

可自适应位移变化的玻璃厚度激光三角测量方法

刘凯媚, 陶卫, 陈潇, 李智, 赵辉*

上海交通大学电子信息与电气工程学院仪器科学与工程系, 上海 200240

摘要 传统的激光三角法测量玻璃厚度时,玻璃与测头的相对位置需保持固定,每当玻璃位置移动时,均需重新标定才能进行准确测量。针对这一问题,提出可自适应位移变化的玻璃厚度激光三角测量方法,玻璃在不同位置时均可以直接对玻璃厚度进行测量。首先分析当玻璃位于基准位置时,其前、后表面反射光的成像光斑间距与玻璃厚度之间的关系;其次分析当玻璃位移变化时,成像光斑间距与玻璃前表面位置、玻璃厚度之间的关系,建立数学模型,并相应地提出修正算法来消除玻璃位移变化对厚度测量的影响;最后设计了基于激光二极管-互补金属氧化物半导体(LD-CMOS)的激光三角测量系统,并采用多块已知厚度的玻璃样本进行标定和测量实验。实验结果表明,当玻璃位置在 1~4.5 mm 的范围内变动时,不同位置处玻璃厚度测量的绝对误差小于 0.010 mm,并且相对误差均在 0.5% 以内。该方法实现了玻璃在不同位置时对玻璃厚度的高精度测量,无需重复标定,具有很好的实用性、灵活性和通用性。

关键词 测量;无损检测;玻璃厚度测量;激光三角法;自适应;补偿

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0104003

Laser Triangulation Method for Glass Thickness by Automatically Adapting to Displacement Change

Liu Kaimei, Tao Wei, Chen Xiao, Li Zhi, Zhao Hui*

Department of Instrument Science and Engineering, School of Electronic Information and Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract When we measure glass thickness using the traditional triangulation method, the relative position of the glass and probe should be kept fixed. When the position of the glass changes, it must be recalibrated to accurately measure thickness. To address this problem, a multi-position glass-thickness-measurement method based on laser triangulation that can automatically adapt to displacement changes is proposed in this paper. By this method, glass thickness can be measured directly when glass position changes. Firstly, the relationship between the glass thickness and spacing of imaging spots of the reflected light from the front and back surfaces of the glass is analyzed when the glass is at the standard position. Then, the relationship among the spacing of imaging spots, position of front surface of the glass, and glass thickness is analyzed when the glass displacement changes. The corresponding mathematical model is established, and a compensation algorithm is proposed herein to correct the influence of the glass displacement change on the glass-thickness measurement. Finally, a laser triangulation system based on a laser-diode-complementary metal-oxide semiconductor (LD-CMOS) is designed, and multiple glass samples with known thicknesses are used for calibration and measurement experiments. Experimental results show that when the glass position changes within the range of 1-4.5 mm, the absolute errors of glass-thickness measurement at different positions are less than 0.010 mm and the relative errors are within 0.5%. The proposed method can thus realize high-precision glass-thickness-measurement without repeated calibration when the glass is at different positions, displaying good practicability, flexibility, and versatility.

Key words measurement; nondestructive test; glass-thickness measurement; laser triangulation; self-adapting; compensation

OCIS codes 120.4290; 120.4570; 120.5700

收稿日期: 2019-06-25; 修回日期: 2019-07-24; 录用日期: 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(51975374)

* E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn

1 引 言

近年来,玻璃作为工业生产重要的原材料之一,在电子信息、交通运输、航天航空、建筑装饰等领域的应用越来越广泛。玻璃的厚度测量对于玻璃生产、加工和质量控制都是不可或缺的环节。传统的测量方式主要利用螺旋测微计和游标卡尺等工具进行人工测量,这种人工的接触式测量灵活性差、效率低、易导致玻璃表面划痕,所以灵活高效、非接触式的光电检测方法得到了越来越广泛的应用。

关于玻璃厚度的光电检测方法主要有透射法、共焦法和反射法^[1]。在激光透射法中检测激光透射玻璃时,利用由折射导致的传播方向的偏移量来进行厚度测量,需在玻璃一侧放置激光光源,另一侧放置光电检测器件,所需空间较大、灵活性低、结构较为复杂^[2-3]。共焦法利用光学系统中透镜的位置色差来检测玻璃厚度,即同一透镜对不同波长的光的焦距不同,通过分析玻璃上、下表面中两个反射峰对应的波长值来计算玻璃厚度。该方法测量玻璃厚度时精度高,但是量程较小,测量速度受光谱分析限制,适用于微小精密物体的测量^[4-6]。反射法主要基于激光三角原理,即激光以一定角度入射到玻璃表面,通过检测玻璃前、后表面反射光之间的间距来检测玻璃厚度,是应用最广的玻璃测厚方法。

