

粒子场同轴全息中 $4f$ 光学透镜组与单透镜的区别

刘振清, 罗振雄, 叶雁, 李军, 李作友, 赵宇*

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999

摘要 采用单透镜型的传像系统研究分析了在同轴粒子场全息诊断中 $4f$ 透镜组的特有作用(即 $4f$ 光学透镜组的放大率对每个位置的粒子均为同一常数)是否为 $4f$ 透镜组特有。实验结果表明,在记录面与透镜的位置相对固定的前提下,采用单透镜型光学系统记录的全息图同样可以用平面波进行高精度再现,而且其放大率与记录对象的物距无关。故在粒子场同轴全息诊断中 $4f$ 的上述优势并非 $4f$ 特有,即采用单透镜型成像系统进行粒子场记录时无须使用不同的再现或粒子尺寸标定方法。

关键词 全息; 相干成像; 空间标定

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.020901

Differences Between $4f$ Lenses System and Single Lens in Particle Field In-Line Holography

Liu Zhenqing, Luo Zhenxiong, Ye Yan, Li Jun, Li Zuoyou, Zhao Yu

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China

Abstract We use single-lens imaging system to analyze whether the specific function of $4f$ lenses system in the particle field in-line holographic diagnosis (ie, the magnification of $4f$ lenses system is the same constant for each position of the particles) is unique or not to $4f$ lenses system. The experimental results show that when the positions of the recording surface and the lens are relatively fixed, the hologram recorded by the single-lens optical system can also be precisely reproduced by the plane wave, and its magnification has nothing to do with the object distance of the object. So we can see that the above advantages of $4f$ in particle field in-line holographic diagnosis are not unique to the $4f$. That is to say, we record the particle field by a single-lens imaging system without different reproduction or particle size calibration methods.

Key words holography; coherence imaging; spatial calibration

OCIS codes 090.1970; 110.1650; 000.2190

1 引言

随着 3D 影像技术逐渐进入家用市场,越来越多的人开始关注 3D 影像技术以及全息技术的最新动向^[1-2]。20 世纪 60 年代,激光器的产生极大地推动了全息技术的发展^[3-4],全息技术作为最早的 3D 照相技术之一,在科研及工业等领域发挥了巨大作用^[5-9]。全息照相技术可通过再现过程重现目标的相位,这是

因为全息照相技术具备三维分辨以及高空间分辨等优势。这一优势使全息照相技术在流场、面形以及粒子场的高精度诊断等领域发挥着不可替代的作用^[10-14]。在流场及面形诊断中,由于全息照相可以记录光场相位分布,2 次曝光就会记录 2 个时刻的光场相位分布,在进行再现时将 2 次记录到的相位叠加输出,故再现光场为干涉条纹,反映的是 2 个时刻光场的相位变化^[15-16]。通过对干涉条纹进行分析,可得到

收稿日期: 2017-08-08; **收到修改稿日期:** 2017-08-17

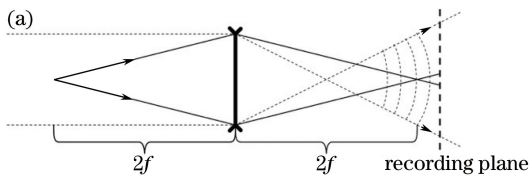
基金项目: 科学挑战专题(TZ2016001)

作者简介: 刘振清(1968—),男,大专,技师,主要从事粒子场全息诊断方面的研究。E-mail: zhenqing_liu@aliyun.com

* **通信联系人.** E-mail: yu_zhao@caep.cn

流场的密度、温度或者表面的形变等数据。在粒子场诊断中,由于粒子具有一定的三维分布,无法在照相时保证所有粒子均同时在焦,但是非在焦粒子的衍射光场会与背景光在记录面上发生干涉,借助再现过程可使大量记录时不在焦的粒子在再现时逐一清晰在焦,因此可实现粒子场的高精度三维诊断^[17-21]。

