二维横向剪切干涉仪

陈钰明　冯大任　邹海兴

（中国科学院上海光机所）

提要：一张剪切干涉图不足以描述一个波面。要重构一个任意形状的波面，必须用两张正交方向剪切的干涉图。本文研究了两种类型的二维横向剪切干涉仪：正交剪切棱镜型和网格光栅型。论述了用干涉图数据来重构波面的方法，并用这种方法处理了我们实验中所获得的干涉图。

Two dimensional lateral shearing interferometer

Chen Yuming　*Feng Daren*　*Zou Haixing*

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

Abstract: A single shearing interferogram is not sufficient to describe a wavefront. Two interferograms sheared in orthogonal directions must be used to reconstruct the wavefront of any arbitrary shape. Two types of two dimensional lateral shearing interferometers have been studied: orthogonal shearing prism and crossed grating. A method is described that uses data obtained from the interferograms to reconstruct the wavefront. It was used in processing the interferograms obtained in our experiment.

我们研制了两种稳定而简单的二维横向剪切干涉仪。一种是正交剪切棱镜型（见图1）：它由两块剪切方向互相垂直的剪切棱镜及分光系统构成，剪切量是固定的。图2是二维横向剪切棱镜干涉仪装置示意图。另一种是网格光栅型（见图3），它是 Ronchi 型光栅干涉仪的一种改进[1,2]，由两块全息摄影或微缩摄影制成的网格光栅平行迭置而成。通过转动两块光栅板的相对角度，可以任意改

图1　二维棱镜剪切干涉仪

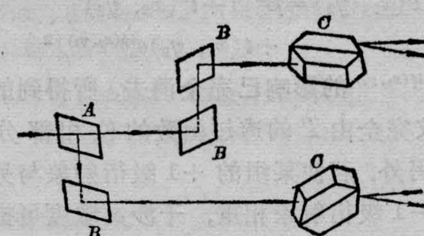


图2　二维横向剪切棱镜干涉仪装置示意图
A—分光板；B—反射镜；C——维剪切棱镜

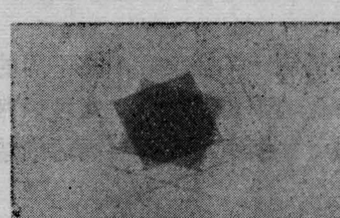


图3　二维光栅剪切干涉仪

收稿日期：1979年11月30日。

变剪切量来变化干涉仪的有效灵敏度以适应被测系统的要求。

二维剪切干涉条纹的数据处理

二维剪切干涉图的解释不象台曼-格林等干涉仪所获得的干涉图那样简单，这是因为干涉出现在两个不完整的波面之间，而不是一个不完整波面(被检测系统)和一个完整波面(参考波面)之间，因此需要相当的计算量，我们采用的方法基本上类似于 Rimmer 所用的方法[3]。

如果所求的波面是 $\omega(x, y)$，则正交方向的两个剪切值可写为：

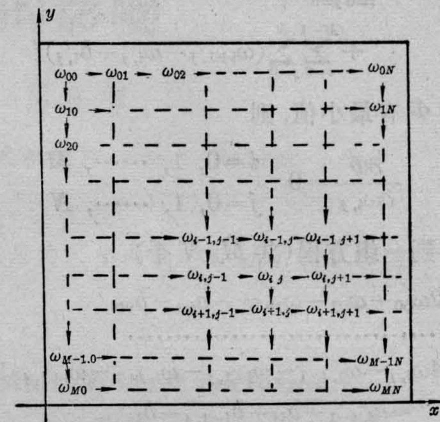
$$\begin{cases} a(x, y, S)=\omega(x+S, y)-\omega(x, y) \\ b(x, y, T)=\omega(x, y+T)-\omega(x, y) \end{cases} \tag{1}$$

这里 a、b 为不同方向剪切图上的干涉条纹的测量值；S 和 T 分别为 x 方向和 y 方向各自对应的剪切量。这两个剪切量可以相同，也可以不同。这样就可以通过测量相隔剪切距离的那些点上的 a、b 值来求出未知波面 $\omega(x, y)$。

