

文章编号 1004-924X(2011)12-2844-10

用光纤耦合法实现颗粒测量

隋国荣*, 程利, 陈抱雪

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要:根据全光散射法测量粒径存在样品池壁散射及折射率改变等问题,提出了利用光纤耦合结构,并引入洛伦兹经典色散公式和多波长处理方法来实现颗粒测试。首先,介绍了全光散射法进行颗粒测试的理论,并研究现有的样品池和测量手段存在的问题。然后,引入洛伦兹色散公式来处理折射率的变化;同时结合多波长处理法,获得颗粒的平均粒径和粒径分布公式,建立目标函数并利用遗传算法进行参数反演;通过光纤端面的耦合结构构造样品池,利用光谱仪对夹在光纤端面间的待测液进行多波长扫描。最后,试制了实际测试系统,通过计算机内部算法,完成颗粒测试。仿真和实验结果表明,该方法可以在折射率未知的情况下较准确地反演出颗粒的平均粒径及其粒径分布;对测量光谱加入2%的随机噪声后,其平均粒径及折射率的反演误差低于1%,粒径分布的反演误差低于5%,可以满足国标对均值误差和重复性误差的要求。

关键词:粒径测量;分布测量;光纤耦合;多波长扫描;洛伦兹色散公式;光纤样品池;遗传算法

中图分类号:TN253;O436.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111912.2844

Measurement of particles by optical fiber coupling

SUI Guo-rong*, CHENG Li, CHEN Bao-xue

(School of Optical-electrical and Computer Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

* Corresponding author, E-mail: suigr@asst.edu.cn

Abstract: By using an optical fiber coupling structure, a new particle measuring method through introducing Lorentz classic dispersion formula and multi-wavelength processing was proposed to amend the scattering influence of a sample cell wall and the change of the refractive index. Firstly, the theory of total light scattering for the particle measurement was introduced, and the problems existed in the sample cell and measurement method were studied. Then, the Lorentz dispersion formula was introduced to process the refractive index changes caused by dispersion and the multi-wave length processing was taken to obtain the average particle size and particle size distribution. By establishing an object function, a method based on the genetic algorithm was proposed to implement the inversion of particle refractive index. A new sample cell was designed and manufactured with the end face coupling of optical fiber, and the particle sample dripping placed the end face between two optical fibers was scanned by a spectrometer in multi-wavelengths. Finally, through the algorithm of the computer, the average particle size and particle size distribution were measured. The simulation and experiment result indi-

收稿日期:2011-04-19;修订日期:2011-05-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61077042/F050211);上海市重点学科建设资助项目(No. S30502);上海理工大学光电学院教师创新能力建设项目(No. GDCX-Y1105)

cates that the average particle size and particle size distribution can be well determined by this method in the case of unknown refractive index. Furthermore, this method has advantages of reliability and stability. When a 2% random noise was put in the transmission extinction measurement values at two wavelengths, the inversion errors of average particle size and refraction index are less than 1% and that of the particle size distribution is less than 5%. It can meet the needs of national standard for mean errors and repeatability errors.

Key words: particle size measurement; particle distribution measurement; optical fiber coupling; multi-wavelength scanning; Lorentz dispersion formula; fiber sample cell; genetic algorithms

1 引 言

光散射法是目前应用最广泛、发展最迅速的颗粒测量方法。由于光的透射性和光电转换的瞬时性,该方法特别适于工业实时在线测量,其测量粒径范围广,从微米到纳米颗粒已经有了诸如衍射法、角散射法、光子相关光谱法、激光测试法、光全散射法、动态光散射法等多种方法,而且相应算法也有了卓有成效的研究成果^[1-8]。光全散射法是光散射颗粒粒径测量技术的一种,其测量范围从亚微米至上百微米,是一种无需标定的颗粒分布绝对测量方法,原理和装置都比其他光散射法简单,因此该项技术逐渐显示出较大的发展空间和应用潜力,并在工农业、医学等多个领域的颗粒测试中得到了应用^[9-11]。对于大多数光学精密测量方法而言,影响光全散射法测量精度的主要因素有波长及功率稳定性、被测介质光学参量的准确性、光学探测器的精度和稳定性、测试装置的可靠性以及数据处理方法的合理性等多个方面。目前,在液态颗粒测量方面所使用的方法多在光源、光探测器、样品池结构和数据处理方法上存在问题,特别突出的是样品池和被测颗粒折射率及其色散问题^[12-14]。现有的粒度仪或测试方法中的样品池多采用透明池壁,而透明池壁会对颗粒的散射光产生折射效应^[12],或者因为球差导致表面反射而引起二次散射^[13]。因此,光波途径前后两个池壁发生的散射成为背景噪声中重要的一部分,需采用熟知的二次测量来剔除。此外,现有的测试方法还存在折射率及其色散的确定问题。目前,在绝大多数情况下被测颗粒的实际折射率并不能事先获得,当采用多个工作波长、涉及色散关

系时,情况就会变得复杂。因此,现行的数据处理手段几乎都采用经验估计法并忽略色散,而实际测试中 6% 的折射率估值误差会导致 14% 左右的粒径测量误差^[14]。

