

文章编号: 0258-7025(2009)08-2089-05

粒子场全息中的定标方法分析及改进

曹娜¹ 曹亮¹ 徐青¹ 崔广斌¹ 薛军² 马继明¹ 张占宏¹

(¹西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

(²西安武警学院物理系, 陕西 西安 710012)

摘要 在粒子场的定量分析中,通常采用外加标准丝作为粒子尺寸测量的定标尺度。为了解一定景深范围内存在的标准丝再现像实验测量结果的影响,从理论和实验上详细分析了标准丝再现像在不同位置处的强度分布及变化,指出了常规定标方法对粒子场图像数据所带来的影响,同时提出了一种新的定标方法——非实时定标方法。实验结果表明,非实时定标方法在保持空间定位精度的基础上,测量得到的标准粒子尺寸的不确定在 4% 左右。该方法有效地解决了标准丝再现像对粒子尺度测量精度影响问题,可以用于粒子场实际测量工作中。

关键词 全息; 定标; 非实时定标; 粒子场图像; 标准丝

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2089

Analyses and Improvement of Scaling Method in Particle Field Holography

Cao Na¹ Cao Liang¹ Xu Qing¹ Cui Guangbing¹ Xue Jun²

Ma Jiming¹ Zhang Zhanhong¹

(¹Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

(²Physics Department, Xi'an Armed Police Force Academy, Xi'an, Shaanxi 710012, China)

Abstract For quantitative analysis in the particle field, a standard wire is generally used as the scaler for measuring the particle size. In order to understand the effect of the reconstructed wire with a certain depth of field on the experimental results, detail analysis of the intensity distribution and variation of the reconstructed wire at different positions are performed by theory and experiments. The influences of the normal scaling method on the particle image data are pointed out and a new scaling method, the non-in-time scaling manner, is given. Experiment results show that, the uncertainty of the particles size measurement is about 4% by keeping the precision of particle location. This new method can effectively solve the problem, which affects the precision of the particle size measurement. It can be used in practical measurements.

Key words holography; scaling; non-in-time scaling; reconstruct particle image; standard wire

1 引 言

同轴粒子场全息技术是目前对不同过程中产生的快速运动颗粒,如爆炸微喷射流、高速冲击颗粒、雾化颗粒、水中气泡等产物的尺寸、三维空间分布、速度分布进行定量分析的最有效的测试方法,在科学与工业及军事研究中有广泛的应用^[1~9]。由于被测试颗粒的尺度在微米量级,依靠系统参数如放大倍数、像素数、像素大小等来计算粒子的大小存在许多不确定性,因此,目前比较通用的方法是在被测

试区域内放置尺寸预知的标准丝,与被测试颗粒同时进行全息记录、再现采集和图像分析^[10~12]。但是,由于标准丝的再现像在离开其清晰的成像面后依然存在一定范围的强度分布,增加了其附近区域的背景噪声,给小粒子的识别带来一定的不确定性,甚至会湮没小粒子信息。本文就标准丝的存在对粒子的判读带来的影响进行理论分析和实验研究,并提出了一种新的定标方法来避免标准丝的影响。

收稿日期: 2008-06-20; 收到修改稿日期: 2008-09-24

作者简介: 曹娜(1969—),女,副研究员,主要从事脉冲全息诊断技术应用方面的研究。E-mail: cnt96@yahoo.com。

2 理论分析

在粒子场全息的同轴远场记录方式中,假定用于记录与再现过程的平行光波长相同,记录系统无

$$\begin{aligned} \psi(\mu, \nu) = & -i\lambda z_0 - i\Gamma\lambda z_0 A^*(\mu, \nu) + \frac{\Gamma}{2} \exp\left(-\frac{\pi i R^2}{2\lambda z_0}\right) \times \iint A^*(\xi, \eta) \exp\left[\frac{\pi i}{\lambda z_0}(\mu\xi + \nu\eta)\right] d\xi d\eta + \\ & \frac{i\Gamma}{\lambda z_0} \left| \iint A(\xi, \eta) \exp\left[\frac{2\pi i}{\lambda z_0}(\mu\xi + \nu\eta)\right] d\xi d\eta \right|^2, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, λ 为记录与再现光波长, z_0 为记录过程中被测对象距全息干板的距离, Γ 为无量纲量, 与全息干板的曝光量有关, 可表示为

$$\Gamma = K(B/m_0)^2 / [\tau_b - K(B/m_0)^2], \quad (2)$$

其中, K 为常数, τ_b 是干板曝光曲线 $\tau - E$ 的直线部分与 τ 轴的截距, B 为描述物光复振幅的常数, m_0 表示记录过程中的放大倍数, 这里取 $m_0 = 1$, 再现光场的强度分布可由 $I = \Psi\Psi^*$ 求得。

