

# 莫尔形貌测量技术中的计算机图像处理\*

贾 惠 波

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京)

## 提 要

本文介绍了利用投影莫尔技术进行表面质量检验时的莫尔图计算机处理, 给出了计算机数字处理的实验结果。

关键词: 莫尔形貌测量, 计算机图像处理。

## 一、前 言

莫尔条纹早在十九世纪就被人们发现。很早就有人设想利用莫尔条纹进行测量, 五十年代后期<sup>[1]</sup>开始用它作位移测量。但莫尔技术用于表面形貌测量则开始于七十年代初, 自从1970年提出莫尔形貌测量技术以后<sup>[2, 3]</sup>, 人们对其进行了深入和广泛的研究, 并将其应用于各类学科领域, 其中尤以医学中人体观测检查, 实验力学中的应变分析等是较为成功的范例。

在莫尔测量技术中, 测量数据以莫尔条纹的形式出现。通常人们感兴趣的是条纹极值点的位置、条纹间距以及条纹的级次; 而莫尔图中各点的强度值, 条纹之间强度的变化, 甚至图像的对比度等对于表面形状的测量分析并不重要, 可以不予考虑。因此利用计算机时莫尔图进行处理, 提取与表面形状有关信息时, 得到一个二值化的, 仅仅包含了条纹极值点位置的条纹中心线曲线图, 不仅大大减少了莫尔图的数据量, 而且更便于计算和分析。在进行这样的处理过程中, 消除莫尔图中由于激光散斑效应而产生的噪声, 是一个重要问题。所以, 数字滤波, 莫尔图二值化和条纹中心线的萃取, 二值化后图像的消噪、自动分析计算以及作图等构成了莫尔图的计算机处理的全过程。

## 二、莫尔图像的产生

图1是用于工程表面质量检验和缺陷探测的投影莫尔测量系统的原理图。为了得到高对比度的干涉图, 用 He-Ne 激光器作光源。光楔产生的夹角为  $\theta$  的两束激光光束在测量基准面  $F$  上干涉而形成间距为  $d$  的栅状条纹。摄像物镜将这个光栅成像在 CCD 像面  $R$  上。CCD 接收面上感光元件的阵列结构本身可以看作一个参考光栅, 与激光干涉条纹的像叠加产生被测物面的莫尔图。如果激光光束与测量基准面的法线夹角为  $\alpha$ , 则测量系统有如下

收稿日期: 1989年2月13日; 收到修改稿日期: 1989年9月29日

\* 本文是作者1987年在西德夫朗和费物理测量技术研究所工作进修期间所做工作的一部分。

关系

$$\left. \begin{aligned} d &= \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2) \cos \alpha}, \\ \Delta z &= \frac{d}{\tan \alpha}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $\Delta z$  称为系统的测量灵敏度, 它的含义是莫尔图中相邻两个条纹所对应的物面上两点之间的高度差, 即每个干涉条纹级所代表的高度偏差。

工程表面形状可能是相当复杂的, 因而相应的莫尔图也相当复杂。它可能有若干个极值点, 这些点可能是凸的, 也可能是凹的; 莫尔条纹可能太密, 也可能过疏。这给计算机处理带来许多麻烦, 甚至会使处理失败。如果在被测物面  $O$  与基准面  $F$  之间引进一个倾角  $\beta$ , 即在系统中引进一个偏置, 莫尔图的结构将发生变化。调整  $\beta$  的大小, 在系统的测量范围内可以得到一个单极值的、疏密适中的莫尔图。这样的莫尔图适合于计算机系统处理分析。

