

基于新数学模型的自动对准式色散系数测量系统

闫俊岑^{1,2}, 车 英¹, 耿树彬³

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012; 3. 北京市延庆县质量技术监督局, 北京 102100)

摘 要: 光学玻璃是光电技术产业的基础和重要组成部分,其色散系数是反应其性能的重要常数。利用 CCD 成像与机器视觉自动对准技术,在考虑了空气折射率对色散系数测量精度影响的基础上,对传统的色散系数测量公式重新进行了数学建模。多波段小型平行光管设计过程中,在校正了与孔径有关像差的基础上,对像差有特征意义的子午面内的光线光路进行了计算,求出了理想像与实际像的位置相差,实现了波段小型平行光管对无穷远目标的模拟。最后,综合运用了多波段小型平行光管设计技术、自动成像技术、光栅角位移测量技术,设计了图像自动对准式色散系数测量系统并实现了高精度测量。利用已知色散系数的光学玻璃对该测量系统进行了标定,通过精度分析可知,测试结果与标准值绝对误差不超过 $\pm 2.3093 \times 10^{-6}$ 。

关键词: 色散系数; V 棱镜; CCD 成像; 平行光管

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2858-06

Dispersion coefficient measuring system of automatic alignment based on novel mathematical model

Yan Juncen^{1,2}, Che Ying¹, Geng Shubin³

(1. School of Opto-electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Mechatronic and Engineering, Changchun University Of Technology, Changchun 130012, China;
3. Beijing Yanqing County Bureau of Quality and Technical Supervision, Beijing 102100, China)

Abstract: Optical glass is the foundation and an important part of photovoltaic technology industry, and the dispersion coefficient is an important constant which responses performance. The novel mathematical model was reestablished instead of the traditional dispersion coefficient measurement formula based on CCD imaging and automatic alignment technique of machine vision in this system. The influence of refractive index of air was considered for dispersion coefficient measurement accuracy. In the design process of small multiband collimator, on the basis of adjusting the aberration related to aperture, the optical path of the light was calculated, which was characteristic sense for aberration in meridian inner surface, the location aberration was obtained between the ideal image and the actual image, the simulation of infinity goals was achieved by a small band collimator. Finally, the technique of multiband

收稿日期: 2015-01-06; 修订日期: 2015-02-07

基金项目: 吉林省科技发展计划重大专项(20126014)

作者简介: 闫俊岑(1988-),女,讲师,博士,主要从事光电检测技术方面的研究。Email:2030401441@qq.com

small parallel light pipe, automatic imaging processing and grating angular displacement measurement were applied in this system. The automatic image alignment of dispersion coefficient measurement system was designed and high precision measurement was realized. It can know from the accuracy of analysis that the measurement system is calibrated with the known dispersion coefficient of optical glass, and the results show that the absolute errors is less than $\pm 2.309 3 \times 10^{-6}$.

Key words: dispersion coefficient; V prism; CCD imaging technique; parallel light pipe

0 引言

光学玻璃的色散系数是衡量透镜成像清晰度的重要指标^[1]。因为色散系数是由光学玻璃在不同光谱下的折射率计算而得到的,因此为了保证光学系统的成像质量,光学材料折射率的准确测量显得尤为重要^[2-4]。传统光学玻璃折射率的测量方法是采用V棱镜折射仪,该方法不仅装置简单、测量方便,而且具有高精度的测试性能^[5-11]。然而,其同时具有人眼通过目镜观察和对准的缺点,因此会使测量结果受主观影响因素的影响,且测量效率较低。其中参考文献[12]的精度达到了 $\pm 1.5 \times 10^{-5}$,参考文献[13]的测量精度可以达到 $10''$ 以内,参考文献[14]主要是在非共轴系统中引入了自由曲面棱镜,从而克服了该类系统因光学元件偏心和倾斜带来的大离轴像差。