为了解决上述问题,本文提出并试制了一种新型的基于光纤耦合型的样品池结构。利用高精密度的光学调整台将两个端面平面研磨的光纤彼此靠近,使得光轴对准的端面之间形成一个平行间隙,液体样品通过毛细管效应注入间隙,并利用表面张力作用稳定在间隙内,由此而构成一种新型结构的样品池,并通过计算机控制对不同的间距进行测试,确定最佳的间距。这种样品池结构光学结构稳定、工作环境宽松,并且结构小,主要器件光纤价格低廉且光学稳定性很高。同时这种光学样品池完全消除了光学意义上的池壁,因此避免了球差、散射等误差对测试和折射率带来的影响。该样品池结构后端通过 FC/PC 接头直接连接光源和探测器,保证了稳定可靠的光源和功率探测,且波长切换平稳、简易。另外,在理论计算方面通过引入经典的对电介质具有普适意义的洛伦兹色散关系,对传统的未氏理论进行了改进,使得颗粒折射率及其色散的变化问题转化成为 3 个寄生参数的确定问题,同时还有 2 个待求参数。5 个参数的确定问题采用了多波长扫描测试结合全局优化的计算方法,通过多变量遗传算法实现参数的求解。理论推导和仿真结果显示平均粒径及折射率的反演误差低于 1%,实验验证了两种已知标准粒径的悬浮聚苯乙烯乳胶球标准颗粒纯水样品,结果表明样品池提供了稳定的测试,对测量光谱加入 2% 的随机噪声,平均粒径及折射率的反演误差低于 1%,数据处理方法的均值偏差和重复性都小于 5%,优于常规折射率估值方法。

2 测量原理

2.1 平均粒径及折射率算法

根据熟知的 Lambert-Beer 光透射定律,当一束单色平行光入射到一含有均匀悬浮颗粒的介质时(这里的入射光强实为测量区中没有颗粒时的出射光强),由于颗粒对入射光的散射和吸收作用,出射光强会有一定程度的衰减,在颗粒浓度满足单散射的条件下可以得到^[14]:

$$\ln(I/I_0) = -\frac{\pi}{4} L N_D D_{32}^2 K_m(\lambda, n, D_{32}), \quad (1)$$

式中 $\ln(I/I_0)$ 称为消光值, L 为样品测量区的厚度, N_D 为颗粒总数, λ 为入射波长, n 为颗粒相对周围介质的折射率:

$$D_{32} = \int N(D) D^3 dD / \int N(D) D^2 dD$$

称为索太尔平均直径:

$$K_m = \int K_{ext} N(D) D^2 dD / \int N(D) D^2 dD,$$

是按等效消光系数的原则定义出的多分散颗粒系的平均消光系数,是一个无因次量,其中 K_{ext} 是消光系数,入射波长 λ , 相对介质折射率 n 和粒径 D 的函数,其值可由经典的米氏理论求得。计算表明,在粒径参量 $\alpha \leq 30$ ($\alpha = D\pi/\lambda$) 时, K_m 可由 D_{32} 求得的 K_{ext} 代替,这样就把一个多分散颗粒系的测量转化成具有单一直径 D_{32} 的单分散系的测量。常用的平均粒径算法主要有多波长法和多对波长法^[14]。这些算法在处理式(1)时,都将式中的折射率 n 当作颗粒的平均折射率,所谓的平均折射率是指入射光中间波长对应的折射率。事实上,由于色散效应,入射波长的变化必然会引起折射率的变化,所以采用平均折射率的算法必定存在一定的误差。对此本文引入具有普适性的洛伦兹色散公式来处理折射率随波长的变化,其公式为^[15]:

$$n^2 = \frac{\sqrt{(1+\chi_r)^2 + \chi_i^2} + (1+\chi_r)}{2}, \quad (2)$$

式中, $\chi_r = \frac{N_e q^2}{\epsilon_0 m} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$ 和 $\chi_i = \frac{N_e q^2}{\epsilon_0 m} \cdot$

$\frac{\gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$ 分别是电极化系数的实部和虚部。其中 N_e 为单位体积中分子数, q 是电子电荷, ϵ_0 为介电常数, m 为电子质量, γ 为阻尼系数,

ω_0 为电子固有振动频率, $\omega_0 = 2\pi c/\lambda$ 。将 $\frac{N_e q^2}{\epsilon_0 m}$, ω_0^2 , γ 分别设为 A, B, C 3 个未知数,则式(2)可化为:

$$n^2 = \frac{(1 + A \frac{B - \omega^2}{(B - \omega^2)^2 + C^2 \omega^2})}{2} + \frac{\sqrt{(1 + A \frac{B - \omega^2}{(B - \omega^2)^2 + C^2 \omega^2})^2 + (A \frac{C \omega}{(B - \omega^2)^2 + C^2 \omega^2})^2}}{2}, \quad (3)$$

由于 ω 的数量级为 10^{16} , 是一个较大的数,为了便于计算,进行归一化处理,可得:

$$n^2 = \frac{(1 + A_1 \frac{B_1 - \omega_1^2}{(B_1 - \omega_1^2)^2 + C_1^2 \omega_1^2})}{2} + \frac{\sqrt{(1 + A_1 \frac{B_1 - \omega_1^2}{(B_1 - \omega_1^2)^2 + C_1^2 \omega_1^2})^2 + (A_1 \frac{C_1 \omega_1}{(B_1 - \omega_1^2)^2 + C_1^2 \omega_1^2})^2}}{2}, \quad (4)$$