在进行粒子场三维诊断时,大量文献中均采用了 $4f$ 光学透镜组作为粒子场的传像元件。采用 $4f$ 光学透镜组作为传像元件主要有2个作用:1)满足粒子场记录的远场数条件,以保证可记录到足够的衍射阶数及干涉条纹对比度^[22-23];2) $4f$ 光学透镜组的放大率对于每个位置的粒子均为同一常数,可方便再现及标定粒子尺寸^[24-25]。其实,第1个作用并不仅限于 $4f$ 光学透镜组,可等效为单透镜的透镜组同样具有传像功能,同样可保证具有恰当的远场数。甚至,对于粒子较大、记录面与目标较近的特殊情况,不借助任何传像元件远场数条件也能较好地得以满足。但是,第2个作用往往被认为是 $4f$ 光学透镜组所特有的。



本文主要从实验入手,采用3个实验,研究分析在同轴粒子场全息诊断中“ $4f$ 光学透镜组的放大率对每个位置的粒子均为同一常数”这一特性是否为 $4f$ 特有,实验1用于说明单透镜下粒子场可由平面波再现,后续2个实验通过改变物距,分别研究了不同物距下目标经过全息记录后再现像的横向、纵向放大率受物距的影响。

2 原理

当采用平面波照明时,单透镜及 $4f$ 透镜组的同轴全息记录如图1所示。图1中实线代表目标的衍射,虚线代表背景光。由图1可知,单透镜情况下记录面上实为球面波背景光与目标衍射光场的干涉,而 $4f$ 透镜组情况下记录面上实为平面波背景光与目标衍射光场的干涉。全息技术往往要求再现时的入射光场尽量与记录时的参考光一致,从再现系统的角度考虑,当参考光及再现时的入射光场均为平面波时,这种一致性更易保持。因此,通常认为采用 $4f$ 透镜组作为粒子场传像元件可方便再现。

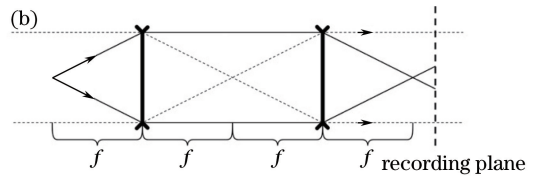


图1 同轴全息记录示意图。(a)单透镜;(b) $4f$ 透镜组

Fig. 1 Sketch map of in-line holography. (a) Single lens; (b) $4f$ lenses system

单透镜与 $4f$ 透镜组的成像公式及放大率公式对比如表1所示^[26],表中 x' 为像与像方焦点的距离, x 为物与物方焦点的距离, f 为单透镜的焦距, f_1 、 f_2 分别为 $4f$ 透镜组的第1片透镜及第2片透镜的焦距, h 为物高, h' 为像高,所有参数均采用文献[26]中的符号约定。由表1可见,对于单透镜,纵、横向放大率均与目标所在位置 x 有关,即不同物距的目标可能具有不同的放大率。然而, $4f$ 透镜组不存在这样的问题,其纵、横向放大率为常数,理论上任何物距的目标均具有相同的放大率。因此,通常认为采用 $4f$ 透镜组可以方便地进行粒子尺寸的标定。

为了确定单透镜在粒子场同轴全息诊断中是否具有上述 $4f$ 透镜组特有作用,本文采用等效单透镜系统进行了粒子场同轴全息诊断实验。本文共开展了3个实验用于分别回答如下3个关键问题:采用单透镜进行粒子场同轴全息记录,再以平面波进行再现能否高精度地再现目标?不同物距下的粒子是否具有不同的横向放大率?不同物距下的粒子是否具有

