

## 激光双路对称透射法在线测量平板玻璃厚度

张景超, 闫 奎, 朱艳英, 李潮洋, 李贺光, 胡学良

(燕山大学 理学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对传统测量平板玻璃厚度的不足, 基于光的折射原理, 提出一种双路激光对称透射法, 设计了在线测量平板玻璃厚度的装置, 以线激光做光源, 以对称平面镜组为光路转换装置, 将对称分布的光路调制为两束相互平行的线激光, 线阵 CCD 传感器作为视觉探测工具, 并针对测量图像的特点, 选定背景与目标的过渡区域段的灰度值, 作为单束线光带图像的边界阈值, 使用改进灰度重心法提取线光带中心像素。通过对待测样品的实验检测, 结果表明该方法测量精确可达 0.1 mm, 该精度符合玻璃生产线上对其厚度检测标准的要求。由此证明了该方法的可行性, 并具有良好的实用价值。

**关键词:** 玻璃厚度; 线激光; CCD; 灰度图像; 在线测量

中图分类号: TP212.9 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)10-2812-05

## Method for on-line measuring thickness of glass by using laser two-way symmetrical transmission way

Zhang Jingchao, Yan Xi, Zhu Yanying, Li Chaoyang, Li Heguang, Hu Xueliang

(College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** For the shortcomings of the traditional flat glass thickness measurement, one method which was based on the principle of light refraction, with the dual laser symmetrical transmission method was proposed, and the whole measured system of on-line measurement of flat glass thickness was designed, in which line laser was the light source and the symmetry plane of mirrors were the optical path switching device to modulate the symmetrically distributed optical paths into two parallel line lasers, and a linear array CCD sensor was set as a visual exploration tool, meanwhile, the grey level of the transition area of the background and target was selected as the boundary threshold value of the single beam line's light band image according to the characteristics of captured image, the algorithm for obtaining light band center pixel was made modified gray gravity. After the experiment of the measurement on the sample glass thickness, the results show that the accuracy of these measurement methods can reach to 0.1 mm. The measuring accuracy is correspond with the requirements of the testing standards. Therefore the feasibility is verified, that have a good practical value.

**Key words:** glass thickness; linear laser; CCD; gray image; on line measurement

## 0 引言

目前,国内外平板玻璃生产线的主流方式多采用浮法工艺,其生产流程基本在高温环境下,玻璃熔浆在锡液的上表面成形,在经退火硬化定型后进行裁切。传统的玻璃厚度检测方法主要是通过测量仪器(千分尺或游标卡尺)对待测玻璃进行人工接触式计数测量。这些传统测量方法效率低、极易造成材料浪费,加之一些特殊的制造环境(如辐射、有害气体、高温等)很难进行接触式的实际测量。随着激光、图像传感、计算机视觉等等技术的快速发展<sup>[1]</sup>,这些技术已成为非接触式光电检测的主要工具,尤其被广泛应用于微光测量、实时监测、产品外部尺寸检测、表面质量评估等诸多领域<sup>[2]</sup>。对平板玻璃厚度测量的研究,国内外已有研究单位做了大量的工作<sup>[3-9]</sup>,其方法主要有激光二次折射反射法<sup>[5-6]</sup>、激光多普勒法<sup>[7-8]</sup>、象散法<sup>[9]</sup>等。但这些方法的测量装置结构复杂、成本高、且在玻璃高温环境下不易长久跟踪测试等。针对这些问题文中提出激光双路对称透射法,并设计整个测量装置系统,对样品进行在线实时测量,该测量系统操作简单、适用于高温环境非接触测量。

## 1 测量原理

根据光的折射定律,光束入射到平板玻璃上,在平板玻璃的上表面和下表面均发生折射,从下表面折射的光线与入射光线方向平行,但光线位置平移了一段距离。如图 1 所示为激光测量原理图。设空气