其中, $A_1 = A \times 10^{-32}$, $B_1 = B \times 10^{-32}$, $C_1 = C \times 10^{-16}$, $\omega_1 = \omega \times 10^{-16}$, 取值都在 $0 \sim 1$ 。将式(4)带入式(1),则式(1)就变成了一个含有 4 个未知数的方程。若用 M 个不同波长的入射光对颗粒进行测量,则可以得到一个方程组:

$$\ln(I/I_0)_{\lambda_i} = -\frac{\pi}{4} L N_D D^2 K_m(\lambda_i, n_i, D_{32}), \quad (5)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, M.$$

将方程组中的式子两两相除,消去常数,又可以得到方程组:

$$\ln(I/I_0)_{\lambda_i} / \ln(I/I_0)_{\lambda_j} = K_{m\lambda_i} / K_{m\lambda_j}, \quad (6)$$

$$i \neq j, i, j = 1, 2, 3, \dots, M,$$

其目标优化函数为:

$$OBF = \sum_{j=2}^M \sum_{i=1}^{j-1} [\ln(I/I_0)_{\lambda_i} / \ln(I/I_0)_{\lambda_j} - K_{m\lambda_i} / K_{m\lambda_j}]^2, \quad (7)$$

$$i \neq j, i, j = 1, 2, 3, \dots, M.$$

通过最优化算法计算得到能使式(7)最小的 D_{32} 和 A_1, B_1, C_1 即为待测量,再将 A_1, B_1, C_1 带入式(4)就能得到相应的折射率 n 。本文中最优化算法采用遗传算法,遗传算法克服了一般的优化算法如最小二乘法, Powell 法等容易陷入局部极小值的缺陷,因而具有较强的搜索能力以及较好的稳定性。

2.2 粒径分布算法

由 Lambert-Beer 定律,在颗粒浓度满足不相

关单散射的前提下,对于具有一定尺寸范围的多分散颗粒系有^[16-17]:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{\lambda_i} = -\frac{3}{2}LN_D \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{K_{\text{ext}}(\lambda_i, n_i, D) f_D(D)}{D} d(D), \quad (8)$$

式中 $\ln(I/I_0)$ 为单色光消光值, L 为被测颗粒系厚度, N_D 为颗粒系的粒子总数, $K_{\text{ext}}(\lambda_i, n_i, D)$ 为消光系数, 它表征每个颗粒对入射光的散射量, 是入射波长 λ_i , 相对介质折射率 n_i 和颗粒粒径 D 的函数, 其值可由经典的米氏理论求得。 $f_D(D)$ 是粒径体积频度分布函数, 描述粒径的分布规律, 表征单位体积内直径在 D 和 $D+d(D)$ 范围内的粒子体积频度。所谓体积频度是指落在某个尺寸范围内的颗粒体积占总量的百分率, 这里 $f_D(D)$ 是待求的未知量, 求得 $f_D(D)$ 也就得到了颗粒的粒径分布。现用数值积分的方法将式(8)离散得到如下矩阵表示的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} \ln(I/I_0)_{\lambda_1} \\ \vdots \\ \ln(I/I_0)_{\lambda_{M_1}} \end{bmatrix} = [A_{ij}]_{M_1 \times M_2} \cdot \begin{bmatrix} f(D_1) \\ \vdots \\ f(D_{M_2}) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$A_{ij} = -3LN_D K_{\text{ext}}(\lambda_i, n_i, D)/2D_j$$

式中 M_1 为测量的波长数, M_2 为划分的粒子区间

数, $f=[f_j]$ 为第 j 个子区间 $[D_j, D_{j+1}]$ 的中点。由于式(9)是一严重病态的方程组, 采用一般的求解线性方程组的方法无法求解, 目前常用的是采用遗传算法等优化方法对其进行求解。在实际测量中, 许多被测颗粒的尺寸常常符合某种双参数分布函数, 这时采用非独立模式算法求解粒径分布函数更为简便。所谓非独立模式算法是指事先假定颗粒系符合某一分布函数, 计算在给定多个波长下的消光值, 并将计算值跟消光测量值比较, 最后用最优化算法求得其粒径分布函数。常用的分布函数有 R-R 分布、正态分布和对数正态分布。其中 R-R 分布是应用最广泛的一种分布函数, 它能较为准确地描述颗粒的分布情况^[13-16], 其体积频度分布函数形式为^[16]:

$$f_D(D) = (k/\bar{D}) \times (D/\bar{D})^{k-1} \times \exp(-(D/\bar{D})^k), \quad (10)$$

式中 (\bar{D}, k) 为双参数, \bar{D} 为尺寸参数, 单位为 μm , k 为分布参数, 是一个无因次量。确定了这组双参数, 函数的形式也就确定了。研究表明^[18], 仅需 3 个波长就能较为准确地求得这组双参数。对于全光散射法, R-R 分布中 (\bar{D}, k) 的范围一般为: $1 < \bar{D} < 9, 1 < k < 9$ ^[19]。

