

微纳级示踪粒子图像灰度与粒径量化关系研究

刘志博, 朱志鹏, 何超, 李佳*, 岳向吉**, 巴德纯, 赵飞

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 基于传统粒子追踪测速(PTV)技术的粒径分析方法只能通过几何成像检测粒径,无法对衍射成像尺寸远远大于几何成像尺寸的粒子图像进行分析。根据衍射成像原理,通过对激光-粒子散射光-CCD信号-图像灰度值物理流程的定量分析,提出确定微纳级示踪粒子图像灰度值与粒径之间量化关系的模型,弥补了PTV技术在粒径检测方面的不足。基于PTV实验系统,应用数码相机和Micro Vec V3软件完成SiO₂粒子图像的拍摄,运用所提模型对拍摄的粒子图像进行粒径分析。实验结果表明,所提方法具有较高的准确性。

关键词 成像系统; 应用光学; 示踪粒子; 微纳尺度; 图像灰度; 光能量; 电信号

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0811004

Research on Quantitative Relationship Between Image Gray Value and Particle Diameter of Micro-Nano-Scale Tracer Particle

Liu Zhibo, Zhu Zhipeng, He Chao, Li Jia*, Yue Xiangji**, Ba Dechun, Zhao Fei

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract Particle diameter analysis method based on traditional particle tracking velocimetry (PTV) technology can be used to detect particle diameter only by geometric imaging, and it is impossible to analyze particle images when diffraction imaging size is much larger than geometric imaging size. Based on the principles of diffraction imaging, a quantitative relationship model for determining image gray value and particle diameter of a micro-nano-scale tracer particle is proposed through the quantitative analysis of the whole physical process related to laser, particle scattered light, CCD signal, and image gray value and thus the shortcomings of PTV technology in particle diameter detection are addressed. Based on the PTV experimental system, the digital camera and software of Micro Vec V3 are used to complete the shooting of SiO₂ particle images, and the proposed model is used to analyze particle diameter from the captured images. The experimental results show that the proposed method has a high accuracy.

Key words imaging systems; applied optics; tracer particle; micro-nano-scale; image gray; light energy; electric signal

OCIS codes 110.4235; 120.5820; 110.2960

1 引 言

当前随着工业技术的不断发展,微纳米颗粒流态化技术已越来越多地应用在微纳米颗粒的生产加工、表面处理,催化剂的制备与使用等领域中。流态化气固两相流场的粒径分析是当今微纳米技术的重点研究方向之一。颗粒在流化床内的粒径大小和位置分布对流化过程中颗粒的运动速度、混合状态等重要参数有直接影响^[1-2]。为了能够分析微纳米颗粒的状态参数,需要对气固两相流场中微纳米颗粒粒径进行准确检测。粒子追踪测速(PTV)成像技

术不仅能够对颗粒的尺寸进行分析^[3],而且还能够对床内流场的运动情况进行全场、无扰式的动态检测,有助于工程设计者展开各项研究,推动流化技术不断发展。PTV分析流程为:在流场中加入适量的示踪粒子,使用脉冲片光源照射流场的待测平面,随流体一同运动的粒子被激光照射而发出散射光,通过数码相机成像可以直接记录粒子所处的位置^[4-5],而后对所拍摄的图像使用数字图像处理技术,实现粒径及运动状态等流化过程的分析。

PTV技术虽然已经有了较为成熟的粒径分析功能,但传统的PTV粒径分析方法均是通过几何

收稿日期: 2019-11-06; 修回日期: 2019-12-16; 录用日期: 2020-01-06

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ24042101)

* E-mail: jiali_neu@126.com; ** E-mail: xjiyue@mail.neu.edu.cn

成像的方式来求得待测颗粒的直径,粒径为图像放大率与直径所占像素个数的乘积。但当粒子图像的几何成像尺寸远远小于衍射成像尺寸时,由于成像原理的差异,传统的 PTV 粒径分析方法将无法准确检测出粒径。由于微米级颗粒并不满足普通几何成像的粒径分析条件,因此传统 PTV 的粒径分析无法得出微纳尺度颗粒准确的粒径结果。

