

基于综合灰度梯度法的数字全息焦平面定位研究

李光勇 黄亮 唐丽丽 杨岩

(重庆理工大学汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室, 重庆 400054)

摘要 针对数字全息中目标焦平面的精确定位问题,在对边缘灰度梯度法进行补充的基础上,提出了全局灰度梯度法,进而结合上述两种方法得到了综合灰度梯度法。利用模拟粒子数字全息图进行了大量的实验研究对比,讨论了边缘灰度法和全局灰度法各自的最佳适用范围。前者适用于大尺寸粒子和近距离情况,而后者在小尺寸粒子和大物距的情况下会得到比较好的焦平面位置。将综合灰度梯度法具体应用于不同条件下的标准粒子靶面目标,结果均能有效地获得不同粒子的高精度焦平面位置。

关键词 数字全息术;焦平面;综合灰度梯度法;粒子;模拟全息图

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.110901

Determination of Focal Plane in Digital Holography Based on Integrated Gray-Level Gradient Method

Li Guangyong Huang Liang Tang Lili Yang Yan

(Key Laboratory of Automobile Parts and Test Technique, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing, 400054, China)

Abstract To accurately locate the focal plane of object in digital holography, the overall sharpness (OS) method, which is the supplement of the edge-sharpness (ES) method, is presented. By combining above methods, the integrated gray-level gradient method is obtained. The criterion with ES is confirmed to be appropriate for large particles or small object distance. In contrast, the criterion with OS is determined to be appropriate for small particles or large object distance. The conditions of above criteria are discussed by using numerical simulation holograms of particles. At last, the integrated gray-level gradient method is applied to the real holograms of dot array target and calibration target. The experimental results demonstrate that this method can effectively extract the focal plane of particle.

Key words digital holography; focal plane; integrated gray-level gradient method; particle; simulation hologram

OCIS codes 090.1995; 090.2645; 350.4990

1 引言

20世纪60年代,Goodman等^[1]提出了数字全息术。该技术作为一种三维图像采集技术,能够实时捕获各种场的三维空间信息。基于图像采集装置,全息技术分为传统光学全息和数字全息两种,相比于利用胶片的数字全息,数字全息不需要化学处理过程,直接利用CCD采集图像。根据不同的光路结构,全息术还可以分为同轴和离轴两类^[2]。同轴全息由于实验装置简单,抗干扰性强,被广泛地应用于各种工程实际测量中^[3~5]。

如何精确地对目标焦平面进行定位是数字全息技术中的一个关键问题,尤其在用于各种流场测定的粒子全息技术中更为重要。Ichenko等^[6]利用梯度准则作为粒子判焦的依据;Dubois等^[7]提出了综合振幅系数评定法;刘长庚等^[8]提出了导数对焦判据函数;Kim等^[9,10]利用维格纳分布定位焦平面;Yang等^[11]阐述了相关系数法在数字全息中的应用;Kob等^[12]提出了梯度准则;而Kim等^[13]则利用归一化比值法来检测粒子焦平面的位置。

收稿日期: 2011-05-12; **收到修改稿日期**: 2011-05-30; **网络出版日期**: 2011-08-27

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC, 2010BB2087), (EC, KJ110822)和重庆理工大学科研启动基金(2009zd29)资助课题。

作者简介: 李光勇(1985—),男,硕士研究生,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: lgyzimu@163.com

导师简介: 杨岩(1975—),男,博士,教授,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: yangyan@cqut.edu.cn(通信联系人)

本文提出了综合灰度梯度法,它是在传统的边缘灰度梯度法(ES)基础上补充了全局灰度梯度法(OS)得到的。通过对模拟全息图的分析得到了边缘灰度梯度法和全局灰度梯度法各自适用的范围,进而得到了综合灰度梯度法的具体应用细则。最后将该方法应用于标准靶面全息图,得到了各种不同尺寸粒子在不同条件下的高精度焦平面位置,验证了该方法的可靠性和广泛适用性。

2 同轴数字全息术基本原理

同轴数字全息的光路原理如图 1 所示。激光通过扩束器形成平面波,该平面波穿过粒子场后投射到 CCD 表面,被粒子散射的光可看作物光,未被散射的直透光可看作参考光,CCD 记录得到全息图。数字全息图能在计算机中实现光学再现过程。该过程可以用菲涅耳-基尔霍夫积分公式表示为^[14]

$$R(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp[-i(2\pi/\lambda) \sqrt{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2 + d^2}]}{\sqrt{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2 + d^2}} dx dy, \quad (1)$$

