

# 全息干涉的数字重现\*

黄晓菁

(集美大学基础教学部, 厦门 361021)

黄献烈

(厦门大学物理系, 厦门 361005)

**提要** 本文报告的全息干涉的数字重现方法,可消除像差、噪声和胶片非线性等因素的影响。用 CCD 摄像机记录全息图,离散化的数据输入计算机。计算机的数字显示可产生较好的条纹图样和测量结果。给出了玻璃板平行度和物体表面微小转动的实验结果。

**关键词** 全息干涉 CCD 数字重现

## Digital Reconstruction of Holographic Interference

Huang Xiaojing

(Dept. of Basic Courses, Jimei Univ., Xiamen 361021)

Huang Xianlie

(Dept. of Phys., Xiamen Univ., 361005)

**Abstract** A method of digital reconstruction of holographic interference is described. It can eliminate aberrations, noise, and film nonlinearity etc. The hologram is recorded by a CCD camera, and the discrete data are sent to the computer. The numerical display of the computer can yield better fringe pattern and measurement results. Experimental results for glass plate parallelism and small rotation of object surface are given.

**Key words** holographic interference, CCD, digital reconstruction

全息干涉计量是全息术的一个重要应用,可以用来测量物体的微小形变、物体表面的不平度以及物体的微小转角等,而且是无损测量。然而目前常用的光学全息干涉方法应用胶片作全息记录和应用光学系统重现,容易受像差、噪声和胶片非线性等因素的影响。我们采用 CCD (电荷耦合器件)作全息记录与数字重现方法<sup>[1-3]</sup>,获得全息干涉的数字记录与重现。

这种方法采用 CCD 代替胶片作全息记录元件,然后对两次记录的全息图作数字采样,经计算机相加后,作快速傅里叶交换、滤波、平移

及快速逆傅里叶变换,重现出全息干涉条纹图样,最后对干涉条纹进行测量。我们利用这种方法对玻璃板的平行度和物体表面的微小转角作全息干涉的数字重现。给出了测量原理和实验结果。

### 全息干涉原理

全息记录采用双曝光法。若待测物体为透明物体,记录光路如图 1 所示。O 为待测透明物体,BS 为分束镜,CCD 记录物光波与参考光波的干涉条纹。物光波与参考光波的夹角  $\theta$  应适当选择。既确保 CCD 能记录下干涉条纹,又能使其频谱的 0 级,±1 级互相分离。用 CCD 作两次记录,第一次记录标准物光波  $u_1(x, y) =$

\* 福建省教委科技项目  
2000 年 4 月 23 日收稿

$a(x, y) \exp[\varphi_1(x, y)]$  与平面参考光波  $u_r(x, y) = \exp[j2\pi\xi_r x]$  的干涉, 其中  $\xi_r = \sin\theta/\lambda$  第二次记录变化了的物光波和同一平面参考光波的干涉。由于物体变化不大, 可视为振幅不变, 只是位相发生变化, 因此变化以后的物光波为  $u_0^2(x, y) = a(x, y) \exp[\varphi_2(x, y)]$

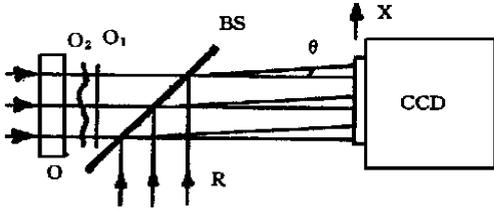


图 1 全息记录光路

两次 CCD 记录的全息图离散化数据直接输入计算机中, 相加后得两次记录的光强为

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |u_r(x, y) + u_0^1(x, y)|^2 \\
 &+ |u_r(x, y) + u_0^2(x, y)|^2 \\
 &= 2r^2 + |u_0^1(x, y)|^2 + |u_0^2(x, y)|^2 \\
 &+ [u_0^1(x, y) + u_0^2(x, y)] \exp[j2\pi\xi_r x] \\
 &+ [u_0^1(x, y) + u_0^2(x, y)] \exp[-j2\pi\xi_r x]
 \end{aligned} \quad (1)$$

