

文章编号: 0253-2239(2010)11-3184-07

基于带通滤波器的透射率起伏信号频谱特征

许亚敏¹ 沈建琪² 蔡小舒¹

(¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; ²上海理工大学理学院, 上海 200093)

摘要 透射率起伏频谱测粒技术是根据透射光起伏信号的频谱特征发展起来的一种新的颗粒测量方法, 可用于实时在线测量。研究基于一阶带通滤波器的透射率起伏信号的频谱特征, 重点分析带通滤波器带宽因子对透射率起伏频谱及其反演结果的影响。同时还考虑了无因次光束直径对透射率频谱的影响。结果表明选择较小的带宽因子 α 有利于提高测量结果的颗粒粒径分辨率, 但是带宽因子 α 过小会降低透射率起伏频谱的强度从而导致测量产生误差; 反之, 选择较大的带宽因子 α 有利于获得较强的透射率起伏频谱信号, 但是带宽因子 α 过大会降低测量结果的颗粒粒径分辨率。

关键词 光学测量; 频谱特征; 透射率起伏频谱法; 带通滤波器; 颗粒测量

中图分类号 O436.2; TB46 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3184

Characteristics of Transmission Fluctuation Frequency Spectrum with Band-Pass Filters

Xu Yamin¹ Shen Jianqi² Cai Xiaoshu¹

¹ School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

² School of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract The transmission fluctuation spectrometry (TFS) is a new method based on the spectral characteristics of the transmission fluctuation spectra, which is developed recently for real-time, online/inline particle analysis in two-phase flow. Both the particle size distribution and concentration can be measured simultaneously. The characteristics of the transmission fluctuation spectra with the 1st order band-pass filters is presented detailedly. The effects of the filter band width parameter on the spectrum and on the inversion results are analyzed together with the effects of the dimensionless beam diameter (beam-to-particle diameter ratio). Numerical calculation and experiments show that a small value of band width parameter can improve the resolution of measurements but reduce the strength of the spectrum and hence bring errors into the results. On the contrary, a big value of band width parameter is beneficial to obtain a strong spectrum but lead to low resolution of measurement.

Key words optical measurement; spectral characteristic; transmission fluctuation spectrometry (TFS); band-pass filter; particle sizing

1 引言

当采用窄光束照射流动的颗粒系统时, 测量区中颗粒浓度的起伏导致透射光信号呈现明显的脉动。这些脉动信号的特征与颗粒粒度、颗粒浓度、光束直径以及流态等因素有关, 因此由透射光起伏信号可得到颗粒粒径和浓度信息。这种基于透射光信号动态行为的颗粒分析技术由 Gregory 于 1985 年

首次提出^[1], 称作透射率起伏法。该方法无须知道颗粒的光学参数且装置简单, 因此被作为一种有效的颗粒测量方法应用于许多领域^[2-7]。然而, Gregory 的透射率起伏模型是建立在照射区内颗粒数呈泊松分布基础上, 没有考虑颗粒出现在光束边界的情况, 因此不适用于粒径接近或大于光束直径的情况。Kräuter^[8] 和 Shen^[9] 采用了一种全新的

收稿日期: 2009-12-31; 收到修改稿日期: 2010-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC50876069 和 NSFC50836003)资助课题。

作者简介: 许亚敏(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: xuyym_2003@163.com

导师简介: 沈建琪(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: shenjqq@online.sh.cn

理论模型克服了这一缺点。此外,透射率起伏法只能得出颗粒平均粒径,而无法得到颗粒在不同粒径范围的分布信息。

当颗粒粒径远大于光束直径时,透射信号表现为二进制信号,即在 0 和 1 之间转换。假定颗粒沿垂直光束传播方向以恒定速度穿过光束,则 0 信号所持续的时间与颗粒粒径和流速密切相关。在长时间段内采集透射光信号,并把这些时间域内的信号转换为频率域内的信号,可得到相应的功率谱。其中,低频信号对应大颗粒情况,高频信号对应小颗粒情况^[10]。当颗粒粒径接近或小于光束直径时,透射信号的起伏性变弱,但其频率特性与上述情况类似。因此,通过对透射光起伏信号的测量可得到颗粒粒径的分布信息。