将式(10)代入式(9), 其目标优化函数为:

$$\text{OBF} = \sum_{jj=2}^M \sum_{ii=1}^{jj-1} \left[\frac{\ln(I_0/D)_{\lambda_{ii}}}{\ln(I_0/D)_{\lambda_{jj}}} - \frac{\sum_{j=1}^S [k/\bar{D}] \times (D/\bar{D})^{k-1} \times \exp(-(D/\bar{D})^k) K_{\text{ext}}(\lambda_{ii}, n_{ii}, D_j)}{\sum_{j=1}^S [k/\bar{D}] \times (D/\bar{D})^{k-1} \times \exp(-(D/\bar{D})^k) K_{\text{ext}}(\lambda_{jj}, n_{jj}, D_j)} \right] \quad (11)$$

$ii \neq jj, ii, jj = 1, 2, 3, \dots, M.$

由此可以看出, 在以往的数据处理方法中, 采用平均折射率估计的方法对式(11)中折射率的处理必定存在一定的误差, 而按照上述的改进算法在计算颗粒系平均粒径的同时也可以求得一组颗粒的折射率, 此组折射率与一组入射波长一一对应, 可以有效降低平均折射率法带来的误差。而在 2.1 节中利用遗传算法对式(7)求解得到的折射率可作为已知量直接代入式(11), 则式(11)的待求量仅为双参数 (\bar{D}, k) , 通过遗传算法解得能使式(11)最小的双参数 (\bar{D}, k) 即为所求。

3 仿真实验及数值模拟结果

3.1 平均粒径及折射率仿真

按照本文的改进算法, 首先假定出平均粒径和一组入射波长及折射率, 将其带入式(6), 可得一组 $\ln(I/I_0)_{\lambda_i}/\ln(I/I_0)_{\lambda_j}$, 将其设为消光测量值, 然后带入式(7)计算平均粒径和折射率。为了避免解的多值性, 提高测量精度并扩大测量范围, 可适当增加入射波长数, 这里入射波长选取 1.0, 1.05, 1.1, 1.15, 1.2, 1.25, 1.3 μm 7 组波长, 并

设定不同的平均粒径进行反演。同时为了验证算法的准确性,引入了石英粒子的色散方程求得以上 7 组波长对应的折射率作为设定值,石英粒子的色散方程为^[20]:

$$n^2 - 1 = \frac{0.696\ 166\ 3\lambda^2}{\lambda^2 - (0.069\ 404\ 3)^2} + \frac{0.407\ 942\ 6\lambda^2}{\lambda^2 - (0.116\ 241\ 4)^2} + \frac{0.897\ 479\ 4\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896\ 161)^2} \quad (12)$$

将入射波长分别代入到式(12),得到各波长对应的折射率如表 1 所示。

表 1 折射率与波长的对应关系

Tab. 1 Relation between refractive index and wavelength

波长/ μm	折射率
1.0	1.450 6
1.05	1.450 0
1.1	1.449 4
1.15	1.448 9
1.2	1.448 3
1.25	1.447 8
1.3	1.447 2

表 2 平均粒径及折射率的反演结果

Tab. 2 Inversion results of average particle size and refractive index

设定值	反演值(考虑光学散射的折射率)		反演值(平均折射率)遗传代数
D_{32}	(D_{32}, A, B, C)	$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7)$	(D_{32}, \bar{n})
No. 1 0.5	(0.499 7, 0.995 9, 0.931 2, 0.797 3)	(1.450 2, 1.449 4, 1.448 8, 1.448 2, 1.447 7, 1.447 2, 1.446 8)	(0.488 9, 1.488 5) 400
No. 2 0.8	(0.797 7, 0.707 4, 0.663 8, 0.668 4)	(1.451 9, 1.451 0, 1.450 2, 1.449 4, 1.448 7, 1.448 1, 1.447 6)	(0.806 2, 1.432 9) 400
No. 3 1.0	(1.000 0, 0.376 3, 0.355 3, 0.556 2)	(1.450 5, 1.449 9, 1.449 3, 1.448 8, 1.448 2, 1.447 7, 1.447 2)	(1.004 5, 1.439 0) 400
No. 4 1.5	(1.499 9, 0.615 1, 0.577 2, 0.686 3)	(1.450 8, 1.450 1, 1.449 4, 1.448 8, 1.448 2, 1.447 7, 1.447 2)	(1.503 8, 1.445 9) 400
No. 5 2.0	(1.999 9, 0.725 7, 0.678 3, 0.756 7)	(1.450 7, 1.450 0, 1.449 5, 1.448 9, 1.448 5, 1.448 0, 1.447 6)	(1.998 2, 1.451 3) 400
No. 6 3.0	(3.000 2, 0.696 9, 0.653 0, 0.723 9)	(1.450 6, 1.449 9, 1.449 3, 1.448 7, 1.448 1, 1.447 7, 1.447 2)	(2.999 1, 1.449 2) 400
No. 7 1.0*	(1.004 6, 0.176 4, 0.171 3, 0.375 3)	(1.444 1, 1.444 5, 1.444 6, 1.444 3, 1.444 0, 1.443 6, 1.443 1)	(0.949 2, 1.511 2) 400