不同的纵向放大率?实验结果显示,粒子场同轴全息诊断实验中,等效单透镜系统同样具有上述作用。

表1 单透镜与 $4f$ 透镜组的成像公式对比

Table 1 Formula contrast between single lens and $4f$ lenses system

Formula type	Single lens	$4f$ lenses system
Longitudinal imaging formula	$x' = -f^2/x$	$x' = (f_2^2/f_1^2)x$
Transverse imaging formula	$h' = hf/x$	$h' = -hf_2/f_1$
Transverse magnification	f/x	$-f_2/f_1$
Longitudinal magnification	f^2/x^2	f_2^2/f_1^2

3 实验结果

3.1 实验基本情况

实验统一采用了同轴光学全息记录光路,采用同轴是因为其光路非常简单,且在大量实验中广泛使用,采用光学全息是因为诊断场景往往同

时要求高分辨率及大视场,而数字全息受现阶段 CCD 像素数及像元尺寸的限制,无法同时满足这些应用要求。图 2(a)为从目标到记录元件部分的光路示意图,该示意图中背景光在像方形成实焦点,因此明显区别于 $4f$ 透镜成像情况。所示成像透镜组为等效单透镜型,该透镜组物方工作距 300 mm 、像方工作距 370 mm ,系统分辨力优于 $4\text{ }\mu\text{m}$;物方目标如图 2(b)所示,为采用光刻技术

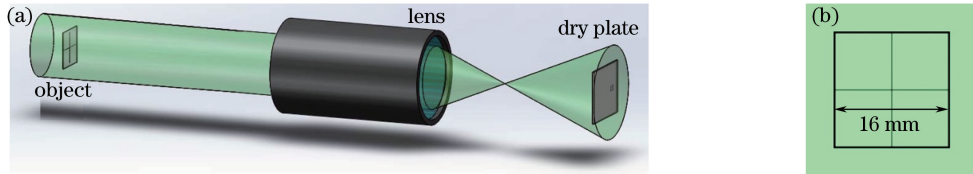


图 2 基于单透镜型光学系统的同轴全息实验。(a)实验示意图;(b)目标示意图

Fig. 2 In-line holography based on single lens mode optical system. (a) Experimental setup; (b) object schematic diagram

3.2 平面波再现实验(实验 1)

由图 1 及图 2(a)所示光路可知,记录面上或全息干板上的干涉条纹实为目标的像的衍射场与球面波的干涉所致。按照全息理论,采用球面波记录后只有采用球面波再现才能抵消衍射光场中的球面相位,若采用平面波再现则会引入球面相位,导致再现目标出现严重像差。为了避免目标直接成像在全息干板上,将目标与透镜组的距离调整为 330 mm ,因此目标的像位于全息干板与透镜组之间;为了能够察觉球面相位引起的细微像差,选择 $6\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子作为目标。

银盐干板的再现结果通常为负片,为了便于人眼观察,将负片形式的再现结果转换为如图 3 所示的正片。由图 3 可知,再现出的 $6\text{ }\mu\text{m}$ 粒子具有较好的对比度,而且肉眼未见明显像差,也未见球面相位可能引入的环状结果。这说明本粒子场同轴全息诊断中,采用单透镜型传像系统进行记录的同时采用平面波进行再现不会出现严重的像差。因此,在后续 2 个实验中,继续将单透镜型传像系统用于记录过程,而采用平面波进行再现。

3.3 不同物距时目标的横向尺寸测量(实验 2)

据表 1 中公式可知,单透镜的横向放大率与物距有关,即从像方进行观察,图 2(b)所示目标在不同物距时的大小是不一样的。但是全息记录并未放置于目标所对应的共轭面,而是放置于某固定位置记录全息图,进行再现须用实验证明再现目标的大小是否会因为物距的变化而变化。为了使再现的目标在横向尺寸上的细微变化可被察觉,重点关注了目标外边框在不同物距条件下再现的长度。为便于说明,采用如图 4 所示的示意图, D 代表目标相对