天津大学的刘力双等^[7]研制了基于电荷耦合器件(CCD)的玻璃厚度在线测量系统,半导体激光器发射激光,激光通过柱面镜变成线激光照射到玻璃表面,玻璃上、下表面的发射光直接垂直入射到线阵 CCD 表面,玻璃厚度与 CCD 上光条纹的垂直距离成线性关系。该系统没有成像透镜,结构简单,但是对照射在玻璃表面的线激光质量要求更高,并且若玻璃厚度变化,线性系数也会发生改变,测量系统无法进行在线标定,测量误差会随玻璃厚度的变化而变化。杨桂栓等^[8-9]提出一种利用激光位移传感器测量玻璃厚度时的光线补偿方法。该方法可直接利用现有直入射式的激光三角传感器进行测量。但该方法是基于被测物表面的散射效应,散射光强取决于被测物表面的粗糙度,而玻璃表面较为光滑,表面的散射光斑极弱,限制了该方法的实用性。大连理工大学的孙峰、陈应诤^[10-11]搭建了基于激光三角法的玻璃厚度在线测量系统。该系统采用线结构光源,用镜头将玻璃前、后表面反射光条纹成像到面阵 CCD 上,通过计算两个光条纹的间距来测量玻璃厚度。该系统量程较大、效率高,但是测量装置的体积

较大,测量精度受限于线激光质量和面阵 CCD 的图像畸变,并且每当待测玻璃与测量装置之间的相对位置发生变化时,需要重新对系统进行标定,灵活性仍有待提高。

针对激光三角法测量玻璃厚度的上述问题,本文基于当光学系统满足 Scheimpflug 成像定律^[12]时,玻璃厚度与成像器件上玻璃前、后表面反射光的光斑间距之间的关系,构建了当玻璃位置变化时,成像器件上光斑间距与玻璃厚度和玻璃位移三者之间的关系模型。因此,在测量时,可以先根据成像器件上玻璃前表面反射光光斑的偏移量测量玻璃位置,再据此对玻璃位移变化带来的影响进行相应的修正。基于该方法,设计了基于点激光和线阵 CMOS 的玻璃厚度测量系统,该系统体积和结构相较于文献中使用线激光和面阵 CCD 的测量系统更为轻巧简单,并且可以实现玻璃在量程范围内任意位置时均可对玻璃厚度进行高精度、高效率的测量,无需重复标定,有很高的灵活性和实用性。

2 基本原理

基于激光三角法的玻璃厚度测量系统,利用光的折射和原理进行测量,通过计算玻璃前、后表面反射光在 CMOS 上的两个成像光斑间距来测量玻璃厚度。其中,成像光斑间距的大小不仅由待测玻璃厚度决定,还与玻璃位置有关。

2.1 玻璃位于基准位置

基于激光三角法的玻璃厚度测量系统如图 1 所示,测量系统由激光器、发射透镜、接收透镜和线阵 CMOS 组成。

令待测玻璃折射率为 n ,当待测玻璃前表面刚好位于基准面位置时,激光二极管所发射的激光以一定角度入射,经过发射透镜会聚后照射到待测玻璃表面的 O 点,入射角为 ϵ ,过 O 点作玻璃表面的垂直轴 OQ ,CMOS 上成像角为 θ 。 O 点处物距为 a ,像距为 b 。

在 O 点处的空气-玻璃交界面,一部分激光经玻璃前表面反射后经过接收透镜到达 CMOS 上 O' 点, ON 与接收透镜光轴重合,反射角 α 等于入射角,所以接收透镜光轴与 OQ 轴夹角 α 与 ϵ 相等。另一部分激光在 O 点处折射进入玻璃内部,折射角为 γ ,其中的一部分再经玻璃下表面反射后在玻璃-空气交界面折射形成光线 BF 。光线 BF 经过透镜折射后照射到 CMOS 表面 A' 点处,像点 O' 和 A' 的间距 x 即包含了玻璃的厚度信息 d 。

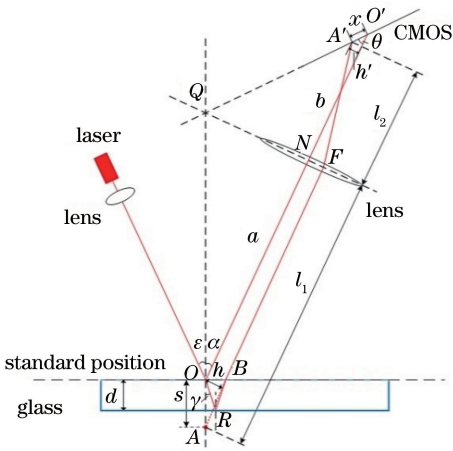


图 1 激光三角法玻璃厚度测量原理图
Fig. 1 Principle of glass-thickness measurement based on laser triangulation

