

doi:10.3788/gzxb20174611.1112006

# 基于机器视觉的快速玻璃折射率测量方法

李延风<sup>1</sup>, 李修宇<sup>2</sup>, 杨柳<sup>2</sup>

(1 长春理工大学 计算机学院, 长春 130022)

(2 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘 要:**为实现玻璃折射率快速、高精度测量需求,提出一种基于机器视觉的玻璃折射率测量方法.推导了玻璃折射率测量数学模型,采用自准直平行光管实现传统 V 棱镜平行光管的功能,同时对 V 槽的装卡倾角进行正交性校准;双 CCD 结合棱镜分光实现大视场拼接,运用图像处理技术直接测量折射光线的偏折角.搭建试验样机,并与传统 V 棱镜折射仪和数字化 V 棱镜折射仪进行对比.结果表明测量精度优于 $\pm 2 \times 10^{-6}$ ,测量速度少于 10 s.测量精度和测量时间都优于前两者,对实现快速、高精度光学玻璃折射率测量具有实际意义.

**关键词:**自校准;机器视觉;直接测量;视场拼接;折射率测量

中图分类号:TB96

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)11-1112006-10

## Rapid Glass Refractive Index Measurement Method Based on Machine Vision

LI Yan-feng<sup>1</sup>, LI Xiu-yu<sup>2</sup>, YANG liu<sup>2</sup>

(1 College of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

(2 College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

**Abstract:** A measurement method of glass refraction rate based on machine vision technology is put forward, to achieve fast and high precision measurement requirements of glass refractive index. A mathematical model for measuring the refractive index of glass, the self-collimator can realize the function of the traditional V prism collimation, which calibrate the V-slot clamping posture. The large field of stitching is achieved by dual CCD and prismatic decomposition. The angle of the refracted light is directly measured by digital image technology. Finally, the test prototype is established, which is test and verified with traditional V prism refractometer and the digital V prism refractometer in the measurement accuracy and measurement time of glass refractive index, the results show that the measurement accuracy is better than  $\pm 2 \times 10^{-6}$  and measurement speed is better than 10 s, Whether both the measurement accuracy and the measuring time is better than before. It has important practical significance to realize fast and high precision measurement of refractive index of optical glass.

**Key words:** Self-calibrate; Machine vision; Direct measurement; Field stitching; Measurement of refractive index

**OCIS Codes:** 120.4630; 100.2000; 110.3080; 140.1488

## 0 引言

随着光学及光电仪器的发展,光学玻璃普遍应用于工程测量与检验,选择适当、折射率准确的光学玻璃

**基金项目:**吉林省科技创新人才培养计划青年科研基金项目(No.20160520014JH)、吉林省科技发展计划重大专项(No.KYC-JC-YM-2012-081)资助

**第一作者:**李延风(1985—),女,讲师,博士,主要研究方向为精密仪器检测及图像处理.Email:yannianyishou@126.com

**收稿日期:**2017-06-22; **录用日期:**2017-07-25

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

是工程顺利进展的前提条件.工程检测精度需求的提高对玻璃折射率的检测精度提出了更高要求.目前玻璃折射率测量方法主要有 V 棱镜折射仪法,最小偏向角法等,由于 V 棱镜折射仪法检测效率高,对试件要求低在玻璃生产领域得到广泛应用.随着光学及光电仪器技术的发展,其  $10^{-3}$  量级的策略精度已经远远满足不了发展的需求.因此半自动、数字化的 V 棱镜折射仪陆续产生.2011 年中国计量院徐聪恩<sup>[1]</sup>设计了智能化 V 棱镜折射仪.2013 年,长春理工大学安志勇等<sup>[2]</sup>对传统 V 棱镜折射仪进行了数字化改进,均采用编码器代替光学度盘进行读角、采用计算机软件采集图像并进行折射率计算.2015 年成都光明吴德林等<sup>[3]</sup>通过对光路的研究,对高折射率玻璃进行补偿,这类仪器普遍采用 CCD 成像系统自动对准技术代替人眼目视瞄准<sup>[4-6]</sup>,光电轴角编码器代替光学度盘记录角度,通过伺服机构驱动成像系统和读角系统偏转,借助软件实现偏折角测量及相应的折射率的计算<sup>[7-11]</sup>.国外,日本小原公司研制的 V 棱镜折射仪精度较高,但对使用条件和环境要求很高.虽然这些仪器的检测精度有所提高,但仍存在如下不足:1)系统结构复杂,误差因素较多,如传动机构的空回、编码器测角精度及电机控制精度等都会引起测量误差;2)测量过程中,由于人为操作差异,每次固定 V 槽时,难以保证 V 槽与平行光管是正交性对准,且难以保证每次的放置位置一致,这些因素的存在致使仪器突破  $10^{-3}$  量级成为一个瓶颈,另外仪器结构复杂、测量过程繁琐使效率很难提高.基于此,本文研究的玻璃折射率测量方法,集自准直及 CCD 视觉技术为一体,摒弃复杂的读数控制机构,可满足  $10^{-6}$  量级高精度测量需求,在一定角度视场内无需对准直接通过图像处理软件经计算得到折射率,提高测试效率.

