

双计算机光栅莫尔拓扑术

张家军 张 莉 贺安之

刘 立 人

(华东工学院应用物理系, 南京 210014)

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

提出了利用双计算机光栅实现莫尔拓扑检测的方法。理论分析表明, 投影光栅核的横向偏导数为常数是实现灵敏度均匀性检测的必要条件。适当设计光栅核, 就可用等间距直条纹来表征标准面形。被测实物面形的缺陷就可通过莫尔条纹相对于背景直条纹的偏移而定量且直观地反应出来。最后, 以轮胎镜为例进行了计算机模拟和实验验证。

关键词 莫尔拓扑术, 计算机光栅。

1 引 言

莫尔拓扑术^[1,2]是测量三维物体面形的一种简单而有效的方法。在过去的几十年中, 人们不断提出新方法改进这一技术, 如光栅投影^[3], 光栅全息^[4], 莫尔零值检测^[5]等。莫尔等高图虽可判断被测物缺陷的凹凸, 但定量计算却不那么直观。莫尔零值检测的特点是没有背景条纹, 莫尔条纹直接反映被测物缺陷。但是, 定性地判断缺陷的凹凸和定量地计算缺陷的大小都不太方便。其主要原因是这些测量方法不具有灵敏度的均匀性。所谓灵敏度的均匀性是指在测量视场中, 莫尔条纹相对于背景条纹的偏移量与被测物面相对于标准面的高度差处处成正比。基于光栅投影莫尔拓扑的原理, Lohmann等^[6]曾提出一种用计算机光栅代替线性参考光栅来产生等间距直条纹作为背景条纹的方法。不过, 并没有给出理论分析和定量计算公式。

本文将发展一种具有灵敏度均匀性的采用双计算机光栅的莫尔零值拓扑检测方法。在理论分析的基础上, 导出经优化设计的计算机光栅所应满足的条件。并以轮胎镜为例, 进行了计算机模拟和实验验证, 从而为非球面的检测尝试一条新的途径。

2 理 论 分 析

2.1 公式推导

一块任意的 2-D 平面光栅的透射强度可表示为:

$$G(x, y) = (1/2) [1 + \cos 2\pi k(x, y)], \quad (1)$$

其中, $k(x, y)$ 为光栅核。例如, Ronchi 光栅的核为 $k(x, y) = x/d$, d 为光栅周期。这样, 两块光栅 $G_1(x, y)$ 和 $G_2(x, y)$ 所形成的莫尔条纹的中心位置就可由下式表示:

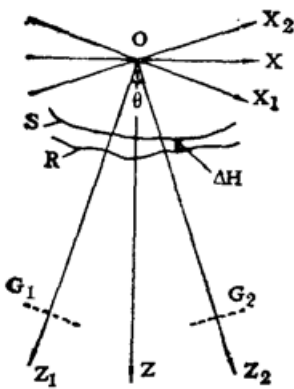


Fig. 1 The setup of the grating projection moiré topography system.

(X_1, Y_1, Z_1) : projection coordinate system;

(X_2, Y_2, Z_2) : projection coordinate system;

G_1 : projection grating;

G_2 : reference grating;

S : standard model surface;

R : real object surface.

$$\Delta k(x, y) = k_1(x, y) - k_2(x, y) = n. \quad (2)$$

其中, $\Delta k(x, y)$ 称为莫尔核, n 为整数. 图1所示为一个典型的光栅投影莫尔拓扑系统. 其中省略了必要的光学成像透镜, 并假设物象间放大系数为1. 假设在观察坐标系统中, 被测物面形可表示为:

$$z_2(x_2, y_2) = H_s(x_2, y_2) + \Delta H(x_2, y_2). \quad (3)$$

此处, $H_s(x_2, y_2)$ 为标准面形, $\Delta H(x_2, y_2)$ 为实物相对于标准面沿观察方向上的高度差.

