

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0119-03

激光波前的剪切测试

王青, 陈磊, 吴帧

(南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

摘要 介绍了利用剪切干涉技术, 研制一个对染料激光器出射光束的波前进行评价的系统。考虑到染料激光器的出射波前基本质量、功率与光斑大小等特点, 系统选择了三平板剪切干涉作为基本干涉光路和一阶微分法波面复原算法; 讨论了优化和工程化方法——对单幅干涉图进行自动数字化采集的智能化判断技术, 包括了系统标定、图象阴影自动校正、直方图分析辅助二值化阈值的选取和自动修像与断点连接等, 在正常测试过程中基本不需要人工干预。研制成功的三平板剪切数字波面干涉仪, 系统的重复性也到了 0.02λ , 测试精度优于 0.05λ (RMS)。

关键词 激光技术; 激光波前; 干涉测试; 剪切

中图分类号 TN249

文献标识码 A

Shearing Test of Laser's Wavefront

WANG Qing, CHEN Lei, WU Zheng

(Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210094 China)

Abstract An evaluation system for wavefront of laser is introduced by shearing technology. The triangle shearing interferometer and one step differentiation method are selected considering the characters (quality of wavefront, power and scale of light spot etc.) of dye laser. Automatic analysis and intelligence technologies for shearing figures are discussed. Which include calibration of system, auto-correcting of shading, threshold selecting aided by histogram analysis, etc., so that human intervention is displaced in normal testing process. The repeatability of system is 0.02λ , and accuracy is 0.05λ (RMS).

Key words laser technique; laser's wavefront; interferometry; shearing

1 引言

早期干涉仪的共同的基本原理, 是用一个标准波面与被测波面之间形成干涉图像作为度量的依据, 但运转中的激光器, 其输出波面性能的干涉检验, 很难想象可以预先制作一个与之相比较的标准激光波面, 因此使用剪切干涉是一条可行的途径。在常见的剪切干涉中, 横向剪切干涉系统的主要光学元件为平面, 易加工、精度高, 特别是三平板剪切干涉仪基本光路是方向相反而空间位置基本等同的闭合环, 两支光路光程差极小, 对震动、气流等干扰不甚灵敏且结构简单, 调整容易。

剪切干涉图形区别于普通干涉图形主要在于不能直接判定被测波面形状, 它是波前的间接测量, 干涉图记录的是波前与它自身移动部分的差异, 在三

平板剪切干涉中, 取决于横向剪切量。目前, 由剪切干涉图复原原始波面, 最常用到的是美国亚里桑拉大学光学研究中心的《Fringe Manual Version》发表的二维错位干涉图的波面重构法, 将剪切干涉图当作被检波面的斜率进行处理, 完全忽略了剪切量的影响, 但是当剪切量较大时, 复原时会产生较大的误差, 因此又有联立方程求解法、一阶微分法等复原波面方法的提出。考虑到染料激光器的出射波前基本质量、功率与光斑大小、三平板剪切干涉基本光路的特点, 选择了一阶微分法进行工程化实施。

2 平行剪切与波面复原

三平板剪切干涉仪是用于准直光束测量的一类独特的双光束干涉仪, 其光学系统均为平面元件, 基

作者简介: 王青(1963-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为光学测试、光干涉理论与智能化仪器。

E-mail: wangqing@mail.njust.edu.cn

本光路如图 1 所示。两支三角光路(SABS 和 SBAS)是方向相反而空间位置基本等同的闭合环,因此不仅容易得到激光干涉条纹,还能得到白光干涉条纹。这种光路对震动、气流等干扰不甚灵敏且结构简单,调整容易。

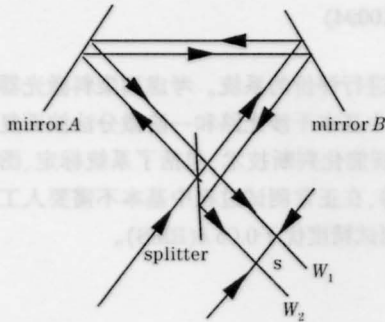


图 1 三平板剪切干涉仪光路原理

Fig.1 Schematic diagram of the optical-path

作为横向剪切中的平行剪切干涉类型,三平板剪切干涉的主要特点是分离的两个出射波前平行错位,即干涉场不随距离变化;其平行性也不随剪切量的改变而变化,因此入射波前一定时,干涉条纹的多少与剪切量直接相关,不能试图通过改变倾斜来改变干涉条纹数;对于同一入射波面,剪切量不同,形成的干涉图形不同,在用三平板剪切干涉仪进行波面检测时,必须考虑到剪切量的影响。