## 1 玻璃折射率测量模型

从平行光管出射的单色平行光作为测量光,经被测玻璃发生折射.假设 V 槽的折射率为  $n_0$ ,被测玻璃的折射率为  $n$ .当  $n > n_0$  时,测量光向上偏折,偏折角  $\theta$  为正值,如图 1(a)所示.当  $n < n_0$  时,测量光向下偏折,偏折角  $\theta$  为负值,如图 1(b).

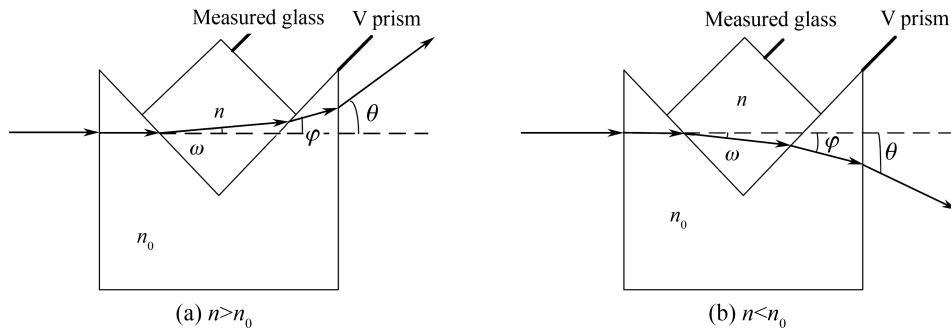


图 1 偏折光测量原理

Fig.1 Deviation ray measurement method diagram

根据折射率定律知,

$$n_0 \sin 45^\circ = n \sin(45^\circ - \omega) \quad (1)$$

$$n \sin(45^\circ + \omega) = n_0 \sin(45^\circ + \phi) \quad (2)$$

$$n_0 \sin \phi = \sin \theta \quad (3)$$

由式(1)~(3)可得

$$n = \sqrt{n_0^2 + \sin \theta \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

只需将偏折角  $\theta$  代入式(4)即可测得玻璃折射率.在传统 V 棱镜折射仪中,采用光学度盘记录偏折角  $\theta$ .数字化改进的 V 棱镜折射仪采用轴角编码器记录偏折角  $\theta$ .这两种方法都需借助传动机构,或通过手动调节,或利用驱动电路驱动读角机构运转,得出偏折角度,测量效率很低.为提高测量效率,本文设计了基于自准直及视觉技术的玻璃折射率测量模型.利用 CCD 相机直接读取偏折角,不需要传动机构和读角机构辅助测量,为了扩大测量范围,采用双 CCD 接收狭缝图像,来扩展视场,增大玻璃折射率的测量范围.其系统工作原理图如图 2.