为了提高测量精度,文中结合基于光电轴角编码器测角技术和CCD图像自动对准技术来设计折射率测量系统,考虑空气折射率对V棱镜折射仪测量精度影响的基础上,提出了一种基于偏折角测量折射率及色散系数的新数学模型,实现了待测试样的色散系数快速准确的全自动测量,测量精度高达 $\pm 2.309 3 \times 10^{-6}$ 。

1 新的色散系数测量模型建立

由折射定律可知:折射角的正弦值与入射角正弦值的比值等于入射光所在介质中的折射率 n 与折射光所在介质里的折射率 n' 的比值,即

$$\frac{\sin I'}{\sin I} = \frac{n}{n'} \quad (1)$$

由公式(1)可知,采用V棱镜折射仪法测量玻璃样品折射率,其原理图如图1所示^[9]。

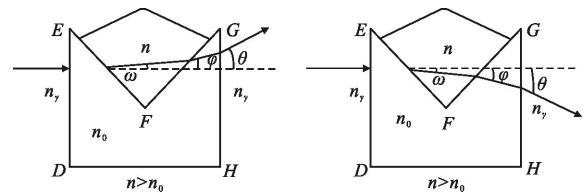


图1 V棱镜折射仪法测量折射率的原理图

Fig.1 Schematic diagram of the V prism refractometer method measuring the refractive index

由此可导出公式:

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

$$n \sin(45^\circ + \omega) = n_0 \sin(45^\circ + \varphi) \quad (3)$$

$$\sin \theta = n_0 \sin \varphi \quad (4)$$

由公式(2)、(3)、(4),可得:

$$n = \sqrt{n_0^2 + \sin \theta \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \theta}} \quad (5)$$

公式(4)并没考虑空气折射率,就直接导出公式(5)。空气对不同的谱线具有不同的折射率,而且对不同的测试环境:温度、气压、湿度,甚至空气成分也有不同的折射率。虽然其变化不大,但对 10^{-6} 数量级的折射率测量精度,已是不可忽略的量。

如图1所示,设空气折射率为 n_γ ,由公式(4)可导出公式(6):

$$n_\gamma \sin \theta = n_0 \sin \varphi \quad (6)$$

将公式(2)三角变换后得:

$$n_0 \sin 45^\circ = n \cos(45^\circ + \omega) \quad (7)$$

将公式(3)与公式(7)分别平方求和消去 ω 得:

$$\left(\frac{n_0 \sin 45^\circ}{n} \right)^2 + \left[\frac{n_0 \sin(45^\circ + \varphi)}{n} \right]^2 = 1 \quad (8)$$

将公式(8)变形为:

$$\sin(45^\circ + \varphi) = \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n_0} \right)^2} \quad (9)$$

将公式(4)代入公式(9)中变形可得:

$$n = \sqrt{n_o^2 + n_s \sin^2 \theta} \sqrt{n_o^2 - n_s \sin^2 \theta} \quad (10)$$

公式 (10) 考虑了空气折射率对偏折角的影响。如果将空气折射率近似为真空折射率, 即令公式 (10) 中的 $n_s=1$, 则公式 (10) 和公式 (5) 完全相同。

按照公式 (10) 分别在 F 、 C 、 d 三种光谱下, 对测试样的折射率进行测量, 可得待测光学玻璃试样的色散系数:

$$v = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (11)$$

式中: v 为光学玻璃色散系数; n_d 为试样在谱线为 d 下的折射率; n_F 为试样在谱线为 F 下的折射率; n_C 为试样在谱线为 C 下的折射率。

2 基于 CCD 成像自动对准技术的色散系数测量系统

2.1 系统的组成及工作原理

色散系数测量系统组成框图如图 2 所示, 主要包括单色光源、准直系统、CCD 成像及图像处理系统、标准 V 形槽、精密光栅测角系统、精密机械系统、数据处理系统和结果显示系统。图 3 为系统工作原理图。