横向剪切干涉图的波面复原,一般采用二维波面重构法,即通过正交方向上的两幅剪切图,求解出实际波面。其中考虑到剪切量影响的有联立方程求解法、一阶微分法等。

一阶微分法可直接对干涉图上的暗条纹(或亮条纹)进行离散、采样,记下每一采样点的相对干涉级次及坐标,直接对这些采样点进行拟合,于是,在所采样点上,表示原始波前的多项式就被确定了。如果用 Zernike 多项式来表示待测波面 c ,则当此波面在 x 方向上错位 s 时,同一点 P 处的错位波面的波差为 $W(x-s, y)$,原始波面和错位波面在 P 点迭加后的程差 ΔW_x 为

$$\Delta W_x(x,y) = W(x-s,y) - W(x,y) = \sum_{k=0}^n A_k [Z_k(x-s,y) - Z_k(x,y)] = P_x(x,y)\lambda \quad (1)$$

当剪切量小到一定程度时,将剪切波面当成被检波面的一阶微分,即

$$\Delta W_x(x,y) \approx \frac{\partial W}{\partial x} s = \sum_{k=0}^n A_k Z_k(x,y) s \quad (2)$$

波面拟合时,首先将剪切波面当作非剪切波面进行拟合,

$$\Delta W_x(x,y) = \sum_{k=0}^n B_k Z_k(x,y) = P_x(x,y)\lambda \quad (3)$$

式中 B_k 为 x 方向的剪切干涉图直接拟合得到的剪切波面的 Zernike 多项式系数。对于 y 方向,同样可以获得另一组 Zernike 多项式系数 C_k 。为了通过系数 B_k 和 C_k 得出波面的 Zernike 多项式系数 A_k ,首先在波面表达式中分别对 x, y 求偏导数,然后把其偏导数分别再重新组合成 Zernike 多项式,比较对应公式可得出 A_k 和 B_k, C_k 以及 s, t 之间的关系

$$\frac{\partial \sum_{k=0}^n A_k Z_k(x,y)}{\partial x} = \sum_{k=0}^n \frac{B_k}{s} Z_k(x,y) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sum_{k=0}^n A_k Z_k(x,y)}{\partial y} = \sum_{k=0}^n \frac{C_k}{t} Z_k(x,y) \quad (5)$$

从而求出 A_k ,相应的原始波面 $W(x,y)$ 就复原出来了。

3 系统标定与干涉图智能化处理

三平板剪切干涉仪的剪切量主要靠调整分光镜的角度来进行,通过光路的分析发现,剪切量的大小与入射角和三个平板之间的相对关系较为复杂,其中任何一个因素的变化均将导致剪切量的变化,因此靠测量平板之间的空间位置等来计算剪切量是困难的,因此我们采取了计算机辅助标定的方法(图 2)。

首先是对三平板剪切干涉仪的零剪切状态的标定,即对光路的平面最佳全同环路的调整。由于两相干光束通过同一闭合环路,所以调整其中一环路时,另一环路也将相应地改变,彼此相互干扰,因此快速调整干涉仪的方法是使用非扩束激光,以一个带孔的屏观察后向反射光点 (Backing points)。这样,以入射光束为标准,两支光路的调整可以分开进行:对于反射环路,应调整分光镜 S ;对于透射环路,

