

doi:10.3788/gzxb20174602.0212001

玻璃在线激光测厚误差的透反互补抑制

肖长江^{1,2}, 张景超¹, 郑连军¹

(1 燕山大学 理学院, 河北 秦皇岛 066004)

(2 燕山大学里仁学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:为了抑制激光在线测厚时入射角波动引起的误差,根据几何光学分析了激光透射式和反射式测厚原理,发现激光在特定入射角附近波动时,两种方式的测厚误差一正一负,具有互补性,在此基础上提出基于透射和反射同时测量的互补式测厚方法,该方法可将误差限定在透射式和反射式测量误差之间,抑制在线测厚误差.对于有机玻璃平板,理论计算表明,当激光入射角在 $67.013^\circ \pm 4^\circ$ 波动时,相对误差绝对值在 1% 以内,误差抑制率均值大于 90%;当入射角为 61.536° 时,误差抑制率为 100%.利用线结构激光器和两个线阵 CCD 相机搭建互补式测厚实验系统,测量了标称厚度为 1~5 mm 的有机玻璃平板,与透射式和反射式测厚结果进行对照,除厚度为 1 mm 的玻璃外,互补式测厚误差被限制在透射式和反射式之间,最大误差抑制率达 61%.实验结果表明,该互补式方法有效抑制了误差,提高了在线厚度测量准确度,解决了在线测量不可重复性导致的无法通过均值法减小误差的问题.

关键词:厚度测量;误差补偿;几何光学;玻璃;激光器;光透射;光反射;光学系统;标定

中图分类号: O435.1; TP202+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2017)02-0212001-10

Error Suppression of Glass Online Laser Thickness Measurement Using Complementation of Transmission and Reflection

XIAO Chang-jiang^{1,2}, ZHANG Jing-chao¹, ZHENG Lian-jun¹

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

(2 Liren College of Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: For suppressing the error from the incident angle fluctuation during laser thickness measurement online, the principles of laser transmission and reflection thickness measurement were analyzed by geometrical optics, which show that when the fluctuation of laser incident angle is nearby a particular value, the thickness measurement errors of two methods are complementary with one positive and the other negative. On this basis, a complementary thickness measurement method was proposed based on laser transmission and reflection simultaneous measurement, and the error could be limited between the transmission type and reflection type measurement errors, suppressing the online thickness measurement error. For the polymethyl methacrylate sheet, theoretical calculation results show that when the fluctuation span of the incident angle is at 67.013 ± 4 degrees, the relative error absolute value is within 1% and the mean error suppression ratio is greater than 90%. When the incident angle is 61.536 degrees, the error suppression ratio is 100%. Using one line structured light laser and two linear array CCD cameras, a complementary thickness measurement system was set up. The polymethyl methacrylate sheets with the nominal thickness of 1~5 mm were measured. In addition to the 1mm glass, the complementary thickness measurement error is restrained between the transmission and reflection measurement errors, and the maximum error suppression ratio is 61%. Experimental results

基金项目:国家自然科学基金(No. 11504320)资助

第一作者:肖长江(1982-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为光电检测技术. Email: xiaochangjiang@aliyun.com

导 师:张景超(1960-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感检测技术. Email: ysu-zjc@163.com

收稿日期:2016-09-12; **录用日期:**2016-11-01

<http://www.photon.ac.cn>

show that the complementary method can effectively restrain the error and improve the online thickness measurement accuracy.

Key words: Thickness measurement; Error compensation; Geometrical optics; Glass; Lasers; Light transmission; Light reflection; Optical systems; Calibration

OCIS Codes: 120.0120; 150.3040; 350.4600; 100.2960

0 引言

平板玻璃广泛用于汽车、通信、显示、太阳能、建筑等行业,厚度是平板玻璃产品的重要指标,各行业对厚度测量准确度的要求越来越高.目前平板玻璃的生产以浮法为主,玻璃厚度的在线测量主要集中于冷端^[1-2],玻璃平板在辊台上移动时难免产生振动、形变等,从而引起测量误差.因此,选择准确度高且抗干扰能力强的在线测量技术和手段具有现实意义.

传统厚度测量方式是采用千分尺或卡尺测量,成本高、效率低、准确度低且无法实现在线测量.随着激光技术、CCD技术和计算机技术的发展,出现了许多高效快速、非接触的玻璃厚度测量方法.蔡怀宇等^[3]提出基于相移技术的空间载频法,理论准确度较高但易受系统参量变化影响;为消除相移法的敏感性,Yangjin Kim等^[4-5]将离散傅里叶变换与波长可调斐索干涉法结合使准确度达到5 nm;Y. Pavan Kumar等^[6]采用横向剪切循环光路和偏振相移干涉法防止了外部振动对测量的影响;Jong-Ahn Kim等^[7]采用双缝干涉法测量运动玻璃板的实时厚度,避免了振动和外部噪声的影响;Po-Chi Sung等利用角入射干涉法实现了大幅面全场厚度测量^[8].虽然这些干涉法准确度很高且具有一定抗干扰能力,但是通常光路较复杂,调试难度大且只能测量较薄玻璃,尚处于实验室研究阶段.目前生产线上玻璃测量以激光三角法^[9-11]、透射法^[12]和反射法^[13-15]为主,基本原理是让激光以一定入射角入射到平板玻璃上,通过CCD获取透射或反射之后的光斑图像,利用光斑位置关系通过换算得到平板玻璃的厚度.由于生产线上玻璃的振动、形变等环境因素的影响,激光入射角不稳定,使厚度的在线测量值产生误差,且由于在线测量的不可重复性,使得这种误差不可能通过对平板玻璃同一位置多次测量的方式消除.文献^[12]和文献^[15]分别提出双激光透射光路和双光源双反射光路来减小透射式和反射式测量误差,但这两种改进方案都存在结构复杂、不易调节的问题,无法实现玻璃板同一位置的测量并有效消除入射角不稳定带来的单次测量误差.

