

Moire偏转技术 (MD) 检测相位物体的研究

王海林

(华东工学院应用物理系)

摘要: 本文给出了Moire偏转技术检测相位物体的基本原理, 分析了该技术的灵敏度, 提出了一种消除测量光路系统误差的有效方法, 并给出了实验结果。

Mapping phase objects using moire deflectometry

Wang Hailin

(Department of Applied Physics, East China Institute of Technology)

Abstract, This paper gives the basic principle of the moire deflectometry for mapping phase objects, discusses the sensitivity of this method, presents a simple and effective method for eliminating the imperfection of optical elements and show some experimental results.

一、引言

1836年Talbot发现了相干光照明下周期物体自成象现象——Talbot效应, 1874年Rey-leigh发现了Moire条纹。近二十年来, Talbot效应和Moire条纹相结合而形成的Moire偏转技术(MD)由于具有独特的长处得到了广泛的研究, 而被广泛地应用于光学检测领域, 成为光学检测的重要方法之一。

MD和其它光学检测方法一样, 可以检测相位物体, 镜面反射物体, 漫反射物体。本文研究MD检测相位物体方面的一些情况。近年来, 国外许多学者对这方面进行了研究, D. Kafri, I. Glatt用它来测量火焰的温度分布, I. Glatt, A. Livnal用它来测量透镜的折射率, J. Strick等把它应用于风洞流场试验中, 等等。但他们的研究工作中还有许多问题没有很好地解决, 如灵敏度低, 对于蜡烛火焰这样的相位体, Moire条纹只变化一个条纹左右。还有测量精度不高, Moire条纹的变化是由被测相位体和光路系统误差共同作用所引起, 这从他们没有得到零场Moire条纹图和参考条纹不直可以看出。

本文介绍了MD的一些基本原理, 讨论了MD检测相位物体的灵敏度和极限灵敏度。在实验方面, 选择了适当密度的光栅, 采取了消除系统误差的措施, 以酒精灯火焰场为例首次得

到了相位体的零场Moire条纹图。所得到的带参考条纹的Moire条纹图，其参考条纹很直，条纹对比度很好，条纹偏转量很大，完全能进行精确定量计算。

二、基本理论

把两块相同的光栅平行接触安置，并使光栅 G_1 和 G_2 的栅线夹角为 2θ ，当用光照明时，就可以看到明暗相间的等间隔的平行直条纹，如图1所示。Moire条纹平行于X轴。如光栅周期为 d ，则Moire条纹周期为

$$D = \frac{d}{2\sin\theta} \quad (1)$$

显然如光栅 G_1 在X方向上移动距离 $d/\cos\theta$ ，Moire条纹在Y方向上移动距离为 D ，因为 θ 很小，所以 $D \gg d$ 。这就是Moire条纹的放大性质，其放大率：

$$A = \frac{D}{d/\cos\theta} = \frac{1}{2} \text{ctg}\theta \quad (2)$$

当一束单色平行光照明光栅 G 时，如图2所示。在 G 后面一些与光栅 G_1 相距为Talbot距离 $\Delta = \frac{nd^2}{\lambda}$ （ λ 为照明光波长， d 为光栅周期， $n=0, 1, 2, \dots$ ）处的平面上，将重复出现光栅 G 清晰的象，这象的性质与 G 一样，称为Talbot象。

MD检测相位物体（PO）光路如图3所示。激光束经过透镜 L_1, L_2 扩束准直后通过相位物体，再经过光栅 G_1, G_2 （ G_2 放在 G_1 的某个Talbot象的位置上），最后经过透镜 L_3 ，

