除和减弱,随机误差具有正态分布的特性,为工程所利用。这里光能分布本来就不平滑,相当复杂,使得对探测光能去噪不可行,导致粒度测量结果失真。诸多学者做过很多尝试性研究,通过变换迭代模式来减小测量误差^[4-7],取得一定成果,但理论不够成熟、有待进一步发展完善。本文中的创新点在于提出了用 5 点 3 次数据平滑算法对独立模式迭代反演进行平滑处理,有效避免了随机噪声影响使测量结果失真的难题,从而提高了独立模式迭代反演算法粒度测量的可靠性和精度。

4.2 反演仿真

图 3 和图 4 中的横轴代表粒径的对数划分 D ,纵轴代表颗粒的频度分布 $f\%$ 。虚线代表本来的粒度分布,实线代表反演计算的粒度分布。

这里以单峰分布模型为例来说明迭代反演算法对噪声的敏感性。一般探测光能噪声不超过 10%,假如探测光能噪声过大,那将需要对整个硬件系统进行检校。

在光能列向量上引入随机噪声模拟实测光能时的 Chahine 和 LMS 迭代反演结果如图 3 所示,可以看到

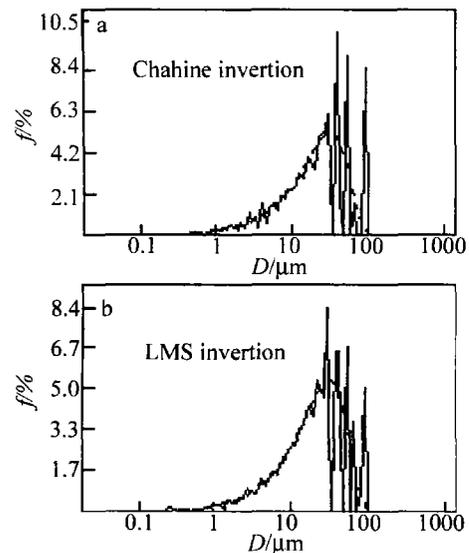


Fig. 3 The inversion of the original algorithm

独立模式迭代算法受噪声影响很大,粒度测量结果严重失真,实际应用不可靠。

图 4a 和图 4c 是将 Chahine 迭代算法分别用于粒度单峰和三峰分布模型的反演计算结果;而图 4b 和 4d 是将 LMS 迭代算法分别用于粒度单峰和三峰分布模型的反演计算结果。从图 4 中可以看到,经平滑处理,反演结果与真实分布基本吻合。说明 5 点 3 次数据平滑算法的引入有效消除了误差影响,粒度测量结

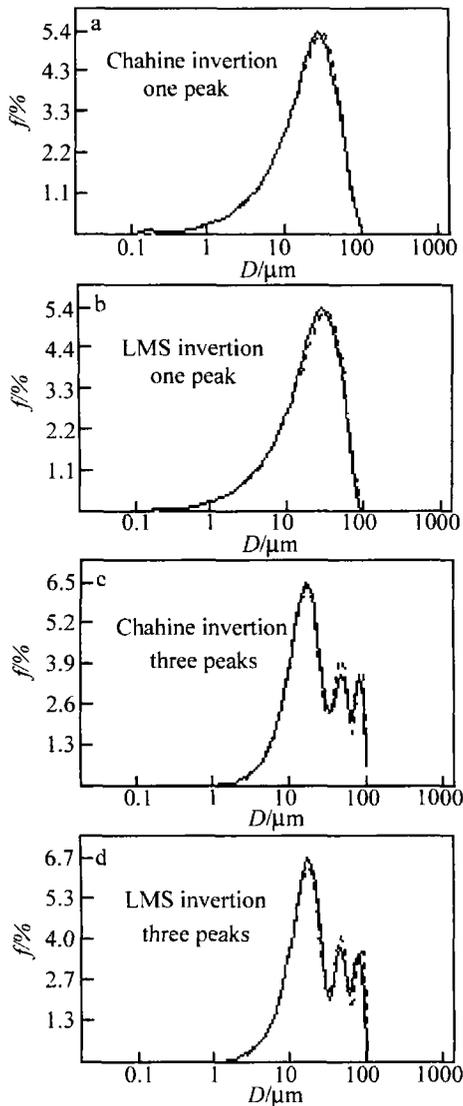


Fig. 4 Five-spot triple smoothing based on inversion

果能够反映粒度的真实分布。

4.3 数据处理与分析

在大多数应用场合,只要确定了样品的特征粒径,样品的粒度情况也就大体确定了。现行的激光粒度仪国际标准建议,用特征粒径 D_{10} , D_{50} 和 D_{90} 来评价反演结果的优劣。 D_{10} , D_{50} 和 D_{90} 分别指质量分布累积达到 10%、50% 和 90% 时所对应的颗粒等效粒径。