* 在第一、五个波长的消光测量值上加入了 2% 的随机噪声。

3.2 粒径分布函数仿真

按照本文的改进算法,选取表 1 中的前 3 组波长及其对应折射率代入式(9)中计算出相应的 $\ln(I/I_0)$ 作为式(11)中的消光测量值,而按照一般的平均折射率法,可选取表 1 中前 3 组波长及中间波长 1.05 μm 对应的折射率作为平均折射率代入式(9),然后计算出相应的 $\ln(I/I_0)$ 作为式(11)中的消光测量值。最后分别将表 2 中 No. 3

遗传算法采用二进制编码,轮盘赌选择,两点交叉算子,离散变异,交叉概率为 0.8,变异概率为(0.7/染色体长度),初始种群大小设为 100,进化代数为 400 代。将遗传算法求出的 A, B, C 3 个参数代入式(7),求出折射率,模拟结果如表 2 所示。相比于采用平均折射率法反演待测参数而言,考虑了色散效应引起折射率变化后,反演结果与设定值更为接近。在实际测试时,仪器误差、环境温度等因素会造成一定的测量误差,为了验证该方法的可靠性,分别在 No. 7 处的第一、第五个波长的消光测量值上加入了 2% 的随机噪声以代表测量误差,结果表明反演误差低于 1%,而实际测试中 2% 的随机噪声已相当大^[21]。由此可见,采用此方法计算颗粒的平均粒径和其相对介质折射率是完全可行的。

和 No. 7 的两组折射率数据作为无随机噪声及参入随机噪声情况下的已知折射率代入式(11)中作为消光系数 K_{ext} 的参数。

遗传算法进化代数改为 200 代,其它参数设置不变。模拟结果如表 3 所示,可以看出反演结果与设定值是相当接近的,在 No. 4 处的第一、第三个波长的消光测量值上引入 2% 的随机噪声,反演误差低于 10%,比平均折射率法更为准确。

表 3 非独立模式下 R-R 分布的反演结果

Tab. 3 Inversion results in dependent model(R-R)

设定值 (\bar{D}, k)	反演值(考虑光学 散射的折射率) (\bar{D}, k)	反演值 (平均折射率) (\bar{D}, k)	遗传 代数
No. 1 (3.8, 3.2)	(3.800 7, 3.200 4)	(3.846 6, 2.948 1)	200
No. 2 (2.2, 1.5)	(2.201 1, 1.501 1)	(2.118 0, 1.319 2)	200
No. 3 (5.8, 4.7)	(5.796 5, 4.711 0)	(5.473 3, 5.805 2)	200
No. 4 (3.8, 3.2)	(3.673 5, 3.460 7)*	(2.976 4, 6.683 7)*	200

* 在第一、三个波长的消光测量值上加入了 2% 的随机噪声。

为了更为直观地分析,图 1 给出了双参数为 (3.8, 3.2) 时的粒径分布,可以看出考虑折射率变化情况后,可以比平均折射率法更为准确地反演出颗粒的粒径分布,即使在加入了 2% 的随机噪声后,和理论分布仍能吻合得比较好。

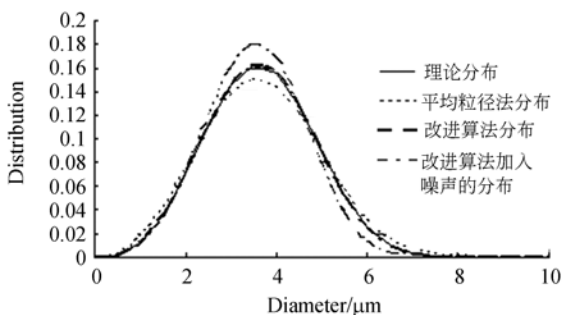


图 1 非独立模式下粒径分布反演结果

Fig. 1 Inversion results in dependent model(R-R)

4 系统实验及结果

4.1 系统结构

通过上述的理论研究和分析,构建了整体系统结构,其系统框架如图 2。



图 2 测试系统框架图

Fig. 2 Framework of measuring system

系统用光纤光谱仪作为宽带光源和光带探测器,可以提供波长为 600~1 700 nm 的高稳定光

源和高精度宽带探测器。输入、输出光纤分别置于两个由计算机控制的高精度光学调整台上,可实时控制并锁定两根光纤端面的空间位置。计算机负责对平台、光谱仪的控制和数据获取,并通过编程实现上述研究的理论算法。系统的测量原理和样品池原理图如图 3,4 所示,光谱仪采用的是安捷伦的 86140B,它具有多波长连续扫描探测模式,可提供高稳定度多波长光源,波长从 1 000 nm 开始,以 50 nm 为间隔进行连续输出,经过 FC/PC 连接头送至输入光纤,然后经过待测液滴进入输出光纤,最后再经过 FC/PC 连接头进入光谱仪的探测端,由光谱仪的波分复用模式实现多波长的连续扫描。在系统中,采用一台奔腾四 1.8 G 的电脑通过 GPIB 口和光学调整台以及光谱仪进行通讯,以获取纯水标准液和颗粒待测液的功率扫描曲线和对应波长的数据差,然后由计算机按照第 2 节的理论,写出算法编制的程序,完成数据处理。