再现得到的粒子像沿光轴方向存在一定的景深, 当沿着光轴方向运动进行采集时, 粒子再现像的强度发生变化, 其分布与再现粒子偏离其成像平面的距离 Δz 有关, 表达式为^[2]

$$\begin{aligned} I(R) \propto & 1 + \left(\frac{\Gamma Z_c}{\lambda z_0 \Delta z}\right)^2 \tilde{A}_0^2\left(-\frac{\mu}{\lambda \Delta z}, -\frac{\nu}{\lambda \Delta z}\right) - \\ & \frac{2\Gamma Z_c}{\lambda z_0 \Delta z} \sin\left(\frac{\pi R^2}{\lambda \Delta z} - \phi\right) \tilde{A}_0, \end{aligned} \quad (3)$$

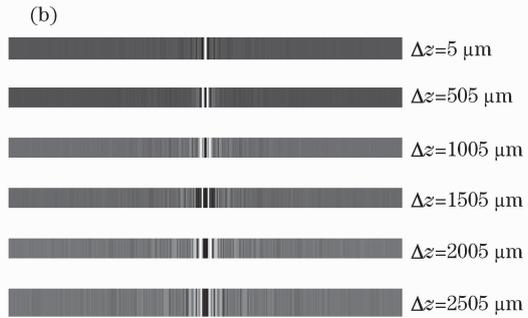
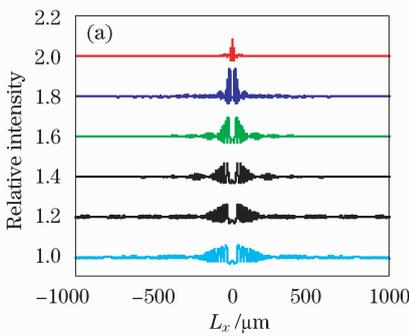


图 1 (a) 直径为 $5 \mu\text{m}$ 的标准丝再现像强度分布与像平面上金属丝的成像范围 L_x 的关系; (b) 相应的金属丝像强度分布灰度图

Fig. 1 Relations of the intensity distribution of the reconstructed wire with diameter of $5 \mu\text{m}$ for the image range L_x (a) and the gray distribution of the wire (b)

由图 1 的模拟结果可知, 随着标准丝再现像偏离其成像面距离 Δz 的增加, 再现像由边缘清晰、对比度高的标准丝像逐渐演变成带衍射条纹的衍射像, 中心强度降低, 边缘模糊, 宽度增加, 无法反映丝的精确尺寸。对于直径 $10 \mu\text{m}$ 的标准丝, 在偏离其像面位置 2.5 mm 处, 其衍射像的强度依然较高。如果有其他被测粒子处于这一区域范围内, 受其

放大, 则对于分布为 $A(\xi, \eta)$ 的被测试物体, 其像面处再现光场的分布为^[2]

式中 Z_c 为再现像平面距全息干板的距离, \tilde{A}_0 为傅里叶变换 \tilde{A} 的实振幅部分, ϕ 为 \tilde{A} 的相位部分。对于直径为 $2a$ 的长标准丝, 有

$$\tilde{A}_0\left(-\frac{\mu}{\lambda \Delta z}\right) = 2a \left[\frac{\sin(2\pi a L_x / \lambda \Delta z)}{2\pi a L_x / \lambda \Delta z} \right], \quad (4)$$

式中 L_x 表示像平面上标准丝的成像范围, 推算得到标准丝再现像强度分布与 Δz 的关系为

$$\begin{aligned} I(L_x) \propto & 1 + \frac{\Gamma^2}{\lambda \Delta z} \cdot 4a^2 \left[\frac{\sin(2\pi a L_x / \lambda \Delta z)}{2\pi a L_x / \lambda \Delta z} \right] - \\ & \Gamma \cdot \left(\frac{1}{\lambda \Delta z}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot 4a \left[\frac{\sin(2\pi a L_x / \lambda \Delta z)}{2\pi a L_x / \lambda \Delta z} \right] \cdot \\ & \exp\left[i\left(\frac{\pi L_x^2}{\lambda \Delta z} - \frac{\pi}{4}\right)\right]. \end{aligned} \quad (5)$$