透射率起伏频谱测粒技术(TFS)正是根据透射光起伏信号的频谱特征发展起来的一种颗粒测量方法^[11~14]。在频率域内,采用一系列低通滤波器对透射光信号进行处理,低通滤波器的截止频率在对数坐标上均匀分布,即可得到透射率起伏信号在不同频率范围的值,即透射率起伏频谱。滤波器的使用节省了计算机对信号的处理时间,因此该方法有利于实时测量。对透射率起伏频谱进行反演计算即可得到颗粒粒径分布和浓度信息。然而,由于低通滤波器的传递特性会导致各通道内信号交叠从而使分辨率降低,为此,采用带通滤波器对透射率起伏信号处理获得透射率起伏频谱^[13,14]。在带通滤波器透射率起伏频谱法中,由于带通滤波器只允许两个特定频率之间的信号通过,从而可以避免各通道之间的信号交叠,有效提高分辨率。

在带通滤波器透射率起伏频谱技术中,滤波器带宽因子的选择是一个重要因素。当带宽因子过小时,大部分信号被滤去从而会导致所得的频谱信号变弱;反之,当带宽因子过大时,同一通道中可能包含了来自于不同粒径的信号,会导致频谱信号交叠。本文研究基于一阶带通滤波器的透射率起伏信号的频谱特征,重点分析带通滤波器带宽因子对透射率起伏频谱及其反演结果的影响。由于透射率起伏频谱信号还与无因次光束直径 Λ (光束直径与颗粒直径的比)密切相关,在分析带宽因子对透射率起伏频谱信号的影响时,将无因次光束直径纳入考虑范围。

2 TFS 的数学表达

在基于带通滤波器的透射率起伏频谱法中,透射率起伏信号通常用标准偏差 σ^2 来表示:

$$\sigma^2 = E(T^2) - E(T)^2, \quad (1)$$

式中 $E(T^2)$ 为透射率平方的期望值, $E(T)$ 为透射率的平均值。

根据层模型,颗粒系统在与光束传播方向垂直的方向上被分成一系列相对独立的单层,对于单分散球形颗粒系,每个单层的厚度要大于或等于颗粒的粒径。当颗粒浓度比较低时,单层的透射率信号的标准偏差可由理论计算得出^[14]:

$$\sigma_{\text{ML}}^2 = E(T_{\text{ML}}^2) - E(T_{\text{ML}})^2 = \beta \cdot \chi(\Lambda, \Psi, \alpha), \quad (2)$$

式中 β 为单层颗粒面密度,它与颗粒浓度相关(即 $\beta = PC_V$, P 为结构函数且 $P \geq 1.5$, C_V 为颗粒体积浓度)^[15]。 Λ 为光束直径 D 与颗粒直径 x 的比值,即 $\Lambda = D/x$,称为无因次光束直径,又叫无因次空间平均参数。无因次频率 Ψ 定义为 $\Psi = \pi x f_c / v$,其中 f_c 为带通滤波器的中心频率, v 为颗粒流速。 α 是一个表示带通滤波器带宽的参数,它和带通滤波器高截止频率 f_H 和低截止频率 f_L 的关系分别是 $f_L = f_c / \alpha$ 和 $f_H = \alpha f_c$ 。 χ 为特征函数,其定义为

$$\chi(\Lambda, \Psi, \alpha) = \int_0^{+\infty} F_F F_S F_P du, \quad (3)$$

式中 F_F 为用 1 阶带通滤波器描述信号滤波的因子

$$F_F = (1 - \alpha^{-4})^{-1} \times \left\{ \left[1 + \left(\frac{u}{\alpha \Psi} \right)^2 \right]^{-1/2} - \left[1 + \left(\frac{u \alpha}{\Psi} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\}. \quad (4)$$

式中 F_S 是光束横截面分布因子,若为圆形均匀光束,则 $F_S = [2J_1(u\Lambda)/u\Lambda]^2$,其中 J_1 为 1 阶贝塞尔函数, u 是积分变量。若为高斯光束,则 $F_S = \exp[-(u\Lambda/2)^2]$ 。 F_P 是表征球形颗粒投影面积的因子, $F_P = 2J_1^2(u)/u$ 。