在几何光学近似下, 先求出沿观察方向得到的投影光栅在被测物面上的变形光栅方程. 因而不难导出, 在参考光栅 G_2 后面所观察到的莫尔条纹的核为:

$$\Delta k(x_2, y_2) = k_1(x_2 \cos \theta + H_s(x_2, y_2) \sin \theta, y_2) - k_2(x_2, y_2) + \frac{\partial k_1}{\partial x_1} \Delta H(x_2, y_2) \sin \theta. \quad (4)$$

(4)式即为光栅投影莫尔拓扑术的一般公式. 它由两部分组成. 等式右边的前两项组成第一部分, 表示背景莫尔条纹. 记为

$$k_b(x_2, y_2) = k_1(x_2 \cos \theta + (H_s(x_2, y_2) \sin \theta, y_2) - k_2(x_2, y_2). \quad (5)$$

这也是标准面形当作被侧面时所观察到的莫尔条纹的核. (4)式右边的最后一项是第二部分, 它反映被侧面相对于标准面形的缺陷, 造成条纹相对于背景条纹的偏移. 记为:

$$k_d(x_2, y_2) = \frac{\partial k_1}{\partial x_1} \Delta H(x_2, y_2) \sin \theta. \quad (6)$$

2.2 讨论

为了便于理解(4)式的一般性, 在讨论光栅的优化设计之前, 先讨论已有的几种特例.

2.2.1 普通的光栅投影莫尔拓扑

投影光栅 G_1 和参考光栅 G_2 均为 Ronchi 光栅时, 图1所示的系统就是普通的莫尔拓扑系统. 令(4)式的莫尔核等于整数, 经适当数学变换, 就可得到被测物的等高线方程.

2.2.2 莫尔零值拓扑检测

这种方法又可分为两种. 一种是投影光栅 G_1 是 Ronchi 光栅, 参考光栅 G_2 是 G_1 在标准模型上的投影沿观察方向看到的变形光栅. 另一种是参考光栅 G_2 是 Ronchi 光栅, 投影光栅 G_1 是这样设计的, 使得沿观察方向所看到的 G_1 在标准模型上的投影的变形光栅为 Ronchi 光栅. 这两种方法的共同之处是, 背景为一片均匀亮场, 被测物为标准模型时, 将不出现莫尔条纹. 实际检测中出现的莫尔条纹就直接反映实物的缺陷.

2.2.3 计算机莫尔

Lohmann 的所谓计算机莫尔是指, 投影光栅 G_1 是 Ronchi 光栅, 参考光栅 G_2 是由计算机产生的, 适当设计 G_2 可使背景条纹为等间距直纹. 这样, 可以更直观地反映被测物的缺陷, 事实上, 投影光栅及参考光栅都可采用计算机光栅, 这将为检测系统的设计带来更大的灵活性.

2.3 计算机光栅的设计

计算机光栅的设计可以根据实际应用的需要进行优化。这里以灵敏度均匀性为优化准则,并兼顾莫尔效应的基本要求来进行设计。

1) 灵敏度均匀性

由(6)式,为使条纹偏移量与实物缺陷成正比,必须使投影光栅核的横向偏导数为常数,

$$\partial k_1 / \partial x_1 = 1/D', D' \text{ 为常数} \quad (7)$$

将上式两边积分得:

$$k_1(x_1, y_1) = (x_1 + f(y_1))/D', \quad (8)$$

其中, $f(y_1)$ 是 y_1 的函数。

2) 背景条纹

为使背景条纹为等间距直条纹,要求 $k_b(x_2, y_2)$ 与 x_2 成正比,令

$$k_b(x_2, y_2) = x_2/D, D \text{ 为条纹间距} \quad (9)$$

将(8)、(9)式代入(5)式可得

$$k_2(x_2, y_2) = (x_2 \cos \theta + H_s(x_2, y_2) \sin \theta + f(y_2))/D' - x_2/D. \quad (10)$$

设计中,应保证莫尔条纹的宽度远大于投影光栅的等效周期,即 $D \gg D'$ 。

既然有许多投影光栅和参考光栅都可满足上述要求,就有必要按照莫尔效应的基本要求进一步优化设计。由于只有具有均匀周期性的两个周期性结构才能产生良好的莫尔条纹,因此,参考光栅核 $k_2(x_2, y_2)$ 以及投影光栅的变形光栅核 $k'(x_2, y_2)$ 应设计得至少具有局部均匀周期性,这可通过选择适当的函数 $f(y)$ 使得光栅核函数的局部梯度近似为常数来实现。例如,虽然 Ronchi 光栅是满足设计要求的最简单的投影光栅,但是,当被测物为轮胎镜时,采用图 2 所示的投影光栅和参考光栅则效果更好。