反向延长 BF , 交 OQ 轴于 A , 故像点 A' 可视为 OQ 轴上 A 点经过透镜在 CMOS 上所成的像点。 O' 为 O 所成像点, 由图 1 可知物平面、透镜平面和像平面交于一条直线^[13-15], 系统满足 Scheimpflug 成像定律。入射角 ϵ 和工作角 α 增大, 测量系统的灵敏度增大, 分辨率减小。在实际测量中, 入射角 ϵ 的选取还受工作距、成像透镜焦距、CMOS 成像长度和测量系统尺寸的限制^[16]。

此时

$$a \tan \alpha = b \tan \theta, \quad (1)$$

A 点处物距 $l_1 = a + s \cos \alpha$, 物高 $h = s \sin \alpha$, 像距 $l_2 = b - x \cos \theta$, 像高 $h' = x \sin \theta$ 。根据三角形相似, 得

$$\frac{s \sin \alpha}{a + s \cos \alpha} = \frac{x \sin \theta}{b - x \cos \theta} \quad (2)$$

由(2)式可得

$$s = \frac{ax \sin \theta}{b \sin \alpha - x \sin(\alpha + \theta)} \quad (3)$$

玻璃厚度 d 与 s 满足

$$d = \frac{\tan \alpha}{2 \tan \gamma} s = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{2 \cos \alpha} s \quad (4)$$

若玻璃材质确定且系统结构固定时, $\frac{\tan \alpha}{2 \tan \gamma}$ 为常数, 因此可通过 CMOS 上光斑间距 x 测得玻璃厚度 d , 即

$$d = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{ax \sin \theta}{b \sin \alpha - x \sin(\alpha + \theta)} \quad (5)$$

2.2 玻璃位置变动

当玻璃位置相对测量基准面移动距离 y 时, 如图 2 所示, 激光照射于玻璃表面的 O_1 点, O_1 点反

射光 $O_1 N_1$ 和折射-反射-折射光 $B_1 F_1$ 经过透镜分别照射到 CMOS 上的 O'_1 和 A'_1 处, $O_1 N_1$ 与垂直轴 OQ 交于 M , 反向延长 $B_1 F_1$ 与轴 OP 交于 A_1 。此时, O'_1 和 A'_1 可分别视为 OQ 轴上点 M 、 A_1 经接收透镜在 CMOS 上的成像点。

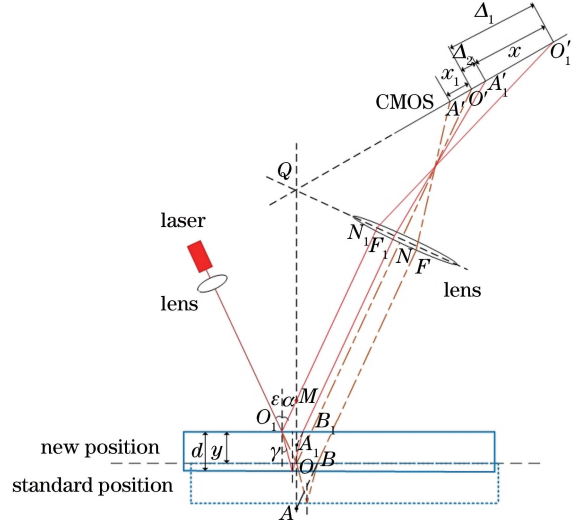


图 2 玻璃位置移动时的厚度测量示意图
Fig. 2 Schematic of glass-thickness measurement when glass position changes

设 OM 的长度为 s_1 , OA_1 的长度为 s_2 , 则

$$s_1 = 2y, \quad (6)$$

$$s_2 = 2y - 2d \frac{\tan \gamma}{\tan \alpha} \quad (7)$$

若玻璃材质确定且系统结构固定时, $\frac{\tan \gamma}{\tan \alpha}$ 为常数, 令

$$k = \frac{\tan \gamma}{\tan \alpha} = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \quad (8)$$

受玻璃位移影响, CMOS 上两像点间距与玻璃位于初始面时的 CMOS 上像点间距不等, 玻璃厚度计算模型就发生了变化。根据三角形相似和 Scheimpflug 成像定律, CMOS 上玻璃前、后表面的反射光斑相对玻璃位于基准位置时前表面反射光斑的偏移量分别为

$$\Delta_1 = O'O'_1 = \frac{bs_1 \sin \alpha}{a \sin \theta + s_1 \sin(\alpha + \theta)}, \quad (9)$$

$$\Delta_2 = O'A'_1 = \frac{bs_2 \sin \alpha}{a \sin \theta + s_2 \sin(\alpha + \theta)}, \quad (10)$$