对于沿光传播方向厚度为 ΔZ 的三维单分散球形颗粒系统,可得^[11]

$$\sigma^2 \approx \frac{1.5\Delta Z}{x} C_V \cdot \chi(\Lambda, \Psi, \alpha), \quad (5)$$

在低浓度情况下,该公式又可进一步推广到多分散颗粒系统:

$$\sigma_j^2 \approx \sum_i \frac{1.5\Delta Z}{x_i} C_{V,i} \cdot \chi(\Lambda_i, \Psi_{i,j}, \alpha), \quad (6)$$

式中 i 为不同的粒径分区, j 为不同中心频率的带通滤波器。

3 TFS 频谱特征研究

3.1 无因次光束直径对 TFS 的影响

由(5)式可见,对于低浓度颗粒系统,透射率起

伏频谱的性质可以通过特征函数 $\chi(\Lambda, \Psi, \alpha)$ 描述, $\chi(\Lambda, \Psi, \alpha)$ 可由理论计算得出。图 1 给出高斯光束情况下, 不同无因次光束直径 Λ 对应的特征函数曲线, 此时带通滤波器带宽因子 $\alpha=2$ 。随着 Λ 的增大, 特征函数值逐渐减小且逐渐向低频方向移动。这是光束横截面对透射率起伏信号空间平均作用的结果。特征函数的最大值位于 $\Psi=1/\sqrt{1+\Lambda^2}$ 处。

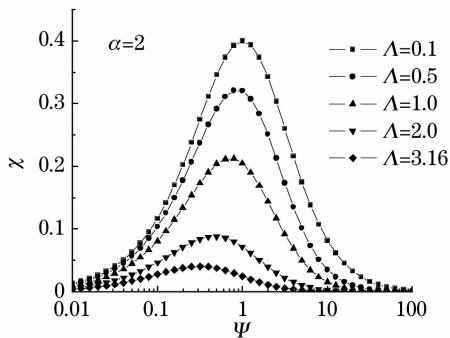


图 1 特征函数 $\chi(\Lambda, \Psi, \alpha)$ 的理论值

Fig.1 Theoretical results of the characteristic function $\chi(\Lambda, \Psi, \alpha)$

为分析无因次光束直径 Λ 对特征函数的影响, 定义归一化特征函数 χ_{normal} :

$$\chi_{\text{normal}} = \frac{\chi(\Lambda, \Psi)}{\chi_{\text{max}}}, \quad (7)$$

式中 χ_{max} 为特征函数的最大值, 即

$$\chi_{\text{max}} = \chi\left(\Lambda, \Psi = \frac{1}{\sqrt{1+\Lambda^2}}\right), \quad (8)$$

χ_{max} 和 Λ 的关系可用一个经验公式来近似描述:

$$\chi_{\text{max}} = 0.036 + \frac{0.5}{1 + \exp(1.71\Lambda - 1.145)}, \quad (9)$$

χ_{max} 的理论值和经验值如图 2 所示。其中, 实心点表示 χ_{max} 理论值, 光滑曲线为经验曲线。

图 3 给出了对应于图 1 的归一化特征函数 χ_{normal} 在不同 Λ 下的数值结果。当 Λ 增大时, χ_{normal} 向低频方向移动, 但其形状基本保持不变。因此, 可通过坐标平移, 使不同 Λ 值的归一化特征函数曲线重合。根据(8)式采用坐标平移 $\Psi' = \sqrt{1+\Lambda^2} \cdot \Psi$, 所有归一化特征函数 χ_{normal} 的最大值均位于 $\Psi'=1$ 处, 如图 4 所示。这些曲线在新坐标下基本重合。因此, 可通过一个经验公式来近似描述。该经验公式可采用广义泊松分布(GPD)表示:

$$\chi_{\text{normal}} = (e/a)^a \xi^a \exp(-\xi), \quad \xi = a\Psi'^b. \quad (10)$$

或者用对数正态分布(LND)表示:

$$\chi_{\text{normal}} = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma\Psi'}} \exp[-(\ln\Psi' - \mu)^2/2\sigma^2], \quad (11)$$

式中的系数分别为 $a = 7.936$ 和 $b = 0.276$; $A = 8.294$, $\sigma = 1.390$ 和 $\mu = 1.851$ 。从图 4 可以看出, 这两条经验曲线和(7)式的理论值吻合良好。