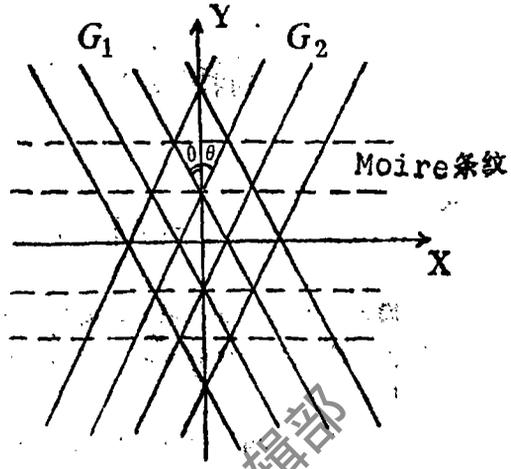


图 1

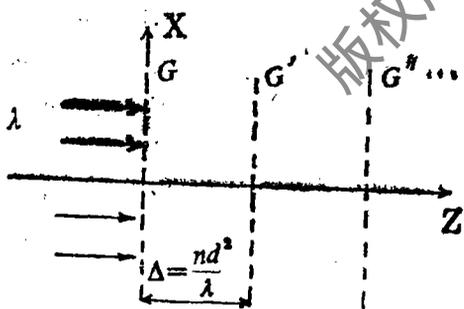


图 2

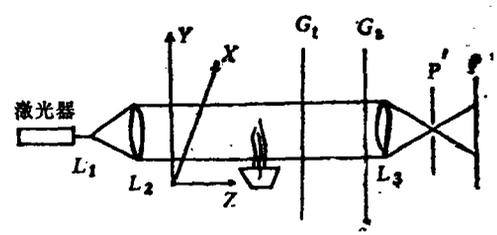


图 3

小孔 P' 组成的空间滤波器在屏 P 上呈清晰的Moire条纹。此Moire条纹为 G_1 的Talbot象与 G_2 作用产生，其性质与图1所讲的情况一样。由公式(1)、(2)所描述，由于实验中所用光栅的条纹密度比较少，下面主要用几何光学的方法讨论MD检测相位的基本原理。

当无相位物体时, 所看到的Moire条纹为一组与X方向平行, 在Y方向等间距分布的直条纹(设一切光学元件质量都很好), 当引入被测相位物体后, 平行光经过PO要发生偏转, 偏转角为 $\varphi_{x,y}$, (下标 x,y 表示经过 x,y 那一点的光线), 如图4所示。这样 G_1 在 G_2 上的Talbot象就要发生变化, 从而形成一定形状分布的Moire条纹。通过测量这个变化了的Moire条纹, 就可以得到对PO的测量, 测量的物理量是PO的折射率和折射率梯度。

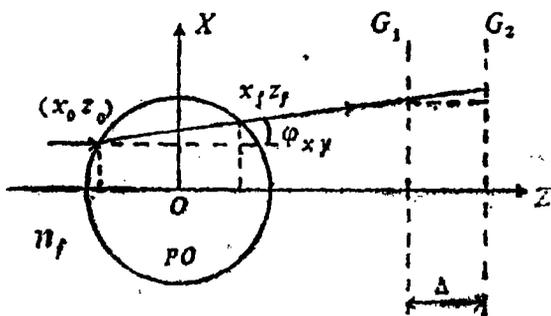


图 4

从图4可以看出, 光线经过PO后X方向偏转角为 $\varphi_{x,y}$, G_1 光栅在 G_2 上的Talbot象(局部)X方向偏转距离为 $\Delta X = \varphi_{x,y} \Delta$ 。由式(2)得由此而引起Moire条纹Y方向移动距离:

$$\begin{aligned} \Delta y &= A \Delta x = A \varphi_{x,y} \Delta \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \theta \varphi_{x,y} \Delta \end{aligned} \quad (3)$$

把(1)式代入(3)式得

$$\Delta y = \frac{1}{2} \varphi_{x,y} \Delta \sqrt{\frac{4D^2}{d^2} - 1} \quad (4)$$

Moire条纹Y方向偏转条纹数

$$n = \frac{\Delta y}{D} = \frac{\varphi_{x,y} \Delta \cos \theta}{d} \quad (5)$$

由此可得MD检测PO时的主观灵敏度与两光栅之间的距离成正比, 与光栅周期成反比。

又由于光栅衍射角的存在, 光栅 G_1 产生的Talbot自成象的距离是有限的, 如图5。其极限距离为

$$\Delta_{\max} = \frac{D_0 d}{2\lambda} \quad (6)$$

D_0 为准直透镜的口径。

结合(5)、(6)两式得Moire条纹偏转的极限条纹数:

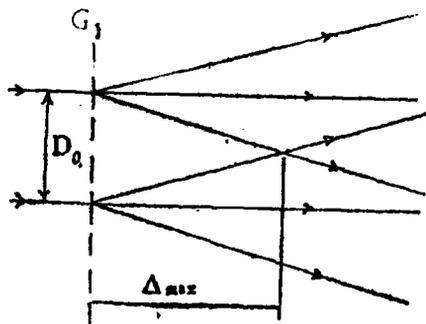


图 5

$$n_{\max} = \frac{\varphi_{x,y} D_0 \cos \theta}{\lambda} \quad (7)$$

从上式可见, 客观灵敏度与光栅周期无关。从(5)式可见 MD检测相位物体时可根据相位体的特性选取适当的主观灵敏度, 用调节光栅之间的距离可解决此问题, 因为客观灵敏度与光栅周期无关, 增加或减少条纹密度实质上不会导致灵敏度变化, 其引起表面上的灵敏度的变化可通过变化两光栅之间距离获得。要注意, 提高表面上的灵敏度时, 成象视场在缩

