

用一维阵列探测器测量二维波面倾斜

蒋志平 钟海荣 陆启生 刘泽金

(国防科技大学应用物理系, 长沙 410073)

提要 提出了一种用一维阵列探测器测量光束的二维波面倾斜的方法, 可用于高频倾斜测量, 给出了初步实验验证。

关键词 波面倾斜, 阵列探测器

1 引 言

在许多应用中需要测量光束波面倾斜, 例如自适应光学、光束的大气传输、光束的自动准直及利用激光束测量物体的倾斜等。一般说来这些问题是二维问题, 即要求测量二维的波面倾斜。倾斜的测量可等价于光束光强的质心测量, 早期是用四象限探测器来完成, 随着阵列器件(如 CCD 光电探测器)的发展, 四象限探测器已被阵列器件所取代。为完成二维光强质心测量需用面阵器件, 阵列器件由大量探测器组成(如面阵 CCD 有几十万个光敏元), 数据的传输通常是串行的, 因此帧频不可能很高, 如常用的 CCD 摄像机为 25 Hz, 这对快速测量来说是不够的。相对于面阵器件而言, 线阵器件的探测器数量少得多, 帧频也就高得多, 能否用线阵器件来测量二维波面倾斜? 本文提出一种用一维阵列探测器测量二维波面倾斜的方法, 通过初步实验证明了其可行性。

2 原 理

A. W. Lohmann 等人指出^[1], 在一个 $2f$ 光学系统的入射面(前焦面)放置一个特殊分布的曲线光阑可在输出面(后焦面)获得 Airy 函数、Laguerre 多项式, 这两个函数是一维的。受该文的启发, 我们考虑这样一个问题, 能否把 Lohmann 的方法用于光束波面倾斜的测量? 幸运的是, 只要用一个双直线光阑就可以将二维波面倾斜问题变为一维问题。

如图 1 的 $2f$ 光学系统, 设入射光为平面波, 可用 $\exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}(o_x x + o_y y)\right]$ 表示, 其中 o_x, o_y 分别是 x, y 方向的倾斜角, 设输入面透过率函数为 $T(x, y)$, 则输出面的光振幅 $E(\xi, \eta)$ 由下面的傅里叶变换给出

$$E(\xi, \eta) = -\frac{i}{\lambda f} \int_{-a}^a \int_{-a}^a T(x, y) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}(o_x x + o_y y)\right] \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x\xi + y\eta}{f}\right) dx dy \quad (1)$$

λ 是光波长, f 是透镜焦距, a 是透镜的尺寸, 这里为方便, 假设透镜是正方形, 实际上并不一定

要这样, 设透过率为双直线

$$T(x, y) = \delta(y - c_1x) + \delta(y - c_2x) \quad (2)$$

两常数 c_1, c_2 分别是两直线的斜率, 将(2)式代入(1)式有

$$\begin{aligned} E(\xi, \eta) &= -\frac{i}{\lambda f} \int_{-a}^a \int_{-a}^a [\delta(y - c_1x) + \delta(y - c_2x)] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\theta_x x + \theta_y y + \frac{x\xi + y\eta}{f}\right)\right] dx dy \\ &= -\frac{i}{\lambda f} \left[\int_{-a}^a \exp(iC_1x) dx \int_{-a}^a \exp(iC_2x) dx \right] = \frac{2a}{\lambda f} [\text{sinc}(C_1a) + \text{sinc}(C_2a)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$C_i = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\theta_x + \theta_y c_i + \frac{\xi + \eta c_i}{f} \right), \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

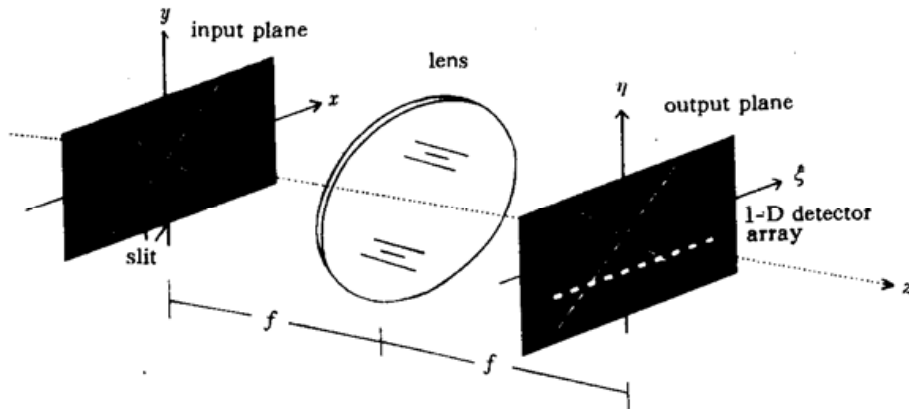


Fig. 1 Schematic diagram of the optical setup

由 sinc 函数的性质可知在(3)式中如果 $a \rightarrow \infty$, $\text{sinc}(xa) \rightarrow \delta(x)$, 所以

$$E(\xi, \eta) |_{a \rightarrow \infty} = \frac{2a}{\lambda f} [\delta(C_1) + \delta(C_2)] \quad (5)$$