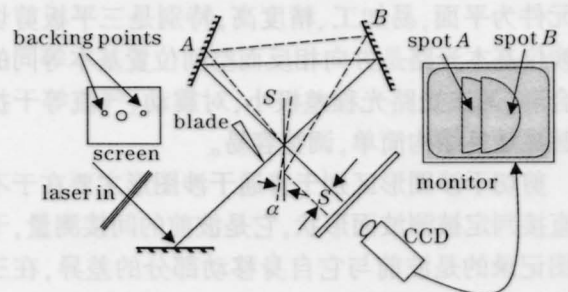


图 2 系统调整与剪切量的标定

Fig.2 Adjusting of system and calibration of shearing quantity

应调整 A 或 B 镜,直至馈光两光点在屏上相对于入射光轴呈对称分布,然后改变剪切量使两光点重合,则干涉仪处于零剪切状态(真正的零剪切状态必须以干涉图为准)。

其次是相对剪切量的标定,这包括了测试口径的标定与绝对剪切量的标定。以计算机采样像素点阵为坐标,对实际光路中位于空间滤波接收屏处的标尺进行采样,把其中复杂的光学采集系统(接收屏,镜头,CCD 摄像机,图像采集卡...)作为一个黑匣子,由程序计算出像素间距与实际尺寸的关系,标定为像素格值^②。然后采集干涉仪出射光斑,读出边缘点的像素坐标,以其最佳拟合圆的尺寸与像素格值比较,得到实际出射光斑的尺寸。三平板剪切干涉仪的剪切量调整是以转动分光镜的角度进行的,通过光路的三角分析可知,在转动角度较小时,推动分光镜转动的千分螺杆的行程与剪切量成线性关系^③。为便于判读,在干涉仪入射口加装一个刀口,产生图中所示的直边阴影,阴影的边距即是当前的剪切量,与像素格值比较,可得到实际的剪切量。为提高精度,在不同的千分螺杆的行程下获得的剪切量应该分别在 x - y 两个方向上进行线性拟合,得到相应的线性系数。以保证在不同剪切量下的测试结果的一致性。

由于剪切干涉的特殊性,只能采集单幅干涉图进行条纹法处理。针对染料激光波前的剪切干涉,条纹质量稳定,因此引入多种图像分析技术,以实现干涉图智能化处理。在条纹分析进行前所采用的图像预处理技术,主要有滤波和阴影校正,前者消除高频噪声,得到平滑的干涉条纹,减少斑点和伪条纹的出现;后者使干涉条纹粗细基本均匀,展宽二值化时阈值选取的范围,方便阈值的自动选取。

条纹分析中原来需要人工干预最多的是二值化和修像。为自动选取阈值,对大量干涉图进行图像灰度值进行了直方图分析,得到去除背景后,以黑条纹像素占 20%左右为佳。二值化后,条纹被细化为宽度由一个像素组成的细线,然后就需要进行修像:链式滤波根据条纹的方向、间隔和长短等因素判断是否为有效条纹,消除斑点和伪条纹;自动断点连接则是追踪条纹内部断点的前进方向,并参考左右级次条纹的走向,判断出断点之间是否属于同一级次的条纹,保证同一级次条纹的连续性,这对后续的条纹级次判读是必须的。

条纹法的的采样数据,在拟合时经常出现“翘边”现象,原因是采样点数少,特别是边缘相当的距

离无采样点(在垂直条纹的方向上,靠近边缘的条纹被边缘切割甚至融入背景之中),因此拟合后得到的数据属于“外插”,数值稳定性不好。因此采用边缘点的重采样过程来控制“翘边”的发生:先进行低阶的 Zernike 多项式拟合,然后对边缘点进行重新采样(波面离散),与第一次采样(条纹采样)的点坐标统一后混合在一起进行高阶拟合。这样获得的波面有效地保证了边缘数据的稳定性。

采用上述方法后,通常不需要操作人员对图像处理 and 条纹分析过程进行干预,既方便了使用,又保证了测试结果的客观可靠。

4 测试与分析

为保证系统测试的准确性,按三个步骤对系统进行考核:计算机模拟测试,He-Ne 激光模拟测试比对,染料激光实测重复性考核。首先利用计算机模拟 Zernike 多项式产生的剪切干涉图,然后进行采样、拟合、波面复原,最后与模拟波面比较获得原理与软件系统精度。由于三平板剪切干涉仪适用于测量具有大像差的波面,所以主要模拟了 $PV > 10\lambda$ 的波面,结果表明相对误差小于 0.5%。

第二是比对测试。He-Ne 激光具有较好的出射波前,因此不能直接产生足够的干涉条纹,必须经透镜会聚为点光源后,测出点光源距分光镜约为 4400 mm,干涉光出射口径为 20 mm,则估算出矢高为 0.01136 mm。换算出波差值为 $PV = 17.958\lambda$ 。对此出射光波进行不同剪切量下的测试,波面复原后得到 PV 值为 $17.875 \pm 0.016\lambda (1\sigma)$,与估算值的偏差只有 0.46%,符合很好,说明本系统采用的复原原理、方法和软件包是可靠的。

实际测试的考核是对染料激光器出射波面进行测试。在标准环境条件下及防震工作台上展开整个测试系统。通过对不同剪切量下得到的干涉图进行处理,复原出原始波面。剪切量在 0.1~0.2 之间多次测试的结果波面重复性精度为 $0.021\lambda (\text{RMS})$ 。不同剪切量下复原的波面指标相差极小,说明了本方法的正确性和对剪切量等标定的准确性。

参考文献

- 1 徐德衍. 剪切干涉仪及其应用[M]. 北京:机械出版社,1987
- 2 王青,陈进榜,陈磊等. 量块的电脑化测试装置[J]. 航空计测技术,1998,18(1):30~33
- 3 吴帆. 三平板剪切干涉仪自动测试系统[D]. 硕士学位论文,南京:南京理工大学,2000