因此, 可以通过玻璃前表面反射光在 CMOS 上成像光斑的偏移量 Δ_1 来计算玻璃的位移量 y , 即

$$y = \frac{a \Delta_2 \sin \theta}{2[b \sin \alpha - \Delta_2 \sin(\alpha + \theta)]}, \quad (11)$$

此时, CMOS 上两光斑的间距 $x = \Delta_2 - \Delta_1$, 经过化

简可得

$$x = \frac{K \cdot d}{d \cdot f(y) + g(y)}, \quad (12)$$

其中

$$K = 2kd \cdot ab \sin \alpha \sin \theta,$$

$$f(y) = 2k[a \sin \theta \sin(\alpha + \theta) - 2y \sin^2(\alpha + \theta)],$$

$$g(y) = [a \sin \theta + 2y \sin(\alpha + \theta)]^2.$$

由(12)式可得厚度 d 的表达式为

$$d = \frac{x \cdot g(y)}{K - x \cdot f(y)}, \quad (13)$$

当 $y=0$ 时,(13)式与(5)式相同。

综上,在测量玻璃厚度时,可先根据(11)式测出玻璃的前表面实际位置,再依据(13)式得到此处玻璃厚度与光斑间距之间的关系,修正位移变化对测量结果的影响。

3 系统设计

基于三角法的玻璃厚度测量系统主要可以分为光学系统、电路与软件系统以及机械系统三部分,如图3所示,光学系统可以分为发射和接收两个部分。由发射系统发射细小光束照射到被测玻璃表面,其上、下表面的反射光由接收模块聚焦成像在光电器件上,并将光信号转换成电信号。当被测玻璃位置变化时,光电器件接收的光信号也随之变化,并输出与之相对应的电信号。该信号通过处理中心和接口电路传输至数据处理系统进行处理后得到测量结果。其中,测量系统设计核心是光学系统和结构参数。光学系统的稳定和结构参数的合理配比决定了测量的精度。

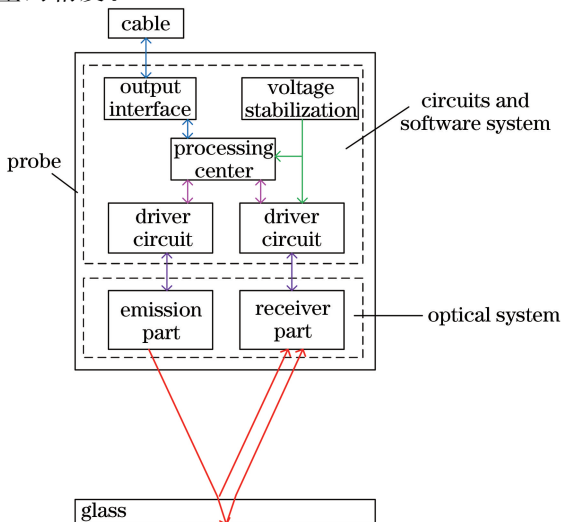


图3 测量系统整体结构框图

Fig. 3 Overall structure of measurement system

在发射端,光源采用三洋红色激光二极管 DL3148-025,波长为 635 nm,连续输出功率为 5 mW,发射透镜选用 M7 玻璃激光聚焦镜头,焦点处的光斑直径可以达到 0.1 mm。为减小球差,接收端采用自行设计的非球面透镜,焦距为 18 mm,CMOS 选用 Dynamax Imaging 的 ELIS1024 线阵 CMOS 光电传感器,成像长度为 8.0 mm。在对系统光学结构选择系统参数时,要综合考虑测量范围、测量精度以及测量系统的体积。最后用 ZEMAX 设计得到的系统结构仿真图如图4所示,可以保证测头横向长度在 70 mm 以内,纵向长度在 50 mm 以内。

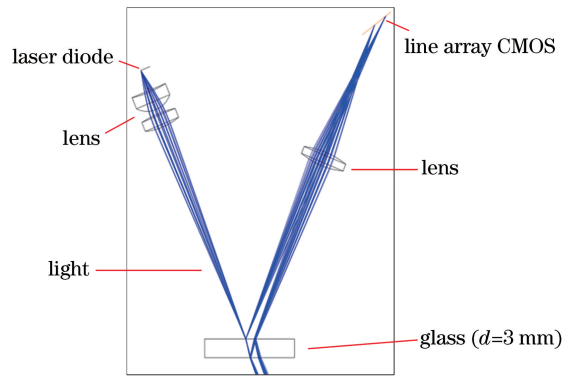


图4 ZEMAX 光学系统仿真示意图

Fig. 4 Schematic of optical system simulation by ZEMAX

当待测玻璃厚度为 3 mm,前表面位于基准面位置时,ZEMAX 仿真得到的成像波形如图5所示。其中右侧波形为玻璃前表面反射光在 CMOS 上成像光斑波形,左侧为玻璃后表面反射光在 CMOS 上成像光斑波形,波形质量较高,说明系统设计满足要求。