当  $n > n_0$  时,入射光经 V 槽与被测玻璃作用后,向上偏转角度  $\theta$ (正值),再经成像物镜,分光镜分光成像于 CCD 相机 I 或 CCD 相机 II.如图 2(a).当  $n < n_0$  时,原理同上所述,其不同在于入射光经 V 槽与被测玻璃

作用后,向上偏转角度  $\theta$ (负值),如图 2(b),其中 CCD 相机 I 与 CCD 相机 II 处于分光镜的等效位置。

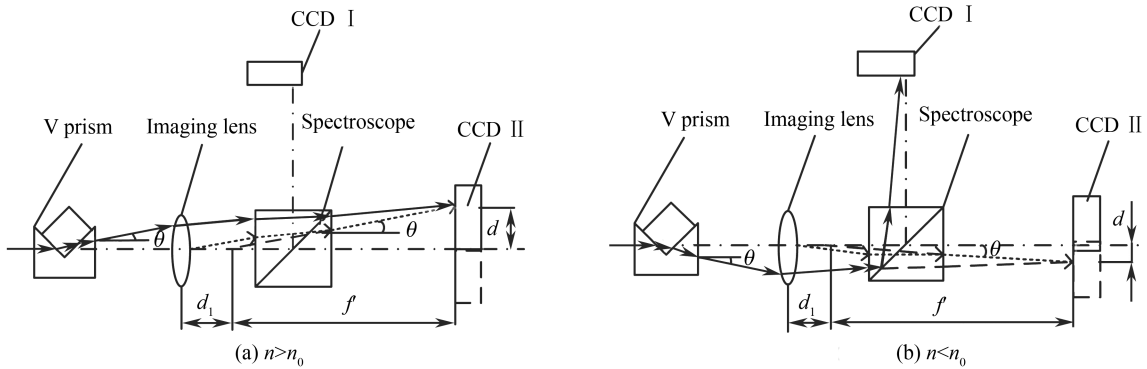


图 2 系统工作原理

Fig.2 System working principle diagram

根据直角三角形正切定理,可求得偏折角度  $\theta$

$$\theta = \arctan(d/f') \quad (5)$$

综上所述可得

$$n = \sqrt{n_0^2 \pm \sin^2[\arctan(d/f')] \sqrt{n_0^2 - \sin^2[\arctan(d/f')]}} \quad (6)$$

式中  $d$  为 CCD 相机上狭缝中心的移量,  $f'$  为成像物镜焦距。

## 2 测量方法实现

### 2.1 系统组成

该测量系统由光源、滤光片组件、自准直平行光管、V 槽、组合透镜组及 CCD 相机构成。其中自准直平行光管由毛玻璃、消杂光阑、分划板、分光镜及准直透镜组构成。系统工作原理图如图 3。

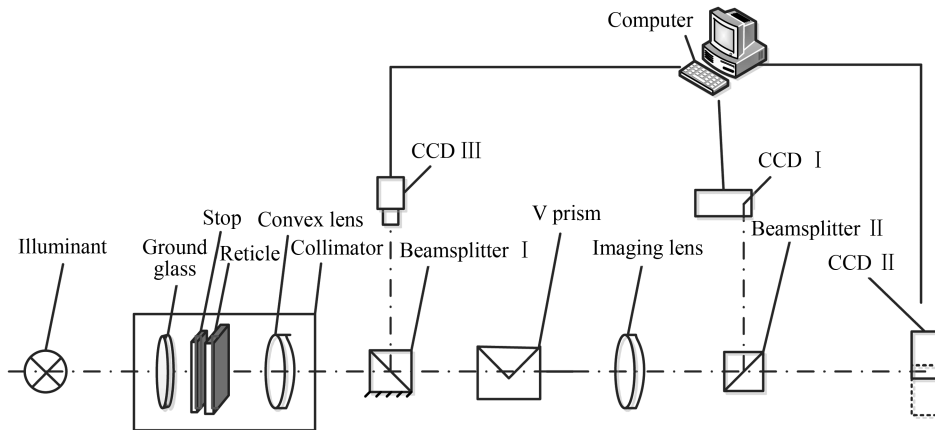


图 3 系统工作原理图

Fig.3 System working principle diagram

由光源发出的光经滤光片滤光形成单色光,毛玻璃匀光,透过透射狭缝,由准直镜准直,入射到 V 槽和被测玻璃。经分光镜后光线被分成两部分,其中部分光线被 V 槽的前端面反射回准直物镜,由分光镜 I 反射进入到自准直 CCD 相机 III,用于 V 槽位置校准。另一部分光线透过 V 槽及被测玻璃,出射光发生偏折,由成像物镜将单狭缝亮线成像在 CCD 相机 I 或 CCD 相机 II 上,代入式(6)计算得出被测玻璃折射率  $n$ 。