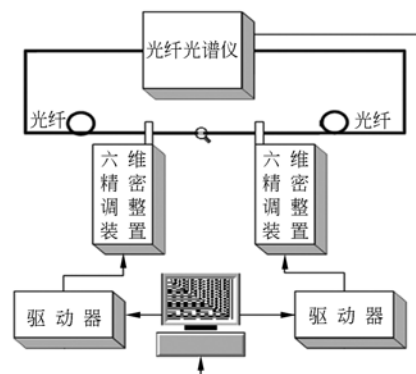


图 3 光路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of light path

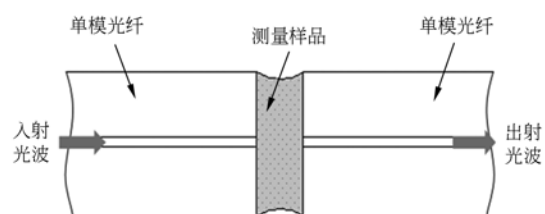


图 4 样品池原理图

Fig. 4 Schematic diagram of sample cell

4.2 样品池间距实验

欲实现整个系统的测试研究,首先要确定样品池的间距,系统避开了传统的样品池结构设计,

而是利用两个单模光纤进行了平面研磨的 FC/PC 端面彼此靠近,然后将待测液滴滴入而形成所谓的样品池,因此有必要就光纤端面间距对实际测试的影响进行实验。

验证试验使用了 Dow 公司的名义直径分别为 $1.00\ \mu\text{m}$ (样品 1)和 $2.06\ \mu\text{m}$ (样品 2)的聚苯乙烯乳胶球标准颗粒,基底液体是纯水,两种样品的浓度分别为 0.5% 和 1.0% 。颗粒比重约为 1,经 30 min 磁性搅拌后进行测量。构成样品池的光纤是市售的光通信用单模石英光纤,芯径约为 $8\ \mu\text{m}$,端面经过平面研磨。光源和探测器是 Agilent 公司的 86140B 光谱仪,选用了 7 个中心波长,分别是 1 000,1 050,1 100,1 150,1 200,1 250 和 1 300 nm,线宽均为 10 nm。每个样品重复测试 50 次,选取具有代表性的间距和所测消光值 I/I_0 的平均值,建立表 4。

表 4-1 样品 1 测试值

Tab. 4-1 Testing value of sample 1

光波长 /nm	10	20	40	100	180	300
1000	0.922 3	0.859 4	0.715 5	0.677 3	0.323 5	0.179 2
1050	0.927 4	0.862 6	0.725 8	0.686 9	0.341 3	0.183 5
1100	0.932 5	0.867 0	0.737 5	0.695 2	0.350 6	0.186 5
1150	0.938 7	0.873 1	0.749 1	0.707 7	0.361 9	0.190 2
1200	0.945 4	0.879 3	0.761 5	0.717 9	0.372 2	0.194 8
1250	0.949 6	0.885 6	0.774 1	0.728 5	0.383 9	0.199 0
1300	0.958 8	0.893 2	0.787 3	0.741 4	0.394 7	0.215 3

表 4-2 样品 2 测试值

Tab. 4-2 Testing value of sample 2

光波长 /nm	10	20	40	100	180	300
1000	0.942 0	0.826 9	0.771 9	0.712 2	0.316 2	0.171 7
1050	0.936 7	0.820 6	0.766 8	0.701 4	0.307 3	0.165 9
1100	0.930 5	0.813 3	0.749 7	0.691 7	0.298 5	0.160 3
1150	0.924 9	0.817 5	0.735 1	0.682 4	0.290 9	0.155 7
1200	0.918 2	0.810 3	0.720 7	0.670 6	0.278 9	0.150 0
1250	0.909 6	0.803 7	0.704 3	0.661 1	0.267 4	0.144 6
1300	0.901 3	0.791 2	0.691 4	0.649 7	0.255 2	0.139 9

用第三节所述的折射率处理方法,可分别计算出两种样品在不同池间距下的颗粒平均粒径 D_{32} ,如表 5 所示。

表 5 不同池间距下所测得的平均粒径

Tab. 5 D_{32} of different sample cell spaces (μm)

池间距	平均粒径(样品 1)	平均粒径(样品 2)
10	2.477	4.614
20	1.645	2.951
40	0.981	2.028
100	0.974	1.985
180	0.689	1.546
300	0.564	1.278

4.3 样品实验测试结果

由表 4、表 5 所示的实测情况可知,当样品池间距不同,即测量距离不同时,测得的结果差异性很大。对于同一种样品(保持样品浓度不变),消光值 I/I_0 随测量距离的增大而减小。在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 的测量距离内,消光值非常高,这是由于入射光纤与出射光纤的端面离得很近,使得大部分散射光也能被出射光纤所接收, I 是由一部分散射光和透射光的光强构成的,使得 I 变得较大。随着测量距离的增大,入射光纤与出射光纤的端面逐渐远离,出射光纤所能接收到的经过颗粒样品后的散射光也逐渐减少,当两端面足够远时,散射光基本上都无法被出射光纤所接收,出射光纤所能接受的几乎都是纯净的透射光,此时的测量较为精确。随着两端面进一步远离,一部分透射光将无法被出射光纤所接收,这样使得 I 变小,消光值 I/I_0 非常低。

