

# 自动的阴影莫尔轮廓术

赵 宏·陈文艺 谭玉山

(西安交通大学机械工程学院激光红外应用研究所, 西安 710049)

**摘 要** 把相移技术用于阴影莫尔条纹分析, 从而克服了传统的阴影莫尔轮廓术无法判断被测物体表面的凹凸以及测量精度低等缺点; 介绍了产生相移的方法, 并分析了相移误差, 最后对实物进行了测量, 给出了实验结果。

**关键词** 相移, 阴影莫尔, 自动处理。

## 1 引 言

莫尔轮廓术<sup>[1]</sup>作为非接触测量方法已经被广泛地应用于工业、医学等领域。但是, 由于莫尔法得到的仅仅是物体表面形状的等高线图, 因而其精度较低, 更重要的是无法从一幅莫尔图中来判别物体表面的凹凸。通常莫尔法可分为两类: 一类为投影型莫尔法, 是把一光栅投影到被测物体表面上, 投影在物体上的光栅图, 随着物体表面而变形。然后通过另一光栅来观察这一变形光栅图, 而得到莫尔条纹图, 这类莫尔法由于采用两个光栅, 因而很容易把相移技术引入。另一类是阴影莫尔法, 是把一光栅放在离被测物体表面很近的位置, 把光栅投影到物体表面而产生变形光栅图, 然后通过同一光栅来观察这一变形光栅图而得到莫尔条纹图。这类莫尔法由于仅采用一个光栅, 因而不象投影型莫尔法可以通过两光栅的相对移动来实现相移。本文提出了光栅沿垂直于光栅平面的移动来实现相移的方法, 从而使阴影莫尔法测量物体面形的精度被大大提高, 并且可以实现计算机自动处理。但是这一方法得到的相移, 从理论上是有误差的。文中分析了这一误差。

## 2 测量原理

阴影莫尔法通常的光路结构如图1所示。设第 $n$ 级莫尔条纹离光栅 $G$ 的距离为 $h_n$ , 则

$$h_n = npl / (d - np), \quad (1)$$

式中,  $p$  为光栅的栅距,  $d$  为光源与观察点 $O$ 的距离, 光源和观察点到光栅平面的距离均为 $l$ 。由于 $n < 10$ 时, 在大多数情况下,  $d \gg np$ , 因此(1)式可近似为:

$$\tilde{h}_n = npl / d. \quad (2)$$

设第 $n$ 级与第 $n-1$ 级条纹间距为 $\Delta\tilde{h}_n$ , 则:

$$\Delta\tilde{h}_n = \tilde{h}_n - \tilde{h}_{n-1} = pl / d. \quad (3)$$

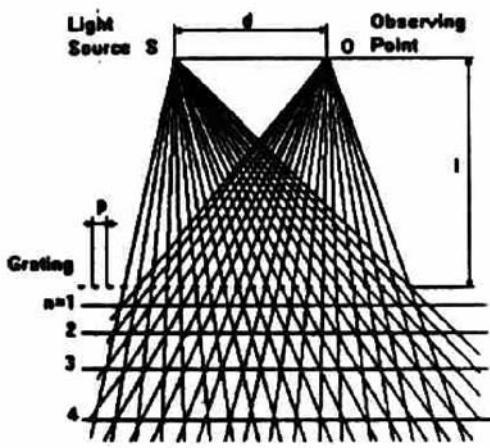


Fig. 1 Optical arrangement of conventional shadow moire

从(3)式可知任意两个相邻条纹间的距离是近似相等的, 又因为  $l \gg \Delta h_n$ , 因此可以通过光栅沿垂直于光栅平面方向移动  $\Delta h_n/4$ ,  $\Delta h_n/2$  和  $3\Delta h_n/4$  来实现三步相移。

另外, 莫尔条纹在任一点  $(x, y)$  的光强表达式为:

$$I = A(x, y) + B(x, y) \cos \phi(x, y), \quad (4)$$

其中,  $A(x, y)$  是背景光强,  $B(x, y)/A(x, y)$  为条纹对比度,  $\phi(x, y)$  为与物体表面上点  $(x, y)$  到光栅  $G$  的距离有关的相位值。可以通过三步相移技术得到  $\phi(x, y)$  :