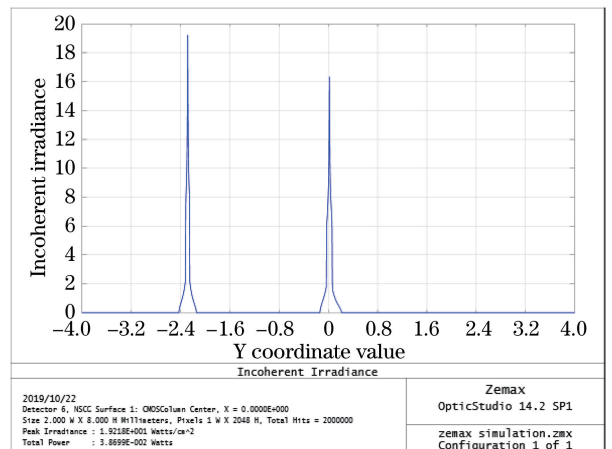


图5 CMOS 上成像波形 ZEMAX 仿真示意图

Fig. 5 Schematic of ZEMAX simulation of imaging waveform on CMOS

根据所设计的结构搭建测量系统,如图 6 所示,测头安装在左侧固定平台上,待测玻璃的加持装置固定在带有移动导轨的平台上,导轨上装有光栅尺,其分辨率可达 0.0001 mm。

对一块厚度为 3 mm 左右的 K9 玻璃进行测量时,玻璃位置从测头近端移动到远端时,CMOS 上的波形如图 7 所示,与仿真结果趋于一致。

4 测量实验与结果

4.1 测量系统标定

测量时,先选用 4 块厚度不同的 K9 玻璃进行

标定实验,4 块玻璃的厚度已由千分尺测出,如表 1 所示。

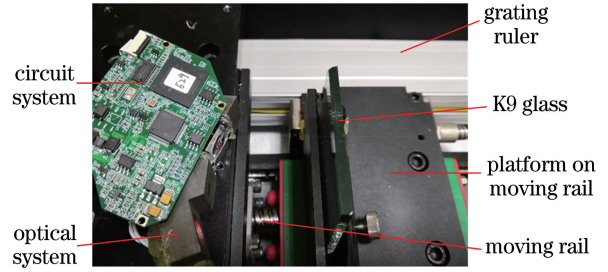


图 6 玻璃厚度测量实验系统

Fig. 6 Experimental system for glass-thickness measurement

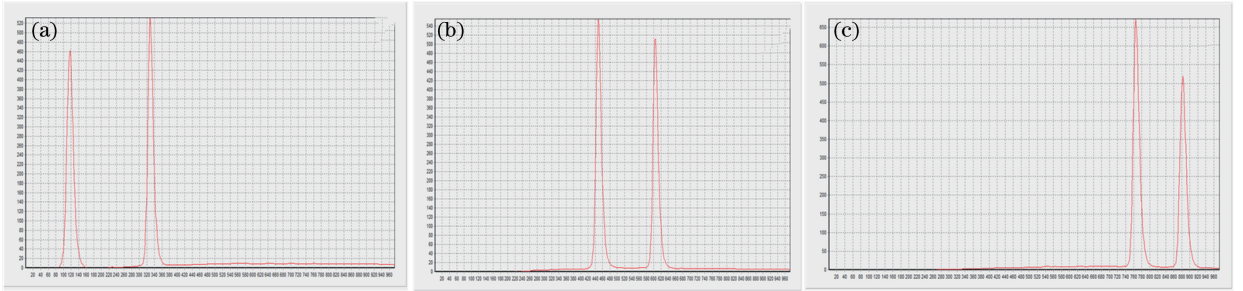


图 7 实际测量时玻璃位于不同位置时的 CMOS 波形。(a)近端;(b)基准位置附近;(c)远端

Fig. 7 CMOS waveforms in actual measurement when glass is at different positions.