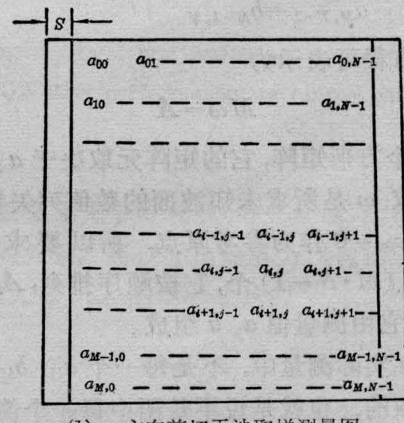
假定被测波面按剪切量 S、T 为间隔分割，相应点分别表示为 ω_{00}, ω_{01}, ……, ω_{MN} (见图 4(a))。箭头指前后两个波面迭加，也表示计算时所取的路线。图 4(b) 和图 4(c) 分别是 x 方向和 y 方向剪切干涉取样测量图，a、b 分别表示测量值，它们与 ω 的关系按剪切原理是：$a_{ij}=\omega_{i, j+1}-\omega_{i, j}$, $b_{i, j}=\omega_{i+1, j}-\omega_{i, j}\cdots$ 等等。即

$$\begin{cases} a_{00}=\omega_{01}-\omega_{00} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ a_{ij}=\omega_{i, j+1}-\omega_{i, j} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ a_{M, N-1}=\omega_{M, N}-\omega_{M, N-1} \end{cases}$$
$$\begin{cases} b_{00}=\omega_{10}-\omega_{00} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ b_{i, j}=\omega_{i+1, j}-\omega_{i, j} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ b_{M-1, N}=\omega_{M, N}-\omega_{M-1, N} \end{cases} \tag{2}$$

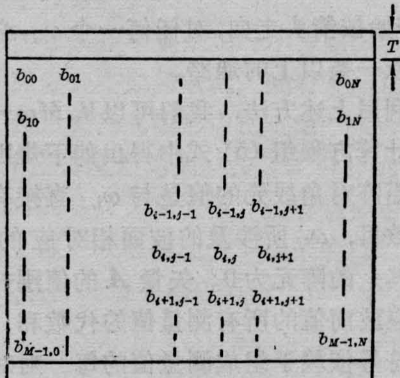
这里有 $[M(N-1)+N(M-1)]$ 个方程式，求 $M\cdot N$ 个未知数，因此可以从中选择 $M\cdot N$ 个方程求出 $M\cdot N$ 个 $\omega_{i, j}$。但由于 a、b 是选定点测量值，存在一定的误差，因此不同的选



(a) 按剪切量 S(x 方向剪切)、T(y 方向剪切)为间隔的被测波面 ω 示意图



(b) x 方向剪切干涉取样测量图



(c) y 方向剪切干涉取样测量图

图 4

择路线会算出不同误差的结果。要合理地减少误差，可以使其均方根差为极小值。令 Φ 为：

$$\Phi=\sum_{i=0}^{M}\sum_{j=0}^{N-1}(\omega_{i,j+1}-\omega_{i,j}-a_{i,j})^2+\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N}(\omega_{i+1,j}-\omega_{i,j}-b_{i,j})^2 \tag{3}$$

要使 Φ 有最小值，则

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\omega_{i,j}}=0 \qquad \begin{matrix} i=0,\ 1,\ \cdots\cdots,\ M \\ j=0,\ 1,\ \cdots\cdots,\ N \end{matrix} \tag{4}$$

则得到一组方程（共 $M\cdot N$ 个）

$$\begin{cases} 2\omega_{00}-\omega_{01}-\omega_{10}=-a_{00}-b_{00} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ 4\omega_{i,j}-\omega_{i,j-1}-\omega_{i-1,j}-\omega_{i,j+1}-\omega_{i+1,j} \\ \quad =a_{i,j-1}-a_{ij}+b_{i-1,j}-b_{ij} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ 2\omega_{M,N}-\omega_{M-1,N}-\omega_{M,N-1} \\ \quad =a_{M,N-1}+b_{M-1,N} \end{cases} \tag{5}$$

这组方程可表示为

$$\boldsymbol{M\omega}=\boldsymbol{A} \tag{6}$$

M 是个方形矩阵，它的矩阵元取决于 a、b 值的选取；$\boldsymbol{\omega}$ 是所求未知波面的数值列矢量，我们取 $\omega_{00}=0$ 作为参考原点，所以要求解的 $\omega_{i,j}$ 共 $(M\cdot N-1)$ 个，它按顺序排列；$\boldsymbol{A}$ 是列矢量，它由测量值 a、b 组成。

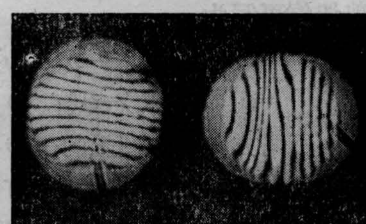
在实际测量中，不是每一个 a_{ij}、b_{ij} 值都要选取的，也就是说不是图中每一个箭头都是必须的。可以删去一些，但有一个原则，从 ω_{00} 开始按箭头走向，对任何一个 $\omega_{i,j}$ 必须有一条或一条以上的通路。

利用上述方法，我们可以从 $\boldsymbol{M\omega}=\boldsymbol{A}$ 形式的计算方程组 (5) 式中得出如下规则：M 方形矩阵对角线元的值是与 $\omega_{i,j}$ 直接有关的波面数目，ω_{ij} 所涉及的波面相对应的元是 -1，其余的阵元为 0。矢量 $\boldsymbol{A}$ 的值刚好是包括对应波面值的所有测量值的代数和，测量值的符号依赖于组成测量值的每一对对应波面的关系。这样，求解方程组(6)就得到在相隔剪切距离的每一点上所求的波面值。