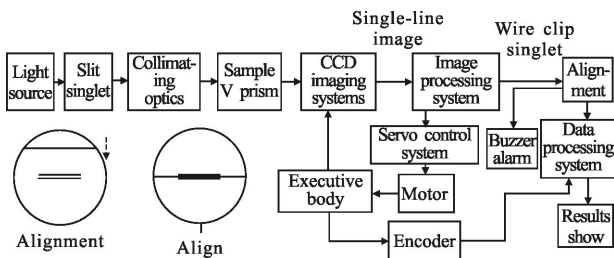


图 2 色散系数测量系统组成框图

Fig.2 Composition block diagram of dispersion coefficient measurement system

图 2 中的光源为单色光源, 分别为 d 光、 F 光、 C 光, 其作用是给出系统所需波长的单色光, 对应波长分别为 656.3 nm、486.1 nm、587.6 nm。

系统工作原理: 单色光源发出的光照射到毛玻璃上, 照亮狭缝单线分划板, 单色光经过小型平行光管准直物镜形成平行光。之后经过前方的滤光片形成适度的单色光, 这时光入射到 V 棱镜底座和被测样品, 考虑到系统机械结构体积的小型化设计要求, 在被测试样和 V 棱镜座的后方添加一个直角棱镜, 其作用是将光偏折 90°, 再经过成像物镜成像在

CCD 平面上。经过处理后将狭缝图像上传到计算机, 操作人员可在屏幕操作窗口上观察到经过图像处理系统加工后的狭缝图像, 将得到的图像与屏幕上由系统程序自动生成的一对参考线进行位置对比分析, 软件系统通过分析单线与双线的相对位置关系来控制精密伺服控制系统, 伺服系统根据接收到的系统程序命令, 驱动电机控制精密机械系统的运动, 使单线图像位于一对参考线中间, 实现精确对准, 如图 2 所示, 此时随着机械系统运动的编码器精密光栅测角系统已经测量出当前角度值, 处理单元根据公式 (11) 进行计算, 最后显示出计算所得的色散系数值。

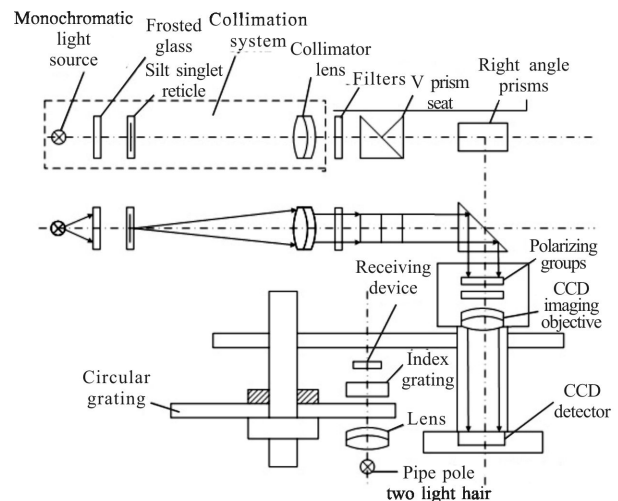


图 3 系统结构框图

Fig.3 Structure diagram of system

2.2 小型多波段平行光管设计

系统利用平行光管的准直作用, 给出一束标准的平行出射光线, 为后续系统检测偏折角提供一个无穷远的狭缝图像, 故对平行光管的成像质量要求非常严格, 尤其是球差和位置色差。光学玻璃色散系数需要在 F 、 C 、 d 三种光谱下对试样的折射率进行测量, 所设计的平行光需要对这三种光谱下的单色像差进行校正。文中系统用到的平行光管属于小视场光学系统, 只要求校正与孔径有关的像差, 对像差有特征意义的子午面内的光线光路进行计算, 包括近轴光线的光路计算和实际光线的光路计算, 以求出理想像的位置和大小, 实际像的位置和大小以及有关相差值。