加工制作的以玻璃板为基底的粒子图案,粒子及边框不透光,粒子位于示意图的 4 个象限中,加工精度优于 $1\text{ }\mu\text{m}$;像方记录元件为 Slavich 生产的全息干板(型号 VRP-M),该干板的感光峰值位于 532 nm 附近,干板分辨率高于 2000 lp/mm 。干板正好放置于距透镜 370 mm 处。本实验中所使用的激光器为 532 nm 波长的单横纵模连续激光器(型号 MGL-FN-532,长春新产业)。

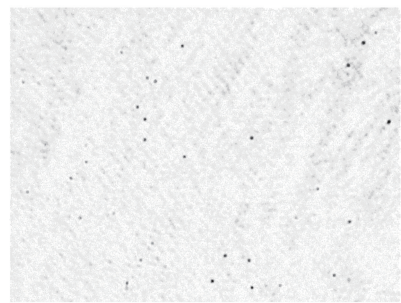


图 3 采用平面波再现得到的图像分布

Fig. 3 Image reconstructed with plane wave

于镜头设计的物面的距离。

将物分别放置于 $D=30\text{ mm}$, $D=-30\text{ mm}$ 时进行全息图记录。其中,当 $D=30\text{ mm}$ 时,目标成像于透镜与干板之间,当 $D=-30\text{ mm}$ 时,目标成像于干板之后。按照几何光学公式,物距变长时目标的像应该小于物距变短时目标的像,即 $D=30\text{ mm}$ 时目标像的尺寸应该小于 $D=-30\text{ mm}$ 时目标像的尺寸。目标的外边框采用本单位研制的全息再现系统进行测量,进行尺寸判读时该再现系统在 x 、 y 方向的测量精度可达 $4\text{ }\mu\text{m}$,而在 z 方向的测量精度可达 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。测量前须先清晰再现出目标,为了保证边框再现效果,以目标中的小粒子是否清晰再现作为简易的判断标准。图 5 为 $D=30\text{ mm}$, $D=-30\text{ mm}$ 时对应全息图某象限中粒子清晰再现后的图像,对比 2 图可知,这 2 种情况的目标再现效果相近,目标清晰,两图相似性较高。图 5 中某些点在(a)图比在(b)图中清晰,这主要是因为该粒子在 2 次再现时分别位于再现激光器散斑噪声中的不同强弱位置。

边框长度的判读主要通过平移全息图和电控平

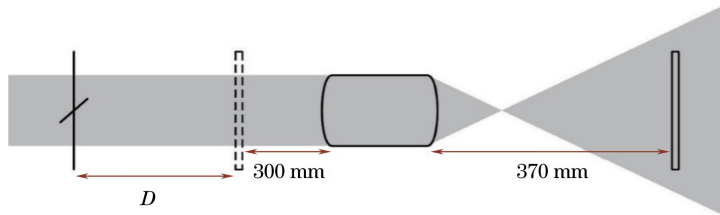
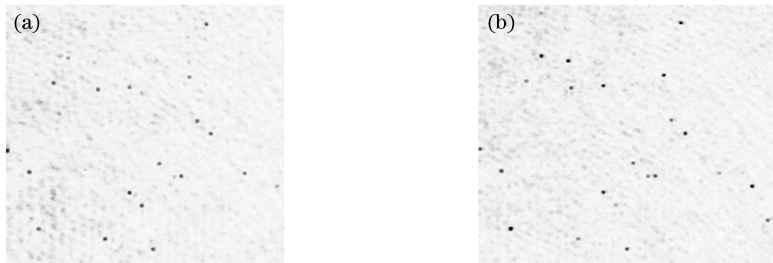


图4 横向放大率分析实验示意图

Fig. 4 Experimental setup of analysis on transverse magnification

图5 不同物距时的清晰再现像。(a) $D=30$ mm; (b) $D=-30$ mmFig. 5 Reconstruction of two holograms at different object distances. (a) $D=30$ mm; (b) $D=-30$ mm