为进一步验证折射率处理结果,取样品池间距 $L=40\ \mu\text{m}$,比较所测颗粒粒径与采用常规折射率估值法所测颗粒,常规折射率估值方法

表 6 测量结果

Tab. 6 Measurement results

测量次数	$D_{32}/\mu\text{m}$ (改进法)		$D_{32}/\mu\text{m}$ (常规法)	
	样品 1	样品 2	样品 1	样品 2
1	0.980 9	2.017 9	0.962 7	1.982 9
2	0.958 7	1.987	0.914 3	1.928 8
3	0.963 5	1.991 3	0.901	1.921 5
4	0.990 2	2.046 2	0.971 2	1.996 4
5	0.972 1	2.021 4	0.925 5	1.906 3
6	0.991 7	2.035 2	0.917 9	1.907 2
平均值	0.9761 83	2.016 5	0.932 1	1.940 517
标准偏差%	1.373 09	2.350 762	2.826 454	3.924 026
重复性%	1.406 59	1.165 763	3.032 35	2.022 155

折射率估值取 1.57,忽略色散。相应的索太尔平均粒径 D_{32} 、均值偏差和重复性见表 6。可以看出,本文方法的均值偏差和重复性都小于 5%,且优于常规折射率估值方法。

5 结 论

本文根据目前全光散射法测粒径所存在的问题,提出利用光纤耦合构造样品池结构,并引用洛伦兹色散公式进行折射率处理,计算颗粒平均粒径及其尺寸分布的方法。介绍了测量系统的结构和工作原理,阐述了算法的理论分析和实现步骤并对算法的有效性和可靠性进行了仿真和实验验证。结果表明,与平均折射率法相比,该方法可以在颗粒相对介质折射率未知的情况下,兼顾色散

所引起的折射率变化,更为准确地反演出待测参数。对在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 之间的两种标准颗粒进行实际测量实验表明,所获得的实验均值误差和重复性误差分别为:1.373 09,2.350 762 和 1.406 59,1.165 763,这一结果在该粒径范围内优于常规折射率估计法的结果,且标准偏差和重复性误差都小于 5%,达到国家测试标准要求。其实际测试结果与仿真结果具有很好的一致性,由于某些客观原因,目前未能完成粒径分布的实测实验,但是由粒径和折射率反演仿真与实测实验的一致性,有望在粒径分布实测试验中也获得较好的实验参数。同时该方法对随机噪声具有较强的抑制能力,较好地解决了平均折射率法所带来的测量误差,能够满足实际测量的需要。

参考文献:

- [1] MARIE J D, IAN A C, RICHARD J M. Determination of particle size distribution by laser diffraction of doped-CeO₂ powder suspensions: effect of suspension stability and sonication[J]. *Part. Syst. Charact.*, 2006, 22(5):310-319.
- [2] WEDD M W. Determination of particle size distributions using laser diffraction[J]. *Educ. Resour. Part. Technol.*, 2003, 32:1-4.
- [3] 吴立敏, 盛克平, 王虎. 光子相关光谱法对颗粒平均粒径测量结果的不确定度评定[J]. *理化检验—物理分册*, 2005, 41(5):245-249.
WU L M, SHENG K P, WANG H. Evaluation of uncertainty for particle size analysis by photon correlation spectroscopy [J]. *Ptca (Part: a Phys. Test.)*, 2005, 41(5):245-249. (in Chinese)
- [4] 王燕民, 陈琪星, 潘志东. 激光粒度测量的综合反演及参数选择[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9):2120-2127.
WANG Y M, CHEN Q X, PAN ZH D. Hybrid inversion algorithm for laser scattering particle size analyzer and its parameter selection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2120-2127. (in Chinese)
- [5] 徐峰, 蔡小舒, 苏明旭, 等. 光谱消光法测量高压湿蒸汽的研究[J]. *动力工程*, 2009, 29(3):254-261.
XU F, CAI X SH, SU M X, *et al.*. Research on the measurement of high pressure wet steam by spectral light extinction method [J]. *Journal of Power Engineering*, 2009, 29(3):254-261. (in Chinese)
- [6] 杨晖, 郑刚, 王雅静. 用动态光散射现代谱估计法测量纳米颗粒[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9):1996-2001.
YANG H, ZHENG G, WANG Y J. Measurement of nano-particles by dynamic light scattering based on spectral estimation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):1996-2001. (in Chinese)
- [7] 何新, 贾红辉, 常胜利, 等. 多次散射情况下非视线光传输的模拟[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2):246-250.
HE X, JIA H H, CHANG SH L, *et al.*. Simulation of non-line-of-sight light propagation for multiple-scattering instance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):246-250. (in Chinese)
- [8] 唐红, 郑文斌, 李宪霞. 主成分分析在光全散射特征波长选择中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8):1691-1698.
TANG H, ZHENG W B, LI X X. Application of principal component analysis to selection of characteristic wavelengths with total light scattering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):1691-1698. (in Chinese)
- [9] 苏明旭, 任宽芳, Grehan G, 等. 光复散射对消光法粒径测量的影响:复散射模型与数值模拟[J]. *光学学报*, 2004, 24(5):696-699.
SU M X, REN K F, GREHAN G, *et al.*. The affect of light multiple scattering on particle sizing by using light extinction method [J]. *Acta Optica Sini-*