由于视场角很小, 相对孔径不大, 选用双胶合或

双分离型透镜。平行光管比一般望远物镜像差校正要求更高一些,为此选用双分离型,这样可以多一个曲率半径和空气间隔作为独立变数。

正透镜用低折射率的玻璃,负透镜用高折射率的玻璃,两者之差越大,球差的高级量越小。正透镜用低色散的玻璃,负透镜用高色散的玻璃,从消除色差要求可知,两种玻璃的平均色散系数差值越大,在满足总焦距的条件下,二透镜的光角度越小,球面半径越大,从而减小像差的高级量。由于第二块透镜在镜筒内部,第一块透镜和外界空气接触,所以用K9作为第一块透镜的材料,F2作为第二块透镜的材料。利用ZMAX设计的平行光管的测试结果如图4~图7所示。

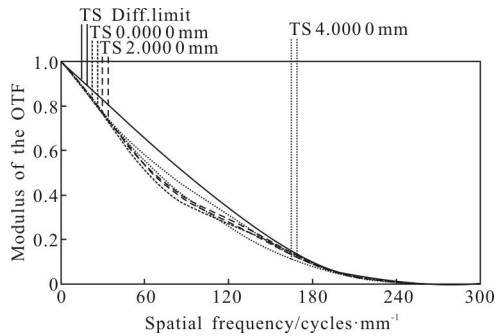


图4 MTF曲线

Fig.4 MTF curve

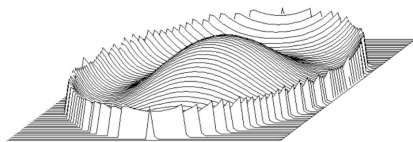


图5 波前图

Fig.5 Wavefront diagram

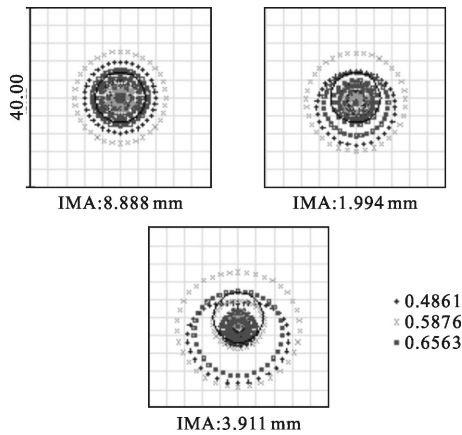


图6 球差图

Fig.6 Spherical map

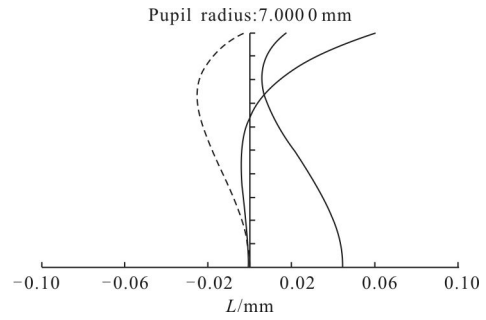


图7 纵向像差曲线

Fig.7 Longitudinal aberration curve

3 实际测量结果与精度分析

3.1 实际测量结果

该测量系统已经在长春天诺精密测控技术有限公司进行了实际测量。在F、C、d三种光谱条件下,首先对型号为S-FSL5、S-TIM1和S-BAH28这三种低槽、中槽和高槽标准块的折射率进行了测量,结果如表1所示;然后计算机根据测得的折射率计算相应的色散系数,结果如表2所示,从表中的色散系数数据可以看出,其测量值与标准值间仅存在极小的误差。

表1 折射率测量结果

Tab.1 Measurement data of refractive index

Standard block	Spec-trum	n_0	Standard block true value	$\theta(^{\circ})$	Measuring the average \bar{n}	Absolute error E-06
	d	1.510385	1.487566	-9352	1.4875641	-1.9
Low slot S-FSL5	F	1.515963	1.492352	-9672	1.4923541	2.1
	C	1.507929	1.485421	-9224	1.4854190	-2.0
In the groove S-TIM1	d	1.647780	1.625868	-8983	1.6258669	-1.1
	F	1.661343	1.638255	-9462	1.6382534	-1.6
	C	1.642163	1.620734	-8794	1.6207327	-1.7
High slot S-BAH28	d	1.754897	1.723472	-12864	1.7234738	1.8
	F	1.774481	1.736927	-15355	1.7369281	1.1
	C	1.746989	1.717863	-11929	1.7178614	-1.6