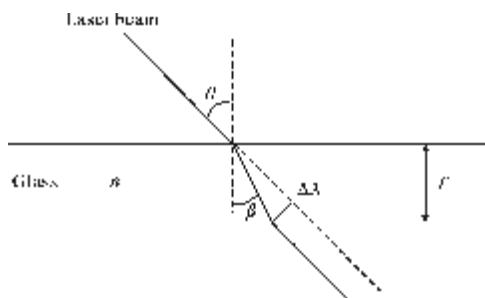


图 1 测量原理图

Fig.1 Diagram of measurement principle

折射率为  $n_0$ ( $n_0 \approx 1$ ),玻璃折射率为  $n$ ,待测平板玻璃厚度为  $T$ ,光束平移量为  $\Delta x$ 。依据图 1 中几何关系可得

$$\Delta x = T(\sin \theta - \cos \theta \cdot \tan \theta) \quad (1)$$

由光的折射定律

$$n = \sin \theta / \sin \beta \quad (2)$$

式中:  $\theta$ 、 $n$  为已知量, 可令  $H = \sin \theta - \cos \theta \cdot \tan \theta$ , 则公式(1)变为  $\Delta x = T \cdot H$ 。

从而玻璃的厚度为:

$$T = \Delta x / H \quad (3)$$

为了减小单光束测量误差,笔者设计了如图 2 所示的对称双路测量光路测量装置,分别由对称的

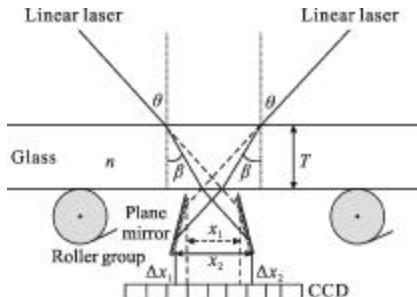


图 2 对称双光路图

Fig.2 Principle diagram of symmetric dual beam

线激光光源、对称的平面镜组 CCD(Charge Couple Device)传感器构成,对称平面镜组为光路调制装置,可将对称分布的光路调制为两束相互平行的线激光,CCD 为光路接受装置。测量中光束偏移量通过 CCD 传感器进行测试和标定,图中两对称光束经过平面镜组反射后,成为一组相互平行的线光束,其光束平移量相等,分别为  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$ ,则:

$$\Delta x = \Delta x_1 = \Delta x_2 = (x_2 - x_1) / 2 \quad (4)$$

则玻璃厚度为:

$$T = |x_2 - x_1| / 2H \quad (5)$$

镜头成像公式为:

$$\Delta x = \gamma \Delta N \cdot p / M \quad (6)$$

式中:  $M$  为镜头放大倍率;  $\Delta N$  为像素数;  $p$  为单元像素;  $\gamma$  为成像定标系数,即线光束像素与位置变化的线性系数,可由事先未放置玻璃时测定,根据公式(4)~(6)可得厚度测量公式为:

$$T = \frac{\Delta x}{2H} = \gamma \frac{\Delta N \cdot p}{2HM} \quad (7)$$

## 2 测量系统设计与装置

文中选择玻璃生产线上的透明平板玻璃为检测对象,可在玻璃退火冷却端进行非接触在线实时测量。总体方案设计如图 3 所示,该测试系统由光源,光线处理装置(包括滤波、准直、激光校正及稳定装置)组成,成像

系统由在一定范围内成像的标准镜头组成。图像采集系统由 CCD 传感器、图像采集卡以及 CCD 驱动装置组成,所采集的图像以数字图像形式保留下来,经过计算机系统相关处理,最后在显示器显示出来。