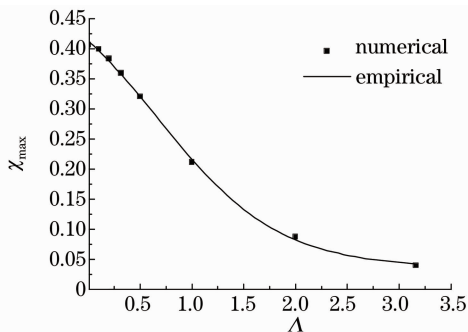


图 2 特征函数最大值 χ_{max} 与光束-颗粒直径比 Λ 的关系

Fig.2 Dependence of the maximum χ_{max} on the beam-to-particle diameter Λ

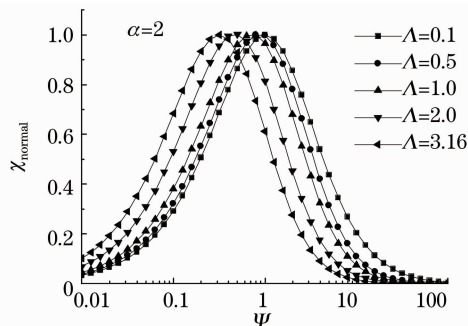


图 3 归一化特征函数

Fig.3 Normalized characteristic functions

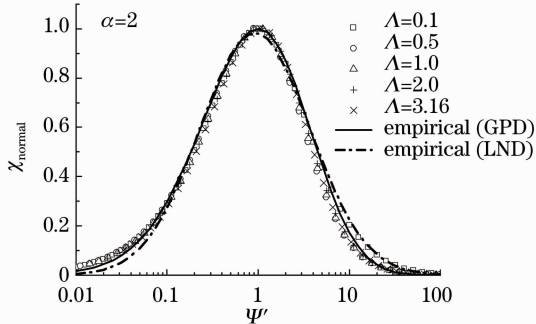


图 4 坐标转换后的归一化特征函数

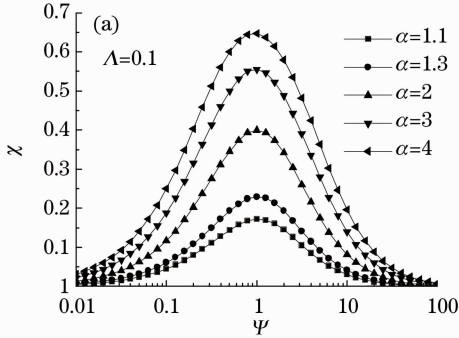
Fig.4 Normalized characteristic functions with a translation of the dimensionless frequency

综上所述, 低浓度情况下, 透射率起伏频谱可以用特征函数 $\chi(\Lambda, \Psi, \alpha)$ 来描述, $\chi(\Lambda, \Psi, \alpha)$ 又可表示为最大值 χ_{max} 和归一化特征函数 χ_{normal} 的乘积。最大值 χ_{max} 和光束-颗粒直径比 Λ 的关系可由(8)式或(9)式近似表示。通过坐标转换 $\Psi \rightarrow \Psi'$, 不同 Λ 下的归一化函数 χ_{normal} 重合在一起, 并且可近似通过(10)式的广义泊松分布函数或(11)式的对数正态

分布函数来表示。

3.2 滤波器带宽因子对 TFS 的影响

在一窄光束($\Lambda=0.1$)情况下,不同的带宽因子 α 对应的特征函数曲线如图 5(a)所示。较大 α 值对



应的特征函数较高而且宽。特征函数曲线的高度可用最大值 χ_{\max} 来体现, χ_{\max} 和带宽因子 α 的关系可用如下经验公式来表示[如图 5(b)所示]:

$$\chi_{\max} = 0.374 \ln \alpha + 0.136. \quad (12)$$

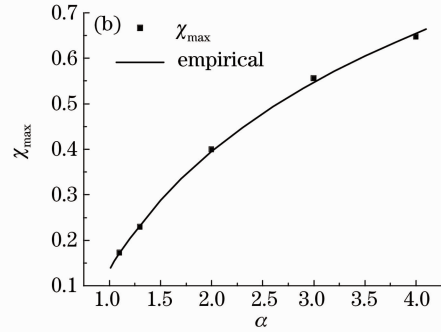


图 5 (a)不同带宽因子 α 对应的特征函数曲线($\Lambda=0.1$), (b)特征函数最大值 χ_{\max} 和带宽因子 α 的关系图
Fig. 5 (a) Characteristic functions χ for a narrow beam with different bandwidth parameters α , (b) Relation between the maximum χ_{\max} and bandwidth parameter α