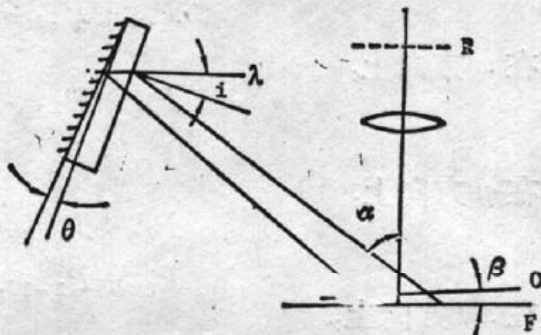


Fig. 1 Projection Moire measurement system

### 三、数字滤波

图像数字滤波可以消除莫尔图中的相干噪声。低通滤波工作简单, 处理速度快, 是消除噪声的有效方法。

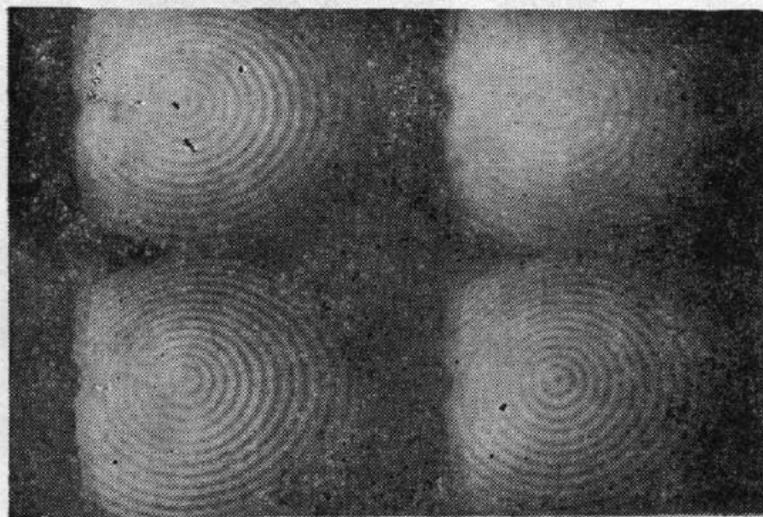


Fig. 2 Digital Filtering

1. [left-down] original Moire pattern
2. [right-down] filtered Moire pattern by  $3 \times 3$  matrix
3. [left-up] filtered Moire pattern by  $5 \times 5$  matrix
4. [right-up] filtered Moire pattern by  $7 \times 7$  matrix

不加权的低通数字滤波原理是图像中每个像点的灰度值取其邻近各像点的平均值。这个邻域可以是一个矩形窗口, 称之为滤波矩阵。矩阵的大小对滤波效果有显著的影响。一般地说, 矩阵大, 滤波效果好, 而处理时间要长一些。莫尔图中, 条纹间灰度的变化是正弦的, 因此滤波矩阵大小取决于条纹间距。条纹密, 必须选择较小的滤波矩阵, 否则会造成莫尔图中有用信息的损失。图 2 示出滤波矩阵对滤波效果的影响。

工业生产中要检验的表面各种各样, 因而其莫尔图也各不相同。为了对不同的莫尔图都能获得满意的滤波效果, 滤波矩阵的大小最好是可变的。可以在滤波程序中设计一个输入参数, 根据当时的具体情况、操作者的经验或者通过试验输入矩阵参数, 从而实现最合适的数字滤波。

#### 四、二值化和条纹中心线的萃取

二值化处理可以采用 Yatagai 等人的算法<sup>[5]</sup>, 在这种方法中, 选择一个  $5 \times 5$  的像点矩阵。判断一个像点是否在条纹中心线上(如图 3 所示)的条件是

$$P_{00} + P_{-10} + P_{10} < P_{02} + P_{-1-2} + P_{1-2}$$

在  $x$  方向上:

$$P_{00} + P_{-10} + P_{10} < P_{02} + P_{-12} + P_{12};$$

$$P_{00} + P_{0-1} + P_{01} < P_{2-1} + P_{20} + P_{21}$$

在  $y$  方向上:

$$P_{00} + P_{0-1} + P_{01} < P_{-20} + P_{-2-1} + P_{-21};$$

$$P_{00} + P_{1-1} + P_{-11} < P_{22} + P_{21} + P_{12}$$

在  $xy$  方向上:

$$P_{00} + P_{1-1} + P_{-11} < P_{-2-2} + P_{-1-2} + P_{-2-1};$$

$$P_{00} + P_{11} + P_{-1-1} < P_{-22} + P_{-12} + P_{-21}$$

在  $-xy$  方向上:

$$P_{00} + P_{11} + P_{-1-1} < P_{2-2} + P_{2-1} + P_{1-20}$$

$P_{2-2}$	$P_{2-1}$	$P_{20}$	$P_{21}$	$P_{22}$
$P_{1-2}$	$P_{1-1}$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$
$P_{0-2}$	$P_{0-1}$	$P_{00}$	$P_{01}$	$P_{02}$
$P_{-1-2}$	$P_{-1-1}$	$P_{-10}$	$P_{-11}$	$P_{-12}$
$P_{-2-2}$	$P_{-2-1}$	$P_{-20}$	$P_{-21}$	$P_{-22}$

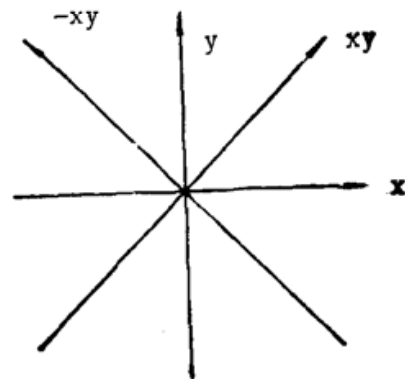


Fig. 3 Algorithm of Binary-coding Moire

莫尔形貌测量中, 测量精度主要取决于系统的灵敏度, 即每个干涉级所代表的高度差。如果从一条莫尔条纹的极大值和极小值各得出一条条纹中心线, 则可以提高系统的灵敏度, 从而提高测量精度。利用上面的判据很容易实现这一点, 只要把有关公式中的运算符号“ $<$ ”改为“ $>$ ”即可。二值化程序设计一个控制参数, 用来控制萃取一条正常的条纹中心线, 或者产生加倍数目的条纹中心线。

通过二值化处理得到的中心线曲线一般还比较粗, 不能适应自动分析测量处理, 必须做进一步的所谓浸蚀减细处理, 以保证曲线在  $x$  或  $y$  方向上有一个为单值的。即干涉条纹中心线图可以通过两步处理(二值化和二值化条纹的浸蚀减细)从莫尔图中获得。

#### 五、二值化莫尔图的消噪处理

尽管通过选择合适的滤波矩阵, 大大降低了莫尔图中的相干噪声, 但是二值化处理后的莫尔条纹中心线图中仍然有噪声存在。噪声出现在条纹中心线上时表现为断线点, 而出现在背景上则形成不规则的噪波点群。这两类噪声都应当消除。

为了消除二值化莫尔图中的噪声，作者发展了一种自动地沿着莫尔中心线进行处理的称之为条纹循迹的算法。用该算法很容易测得线的长度，称之为链长。循迹算法的前提是曲线应是连续的、平滑的，前进方向不应有突然改变(90°改变)。莫尔条纹是满足这个条件的。