式中 $R(\xi', \eta')$ 和 $E_R(x, y)$ 分别为再现光光场的复振幅分布和参考光光场的复振幅分布, $h(x, y)$ 为全息图, d 为目标到 CCD 的距离, λ 为波长。

重建图像 $R(\xi', \eta')$ 可以用菲涅耳方法或者卷积法计算得到^[14]。由于卷积法所得到的再现图的分辨率要比菲涅耳方法高^[11], 因此本文采用卷积法对全息图进行数值重建

$$R(\xi', \eta') = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}[h(x, y)] \mathcal{F} \left[\frac{i}{\lambda} \frac{\exp[-i(2\pi/\lambda) \sqrt{d^2 + (x - \xi')^2 + (y - \eta')^2}]}{\sqrt{d^2 + (x - \xi')^2 + (y - \eta')^2}} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $\mathcal{F}\{\}$ 和 $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ 分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换。由于参考光 $E_R(x, y)$ 为平面光, 可以用常数 1 替代。

对(2)式直接逆用,即用 $h(\xi', \eta')$ 和物平面的复振幅透射函数 $O(x, y)$ 分别代替(1)式中的 $R(\xi', \eta')$ 和 $h(x, y)$ 便可得到数字模拟全息图^[15]。模拟全息图由于没有噪声,并且已知精确物距,所以被广泛应用于验证各种数字全息理论和算法。文献[15]中介绍了两种同轴全息图的数字模拟方法,即菲涅耳方法和卷积法。在菲涅耳数字模拟方法中,必须满足取样条件^[16]

$$\frac{L_0}{N} \leq \frac{\lambda \sqrt{d'^2 + 2L_0^2}}{2L_0}, \quad (3)$$

式中 L_0 为实际计算区域, d' 为衍射距离, N 为取样数。从(3)式可以看出,当衍射距离较小时,取样间隔将是光波长的数量级。由于实际计算区域远大于波长,按照这个条件,庞大的取样数将使严格的计算无法进行。而相较菲涅耳方法,卷积法能够得到高分辨率的全息图,并且图像的质量和尺寸不会随着物距的变化而发生改变,因此本文中利用卷积法数字模拟粒子全息图来讨论综合灰度梯度法的具体应用细则。

3 综合灰度梯度法原理

3.1 边缘灰度梯度法

如图 2 所示,当粒子的重建位置离聚焦位置越远时,其边缘的清晰度将会越低。因此粒子再现图的聚焦程度可以用粒子边缘灰度梯度来进行描述^[6]。首先用自适应阈值法尽可能精确地获得粒子的二值图,通过扫描技术,很容易检测到粒子的边缘。图 3 显示了粒子再现图的二值图像边缘结构,而边缘灰度梯度 S_E 可定义为

$$S_E = \frac{1}{N_1} \sum_i^{N_1} F_{1i}(x, y) - \frac{1}{N_2} \sum_i^{N_2} F_{2i}(x, y), \quad (4)$$