实验结果及分析

我们在二维剪切棱镜干涉仪上进行了测试。被测系统放在干涉仪前面，将 6328 Å 的 He-Ne 激光作为光源获得了干涉图（见图 5）。棱镜的反射面和分光面之间的夹角为

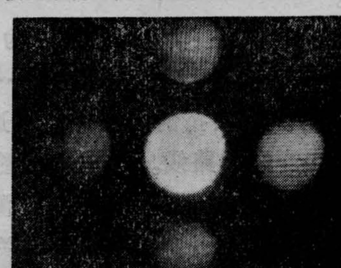
(a)



(b)

图 5　利用二维剪切棱镜干涉仪获得的干涉图

(a) 被测系统为一块加工质量较差的光学玻璃；
(b) 被测系统为被烟扰动的热空气流



(a) 无畸变时

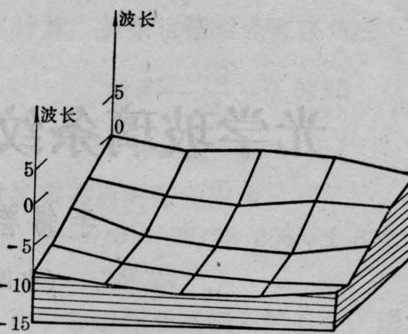
(b) 畸变时

图 6　利用二维剪切光栅干涉仪测试畸变玻璃获得的干涉图

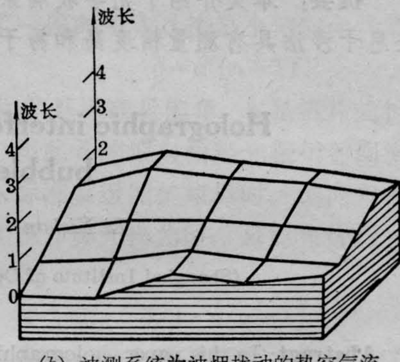
10′，由图可知剪切量大约为0.3左右。

我们在二维剪切光栅干涉仪中，将He-Ne激光通过被检系统后引向40条/毫米的光栅中，用两块光栅相对转动来变化剪切量，获得合适的干涉图(见图6)。干涉图花样中心是零级非衍射光束，周围的四个花样是由两块光栅所产生的在x方向的±1级和在y方向的±1级衍射花样交迭相干。调整光栅间的相对转动量可获得合适的剪切量。

对实验所得的互相正交的两种剪切干涉条纹进行了数据处理，以重新构造出原始的波面。将图5所示的干涉图用双坐标网格板来测定(见图7，网格距离等于剪切距离)，大约25个点均匀分布在干涉图上，对每张干涉图都用一个公共的坐标系统，测量黑条纹(或白条纹)中心位置均可确定数据。对于每一点的测量，必须注意条纹相对的级。图8为图7所示干涉图中数据处理获得的波面。

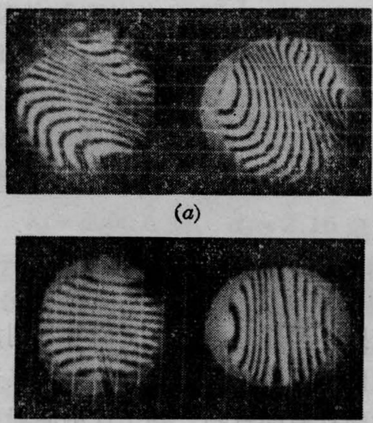


(a) 被测系统为一块加工质量较差的光学玻璃



(b) 被测系统为被烟扰动的热空气流

图8 利用图7所示的干涉图数据处理所得的重新构造波面二维图示


(a)

(b)

图7 用网格板来测定干涉条纹数据的示意图

参考文献

[1] V. Ronchi; *Appl. Opt.*, 1964, **3**, 437.

[2] A. Cornejo, D. Malacara; *Appl. Opt.*, 1970, **9**, 1897.

[3] M. P. Rimmer; Appl. Opt., 1974, **13**, 623.

(上接第31页)

选择透镜半径可以大大提高耦合效率，纤维相同，球形半径为30微米的纤维其耦合效率比$R=60$微米的高8%，计算表明，球形半径等于纤维半径有最大接收角，即最大耦合效率。而此种纤维平面端面的耦合效率只有22%。F_{46}光学纤维，因为折射率差和芯径都很大，所以计算得到的耦合效率可达80%以上。

参考文献

[1] C. A. Brackett; *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**, No. 6, 2636.

[2] *Bell. Syst. Tech. J.*, 1972, **51**, No. 3, 573.