(a) Proximal; (b) close to standard position; (c) distal

表 1 标定所用玻璃厚度

Table 1 Thicknesses of glass used for calibration

Number of glass	1	2	3	4
Thickness /mm	1.100	1.850	3.318	5.822

标定时,先将导轨位置固定,分别采集不同厚度玻璃前、后表面反射光在 CMOS 上的成像光斑的间距,再移动导轨,读取光栅尺测得的导轨移动量,采集此位置下不同厚度玻璃对应的成像光斑间距大小,并重复上述过程。

玻璃位置随导轨移动时,在每个不同的位置上,CMOS 上光斑间距与玻璃厚度的关系如图 8 所示,

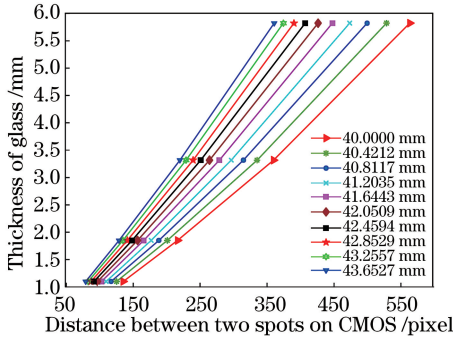


图 8 不同位置下 CMOS 上光斑间距与玻璃厚度关系

Fig. 8 Spot spacing on CMOS as a function of glass thickness when glass is at different positions

玻璃越厚,CMOS 上对应光斑间距越大。对于每块玻璃而言,CMOS 上光斑间距与玻璃位移间的关系如图 9 所示,玻璃厚度不变时,CMOS 上光斑间距随待测玻璃与测头之间相对距离的增大而减小。

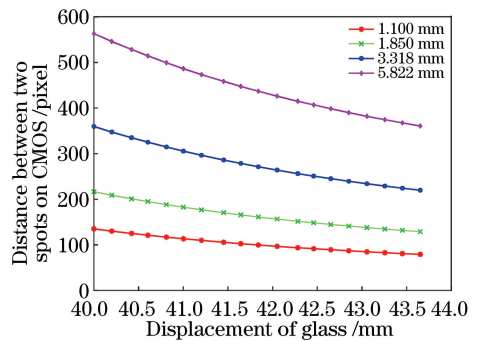


图 9 测量不同厚度玻璃时,CMOS 上光斑间距随玻璃位移变化关系

Fig. 9 Spot spacing on CMOS as a function of glass displacement when glasses with different thicknesses are measured

因为实际加工和安装误差,系统实际参数和设计参数会存在一定偏差,所以不能直接利用(13)式计算玻璃厚度。可以采用拟合法,根据标定实验结果,拟合出不同位置下玻璃厚度像素间距之间的关系(均可用二次多项式进行拟合),即

$$y = Ax^2 + Bx + C, \quad (14)$$

再分析玻璃厚度-光斑间距的拟合关系式随玻璃位置变化的规律。

实际测量时,先根据 CMOS 上前表面反射光斑的位置测出玻璃的位移,再根据玻璃的位移得到此位置下玻璃厚度-像素间距的关系式,即可测得玻璃厚度。

表 2 厚度为 3.018 mm 的玻璃在不同位置下的测量数据

Table 2 Data of thickness measurement for 3.018-mm-thick glass at different positions

Displacement of glass /mm	Distance between spots /pixel	Measurement result /mm	Measurement error /mm	Absolute error /m	Relative error /%
40.0000	331.6672	3.006	0.012	0.012	0.38
40.4212	310.3207	3.030	-0.012	0.012	0.39
40.8117	291.6010	3.033	-0.015	0.015	0.48
41.2035	274.4923	3.030	-0.012	0.012	0.39
41.6443	257.7499	3.028	-0.010	0.010	0.33
42.0509	243.6491	3.021	-0.003	0.003	0.11
42.4594	231.3922	3.021	-0.003	0.003	0.10
42.8529	220.3813	3.015	0.003	0.003	0.11
43.2557	210.1754	3.007	0.011	0.011	0.37
43.6527	202.6494	3.023	-0.005	0.005	0.17
44.0747	194.1861	3.022	-0.004	0.004	0.14

表 3 厚度为 4.389 mm 的玻璃在不同位置下实测数据

Table 3 Data of thickness measurement for 4.389-mm-thick glass at different positions

Displacement of glass /mm	Distance between spots /pixel	Measurement result /mm	Measurement error /mm	Absolute error /mm	Relative error /%
40.2224	435.717	4.384	0.005	0.005	0.16
40.6425	408.5386	4.403	-0.014	0.014	0.47
41.0540	384.2368	4.397	-0.008	0.008	0.27
41.4802	361.4038	4.383	0.006	0.006	0.20
41.8618	344.5201	4.389	0.000	0.000	0.01
42.2498	328.0131	4.379	0.010	0.010	0.33
42.6555	313.0257	4.380	0.009	0.009	0.30
43.0428	300.0813	4.383	0.006	0.006	0.19
43.4139	289.0668	4.385	0.004	0.004	0.12
43.6162	283.9852	4.397	-0.008	0.008	0.26