为消除入射角波动引起的厚度测量误差,在激光透射式和反射式原理的基础上,提出采用透反结合的方式来测量玻璃厚度,给出确定入射角的方法,阐述误差互补的原理,并搭建实验系统,通过采集加载玻璃前后透射和反射光条图像,对系统进行标定,测量多块玻璃样品的厚度,验证理论方案的可行性.

1 理论分析

图1为透反互补原理图, T 为平板玻璃厚度, i 为激光入射角, n_g, n_a 分别为玻璃和空气折射率, D_t 为透射光线相对于入射光线的横向偏移量, D_r 为玻璃上、下表面反射光线间距.

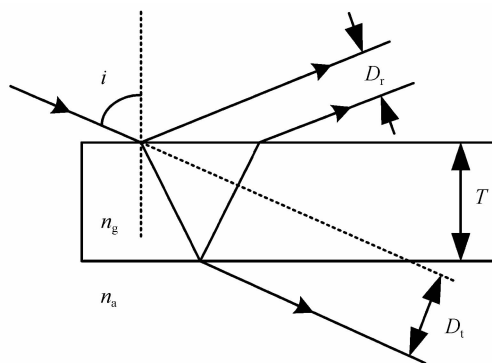


图1 透反互补原理

Fig. 1 Transmission-reflection complementation principle

根据折射和反射定律,得

$$\begin{cases} T = k_t D_t \\ T = k_r D_r \end{cases} \quad (1)$$

式中, k_t, k_r 分别为透射和反射厚度系数, 即

$$\begin{cases} k_t = \frac{2C_i}{2C_i \sin i - n_a \sin(2i)} \\ k_r = \frac{C_i}{n_a \sin(2i)} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $C_i = \sqrt{n_g^2 - n_a^2 \sin^2 i}$ 是与入射角有关的函数。

选择空气折射率 $n_a = 1$, 有机玻璃(Polymethyl Methacrylate, PMMA)折射率 $n_g = 1.49$, 根据式(2), 系数 k_t 和 k_r 与入射角 i 的变化关系曲线如图 2, 两曲线有唯一交点. 令 $k_t = k_r$, 得

$$\sin i = \sqrt{\frac{9n_a^2 - n_g^2}{8n_a^2}} \quad (3)$$

将玻璃和空气折射率代入式(3)可得, $i^* \approx 1.170$ rad, (即 67.013°), 将 i^* 代入式(2)可得 $k_t = k_r = k^* = 1.631$.

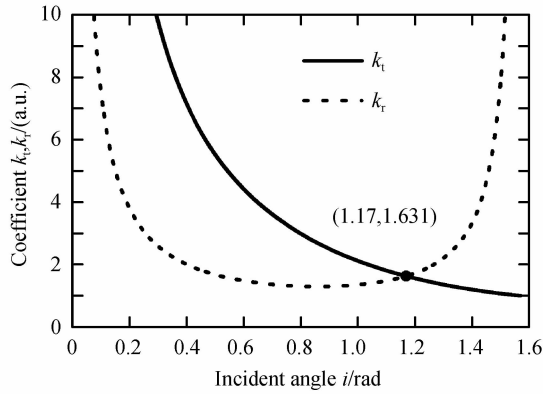


图 2 系数 k_t 和 k_r 与入射角 i 的关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between coefficient k_t, k_r and incident angle i

若测量时选择 i^* 为激光入射角, 则根据式(1)得透射式和反射式玻璃厚度测量公式为

$$\begin{cases} T_t^* = k^* D_t \\ T_r^* = k^* D_r \end{cases} \quad (4)$$

若实际测量时入射角 i 存在偏差 $\epsilon = i - i^*$, 则 $k_t \neq k_r \neq k^*$, 测量出现误差, 设透射式和反射式测量绝对误差分别为 $\delta_t = T_t^* - T$ 和 $\delta_r = T_r^* - T$, 根据式(1)和式(4), 得

$$\begin{cases} \delta_t = \left(\frac{k^*}{k_t} - 1 \right) T \\ \delta_r = \left(\frac{k^*}{k_r} - 1 \right) T \end{cases} \quad (5)$$

由图 2 可知, 当 $\epsilon > 0$ 时, 对于透射光来说, $k_t < k^*$, $\delta_t > 0$; 对于反射光来说, $k_r > k^*$, $\delta_r < 0$. 反之, 当 $\epsilon < 0$ 时, 情况正好相反。

透射式和反射式厚度测量值与真值的关系可分别表示为 $T_t^* = T + \delta_t$ 和 $T_r^* = T + \delta_r$, 考虑到无论偏差 ϵ 取正还是取负, δ_t 和 δ_r 始终一正一负, 具有互补性. 将 $T^* = \frac{T_t^* + T_r^*}{2}$ 作为厚度测量值, 即 $T^* = T + \delta$, 其中 $\delta = \frac{\delta_t + \delta_r}{2}$ 利用了透射式和反射式厚度测量误差的互补性, 称为互补式厚度测量绝对误差, 利用式(5), 得

$$\delta = \left[\frac{k^* (k_t + k_r)}{2k_t k_r} - 1 \right] T \quad (6)$$

根据式(5)和式(6), 分别将 δ 和 δ_t, δ_r 相减可得

$$\delta - \delta_t = -(\delta - \delta_r) = \frac{k^* (k_t - k_r)}{2k_t k_r} T \quad (7)$$

由图 2 可知,当 $\epsilon > 0$ 时, $k_t < k_r$, 反之,当 $\epsilon < 0$ 时, $k_t > k_r$, 由式(7)可得

$$\begin{cases} \epsilon > 0, \delta_r < \delta < \delta_t \\ \epsilon < 0, \delta_t < \delta < \delta_r \end{cases} \quad (8)$$

令 $\delta_{\min} = \min\{\delta_t, \delta_r\}$, $\delta_{\max} = \max\{\delta_t, \delta_r\}$, 则, $\delta_{\min} < \delta < \delta_{\max}$. 当 $\delta_t \rightarrow 0, \delta_r \rightarrow 0$ 时, 必然存在 $\delta \rightarrow 0$.

