

激光测量中狭缝非匀速移动引起的失真及校正*

楼宇丽 李俊昌

(昆明理工大学基础部, 昆明, 650093)

摘要: 在红外大功率激光功率密度分布的测试研究中, 利用平动狭缝采样, 通过计算机对采样光斑的灰度处理获得激光功率密度, 是一种方便适用的方法。讨论了狭缝非匀速运动对采样结果的失真及其校正方法。

关键词: 激光测量 数字信号处理 图像处理

The distortion induced by nonuniform motion of the slit in the process of laser power density measurement and its correction

Lou Yuli, Li Junchang

(Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650093)

Abstract: In the process of the study on power density distribution of infrared high power laser, it is convenient to acquire laser power density through processing the laser image gradation by computer. The image is obtained via the method of translation slit. The distortion induced by nonuniform motion of the slit in the process of laser power density measurement and its correction is discussed in the paper.

Key words: laser measurement digital signal processing image processing

* 国家自然科学基金资助。

4 结 论

本试验测量记录了光学玻璃材料在激光作用下的破坏, 并对 Nomarski 干涉仪进行了优化设计, 减少了一个昂贵的 Wollaston 棱镜, 降低了实验成本, 同时使光学系统的长度缩短了一半, 整台仪器更加小型化。往返式光路结构提高了光学元件的利用率, 使干涉光先后两次通过破坏材料, 并加大了破坏点与非破坏点的光程差, 使干涉效果更为明显。光路简单紧凑, 易于调整。本试验初步地了解了破坏过程, 有关破坏的机理还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 孟绍贤, 江志明, 徐至展 *et al.* 核聚变与等离子体物理, 1989; 9(2): 102
- 2 於海武, 孟绍贤. 光学学报, 1996; 16(11): 1646
- 3 Yu H W, Meng Sh X. SPIE, 1996; 2885: 55
- 4 Ward B, Emmony D C. Journal of Modern Optics, 1990; 37(4): 803~ 811
- 5 陈 飞. CCD 摄像技术在光学玻璃材料破坏测量研究中的应用. 上海光机所硕士论文, 1997: 52~ 53

作者简介: 朱鹏飞, 男, 1974 年 9 月出生。在读博士研究生。现从事超短超强激光单元技术的研究。

引 言

在红外大功率激光的测试研究中,我们曾经提出平动狭缝采样,通过对采样光斑的灰度处理获得激光功率密度的方法^[1,2]。该方法的基本原理示于图 1a,图中, x_0-y_0 为与光束垂直的采样平面,在该平面上放置宽度为 a 的狭缝,使狭缝平行于 y_0 轴,并能沿 x_0 方向往复运动;狭缝平面后距离 d 处为热敏探测平面 $x-y$ 。当狭缝在激光照射下以均匀速度 v 沿 x_0 方向平移时,将能在探测材料上获得能量密度为 $J(x, y)$ 的图样。文献[1]已经证明,作用激光在 $x-y$ 平面的功率密度为:

$$P(x/M, y/M) = (M^2 v/a)J(x, y) \tag{1}$$

式中, $P(x_0, y_0)$ 为作用激光在采样平面的功率密度分布; $M = (R + d)/R$ 为光场的横向放大率; R 为 x_0-y_0 平面上激光束的波面曲率半径(对于未经聚焦的光束,由于 R 通常甚大,可令 $M \approx 1$, 否则可以认为曲率中心在激光束光腰中心处)。

利用热敏材料对激光采样,并通过测量采样光斑灰度分布的方法可以确定热敏探测平面上的能量密度 $J(x, y)$, 由于 v, a, M 是已知量,根据上式便能测出作用激光的功率密度分布。然而,由于种种原因,狭缝平移的速度并不是理想匀速的。例如,实际测量中狭缝通常是放在激光加工工作台上通过工作台的平动而实现测量的,当给定一个移动速度时,工作台的启动是一个从速度为 0 到给定值的加速运动,虽然可以等待工作台运动平稳后进行测量,但当使用由步进电机带动的数控工作台时,若给定速度较小,步进电机的步距角又较大时,相邻两个触发脉冲之间的电机转动速度将是不均匀的:当触发脉冲到来时,电机由脉冲到来前的速度开始逐渐加速,而当脉冲结束后又逐渐减速,形成工作台平移速度的周期性变化——“工作台爬动”。在这种条件下进行测量时,采样光斑将带有速度变化所引入的灰度畸变信息。为直观起见,图 1b 给出了“工作台爬动”情况下采样光斑实例(图中箭头指出狭缝移动速度较小时对应位置)。对不同功率段的激光测试时,选择较慢的狭缝移动速度是必须的,在此即讨论“工作台爬动”对采样光斑的影响及测试信息的校正问题。