Table 1 Inversion of one peak particle size distribution (PSD) and error calculation

characteristic value	standard value/ μm	Chahine		LMS	
		calculate/ μm	error/%	calculate/ μm	error/%
D_{10}	3.89	3.78	2.83	4.01	3.08
D_{50}	20.40	20.20	0.98	20.34	0.29
D_{90}	49.72	49.29	0.86	49.87	0.30

由表 1 知,Chahine 和 LMS 的单峰反演结果的 D_{10} 误差相对大一些,研究表明,这与探测器外环尺寸设计有关,小颗粒散射角较大,其散射光多分布在外环,而外环尺寸是有限度的,因此导致小颗粒测量误差较大。当

探测器逐渐增大,小颗粒的测量误差将逐渐减少。总体上,基于 Chahine 和 LMS 迭代算法的单峰测量误差都很小,均满足了 D_{10} 和 D_{90} 误差分布小于 5%、 D_{50} 误差分布小于 3% 的要求,说明数据平滑处理有效可行。

Table 2 Inversion of three peaks PSD and error calculation

characteristic value	standard value/ μm	Chahine		LMS	
		calculate/ μm	error/%	calculate/ μm	error/%
D_{10}	7.14	7.05	1.26	7.06	1.12
D_{50}	18.69	18.46	1.23	18.30	2.09
D_{90}	69.27	67.18	3.02	66.54	3.94

由表 2 知,Chahine 和 LMS 迭代算法的三峰反演均有着较高的精度,同样都满足了 D_{10} 和 D_{90} 误差分布小于 5%、 D_{50} 误差分布小于 3% 的要求。

5 结论

使用独立模式算法已成为激光粒度仪产品的发展趋势,本文中分析了独立模式的 Chahine 迭代反演算法和 LMS 迭代反演算法的性能特点,针对激光粒度仪探测的颗粒系散射光能分布的复杂性以及从光能分布上去噪的不易操作性,采用了 5 点 3 次数据平滑算法,分别对 Chahine 迭代反演结果和 LMS 迭代反演结果进行平滑处理,仿真实验结果均满足了特征粒径 D_{10} 和 D_{90} 误差分布小于 5%、 D_{50} 误差分布小于 3% 的要求,说明数据平滑处理后的粒度测量结果能够反映粒度真实分布,解决了探测光能误差导致反演失真的问题,基本满足了现代粉体工业粒度测量稳定可靠、精度高、速度快的要求。

参考文献

- [1] YU L Sh, YANG G L, HE Zh J, *et al.* Iterative CONTIN algorithm for particle sizing in dynamic light scattering[J]. Opto-electronic Engineering, 2006, 33(8): 64-69 (in Chinese).
- [2] ZHAO D, LIU Ch L, ZHANG Y Ch, *et al.* Design of key circuit of laser particle sizers based on DSP and ARM [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2009, 28(12): 54-56 (in Chinese).
- [3] SZCZUCZYŃSKI D K, MROCZKA J. Comparing the quality of solution of inverse problem in nephelometric and turbidimetric measurements[J]. Optica Applicata, 2009, 39(3): 521-531.
- [4] WANG Q H. Particle size and shape analysis with light scattering [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2003: 13-49 (in Chinese).
- [5] SHAO Y, WANG Q H. Application of the smooth chahine algorithm in deducing the particle size distribution with light scattering[J]. Journal of Nanjing Xiaozhuang University, 2008, 11(6): 15-17 (in Chinese).
- [6] SHEN Sh W. Research of laser particle sizer based on scattering theory [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 7-47 (in Chinese).
- [7] ZHANG Zh. Numerical studies on model-independent retrieval algorithm in Mie scattering particle sizer [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006: 5-36 (in Chinese).