为了使 PTV 技术能够在动态条件下对流化过程中的微纳米级颗粒进行粒径检测,本文依托 PTV 实验条件,以微纳尺度的粒子作为研究对象,通过 CCD 成像技术^[6]对粒子的尺寸进行分析,以确定微纳级示踪粒子的尺寸与所拍摄图像灰度值之间的量化关系,从而完善 PTV 技术在粒径检测方面的不足。

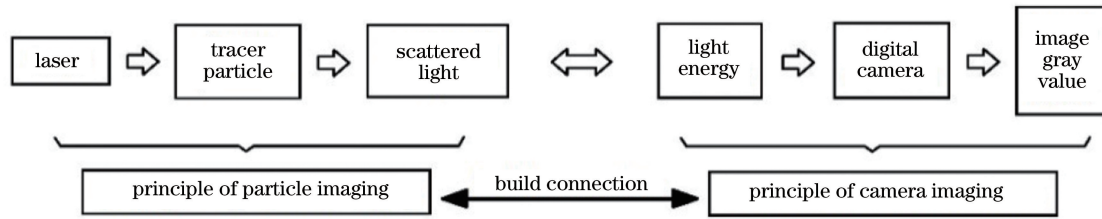


图 1 粒径与灰度值映射关系分析流程

Fig. 1 Analysis flowchart of relationship between particle diameter and gray value

由于 PTV 成像过程涉及的因素众多,在实际应用或进行相关分析计算时无法考虑全部因素,因此需要忽略一些次要的因素。本文基于以下假设:镜头不产生像差;实验中镜头与激光平面(物面)准确对焦;感光面积与 CCD 面积之比称为填充率,本文填充率为 100%。

2.1 衍射极限成像

在 PTV 的实际应用中,即使镜头不产生像差,物面上的一个点在像面图像上也表现为一个具有有限直径的圆斑。这种现象可以由衍射极限成像理论解释,该理论认为:一个理想点经光学系统成像,由于衍射的限制不可能得到理想像点,而是一个夫琅禾费弥散斑,这种弥散斑与由镜头像差形成的弥散斑不同,它受物理光学的限制,是光的衍射造成的。该情况下,粒子在像平面的光强分布由艾里函数表示,对应的光斑称艾里斑。艾里斑中心处能量最高,衍射极限光斑直径 d_s 为艾里斑中心亮斑所对应的直径^[12]:

$$d_s = 2.44 \frac{\lambda Z_0}{D_a}, \quad (1)$$

式中: λ 为激光波长,单位为 nm; Z_0 为镜头与像面的距离,单位为 mm;镜头光圈直径 $D_a = f/F$, f 为镜头焦距,单位为 mm, F 为光圈数。

2 衍射成像与曝光量-粒径函数关系

成像过程中,当衍射成像尺寸远远小于几何成像尺寸时,可通过实验标定的图像放大率得到每个像素对应的实际尺寸,进而求得粒子尺寸。但当粒子尺寸小到一定程度时^[7],几何光学原理将不再适用于成像分析,由此引入微纳尺度粒子的成像原理,建立 CCD 相机成像与 PTV 粒子曝光特性的联系^[8]。分析的流程如图 1 所示,激光照射示踪粒子,粒子的散射光能量被 CCD 相机接收,并以灰度值的形式显示在图像上^[9-11]。以此建立示踪粒子尺寸与图像灰度值间的映射关系。

对于理想的衍射极限镜头,其点光源的衍射极限光斑的光强分布可近似为高斯分布。使用高斯近似的优点在于,首先二维高斯分布可拆分为两个一维高斯分布,从而简化了分析过程;其次高斯函数的卷积仍为高斯函数^[12]。根据高斯近似,假定微小粒子的粒径为 d_p ,则其无像差图像的能量分布形式符合直径为 $M_0 d_p$ 的高斯分布,其中 M_0 为成像放大倍数,计算公式为

$$M_0 = \frac{Z_0}{z_0} = \frac{l_{\text{pix}}}{N_{\text{im}} \times 10^3}, \quad (2)$$