对于特征函数曲线的宽度,可通过其归一化函数进行比较。根据 3.1 节所述,对于一个给定的带宽因子 α ,尽管无因次光束直径不同,平移后的归一化特征函数都可以用同一个经验公式来表示。用 3.1 节所述的方法分别对 $\alpha=1.1, 1.3, 2, 3$ 和 4 的情况进行数值分析,并在图 6 中给出各个 α 对应的归一化特征函数 $\chi_{\text{normal}}(\Delta, \Psi', \alpha)$ 的经验曲线。可以发现,随着带宽因子的增大,曲线越来越宽,但他们的基本形状仍然符合广义泊松分布或对数正态分布。因此,(10)式和(11)式同样可用于这些曲线的表达,只是其中的参数会有所不同,这些参数和带宽因子 α 之间存在一定的关系。对于(10)式存在:

$$\begin{aligned} a &= 0.722\alpha + 6.514, \\ b &= -0.032\alpha + 0.34. \end{aligned} \quad (13)$$

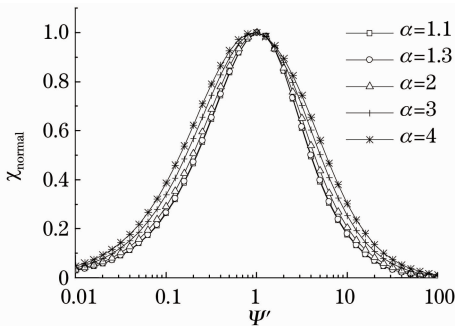


图 6 不同带宽因子对应的归一化特征函数 $\chi_{\text{normal}}(\Psi')$
Fig. 6 Normalized characteristic functions $\chi_{\text{normal}}(\Psi')$ with different bandwidth parameters

对于(11)式存在:

$$A = 5.471 \exp(0.213\alpha),$$

综上所述,带宽因子的变大使得特征函数变高和变宽,这是由带通滤波器的特性决定的。假定一阶带通滤波器的中心频率 $f_c=1$,带宽因子 α 分别取 1.1, 1.3, 2, 3, 4, 则带通滤波器的传递函数如图 7 所示。可见,当 α 较小(即带宽较窄)时,传递函数较窄,幅值较小。这说明滤波器带宽越窄,通过滤波器的信号强度越弱。

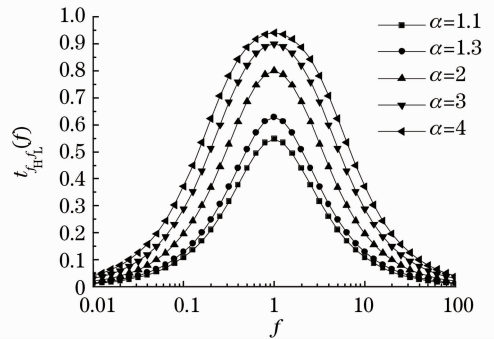


图 7 具有不同带宽因子的一阶带通滤波器传递函数
Fig. 7 Transfer functions of 1st band-pass filters with different bandwidth parameters

4 实 验

4.1 频率谱的测量

用单模 He-Ne 激光器作光源,会聚高斯光束的束腰直径约为 $24 \mu\text{m}$,测量区光程为 $\Delta Z=5.5 \text{ mm}$ 。颗粒两相流由偏心泵驱动在一个密闭系统中匀速循环,测量区内的颗粒流速为 $v \approx 1.98 \text{ m/s}$ (光学装置如图 8 所示)。