### 2.2 V 槽姿态的自准直

在实际测量中,V 槽需要经常更换,由于人为操作差异,难以保证 V 槽与平行光管是正交性对准,且即使利用专业校准工具已经将 V 槽位置校准,但难以保证每次固定 V 槽的位置一致,因此,避免 V 槽姿态变化引入测量误差,是提高光学玻璃折射率测量精度的关键因素之一。

本文采用自准直与 CCD 视觉技术对 V 槽倾角进行校准。固定 V 槽后,入射光线经准直透镜组实现光线

准直,透过分光镜时被分成两路,一路直接透过分光镜,入射到 V 槽的抛光表面,再次被反射回分光镜,折射入 CCD 相机 III,其中 CCD 相机 III 位于组合透镜组的焦平面上;另一路被反射后垂直向下入射到平面反射镜,再被垂直向上反射到 CCD 相机 III,若两路光线形成的狭缝像重合,则说明 V 槽与平行光管是正交的,如图 4(a),若狭缝像不重合,则说明 V 槽倾斜,如图 4(b).

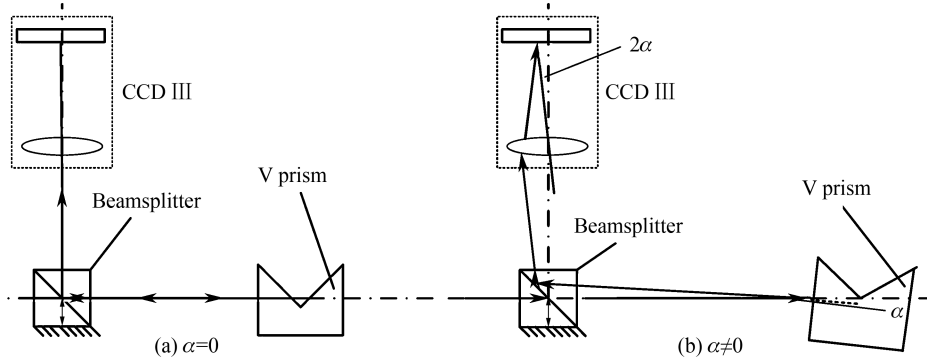


图 4 V 槽倾角自准直方法原理  
Fig.4 Self-collimation method diagram

根据 CCDIII 中狭缝图像位置,将 V 槽调至与平行光管正交.同时,若狭缝图像的大小发生变化,说明 V 槽的前后位置发生变化,需根据 CCDIII 中的反馈值进行调整,通过以上两步将 V 槽位置调到正确的位置.

### 2.3 双 CCD 视场扩展

由于 CCD 幅面的限制,满足分辨率要求情况下,为保证测量精度的同时实现大偏折角测量,本文采用分光镜分光,使用 CCD 相机 I 和 CCD 相机 II 实现视场扩展,通过对两 CCD 采集到的视频进行拼接实现.由于检测系统中使用的两个 CCD 是同型号,即帧频和分辨率都是一致的,因此,在视频拼接过程中不涉及时间分辨率和空间分辨率一致性问题<sup>[12-13]</sup>.

本文采用基于模板的视频拼接方法,其示意图如图 5.

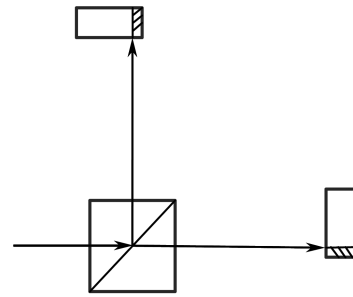


图 5 拼接示意图  
Fig.5 Image registration diagrammatic sketch

当 V 槽中放入标准块时,准直光线透过 V 槽后,被分光镜分成两路分别入射到 CCD 相机 I 和 CCD 相机 II,在两 CCD 相机中呈现狭缝图像,且有重叠区域,即图 5 中阴影区域.针对该重叠区域,及狭缝图像的重心、边界坐标进行相似性配准<sup>[14-18]</sup>,即可得到拼接后的图像.其算法流程图如图 6.