因此,当入射角大于理论值时,反射式绝对误差最小,而当入射角小于理论值时,透射式绝对误差最小.

设透射式、反射式和互补式相对误差分别为 $e_t = \delta_t/T$, $e_r = \delta_r/T$ 和 $e = \delta/T$, 则由式(5)和式(6)可知

$$\begin{cases} e_t = \left(\frac{k^*}{k_t} - 1\right) \times 100\% \\ e_r = \left(\frac{k^*}{k_r} - 1\right) \times 100\% \\ e = \left[\frac{k^* (k_t + k_r)}{2k_t k_r} - 1\right] \times 100\% \end{cases} \quad (9)$$

由于绝对误差和相对误差都是代数数量,而真正反映测量准确度的是误差的绝对值,绝对值大则误差大,绝对值小则误差小,因此,在图 3 中绘制了透射式、反射式和互补式测量相对误差的绝对值随入射角的变化曲线.

由图 3(a)可见,当入射角 $i > 0.688 \text{ rad}$ (39.419°) 时,互补式测量相对误差绝对值最小. 在理论入射角 $i^* = 1.170$ 处,三种误差都为零. 考虑入射角 $i = 1.170 \pm 0.07 \text{ rad}$ ($67.013^\circ \pm 4^\circ$), 即入射角在理论入射角附近波动幅度不大的情况,由图 3(b)可见当入射角 $i > 1.074 \text{ rad}$ (61.536°) 时,三种测量方式相对误差绝对值的关系为 $|e_r| > |e_t| > |e|$, 透射式和反射式相对误差绝对值约小于 10%, 而互补式相对误差绝对值约小于 1%, 大部分情况下在 0.5% 以内, 可见互补式测量对入射角不稳定带来的误差起到了有效的抑制.

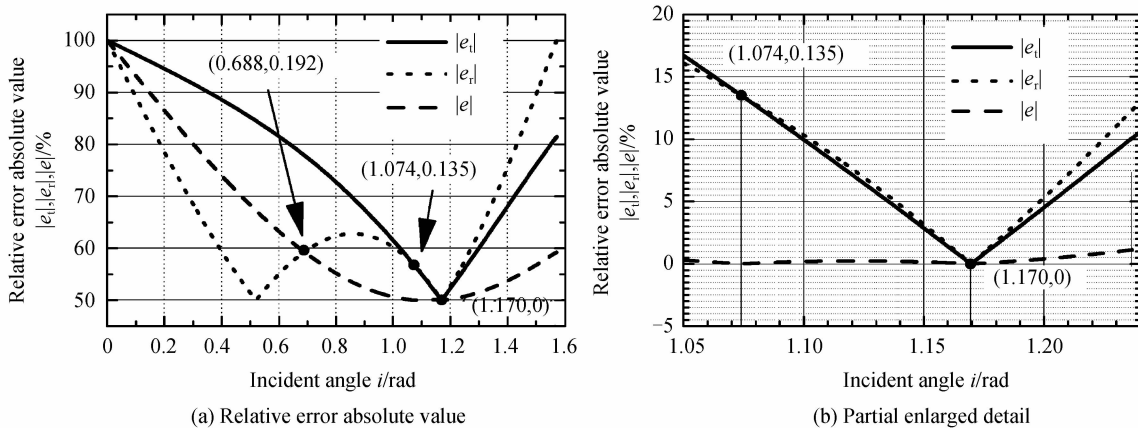


图 3 相对误差绝对值的比较
Fig. 3 Comparison of relative error absolute values

对于采用单一测量方式的系统来说,虽然通过对玻璃同一位置多次测量取平均的方式可以减小随机误差,但是玻璃的在线测量只能是单次测量,因此无法达到提高测量准确度的目的,而互补式结合了透射式和反射式,玻璃在线单次测量时无论入射角偏大或偏小,厚度测量误差都取中间值,限制了误差范围,相对误差绝对值最小,对误差具有很好的抑制作用.

为定量描述互补式误差抑制的效果,定义误差抑制率为

$$R_e = \left(1 - \frac{|\delta_t + \delta_r|}{|\delta_t| + |\delta_r|}\right) \times 100\% \quad (10)$$

式中, δ_t 和 δ_r 不能同时为零,因为一方面分子分母都为零时变为不定式,另一方面二者都为零时,激光入射角为理论入射角,测量无误差,也就不存在误差抑制的问题. 根据式(5)和式(6),误差抑制率 R_e 与入射角 i 的关系曲线如图 4, 图中只绘出了入射角大于 0.688 rad 的情况, 因为这时互补式相对误差绝对值最小. R_e 越大说明对误差的抑制效果越好,反之越差.

