

基于刀口法的激光横向变形检测与标定方法

刘旭,黄承义

武汉纺织大学

摘要: 为测量材料的横向形变,提出了一种基于刀口法的激光横向变形检测与标定方法。通过控制遮挡板的精密机械运动来模拟刀口切割射向光电探测器的矩形光束,从而改变光电探测器接收的光照强度以检测光斑能量分布情况并建立光照强度与刀口运动位移的对应关系,最终根据位移与光强度的线性关系检测矩形光斑能量匀化状态并对移动的位移进行反向精确标定。试验得出:曲线交点坐标相对误差不高于1.63%,且遮挡板不同运动模式以及多点位实验中,矩形光斑中间1mm区域线性决定系数均为0.998,表明该方法可以借助精密控制的遮挡板的机械运动模拟材料的横向形变,为材料横向形变测量提供便利的检测模拟手段和方法。

关键词: 刀口法;矩形光束;能量匀化;横向变形;变形标定

中图分类号: TG806;TH741;TN247

文献标志码: A

Laser Transverse Deformation Detection and Calibration Method Based on Knife-edge Method

Liu Xu, Huang Chengyi

Abstract: In order to measure transverse deformation of stressed material, a laser system that can detect and calibrate transverse deformations based on knife-edge method is constructed. Through accurately controlled mechanical movement of baffle plate that runs like a knife-edge across the rectangular light beam emitted by a diode laser generator, the intensity of laser light collected by photodetector is changed and the relationship of light intensity with moving displacement of the baffle plate can be established at the same time. An obtained linear relationship of the displacement with the light intensity can be used to explore the homogenization of the beam intensity. Precision displacement of the moving plate is used inversely to calibrate the linear relationship and the transverse deformation of the material. The experimental results show that the relative errors of the intersection coordinates of curves are not higher than 1.63% and the linear coefficient of determination of 1mm region in the middle of rectangular spot are 0.998 in the different motion modes and multi-point experiments of the baffle plate. It means that the laser system can simulate transverse deformation of material under the controlled precise movement of the baffle plate, and provides a convenient simulation method to the measure of transverse deformation.

Keywords: knife-edge method; rectangular light beam; homogenization of intensity; transverse deformation; deformation calibration

1 引言

激光横向变形测量系统主要由半导体激光器、光电探测器和数字示波器组成^[1]。半导体激光器发射高斯强度分布激光,经由传导光纤多次折射后匀化整形为强度分布均匀的矩形横截面的激光光束^[2],投射在待测试件的侧面,让部分光束穿过试件照射在设置于试件后方的光电探测器上。当试件受力变形,由于泊松效应使试件侧向发生相应的横向变形切割激光光束改变光电探测器接收到的光强,使光电探测器的输出电压发生改变,再通过数字示波器予以捕捉和展示^[3-5]。如果变形与电压关系

获得精确标定即可测量计算试件的横向变形结果。该方法的最大特点在于非接触测量,测量过程对待测试件的力学性能不会产生任何负面影响。但激光横向变形测量系统借助激光照射测量变形,激光强度易受环境光照因素干扰,导致变形测量在环境光照因素影响下而产生测量误差。

为保证测量精度,需要设计能在不同测量环境下对变形测量系统进行快速、准确的标定方法,消除光照环境对变形测量的影响;另外由于光斑强度的匀化结果对横向变形测量精度具有决定性作用,故检测矩形激光光斑强度分布规律,确定光斑能量匀化分布区域,对提高激光横向变形测量系统测量精度具有重要的现实意义。

当前激光光强匀化检测主要有移动测量法和传感器阵列法两大类。前者根据遮挡光斑的移动形式

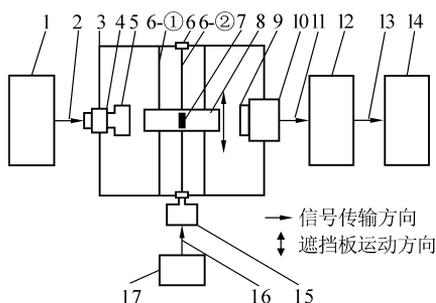
可分为狭缝法^[6]、小孔法^[7]和普通刀口法^[8];后者依据收集光斑成相的载体分为硅 CCD 和 CMOS 探测器的相机阵列测量法^[9]。

