

用阈值函数分析粒子场同轴全息非线性记录对再现像的影响*

叶 雁 李泽仁 李作友 刘振清 钟 杰 罗振雄 李 军 郑贤旭

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川绵阳 621900)

摘 要 用阈值函数分析了粒子场同轴全息非线性记录对再现像的影响, 从理论上得到了非线性记录影响粒子场同轴全息再现像的模型, 并数值模拟了不同形状粒子在非线形记录下的再现像, 得到再现像出现了边缘剪切效应. 实验验证了数值模拟的结果, 完善了粒子场同轴全息理论, 并为粒子场同轴全息图像处理提供了光学产生边缘剪切效果, 节约了图像处理的时间.

关键词 粒子场; 同轴全息; 非线性; 边缘剪切; 阈值函数

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

0 引言

由于粒子场同轴全息技术^[1,2]测量精度高、景深长和信息量大等优点, 在化工、能源和环境保护等研究领域有广泛用途. 近几年来, 全息非线性效应研究的显著特点是以离轴全息为对象, 理论研究都是通过 t - E 曲线的各种近似描述^[3], 如泰勒级数和切雪夫多项式, 并假设简单物场来分析非线性效应对再现光场的影响^[4,5], 得到非线性记录使再现像产生高级像和伴生像的结论. 这样的分析数学推导较为复杂而且没有专门对同轴全息非线性进行研究. 本文用阈值函数对粒子场同轴全息非线性记录对再现像的影响研究进行了理论推导, 并进行了数值模拟和实验, 证明了非线性记录将使再现像出现边缘剪切效应的结论.

1 理论分析

测量粒子场的激光同轴全息技术分为全息记录和再现两个过程. 物光是被粒子场散射的光, 参考光是未被粒子场干扰的光, 它们在粒子场后相干. 散射光的强度和位相与散射粒子的特征有关, 当用全息干板记录了干涉场即全息图时, 也就记录了粒子场的大小、形状、空间分布等信息^[3].

一般全息记录过程都是假设干板 t - E 曲线是进行线性传递, 即在记录光强 $I(x, y)$ 前乘以系数 k , 再进行再现推导. 如果用多项式描述 t - E 曲线, 数学推导较为复杂.

为了简化分析, 将干板 t - E 曲线看成硬限幅器, 对于低于某一阈值 E_0 的一切曝光量, 透射率都保持为 0, 而对于高于 E_0 的所有曝光量, 透射率下降

为 1, 即将 t - E 曲线由多项式拟合简化成阈值函数. 阈值函数的定义为

$$g(E) = \frac{E - E_0}{2 \times |E - E_0|} + \frac{1}{2} \quad (1)$$

即

$$g(E) = \begin{cases} 0 & (\text{if } E \leq E_0) \\ 1 & (\text{if } E > E_0) \end{cases}$$

将曝光量 $E = I \times t_e$ 代入阈值函数定义式即记录光强 I ^[6] 得到

$$g(I \times t_e) = \frac{I \times t_e - E_0}{2 \times |I \times t_e - E_0|} + \frac{1}{2} \quad (2)$$

将式(2)阈值函数代入菲涅耳衍射积分^[4], 推导再现光的复振幅

$$\begin{aligned} U'(\mu, \nu) &= \iint_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{I \times t_e - E_0}{2 |I \times t_e - E_0|} + \frac{1}{2} \right) \times \\ &\exp \left(\frac{ik_2}{2z_2} [(\mu - x)^2 + (\nu - y)^2] \right) dx dy = \\ &\exp \left(\frac{ik_2}{2z_2} (\mu^2 + \nu^2) \right) \times \iint_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{I \times t_e}{2 |I \times t_e - E_0|} + \right. \\ &\quad \left. - \frac{E_0}{2 |I \times t_e - E_0|} + \frac{1}{2} \right) \times \\ &\exp \left(\frac{ik_2}{2z_2} [x^2 + y^2 - 2\mu x - 2\nu y] \right) dx dy \quad (3) \end{aligned}$$

式中 $k_2 = 2\pi/\lambda$, z_2 是再现距离. 由于是远场同轴全息满足远场条件^[6] $k_2(x^2 + y^2)_{\max} \ll z_2$, 在式(3)中包含再现粒子的部分主要是第一项, 所以式(3)变为

$$\begin{aligned} U'(\mu, \nu) &= t_e \times \exp \left\{ \frac{ik_2}{2z_2} [\mu^2 + \nu^2] \right\} \times \\ &\iint_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{I}{2 |I \times t_e - E_0|} \right) \exp \left\{ \frac{ik_2}{2z_2} [-2\mu x - 2\nu y] \right\} dx dy \quad (4) \end{aligned}$$