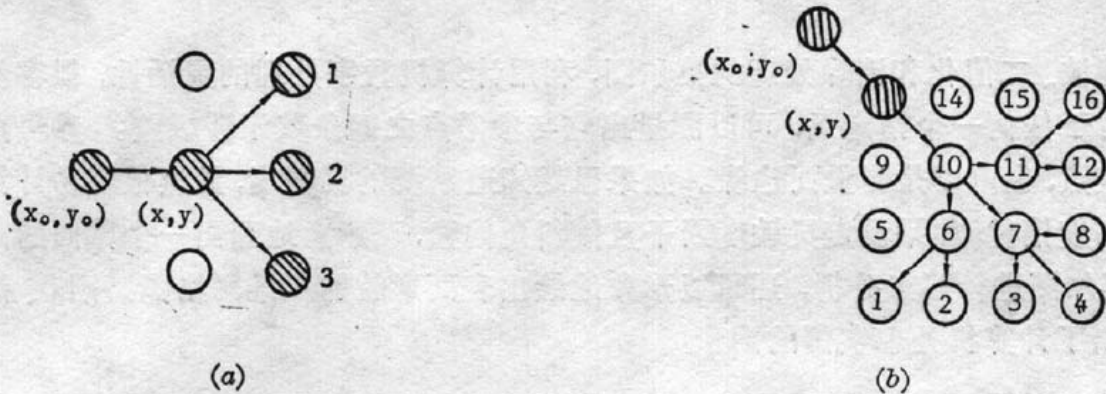


Fig. 4

循迹原理如图4(a)所示。设点 $(x, y)$ 是条纹线上一点。如果点 $(x_0, y_0)$ 是线上前一个相邻点，则下一个相邻点只能出现在位置1, 2或3上。选择适当的像点矩阵和相应的判据，就可以沿线连续循迹。如果在循迹位置上找不到下一个相邻点，那么或者是到了条纹线的端点，例如遇到图的边缘；或者遇到了断点。在循迹过程中随时测量链长，根据噪声通常是无规则的，不会有很大链长值存在，利用预先指定的链长值，就可以把小链长的点线看作噪声而消除。

利用循迹算法，还可以对包括不多的连续像点的断线点自动填补。图4(b)中点 $(x, y)$ 和点 $(x_0, y_0)$ 是条纹上两个相邻像点，下面是一个断点。取一个4×4矩阵。如果点3, 4和8中有一个在条纹上，则可以填补点7和10；如果点1或者2在线上，则填补点6和10；而如果点12或者16在线上，则填补点10和11。

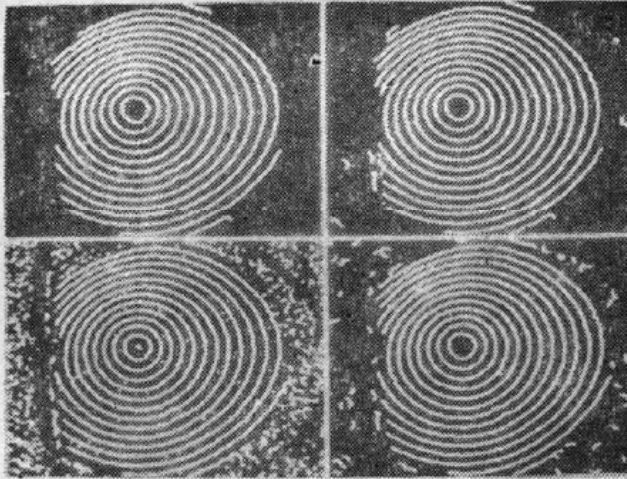


Fig. 5 Removing Noise Processing

1. [left-down] binary processed Moire pattern
2. [right-down] removing noise processing with chain-length 5
3. [right-up] removing noise processing with chain-length 10
4. [left-up] removing noise processing with chain-length 20