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)}, \quad (5)$$

其中,  $I_k = A(x, y) + B(x, y) \cos [\phi(x, y) + k\pi/2]$ ,

$$k = 0, 1, 2, 3.$$

由于  $\phi(x, y)$  是原理相位值, 所以使用 Macy<sup>[2]</sup> 的去包裹处理技术可得到去包裹相位值:

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2n\pi \quad (n \text{ 为整数}). \quad (6)$$

由于莫尔条纹间距为  $pl/d$ , 而第一级条纹间距所对应的相位值  $2\pi$ , 因此, 物表面上任意点  $(x, y)$  距光栅平面的距离为:

$$h(x, y) = (pl/d) [\Phi(x, y)/2\pi] \quad (7)$$

### 3 实验结果与精度分析

#### 3.1 实验结果

为了证实此方法的可行性, 分别对凹凸物体都进行了测量。实验结构如图 1 所示,  $G$  为  $p = 0.2 \text{ mm}$  的矩形光栅, 用碘钨灯作光源, 由于灯的尺寸远小于  $l$ , 可近似为一点光源,  $l = 600 \text{ mm}$ ,  $d = 200 \text{ mm}$ 。用 CCD 摄像机摄像。光栅移动  $0, \Delta h_n/4, \Delta h_n/2, 3\Delta h_n/4$  相当于莫尔条纹相移  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ , 从而得到凸物和凹物的四幅莫尔条纹图, 分别示于图 2, 图 3。

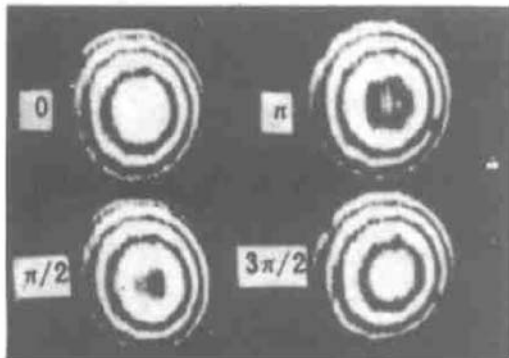


Fig. 2 Moire fringe patterns of a convex surface

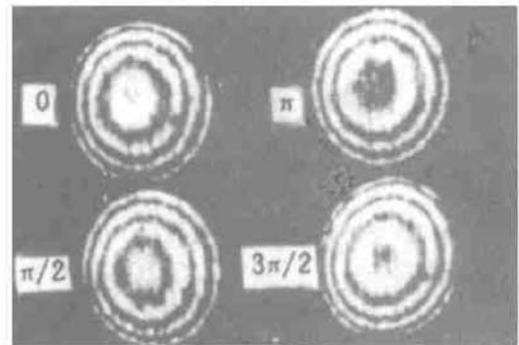


Fig. 3 Moire fringe patterns of a concave surface

经相移算法可得到如图 4、图 5 所示的原理相位图, 最后利用 Macy 的去包裹算法可分别得到它们的去包裹相位值  $\Phi(x, y)$ , 利用(7)式可得到物体的形状分布。图 6, 图 7 分别是图 4, 图 5 的去包裹相位分布图。

由于采用了相位测量方法, 物体的三维坐标可通过相位值得到, 因此就不需要判断物体的凹凸, 而是直接根据相位分布来确定被测物体的表面形状。另外, 从图 4、图 5 可以很容易判断物面的凹凸, 当亮条纹的灰度从里向外是由暗到亮时, 实际物表面为凸, 当亮条纹的灰度从里向外是由亮到暗时, 实际物表面为凹。由于以光栅为参考面, 因此图 4、图 5 所表示的