(5) 式中函数 $\delta(x)$ 的定义是 $\delta(0) = 1, \delta(x \neq 0) = 0$ 。由(5)式不为零的 $E(\xi, \eta)$ 应满足

$$C_i = 0, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

在输出面光强分布为两条亮的直线, 由(6), (4)式该两直线满足如下方程

$$\theta_x + \theta_y c_i + \frac{\xi + \eta c_i}{f} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

(ξ_1, η_1) 和 (ξ_2, η_2) 分别是输出面上两直线上的点。解(7)式可得

$$\left. \begin{aligned} \theta_x &= \frac{1}{f} \frac{\xi_1 c_2 - \xi_2 c_1 + c_1 c_2 (\eta_1 - \eta_2)}{c_1 - c_2} \\ \theta_y &= \frac{1}{f} \frac{\xi_2 - \xi_1 + \eta_2 c_2 - \eta_1 c_1}{c_1 - c_2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(8) 式的含义是, 只要测量出两直线上点的坐标即可求出波面的二维倾斜, 而这可用一维阵列探测器来实现。为使用方便, 可简化(8)式。首先让线阵列探测器平行于 ξ 轴, 这样一来总有 $\eta_1 = \eta_2 = \text{常数}$; 另外不难理解, 对波面倾斜的测量重要的是其变化, 因此不失一般性, 考虑到动态倾斜, 可将(8)式写作

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_x(t) &= \frac{1}{f} \frac{\Delta\xi_1(t)c_2 - \Delta\xi_2(t)c_1}{c_1 - c_2} \\ \Delta\theta_y(t) &= \frac{1}{f} \frac{\Delta\xi_1(t) - \Delta\xi_2(t)}{c_2 - c_1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

t 是时间变量, (9) 式中与时间有关的量都指的是相对于 $t = 0$ 时刻的变化, 例如 $\Delta\theta_x(t) = \theta_x(t) - \theta_x(0)$ 。此外, 若取 $c_2 = -c_1 = 1$, 则有

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_x(t) &= -\frac{1}{2f} [\Delta\xi_1(t) + \Delta\xi_2(t)] \\ \Delta\theta_y(t) &= \frac{1}{2f} [\Delta\xi_1(t) - \Delta\xi_2(t)] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

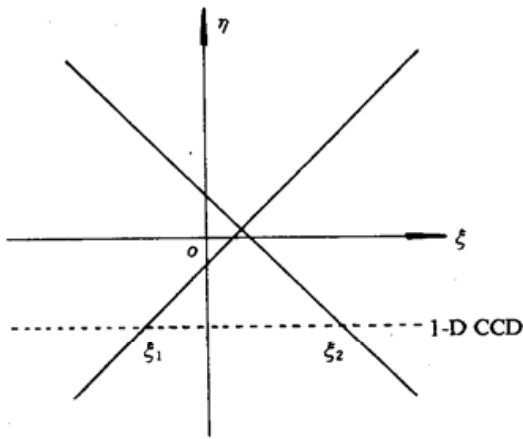


Fig. 2 Intensity distribution at the output plane

线阵列探测器也可平行于 η 轴放置, 得到的公式类似于 (10) 式, 但本质是相同的。

实际测量时 a 不可能为无限大, (3) 式不能简化为 (5) 式, 但 $\text{sinc}(x)$ 函数在 $x = 0$ 处有一主极大, 上面的讨论只要理解为针对主极大的即可。