- ca, 2004, 24(5):696-699. (in Chinese)
- [10] 徐峰, 蔡小舒, 苏明旭, 等. 独立模式算法求解颗粒粒径分布的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(2): 223-228.
XU F, CAI X SH, SU M X, *et al.*. Study of independent model algorithm for determination of particle size distribution[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2004, 31(2):223-228. (in Chinese)
- [11] 徐峰, 蔡小舒, 任宽芳, 等. 遗传算法在多光谱消光法测量粒径中的应用[J]. 中国颗粒学报, 2004, 2(6):235-240.
XU F, CAI X SH, REN K F, *et al.*. Application of genetic algorithm in particle size analysis by multispectral extinction measurements[J]. *China Particuology*, 2004, 2(6):235-240. (in Chinese)
- [12] 王少清, 董学仁, 孙平. 矩形样品池对激光粒度测量的影响及其修正[J]. 光学技术, 2002, 28(3): 259-260.
WANG SH Q, DONG X R, SUN P. Affection of square sample sell on laser particle sizing and its correction[J]. *Optical Technology*, 2002, 28(3): 259-260. (in Chinese)
- [13] 杨晖, 郑刚, 李孟超, 等. 后向动态光散射测量中样品池的影响及校正[J]. 光散射学报, 2008, 20(4):306-309.
YANG H, ZHENG G, LI M CH, *et al.*. Affection of sample cell in dynamic light back scattering measurement and its correction[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2008, 20(4):306-309. (in Chinese)
- [14] 王乃宁. 颗粒粒径的光学测量技术及应用[M]. 北京:原子能出版社, 2000.
WANG N N. *Optic Measurement Technology of Particle Size and Its Application*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000. (in Chinese)
- [15] 叶玉堂, 饶建珍, 肖峻. 光学教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
YE Y T, RAO J ZH, XIAO J. *Optics Course* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [16] 张虎, 戴景民, 唐红, 等. 改进的遗传算法在粒径测量中的应用[J]. 光电工程, 2008, 35(9):50-54.
ZHANG H, DAI J M, TANG H, *et al.*. Application of improved genetic algorithm in the particle sizing technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(9):50-54. (in Chinese)
- [17] 孙晓刚, 唐红, 原桂彬. 颗粒系的可见消光光谱分析及最佳波长的选择[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(9):1968-1973.
SUN X G, TANG H, YUAN G B. Analysis of visible extinction spectrum of particle system and selection of optimal wavelength[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(9):1968-1973. (in Chinese)
- [18] 刘铁英, 郑刚, 虞先煌, 等. 三波长消光法测定微粒的粒径及其分布[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(2):208-210.
LIU T Y, ZHENG G, YU X H, *et al.*. A method to determine size distribution of small particles using three wavelengths extinction [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, 21(2): 208-210. (in Chinese)
- [19] 孙晓刚, 唐红, 原桂彬. 非独立模式算法下粒径分布反演及分类的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(5):1111-1114.
SUN X G, TANG H, YUAN G B. Study of inversion and classification of particle size distribution under dependent model algorithm[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(5): 1111-1114. (in Chinese)
- [20] MALITSON I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1965, 55(9):1205-1209.
- [21] 郑刚, 卫敬明, 王乃宁. 用多波长消光法测量大颗粒的尺寸分布[J]. 光学学报, 1993, 13(2):165-169.
ZHENG G, WEI J M, WANG N N. Determination of size distribution of large particle using multi-wavelength light extinction[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, 13(2):165-169. (in Chinese)

作者简介:



隋国荣(1974—),男,陕西宝鸡人,博士,讲师,1996年于北京理工大学获得学士学位,2003年、2008年于上海理工大学获得博士学位,主要从事光电检测、微纳米探测和成像技术等方面的研究。E-mail: suigr@usst.edu.cn



陈抱雪(1955—),男,浙江上虞人,教授,博士生导师,1982年于上海理工大学获得学士学位,1994年于日本国立东京农工大学研究生院获工学博士学位,主要从事超高速大容量光通信器件技术,集成光学及平面光学回路技术,微光学器件及其特种工艺技术的研究。E-mail: bxchen55@live.cn



程利(1988—),男,上海人,硕士研究生,2010年于上海理工大学获得学士学位,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: cl613cl@126.com

● 下期预告

室内可见光通信中的分数间隔均衡技术

王俊波,谢秀秀,曹玲玲,盛明,冯敏
(南京航空航天大学电子信息工程学院,江苏南京 210016)

为了降低码间干扰对室内可见光通信系统性能的影响,对室内可见光通信系统分数间隔均衡技术进行了研究。首先,针对室内可见光通信系统的传输特点和信号调制特性,建立了室内可见光通信链路模型,在此基础上,提出了分数间隔均衡方法,并利用最小均方误差准则对均衡器进行了优化设计。最后,通过计算机仿真,对提出的分数间隔均衡方法进行了性能评估。实验结果表明,相同误码率条件下, $T/2$ -分数间隔均衡器比符号间隔均衡器有 $1\sim 2$ dB的性能改善,能够更为有效地抑制由信道多径效应等引起的码间干扰,提高信号传输的可靠性。