移台示数实现。由于测量长度时须对平移台进行长距离平移,因此将步长设置得较大,根据所使用的步长,边框长度测量的误差在 $\pm 50 \mu\text{m}$ 内。边框长度判读的原始数据如表2所示,在误差允许范围内,边框长度判读结果可视为一致。因此,可认为该实验中由全息干板再现的像的横向尺寸不受物距的影响,即不同物距下的横向放大率是一致的。另外,如果再现后的结果也应该遵循表1所示公式,则 $D=30$ mm时的横向长度应该小于 $D=-30$ mm时的横向长度,而不是表2所示误差允许范围内相等的横向长度,更不应出现相反的情况。

表2 不同物距时目标的横向长度

Table 2 Transverse lengths of object at different object distances

	mm	
Relative object distance	30	-30
Reconstructed frame length	23.0725	23.0000
Real frame length	16	

3.4 不同物距时目标的纵向尺寸测量(实验3)

据表1中公式可知,单透镜的纵向放大率与物

距有关,即从像方进行观察,一定厚度的目标在不同物距的厚度不同。但全息记录往往不放置于目标的共轭面上,而是放置于像方某固定位置,因此多数情况下需要进行再现,再现的目标厚度是否也因物距的变化而变化需要用实验证明。本实验中将2个以玻璃为基底的光刻目标平行放置,且位置相对固定,以2个目标间的空间距离作为整体的纵向尺寸。实验3示意图如图6所示, D 为透镜设计物面与2个图案的中间平面的距离,本实验分别测量不同 D 时2个目标在全息再现光场中的空间距离。

分别将 D 设置在 $-20, -12, 12, 20$ mm 4个位置,以避免某一全息图记录时2个目标分别位于全息干板的两侧,这是因为同轴全息的共轭像问题会导致无法区分目标位于干板的哪一侧。在测量2个目标间距时,须在再现光场中对2个目标分别进行清晰成像,该过程需要对平移台进行平移,并凭肉眼判断是否清晰,根据所使用的电机步长,像方2个目标间距离的判读误差在 ± 0.125 mm内,在误差允许

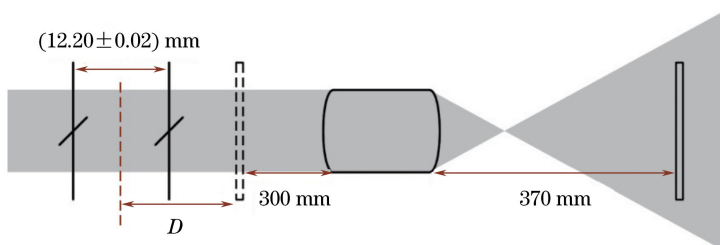


图6 纵向放大率分析实验示意图

Fig. 6 Experimental setup of analysis on longitudinal magnification

的范围内,表3的判读结果是一致的。因此可认为该实验中由全息干板再现的2个目标间的距离不受物距的影响,即不同物距的纵向放大率一致。

表3 不同物距时目标的纵向长度

Relative object distance	-20	-12	12	20
Reconstructed frame length	25.500	25.625	25.375	25.375
Real frame length	12.20±0.02			

4 分析与讨论

本文所述同轴粒子场全息实验均采用了单透镜型的透镜组,因此全息图为目标衍射场与球面波的干涉结果。实验1证明可使用平面波对这种全息图进行再现,且再现出来的目标分辨率(接近该单透镜型透镜组分辨极限)未受到明显的影响。因此后续2个实验依然采用平面波对全息图进行再现。事实上,实验1可以平面波再现是因为关注重点是目标的强度分布,如果还须关注目标的相位分布,则应该用球面波进行再现,这一结论可由全息的一些理论推导得出。实验2证明,在全息干板与单透镜型透镜组的位置相对固定的前提下,再现场中目标的横向尺寸不受物距影响,即表明该情况下的横向放大率与物距无关。实验3证明,在全息干板与单透镜型透镜组的位置相对固定的前提下,再现场中目标的纵向尺寸也不受物距影响,即表明该情况下的纵向放大率也与物距无关。综上所述,3个实验足以证明在粒子场同轴全息诊断中,放大率对每个位置的粒子均为同一常数并非4f透镜组系统所特有。