图 2 是输出面上的光强分布示意图及线阵 CCD 的放置 (图中虚线), 一般地入射光的波面有倾斜, 所以输出面上的两条亮线的交叉点不在原点。

3 实验验证

为验证上述设想的可行性, 我们进行了简单、初步的实验, 用来测量光楔的楔角。实验装置如图 1 所示, 公式 (2) 的光阑用照相的方法来实现, 宽度为 0.3 mm 的垂直两直线通过照相缩小 10 倍, 最后得到的光阑的宽度为 0.03 mm (从原理上来说光阑的宽度越小越好, 但考虑到它对光强的影响及制作的方便, 取 0.03 mm 左右是比较好的)。He-Ne 激光器输出的激光束传输约 10 m 后入射至位于输入平面 (在透镜的前焦面) 的狭缝光阑上, 光阑处光束的半径约为 10 mm, 透镜的焦距约为 1.08 m。线阵探测器用可见光线阵 CCD, 光敏元的间隔为 14 μm , 像元数为 2048, 数据经 A/D 转换后由计算机处理。图 3 是 CCD 测得的光强分布, 横坐标是 CCD 的像元位置。图 3(a) 是不加玻璃片时的光强分布; 图 3(b) 是在输入面的光阑前加玻璃片后的光强分布; 然后让玻璃片旋转约 90°, 再测量输出面上的光强分布 [图 3(c)]。计算光强分布质心时对光强分布作了适当的阈值处理。玻璃片具有倾角, 相当于入射光有一倾斜。与图 3(a) 相比, 图 3(b) 中两亮线的光强质心相互靠近, 移动量差不多, 由 (10) 式可知此时波面的倾斜主要是在 y 方向; 图 3(c) 中的两亮线的光强质心同时向左移动, 说明此时的倾斜主要是在 x 方向 [注意图 3(c) 中玻璃片相对图 3(b) 旋转了约 90°, 与这里测的结果相符]。经数据处理后所得的波面倾角分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_x &= 0.00' \\ \Delta\theta_y &= 1.92' \end{aligned} \right\} \quad \text{对应于图 3(b)} \quad (11a)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_x &= 1.99' \\ \Delta\theta_y &= 0.00' \end{aligned} \right\} \quad \text{对应于图 3(c)} \quad (11b)$$

玻璃片的倾角约为 $4.0'$, 折射率约 1.5, 因此引入的倾角为 $\varphi \approx (1.5 - 1) \times 4.0' = 2.0'$, 与 (11) 式基本相符, 说明测量是可靠的, 本方法是可行的。当 $\varphi \ll 1$ 时, 有关系