3 计算机模拟和实验

3.1 计算机模拟

轮胎镜的标准面形可用下列函数表示。

$$z_2(x_2, y_2) = H_s(x_2, y_2) = \sqrt{(R + \sqrt{r^2 - y_2^2})^2 - x_2^2}. \quad (11)$$

其中, R 和 r 为半径。由对称性知,该面形在投影坐标系中的方程为:

$$z_1(x_1, y_1) = H_1(x_1, y_1) = \sqrt{(R + \sqrt{r^2 - y_1^2})^2 - x_1^2}. \quad (12)$$

取 $f(y_1) = H_1(0, y_1)$, 则投影光栅核为:

$$k_1(x_1, y_1) = (x_1 + H_1(0, y_1))/D'. \quad (13)$$

如图 2(a) 所示。

将(13)式代入(10)式得参考光栅核为:

$$k_2(x_2, y_2) = (x_2 \cos \theta + H_s(x_2, y_2) \sin \theta + H_1(0, y_2))/D' - x_2/D. \quad (14)$$

如图 2(b) 所示。

当被测物为标准模型时,就可得到如图 3(a) 所示的莫尔条纹。这是一组等间距直条纹,为了便于对照比较,以下三种模拟中假定被测物下半部始终为标准模型,而上半部经历各种变化。当被测物沿观察方向平移 Δz_2 时,物面上任一点相对于标准面的高度差都是同一个值 Δz_2 ,由灵敏度均匀性原理,莫尔条纹相对于背景条纹的偏移量应处处相等。如图 3(b) 所

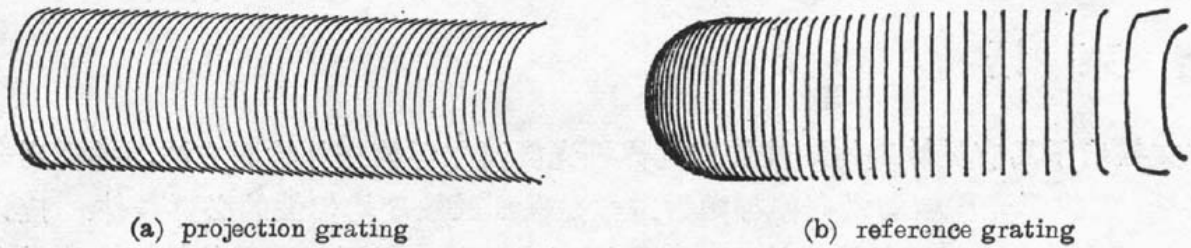


Fig. 2 Computer generated gratings

示. 当被测物沿角平分线方向平移 Δz 时, 物面上各点相对于标准面的高度差(沿 z_2 方向)随横标坐的位置不同而不同, 所以每条条纹的偏移量也不同, 如图 3(c)所示. 当被测物的半径 r 比标准面的 r 大时, 物面上各点的缺陷都不相同. 结果, 条纹不仅偏移了, 而且都向同一方向弯曲, 如图 3(d)所示. 这个结果可用图 4 所示的曲线来解释. 这时面形的缺陷 MD 也随 y_2 而改变, 图中的两条曲线分别代表中央区一周及上边缘一周各点的缺陷与 x_2 的关系. 由灵敏度均匀性原理, 缺陷大则条纹偏移就大. 由于对于任意给定的 x_2 , $y_2=r$ 处的缺陷总是大于 $y_2=0$ 处的, 所以, 图 3(d)中的条纹向同一方向弯曲.

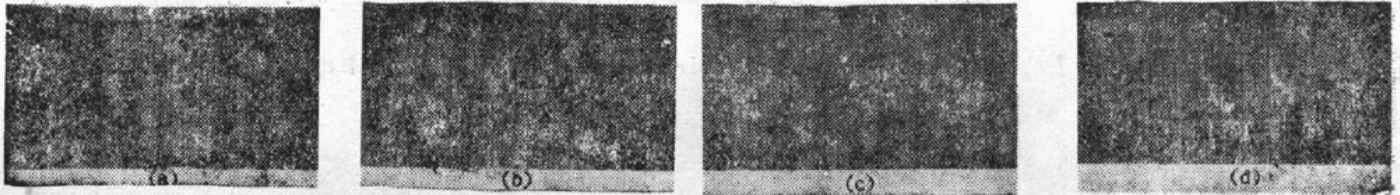


Fig. 3 Moire patterns by Computer generated gratings

(a) Moire pattern of a standard toroidal surface; (b) Moire pattern of a toroidal object with its upper part shifted in the z_2 -direction; (c) Moire pattern of a toroidal object with its upper part shifted in the angle bisect line direction; (d) Moire pattern with an enlarged radius r