在激光横向变形检测与标定运用中分别存在无法直接获得光斑全域面能量分布、测量时间长、检测精度低、动态测量范围小且成本高的缺陷。因此本文提出了一种基于刀口法的激光横向变形测量快速标定方法,以期能为激光横向变形测量提供便利的检测和标定方法。

2 检测系统及方法

本文提出的基于刀口法的激光横向变形测量与快速标定方法,将半导体激光器发出的激光束照射在光电探测器上,通过检测平台上的步进电机带动高精度丝杠运动,控制垂直于激光束的矩形遮挡板模拟刀口沿两根平行于丝杠的导轨在光束中以精确位移移动切割光束;步进电机控制器根据矩形遮挡板的运动需要控制步进电机的运动,以改变照射在光电探测器上的光斑强度,引发电光转换的输出电压产生变化;通过数字存储示波器采集并显示电压信号。

根据采集到的电压信号以及遮挡板移动的精确位移,获得电压与位移之间的变化关系,实现对矩形激光光斑强度分布情况的检测与位移的反向标定,即标定激光横向变形测量系统的变形测量。图 1 为检测系统和方法实施结构简图。根据图示工作原理构建激光横向变形检测系统。



1. 半导体激光器 2. 方形光纤 3. 支撑架 4. 光纤头安装座
5. 准直透镜 6. 检测平台 6-①. 导轨 6-②. 丝杠 7. 遮挡板
8. 移动平台 9. 聚焦透镜 10. 光电探测器 11. BNC 连接线
12. 数字存储示波器 13. STP 网线 14. 计算机
15. 步进电机 16. 控制线 17. 步进电机控制器

图 1 基于刀口法的激光横向变形检测与标定系统结构

3 遮挡板运动试验检测分析

为了模拟不同材料的横向变形,提高变形测量的标定精度,选用可程序控制的步进电机。通过步

进电机控制器输入编制的控制程序来改变遮挡板的运动模式,模拟各种不同性质的横向变形。通过进行遮挡板运动的检测实验,检测系统测量的可靠性和准确性。设定遮挡板与准直透镜的距离为 72mm,准直透镜与聚焦透镜的距离为 144mm。

检测试验采用两种基本的遮挡板运动模式——静态等步长位移移动和动态匀速运动检测不同性质位移与电压关系并同时检测光斑的匀化分布状态。根据遮挡板的运动信号特征分别采用数字万用表采集等步长移动位移的静态电信号,数字存储示波器用于采集连续的动态匀速移动位移电信号。

当遮挡板以等步长移动定位于矩形光斑的不同位置时,连接在光电探测器上的数字万用表能够直接读取信号电压,记录各位置点的电压变化;而遮挡板匀速运动时,数字存储示波器能够全程采集遮挡板运动的电压信号,获得矩形光斑的能量分布曲线,快速准确地确定强度匀化区域。图 2 为检测与标定系统实物图。

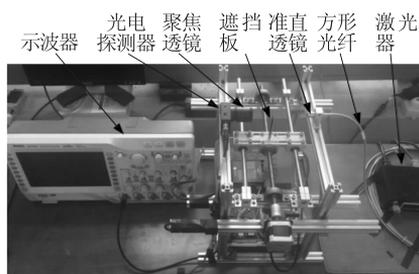


图 2 基于刀口法的激光横向变形检测与标定系统

试验通过对两种运动模式采集的数据对比分析,进一步说明本文提出的检测系统和方法可以对矩形激光光斑强度分布情况进行有效检测,其适用性和准确性完全可以满足非接触横向变形测量系统的测量要求。

3.1 等步长位移检测试验结果

步进电机控制程序设定步进电机每次按键转角 18° ,丝杠导程 2mm,故每次按键遮挡板前进(后退) 0.1mm;激光器功率 100mW,矩形光斑长度 4mm,光斑照射范围内可记录 40 个不同位置输出电压值,图 3 为等步遮挡和反向退出遮挡光斑过程位移—电压曲线。