根据(5)式, 计算了直径为 $5 \mu\text{m}$ 的标准丝在不同 Δz 的情况下的相对强度分布图如图 1 所示。

影响, 粒子再现像边缘的清晰度下降。所幸在垂直于光轴的横向空间内标准丝衍射像影响的区域非常有限, 宽度不到 1 mm 。随着标准丝直径的增加, 相同再现位置处衍射像的强度增加, 横向空间受影响的范围将略有扩展。标准丝尺度变化对粒子再现像的影响, 比较明显地表现在沿光轴方向上, 如图 2 所示。不同直径的标准丝, 其再现像最大强度随 Δz

的增加而迅速衰减,标准丝直径越大,沿光轴方向的衰减长度越长,但斜率基本一致。表明不同尺度的物体,其全息再现像在一定深度范围内始终存在,由清晰到模糊,最后溶于背景中,这一范围称作像深度,物体尺度越大,像深度越大。对粒子场测量而言,标准丝的像深度对其深度范围内的粒子识别带来困难,甚至会湮没直径较小的粒子,从而带来小粒子识别的不确定度,因此,需要在实际测量中尽量减少或者避免标准丝的影响。然而,对被识别颗粒而言,有研究表明^[13],一定的像深度可用于粒子的自动识别。

3 实 验

为验证理论模拟结果,实验上对标准丝进行了全息记录和再现。实验中采用 532 nm 的连续激光光源进行全息记录,标准丝采用两种形式,一种为刻划在标准粒子板上的十字线,直径为 10 μm ;一种为实验中常用的悬挂金属丝,直径为 20.8 μm 。图 3

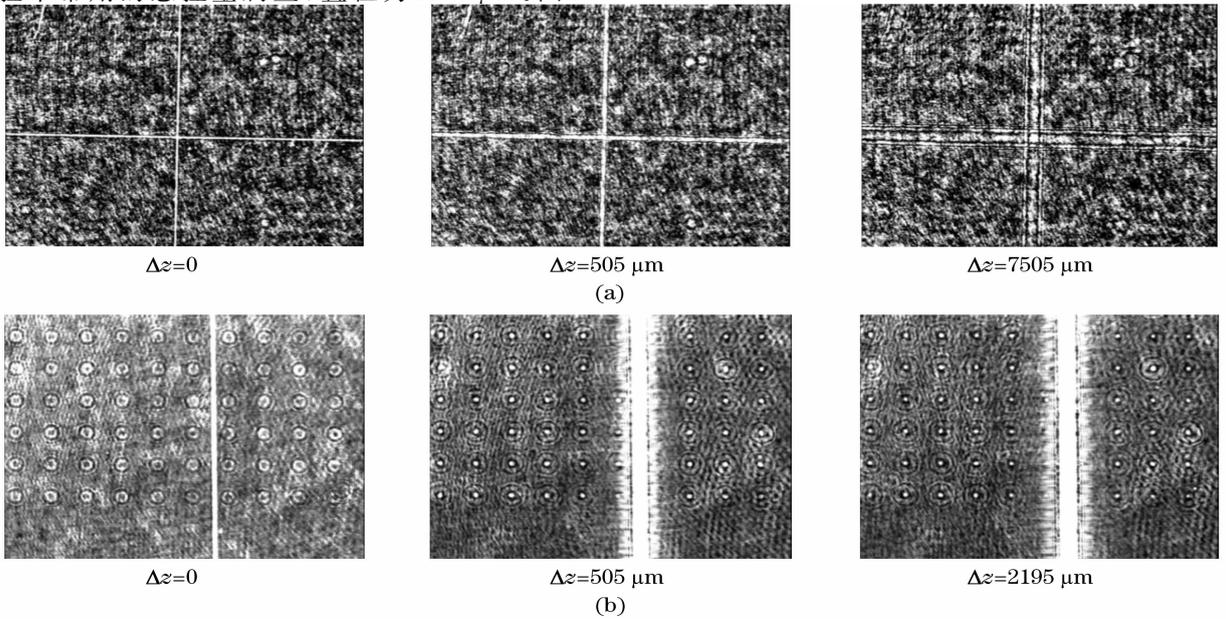


图 3 粒子板直径为 10 μm 标准丝(a)及 20.8 μm 悬挂标准金属丝(b)在不同偏移距离的再现像
Fig. 3 Reconstructed images of 10- μm wire(a) and a 20.8- μm hanged wire(b) at different Δz