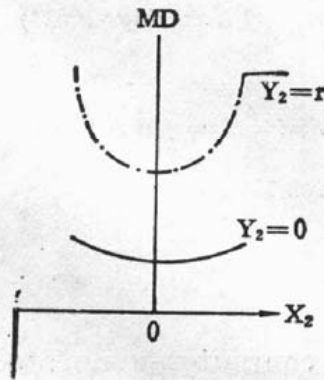


Fig. 4 The plots of the object defects with an enlarged radius r via x_2 for a given y_2

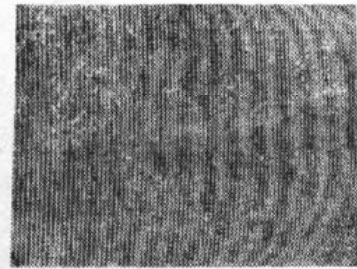


Fig. 5 Moire pattern of the tested toroidal object

3.2 实验

把上述计算机模拟中所设计的投影光栅和参考光栅制作成振幅型光栅, $D'=0.5\text{mm}$, $D=5\text{mm}$, 实验系统如图 1 所示, $\theta=30^\circ$. 所设计的标准轮胎镜面的半径为 $R=50\text{mm}$, $r=16\text{mm}$. 然而, 加工出的实物轮胎镜的 r 约为 17mm , 并且在轮胎面中央区一周留下了深约 0.5mm 的凹槽. 实验结果如图 5 所示. 定性分析可以看出, 上下边缘部分的条纹弯曲表明了实物的半径 r 大于标准模型的 r , 条纹中部的弯曲与实物上的凹槽相对应. 由定量测量, 求得 $\Delta H(x_2, y_2)=0.4\text{mm}$, 与实际相差很小.

4 结 束 语

本文提出了具有灵敏度均匀性的双计算机光栅莫尔零值拓扑检测方法, 并得到一个有益的结论, 即投影光栅核的横向偏导数为常数是保证灵敏度均匀性的必要条件. 应该指出的是整个系统的中心对准是该方法有效性和正确性的基本保证. 采用的校准方法是在调整中观察是否出现了所设计的背景条纹.

参 考 文 献

- [1] M. Meadows, W. O. Johnson, J. B. Allen, Generation of surface contours by moire patterns. *Appl. Opt.*, 1970, **9** (4) : 942
- [2] H. Takasaki, Moire topography. *Appl. Opt.*, 1970, **9** (6) : 1467
- [3] J. Der Hovanesian, Y. Y. Hung, Moire contour-sum, contour-difference, and vibration analysis of arbitrary objects. *Appl. Opt.*, 1971, **10** (12) : 2734
- [4] Y. Yoshino, M. Tsukiji, H. Takasaki, Moire topography by means of a grating hologram. *Appl. Opt.*, 1976, **15** (10) : 2414
- [5] T. Yatagai, M. Idesawa, Use of synthetic deformed gratings in moire topography. *Opt. Commun.*, 1977, **20** (2) : 243
- [6] A. W. Lohmann, P. Lu, Computer generated moire. *Opt. Commun.*, 1980, **34** (2) : 167

Moire topography with double computer-generated gratings

ZHANG JIAJUN ZHANG LI HE ANZHI

(Department of Applied Physics, East China Institute of Technology Nangjing 210014)

LIU LIREN

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica Shanghai 201800)

(Received 28 January 1992; revised 16 March 1992)

Abstract

A method of Moire topography testing with double computer-generated gratings is proposed. It is concluded from theoretical analysis that the lateral derivative of the kernel of the projection grating being a constant is the necessary condition for the uniform accuracy testing. Under the proper designation of grating kernels, the standard model can be characterized by equalinterval straight fringes. Therefor, the defect of the tested object can be found directly and quantitatively form the deviation of moire fringe from the background pattern. Finally, computer simulations and experimental verification on the test of a torid surface are presented.

Key words Moire topography, computer-generated grating.