由图 4 可见, R_e 高于 50%, 当入射角达到 1.074 rad (61.536°) 时, R_e 达到 100%, 由图 3(b) 可知, 此时 $|e_t| = |e_r|$ 但符号相反, 故 $\delta = 0$, 误差被完全抑制. 考虑入射角 $i = 1.170 \pm 0.07 \text{ rad}$ ($67.013^\circ \pm 4^\circ$) 的情况, 图 4 中坐标 (1.17, 0.936*) 带星号的数据为无意义的数值, 式(10)对 R_e 的定义中已经分析过原因, R_e 在

(89.8%, 98.2%)之间取值,其平均值约为 91.7%,可见入射角小幅波动时,误差抑制率很高。

若 $\delta = \frac{\delta_t + \delta_r}{2} = 0$, 即 $R_c = 100\%$, 则 $T^* = T$, 由式(5)可知 k_t 和 k_r 满足

$$\frac{1}{k_t} + \frac{1}{k_r} = \frac{2}{k^*} \quad (11)$$

用式(1)对入射角求导数可得,透射厚度系数和反射厚度系数随入射角的变化率分别为

$$\begin{cases} \frac{dk_t}{di} = - \left[\frac{C_i}{\sin i \tan i (C_i - n_a \cos i)} + \frac{n_a (n_g^2 - n_a^2)}{C_i (C_i - n_a \cos i)^2} \right] \\ \frac{dk_r}{di} = - \left[\frac{n_a}{2C_i} + \frac{2C_i}{n_a \sin(2i) \tan(2i)} \right] \end{cases} \quad (12)$$

透射和反射厚度系数斜率随入射角的变化曲线如图 5,可见在入射角 i^* 处,透射厚度系数和反射厚度系数的斜率分别为 -2.396 和 2.73 ,其绝对值差为 0.334 。因此,对于入射角的微小偏差 ϵ 而言, $\Delta k_t = k_t - k^* = -2.396\epsilon$, $\Delta k_r = k_r - k^* = 2.73\epsilon$ 。

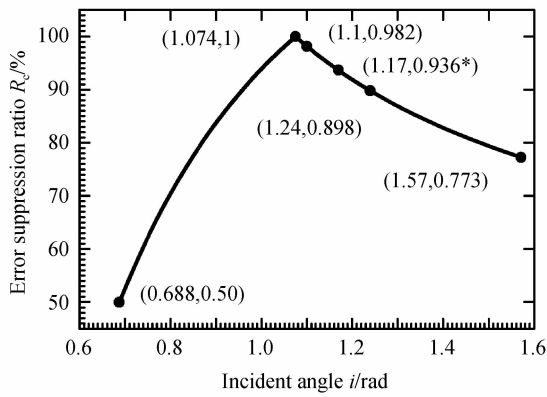


图 4 误差抑制率

Fig. 4 Error suppression ratio

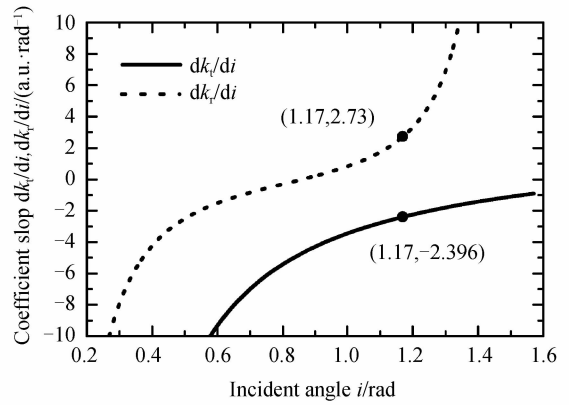


图 5 透射和反射厚度系数斜率

Fig. 5 Thickness coefficient slopes of transmission and reflection

将 $k_t = k^* - 2.396\epsilon$ 和 $k_r = k^* + 2.73\epsilon$ 代入式(11)可得

$$\frac{1}{k^* - 2.396\epsilon} + \frac{1}{k^* + 2.73\epsilon} = \frac{2}{k^*} \quad (13)$$

考虑到 $k^* = 1.631$, 可解出 $\epsilon_1 \approx 0.39 \times 10^{-30}$ rad, $\epsilon_2 \approx 0.042$ rad, 第一个解太小无实际意义可忽略, 第二个解意味着当入射角比理论值大 0.042 rad (约 2.406°), 即 $i \approx 1.212$ rad (69.419°) 时, 厚度测量值依然可接近真值, 当然这只是一种近似分析方法, 但计算所得角度在入射角 i^* 附近 4° 以内, 与图 3(b) 分析结果一致, 可见, 在入射角小幅波动时可认为由此引起的互补式测量误差近似为零。

另外, 若选择厚度系数斜率大小相等、符号相反 (即 $\frac{dk_t}{di} = -\frac{dk_r}{di}$) 确定测量时的激光入射角, 则在入射角偏差较小时理论上也可以实现 $R_c \approx 100\%$, 但是与利用式(3)计算入射角相比, 该方法无法得到解析解, 只能通过图解法求解, 按折射率 $n_a = 1$, $n_g = 1.49$, 利用该方法确定的激光入射角为 $i^* \approx 1.152$ rad, (66.005°), 若改换其他种类的玻璃, 入射角的确定就比较繁琐。另外, 按式(3)确定入射角, 经计算, 当偏差 $\epsilon = -4^\circ$ 时, 相对误差 $e \approx 0$; 当偏差 $\epsilon = 4^\circ$ 时, 相对误差 $e \approx -0.013$; 当偏差 $|\epsilon| < 4^\circ$ 时, 由图 3(b) 可知, 相对误差绝对值 $|e| < 0.013$, 可见小角度偏差时计算得到的理论误差已经很小。两种方法确定的入射角之差仅为 $\Delta i^* = 1.17 - 1.152 = 0.018$ rad (1.008°), 偏差远小于 4° , 采用厚度系数斜率大小相等、符号相反的方法计算的入射角亦处于 i^* 附近 4° 以内, 因此, 本文选择更加简便的入射角确定方法。