表 2 色散系数测量结果

Tab.2 Measurement data of refractive index

Standard block	V prism seat dispersion coefficient	True value of the standard block dispersion coefficient	Measuring the average dispersion coefficient	Absolute error E-06
Low slot S-FSL5	63.525 403	70.121 820	70.121 820 6	-0.7
In the groove S-T1M1	33.808 435	35.715 607	35.715 600 6	-0.8
High slot S-BAH28	27.458 751	37.942 375	37.942 373 6	2.3

自动对准式色散系数测量系统及实物图测量界面如图 8、图 9 所示。

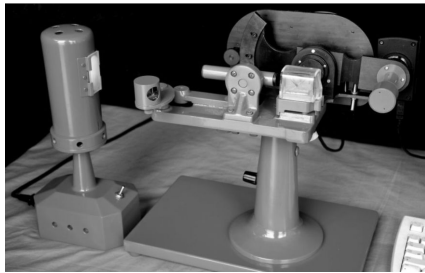


图 8 自动对准式色散系数测量系统实物图

Fig.8 Diagram of dispersion coefficient measuring system of automatic alignment

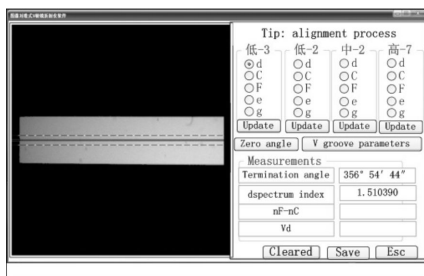


图 9 测量界面图

Fig.9 Interface diagram of measurement

3.2 测量精度分析

折射率测量精度决定了色散系数的测量精度,根据公式(11)分析可知,引起折射率测量值不确定度的主要因素为按公式计算折射率引起的不确定度 $u_{1(n)}$;还有仪器折射率测量重复性所导致的不确定度 $u_{2(n)}$ 和其他因素引起的测量不确定度 $u_{3(n)}$,但其值相

对很小,可以忽略。下面讨论按公式计算折射率引起的不确定度 $u_{1(n)}$:

$$u_{1(n)} = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial n_0}\right)^2 u_{n_0}^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial \theta}\right)^2 u_{\theta}^2} \quad (12)$$

公式(12)中的微商可由公式(13)求得:

$$n = \sqrt{n_0^2 + \sin^2 \theta} \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \theta} \quad (13)$$

$$\frac{\partial n}{\partial n_0} = \frac{n_0}{n} \left(1 + \frac{\sin^2 \theta}{2 \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \theta}} \right)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \theta} = \frac{\cos \theta (n_0^2 - 2 \sin^2 \theta)}{2n \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \theta}} \quad (14)$$

将表 2 中的数据代入公式(13)、(14),计算得出:

$$\frac{\partial n}{\partial n_0} = 1.000 59, \frac{\partial n}{\partial \theta} = 0.475 76。$$

标准块折射率引起的不确定度为 5×10^{-7} , $u_{n_0} = 5 \times 10^{-7} / k = 5 \times 10^{-7} / 3 = 1.67 \times 10^{-7}$ 。编码器的精度是引起偏转角 θ 误差的主要因素,而编码器精度为 $\pm 1''$,则可计算出测量偏转角所引起的不确定度为 $u_{\theta} = 1'' = 4.845 6 \times 10^{-6}$ rad。

把求得的各参数代入公式(12)得:

$$u_{1(n)} = \sqrt{(1.000 59 \times 1.67 \times 10^{-7})^2 + (0.475 76 \times 4.845 6 \times 10^{-6})^2} = 2.3093 \times 10^{-6}。$$