式中: z_0 为物距,单位为 mm; N_{im} 为图像放大率,单位为 mm/pixel; l_{pix} 为像元的尺寸,单位为 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。

涉及衍射和几何成像作用的粒子所成的像的近似直径^[13]为

$$d_\tau = \sqrt{M_0^2 d_p^2 + d_s^2}. \quad (3)$$

透镜焦距、像距、物距间的成像公式满足

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{Z_0} + \frac{1}{z_0}. \quad (4)$$

结合(1)~(4)式,得到化简后的衍射极限光斑直径 d_s 及涉及衍射极限和几何成像作用的粒子图像近似直径 d_τ (单位为 μm) 的计算公式分别为

$$d_s = 2.44 \times \frac{\lambda F (N_{\text{im}} \times 10^3 + l_{\text{pix}})}{N_{\text{im}} \times 10^3}, \quad (5)$$

$$d_{\tau} = \frac{\sqrt{l_{\text{pix}}^2 d_p^2 + 2.44^2 \lambda^2 F^2 (N_{\text{im}} \times 10^3 + l_{\text{pix}})^2}}{N_{\text{im}} \times 10^6} \quad (6)$$

用衍射成像原理分析粒子图像的特殊性在于粒子的散射光经相机光圈后发生衍射,理论上以艾里斑的形式成像在 CCD 传感器上。但在实际操作条件下,由于片光源本身具有一定的宽度,而相机只能聚焦在一个平面上,故实际拍摄的粒子位置会出现在镜头的焦平面之前或之后,即景深的影响使粒子图像形成弥散圆。真实的镜头并不能完美地将所有光线会聚起来,因此所成的像始终存在弥散圆的情况。由于粒子在成像时距物面或远或近,因此在实际计算时,不能简单地通过(5)、(6)式判断粒子在图像上最终形成的光斑大小,(5)、(6)式只适用于理想情况。

2.2 粒子图像曝光量计算

粒子经过成像系统所形成的图像需要经过曝光才能被图像传感器记录,示踪粒子产生的曝光量的计算公式^[12,14]为

$$\varepsilon_p(X, Y) = \int_0^{\delta t_e} I_p(X, Y, t) dt = \int_0^{\delta t_e} J(z_p, t) \tau_0 [X - M_0 x_p(t), Y - M_0 y_p(t)] dt, \quad (7)$$

式中: (X, Y) 为像面上的二维坐标;函数 I_p 为粒子的灰度场;函数 $J(z_p)$ 为粒子在距物平面 z_p 位置处所受的片光强度;函数 τ_0 为单位片光强度照射下示踪粒子的曝光量; (x_p, y_p) 为示踪粒子在物空间的坐标; t 为时间; δt_e 为曝光时间,相机的曝光时间一般远大于激光的一个脉冲波长,因此实际曝光时间只由脉冲波长确定,即 $\delta t_e = \min(\delta t, \delta t_{e0})$, δt 为激光的脉冲持续时间, δt_{e0} 为数字相机电子快门的时间。

研究表明,示踪粒子的曝光量与脉冲持续时间、脉冲光总能量、镜头光圈大小及粒子的散光特性等多个因素有关。在实际 PTV 应用中,当示踪粒子发出的散射光满足米氏散射理论,且衍射极限光斑的大小远大于示踪粒子的几何图像时,将单位面积的粒子图像曝光量计算公式^[13]简化为

$$\bar{\varepsilon}_p = \frac{J_0 \frac{\delta t_e}{\delta t} \left(\frac{d_p}{\lambda}\right)^3 D_a^4}{Z_0^2 z_0^2 \Delta y_0 \Delta z_0}, \quad (8)$$

式中:认为激光片光强度在 y 和 z 方向均为顶帽

分布,且总能量为 J_0 ; Δy_0 和 Δz_0 分别为激光片光的宽度和厚度。根据大量实践经验,片光厚度 Δz_0 在 PTV 实验中取 1 mm 左右^[12]。在实验前可通过图像标定的方法测量出所使用激光能量对应的 Δy_0 和 Δz_0 。(8)式可以应用于任何一种记录介质上。