考虑到 CCD 相机镜头对光线的变换, 有

$$D = \frac{p}{M} \Delta P \quad (14)$$

式中, D 为光线偏移量或两光线间距, p 为 CCD 像元尺寸, M 为相机镜头变换倍率, ΔP 为光条中心像素差。

对系统在入射角为 i^* 时进行标定,并考虑式(4),可得透射式、反射式和透反互补式玻璃厚度测量公式为

$$\begin{cases} T_t^* = K_t^* \Delta P_t \\ T_r^* = K_r^* \Delta P_r \\ T^* = K^* (\Delta P_t + \Delta P_r) \end{cases} \quad (15)$$

式中, $K_t^* = k_t^* \frac{p}{M}$ 、 $K_r^* = k_r^* \frac{p}{M}$ 、 $K^* = k^* \frac{p}{2M}$ 分别为透射式、反射式和透反互补式厚度测量系统标定系数, $k_t^* = k_r^* = k^*$ 为入射角为 i^* 时透射式或反射式厚度系数. $\Delta P_t = |P_t - P_n|$ 为加载玻璃时透射光线产生的激光光条中心像素值 P_t 与未加载玻璃时的激光光条图像中心像素值 P_n 之差的绝对值, $\Delta P_r = |P_{r2} - P_{r1}|$ 为激光经玻璃上下表面反射后产生的两束反射光线的光条图像中心像素值 P_{r1} 和 P_{r2} 之差的绝对值.

实际测量时,线激光都有一定的投射宽度 d ,如图 6,可知透射激光线宽和反射激光线宽为 d ,可得

$$\begin{cases} D_t = \Delta_t + d \\ D_r = \Delta_r + d \end{cases} \quad (16)$$

式中, Δ_t 和 Δ_r 分别为透射式和反射式光条相邻边缘的距离.

考虑式(14)和式(15),可得

$$T^* = \frac{k^*}{2} (\Delta_t + \Delta_r + 2d) \quad (17)$$

在极限情况下, $\Delta_t = \Delta_r = 0$,故厚度测量下限为

$$T_{\min}^* = k^* d \quad (18)$$

可见,厚度测量下限与镜头放大倍数无关.

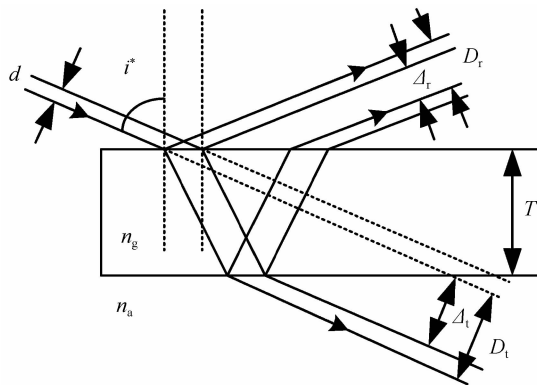


图 6 厚度测量下限

Fig. 6 Thickness measurement lower limit

2 实验系统

实验系统如图 7,线激光二极管(Linear Laser Diode, LLD)是美国 ProPhotonix Ltd 公司生产的 invisio 单线激光光源,激光线强度呈非高斯均匀分布,强度波动 10% 以内,功率 19 mW,峰值波长 690 nm,最高工

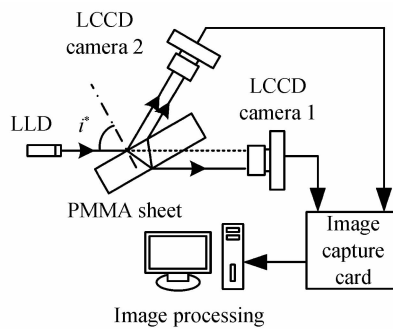


图 7 实验系统

Fig. 7 Experiment system

作温度 33 ℃,扇角 60°.

LCCD camera 1 由天津市开希机器视觉技术有限公司生产,型号为 TCD1501-2,CCD 图像传感器由日本东芝生产,型号为 TCD1501D,该芯片包括采样保持电路,具有高灵敏度和低暗电流,有效光敏像元数为 5 000 像素,像元间距为 $p=7\mu\text{m}$,镜头采用俄罗斯泽尼特标准螺纹口(M42×1)镜头,焦距 50 mm,光圈范围 2~16,调焦范围:0.35~∞,USB 采集卡由天津市耀辉光电技术有限公司生产,型号 AD08S-USB. LCCD camera 2 为加拿大 Dalsa 公司生产的线阵 CCD 相机,型号 P2-22-06K40,像元尺寸 $7\mu\text{m}\times 7\mu\text{m}$,分辨率 6144×1,最大行频 12 kHz,相机接口采用 Base camera link 高速标准接口,采用相关双采样(CDS)和嵌入式平场纠错算法保证其输出均匀性;数据采集卡采用 Dalsa 公司的 X64-CL iPro 高速图像采集卡,像素时钟频率达 85 MHz,数据密度为 8~16 bits/pixel,主机总线为 PCI-X66,帧缓存为 32 MB,软件为 Sopera LT 32 bit. 相机镜头采用 Nikon 尼克尔自动变焦镜头,焦距 24~85 mm 可调,浮动光圈 f/2.8~4;光学转动平台由北京方式科技有限责任公司生产,角度调节准确度可达 0.01°.