图 3 显示,万用表检测出的矩形激光光斑中间的 $EF(fe)$ 段位移—电压曲线基本呈线性关系。为进一步了解线性程度,对图 3 中 EF 段和 fe 段分别采用线性拟合分析,通过趋势线方程和决定系数量化分析位移—电压的相关性^[10]。图 4 为 EF 段和 fe 段线性拟合趋势线分析图,所得趋势线方程和决定

系数如下:

*EF*段:趋势线方程 $y_{EF} = -0.747x + 2.059$, 斜率 $k = -0.747$, 决定系数 $R_{EF}^2 = 0.998$;

*fe*段:趋势线方程 $y_{fe} = 0.742x - 0.926$, 斜率 $k = 0.742$, 决定系数 $R_{fe}^2 = 0.998$;

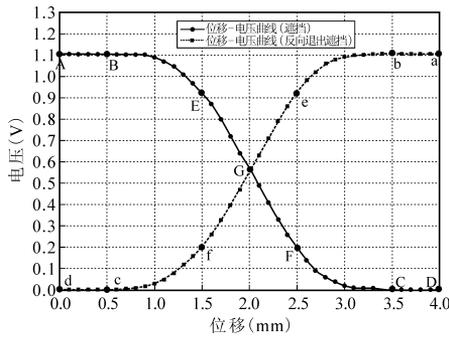


图3 等步遮挡和反向退出遮挡光斑过程位移—电压曲线

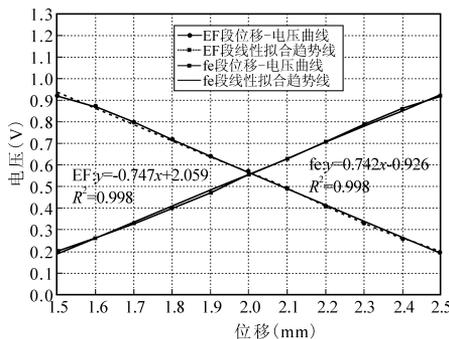


图4 *EF*段和*fe*段线性拟合趋势线分析

由于曲线 *EF* 段和 *fe* 段具有高度线性特征,故将图4中 *EF* 和 *fe* 趋势线的交点近似为图3中正向遮挡和反向退出遮挡过程的位移—电压曲线的交点 *G* (图3上标出) 并求得坐标值 $G_x = 2.005\text{mm}$ 、 $G_y = 0.562\text{V}$ 。

另一方面,实测光斑的长度为4mm,全光照电压值为1.106V,故理论上图3中正向遮挡和反向退出遮挡过程的位移—电压曲线的中点坐标值应为2mm和0.553V,由此计算出曲线的交点坐标与两条曲线的中点误差为 $\delta_{c_x} = 0.25\%$ (位移误差), $\delta_{c_y} = 1.63\%$ (电压误差);较高的电压误差主要来自于万用表的测量误差。

上述测量结果表明:双向位移曲线段 *EF* 和 *ef* 的线性拟合具有极高的决定系数(0.998),说明激光光斑的中心段具有高度的线性特征,也证明了光斑中心段的激光强度匀化效果良好;同时拟合的线性函数具有相同的相关性,说明遮挡板刀口的双向运动具有高度的对称性,证明了步进电机控制的遮挡板刀口的等步长机械运动位移具有较高的控制精度。

遮挡板的双向运动曲线展示的遮挡板刀口双向对称运动,图3中两条双向运动曲线的交点坐标同曲线中点的相对偏差值显示实际交点基本重合于曲线的中点(光斑中心),也说明了刀口的等步长运动位移具有较高的控制精度,能够满足光斑匀化检测及模拟横向变形测量的要求。

3.2 匀速运动检测试验结果

为进一步检测遮挡板刀口不同模式运动的位移精度,通过设计程序控制遮挡板刀口进行匀速运动以连续遮挡和切割激光光斑,采用数字存储示波器捕捉和记录光电探测器转换的连续电压信号。设计程序控制遮挡板以0.25mm/s的匀速运动遮挡和切割矩形光斑;激光器功率仍设定为100mW,光斑的长度仍为4mm且遮挡板与准直透镜、聚焦透镜间的距离保持不变;示波器通过扫描光电探测器的输出电压信号,捕捉匀速遮挡和反向退出遮挡过程的输出电压波形如图5所示。