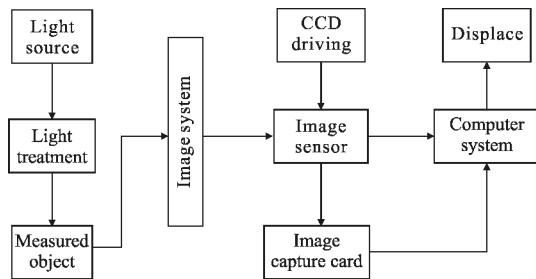


图 3 测量系统框架图

Fig.3 Structure diagram of measurement system

测量装置如 4 所示,其中光源依据图 5 中 CCD 光谱响应曲线,响应曲线敏感区域主要集中在可见光波段,在线测量时玻璃热辐射为红外区域波段,该波段不

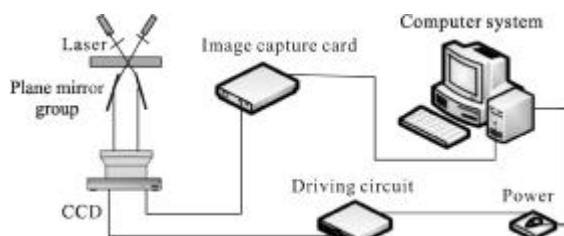


图 4 系统测量装置示意图

Fig.4 System model of experimental device

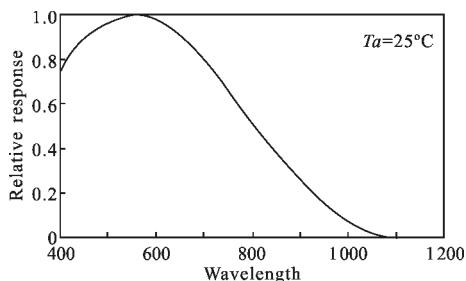


图 5 CCD 光谱响应曲线

Fig.5 CCD spectral response curve

在 CCD 光谱响应区域范围内。采用半导体线激光器,波长为  $632\text{ nm}$ ,功率为  $3\text{ mW}$ ,出口线宽  $L \leq 0.5\text{ mm}$ 。镜头采用 ZENITAR-F2/50 mm 型号标准镜头,镜头焦距为  $50\text{ mm}$ ,光学成像放大倍率为  $M=1:5$ 。CCD 传感器采用日本东芝 TOSHIBA-TCD1501D 型号,像元数目为 5 000 像素,有效像元尺寸  $35\text{ mm}$ ,单位像元间距  $p=7\text{ }\mu\text{m}$ 。采集卡使用 KXUSB-SDK 系列,采

用 USB 总线数据接口,使接口芯片与主机 USB 接口相连,图像以灰度图像 GRAY8 数字图像格式显示出来,图像可以 JPG、BMP 等格式存储。

### 3 光带中心识别算法

这里提取光条纹图像中心像素是系统整个实验测量的关键环节,系统装置中线激光产生的光条纹如图 6(a)所示是个一字线型,在线激光光束的截面上,对应光强能量通常呈现的是强度对称的高斯分布,图像条纹的灰度由光条纹中心向两侧逐步递减,直到与背景灰度值融合。图 6(b)为边界区域灰度图像,右边黑色为背景部分情况,中间灰色状态为边界过渡区域即高斯发散区域部分。图 7 为图 6 中对应的光带灰度直方统计图,可以确定其边界阈值。

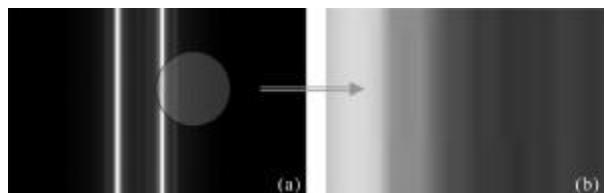


图 6 线光带灰度图像

Fig.6 Grayscale image of line light band line

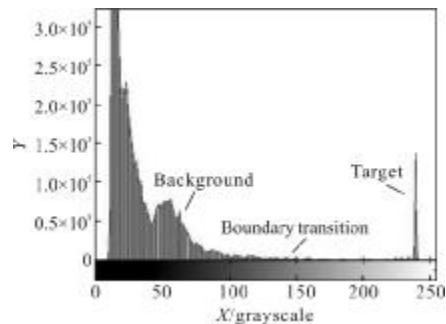


图 7 光带灰度直方统计图

Fig.7 Gray straight party statistics

由于系统采集过程中产生各种随机噪声对图像采集可能或多或少带来不稳定的影响。有时会造成图像灰度分布不对称或者光条纹中心偏移等(灰度中心理论认为两边邻域像素对称分布)。针对图像特点中心像素提取有多种方法<sup>[9-10]</sup>,文中对灰度重心法<sup>[11-12]</sup>进行改进,首先可通过阈值法对边界进行粗定位,选定背景与目标的过渡区域段的灰度值,作为单束线光带图像的边界阈值,以确定光带中心邻域范围。则线光带中心像素计算如图 8 所示,  $C_i$  为

像素,基于物理学中刚体质心原理,则中心像素灰度重心表达式为:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^r f(i, j) \times P(i, j)}{\sum_{i=1}^r f(i, j)}, (l \leq j \leq r) \quad (7)$$

由于线激光呈高斯分布,为使计算中心更为接近实际光带中心,采用加权式计算灰度质心,可增强那些离实际光强灰度中心近的像素对所求中心像素的影响,则公式(7)变为:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^r [f(i, j) - f_{th}]^2 \times P(i, j)}{\sum_{i=1}^r [f(i, j) - f_{th}]^2}, (l \leq j \leq r) \quad (8)$$