但是,当粒子尺度约小于激光波长的 1/10 时,散射光强度与入射光波长的四次方成反比,符合瑞利散射条件。反之,当示踪粒子的尺度增加到一定程度(由粒子衍射成像尺寸和几何成像尺寸共同决定)时,出现几何散射现象,图像强度与粒径无关,因为散射光能量和图像区域都随着直径的二次方而增加^[13]。因此(8)式适用于粒子尺度约大于激光波长 1/10,和粒子的衍射极限光斑尺寸远大于粒子几何成像尺寸的实验条件。

由(8)式通过数字相机求得示踪粒子曝光量后,便可反推求得所拍摄粒子的直径。

3 数字相机成像与曝光量-灰度值量化关系

3.1 数字相机成像流程

CCD 相机将入射光信号转换为电信号,图像的信息以电荷的形式存储在像元中并进行转移^[15];在模拟电路中,通过前置放大器对弱电电压进行一次放大;再通过主放大电路对新信号进行二次放大,通过调节 Micro Vec V3 软件亮度增益改变放大倍数,放大倍数达到合适范围后,AD 采集模块对信号进行模数转换操作,实现电压的数字化;最终以灰度值的形式传输至计算机并显示图像。流程如图 2 所示。

3.2 数字相机参数计算

根据图 2 可知,相机传感器捕获到示踪粒子的散射光后,会通过光电转换效应使像元产生对应的光电子。产生的光电子数与照射到传感器感光元件的光子数之比称为量子效率 η ,本文中相机传感器的量子效率 $\eta \approx 0.58$ 。

电子作为图像信息的载体,由于每个势阱有着最大电荷容量的限制,因此也就存在读出电压的饱和值^[16]。达到饱和值后,如果有光子继续注入,新的电子便会向周围临近的像元溢出,产生高光溢出现象。此时的像元信息不再完整,因此在拍摄中应合理调节各参数,尽量避免饱和甚至高光溢出的现象。

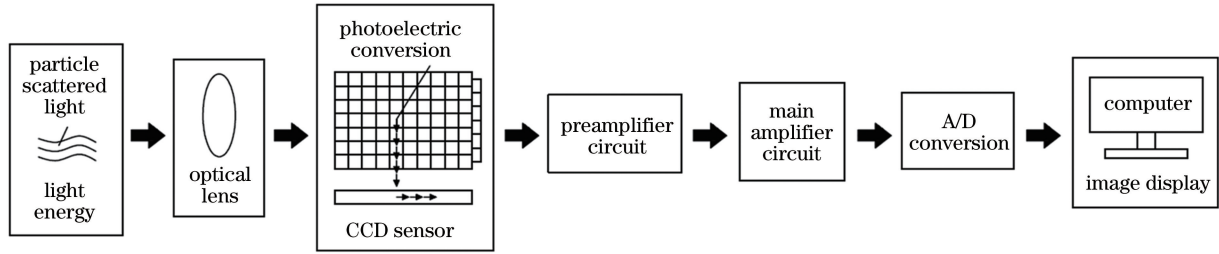


图2 CCD成像流程

Fig. 2 Imaging process for CCD

感光元件生成的电信号十分微弱,所以无法直接进行模数转换工作,输出的电信号必须进行统一的放大处理。CCD传感器中的前置放大器保证了每个像点的电信号强度都能获得同样幅度的增大^[17-18]。通过前置放大器后,电信号会通过模拟增益控制进行二次线性放大。本文数字相机模拟增益控制的换算公式为 $20\lg A = A_g$, 其中 A 为放大倍数, A_g 为增益的分贝数。