3 实验及数据处理

由于实验条件限制,实验中选择了两种不同品牌的线阵 CCD 相机,但是其像元尺寸相同,测量时首先将放大倍数调至相同,然后设置激光入射角为 67.013°,在加载 PMMA 平板之前由 LCCD camera 1 采集激光光条图像,如图 8(a),在加载玻璃之后,再由 LCCD camera 1 采集激光透射光条图像,如图 8(b),由于实验过程中玻璃板并未在辊台上移动,而是将其固定在一个角度可调的精密光学转台上,所以可同时由 LCCD camera 2 采集同一位置的激光反射双光条图像,如图 8(c). 实际玻璃生产线、玻璃板在辊台上移动,两个相机必须做到同时采集透射和反射光条图像,只有这样才能保证测量的是玻璃板上的同一位置.

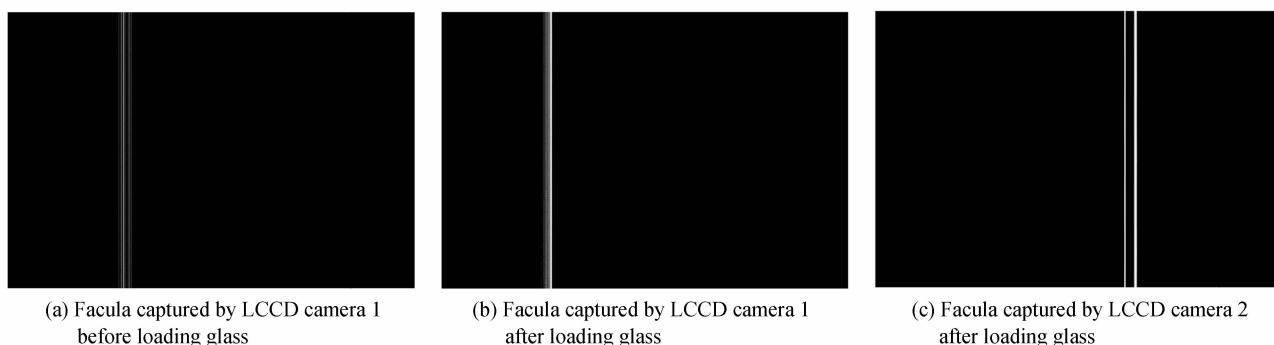
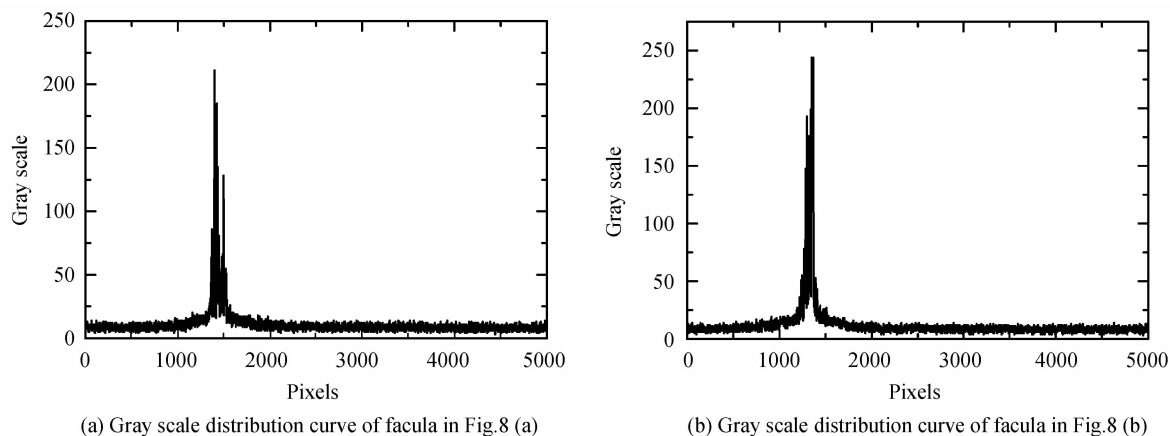
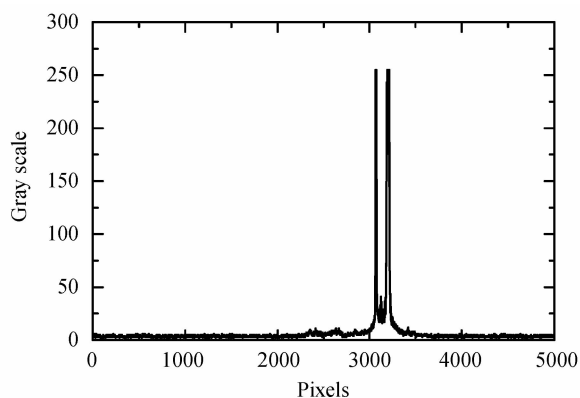


图 8 线阵相机采集的光条图像
Fig. 8 Facula captured by LCCD Camera

3.1 光条中心像素差的提取

以 6 mm 玻璃为例,确定光条中心像素差的步骤为:先利用图像数据采集卡获取透射和反射的光条图像,如图 8,然后再获取光条的灰度分布曲线,如图 9,横轴表示像素,纵轴表示灰度. 由图 9 可以看出,噪声的





(c) Gray scale distribution curve of facula in Fig.8 (c)