若不根据玻璃位移-玻璃厚度-光斑间距的数学模型而采用补偿算法,根据位移值对不同位置下的光斑间距和玻璃厚度关系进行修正,直接在不同位置进行厚度测量的结果如图 10 和图 11 所示,测量误差随玻璃位置远离基准位置(42.4 mm 左右)而增大,可以看出位移补偿算法可以有效地修正玻璃位移对玻璃厚度测量的影响。

4.3 误差来源分析

本文所设计的基于三角法的玻璃厚度测量系统绝对误差最大值为 0.008 mm,测量系统的误差来源主要有以下几个方面。

1) 光斑中心定位误差。受系统发射镜组和接

4.2 实验测试

选用两块厚度分别为 3.018 mm 和 4.389 mm 的玻璃,分别在不同位置测量其厚度,得到的测量结果分别如表 2、3 所示,在不同位置下绝对误差平均值分别为 0.008 mm 和 0.007 mm,相对误差均在 0.5% 以内。

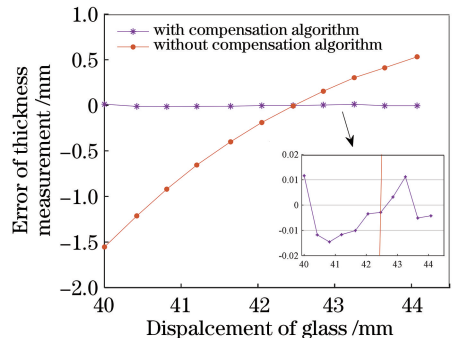


图 10 玻璃厚度为 3.018 mm 时的测量误差对比
Fig. 10 Comparison of thickness measurement error for 3.018-mm-thick glass

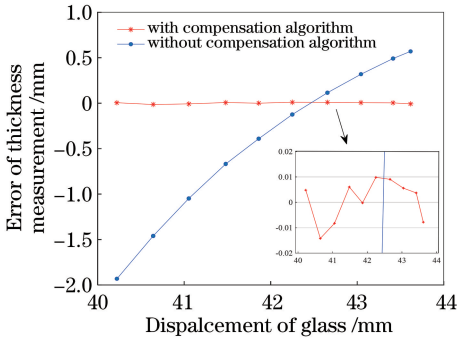


图 11 玻璃厚度为 4.389 mm 时的测量误差对比

Fig. 11 Comparison of thickness measurement error for 4.389-mm-thick glass

收镜组像差的影响,实际成像在 CMOS 上的光斑并不是一个理想的光斑,利用质心法定位光斑质心时计算得到的光斑间距 x 与真实值存在一定差距,直接导致厚度 d 的测量值不准确。例如,如果因为光斑定位误差引起的光斑间距 x 的误差为 ± 0.1 pixel,当玻璃与测头距离为 42.000 mm 时,玻璃厚度测量误差为 ± 0.002 mm。

2) 被测玻璃倾斜带来的误差。待测玻璃平面不与测头严格平行,在垂直方向偏转了一定夹角,将导致入射光照射在玻璃前、后表面反射光的角度发生偏转,如图 12 所示,CMOS 上成像光斑位置发生移动,前、后表面反射光斑间距改变,从而引起测量误差,测量时应选择较好的夹持装置,严格按照要求安装被测玻璃。

3) 环境因素的影响。当测量环境的温度和湿度发生改变时,玻璃和空气的折射率均会发生改变,从而引起厚度 d 的测量误差。

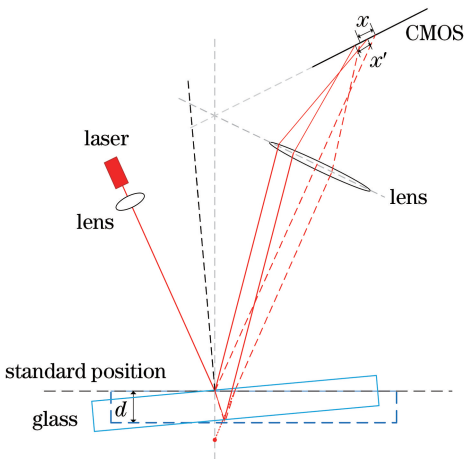


图 12 玻璃位置倾斜时的厚度测量

Fig. 12 Schematic of thickness measurement when glass is tilted

5 结 论

利用激光在玻璃表面的反射和折射效应,基于激光三角法的玻璃厚度测量方法分析了当玻璃位置变化时,成像光斑间距与玻璃位移、玻璃厚度之间的关系,并建立了相应的数学模型,并据此提出可以自动适应待测玻璃位移变化的测量方法,该方法可修正玻璃位移变化对厚度测量的影响。最后,设计了一套主要由光源、透镜组和 CMOS 组成的玻璃厚度在线测量系统,结构简单、体积较小。仿真和实验证明,当玻璃位置在量程范围内变动时,玻璃厚度测量绝对误差小于 0.010 mm,绝对误差最大值小于 0.015 mm,相对误差均不超过 0.5%,实现了玻璃在不同位置时,均能对玻璃厚度进行高精度测量,无需重复标定。该测量系统相对现有测量系统具有体积更小,灵活性和效率更高等优点,可以进一步应用到玻璃生产、加工等在线检测领域。