对上式作傅里叶变换, 得

$$\begin{aligned}
 U(\xi, \eta) &= F[I(x, y)] \\
 &= U_0(\xi, \eta) + U_1(\xi - \xi_r, \eta) + U_2(\xi + \xi_r, \eta)
 \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $U_0(\xi, \eta)$  为式 (1) 中前三项的傅里叶变换,  $U_1(\xi - \xi_r, \eta)$ ,  $U_2(\xi + \xi_r, \eta)$  分别为式 (1) 中后两项的傅里叶变换。当物光波为限带函数,  $u_0^1(x, y)$  和  $u_0^2(x, y)$  二者的空间频谱宽度范围从  $-\xi_{\max}$  到  $+\xi_{\max}$  以及从  $-\eta_{\max}$  到  $+\eta_{\max}$ , 若  $\xi_r \geq \xi_{\max}$ , 则式 (2) 中的三项在频谱面上彼此是分离的。经频谱滤波, 分离出第三项  $U_2(\xi + \xi_r, \eta)$ , 再平移, 得  $U_2(\xi, \eta)$ 。

将  $U_2(\xi, \eta)$  作逆傅里叶变换, 得

$$\begin{aligned}
 F^{-1}[U_2(\xi, \eta)] &= r[u_0^1(x, y) + u_0^2(x, y)] \\
 &= ra(x, y) \{ \exp[j\varphi_1(x, y)] + \exp[j\varphi_2(x, y)] \}
 \end{aligned} \quad (3)$$

由此实现了标准物光波与变化了的物光波的干涉, 这就是全息干涉。式 (3) 的强度分布为

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= 4r^2 a^2(x, y) \\
 &\cdot \cos^2 \left\{ \frac{1}{2} [\varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)] \right\}
 \end{aligned} \quad (4)$$

可见干涉条纹的形状完全取决于物光波的位相变化, 而这一位相变化与物体形变的大小有关。据此可根据条纹的疏密、取向对物体的形变进行测量。

### 全息干涉的数字重现

为实现全息干涉的数字记录, 在  $M \times N$  矩形网络中对 CCD 面上的光强分布  $I(x, y)$  作数字采样。沿  $x, y$  方向的采样间距分别为  $\Delta_x, \Delta_y$ , 则以  $m\Delta_x, n\Delta_y$  代替  $x, y$  对  $I(x, y)$  的傅里叶变换  $U(\xi, \eta)$  同样作数字采样, 以  $k\Delta\xi, l\Delta\eta$  代替  $\xi, \eta$ , 则离散化的  $U(\xi, \eta)$  为

$$U(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I(m, n) \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{mk}{M} + \frac{nl}{N} \right) \right] \quad (5)$$

同样地, 对  $U_2(\xi, \eta)$  的逆傅里叶变换式 (3) 作离散化得

$$\begin{aligned}
 ra(m, n) \{ \exp[j\varphi_1(m, n)] + \exp[j\varphi_2(m, n)] \} \\
 = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} U_2(k, l) \exp \left[ j2\pi \left( \frac{mk}{M} + \frac{nl}{N} \right) \right]
 \end{aligned} \quad (6)$$

这样, 可以式 (5) 和 (6) 为基础, 可利用快速傅里叶变换实现全息干涉的数字重现。

如上所述, 为了对 CCD 面上光强分布的傅里叶变换  $U(\xi, \eta)$  作频谱滤波, 参考光的  $\xi_r$  应满足  $\xi_r \geq \xi_{\max}$ 。根据采样定理, 若要在 CCD 面上完全记录各频谱分量, 则应满足  $2(\xi_r + \xi_{\max}) < 1/\Delta_x$ , 即  $\xi_{\max} < 1/\Delta_x$  和  $\eta_{\max} < 1/\Delta_y$ 。因此, 数字重现沿  $x, y$  方向的空间分辨率大约为  $1/\Delta_x$  和  $1/\Delta_y$ 。若 CCD 靶面大小为  $6 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ , 像素点阵为  $256 \times 256$ , 则其重现的全息图的空间分辨率约为  $0.19 \text{ mm}$  和  $0.07 \text{ mm}$ 。