传感器输出的电信号经过调理后,由模数转换器进行图像的量化。通过数字编码器将采样得到的模拟电信号映射为离散数字信号,即最终图像显示的灰度值。数字图像输出灰度范围为 $0 \sim I_{bit}$, 本实验中的编码器分辨率设定为8位,则 I_{bit} 的计算公式为

$$I_{bit} = 2^8 - 1 = 255. \quad (9)$$

响应度 R 是描述器件光电转换能力的物理量,其值的大小可以理解光电转换器的输出电信号与输入光功率之比,是决定光电探测器性能的重要指标^[19]。 R 的计算公式^[20]为

$$R = C_{VF} \cdot \frac{\lambda \eta A_p}{hc}, \quad (10)$$

式中: R 的单位为 $V \cdot m^2/J$; A_p 为像元的感光面积; h 为普朗克常数; c 为光速; C_{VF} 为电荷转换因子。电荷转换因子代表每个信号电荷所产生的电压值大小^[20], 表达式为

$$C_{VF} = \frac{V_{sat}}{N_{es}}, \quad (11)$$

式中: V_{sat} 为像元的饱和电压值; N_{es} 为像元的饱和电子容量。

像元曝光量与其输出的电信号成正比,计算公式为

$$\bar{\epsilon}_i = \frac{U_{CCD}}{R}, \quad (12)$$

式中: i 为图像中对应的像元; $\bar{\epsilon}_i$ 为单个像元曝光量; U_{CCD} 为像元输出电压。

因此像元饱和曝光量 S_E 的表达式为

$$S_E = \frac{V_{sat}}{R} = \frac{N_{es} hc}{\lambda \eta A_p}. \quad (13)$$

相机主放大电路的放大倍数由软件中的亮度增益选项直接调节,可根据实验条件和实际需求实时地调节该增益大小。Micro Vec V3 软件中亮度增益共提供 $\times 1, \times 2, \dots, \times 10$ 十个选项。设亮度增益调节为 N , 根据增益公式可以得到

$$20\lg A = A_g \cdot \frac{N}{10}, \quad (14)$$

对应的放大倍数 A 为

$$A = 10^{\frac{A_g N}{200}}. \quad (15)$$

3.3 曝光量与灰度值关系的建立

CCD相机中前置放大器与主放大电路虽然同时起到放大倍率的作用,但用途和目的截然不同。主放大电路中放大倍数的调节可以改变图像的亮暗程度,即该放大倍数并没有影响图像量化时最大灰度值 I_{bit} 对应的模拟量大小 U_{bit} , 主放大电路的调节对量化过程没有任何影响。 U_{bit} 值是传感器输出的微弱电信号在经前置放大器处理后、主放大电路处理前的数值,表达式为

$$U_{bit} = V_{sat} \cdot N_{sum}, \quad (16)$$

式中: N_{sum} 为像元输出的电信号所涉及的全部相关线性增益。

因此,图像上某一像素的灰度值 I_p (已减去图像噪声)与像元输出电压间的关系为

$$\frac{I_p}{I_{bit}} = \frac{U_{CCD} \times N_{sum} \times A}{U_{bit}} = \frac{U_{CCD} \times A}{V_{sat}}. \quad (17)$$

综合(12)、(15)及(17)式,解得数字相机拍摄的图像灰度值 I_p 与像元产生的曝光量 $\bar{\epsilon}_i$ 之间的量化关系为

$$\bar{\epsilon}_i = \frac{V_{sat} I_p}{R I_{bit} \cdot 10^{\frac{A_g N}{200}}} \times 10^{-6}, \quad (18)$$

式中: $\bar{\epsilon}_i$ 的单位为 J/mm^2 。从而建立了数字相机灰度值与传感器像元曝光量之间的量化关系函数。

3.4 像元曝光量与单位面积粒子图像曝光量的联系

最后,像元曝光量 ϵ_i 与单位面积的粒子图像曝光量 ϵ_p 之间的表达式为

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i = \epsilon_p \times T, \quad (19)$$

式中: n 为粒子图像在 CCD 传感器上所占像素个数; $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i$ 为粒子图像在 CCD 传感器上的平均能量,以此与 ϵ_p 建立对应关系; T 为实验中玻璃或其他透明物质隔断的总透光率,本文使用的玻璃透光率约为 0.88。

通过(19)式求得 ϵ_p ,再代入(8)式即可求得示踪粒子的粒径大小。实验中由于衍射光斑和弥散圆的共同存在,在两种条件同时发生的情况下, n 值是通过 PTV 技术的粒子识别算法^[21],以实际灰度分布判断图像中粒子所占实际像素区域大小来确定的。