首先对图像进行去噪处理,然后识别两 CCD 相机中的狭缝像,得到其中心坐标  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ .由于狭缝像处于两 CCD 相机的重叠区域,以此重叠区域内的配准特征点建立数据点集,采用相位相关法指导数据点集配准.最后选定第 n 帧为全景图像参考帧,即参考坐标系,直接求取当前帧到全景图像的变换参数,实现视场拼接.

## 3 实验验证及结果分析

### 3.1 实验验证

根据 V 棱镜折射仪的检定规程<sup>[19]</sup>,在满足温度

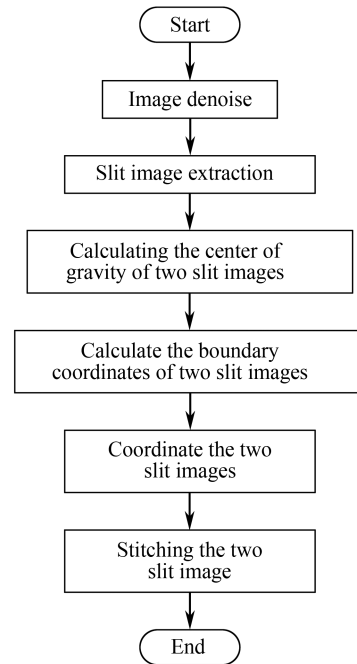


图 6 图像拼接算法流程图  
Fig.6 Image mosaic algorithm flow chart

$t_0 = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 、压强  $P_a = 101 \text{ kPa}$ 、湿度  $f_0 < 85\% \text{RH}$ 、 $\text{CO}_2$  含量约为  $0.03\%$  的环境下进行实验。

测试前,调校光路,为测试做准备。

首先,调整光谱光源、狭缝、准直平行光管、V槽的位置及 CCD,使其均在光轴上.以分划板和准直物镜构成的平行光管光轴为基准,分划板上的狭缝像作为无穷远物,在准直光路中,V槽位置放置角隅反射棱镜(原向反射镜),在分光镜 I(自准直仪中的)位置放置五棱镜(入射光垂直于出射光),前后、左右、倾斜三个方面调节 CCD 相机 III,倾斜调整使狭缝像与行对齐;左右调整使之位于视场中心;前后调整使狭缝像在 CCD 相机 III 上所占的行(或列)最少;固定好 CCD 相机 III,用分光镜 I 替换五棱镜,调节其倾斜角度使狭缝像保持五棱镜时的状态,并固定,至此,CCD 相机 III 调整完毕.接着在分光镜 II 的位置放置五棱镜,以平行光管的无穷远狭缝像为远物,按前述相同方法调整好 CCD 相机 II 和分光镜 II 之后,分别前后、上下、倾斜调整 CCD 相机 I,使其位于和 CCD 相机 II 的等效位置上,然后分别平移 CCD 相机 I 和 CCD 相机 II,全狭缝像分别处于 CCD 相机 I 的底部和 CCD 相机 II 的顶部,并对齐相同的像素行,前述 CCD 的信号可以用成像法,也可以接到示波器上,用波形加以分析.采用示波器进行分析精度更高些.至此,CCD 相机 I 和 CCD 相机 II 调整完毕。

然后,调整 CCD 相机 I 或 CCD 相机 II 处于分光镜的等效位置,即成像物镜的两个等效焦平面上。

最后,对 V 槽位置进行校准.在 V 槽中放入标准块,将标准块与 V 槽的接触面涂上浸液,目的是使二者充分地接触,排除气泡.通过软件判断由 V 槽反射回的狭缝像和 CCD 相机 III 直接接收到的狭缝像是否重合,若不重合,调整 V 槽倾角将其调整至重合,即说明 V 槽与平行光管已正交性对准.其测量装置如图 7。