式中 N_1 和 N_2 分别为背景靠近粒子边界区域和粒子边界区域的像素数,而 $F_{1i}(x, y)$ 和 $F_{2i}(x, y)$ 为相应区域

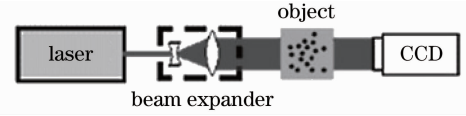


图 1 同轴数字全息的光路原理

Fig. 1 Principle of in-line digital holography

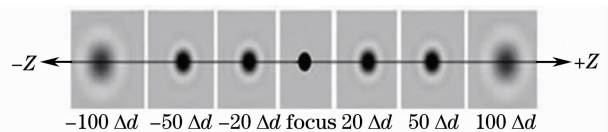


图 2 粒子全息图在不同位置重建像

Fig. 2 Reconstruction images of particle hologram at different distances

的像素点灰度值。

基于不同尺寸粒子处于不同物距下的模拟全息图,得到粒子重建像的边缘灰度梯度随物距变化的曲线如图4所示,聚焦误差如表1所示。结合表1从图4(a)中可以看出,粒子尺寸越小其边缘灰度梯度曲线的峰值越不明显,且聚焦误差越大。同理从图4(b)中可以看出,物距越大其边缘灰度梯度曲线的峰值也越不明显,且聚焦误差也越大。通过分析图4和表1可知,大尺寸和小物距情况下边缘灰度梯度法能够精确地获得粒子的焦平面位置。然而对于小尺寸粒子而言,其边缘灰度梯度曲线的峰值并不明显,由于小粒子所包含的图像像素点个数太少,很难精确地提取其边缘,因此边缘灰度梯度法很难满足小粒子焦平面定位要求。同时在物距较大的情况下也很难定位,因为当粒子远离 CCD 时,再现图像中粒子的边缘也会不清晰,也就很难精确地提取粒子边缘,从而影响粒子焦平面的定位精度。

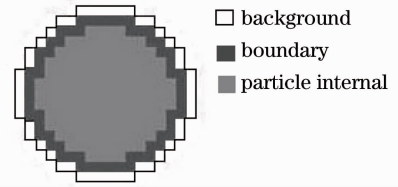


图3 粒子重建图像

Fig. 3 Reconstruction image of particle

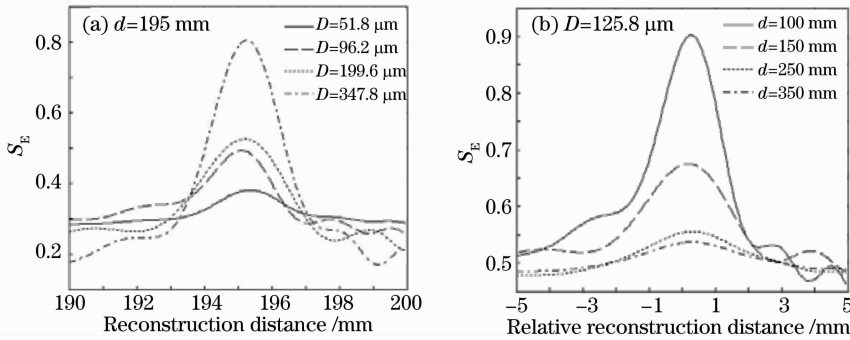


图4 粒子的边缘灰度梯度曲线。(a)不同直径 D 时的梯度曲线;(b)不同物距 d 时的梯度曲线

Fig. 4 Effects of particle diameter D (a) and object distance d (b) on the edge-sharpness S_E

表1 边缘灰度梯度法所确定焦平面位置的误差

Table 1 Errors of focal plane determination using ES

Object distance d /mm	195				100	150	250	350
Particle diameter D / μm	51.8	96.2	199.8	347.8	125.8			
Error /mm	0.089	0.059	0.045	0.063	0.064	0.073	0.079	0.112

3.2 全局灰度梯度法

对于边缘灰度梯度法不能精确定焦的情况,这里介绍全局灰度梯度法来对粒子的焦平面进行定位。首先用自适应阈值法对粒子再现图二值化,用扫描法检测粒子的边缘,然后沿光轴连续重建图像,进而通过求全局灰度梯度的最大值得到焦平面位置。全局灰度梯度 S_0 可定义为

$$S_0 = \frac{1}{N_1} \sum_i^{N_1} F_{1i}(x, y) - \frac{1}{N_2 + N_3} \left[\sum_i^{N_2} F_{2i}(x, y) + \sum_i^{N_3} F_{3i}(x, y) \right], \quad (5)$$

式中 N_1, N_2 和 N_3 分别为背景靠近粒子边界区域、粒子边界区域和中间区域的像素数,而 $F_{1i}(x, y), F_{2i}(x, y)$ 和 $F_{3i}(x, y)$ 分别为相应区域的像素点的灰度值。