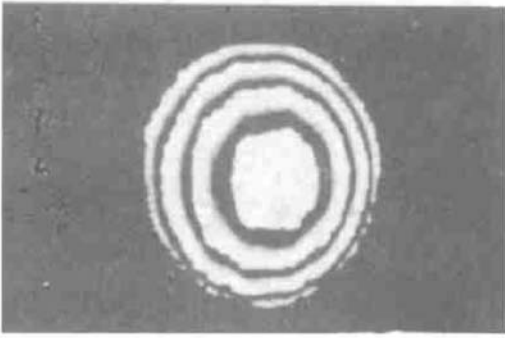


Fig. 4·Wrapped phase pattern of the convex surface

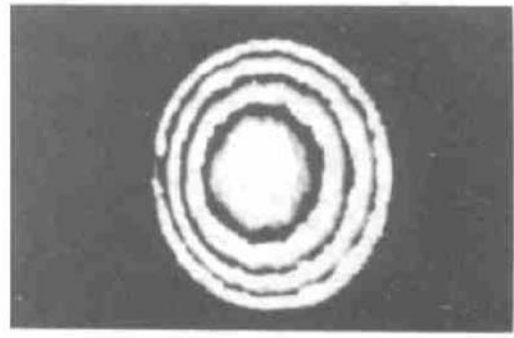


Fig. 5 Wrapped phase pattern of the concave surface

形状与实际相反, 必需对求出结果反向, 图 6, 图 7 为反向后的结果, 其形状与实际吻合。

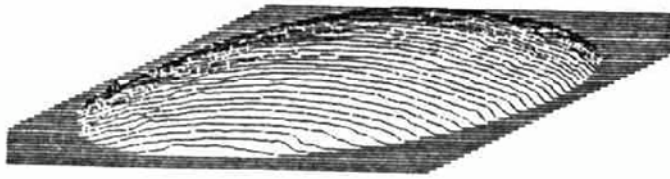


Fig. 6 Unwrapped phase distribution of Fig. 4

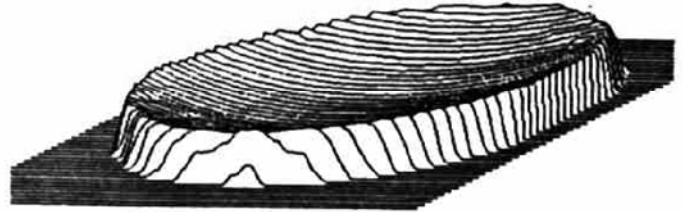


Fig. 7 Unwrapped phase distribution of Fig. 5

### 3.2 精度分析

显然从(1)式简化为(2)式时必然给相位测量带来误差, 设每级条纹的相对误差为  $e_n$ , 则:

$$e_n = [(h_n - \bar{h}_n)/h_n] \times 100\% = (np/d) \times 100\% \quad (7)$$

(7)式表明随着条纹级数  $n$  的增加, 误差将增大, 在本文中  $n = 4$ , 则:

$$e_4 = (4 \times 0.2/200) \times 100\% = 0.4\% \quad (8)$$

因此, 由这一方法引起的误差是很小的, 从而使阴影法的测量精度得到提高。

**结 论** 本文把相移技术引入阴影莫尔轮廓术, 使传统的阴影莫尔法从测量等高线得到三维表面轮廓形状变为得到相位分相后求出物体的三维轮廓。这样不仅不需要判断物体测量表面的凹凸, 而且提高了测量精度, 从而可以实现计算机自动测量。

### 参 考 文 献

- [1] H. Takasaki, Moire topography. *Appl. Opt.*, 1970, 9(6): 1467~1472  
 [2] W. W. Macy, Two-dimensional fringe-pattern analysis. *Appl. Opt.*, 1983, 22(23): 3898~3901

## Automatic Shadow Moire Topography

Zhao Hong      Chen Wenyi      Tan Yushan

(Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 14 May 1994; revised 24 August 1994)

**Abstract** The phase-shift technique is adopted to the conventional shadow moire topography to improve the measuring sensitivity and computational processing. The generation and error of phase-shift and experimental results are presented.

**Key words** phase-shift, shadow moire, automatic processing.