4 实验与结果分析

4.1 实验系统

为验证所提方法与模型的正确性,进行相关实验。实验系统如图 3 所示。实验时将适量的示踪粒子从玻璃管入口处放入,启动空气压缩机后由调节阀控制实验所需的气流大小。激光从上方照射至玻璃管出口处的拍摄区域,同时相机进行粒子图像的拍摄。本文使用的数字相机为面阵型 CCD 相机,参数设置、设备启动通过 Micro Vec V3 软件进行。

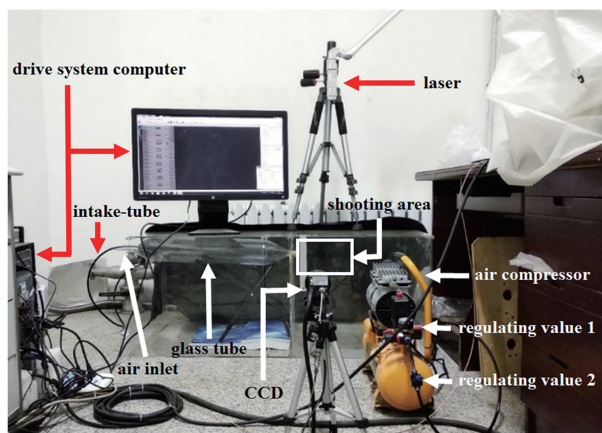


图 3 PTV 气固两相流实验系统

Fig. 3 Experimental system of PTV gas-solid two-phase flow

本实验使用科研级 CCD 传感器,CCD 传感器的量子效率约为 58%($\lambda = 525 \text{ nm}$ 时);所拍摄的图像尺寸宽为 2456 pixel、高为 2058 pixel;像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$;相机模拟增益为 0 dB ~ 36 dB;像元饱和电子数约为 6000,饱和电压为

360 mV;相机焦距为 50 mm,光圈数为 1.4, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16;双脉冲激光器的激光波长为 532 nm,单个脉冲激光的能量为 200 mJ。

实验中,示踪粒子为微纳级 SiO_2 ,拍摄的粒子图像的详细样貌如图 4 所示,粒子图像如图 5 所示(原图尺寸较大,在此截取局部予以展示)。基于 Visual C++ 编程平台,开发了粒径计算方法的软件系统,以实现图像自动处理分析的功能。



图 4 粒子图像的形貌

Fig. 4 Morphology of particle image

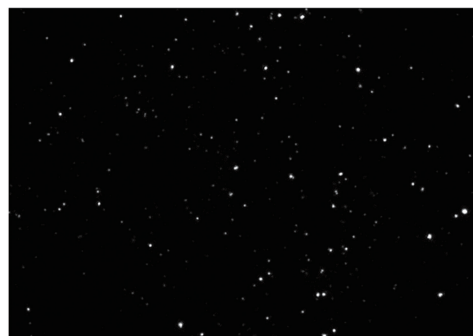


图 5 实验拍摄的 SiO_2 粒子部分图像

Fig. 5 Partial image of SiO_2 particle taken in experiment

4.2 微纳级 SiO_2 粒子实验

4.2.1 样品实际粒径确认

实验所使用的微纳级 SiO_2 粒子样品经上海育仪科技有限公司的马尔文 2000 激光粒度仪检测。根据粒度测试报告数据,样品的平均粒径(Z-average)为 465.8 nm,实际粒径分布情况如图 6 所示,其中纵坐标表示粒子所占的数量百分比。