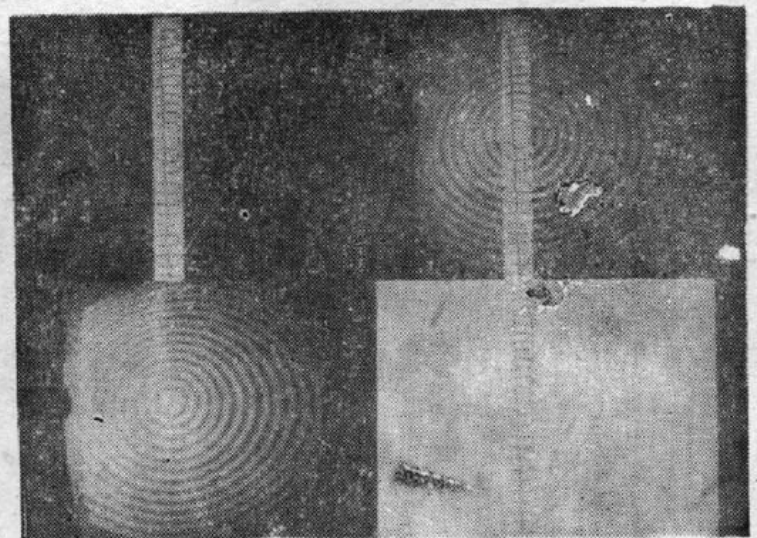


Fig. 6 Outline Curve of Section Part through Limit

利用链长做值判据，可以消除二值化莫尔图中的噪声。显然，链长值直接影响消噪效果。图5示出了链长值对消噪效果的影响。链长值大，消噪效果好，但破坏信息的可能性也

大。设计一个链长参数,根据具体的条纹结构赋予不同的值,则有可能不损失条纹信息而获得令人满意的消噪效果。

## 六、莫尔图的分析测量

经过滤波、二值化和消噪处理的莫尔图,利用计算机数字处理的灵活性,很容易进行分析测量。对于任何一个指定点,可以测量出它与参考点之间条纹干涉级差。参考点可以是另一个指定点,也可以是测量面边缘。如果已经知道系统的灵敏度,显然很容易计算出任意点的相对高度偏差;如果设定灵敏度因子及倾斜角偏置,可示意地画出一个截面的高度轮廓曲线;对莫尔图进行逐点分析,还可以形象地绘出表面形貌的三维网格图。图5、图6和图7分别示出了计算机处理实例的图形。

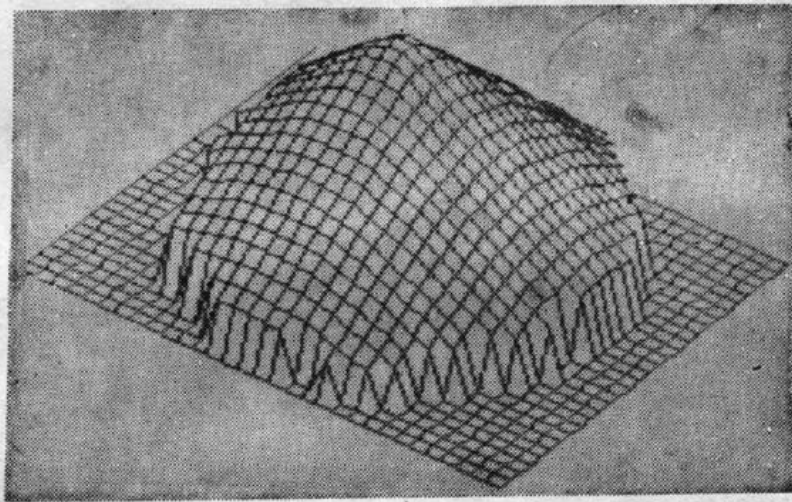


Fig. 7 3-Dimension Net Graph

### 参 考 文 献

- [1] G. T. Reid; *Opt. & Lasers in Engineering*, 1984, No. 5 (May), 63~93.
- [2] H. Takasaki; *Appl. Opt.*, 1970, 9, No. 6 (Jun), 1467~1474.
- [3] D. Meadows *et al.*; *Appl. Opt.*, 1970, 9, No. 4 (Apr), 942~948.
- [4] L. Pirodda; *Opt. Engineering*, 1982, 21, No. 4 (Jul/Aug), 640~649.
- [5] Toyohiko Yatagai *et al.*; *Opt. Engineering*, 1982, 21, No. 3 (May/Jnn), 432~435.

## Application of projection Moire in the defect detecting test of surface\*

JIA HUIBO

(Department of Precision Instruments & Mechanology of Tsinghua University, Beijing)

(Received 13 February 1989; revised 29 September 1989)

### Abstract

The principle and experimental system of projection Moire used in the defect detecting test of surface are introduced in this paper. The result of computer-based digital moire pattern processing is given.

**Key words:** projection Moire; computer pattern processing.

\* This paper is one part of author's whole work during he was a visiting scholar in Fraunhofer-Institut fuer Pysikalische Messtechnik Freiburg, BRD.

\*\*\*\*\*

《光学学报》1989年第12期第1078~1084页作补正如下,并向作者、读者致歉!

## 二维光学沃尔什-哈特曼变换

陈岩松 郑师海 李德华 杨国桢

(中国科学院物理研究所,北京)

《ACTA OPTICA SINICA》, 1989, Vol. 9, No. 12 (Dec), pp. 1078~1084

### 2-Dimensional optical Walsh-Hadamard transform

CHEN YANSONG, ZHENG SHIHAI, LI DEHUA AND YANG GUOZHEN

(Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing)