

基于光逻辑的莫尔偏折学

张家军 刘立人

(中国科学院上海光机所)

提要: 光逻辑莫尔是基于光学逻辑运算的原理而提出的获取特定莫尔条纹的新方法。本文将其能消除载频和窄化条纹的特性应用于偏折学,并给出了实际结果。

Moire deflectometry based on optical logical operation

Zhang Jiajun, Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: Optical logical moire is a new method based on the principle of optical logic operation to abstract a specific moire pattern. Its characteristics of eliminating original carrier frequency and narrowing fringes are applied to deflectometry in this article and the experimental results are presented.

一、引言

莫尔技术已被广泛应用于光学检测、拓扑学及偏折学中。在这过程中,人们往往需要消除原有的载频或抽取单一频率成份,有时更希望能够将条纹窄化以增强其锐度。传统的方法是用光学滤波器或运动光栅法。最近, Bryngdahl^[1,2]提出一种全新的方法来抽取差频条纹——正交态光栅法,它比以往的方法具有更大的灵敏性和多样性。但是,正交态有限(仅三种彩色和两种偏振化方向),而且一般情况下要对光栅进行彩色和偏振化编码是不方便的。

根据光学逻辑运算的原理,我们曾提出光逻辑莫尔^[3],理论和实验表明光逻辑莫尔

条纹不仅易于实现,而且具有消除载频、窄化条纹以及抽取单一频率条纹的功能。光逻辑莫尔的另一优点是具有事后可处理性。

本文将主要讨论光逻辑莫尔在偏折学中的应用。在以前提出的各种光逻辑方案中,原理上最为困难的是对输入实行光逻辑编码,其中最原始的方法是对输入作正、负两种透明片,再用两次曝光法编码合成。显然,在光栅作为编码对象的情况下,只需两次曝光或多次曝光即可。因此,实现莫尔效应的光逻辑运算,编码是最易实现的,这也是一个优点。莫尔偏折学是利用莫尔效应测量相位物体相位变化率的方法^[4,5]。我们利用光逻辑莫尔消除载频和窄化条纹,从而实现对相位体更为有效更为精确的测量。

收稿日期:1988年4月5日。

二、光逻辑莫尔

我们先简述光逻辑莫尔的基本原理^[3]。一个 Ronchi 光栅可看作是由取值为 0 和 1 的条带组成的周期性结构,两个 Ronchi 光栅的叠加作为两个输入变量的二值逻辑共有 $2^4 = 16$ 种逻辑运算。只要先将光栅编码,就可以实现其中任何一种运算。一种逻辑运算就对应一种条纹。例如,AND 运算对应通常的乘积型莫尔条纹,而 XOR (异或) 运算对应的是消除了载频的莫尔条纹。图 1(a) 和 (b) 表示出这两种具有典型意义的条纹。这一原理可推广到由二值以上的条带组成的周期性结构中去,因而具有更多的灵活性。我们最感兴趣的是产生和频或差频条纹的逻辑运算,如图 1(c) 所示,三值编码光栅产生的差频莫尔条纹,条纹的黑白比为 2:1,显然条纹变窄了。

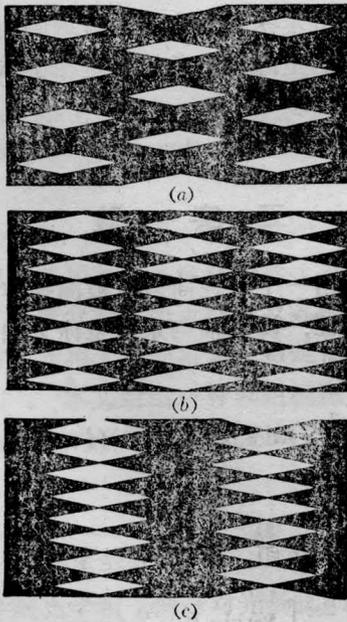


图 1

三、莫尔偏折学

图 2 所示为一种典型的莫尔偏折系统,

其特点是检测光栅置于观察面处,并增加了成像透镜(L)以测量较大相位变化的物体。实验中使 L 具有较小的相对口径,以产生足够大的景深,因此从整体上积分考虑,可认为在有一定厚度的相位体中几何光学折射起主要作用,即物体等效于具有相应相位梯度的平面薄相位体。