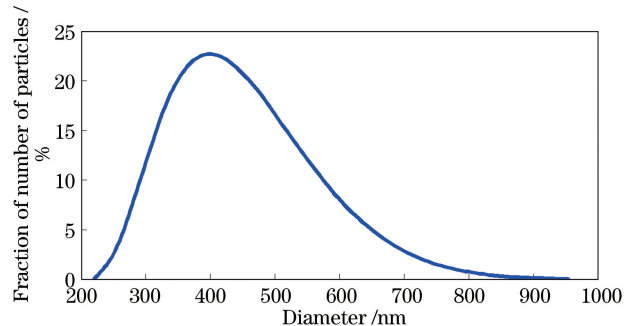


图 6 SiO_2 粒子样品实际直径分布

Fig. 6 Actual diameter distribution of SiO_2 particle samples

4.2.2 SiO₂ 粒子 PTV 实验结果

图 7 为图 5 中微纳级 SiO₂ 粒子图像的分析结果。相关参数为:图像放大率 $N_{\text{im}}=0.0668$ mm/pixel;片光源激光能量大小 $J_0=0.0667$ J;亮度增益 $N=1$;相机光圈数 $F=16$;总透光率 $T=0.88$; $\Delta y_0 \approx 230$ mm, $\Delta z_0 \approx 1$ mm。

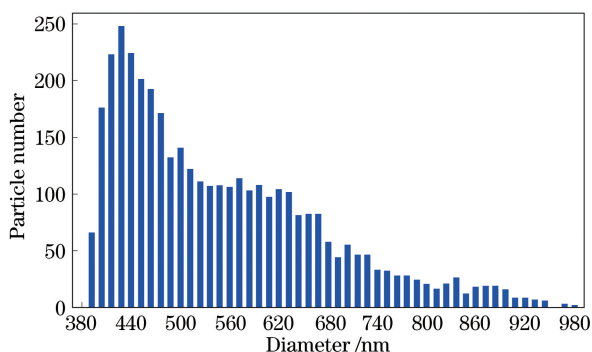


图 7 粒子直径计算结果

Fig. 7 Calculation result of particle diameter

4.3 实验结果与误差分析

比较图 7 与图 6, 粒径分析的结果与实际粒径在分布形式和数值范围上均一致。实验结果呈不对称分布, 峰值左侧分布有所缺失, 这是因为即使在 PTV 高要求的实验条件下, 数字相机成像过程也不可避免会产生各类随机噪声。尺寸偏离峰值左侧一定距离的粒子会被淹没在图像噪声中, 粒子的识别能力降低。

实验参数的调节会导致粒径的可测范围发生改变, 结合(8)、(18)及(19)式即可计算不同参数下的可测范围。在实验中应根据实际情况合理调节各参数, 尽可能降低图像噪声, 为后期图像处理提供更为可靠的图像数据。通过比较衍射极限光斑理论值 d_s 与几何成像尺寸 $M_0 d_p$, 即可判别设置的参数是否处于所提方法的适用范围。实验参数的调节对测量精度有着一定的影响, 这在图像存在高噪声时尤为明显。同时, 图像的量化过程也会产生些许的误差, 降低检测结果的准确性。

所涉及的参数中只有 Δy_0 、 Δz_0 及 N_{im} 存在测量误差。实际测量时只要规范实验操作便很容易减小测量产生的误差。同时在计算单位面积粒子图像曝光量时并不涉及量纲转换, 直接代入数值计算公式即可, 而曝光量与粒径的三次方成正比, 二者数量级相差较大, 因此标定所产生的微小误差对粒径分析造成的影响可以忽略不计。