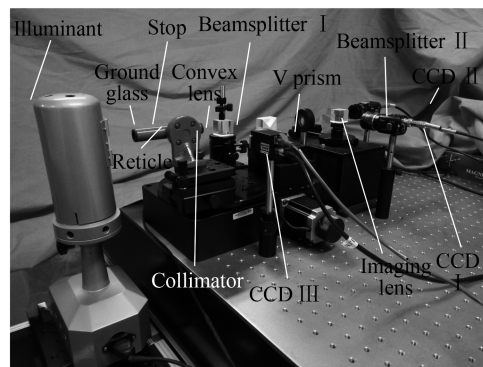


图 7 V 棱镜折射仪装置图

Fig.7 the V prism refractometer set-up diagram

测试过程分两步:

首先,标记标准块产生的狭缝像位置.放置标准块(折射率与 V 槽折射率一致)到 V 槽中,透过 V 槽及标准块的入射光线,由 CCD 相机 I 或 CCD 相机 II 接收,产生的狭缝像,其中心作为基准位置。

最后,对被测玻璃折射率进行测量.当 V 槽中放入被测玻璃时,透过 V 槽及标准块的入射光线,发生偏折,由测量 CCD 相机 I 或 CCD 相机 II 接收的狭缝像偏离了基准位置,通过软件解算其偏差值,代入式(6),测得被测玻璃折射率。

### 3.2 结果分析

本实验分别利用传统 V 棱镜折射仪、数字化 V 棱镜折射仪及根据本文方法搭建的实验装置,进行玻璃折射率精度、重复精度及测量效率测试。

#### 1) 玻璃折射率测量重复精度、效率测试

在波长为  $587.6 \text{ nm}$  的 d 光作用下,对型号为 S-BSL7 的被测玻璃进行 6 次等精度重复测量,其测量结果如表 1.其中型号为 S-BSL7 的被测玻璃经最小偏向角法标准仪器标定,其值  $1.516\ 379$  视为真值。

表 1 玻璃折射率的重复精度数据表

Table 1 Repeatability accuracy of glass refractive index data

Order number	Traditional			Digital			Method of this paper		
	$\theta/(\prime)$	Actual	Time/s	$\theta/(\prime)$	Actual	Time/s	$\theta/(\prime)$	Actual	Time/s
1	2 457	1.516 331 9	19.3	2 474	1.516 373 0	22.3	2 477.3	1.516 380 9	7.0
2	2 467	1.516 356 1	18.7	2 476	1.516 377 8	20.9	2 477.5	1.516 381 3	8.2
3	2 464	1.516 348 8	18.2	2 474	1.516 373 0	21.7	2 476.9	1.516 379 9	8.8
4	2 470	1.516 363 3	17.8	2 475	1.516 375 4	21.3	2 477.1	1.516 380 4	7.9
5	2 452	1.516 319 8	17.8	2 475	1.516 375 4	21.3	2 476.5	1.516 378 9	8.3
6	2 445	1.516 302 9	18.3	2 474	1.516 373 0	21.7	2 477.2	1.516 380 6	8.1
Mean value	2 458.3	1.516 337 1	18.35	2 436.7	1.516 375 0	21.5	2 477.3	1.516 380 3	8.1

由测量数据知,传统 V 棱镜折射仪的玻璃折射率测量均值为  $1.516\ 337\ 1$ ,与真值比较的绝对误差为

$-4.2 \times 10^{-5}$ , 数字化 V 棱镜折射仪的测量均值为 1.516 375 0, 与绝对误差为  $-4 \times 10^{-6}$ , 本文提供的方法测量均值为 1.516 380 3, 与绝对误差为  $1.3 \times 10^{-6}$ , 小于  $2 \times 10^{-6}$ , 其仪器精度数据表如表 2.

表 2 仪器精度测量实验数据表

Table 2 Experimental data sheet of instrument accuracy measurement

	Traditional	Digital	Method of this paper
Actual	1.516 337 1	1.516 375 0	1.516 380 3
Real	1.516 379	1.516 379	1.516 379
Absolute error	$-4.2 \times 10^{-5}$	$-4 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-6}$

根据贝塞尔公式(7), 可由残余误差求得测量的重复性  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2}{6 - 1}} \quad (7)$$

式中,  $x_i$  为第  $i$  次测量值,  $\bar{x}$  为 6 次测量平均值.