图5中示波器扫描到*H*点时遮挡板开始遮挡光斑,*K*点为完全遮挡;当示波器扫描到*k*点时开始退出遮挡,扫描到*h*点时完全退出遮挡。

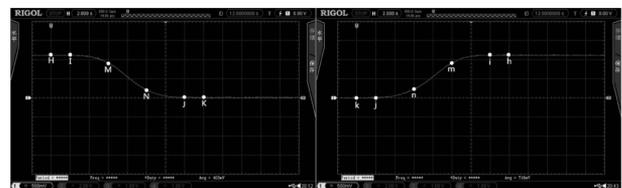


图5 匀速遮挡(*HIJK*)和反向退出遮挡(*jih*)光斑过程示波器电压波形

为便于对比分析,输出图5图形的CSV数据文件对波形进行重建,并通过Savitzky-Golay滤波算法平滑去噪^[11]。

图6为重建的描述遮挡和反向退出遮挡光斑运动过程的电压输出曲线。采用线性拟合分析方法截取图6中*MN*段和*nm*段位移—电压曲线进行线性相关性分析。

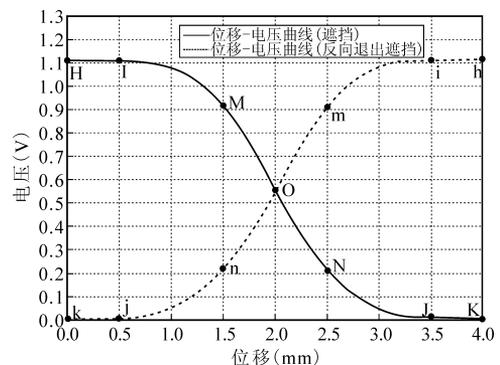


图6 匀速遮挡和反向退出遮挡光斑过程位移—电压曲线

图7为MN段和nm段曲线及其对应的线性拟合曲线,线性拟合曲线方程和决定系数为

MN段:线性拟合方程 $y_{MN} = -0.748x + 2.059$, 斜率 $k = -0.748$, 决定系数 $R_{MN}^2 = 0.998$;

nm段:线性拟合方程 $y_{nm} = 0.749x - 0.935$, 斜率 $k = 0.749$, 决定系数 $R_{nm}^2 = 0.998$;

同理,近似求出匀速遮挡和反向退出遮挡曲线交点O(图6上标出)坐标值为 $O_x = 2, O_y = 0.563$ 。

实测光斑长度仍为4mm,检测全光照电压值为1.109V,理论上两曲线的中点(光斑中心)坐标均为(2,0.555),交点O与中点的坐标相对误差分别为 $\delta_{O_x} = 0, \delta_{O_y} = 1.44\%$ 。

产生的电压误差主要来自于测试电路系统的电噪声。MN和nm段曲线的拟合结果再次说明光斑中心段的光强度匀化效果良好,程序控制的遮挡板匀速机械运动能够产生准确的移动位移,具备了模拟材料横向变形的能力。

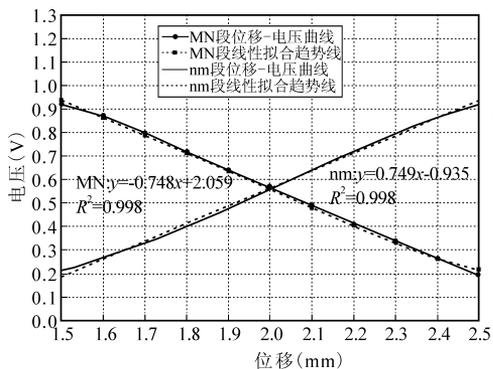


图7 MN和nm段线性拟合趋势线分析

3.3 不同运动模式检测结果分析

表1展示了采用上述等步长位移检测和匀速运动检测获得的线性拟合斜率、决定系数以及交点相对于曲线中点(光斑中心)的误差等参数。

表1 等步长位移检测与匀速运动检测参数

	等步长位移检测(数字万用表)		
	斜率值	决定系数	交点坐标相对误差(%)
遮挡	-0.747	0.998	$\delta_{C_x} = 0.25$
反向退出遮挡	0.742	0.998	$\delta_{C_y} = 1.63$
	匀速运动检测(数字存储示波器)		
	斜率值	决定系数	交点坐标相对误差(%)
遮挡	-0.748	0.998	$\delta_{O_x} = 0$
反向退出遮挡	0.749	0.998	$\delta_{O_y} = 1.44$