根据实验2中数据可得出,横向放大率为 $m = 1.4395 \pm 0.0055$ 。根据实验3的结果可得出,纵向放大率范围为 $\bar{m} = 2.090 \pm 0.024$ 。由根据几何光学关于单透镜的横纵放大率的分析结果可知,纵向放大率应为横向放大率的平方,因此可由横向放大率推导出,纵向放大率为 $m^2 = 2.072 \pm 0.016$ 。对比 m^2 与 \bar{m} 可知,在误差允许的范围内,可认为实验测得的横、纵向放大率满足几何光学理论给出的平方关系。

在以单透镜作为传像元件时,同轴全息中有2个主要因素,一是物与透镜的距离,二是干板与透镜的距离。实验证明,平面波再现像相比于原始物的放大率不由目标所处的具体位置决定,只能由干板与透镜的距离决定。因此,同轴全息记录系统中目标的放大率并不是由物体与透镜的距离决定的,而是由记录元件所在位置决定的。

5 结论

实验结果表明,采用单透镜型光学系统进行粒子场同轴全息记录,并采用平面波进行全息图再现时,既不必担心记录光与重建光相位不匹配的问题,也不必担心粒子尺寸标定问题。因为相较于4f透镜组系统,单透镜型不会使再现变得困难,也不会使粒子尺寸标定有异。因此,在没有其他顾虑的情况下,完全可以不加区别地使用单透镜型或4f型光学传像系统。

本文实验均采用了同轴全息方案,这也是目前实际工程应用较为普遍的方案,当采用离轴全息方案后可能会有不一样的结果,关于离轴全息的情况将在后续研究中继续开展。

参 考 文 献

- [1] Sang X Z, Yu X B, Chen D, *et al.* Research progress on three-dimensional optical display [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050006.
桑新柱, 于迅博, 陈铎, 等. 三维光显示技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050006.
- [2] Ma J S, Cheng B C, Cao W B, *et al.* Holographic display system of digital micro-mirror devices based on LED light source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0709001.
马建设, 程炳超, 曹文波, 等. 基于LED光源的数字微镜器件全息显示系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0709001.
- [3] Thompson B J, Ward J H, Zinky W R. Application of hologram techniques for particle size analysis [J]. *Applied Optics*, 1967, 6(3): 519-526.
- [4] Trolinger J D, Belz R A, Farmer W M. Holographic techniques for the study of dynamic particle fields [J]. *Applied Optics*, 1969, 8(5): 957-961.
- [5] Zhao H, Tu D, Hu Z, *et al.* Holographic sizing of contaminants in HV XLPE cable [J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1991, 26(2): 217-221.
- [6] Hussain F. Basic studies of microstructure of combusting turbulent flows [J]. *Nasa STI/Recon Technical Report N*, 1991, 91: 222.
- [7] Trolinger J D, Lal R B, Batra A K. Holographic instrumentation for monitoring crystal growth in space [C]. *Optical testing and metrology III: Recent advances in industrial optical inspection*, 1991, 1332: 151-165.