得到传统 V 棱镜折射仪测量方法、数字化 V 棱镜折射仪测量方法、本文所提出的测量方法的重复精度分别为:  $2.3 \times 10^{-5}$ ,  $1.9 \times 10^{-6}$ ,  $8.5 \times 10^{-7}$ .

## 2) 玻璃折射率测量精度测试

针对不同光谱线(d 光、C 光、F 光、e 光和 g 光), 采用以上三套设备对型号为 S-FSL5(不同光谱线作用下的玻璃折射率见表 3)的玻璃进行玻璃折射率的精度测试, 其测量结果如表 3.

表 3 不同光谱线下玻璃折射率数据表

Table 3 Glass refractive index data under different spectral lines

Optical spectrum	Real	Traditional		Digital		Method of this paper	
		Actual	Absolute error	Actual	Absolute error	Actual	Absolute error
d	1.487 566 1	1.487 535 1	$-3.1 \times 10^{-5}$	1.487 561 4	$-4.7 \times 10^{-6}$	1.487 564 3	$-1.8 \times 10^{-6}$
C	1.485 421 6	1.485 466 1	$4.5 \times 10^{-5}$	1.485 425 4	$3.8 \times 10^{-6}$	1.485 422 8	$1.2 \times 10^{-6}$
F	1.492 352 3	1.492 321 2	$-3.1 \times 10^{-5}$	1.492 349 7	$-2.6 \times 10^{-6}$	1.492 351 2	$-1.1 \times 10^{-6}$
e	1.489 221 6	1.489 257 1	$3.6 \times 10^{-5}$	1.489 224 9	$3.5 \times 10^{-6}$	1.489 223 5	$1.9 \times 10^{-6}$
g	1.496 021 4	1.496 074 5	$5.3 \times 10^{-5}$	1.496 025 7	$4.3 \times 10^{-6}$	1.496 022 7	$1.3 \times 10^{-6}$

由测量结果知, V 棱镜折射仪的玻璃折射率测量结果优于  $\pm 5 \times 10^{-5}$ , 数字化 V 棱镜折射仪的测量结果优于  $\pm 5 \times 10^{-6}$ , 本文提供的方法测量结果优于  $\pm 2 \times 10^{-6}$ , 明显优于前两者.

综上, 本文所提供方法与真值的绝对差、重复精度及效率方面都优于前两者.

## 4 结论

本文采用机器视觉技术实现偏折角的直接测量, 简化了测角机构、传动机构及伺服机构, 缩短测量时间, 提高测量效率. 通过自准直技术实现 V 槽的正交性校准, 减小由 V 槽倾斜引入的测量误差, 提高玻璃折射率的测量精度. 实验结果表明, 采用该方法可将玻璃折射率测量精度提高到  $\pm 2 \times 10^{-6}$ , 测量时间可缩短到 10 s 以内.

### 参考文献

- [1] XU Cong-en. Research on the intelligence of V prism refractometer[D]. Jiangsu, Institute of Metrology, 2011. 徐聪恩. V 棱镜折射仪的智能化研究[D]. 江苏, 中国计量科学研究院, 2011.
- [2] CAO Miao, LIU Chang, AN Zhi-yong. Study on refractive index measurement system of glass based on CCD automatic alignment technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, **34**(11): 2565-2571. 曹杪, 刘畅, 安志勇, 等. 基于 CCD 成像自动对准技术的玻璃折射率测量系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, **34**(11): 2565-2571.
- [3] WU De-lin, WU Zhi-qiang, MA Bo-tao. Study on the compensation method of high refractive index V prism[J]. *Opto Electronic Engineering*, 2015, **42**(1): 20-24. 吴德林, 吴志强, 马伯涛, 等. 高折射率 V 棱镜测试补偿方法研究[J]. 光电工程, 2015, **42**(1): 20-24.
- [4] LI Yan-feng, AN Zhi-yong, WANG Jin-song, et al. Research on low contrast image recognition algorithm based on image alignment V prism refractometer[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(6): 061002. 李延风, 安志勇, 王劲松, 等. 基于图像对准式 V 棱镜折射仪低对比度图像的识别算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, **51**(6): 061002.