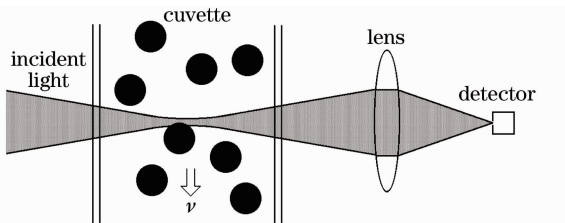


图 8 光学装置示意图

Fig. 8 Scheme of the optical arrangement

采用 Yakogawa 公司生产的数字示波器 DL708 获得并存储实时的透射率信号。采样率根据流速和颗粒粒径设定。在实验中,采样率取 $10^5/s$ 或 $10^6/s$,每次测量的采集时间不少于 1 s。采集到的信号通过 RS-232 型接口输入到计算机中,计算机内的时间信号通过傅里叶变换转换成频率信号,由一系列一阶带通滤波器组成的信号处理系统及后续的均方根(RMS)模块得到频率谱,具体方法如下:首先,采用一个具有非常低截止频率的低通滤波器

来获得透射率起伏信号的平均值 $E(T)$,与此同时,起伏的透射信号被送到一系列平行通道内,每个通道包含一个一阶带通滤波器和一个均方根处理芯片——AD536。这些通道的中心频率(带通滤波器的中心频率)在一个很宽的频率范围呈对数均匀分布。这样,透射率标准方差就形成了一个透射率起伏频谱。

分别以平均粒径为 $265 \mu\text{m}$ 的玻璃球单分散系和平均粒径为 $50 \mu\text{m}$ 的 SiC 单分散系为测量对象,通过称重法得到的玻璃球颗粒体积浓度约为 0.622%, SiC 颗粒体积浓度约为 0.191%。选取不同带宽因子的滤波器对透射信号进行处理,得到的透射率起伏频谱(用标准偏差 σ^2 表示)如图 9 所示。可见,透射率起伏频谱随着带宽因子的增大而逐渐增大、变宽。这种规律与图 5(a)所示的特征函数与带宽因子的关系是一致的,从而也证明了低浓度下透射率起伏频谱的特征可用特征函数的性质来描述。

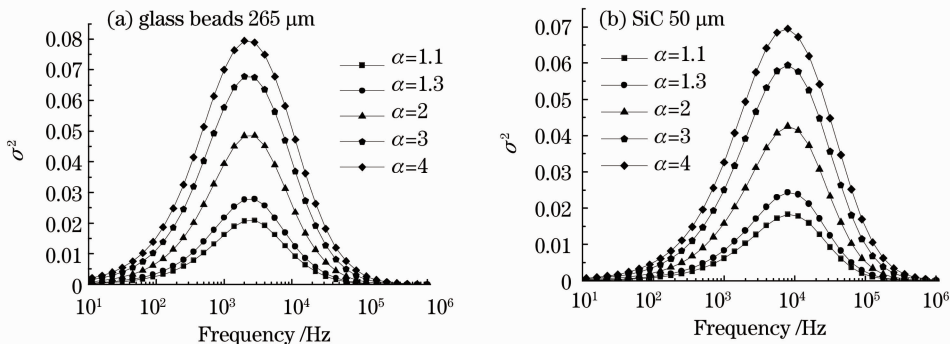


图 9 不同带宽因子情况下的透射率起伏频谱

Fig. 9 Transmission fluctuation spectra obtained with different bandwidth parameters of the filters

4.2 实验结果及讨论

结合(7)式,并考虑到高斯光束的截面直径沿光传播方向是变化的,信号处理系统中带通滤波器的个数用 j 表示,则(6)式可写为

$$\sum_i \underbrace{\frac{1.5\Delta Z}{\bar{x}_i} C_V(\bar{x}_i) \Delta x_i \cdot \chi_{\max}(\Delta\langle Z, \bar{x}_i \rangle)}_{X_i} \cdot \underbrace{\frac{1}{\Delta Z} \int_{Z_1}^{Z_2} \chi_{\text{normal}}(\Psi_j, \Delta\langle Z, \bar{x}_i \rangle) dZ}_{A_{i,j}} = \underbrace{\sigma(\Psi_j)^2}_{B_j}, \quad (15)$$