式中: $C_i$  为线光带某一行中心像素; $f(i, j)$  为光带中心邻域灰度值,即光强灰度表示; $P(i, j)$  为坐标像素; $f_{th}$  为图像目标与背景分割的阈值; $f(i, j) - f_{th}$  可在运算中降低背景噪声对光强分布的影响。通过平方的形式加权,可增大光强大的像素在定位光带中心时的权重,适合呈高斯分布的光带图像。

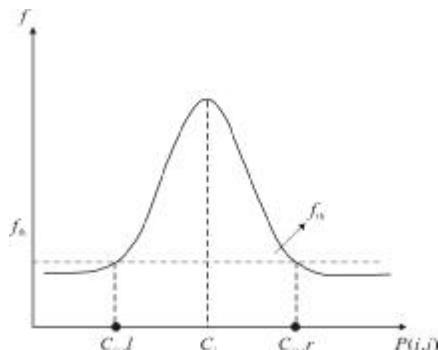


图 8 中心像素计算示意图

Fig.8 Sketch of searching center pixel

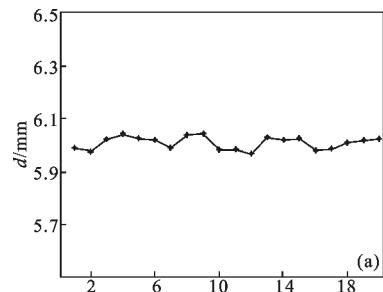
#### 4 实验及分析

选定线激光光线入射平板玻璃的入射角为  $45^\circ$ ,首先在未加载玻璃样品时,对两条线状光条纹位置做一个参考标定;然后在玻璃样品加载之后,确定两个平行光束间隔距离与像素变化之间的线性比例关系,即  $\gamma$  定标系数。最后分别对厚度不同玻璃样品进行实验测量。实验中样品玻璃折射率为 1.512,测量的数据如表 1 所示,测量以 20 个测量点为一组单元,计算所得平均厚度为 6.0078 mm, 测量的平均误差为 0.0217 mm。对应的测量数据与误差表述如图 9 所示。

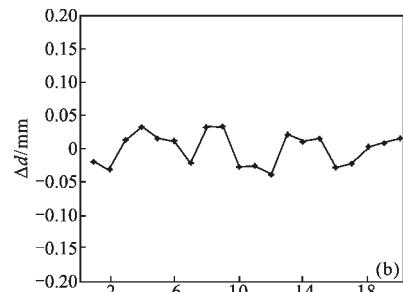
表 1 6 mm 玻璃厚度实测数据(单位:mm)

Tab.1 Experimental date of thickness measurement of 6 mm glass(Unit: mm)

No.	$\Delta N$	T	$\Delta T$
1	147.75	5.9869	-0.0209
2	147.51	5.9768	-0.0311
3	148.57	6.0211	0.0133
4	149.09	6.0411	0.0333
5	148.65	6.0235	0.0157
6	148.56	6.0199	0.0121
7	147.75	5.9867	-0.0211
8	149.06	6.0399	0.0321
9	149.11	6.0422	0.0344
10	147.76	5.9801	0.0277
11	147.63	5.9821	-0.0257
12	147.31	5.9688	-0.0390
13	148.81	6.0299	0.0221
14	148.51	6.0175	0.0097
15	148.65	6.0234	0.0156
16	147.54	5.9784	-0.0294
17	147.72	5.9857	-0.0221
18	148.32	6.0098	0.0020
19	148.51	6.0179	0.0101
20	148.67	6.0243	0.0165



(a)



(b)

Fig.9 Measured values and error diagram

表 2 是对其他厚度玻璃进行测量。从测量的实验数据中得知,各厚度测量的误差均小于 0.1 mm,该精度达到玻璃厚度测量标准的要求。

表 2 不同样品测量数据表(单位:mm)

Tab.2 Measurement date of different thickness sample(Unit: mm)

Sample	3	4	10	15
Measured value	3.039 3	4.041 1	10.004 2	15.018 1
Even error	0.036	0.026	0.023	0.019