小,如图5。

光线的基本方程为:

$$\frac{d}{ds} \left[n(x, y, z) \frac{d\vec{r}}{ds} \right] = \nabla n(x, y, z) \quad (8)$$

\vec{r} 为光线的位置矢量, s 为 Poynting 矢量。光线如图 3、4 所示平行于 Z 方向。如光线经过相位物体偏转很小 (设为弱相位物体), 则 $ds \approx dz$, 设相位物体开始在 $Z = Z_0$, 终止在 $Z = Z_1$, 环境折射率为 $n = n_f$, 则由 (8) 式得

$$\varphi_{z, z} = \frac{d\vec{r}}{ds} = \frac{1}{n_f} \int_{z_0}^{z_1} \frac{\alpha n(x, y, z)}{\alpha x} dz \quad (9)$$

对于如图 4 所示的对称场, 有 $n(x, y, z) = n(r, y)$, 其中 $r = (x^2 + z^2)^{1/2}$, (9) 式写成柱坐标形式

$$\varphi_{z, z} = \frac{2x}{n_f} \int_x^{x_1} \frac{\alpha n(x, y)}{\alpha r} \frac{dr}{(r^2 - x^2)^{1/2}} \quad (10)$$

通过 Abel 变换得

$$n(r, y) - n_f = \frac{-n_f}{\pi} \int_r^{r_1} \frac{\varphi_{z, z} dx}{(r^2 - x^2)^{1/2}} \quad (11)$$

这样由式 (4) 或 (5) 计算出 $\varphi_{z, z}$, 代入上式可求得相位体的 $n(r, y)$, 再根据一些关系式求出相位体的温度、密度等物理量的分布。

三、实 验

实验光路如图 3 所示。如果在光栅后面直接观察 Moire 条纹, 由于光栅的衍射效应, Moire 条纹的对比度较差或有重影。如在 G_2 后加上空间滤波系统 L_3, P' , 让第一或第零线在 P 上成象, 则可发现 Moire 条纹图很清晰。

光路中光栅 G_1 并不是理想的光栅, 而是附在质量较差的普通平板玻璃上, 它是一个未知的相位物体, 本身就引起 Moire 条纹不规则畸变, 它是光路系统误差的主要来源。最后实验结果为被测相位物体和系统误差共同作用的总和, 图 6 是这种情况所得到的火焰场的 Moire 条纹图, 显然不能从它得到精确的结果。

为了消除系统误差, G_2 用放到 G_1 的某个 Talbot 象处的全息干板在无被测物体时曝光, 处理后, 并放回原来拍照的位置, 这样 G_1 在 G_2 处的 Talbot 象的误差与 G_2 的误差

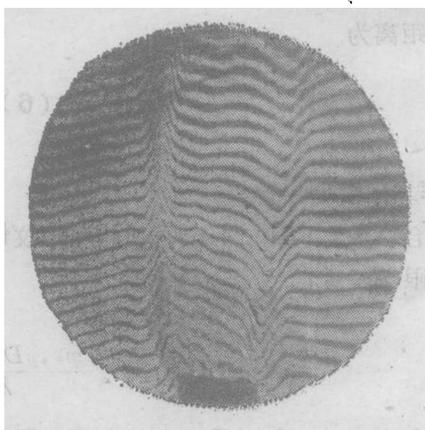


图 6

相同。根据等差线 (Moire 条纹) 的特点, 这次形成的 Moire 条纹几乎不包含系统误差, 用此方法可对带有窗口的相位体进行测量。图 7、8、9、10 是用此法消除系统误差后得到的