(下转第 387 页)

- [3] HARTEMANN F V, KERMAN A. Classical theory of nonlinear Compton scattering[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(4): 624-627.
- [4] QUESNEL B, MORA P. Theory and simulation of the interaction of ultraintense laser pulses with electrons in vacuum[J]. *Physical Review*, 1998, E58(3): 3719-3712.
- [5] HAFIZI B, GANGULY A K, TING A, *et al.* Analysis of Gaussian beam and Bessel beam driven laser accelerators[J]. *Physical Review*, 1999, E60(4): 4779-4792.
- [6] LEEMANS W P, NAGLER B, GONSALVES A J, *et al.* GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator[J]. *Nature Physics*, 2006, 2(10): 696-699.
- [7] MANGLES S P D, MURPHY C D, NAJMUDIN Z, *et al.* Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions[J]. *Nature*, 2004, 431(7008): 535-538.
- [8] GEDDES C G R, TOTH CS, ESAREY E, *et al.* High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding[J]. *Nature*, 2004, 431(7008): 538-541.
- [9] FAURE J, GLINEC Y, PUKHOV A, *et al.* A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams[J]. *Nature*, 2004, 431(7008): 541-544.
- [10] CHEN M, SHENG Z M, ZHANG J, *et al.* On the angular distribution of fast electrons generated in intense laser interaction with solid targets[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(1): 4504-4507.
- [11] HE X K, LI R X, SHUAI B, *et al.* Phase dependence of electron acceleration in a tightly focused laser beam[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12(7): 3101-3105.
- [12] ZHAO Z G, LÜ B D. Direct acceleration of electrons by a Laguerre-Gaussian laser beam in vacuum[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(4): 1798-1802(in Chinese).
- [13] LI X Q. Collapsing dynamics of plasmons[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003: 11-18(in Chinese).
- [14] LI Z W, XIAO X H. *Astrophysics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 39-43(in Chinese).
- [15] LÜ B D. *Laser optics*[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003: 98-102(in Chinese).
- [16] HE X K, LI R X, SHUAI B, *et al.* Electron acceleration in a tightly focused laser beam[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(6): 364-366.
- [17] SALAMIN Y I, FAISAL F H. Relativistic free-electron dynamics and light-emission spectra in the simultaneous presence of a superintense laser field and a strong uniform magnetic field[J]. *Physical Review*, 1998, A58(4): 3221-3234.
- [18] SALAMIN Y I, FAISAL F H M, KEITEL C H. Exact analysis of ultrahigh laser-induced acceleration of electrons by cyclotron autoresonance[J]. *Physical Review*, 2000, A62(5): 3809-3823.
- [19] SALAMIN Y I, KEITEL C H. Electron acceleration by a tightly focused laser beam[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(9): 5005-5008.
- [20] ZHAO S Y. Research of Compton radiation of relativistic charged particles in laser electromagnetic field[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007: 38-48(in Chinese).
- [21] HE F, YU W. Ponderomotive acceleration of electrons by a tightly focused intense laser beam[J]. *Physical Review*, 2003, E68(4): 6407-6411.
- [22] LIU X L, LIU S Q, YANG X S. Strong Langmuir turbulence excited by laser near critical surface[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 213-216(in Chinese).
- [23] ZHANG W D, LIU S Q, XIAO Q S, *et al.* Locomotion radiation of monopole by hyperbola in plasma[J]. *Journal of Nanchang University*, 2008, 32(2): 186-189(in Chinese).
- [24] JACKSON J D. *Classical electrodynamics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 311-315.

(上接第355页)

- [8] ZHANG M Sh. *Laser light scattering spectroscopy*[M]. Beijing: Science Press, 2008: 6(in Chinese).
- [9] FERRI F, BASSINI A, PAGANINI E. Modified version of the chahine algorithm to invert spectral extinction data for particle sizing[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(25): 5829-5839.
- [10] PAN W G. Development of full-automatic laser size instrument[D]. Ji'nan: Shandong University, 2006: 31-34(in Chinese).
- [11] ZHANG Y Ch, LIU Ch L, ZHAO D. Research of granulometric analysis algorithm based on Mie scatter theory[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2009, 28(11): 24-25(in Chinese).
- [12] SHI Y Y. Smooth processing of vibration signal used in the isolator analysis[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2009, 154(3): 100-101(in Chinese).
- [13] JIN T B, WANG A G, DING R L, *et al.* The preprocessing of training samples for artificial neural network of periodic defected ground structure[J]. *Research & Progress of SSE*, 2005, 25(3): 299-304(in Chinese).