1 狭缝平移速度随时间变化的影响讨论

沿用图 1 所设坐标及参数,若 $t = 0$ 时狭缝中央在 $x_0 = -l$ 处,则以速率 $v(t)$ 沿 x_0 正向移动的狭缝作用可以表达为 x_0-y_0 平面对激光具有一个随时间变化的复振幅透过率^[3]:

$$\text{rect}\left\{\frac{1}{a}\left[x_0 - \int_0^t v(t') dt' + l\right]\right\}$$

这样,激光光波在穿过采样平面时的复振幅可以表示为:

$$U_0(x_0, y_0, t) = \text{rect}\left\{\frac{1}{a}\left[x_0 - \int_0^t v(t') dt' + l\right]\right\} E_0(x_0, y_0) \exp\left[\frac{jk}{2R}(x_0^2 + y_0^2)\right] \tag{2}$$

式中, $j = \sqrt{-1}$; $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长; $E_0(x_0, y_0)$ 为光波振幅,而 $E_0^2(x_0, y_0)$ 即为待测激光的功率密度。忽略衍射影响,并忽略光波由 x_0-y_0 平面传播到 $x-y$ 平面的时间,可将探测平面 $x-y$ 上光波的复振幅写为^[1,3]:

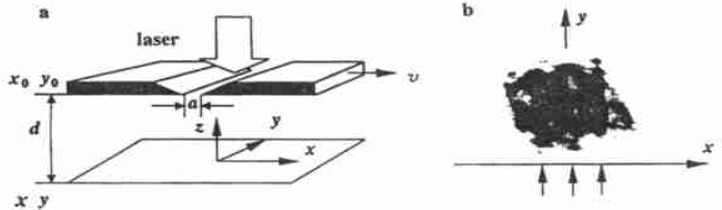


Fig. 1 a-slit sampling device b-sampling gradation with distorted information

$$U(x, y, t) = \frac{1}{M} \text{rect} \left\{ \frac{1}{Ma} \left[x - M \int_0^t v(t') dt' + Ml \right] \right\} E_0 \left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right) \exp \left[\frac{jk}{2(R+d)} (x^2 + y^2) \right] \quad (3)$$

由于探测材料记录的是激光照射下吸收的能量密度分布,因此,对于狭缝从 $x_0 = -l$ 到 $x_0 = l$ 的一次采样过程, $x-y$ 平面上所接收的能量密度可以表示为:

$$J(x, y) = \int_0^{2l/v} dt U(x, y, t) U^*(x, y, t) \quad (4)$$

式中, v 为完成一次采样时的平均速度。将有关各量代入上式得到:

$$J(x, y) = \frac{1}{M^2} E_0^2 \left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right) \int_0^{2l/v} \text{rect} \left\{ \frac{1}{Ma} \left[x - M \int_0^t v(t') dt' + Ml \right] \right\} dt \quad (5)$$

于是得到: $E_0^2 \left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right) = M^2 J(x, y) / \int_0^{2l/v} \text{rect} \left\{ \frac{1}{Ma} \left[x - M \int_0^t v(t') dt' + Ml \right] \right\} dt \quad (6)$

根据对工作台爬动情况的分析及畸变图像条纹的周期性结构,设工作台的移动速度为:

$$v(t) = v + \Delta v \sin(2\pi t/T + \theta) \quad (7)$$

式中, v 为平均速度,即实际测试时的对工作台给定的平均速度;若光斑图像上条纹结构的间隔为 Δx ,则 $T = \Delta x/v$, Δv 及 θ 将在实际处理光斑时确定。将(7)式代入(6)式得:

$$E_0^2(x/M, y/M) = \Theta(x) J(x, y) \quad (8)$$

式中, $\Theta(x) = M^2 / \int_0^{2l/v} \text{rect} \left\{ \frac{1}{Ma} \left[x - Mvt - M \frac{T\Delta v}{2\pi} \left[\cos\theta - \cos \left(\frac{2\pi}{T}t + \theta \right) \right] + Ml \right] \right\} dt$

将(8)式与(1)式比较表明,由于狭缝扫描速度随时间发生变化,采样光斑上的灰度分布与作用光束功率密度分布之间已经不是简单的线性关系。

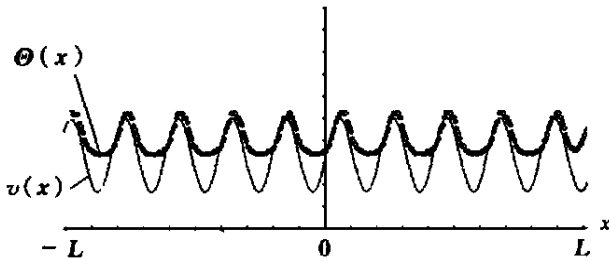


Fig. 2 Distribution of nonlinear function $\Theta(x)$ and slit travelling speed $v(x)$

影响,图2给出非线性函数 $\Theta(x)$ 随 x 变化的曲线。为便于分析以上结果,再对狭缝中心在 $x-y$ 平面的投影坐标为 x 时的狭缝移动速度作研究。由于 t 时刻狭缝中心在 $x-y$ 平面的投影坐标为 x 的位置为:

$$x = Mvt + MT \Delta v [\cos\theta - \cos(2\pi t/T + \theta)] / (2\pi) - Ml \quad (9)$$