从理论模拟和实验结果可以看出,标准丝的存在给其所处区域附近的被测试粒子的识别和计数带来困难,从而降低了最终的测试数据精度,那么,如何在保证粒子尺度定标和空间位置定标的基础上,减少或避免标准丝所带来的影响呢?一种方法是将金属丝尽量悬挂在视场的边缘,减少其对中心测试区域的影响。这种方法对于定位喷射及展宽角度较小的测试对象比较合适,但对于测试颗粒较密集,且分布区域较大的诊断对象效果并不理想。这里提出

中,(a)给出的是标准粒子板十字线在不同偏移距离的再现像,(b)给出的是悬挂金属丝在不同偏移距离的再现像,从图中可以看出,随着标准丝直径的增加,其衍射像所影响的深度和广度范围增加,对其附近区域粒子识别的影响越显著。

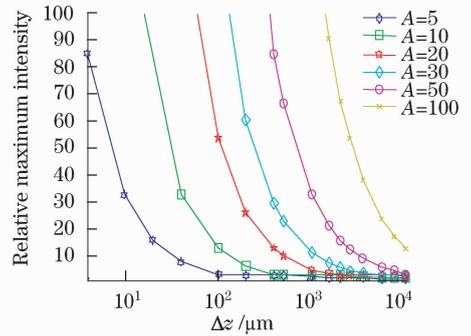


图 2 不同直径标准丝再现像最大强度与像面偏离距离 Δz 的关系曲线($A=2a \mu\text{m}$)
Fig. 2 Curves of the maximum intensity of different diameter wires changing with Δz ($A=2a \mu\text{m}$)

一种新的定标方法——非实时定标法,即在同样实验条件下,对包含和不包含金属丝两种情况下得到的全息再现像进行比对,给出粒子尺度和空间位置标尺。由于测试对象所在的全息图中不包含标准丝,因此有效地避免了标准丝引起的数据不确定度。该方法所采用的实验光路如图 4 所示。

在被测试区域前工作面固定位置处悬挂标准丝,在其成像位置处进行全息记录,标准丝的位置即为被测试区域的空间定标位置。保持实验构型不

变,取下标准丝及干板,将另外一块干板置于干板盒中进行被测试对象的全息记录。再现时,首先将标准丝全息图置于再现光路中,使丝像清晰地成在 CCD 灵敏面上,同时读出丝所占像素数。随后,将

测试对象全息图换上,即可根据记录时的实验构型来确定测试对象的空间位置,粒子的大小则根据其所占像素数与标准丝比对获得。图 5 给出了非实时定标的部分实验结果。

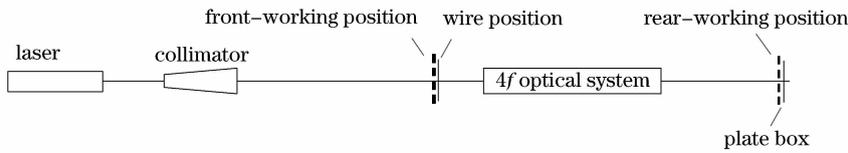


图 4 非实时定标方法实验光路图

Fig. 4 Experimental scheme of the non-in-time scaling method

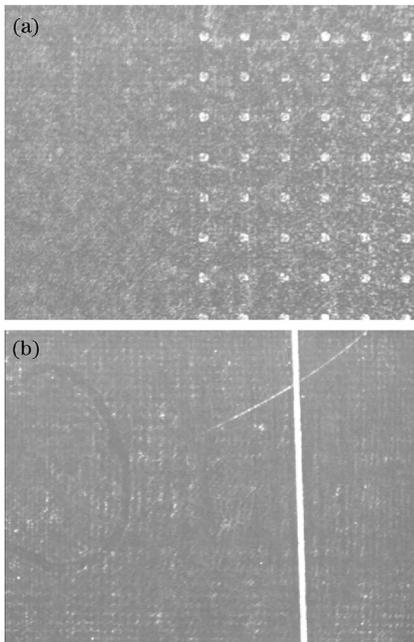


图 5 相同位置处粒子及标准丝的全息再现像。(a) 粒子像;
(b) 标准丝像

Fig. 5 Reconstructed image of 20- μm particles and standard wire. particle image (a); wire image (b)