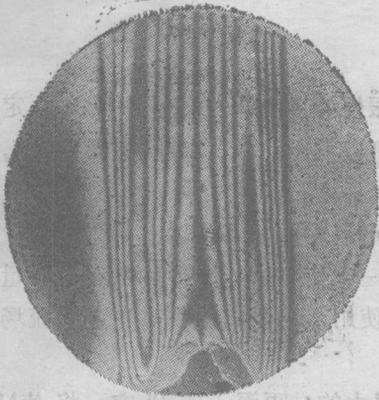


图 7

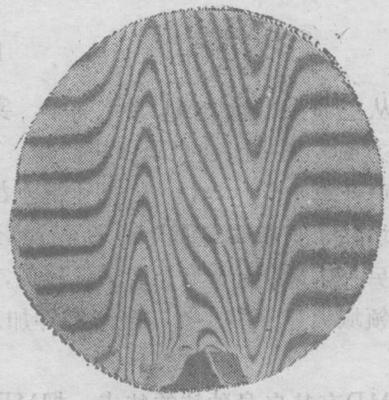


图 8

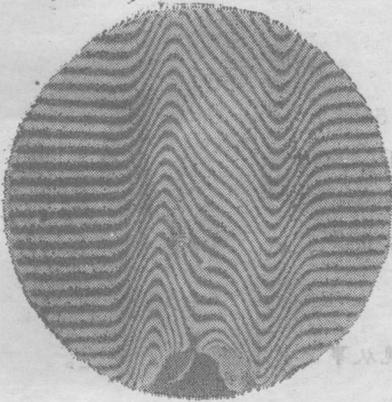


图 9

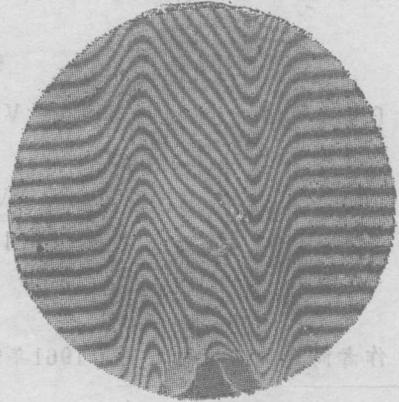


图 10

酒精灯火焰场的Moire条纹图。

图7为火焰场的零场Moire条纹图（两光栅栅线夹角 $\theta=0$ 的情况），图8、9、10为带参考条纹的情况。图8、9为两光栅之间距离 Δ 相同，Moire条纹周期不同情况下的照片，条纹最大偏离4个条纹左右。图9是增加了 Δ 情况下的照片，条纹最大偏移超过5条。为了

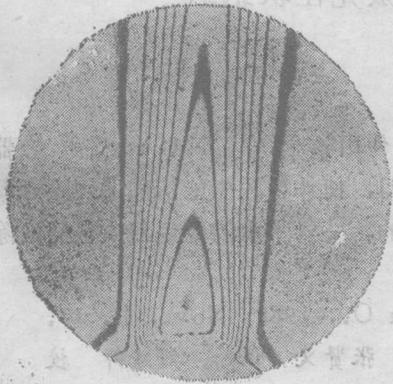


图 11

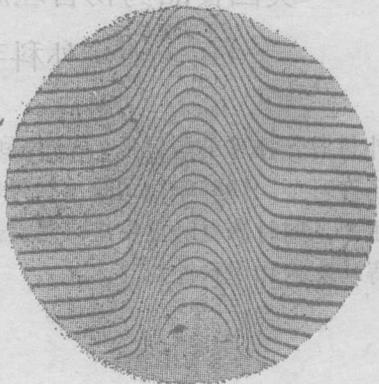


图 12

对比图11、12给出了火焰场的零场干涉条纹图和带有参考条纹的干涉条纹图。

四、结 论

从上面可以看出MD光路简单,实时,操作方便,抗振性强,整个仪器造价低,在定量计算方面,它也比全息干涉法简单。从(5)、(11)式可以看出,MD能直接得到 $\varphi_{,ij}$,立即可计算出 $n(x,y,z)$,而全息干涉法则需对干涉图微分一下,才能得到 $\varphi_{,ij}$,计算过程不仅增加了复杂性,而且带来了计算误差。比较图7、11可以看出前者为后者的微分。

另外,MD比全息干涉灵敏度低,但可调节,它的这一特点可在全息干涉法无法测量的一些领域大显身手,如在光学零件加工的最初几道工序中使用,测量高温、高压下的流场等等。

MD有其自身独特的特点,把MD用于光学检测是有潜力的,更深入的研究,将使MD和全息干涉法在一起,使光学检测范围更广、更实用。

本文是在贺安之教授指导下完成,在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Opt. Lett., 1980, Vol. 5, No. 2, P. 555.
- [2] Opt. Engng., 1985, Vol. 24, No. 6, P. 944.
- [3] Appl. Opt., 1984, Vol. 23, No. 14, P. 2241.
- [4] AIAA J., 1982, Vol. 20, No. 4, P. 820.

* * *

作者简介:王海林,男,1961年9月出生。博士生。现从事激光与现代光学研究。

收稿日期:1988年10月17日。

• 简 讯 •

美国食品药品监督管理局(FDA)批准激光在软组织 外科手术中应用

外科激光技术公司已从FDA得到在软组织外科手术中使用该公司的Nd:YAG激光器的市场许可证。1985年公司推出接触激光探针和激光手术刀,使外科医生能精确地切除和凝结软组织,同时恢复触觉反应,用普通的激光器是做不到的。外科手术的应用包括乳房切除术、痔切除术和甲状腺切除术。

译自 L. & O., 1988, Nov., P. 17.

张贤义 译 刘建卿 校