## 5 结 论

文中针对玻璃厚度非接触在线测量的问题,提出一种激光双路透射法,设计出玻璃厚度测量装置系统,可以在玻璃退火冷却过程中对玻璃厚度进行实时在线检测。实际生产过程中玻璃退火温度比较高,热气流往上升,把 CCD 置于玻璃下方就是为了避免上升的热流对 CCD 传感器的影响和干扰,实际测量时采用双路对称光路,基于改进灰度重心法,可大大降低测量过程中的系统误差,可以满足国家现在规定的厚度检测标准(GB11614-1999),厚度实际测量范围在 2~20 mm 内。同时,该系统通过改装,还可对玻璃表面平整度以及玻璃应力进行定性分析。该方法对玻璃厚度非接触式在线测量的精度、灵敏度及稳定性均有很大提高,且对环境要求不高,具有重要的实用价值。

## 参考文献:

- [1] Chen Donglei, Wang Qingyuan, Zhang Tianshun. CCD sensor and its applications[J]. Sensor World, 2007(7): 22-26. (in Chinese)  
陈东雷, 王清元, 张天顺. CCD 传感器及其应用研究[J]. 传感器世界, 2007(7): 22-26.
- [2] He Sihua, Yang Shaoqing, Shao Xiaofang, et al. Ship target detection on the sea surface based on natural measure feature of image block [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1812-1815. (in Chinese)  
何四华, 杨绍清, 邵晓方, 等. 利用图像区域自然尺度特征的海面舰船目标检测 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1812-1815.
- [3] Novikov M A, Tertyshnik A D, Ivanov V V. Optical interference system for controlling float-glass ribbon thickness at hot Stages of production [J]. Glass and Ceramics, 2004, 61(2): 37-41.
- [4] Mamedov F I, Dadashov M G, Gabibov S Sh. Device for continuous glass thickness determination [J]. Glass and Ceramics, 1990, 47(5): 184-186.
- [5] Cong Hexi, Wang Shutao, Li Yuanyuan, et al. On-line thickness measurement technology for high temperature glass based on light reflection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1356-1359. (in Chinese)  
丛赫曦, 王书涛, 李园园, 等. 基于光反射的高温玻璃厚度在线检测技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1356-1359.
- [6] Zhang Yao, Wang Baoya, Liang Hongfeng, et al. Study on application of optical measurement system in high temperature environment [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(5): 73-75. (in Chinese)  
张姚, 王宝亚, 梁洪峰, 等. 一种新型光学测量系统那在高温环境中的应用研究[J]. 传感器与系统, 2008, 27(5): 73-75.
- [7] Song Chen, Lv Cen, Guo Qi, et al. One method for measuring thickness of glass by using laser heterodyne and doppel [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1635-1638. (in Chinese)  
宋晨, 吕岑, 郭琪, 等. 一种激光外差多普勒玻璃厚度的测量方法[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1635-1638.
- [8] Li Yanchao, Zhang Liang, Yang Yanling, et al. The method for multi-beam laser heterodyne high-precision measurement fo the glass thickness[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8): 5475-5477. (in Chinese)  
李彦超, 章亮, 杨彦玲, 等. 多光束激光外差高精度测量玻璃厚度方法[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5475-5477.
- [9] Liu Chien-hang, Li Zonghan. Application of the thickness measurement of glass substrates [J]. Applied Optics, 2008, 21: 3968-3970.
- [10] Wu Qingyang, Su Xianyu, Li Jingzhen, et al. A new method for extracting the centre-line of light structure light-stripe[J]. Journal of Sichuan University, 2007, 39(4): 151-155. (in Chinese)  
吴庆阳, 苏显渝, 李景镇, 等. 一种新的线结构光光带中心提取算法[J]. 四川大学学报, 2007, 39(4): 151-155.
- [11] Wu Jiayong, Wang Pingjiang, Chen Jihong, et al. Method of linear structured light sub-pixel center position extracting based on gradient barycenter [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(7): 1354-1358. (in Chinese)  
吴家勇, 王平江, 陈吉红, 等. 基于梯度中心法的线结构中心亚像素提取方法 [J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(7): 1354-1358.
- [12] Zhao Xin, Zhang Yi, Zhang Liming, et al. Algorithm of laser altimeter reflecting waveform based on Gaussian decomposition [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 643-648. (in Chinese)  
赵欣, 张毅, 张黎明, 等. 激光测高仪高斯回波分解算法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 643-648.