图9 灰度分布曲线

Fig.9 Gray scale distribution curve

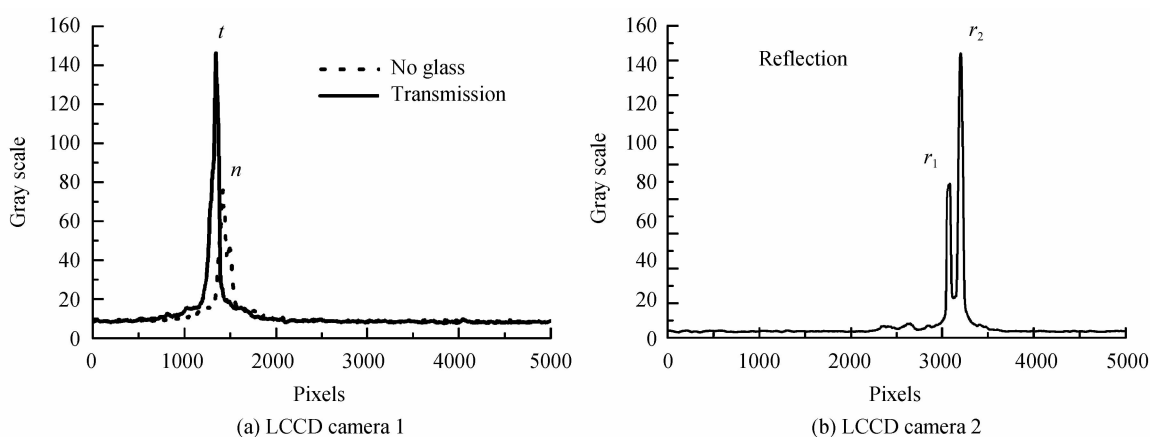


图10 平滑处理后的光条灰度分布

Fig.10 Facula grayscale distribution diagram by smoothing

存在使得确定光条中心的像素值很困难,采用 Savitzky-Golay 法^[16]对灰度分布图进行平滑处理,窗宽选择 50,阶数选择 1,结果如图 10,n 和 t 分别代表加载玻璃前后 LCCD camera 1 采集的光条图像灰度峰, r_1 和 r_2 分别代表 LCCD camera 2 采集的反射光条图像中的两个灰度峰.

利用单峰和双峰高斯拟合法可得到各峰对应的像素值 P_n, P_t, P_{r1}, P_{r2} ,重复测量 10 次,将结果记录在表 1 中.

表 1 标定实验数据

Table 1 Calibration experiment data

Number	Micrometer	Transmission-type			Reflection-type			Complementary-type
	T/mm	P_n /pixels	P_t /pixels	ΔP_t /pixels	P_{r1} /pixels	P_{r2} /pixels	ΔP_r /pixels	$\Delta P_t + \Delta P_r$ /pixels
1	5.695	1 432.679	1 337.037	95.642	3 073.440	3 200.971	127.531	223.173
2	5.705	1 432.083	1 336.068	96.015	3 073.795	3 201.072	127.277	223.292
3	5.711	1 432.440	1 337.111	95.329	3 073.810	3 200.991	127.181	222.51
4	5.706	1 432.522	1 336.859	95.663	3 074.068	3 201.115	127.047	222.71
5	5.766	1 432.636	1 337.110	95.526	3 074.022	3 201.193	127.171	222.697
6	5.914	1 432.606	1 336.619	95.987	3 073.801	3 201.002	127.201	223.188
7	5.910	1 432.394	1 338.158	94.236	3 073.987	3 201.223	127.236	221.472
8	5.855	1 432.837	1 336.325	96.512	3 074.087	3 201.151	127.064	223.576
9	5.758	1 432.637	1 336.571	96.066	3 073.478	3 200.639	127.161	223.227
10	5.717	1 432.485	1 336.406	96.079	3 073.943	3 201.079	127.136	223.215
Mean±S. D.	5.77±0.09	—	—	95.71±0.62	—	—	127.21±0.14	222.91±0.61

3.2 标定实验

利用千分尺测量玻璃板的厚度,将玻璃板放置在测量系统中,可得透射式和反射式对应的光条中心像素差,二者相加即为互补式的光条中心像素差,测量数据见表1,利用式(15)可求得标定系数(单位:mm/pixel)为

$$\begin{cases} K_t^* = \frac{T}{\Delta P_t} \approx 0.060 \\ K_r^* = \frac{T}{\Delta P_r} \approx 0.045 \\ K^* = \frac{T}{\Delta P_t + \Delta P_r} \approx 0.026 \end{cases} \quad (19)$$

3.3 样品玻璃厚度测量

选择标称厚度为1~5 mm的有机玻璃样品进行测量,每种玻璃测量10次,计算光条中心像素差,取平均后利用标定系数通过式(15)计算不同方法的厚度测量值,结果如图11,图中给出了不同方法下玻璃厚度测量值与标称值的变化曲线.由图可见,透射式测量误差较大,特别在玻璃较薄时测量值比标称值大,但对于较厚的玻璃(如4 mm,5 mm),误差很小,而反射式测量值比标称值小.与透射式和反射式相比,互补式测量值更接近标称值,对于1 mm玻璃,透射和反射厚度均大于标称值和千分尺测量值,与理论分析不符,说明所建系统对较薄玻璃并不适用.由图11可见,反射式测量数据与标称值数据及千分尺测量数据连线之间有交叉,经计算,交叉点厚度值分别为1.250 mm和1.350 mm,考虑到标称值公差较大,利用千分尺测量数据作保守估计,本实验系统能测量的最小厚度不能低于1.350 mm.限制系统厚度测量最小值的可能因素是线结构激光线宽在1 mm左右,且经反射和折射后宽度稍有增加,另外由于激光功率较大,CCD接收光强时极易饱和,这些都使呈现的光条图像具有一定宽度,当玻璃厚度小于一定值时,图像中两光条重合,无法采集光条中心,也就限制了所能测量的最薄厚度.采用千分尺实际测量值作为真值估计值,利用式(10)计算得到厚度2~5 mm玻璃样品互补式测量的误差抑制率 R_e 分别为57%、61%、39%、41%.与千分尺测量结果相比,系统产生的测量误差过大,经分析有以下几点原因:1)玻璃样品的厚度不均,所购玻璃平板公差过大;2)玻璃板厚度过小,接收透射光的线阵相机准确度不够;3)试验结果受平台及系统组件稳定性影响过大;4)角度调节平台具有一定偏心误差.拟进一步采取的减小误差的改进方案有:1)提高系统稳定性;2)更换更高准确度的相机;3)采用厚度准确度更高的玻璃对系统标定;4)改进光条中心提取方法.