- [8] Feldmann O, Mayinger E H F, Gebhard P. Evaluation of pulsed laser holograms of flashing sprays by digital image processing and holographic particle image velocimetry [J]. *Nuclear Engineering & Design*, 1998, 184(2): 239-252.
- [9] Zhang L Y, Xu Q, Cao N, *et al.* Effect of the size of high-pass filter on the off-axis particle holographic image[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 060901.
张连永, 徐青, 曹娜, 等. 高通滤波器尺寸对粒子离轴滤波全息像的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 060901.
- [10] Luo Z X, Li Z R, Liu Z Q, *et al.* Application of in-line digital holography to micro-jet particles measurement[J]. *Explosion & Shock Waves*, 2007, 27(3): 278-282.
罗振雄, 李泽仁, 刘振清, 等. 同轴数字全息技术在高速射流粒子测量中的应用[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(3): 278-282.
- [11] Meng H, Hussain F. Holographic particle velocimetry: a 3D measurement technique for vortex interactions, coherent structures and turbulence[J]. *Fluid Dynamics Research*, 1991, 8(1/2/3/4): 33-52.
- [12] Ang J A, Hansche B D, Konrad C H, *et al.* Pulsed holography for hypervelocity impact diagnostics[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14(1/2/3/4): 13-24.
- [13] Sorenson D S, Minich R W, Romero J L, *et al.* Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(10): 5830-5836.
- [14] Wu Y C, Wu X C, Cen K F. Development of digital holography in particle field measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6):0601001.
吴迎春, 吴学成, 岑可法. 数字全息测量颗粒场研究进展[J]. *中国激光*, 2014, 41(6):0601001.
- [15] Feng Y, Wu P, Cai J. Measuring direction of mechanical micro-deformation by laser holographic interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(2):248-252.
冯颖, 吴平, 蔡静. 利用激光全息干涉法测量微小机械变形方向[J]. *中国激光*, 2006, 33(2): 248-252.
- [16] Lei L, Cao N, Cao L, *et al.* Investigation on plasma electron density distribution with finite holographic interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0102008.
雷岚, 曹娜, 曹亮, 等. 有限宽全息干涉技术对等离子体电子密度的诊断[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0102008.
- [17] Sorenson D S, Malone R M, Frogget B C, *et al.* Particle distribution measurements using in-line Fraunhofer holography [C]. 22nd International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 1997, 2869: 206-214.
- [18] Sorenson D S, Obst A, King N S P, *et al.* In-line particle field holography at Pegasus [C]. IEEE International Conference on Digest of Technical Papers, 1995, 2: 1024-1029.
- [19] Oro D M, Hammerberg J E, Buttler W T, *et al.* A class of ejecta transport test problems [C]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1426(1): 1351-1354.
- [20] Ogorodnikov V A, Mikhailov A L, Sasik V S, *et al.* Effect of a gas on the ejection of particles from the free surface of a sample subjected to a shock wave with various intensities[J]. *Journal of Experimental & Theoretical Physics*, 2016, 123(2): 357-362.
- [21] Li Z, Luo Z, Liu Z, *et al.* High-speed microjet particles measurement using in-line pulsed holography [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(11): 113110.
- [22] Liu Z G, Ye Z F, Wang J H. Further analysis of $4f$ Fourier transform lens in holography measurement of particle field [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, 8(11): 46-53.
刘志刚, 叶梓丰, 王家骅. $4f$ 傅里叶变换系统粒子场测量的探讨[J]. *光学学报*, 1988, 8(11): 46-53.
- [23] Dunn P, Thompson B J. Objectshape, fringe visibility, and resolution in far-field holography[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(2): 327-332.
- [24] Wang G Z, Feng S, Wang Z R, *et al.* Holographic instrument for measurement of dynamic particle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1992, 21(1): 67-72.
王国志, 丰善, 王正荣, 等. 运动粒子全息测试仪[J]. *光子学报*, 1992, 21(1): 67-72.
- [25] Cao L, Cao N, Xu Q, *et al.* Effects of air ionization on particle holographic image[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 217-220.
曹亮, 曹娜, 徐青, 等. 空气击穿效应对粒子全息像的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(12): 217-220.
- [26] Warren J S. *Modern Optical Engineering* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
沃伦 J. 史密斯. *现代光学工程* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.