上式与(7)式相结合,在图2同一横坐标下绘出狭缝中心线在 $x-y$ 平面的投影坐标为 x 时的速度曲线。由图可见,由于狭缝移动速度越快,穿过狭缝探测材料接收到的激光能量越少,对此,非线性函数 $\Theta(x)$ 刚好起到了补偿作用。

2.2 光斑灰度畸变的校正

以上讨论提供了一种校正采样光斑灰度信息的方法。作为实例,现对图1b所示的光斑灰度信息进行校正。该光斑采样时的有关参数为: $a = 1.5\text{mm}$, $v = 20\text{mm/s}$, $d = 50\text{mm}$, $R = 150\text{mm}$ 。从光斑上测得 $\Delta x = 1.5\text{mm}$ (即 $T = 0.075\text{s}$);若 y 坐标选择在光斑中央,且在 $x =$

2 光斑灰度畸变的校正

2.1 校正函数讨论

分析(8)式可知,光斑功率密度是采样光斑灰度分布与非线性函数 $\Theta(x)$ 之乘积。只要能够求出非线性函数 $\Theta(x)$,就可以对带有畸变信息的光斑进行校正,得到正确的测量结果。为分析 $\Theta(x)$ 对灰度的

- x_c 处为相邻畸变条纹的高灰度中心, 则

$$\theta = [\Delta x / x_c - l / (Tv) - 1/4] \times 2\pi \quad (10)$$

对图 1b 的光斑进行灰度校正时, 由于事先不能准确测量采样时狭缝平移速度 $v(t)$, Δv 的选择是根据校正后光斑灰度分布是否已经基本消除平行于 y 轴的条纹结构来确定的。为定量地实现这一点, 我们通过对不同的 Δv 所得的校正结果沿

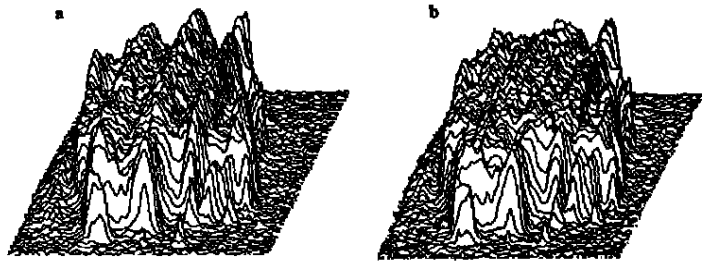


Fig. 3 Distributions of laser image gradation before and after correction
a—distributions before correction b—distributions after correction

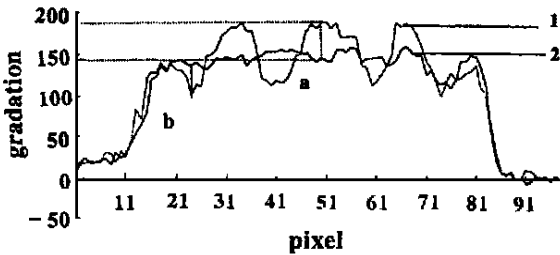


Fig. 4 Gradation curve, 1—gradation curve before correction
2—gradation curve after correction

光斑环状灰度分布区取样, 考察其灰度值是否已经明显地消除周期性灰度变化的影响, 从而实现对 Δv 的优化选择。通过优化, 求得 $\Delta v = 3\text{mm/s}$, 图 3a, 图 3b 分别给出了光斑灰度在校正前后的分布。

图 4 给出了光斑失真最严重的某一横轴上校正前后的灰度对比曲线。点 a 为校正前灰度值最大的位置, 灰度值 $F = 190$, 校正后灰度值 $F' = 150$, 若以校正后的灰度值为基准, 则相对误差为 26%; 点 b 为校正前灰度值最小的位置, 灰度值 $F = 105$, 校正后 $F' = 140$, 相对误差为 25%。由此可见, 进行校正是有必要的, 否则将会引入较大的误差。

3 结 论

以上研究表明, 狭缝平移速度的非均匀性将造成采样信号的失真, 但是, 只要知道狭缝平动速度随时间变化的规律, 则可以通过(6)式对失真信息进行校正。因此, 我们提出了一种对狭缝平移速度非均匀性引起的取样误差校正的方法, 提高了平动狭缝采样法测量大功率激光功率密度方法的可靠性, 其原理对同类物理量的测量及误差的校正是一个有益的参考。

参 考 文 献

- 1 李俊昌. 中国激光, 1993; A20(2): 93~ 97
- 2 李俊昌. 中国激光, 1993; A20(4): 273~ 277
- 3 顾德门 J W 著, 詹达三等译. 傅里叶光学导论. 北京: 科学出版社, 1976

* * *

作者简介: 楼宇丽, 女, 1975 年 1 月出生。硕士研究生。从事应用数学专业计算物理方面的研究。