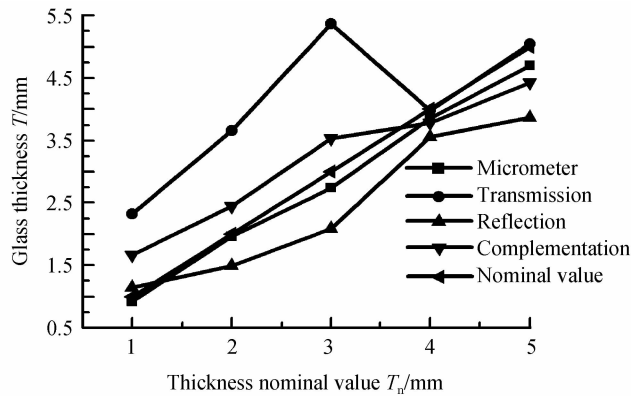


图11 玻璃厚度与标称值的关系曲线

Fig. 11 Relationship curve between glass thickness and nominal value

4 结论

本文利用激光透射式和反射式玻璃测厚在特定入射角附近的误差互补性,提出了一种基于透射和反射同时测量的互补式测厚方法.理论分析表明,对于PMMA平板,当入射角在 67.013° 波动时,互补式测量误差处于透射式和反射式测量误差之间,在左右 4° 范围波动时其相对误差绝对值在1%以内,误差抑制率 R_e 平均值大于90%;当入射角为 61.536° 时,误差抑制率为100%.与透射式和反射式测厚进行对照实验,结果表明最大误差抑制率达61%.互补式测厚方法有效抑制了在线测量误差,提高了厚度测量准确度,解决了无法通过多次测量取平均的方法减小激光入射角波动引起的在线测厚误差的问题.对于其他种类的玻璃平板,

通过更换折射率等参量,所提方法仍然适用.下一步的工作将是开发系统样机,进行设计优化和生产线上的在线验证.

参考文献

- [1] LIU Li-shuang, ZHANG Yao, LU Hui-qing, *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.
- [2] WANG Yu-tian, YANG Ni, LIN Xiao-lin. Research on float glass thickness measurement system based on CCD technology[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2007, (6):72-74.
王玉田,杨妮,林晓琳. 基于 CCD 技术的浮法玻璃厚度测量系统的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2007, (6):72-74.
- [3] CAI Huai-yu, LI Hong-yue, ZHU Meng, *et al.* Measurement of thickness uniformity for glass plate by spatial carrier [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(2):260-266.
蔡怀宇,李宏跃,朱猛,等. 用空间载频法测量玻璃平板的厚度均匀性[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(2):260-266.
- [4] KIM Y, HIBINO K, SUGITA N, *et al.* Measurement of absolute optical thickness of mask glass by wavelength-tuning Fourier analysis[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(13): 3169-3172.
- [5] KIM Y, HIBINO K, SUGITA N, *et al.* Optical thickness measurement of mask blank glass plate by the excess fraction method using a wavelength-tuning interferometer[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, **51**(10): 1173-1178.
- [6] KUMARY P, CHATTERJEE S. Thickness measurement of transparent glass plates using a lateral shearing cyclic path optical configuration setup and polarization phase shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(33): 6552-6557.
- [7] KIM J A, KIM J W, EOM T B, *et al.* Vibration-insensitive measurement of thickness variation of glass panels using double-slit interferometry[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(6): 6486-6494.
- [8] SUNG P C, WANG W C, HWANG C H, *et al.* Large-area full-field thickness measurement of glass plates by an optical interferometric system[J]. *Optics Communications*, 2014, **333**: 243-252.
- [9] YANG Gui-shuan, CHEN Tao, ZHANG Zhi-feng. 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.
- [10] WANG W, WANG Z B. A technological research of high temperature float glass thickness un-touch detection based on CCD sensor[J]. *Journal of Computational Methods in Sciences & Engineering*, 2015, **15**(2): 251-260.
- [11] WANG W. Research on detecting thickness of high temperature float glass by laser trigonometry measurement of CCD sensor[J]. *Journal of Fiber Bioengineering & Informatics*, 2015, **8**(1): 171-178.
- [12] ZHANG Jing-chao, YAN Xi, ZHU Yan-ying, *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.
- [13] CONG He-xi, WANG Shu-tao, LI Yuan-yuan, *et al.* Online thickness measurement technology for high temperature glass based on light reflection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(7):1356-1359.
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.
- [14] XIAO Chang-jiang, ZHANG Jing-chao, LI Xing-yuan, *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.
- [15] WANG Yu-tian, YANG Ni. Glass thickness measuring technology of two-beam path of compensation[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(6): 1428-1431.
王玉田,杨妮. 双路补偿法的玻璃厚度测量技术[J]. 传感技术学报, 2007, **20**(6):1428-1431.
- [16] ZHANG Yi-zhou, XU Ting-fa, LIU Zi-wei, *et al.* Correction method for stripe nonuniformity in infrared images based on Savitzky-Golay weighted fitting algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(1):51-58.
张一舟,徐廷发,刘子伟,等. 基于 Savitzky-Golay 加权拟合的红外图像非均匀性条带校正方法[J]. 中国光学, 2015, **8**(1):51-58.