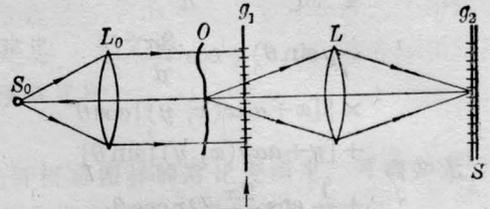


图 2

S_0 —点光源; L_0 —准直透镜; O —物体; g_1 —编码栅; L —成像透镜; g_2 —检测栅(或调制光栅 M), S —观察屏(或全息平板 H)

平行光照射物体,由于物体相位变化使出射光产生偏折。 g_1 光栅调制该偏折信息,经 g_2 光栅检测产生莫尔偏折的等位线条纹。

偏折术中常采用 Ronchi 光栅,其原理可用强度分布为余弦型的光栅来解释。设 g_1 和 g_2 是相同的光栅,且分别与 x 轴成 $\pm\theta$ 角,则有

$$g_1(x, y) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \frac{2\pi}{d} (x \cos \theta + y \sin \theta) \right] \quad (1)$$

$$g_2(x, y) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \frac{2\pi}{d} (x \cos - y \sin \theta) \right] \quad (2)$$

其中 d 为光栅周期。物体的相位变化率在一阶近似下可由偏折角表示^[6],

$$\alpha(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \text{grad} \phi(x, y) \quad (3)$$

偏折后的光线经 a 距离后相应的坐标为

$$\begin{aligned} x' &= x + a\alpha x(x, y) \\ y' &= y + a\alpha y(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

所以,光线在 g_1 光栅的透射强度为

$$I_1(x, y) = I_0 \cdot \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \frac{2\pi}{d} [(x$$

$$+ a\alpha x(x, y)] \cos \theta + [y + a\alpha y(x, y)] \sin \theta \} \quad (5)$$

I_0 为原平行光强度。 g_1 与 g_2 反向成像, 所以透过 g_2 的光强分布为

$$I_s(x, y) = I_1(x, y) \cdot g_2(-x, -y) = \frac{1}{4} I_0 \left\{ 1 + \cos \frac{2\pi}{d} (x \cos \theta - y \sin \theta) + \cos \frac{2\pi}{d} \times [[x + a\alpha x(x, y)] \cos \theta + [y + a\alpha y(x, y)] \sin \theta] + \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi}{d} [2x \cos \theta + a \cos \theta \alpha x(x, y) + a \sin \theta \alpha y(x, y)] + \cos \frac{2\pi}{d} [2y \sin \theta + a \cos \theta \alpha x(x, y) + a \sin \theta \alpha y(x, y)] \right\} \quad (6)$$

光栅 g_1 的法向矢量为

$$\mathbf{f} = \text{grad}(x \cos \theta + y \sin \theta) = \mathbf{i} \cos \theta + \mathbf{j} \sin \theta \quad (7)$$

所以, $I_s(x, y)$ 可表示为

$$I_s(x, y) = \frac{1}{4} I_0 \left\{ 1 + \cos \frac{2\pi}{d} (x \cos \theta - y \sin \theta) + \cos \frac{2\pi}{d} (x \cos \theta + y \sin \theta + a\mathbf{f} \cdot \boldsymbol{\alpha}) + \frac{1}{2} \left[\cos \frac{2\pi}{d} (2x \cos \theta + a\mathbf{f} \cdot \boldsymbol{\alpha}) + \cos \frac{2\pi}{d} (2y \sin \theta + a\mathbf{f} \cdot \boldsymbol{\alpha}) \right] \right\} \quad (8)$$

通常能为人眼所接受的是差频的条纹:

$$\cos \frac{2\pi}{d} (2y \sin \theta + a\mathbf{f} \cdot \boldsymbol{\alpha})$$

其中差频 $2y \sin \theta$ 构成背景平行条纹, 而 $a\mathbf{f} \cdot \boldsymbol{\alpha}$ 则表示相位体的位相变化率对莫尔背景条纹形变的影响。当 $\theta = 0$ 时, 则莫尔条纹作为等位线直接反映偏折角的变化。

四、光逻辑偏折学

要实现光逻辑, 首先对光栅进行 θ 调制编码^[1]。图 2 所示系统就可用作预处理系统, 只需将观察屏换成全息干板, 检测光栅换成用作 θ 调制的细光栅 M , 并将 M 紧贴干板, 第一次曝光后, 将 g_1 沿法线方向横移 $\frac{1}{2}d$, 并将 M 旋转 90° , 作第二次曝光, 这样取得了经物体调制的变形光栅编码图, 然后将物体移去, 用同样的 θ 方法但不同的 θ 角制作另一块检测编码光栅。