参 考 文 献

- [1] Xiao C J, Zhang J C, Li X Y, et al. Experimental research on thickness measurement of reflection-type flat glass based on line laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(5): 909-912.
肖长江, 张景超, 李兴元, 等. 基于线结构光的反射式平板玻璃厚度测量实验研究 [J]. 半导体光电, 2013, 34(5): 909-912.
- [2] Xiao C J, Zhang J C. Measuring outer diameter and wall thickness of quartz tube by laser transmission imaging method [J]. Optical Technique, 2017, 43(6): 481-487.
肖长江, 张景超. 激光透射成像法测量石英管的外径与壁厚 [J]. 光学技术, 2017, 43(6): 481-487.
- [3] Zhang J C, Yan X, Zhu Y Y, et al. Method for on-line measuring thickness of glass by using laser two-way symmetrical transmission way [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2812-2816.
张景超, 闫玺, 朱艳英, 等. 激光双路对称透射法在线测量平板玻璃厚度 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2812-2816.
- [4] Qiao Y, Zhang N, Xu X P, et al. Design of lens thickness measurement system based on confocal technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(7): 1635-1641.
乔杨, 张宁, 徐熙平, 等. 基于共焦法的透镜厚度测量系统设计 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1635-1641.
- [5] Zhou Y, Guo B H, Wang X X, et al. Design of lens central thickness measuring optical system [J]. Laser

- &. Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031201.
周勇, 郭帮辉, 王潇询, 等. 透镜中心厚度测量系统光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031201.
- [6] Wang H Y. The optical system design of high-precision detection instrument for glass thickness [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
王红宇. 玻璃厚度高精度检测仪光学系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [7] Liu L S, Zhang Y, Lu H Q, et al. Online measurement system for glass thickness based on CCD[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(3): 652-654.
刘力双, 张铤, 卢慧卿, 等. 基于 CCD 的玻璃厚度在线测量系统[J]. 传感技术学报, 2006, 19(3): 652-654.
- [8] Yang G S, Chen T, Zhang Z F. Study and application on transparent plate thickness measurement based on laser triangulation with light compensation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0708004.
杨桂栓, 陈涛, 张志峰. 基于激光三角法对透明平板厚度测量光线补偿的研究及应用[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708004.
- [9] Gao Z, Wu S J, Han Q, et al. The influence of surface scattered light to the measurement of laser displacement sensor based on triangulation[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s2): 29-32.
高瞻, 吴思进, 韩强, 等. 表面散射光对激光三角法位移测量的影响[J]. 光学学报, 2008, 28(s2): 29-32.
- [10] Sun F. Development of on-line measurement system for the thickness of glass [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
孙峰. 玻璃厚度在线测量系统的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [11] Chen L Q. The study of application of glass thickness measurement with laser [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
陈立诠. 激光玻璃测厚应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [12] Miks A, Novak J, Novak P. Analysis of imaging for laser triangulation sensors under Scheimpflug rule [J]. Optics Express, 2013, 21(15): 18225-18235.
- [13] Yang H W, Tao W, Zhang Z Q, et al. Reduction of the influence of laser beam directional dithering in a laser triangulation displacement probe[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1126.
- [14] Chen J X, Tao W, Yang H W, et al. Optimized design of locating algorithm for laser triangulation displacement sensor [J]. Transducer and Microsystem Technology, 2016, 35(9): 62-65.
陈家兴, 陶卫, 杨红伟, 等. 激光三角位移传感器定位算法优化设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(9): 62-65.
- [15] Zhu Z T, Pei W D, Li Y, et al. Research and implementation of laser triangulation system based on telecentric lens [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031002.
朱铮涛, 裴炜冬, 李渊, 等. 基于远心镜头的激光三角测距系统研究与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031002.
- [16] Zhao H, Zhang H B, Tao W. Resolution analysis of laser triangulation displacement sensor and parameters optimization [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S1): 75-78.
赵辉, 张海波, 陶卫. 激光三角位移传感器分辨率不均匀性分析与参数优化[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S1): 75-78.