同边缘灰度梯度法一样,可以得到各种条件下粒子的全局灰度梯度随物距变化的曲线图,如图5所示,聚焦误差如表2所示。从图5(a)可以看出,粒子尺寸越大其全局灰度梯度曲线的变化趋势越缓慢,且聚焦误差越大,如表2所示。结合表1从图5(a)和表2可以看出,虽然直径为 $125.8 \mu\text{m}$ 的粒子在较近的物距上其全局灰度梯度曲线具有明显的峰值,但其焦平面定位效果并不如边缘灰度梯度法理想。通过分析图5和表2可知,在小尺寸或较大物距情况下全局灰度梯度法能够精确地对粒子的焦平面进行定位。从(5)式可以看出用该方法计算粒子梯度时参与计算的像素数要多得多,基本上包含了粒子的全部特征,因此也就克服了小粒子图像不清晰的缺点。然而对于大尺寸粒子而言,由于粒子直径越大焦深越大,因此粒子的全局灰度梯度变化曲线的峰值并不明显,也就很难找到粒子的焦平面位置。

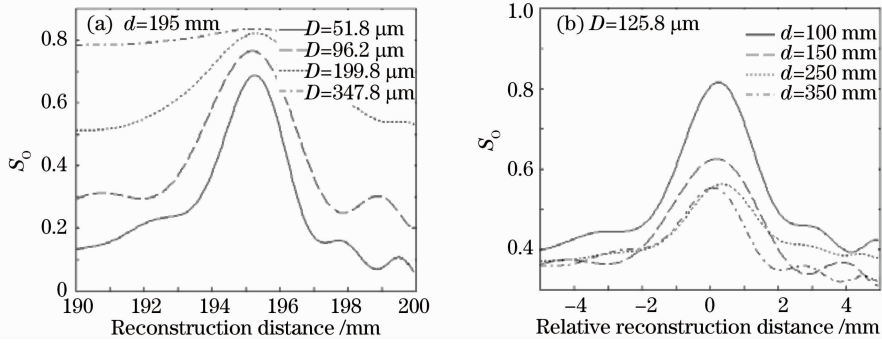
图5 粒子的全局灰度梯度曲线。(a)不同直径 D 时的梯度曲线;(b)不同物距 d 时的梯度曲线Fig. 5 Effects of particle diameter D (a) and object distance d (b) on the overall-sharpness S_0

表2 全局灰度梯度法所确定焦平面位置的误差

Table 2 Errors of focal plane determination using OS

Object distance d /mm	195				100	150	250	350
Particle diameter D / μm	51.8	96.2	199.8	347.8	125.8			
Error /mm	0.089	0.066	0.074	0.081	0.074	0.087	0.114	0.103

综上所述,边缘灰度梯度法和全局灰度梯度法有各自不同的适用范围,对于边缘灰度梯度法而言,在大尺寸粒子和比较小的物距的情况下能够得到比较精确的粒子焦平面位置,而在小尺寸粒子和比较大的物距的情况下更适合用全局灰度梯度法。

3.3 综合灰度梯度法

由于上述两种方法应用范围不同,结合这两种方法提出了综合灰度梯度法。利用模拟全息图,对不同尺寸粒子在不同物距下的情况分别应用两种方法计算焦平面,进而找出两种方法各自的适用区间,最后总结出综合灰度梯度法的适用细则如表3所示,其中 \checkmark 适用于全局灰度梯度法,其他情况适用于边缘灰度梯度法。利用该表,可以很容易地编制程序对不同粒子在不同物距条件下适用的方法进行分配,进而精确地确定粒子焦平面的位置。

表3 综合灰度梯度法的适用区间细则

Table 3 Applicable conditions of the integrated gray-level gradient method

Diameter D / μm	Object distance d /mm												
	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400
7.4	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
37	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
51.8			\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
59.2					\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
66.6						\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
81.4							\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
96.2								\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
125.8										\checkmark	\checkmark	\checkmark	
\downarrow													
347.8													

4 实验分析

4.1 标准靶面目标实验

为了有效地验证综合灰度梯度法,采用如图6所示的标准靶面作为测试目标,它包含了直径12~300 μm 各种不同尺寸的圆点。实验参数为:氦氖激光波长632.8 nm,CCD大小2048 pixel \times 2048 pixel,像素大小为7.4 $\mu\text{m}\times$ 7.4 μm 。在目标的大概区域范围内以一定的步长距离不停地对全息图进行重建,应用二值化和边缘检测的方法,可以得到一系列圆点目标重建像的二值图像。由图2可知,越靠近焦平面位置的目标重建像