式中 \bar{x}_i 表示颗粒在第 i 个区间 Δx_i 内的平均粒径, B_j 为第 j 个带通滤波器的实验测量值, $A_{i,j}$ 是反演矩阵,可根据经验(10)式或(11)式得出。 X_i 包含了颗粒的粒径分布信息和浓度信息,通过反演算法^[12,16]求解可得。 χ_{\max} 是与颗粒粒径有关的函数,当粒径为一定值时, χ_{\max} 也唯一确定,可以通过理论计算得出,但它作用在 X_i 上并不影响粒径分布。

采用累积体积分布来表示颗粒的粒径分布。图 10 是对上述玻璃球颗粒系统和 SiC 颗粒系统的反演结果。由图可见,对于带通滤波器情况,带宽因子越小,测量结果的粒径分辨率越高。这与 3.2 节的叙述是一致的。然而较小的带宽使得透射率频谱信号的强度减弱,这对于实际测量是不利的,容易产生测量误差;反之,较大带宽的滤波器可得到较强的

信号,但测量精度较低。因此,在实际情况下应综合考虑信号强度和粒径分辨率两个因素选取合适的 α 值,既使滤波信号足够强,又使测量粒径分辨率较高。另外,图 10 中还给出了一阶低通滤波器和二阶

低通滤波器情况下的反演结果(空心点表示),实验结果表明,若带通滤波器的带宽因子不太大,采用带通滤波器比采用低通滤波器具有更高的颗粒粒径分辨率。

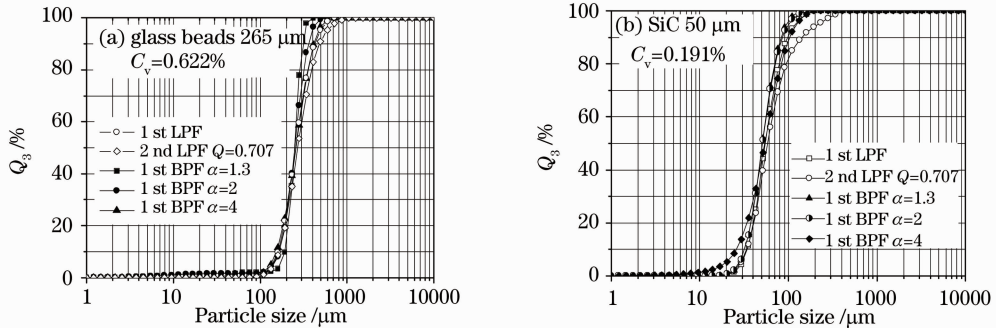


图 10 低浓度情况下采用不同滤波器所得的颗粒粒径分布比较

Fig. 10 Particle-size distributions of glass beads measured at a low concentration with different filters

5 结 论

研究了基于带通滤波技术的透射光起伏信号的频谱特征。考虑光束一颗粒直径比和带通滤波器带宽因子这两个因素对透射率起伏频谱的影响。

对于低浓度颗粒系统,透射率起伏频谱的性质可通过特征函数 χ 描述。随着光束一颗粒直径比 Δ 的增大,特征函数的值逐渐减小,并且逐渐向低频率方向移动。经过频率转换后的归一化特征函数(最大值归一)在不同 Δ 值时重合。可采用广义泊松分布或者对数正态分布近似表示。

滤波器的通带宽度是影响透射率起伏频谱特征的关键因素。数值计算发现,特征函数曲线随着带宽因子 α 的增大逐渐变高、变宽。选择较小的带宽因子 α 有利于提高测量结果的颗粒粒径分辨率,但是带宽因子 α 过小会降低透射率起伏频谱的高度从而导致测量产生误差;反之,选择较大的带宽因子 α 有利于获得较强的透射率起伏频谱信号,然而带宽因子 α 过大会降低测量结果的颗粒粒径分辨率。因此,在实际情况下应综合考虑信号强度和粒径分辨率两个因素,选取合适的带宽因子 α 。最后,实验验证了带宽因子对透射率起伏频谱以及颗粒粒度分布结果的影响。

参 考 文 献

- 1 J. Gregory. Turbidity fluctuations in flowing suspensions[J]. *J. Colloid Inter. Sci.*, 1985, **105**(2): 357~371
- 2 B. Wessely, J. Altmann, S. Ripperger. The use of statistical properties of transmission signals for particle characterization[J]. *Chem. Engng. Technol.*, 1996, **19**(5): 438~442
- 3 U. Feller, B. Wessely, S. Ripperger. Particle size distribution measurement by statistical evaluation of light extinction signals