- [5] ZHAN Yong-hong, LIU Qing, YANG Di, *et al.* Inversion of complex refractive index for rough-surface objects[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(8): 2178-2184.  
战永红,刘卿,杨迪,等. 表面粗糙材质的复折射率反演[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(8): 2178-2184.
- [6] ZHANG Zong-quan, XU Ming, REN Jun-peng, *et al.* Non-contact measurement for liquid refractive index in a closed pipe[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(10): 2408-2416. .  
张宗权,徐铭,任俊鹏,等. 封闭玻璃管道内液体折射率的非接触测量[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(10): 2408-2416.
- [7] CAO Miao, LIN Yun, AN Zhi-yong, Improvement of high precision automatic V prism refractometer[J]. *Journal of Metrology*, 2014, **35**(5): 430-433.  
曹秒,林昀,安志勇,等. 高精度全自动 V 棱镜折射仪的改进[J]. 计量学报, 2014, **35**(5): 430-433.
- [8] HANS S, DRIES M, OLIVIER T, *et al.* Determination of the refractive index of water-dispersible granules for use in laser diffraction experiments[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2002, **19**(6): 426-432.
- [9] CAO Miao, GUO Xiao-xue, Liu Ming, *et al.* Design of opto mechanical structure of high precision V prism refractometer[J]. *Applied Optics*, 2014, **35**(4): 568-573.  
曹秒,郭晓雪,柳鸣,等. 高精度 V 棱镜折射仪光机结构设计[J]. 应用光学, 2014, **35**(4): 568-573.
- [10] ZHANG Xi, CAO Wei-guo, HUI Ying-chao, *et al.* Study on V prism photoelectric refractometer based on[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2013, **36**(5): 48-51.  
张溪,曹维国,回英超,等. 基于 CCD 的 V 棱镜光电折射仪研究[J]. 长春理工大学学报, 2013, **36**(5): 48-51.
- [11] MENG Qing-hua, XIANG Yang. A new method for measuring refractive index of optical glass with high accuracy [J]. *Optical Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2114-2119.  
孟庆华,向阳. 高精度测量光学玻璃折射率的新方法[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(11): 2114-2119.
- [12] GAO Tian-yuan, DONG Zheng-chao, ZHAO Yu. Structure and setting method of compound eye vision system based on field of view[J]. *Journal of photonics*[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1122001.  
高天元,董正超,赵宇,等. 视场拼接复眼成像系统结构及装调方法[J]. 光子学报, 2014, **43**(11): 1122001.
- [13] LEI Hua, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun. Optical mosaic imaging system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(6): 1213-1217.  
雷华,徐之海,冯华君,等. 光学拼接成像系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(6): 1213-1217.
- [14] CHANG Lin, JIN Guang, YANG Xiu-bin. Design and analysis of a fast registration algorithm for space camera TDICCD imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(5): 0511011.  
常琳,金光,杨秀彬. 航天 TDICCD 相机成像拼接快速配准算法设计与分析[J]. 光学学报, 2014, **34**(5): 0511011.
- [15] AO Lei, TAN Jiu-bin, CUI Ji-wen. Positioning method from the center of a circle collimator target fast high precision laser optical CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 254-258.  
敖磊,谭久彬,崔继文,等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直圆目标中心的定位方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 254-258.
- [16] KITAMURA Y, SHOGENJI R, YAMADA K, *et al.* Reconstruction of a high-resolution image on a compound-eye image-capturing system.[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(8): 1719-27.
- [17] CHAN W S, LAM E Y, NG M K, *et al.* Super-resolution reconstruction in a computational compound-eye imaging system[J]. *Multidimensional Systems & Signal Processing*, 2007, **18**(2-3): 83-101.
- [18] WU De-lin, WU Zhi-qiang, MA Bo-tao, *et al.* The research of data compensation method for V-prism test of high refractive index[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(1): 20-24.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局 JJG863-2005, V 棱镜折射仪检定规程[S]. 2005.