二值图像的面积越小,所以可以根据最小面积初步得到近似的目标物距,然后根据表 3 查取该类型圆点适用于综合灰度梯度法中的哪种方法,进而精确确定焦平面位置。上述查询和计算过程通过 Matlab 程序很容易实现。对目标上不同点应用综合灰度梯度法中的不同方法,得到了标准靶面上不同直径圆点的梯度曲线图,如图 7 所示。从图中可以看出这些圆点对应的梯度曲线图都具有明显的峰值,因此能很容易找到粒子的聚焦位置。标准靶面上圆点的平均聚焦位置以及某些圆点的聚焦误差如表 4 所示,从中可以看出综合灰度梯度法能完全满足不同尺寸粒子焦平面定位的要求。对该标准靶面目标单独应用边缘灰度梯度法和全局灰度梯度法,进而与综合灰度梯度法进行对比,结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出,不管是平均误差还是相对误差,综合灰度梯度法的误差值都要比其他两种小。这说明综合灰度梯度法比单独应用边缘灰度梯度法和全局灰度梯度法中的一种定位精度要高。在 197.131 mm 处重建,可以得到清晰的标准靶面再现图,如图 8 所示,从而验证了综合灰度梯度法的广泛适用性和优越性。

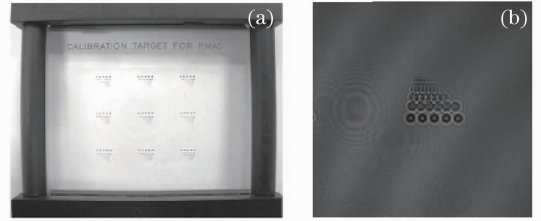


图 6 标准靶面(a)及其全息图(b)

Fig. 6 Calibration target (a) and its hologram (b)

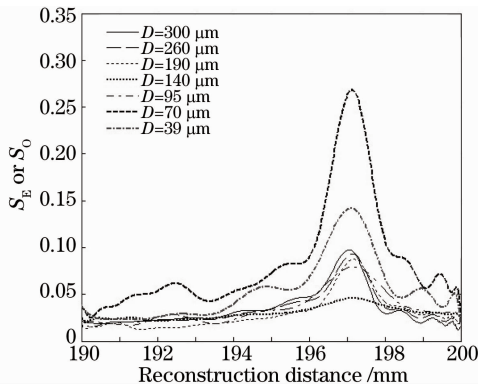


图 7 不同尺寸粒子的梯度曲线

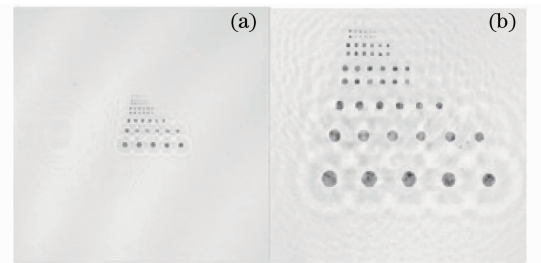
Fig. 7 Curves of particle diameter D on the sharpness S_E or S_O 

图 8 靶面在 197.131 mm 处的再现图(a)及其放大图(b)

Fig. 8 Reconstruction image at 197.131 mm (a) and its magnified image (b)

表 4 不同尺寸粒子的焦平面位置误差

Table 4 Errors of the focal plane determination for different dots

Particle diameter $D / \mu\text{m}$	39	70	95	140	190	260	300
Error /mm	0.031	0.011	0.029	0.029	0.049	0.009	0.071

表 5 标准靶面的焦平面位置及误差

Table 5 Errors of focal plane determination using different methods

Object distance d / mm	Method	Mean of focal plane /mm	Mean error /mm	Stand deviation of error /mm
197.131	ES	197.100	0.068	0.032
	OS	197.157	0.059	0.042
	Integrated	197.131	0.032	0.020

4.2 不同物距实验

考虑到物距对综合灰度梯度法判焦的影响,将标准靶面置于不同的位置进行实验。在三种不同物距情况下对标准靶面进行测试,结果如表 6 所示。从表中可以看出,误差值随着物距的增大而增大,但是误差控制在一定的范围以内。因此,在各种条件下,综合灰度梯度法都能够精确地获得粒子的焦平面位置。