显然, 如果不是对二值光栅而是对多值光栅进行编码就要用多次曝光法。

最后用一个 $4f$ 系统对叠加在一起的编码光栅进行解调, 就可实现逻辑运算。并且对于一种特定的莫尔条纹, 只要在解调时施以相应于其逻辑运算的滤波器即可。由于我们是在一个偏折术系统对光栅进行编码的, 所以, 光逻辑所产生的莫尔条纹就是相位体的等位线条纹。

五、实 验

这里用一个凸柱面透镜被测物体来作定量实验论证, 设镜轴与系统坐标 x 轴夹角为 α , 则

$$\boldsymbol{\alpha} = -\frac{1}{f_0} (x \cos \alpha + y \sin \alpha) (\mathbf{i} \cos \alpha + \mathbf{j} \sin \alpha) \quad (9)$$

f_0 为柱镜的焦距。所以, 频差条纹为

$$\cos \left\{ \frac{2\pi}{d} \left[2y \sin \theta + \frac{a}{f} (x \cos \alpha + y \sin \alpha) \cos(\alpha - \theta) \right] \right\}$$

可以看出, 背景条纹是直条纹, 等位线条纹也是直条纹, 它们的夹角为

$$\operatorname{ctg} \gamma = - \left(\operatorname{tg} \alpha + \frac{2f_0 \cdot \sin \theta}{a \cos \alpha \cdot \cos(\alpha - \theta)} \right) \quad (10)$$

干涉仪系统为焦距 $f = 185 \text{ mm}$, 粗光栅 $d = 3 \text{ mm}$ (在三值逻辑时, $d = 4.5 \text{ mm}$), θ 调制用的细光栅为 40 条/mm。解调时 $4f$ 系统中傅立叶透镜为 $f = 300 \text{ mm}$ 。

图 3 给出一个凸柱面镜的一组照片。为了便于比较光逻辑莫尔与传统莫尔的对应关系, 实验中我们使用了较粗的光栅, 图片中的一些杂散白点系 He-Ne 光的相干噪声: (a) 图即为一般的莫尔条纹, 图上部的条纹为背景条纹, 镜框内的条纹则为柱镜等位线条纹; (b) 图为对应于 XOR 逻辑运算的莫尔条纹,

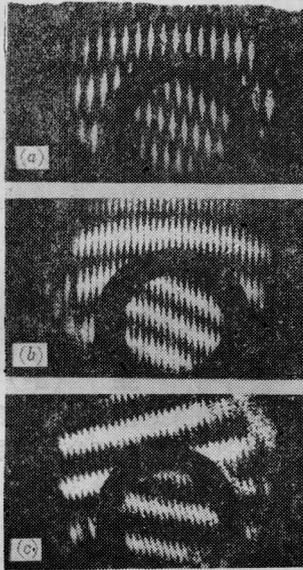


图 3

它消除了载频, 具有较强的对比度, 条纹的黑白比为 1:1; (c) 图为用三值编码光栅抽取的差频莫尔条纹。它不仅对比度高, 而且锐化了条纹, 条纹的黑白比为 2:1。

被测物体为 $f_0 = 30.76 \text{ cm}$, $a = 6.5 \text{ cm}$, $\alpha = 4^\circ$, $\theta = 10^\circ$, 由公式 (1) 求得 $\gamma = -30.1^\circ$ 。而照片上相应的角度也为 30° 左右, 并且等位线条纹向下偏折, 与公式中的负号的含义一致。

可见, 实验所得等位线条纹的特性与上述分析的是一致的。

光逻辑莫尔在偏折学中的应用, 显示出其独特的优点: 灵活、多样和易于实现。虽然 θ 调制编码对一般的光逻辑运算并不简单, 但对于光逻辑莫尔这一特定的应用, “横移光栅”法却使其变得十分容易。事实上, 光逻辑莫尔不仅在测量相位物体方面有实用价值, 而且对于其它基于莫尔效应以抽取信息为目的的计量和检测如莫尔拓扑学等都具有应用的潜力。

参 考 文 献

- 1 Bryndahl Olof. *Opt. Commun.*, **39**, 127(1981)
- 2 Bryndahl Olof. *Opt. Commun.*, **41**, 249(1982)
- 3 Zhang Jiajun, Liu Liren. *Opt. Commun.*, **66**, 179(1988)
- 4 刘立人. *光学学报*, **4**(6), 522(1984)
- 5 Kafri O. *Opt. Lett.*, **5**(12), 555(1980)
- 6 Liu Liren. *Appl. Opt.*, **21**(15), 2817(1982)
- 7 Armitage J D, Lohmann A W. *Appl. Opt.*, **4**, 399(1965)