实验中误差产生的原因分析如下。

1) (19)式中所求 n 值的准确程度, 即光能量在

CCD 传感器上占据实际区域的大小。

2) 各类光噪声、电噪声及随机噪声的影响。其中由亮度增益 N 的改变带来的图像背景噪声是各类噪声中影响最为直接且最严重的。

3) 理论公式推导时提出的假设近似。如对单位面积的粒子图像曝光量公式推导时采取了对激光能量分布进行理论处理的方式等。

5 结 论

传统 PTV 技术的粒径分析方法是通过简单的几何成像方式进行粒径分析的, 因此对几何成像尺寸远远小于衍射成像尺寸的微纳米级示踪粒子无法进行准确的粒径计算。为解决这一问题, 提出了应用 PTV 技术实现对微纳级示踪粒子尺寸测量的方法。在 PTV 测量过程中, 示踪粒子被激光照射, 其散射光被 CCD 相机所接收, 并以灰度值的形式显示在数字图像上。基于数字相机成像流程和示踪粒子衍射成像原理, 建立粒子直径与图像灰度值之间的量化函数, 提出了准确测量微纳级别粒子粒径的方法与计算模型。并对 Z -average 为 465.8 nm 的微纳级 SiO₂ 示踪粒子图像进行处理分析, 将粒子尺寸的实际分布情况与所提方法所得的结果进行比对, 一致性较好, 验证了所提方法的准确性。通过所提方法可以确定几何成像尺寸远远小于衍射成像尺寸的微纳级粒子的粒径与灰度值之间的映射关系, 完善了 PTV 技术在粒径检测方面的不足, 同时也对 CCD 成像过程的分析提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Liu H L, Yoon S, Li M Z. Three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) study of the gas-particle circulation pattern within a fluidized bed granulator: by full factorial design of fluidization velocity and particle size [J]. *Drying Technology*, 2017, 35(9): 1043-1058.
- [2] Suranani S, Goli V R. Fuel particle size effect on performance of fluidized bed combustor firing ground nutshells [J]. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2012, 3(2): 147-151.
- [3] Choi Y S, Seo K W, Sohn M H, et al. Advances in digital holographic micro-PTV for analyzing microscale flows [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(1): 39-45.
- [4] Li D X, Qu Z S, Yu M Z, et al. Principle and application of particle tracer velocity measurement technology [M]. Beijing: Science Press, 2012: 171-

224.
李丹勋, 曲兆松, 禹明忠, 等. 粒子示踪测速技术原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 171-224.
- [5] Hain R, Kähler C J. Fundamentals of multiframe particle image velocimetry (PIV)[J]. *Experiments in Fluids*, 2007, 42(4): 575-587.
- [6] Hain R, Kähler C J, Tropea C. Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras[J]. *Experiments in Fluids*, 2007, 42(3): 403-411.
- [7] Prasad A K, Adrian R J, Landreth C C, et al. Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation[J]. *Experiments in Fluids*, 1992, 13(2/3): 105-116.
- [8] Adrian R J. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(11): 1690-1691.
- [9] Adrian R J, Yao C S. Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and the scattering power of seed materials [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(1): 44-52.
- [10] Huang X Q, Lepiller V, Bailly Y, et al. Particle sizing and velocity measurement of microspheres from the analysis of polarization of the scattered light[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(1): 57-63.
- [11] Song L P, Elson D S. Effect of signal intensity and camera quantization on laser speckle contrast analysis [J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(1): 89-104.
- [12] Chen Q G, Chen H, Zhong Q, et al. Principle and practice of high frequency particle image velocity measurement system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 20-72.
陈启刚, 陈槐, 钟强, 等. 高频粒子图像测速系统原理与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 20-72.
- [13] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23(1): 261-304.
- [14] Kato F, Shimizu I. Optical processing of particle tracking velocimetry under deformed double exposure[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(6): 646-654.
- [15] Yonemoto K. CCD/CMOS image sensor basics and applications[M]. Chen R T, Peng M G, Transl. Beijing: Science Press, 2006: 13-72.
米本和也. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用 [M]. 陈榕庭, 彭美桂, 译. 北京: 科学出版社, 2006: 13-72.
- [16] Adrian R J. Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry [J]. *Measurement Science and Technology*, 1997, 8(12): 1393-1398.
- [17] Chen Z, Qiu Y H, Wen Y, et al. Noise model and simulation analysis of the low noise pre-amplifier of CCD camera[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9142: 91420M.
- [18] Xue X C, Zhang S Y, Li H F, et al. Design of high-speed low-noise pre-amplifier for CCD camera [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7658: 76584O.
- [19] Han C Q, Tao Y Z. Measurement technology for responsivity of scientific grade CCD cameras [J]. *OME Information*, 2009, 26(7): 32-34.
韩采芹, 陶跃珍. 科学级 CCD 相机的响应度测试研究[J]. *光机电信息*, 2009, 26(7): 32-34.
- [20] Holst G C. CCD arrays, cameras, and displays[M]. Bellingham: SPIE, 1998: 78-119.
- [21] Wang T. Research on particle image velocity measurement based on PIV/PTV hybrid algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017: 20-25.
王甜. 基于 PIV/PTV 混合算法的粒子图像测速技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 20-25.