两种检测方法拟合的曲线线性部分所得的决定系数均为0.998,表明长为4mm的矩形激光光斑的线性中心段(长度为1mm)的光能量密度匀化程度较高,具有良好的线性匀化效果;正向遮挡过程以及反向退出遮挡过程的曲线变化斜率基本相同,且匀

速运动检测的结果误差更为微小(相差0.001),说明两种运动曲线均具有高度的对称性;同时两种检测方法的曲线交点的横坐标位置与光斑的中心位置误差非常微小,表明两种运动的位移中心均能准确定位于光斑的中心位置;匀速运动的位移交点较等步长运动具有更高的精度,这是由于等步长运动的每一步所积累的运动位移误差要高于匀速运动产生的误差。

两种运动曲线所展示的高度对称性以及交点与光斑中心的高精度重合表明本系统涉及的机械运动具有较高的位移控制精度,能够快速确定矩形光斑能量匀化分布区域,并可以为激光横向变形检测提供精确标定的变形测量。

4 遮挡板与激光器之间距离对试验检测的影响

为适应不同环境的变形测量,测量试件在激光横向变形测量系统中与发射激光的激光器或接收光强的光电探测器之间的距离位置无法做固定设计,需要考虑测量试件与激光器之间距离变化对激光横向变形测量系统的测量精度产生的影响。此类因测量距离变化对变形测量精度的影响可以通过改变遮挡板与激光器准直透镜之间的距离进行检测和分析。

不改变其他条件参数,仅将遮挡板沿光束方向前后分别移动10mm(基本可以满足变形测量情况的变化),在 d_2 (72mm) 匀速实验的基础上,进行 d_1 (62mm)、 d_3 (82mm) 多点位距离检测实验,图8为距离检测实验中遮挡板的位置分布。

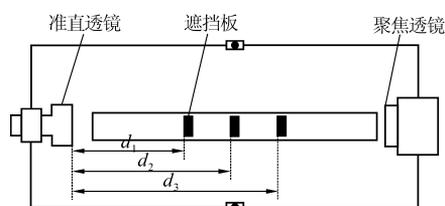


图8 遮挡板位置分布

在距离影响检测试验中,遮挡板分别设置于距准直透镜为62mm(d_1)、72mm(d_2)和82mm(d_3)的三个不同点位以匀速运动遮挡矩形光束,通过示波器捕捉光电探测器的输出电压。图9为 d_1 、 d_2 、 d_3 三个点位上的位移—电压曲线图。

图9中,当遮挡板处于不同点位时,各点位的位移—电压曲线在中心1mm段(位移为1.5mm到2.5mm段)均呈现高度的线性关系。通过线性拟合对不同点位的实验曲线进行解析,各段曲线的电压

最值以及相关线性拟合结果见表2。

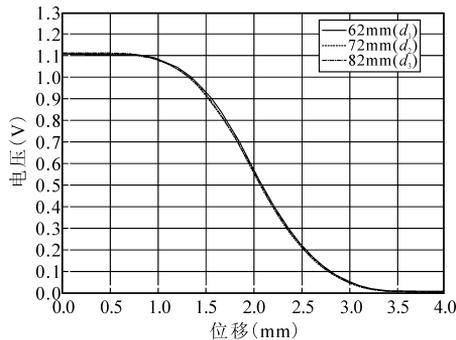


图9 遮挡板处于不同位点时的位移—电压曲线

表2 距离试验中位移—电压曲线中心1mm的各段曲线线性拟合结果

距离 (mm)	电压最大值 (V)	电压最小值 (V)	线性拟合方程	决定系数
$d_1 = 62$	0.932	0.222	$y = -0.755x + 2.086$	0.998
$d_2 = 72$	0.918	0.215	$y = -0.748x + 2.059$	0.998
$d_3 = 82$	0.918	0.213	$y = -0.746x + 2.052$	0.998