$$\varphi^2 = (\Delta\theta_x)^2 + (\Delta\theta_y)^2 \quad (12)$$

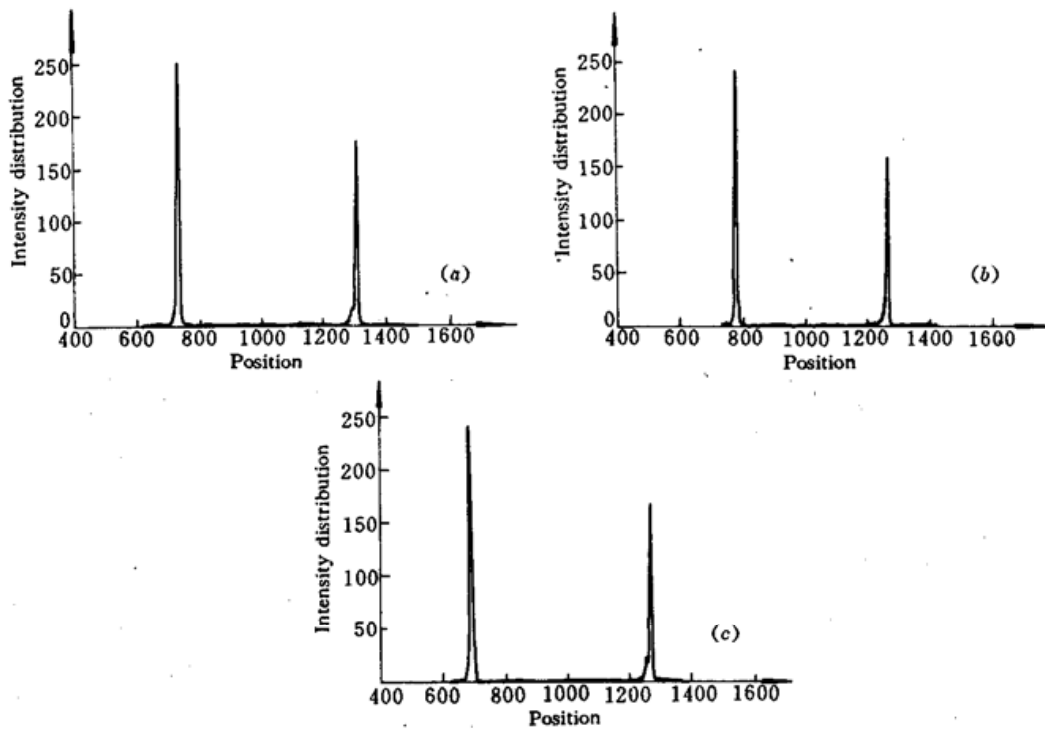


Fig. 3 CCD detected intensity distributions

(a) original; (b) a glass plate is inserted; (c) the glass is about 90° rotated

在实验中当光楔引入的波面倾斜不正好是在 x 或 y 方向时, 测量的结果符合 (12) 式, 因为是原理性实验, 没有采取严格的措施来消除各种误差, 主要的误差来源有: (1) 玻璃片与光路并非严格垂直, 图 3(b), (c) 两次实验中玻璃片引入的波面倾斜量是不同的, 这是造成 (11a), (11b) 误差的主要原因; (2) 光阑并非严格 45° 角放置 (即不能严格保证 $c_2 = -c_1 = 1$), 这是系统误差, 在实际应用中可以消除; (3) 整个实验装置放置在普通的桌面上, 由于机械振动系统本身即有动态的波面倾斜。需要指出的是, 这种方法测量的是波面倾斜, 由于机械振动等导致的波面倾斜也一起被测量了。我们用该方法作二维波面倾斜的测量, 实现了光束的二维稳定控制^[2], 进一步的工作及其应用正在进行当中。

4 结 论

本文提出一种用线阵探测器测量二维波面倾斜的方法, 并通过实验验证了其可行性, 主要的优点是测量速度快。线阵探测器的帧频要比面阵探测器高 2 个数量级以上, 因此其测量速度也可高两个数量级以上 (例如可做到几 kHz), 可以满足要求快速测量的场合。从原理上来说该方法具有较高的灵敏度和精度, 由 (10) 式可知与线阵探测器用于一维探测的灵敏度和精度相同。探测器的价格可能并不重要, 但当只有线阵列器件时也可作为替代办法。该方法显然也存在一些问题, 例如光强的损失, 这决定了它只能用于光束较强的场合 (如果将两条垂直的狭缝改成两组垂直的狭缝, 每组内有很多平行的狭缝, 则可提高入射光的利用率。这样的光阑可用照相法制得)。该方法不能完全取代二维探测器, 但有其用武之地。

本文的分析和实验都是初步的,有许多问题有待今后研究解决,如非平面波的影响等。Lohmann 等人及本文的思想也是值得注意的,用别的光阑我们还能做什么?希望本文能起到抛砖引玉的作用。

参 考 文 献

- 1 A. W. Lohmann, J. Ojeda-Castaneda, J. G. Ibarra. Airy function and Laguerre polynomials; optical display processing. *Opt. Commun.*, 1994, 109: 361~367
- 2 钟海荣,蒋志平,陆启生等. 基于一维探测器阵列测量二维波面倾斜的光束稳定研究. 待发表

Measurement of 2D Wavefront Tilt Using 1D Array Detectors

Jiang Zhiping Zhong Hairong Lu Qisheng Liu Zejin

(Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract A method, which uses a one-dimensional array detector to measure the two-dimensional wavefront tilt of a beam, is proposed. A preliminary experiment is given to verify the principle.

Key words wavefront tilt, array detector

万瓦级激光大面积自动涂敷系统

在国家“八·五”攻关中,天津纺织工学院激光加工中心研制成功了万瓦级激光大面积自动涂敷系统。它由 10 kW 激光涂敷宽带扫描转镜和激光涂敷自动喷粉机组成。扫描镜具有宽带和聚焦扫描两种功能,扫描宽度 10~50 mm 连续可调,扫描频率 6 万次/分连续可调。扫描带内光束分布均匀。自动喷粉机采用可料位转鼓式计量和非载气送粉相结合的方式,送粉连续均匀稳定。送粉量大,0.5~200 g/min 连续精细可调,送粉精度 $\leq 2\%$ 。粉末利用率达 98%。送粉材料适应性广,不仅一般 Ni 基、Fe 基、Co 基粉可送,而且还能用于超细陶瓷粉和超重 WC 粉。单道涂敷宽度(10~35 mm)和单道涂敷厚度(0.2~8 mm)调节范围大。

采用上述转镜和喷粉机对近 $\phi 500$ 大轧辊进行了长时间激光涂敷试验,结果表明,上述系统在 8 kW CO_2 激光涂敷中连续工作时间大于 8 小时,其可靠性指标也达到了国家可靠性中心的要求。

该项成果在万瓦级激光宽带转镜线光斑扫描技术、送粉机构和宽带非载气送粉方式,以及为适应工业生产需要采用的各项措施均有重要的创新,并特别适合中国的国情,其总体水平已达到国际先进水平。该成果已于 1996 年 1 月通过国家主管部门验收,并已经用于 $\phi 500$ 以下多种轧辊以及汽车摇臂、凸轮轴和汽车油封等激光涂敷和淬火,并产生了很大的经济效率和社会效率。

(天津纺织工学院激光加工中心 杨洗陈 收稿日期:1996 年 5 月 6 日)