图 5(a)为直径 20 μm 的标准粒子的全息再现像,图 5(b)为直径 20.8 μm 标准丝的全息再现像,二者的记录位置相同。无标准丝时,各处的粒子再现像清晰可见。通过比较图 5 中标准丝所占的像素数和粒子所占像素数,得到标准粒子的直径为 20.8 μm ,其测量不确定度为 4%,这种尺寸上的偏差是由于粒子和标准丝在 CCD 灵敏面上所占的像素数为非整数引起的,这一不确定度在任何定标方法中都始终存在。

4 结 论

从理论和实验结果可知,标准丝的存在引起了诊断系统的测量不确定度,随着标准丝直径的增加,其再现像的像深随之增加,在其附近区域被遮挡的

粒子信息则越多,极大地影响了测量精确度,因此,在实际测量中需要尽量减小标准丝直径。但是,受采集系统中 CCD 分辨率的限制,如果标准丝直径太小,则其再现像在 CCD 灵敏面上占据的像素数过少,同样会增加粒子尺度测量的误差。综合考虑二者的影响,如果必须使用标准丝,则以标准丝再现像直径为 CCD 分辨尺寸的 3~5 倍较为合适。而对于非实时定标方法,由于被测试颗粒全息片中不包含标准丝,其再现像对测试颗粒识别的影响则完全被消除,所需考虑的只是由于丝像与粒子像不在同一张全息片上所带来的空间定位的精度问题。然而,实验数据表明,在非实时定标方法中,空间定位精度的变化仅取决于记录过程中两张全息干板和再现时两张全息图复位时的机械定位精度,在目前的机械加工水平下,微米量级的复位精度是能够做到的,而微米量级的定位偏差对于实际实验中的空间要求是可忽略的。

参 考 文 献

- 1 Yamakawa Masahisa, Kamikawa Masahiro, Yoshizaki Takuo *et al.*. Measurement of droplet distribution of a D. I. gasoline spray with pulsed laser holography [J]. *Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan*, 2001, **32**(4): 45~50
- 2 Chandras Vikram. Particle Field Holography [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 18~27
- 3 J. Thompson Brain. Holographic methods for particle sizing and velocity measurement—recent advances [C]. *SPIE*, 1989, **1136**: 308~326
- 4 D. Tronlinger James. Particle field holography [J]. *Opt. Eng.*, 1975, **14**(5): 383~392
- 5 Vossing Hermann-Joset, Borrmann Stephan, Jaenicke Reprecht. In-line holography of cloud volumes applied to the measurement of raindrops and snowflakes [J]. *Atmospheric Research*, 1998, **49**: 199~212
- 6 D. S. Sorenson, R. W. Minich, J. L. Romero *et al.*. Ejecta particle sizing distributions for shocked loaded Sn and Al metals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(10): 5830~5836
- 7 F. M. Coimbra Carlos, H. Rangel Roger, D. Trolinger James. The Science Behind SHIVA: Spaceflight Holography Investigation in a Virtual Apparatus [R]. 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reston, VA, American Institute of

- Aeronautics and Astronautics*, 2001;1~17
- 8 G. J. An, B. Hansche, C. Konrad *et al.*. Pulsed holography for hypervelocity impact diagnostics[J]. *Int J. Engng*, 1993, **14**(1):13~24
- 9 J. J. Nebrensky, G. Craig, P. R. Hobson *et al.*. A data extraction system for underwater particle holography[C]. *SPIE*, 2000, **4076**:120~129
- 10 Luo Zhenxiong, Zhong Jie, Liu Zhenqing *et al.*. Micro-jet particle field measurement using in-line frauhofer holography[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(1):45~47
罗振雄, 钟 杰, 刘振清 等, 微射流粒子场的 Frauhofe 同轴全息测试[J]. *激光技术*, 2004, **28**(1):45~47
- 11 M. C. Millan Charles, Whipkey Richard. Holographic measurement of ejecta from shocked metal surfaces[C]. *SPIE*, 1988, **1032**:553-557
- 12 D. S. Sorenson, A. Obst, N. S. P. King *et al.*. In-line particle field holography at Pegasus[C]. *Proceedings of the 10th IEEE Pulsed Power Conference*, 1995, **2**(2):1024~1029
- 13 Chandras S. Vikram, M. L. Billet. On the problem of automated analysis of particle[J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 1984, **33**(3):149~154