表2表明,当遮挡板处于不同点位时,位移电压曲线的中心1mm段的线性拟合决定系数均为0.998,说明遮挡板距离在一定范围内改变时,对矩形光斑在该区域能量匀化分布影响极其微弱;随着遮挡板与激光器距离的增加,激光强度逐渐降低,例如光斑中心2mm处,由表2的线性拟合方程 d_1 、 d_2 和 d_3 各点位的电压分别为0.576V、0.563V和0.560V,随着距激光器距离的增加,光强电压呈递减趋势;随着距离的增大,电压下降的变化速率逐步降低, d_1 和 d_3 点位与位于激光器和光电探测器中间的 d_2 点位的电压差分别为2.31%和-0.53%,说明遮挡板如果位于激光器和光电探测器中间或偏向光电探测器的点位,位置的变化对变形测量精度不会产生明显影响。因此,试件应置于准直透镜与光电探测器的中间或偏向光电探测器的位置,试件的位置差异对测量精度的影响基本可以忽略。

5 结语

遮挡板在不同控制运动模式下(等步长运动或匀速运动),其遮光过程和退出遮光过程得到的光斑能量分布完全一致,验证了系统机械机构能够产生精确的运动位移;等步长运动和匀速运动的检测结果说明系统能够对光斑能量分布进行有效和准确的检测;遮挡板不同点位检测实验表明,变形测量精度对遮挡板与准直透镜之间的距离在一定范围内的变化并不敏感,试件的位置变化对测量精度的影响十分微弱。本检测系统能够快速检测矩形光斑能量

分布,确定匀化区域范围,实现对矩形激光光斑强度分布情况的检测,具有较高的检测精度。通过设置不同控制程序,为遮挡板提供不同的精密机械运动模式模拟材料的横向变形,可直接应用于标定横向变形测量系统的变形测量。

参考文献

- [1] 武汉纺织大学. 一种基于激光照射强度变化的横向形变测量系统及方法: 中国, CN201610504094. 5 [P]. 2016-09-21.
 - [2] Avila G. FRD and scrambling properties of recent non-circular fibres [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012, 8446(1).
 - [3] Li Y, Ramesh K T. An optical technique for measurement of material properties in the tension Kolsky bar [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(4): 784-798.
 - [4] 赵鹏铎, 卢芳云, 陈荣, 等. 光通量法在 SHPSB 剪切应变测量中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3): 232-236.
 - [5] Bilger H R, Habib T. Knife-edge scanning of an astigmatic Gaussian beam [J]. Applied Optics, 1985, 24(5): 686.
 - [6] 李蕾, 臧景峰. 双狭缝扫描法测量激光光束质量 [J]. 激光技术, 2015, 39(6): 845-849.
 - [7] 国家纳米科学中心. 一种原位测量聚焦激光光斑能量分布的装置及方法: 中国, CN201010124758. 8 [P]. 2011-09-21.
 - [8] 高原, 樊仲维, 余锦, 等. 刀口法测平顶光斑和高斯光斑半径的新算法 [J]. 激光技术, 2013, 37(2): 261-264.
 - [9] 张爱丽, 佟首峰, 韩成, 等. 基于 CCD 的光斑能量分布测量及特性分析 [J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 622-626.
 - [10] 曹昭. 一元线性回归中的相关系数与回归直线斜率探讨 [J]. 统计与决策, 2009(9): 147-148.
 - [11] Acharya D, Rani A, Agarwal S, et al. Application of adaptive Savitzky-Golay filter for EEG signal processing [C]. International Conference on Recent Trends in Engineering and Material Sciences, 2016.
- 第一作者: 刘旭, 硕士研究生, 武汉纺织大学机械工程与自动化学院, 430200 湖北省武汉市
- First Author: Liu Xu, Postgraduate, School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China
- 通信作者: 黄承义, 博士, 教授, 武汉纺织大学机械工程与自动化学院, 430200 湖北省武汉市
- Corresponding Author: Huang Chengyi, Doctor, Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China