### 实验结果

下面给出利用上述方法作玻璃板平行度的全息干涉测量的数字重现。首先对一片厚  $2.5 \text{ mm}$  的普通玻璃板进行实验, 全息记录光路采用马赫-泽德干涉仪光路, CCD 靶面大小为

6mm×4.5mm.未放玻璃板,CCD作第一次全息记录.然后将待测玻璃板插入干涉仪的一臂,CCD作第二次全息记录.重现的干涉条纹图样示于图2(a).由图可见,在玻璃板上6mm×4.5mm范围内有7条干涉条纹,厚度差约为2.2μm,不平行度约为2′.若以全息照相用的厚1mm的玻璃底板代替上述厚2.5mm的普通玻璃板重复实验,其重现的干涉条纹图样示于图2(b).由图可见,在玻璃底板上6mm×4.5mm范围内有1条干涉条纹,厚度差约为0.3μm,不平行度约为20″,明显优于普通玻璃板的不平行度.

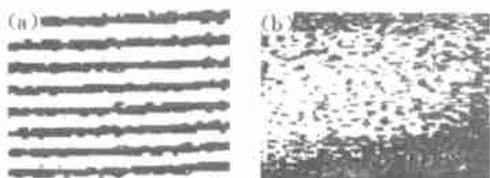


图2 玻璃板的干涉条纹图样



图3 物体转动的干涉条纹图样

我们还对物体表面的微小转角作全息干涉

测量的数字重现.全息记录光路仍采用马赫-泽德干涉仪光路. CCD作第二次全息记录时,干涉仪的一臂转过一小角度.经全息干涉的数字重现后得到的干涉条纹分布如图3所示,图中(a)(b)分别为水平转动5′的结果.

## 结论和讨论

本文所述的全息干涉数字重现的方法,可以快速地测出物体的微小形变.物体表面的不平度和微小转角,可消除光学系统的像差、噪声和胶片非线性等因素的影响,而且不存在文献[3]的物体重现像因不在同一平面而互成噪声所造成的质量下降问题.但由于我们所用的普通CCD摄像机分辨率与胶片相比,明显偏低很多,全息图的空间分辨率只有亚毫米数量级,而且CCD靶面较小,只有毫米数量级,大大限制了测量范围.然而随着CCD芯片的不断发展,全息图的空间分辨率和CCD靶面面积将大大提高,应用前景看好.

## 参考文献

- [1] U. Schnars, et al., Appl. Opt., 1994, 33(2), 179
- [2] 肖体乔等,光学学报, 1995, 15(2), 129
- [3] 成择等,光学学报, 1997, 17(5), 577

(上接第273页)

### 4. 非线性散射

一般为固态或液态悬浮液.弱光入射时,悬浮液透明,光高透射;强光入射时,悬浮液浑浊,散射增加,光低透射.文献8中介绍了一种非线性悬浮液,从墨汁中提取的碳颗粒作溶质,溶剂选用流动性好的甲醇,对400~700nm波段光该材料OD值约为3,平均透过率约为70%.响应时间 $< 8\text{ns}$ .

近年来,非线性材料研究取得了很大进展,但与实际需求仍有一定差距,应尽快研制非线性系数大、响应时间快、抗损伤阈值高、物理化

学性能稳定、使用价值高的材料,以适应飞速发展的激光技术.

## 参考文献

- [1] 王丽等,《国外激光》, 1991, 12, 17
- [2] 朱顺贤,应用激光, 1986, 2, 42
- [3] 冯苏英,激光杂志, 1999, 2, 8
- [4] 高光煌等,激光技术, 1996, 4, 193
- [5] 段潜等,中国激光, 1997, 5, 457
- [6] 查子忠等,激光技术, 1994, 4, 69
- [7] 龚旗煌等,光学学报, 1993, 8, 766
- [8] 查子忠等,激光技术, 1997, 8, 246