- [C]. 7 th European Symposium Particle Characterization 1998, Nuremberg, Germany, **1**: 367~376
- 4 S. Ripperger, B. Wessely, U. Feller. Erfassung von dispersitätseigenschaften mittels dynamischer extinktionsmessung [J]. *Chem. Technik.*, 1999, **51**(5): 258~262
- 5 X. Cai, J. Li, X. Ouyang *et al.*. In-line measurement of pneumatically conveyed particles by a light transmission fluctuation method[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2005, **16**(5): 315~320
- 6 B. Wessely, S. Gabsch, J. Altmann *et al.*. Single particle detection and size analysis with statistical methods from particle imaging data [J]. *Part. Part. Syst. Char.*, 2006, **23**(2): 165~169
- 7 S. Gabsch, B. wessely, M. Stintz. The influence of particle shape and orientation on the results of the dynamic extinction measurement [C]. *International Congress for Particle Technology (PARTEC2007)*, Nuremberg, Germany, 27~29
- 8 U. Kräuter. Grundlagen zur in-situ Partikelgrößenanalyse mit Licht und Ultraschall in konzentrierten Partikelsystemen [D]. Karlsruhe: Tu Karlsruhe, 1995
- 9 J. Shen, Y. Xu, B. Yu *et al.*. Transmission fluctuation method for particle analysis in multiphase flow [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2008, **34**(10): 931~937
- 10 J. Shen, B. Yu, Y. Xu *et al.*. Particle sizing by spectral analysis on transmission fluctuations [J]. *Powder Technol.*, 2006, **166**(2): 91~99
- 11 J. Shen. Particle Size Analysis by Transmission Fluctuation Spectrometry: Fundamentals and Case Studies [D]. Cuvillier Verlag Göttingen: Tu Cottbus, 2003
- 12 Xu Yamin, Yu Bin, Liu Lei *et al.*. Measurement results on transmission fluctuation spectrometry by using the 2nd order filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1495~1500
- 13 许亚敏, 于彬, 刘蕾等. 基于二阶滤波器的透射率起伏谱颗粒测量结果 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1495~1500
- 13 J. Shen, Y. Xu, B. Yu *et al.*. Signal processing in transmission fluctuation spectrometry with band-pass filters [C]. *American Institute of Physics Conference Proceeding*, 2007, **914**: 226~231
- 14 Y. Xu, J. Shen, X. Cai *et al.*. Particle size analysis by transmission fluctuation spectrometry with band-pass filters [J]. *Powder Technology*, 2008, **184**(3): 291~297
- 15 U. Riebel, U. Kräuter. Extinction of radiations in sterically

interacting systems of monodisperse spheres. Part 1: Theory[J].
Part. Part. Syst. Char., 1994, 11(3): 212~221

16 Wang Huarui, Shen Jianqi, Yu Haitao *et al.*. Inversion problem
in submicron and nanometer particle sizing using laser self-mixing

interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12):
2335~2343

王华睿, 沈建琪, 于海涛等. 激光自混合干涉法亚微米及纳米颗粒
测量中的反问题[J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2335~2343

2011 年《中国激光》“激光制造”专题 征 稿 启 事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》在成功组织 2008 年、2009 年“激光制造”专题的基础上,计划在 2011 年 6 月正刊(EI 核心收录)上推出第三期“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光制造”方面原创性的研究论文,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光制备新材料技术
- 激光表面工程技术
- 激光连接技术
- 激光去除技术
- 激光直接制造技术
- 激光复合制造技术
- 激光微加工技术
- 激光纳米制造技术
- 激光器、光学元器件与加工系统
- 激光宏微观制造过程模拟、检测与控制技术
- 其他

特邀组稿专家:

钟敏霖 教授(《中国激光》常务编委) 清华大学机械工程系激光加工研究中心

E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期:2011 年 2 月 28 日

投稿方式以及格式:

通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(留言中说明“激光制造”专题投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体为中文,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: mayi@siom.ac.cn;电话:021-69918427-802。

《中国激光》杂志社

2010-09-22