从式(4)可以看出菲涅耳衍射积分变成了傅里叶变换

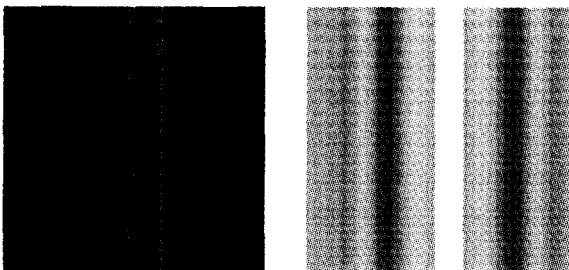
$$U'(\mu, \nu) = t_e \times \exp \left(\frac{ik_2}{2z_2} [\mu^2 + \nu^2] \right) \times$$

$$\begin{aligned}
 F\left\{\frac{I}{2|I \times t_e - E_o|}\right\} &= t_e \times \exp\left(\frac{ik_2}{2z_2}[\mu^2 + \nu^2]\right) \times \\
 F\left\{I \times \frac{1}{2|I \times t_e - E_o|}\right\} &= t_e \times \exp\left(\frac{ik_2}{2z_2}[\mu^2 + \nu^2]\right) \times \\
 F\{I\} * F\left\{\frac{1}{2|I \times t_e - E_o|}\right\} & \quad (5)
 \end{aligned}$$

从式(5)分析可知,包含粒子信息的再现光复振幅在第 2 项中,其结果将卷积第 3 项. 不同形状的粒子具有不同的记录光强分布,可以进行不同粒子再现光强的数值模拟.

2 数值模拟

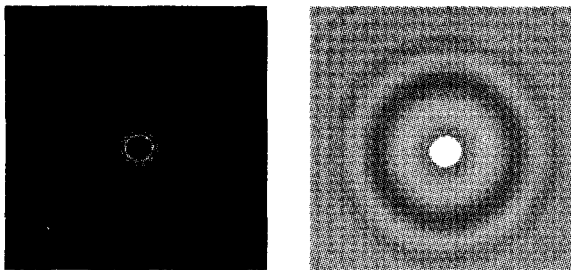
首先对线形粒子进行再现光强的模拟,得到图 1 的结果. 由图可见,线形粒子中心光强出现下凹,与边界形成强度差别.



(a)Reconstruction of nonlinear record (b)Reconstruction of linear record

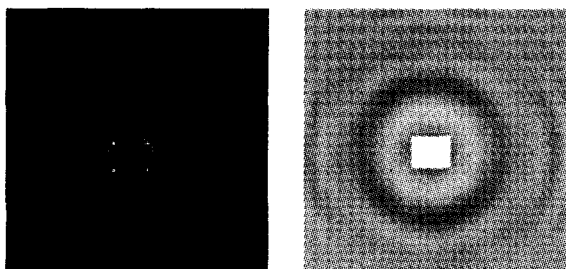
图 1 线形粒子非线性记录和线性记录模拟再现像比较
Fig. 1 Comparing of simulation reconstruction of line particle in nonlinear record and linear record

图 2~图 4 分别为二维粒子其中包括圆形、长方形和三角形的数值模拟结果.



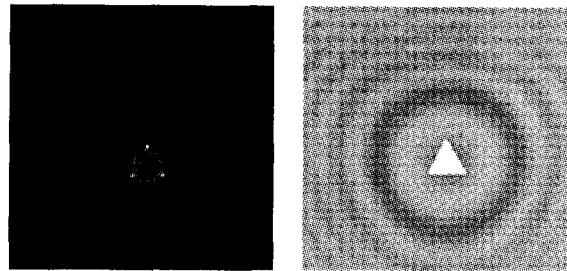
(a)Reconstruction of nonlinear record (b)Reconstruction of linear record

图 2 圆形粒子非线性记录和线性记录模拟再现像比较
Fig. 2 Comparing of simulation reconstruction of circle particle in nonlinear record and linear record



(a)Reconstruction of nonlinear record (b)Reconstruction of linear record

图 3 长方形形粒子非线性记录和线性记录模拟再现像比较
Fig. 3 Comparing of simulation reconstruction of rectangle particle in nonlinear record and linear record



(a)Reconstruction of nonlinear record (b)Reconstruction of linear record

图 4 三角形粒子非线性记录和线性记录模拟再现像比较
Fig. 4 Comparing of simulation reconstruction of triangle particle in nonlinear record and linear record

从图 1~4 可以看出,模拟的各形粒子在非线性记录即 D-LogE 曲线肩部记录的再现像都存在边缘剪切的现象,而且边缘上还出现衍射极大的亮纹,但在 D-LogE 曲线线性段记录的模拟再现像没有出现边缘剪切,再现像清晰,背景有衍射环.

3 实验结果

首先获得所用干板的 D-LogE 曲线,然后在其线性段和肩部分别进行同轴全息照相实验. 再用图 5 的再现光路进行全息图的再现,由 CCD 接收再现像.