根据该计算结果及折射率和色散系数的关系,可知色散系数的测量精度高于国内现阶段色散系数测量仪的测量精度,达到很好的测量结果。

4 结论

文中在考虑了空气折射率影响被测样折射率、从而影响被测样色散系数的基础上,建立了新的色散系数测量模型;综合运用了平行光管设计技术、CCD 成像技术、光栅角位移测量技术等,设计了图像对准式色散系数测量系统;与传统色散系数测量仪相比较而言,系统不仅提高了测量效率,而且把色散系数测量精度提高到 $\pm 2.309 3 \times 10^{-6}$ 。

参考文献:

- [1] China Institute of Metrology. Metrological verification regulations of the people's Republic of China. Regulation of V Prism Refractometer Verification [M]. Beijing: China Institute of Metrology, 2005: 13-23. (in Chinese)

(下转第 2866 页)

无人机导航与控制技术(态势感知技术、自主决策技术,等)

遥控与遥测技术(航测技术、地面监控技术,等)

无人机机载任务设备技术(任务载荷一体化技术、气动载荷设计技术,等)

无人机产业化及应用(产业化模式推广、资源勘探、气象观测、森林防火,等)

特邀专家报告(更新中):

樊邦奎(总参 55 所),魏靖彪(总参陆航研究所),任建军(空军装备研究院),范国滨(中国工程物理研究院),杨维顺(中国航天科工集团 60 所),李春华(中国航空工业直升机研究所),陈龙建(中航工业成都飞机设计研究所)王合龙(洛阳电光设备研究所),纪明(西安应用光学研究所),黄国江(航天空气动力技术研究院),文运丰(电子科技集团 54 所),杨邵文(贵州航空工业集团),戴明(中科院长春光机所),王岩飞(中科院电子所),李传荣(中科院光电院),张玉琢(西北工业大学),向锦武(北京航空航天大学),昂海松(南京航空航天大学),张邦楚(中航工业洪都集团)

联系人:赵力杰,010-63728336, zhaolijie@csoe.org.cn

中国光学工程学会网站: <http://www.csoe.org.cn> 联系电话:022-58168510、022-58168516

(上接第 2862 页)

- [2] Xing Mannan, Bai Ran, Pu Xiaoyun. A new method for trace liquid refractive index measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(7): 1196-1202. (in Chinese)
- [3] Wu Zhiwei. Step refractive index combined triangular-section prism generating non-diffracting linear structured beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0523005. (in Chinese)
- [4] Wu Zhiqiang, Ma Botao, Wu Deling, et al. The measuring technique of dispersion coefficient for low dispersion optical glass[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(3): 62-66. (in Chinese)
- [5] Liu Jifan, Ma Yanhua, Zhang Lei, et al. The new imaging spectrometer system based on AOTF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3065-3069. (in Chinese)
- [6] Gong Dun, Wang Hong. Space hyperspectral imager optical design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 541-545. (in Chinese)
- [7] Xu Wenhai, Wu Houde. Design of ultra-high-resolution CCD imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1603-1610. (in Chinese)
- [8] Wang Mingfu, Yang Shihong, Wu Qinzhang. Design of large-array CCD image display system in real time[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 2053-2059. (in Chinese)
- [9] Liu Lei. Design of Lightweight high stability off-axis aspheric collimator[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 588-593. (in Chinese)
- [10] Gao Minghui, Li Lifu, Xu Jingli, et al. Design of a new multi-band large-diameter collimator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 38(4): 698-701. (in Chinese)
- [11] Wang Hong, Tian Tiejun. Design of 5x zoom optical system miniaturization[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 315-319. (in Chinese)
- [12] Li Xishan, Sun Baoding, Sun Jingfan, et al. Automatic V prism refractometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1992, 13(2): 113-120. (in Chinese)
- [13] Zhao Junli, Wu Yiming, Gao Limin. Detecting method of right-angled prism tilting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 228-232. (in Chinese)
- [14] Wang Yunxia, Lu Zhenwu, Liu Hua, et al. Application of freeform surface prism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 319-321. (in Chinese)