综上所述,结合了边缘灰度梯度法和全局灰度梯度法的长处综合而成的综合灰度梯度法不仅克服了这两种方法定位精度不高和运算速度不快的缺点,而且能够适用于各种不同的条件。因此该方法具有较高的可靠性且能够应用于各种实际测量当中。

表 6 标准靶面在不同物距情况下的焦平面位置及误差

Table 6 Errors of focal plane determination at different object distances

Object distance d /mm	Mean focal plane /mm	Mean error /mm	Stand deviation of error /mm
142.541	142.541	0.014	0.007
183.612	183.612	0.021	0.015
197.131	197.131	0.032	0.020

5 结 论

在对数字全息焦平面精确判定问题的研究中,以传统的边缘灰度梯度法为基础,提出了全局灰度梯度法对其进行补充,进而总结两种方法得到了一种全新的粒子焦平面定位方法即综合灰度梯度法。该方法结合了边缘灰度梯度法和全局灰度梯度法的长处。通过对不同粒子在不同物距条件下的模拟全息图进行分析,得到了边缘灰度梯度法和全局灰度梯度法各自的最佳适用范围,边缘灰度梯度法适用于大尺寸粒子和近距离,全局灰度梯度法适用于小尺寸粒子和大物距的情况,从而得到了综合灰度梯度法的具体适用细则。将该方法应用于标准靶面目标全息图焦平面的判定实验,实验结果表明综合灰度梯度法能够精确地获得粒子的焦平面位置。该方法具有较高的可靠性及广泛适用性。

参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman, R. W. Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(3): 77~79
- 2 C. S. Vikram. Introduction to Holography[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 6~16
- 3 Yang Yan, Boseon Kang. Measurements of the characteristics of spray droplets using in-line digital particle holography[J]. *J. Mechanical Science and Technology*, 2009, **23**(6): 1670~1679
- 4 Lü Qieni, Ge Baozhen, Gao Yan *et al.*. Simultaneous measurement of size and velocity of alcohol spray with digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 266~270
吕且妮, 葛宝臻, 高岩等. 乙醇喷雾场粒子尺寸和速度的数字全息测量[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 266~270
- 5 Lü Qieni, Zhao Chen, Ma Zhibin *et al.*. Digital holography experiment on the measurement of particle size and size distribution of diesel spray[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 779~783
吕且妮, 赵晨, 马志彬等. 柴油喷雾场粒子尺寸和粒度分布的数字全息实验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 779~783
- 6 V. Ichenko, T. Sattlemayer. Depth position detection of the particles in digital holographic particle image velocimetry (DHPIV)[C]. *SPIE*, 2005, **5851**: 123~128
- 7 F. Dubois, C. Schockaert, N. Callens *et al.*. Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 5895~5908
- 8 Liu Changgeng, Wang Dayong, Zhang Yizhu *et al.*. Derivatives-based autofocus algorithms for the digital holographic imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2989~2996
刘长庚, 王大勇, 张亦卓等. 数字全息成像中基于导数的自动对焦算法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2989~2996
- 9 T. Kim, T. C. Poon, G. Indebetouw. Depth detection and image recovery in remote sensing by optical scanning holography[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(6): 1331~1338
- 10 T. Kim, T. C. Poon. Three-dimensional matching by use of phase-only holographic information and the Wigner distribution[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(12): 2520~2528
- 11 Y. Yang, B. S. Kang. Application of digital holography to sprays[C]. Proceedings of Asia Display, 2007. 2050~2054
- 12 Kwang Uoong Kob, Joo Youn, Sang Yong Lee. Determination of in-focus criteria and depth of field in image processing of spray particles[J]. *Atomization and Sprays*, 2001, **11**(4): 317~333
- 13 K. S. Kim, S. S. Kim. Drop sizing and depth-of-field correction in TV imaging[J]. *Atomization and Sprays*, 1994, **4**(1): 65~78
- 14 U. Schnars, W. Jueptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13**(9): R85~R101
- 15 Y. Yang, B. S. Kang. Numerical simulation of in-line digital holograms[C]. Proceedings of Asia Display, 2007. 2055~2059
- 16 Li Junchang, Xiong Bingheng. Tutorial of Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 2011. 58~64
李俊昌, 熊秉衡. 信息光学教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 58~64