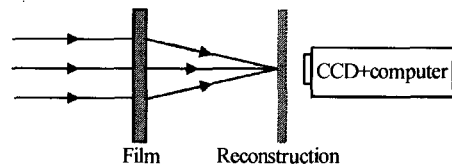
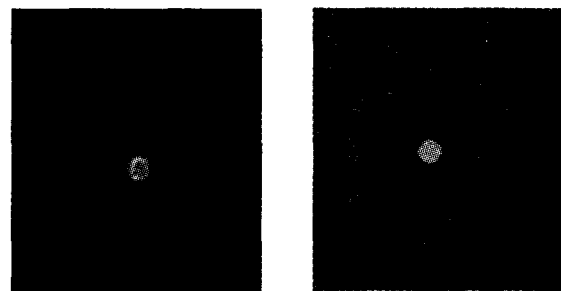


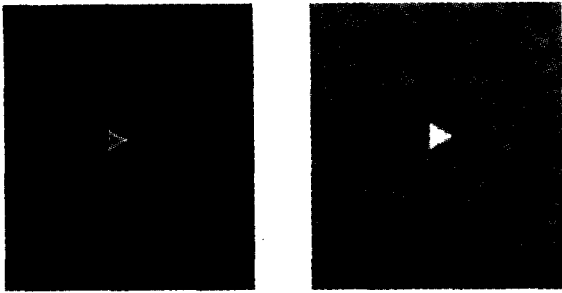
图 5 再现光路图
Fig. 5 The reconstruction principle

图 6 和图 7 分别为圆形粒子和三角形粒子在 D-LogE 曲线线性段记录和肩部记录,用输出相同功率的激光器进行再现的实验结果. 从图可以看出圆形和三角形粒子在非线性记录即 D-LogE 曲线肩部记录的再现像出现了明显的边缘剪切效应. 在线性段记录的圆形和三角形粒子再现像没有出现边缘剪切效应,粒子中心光强饱满,周围有一些衍射花纹,是由于粒子场采用的规则分布的光刻靶发生衍射导致的.



(a)Reconstruction of nonlinear record (b)Reconstruction of linear record

图 6 圆形粒子非线性记录和线性记录实验再现像比较
Fig. 6 Comparing of experimental reconstruction of circle particle in nonlinear record and linear record



(a)Reconstruction of nonlinear record (b)Reconstruction of linear record

图7 三角形粒子非线性记录和线性记录实验再现像比较
Fig.7 Comparing of experimental reconstruction of triangle particle in nonlinear record and linear record

4 讨论

用阈值函数对粒子场同轴全息非线性曝光进行分析,建立数值模拟模型,得到了在非线形记录即 D-LogE 曲线肩部记录的再现像,出现边缘剪切效应,并通过实验对其进行了验证. 在建立模型时,采用了硬限幅器近似和算法有限位计算. 模拟的粒子场背景和实验的情况存在差别,但并不影响边缘剪切效应. 在处理粒子场同轴全息的再现像时,可以在不丢失粒子场信息的前提下,记录段可以适当选择在肩部,使再现像产生边缘剪切效应,且产生的边缘剪切效应是方便和并行的,可以节约再现像图象处理时间.

Analysis of Influences of Coaxial Holographic Nonlinear Recording for Particles Field on Image Reconstruction by Using the Threshold Value Function

Ye Yan, Li Zeren, Li Zuoyou, Liu Zhenqing, Zhong Jie, Luo Zhenxiong, Li Jun, Zheng Xianxu

Institute of Fluid Physics, CAEP, Sichuan Mianyang 621900

Received date: 2004-08-26

Abstract The influence on image reconstruction of the coaxial holographic nonlinear recording for particles field was analyzed by using the threshold value function. In theory, the simulation model was built, in which the reconstructions of different shapes particles were recorded in the nonlinear segment of D-LogE. The effect of edge shearing appeared in the reconstruction. The simulation result and the experimental result are in good agreement. The result can develop the theory of the in-line holography. The effect of edge shearing not only offer the optic method for the image manipulation in the particle in-line holography but also shorten the time of image.

Keywords Field of particles; In-line holography; Nonlinearity; Edge shearing; Threshold value function



Ye Yan was born in 1978. She graduated from Chongqing University with her B. S. degree in 2000 and received the M. S. degree from CAEP in 2003. Her research interests focus on holography and photoelectric sensor.

参考文献

- 1 李茹, 王国志, 张耀明. 含铝推进剂燃烧场全息粒子图象处理系统的研究. *光子学报*, 1999, **28**(12): 1107~1112
Li R, Wang G Z, Zhang Y M. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(12): 1107~1112
- 2 王峰, 李泽仁. 粒子场同轴全息图中对比度与再现像关系的讨论. *光子学报*, 2000, **29**(1): 207~214
Wang F, Li Z R. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(1): 207~214
- 3 Bryngdahl O, Lohmann A. Nonlinear effects in holography. *Journal of the Optical Society of America (B)*, 1968, **58**(10): 1325~1334
- 4 Tischer F J. Analysis of ghost image in holography by the use of chebyshev polynomials. *Applied Optics*, 1970, **9**(6): 1369~1370
- 5 Banyasz I, Fimia A, Belendez A, *et al.* Nonlinear recording of amplitude holograms in agfa 8E75HD. *Optics Communications*, 1994, **111**(10): 225~232
- 6 刘子超, 赵云惠. 液雾及颗粒的激光测量. 北京: 宇航出版社, 1988. 292~305, 234~237
Liu Z C, Zhao Y H. *Liquid Spray and Grain Measurement with the Laser*. Beijing: Space Navigation Press, 1988. 292~305, 234~237