

电机补偿式焦度仪镜片参数的计算

张永玲

(中北大学 光电仪器厂, 山西 太原 030051)

摘要:针对目前市场上测量眼镜片相关参数全自动焦度仪测量范围小、测量精度较差等问题,研制了基于电机补偿原理的焦度仪。该焦度仪采用步进电机带动分划板做线性运动对分划板的位置进行补偿,通过改变焦度仪光学系统的物像关系来提高焦度仪的测量精度,扩大它的测量范围。测量时放入待测镜片,待整个调节过程结束后,电器部件会将每个接收到的图像进行分析计算后取平均值,得到待测镜片的各项参数。利用本样机对一些典型镜片进行了测量,结果显示所有镜片的误差范围均在 $\pm 0.02 \text{ m}^{-1}$ 内,表明本文研制的焦度仪完全符合国家计量检定规程的计量检定要求。

关键词:焦度仪;电机补偿;镜片参数

中图分类号:TH741.4 **文献标识码:**A

Calculation of lens parameters for lensmeters based on motor compensation

ZHANG Yong-ling

(*Optical Instrument Factory of North University of China, Taiyuan 030051, China*)

Abstract: Automatic lensmeter is an instrument for measuring optical parameters of glasses. For several universal problems on the small measurement range and poor accuracy of the automatic lensmeter, this paper developed a instrument. It uses motor compensation principle to adjust the linear motion position of a partition board to implement the compensation, and changes the relation of the images and the object to achieve the focal power measurement accuracy and enlarge the measuring range. When a lens is placed in the optical system until the end of the adjustment process, the electrical components will receive the image and analyze the averaged calculation, which can get the parameters of the lens under test. After a system demonstration and testing, the prototype is used to successful measure some typical lenses. The results show that all lenses are in the range of error within $\pm 0.02 \text{ m}^{-1}$. The measurement results fully meet the requirements of national metrological verification test.

Key words: lensmeter; motor compensation; lens parameter

1 引言

焦度仪是用来测量眼镜片各项参数的仪器,目前市场较普遍的焦度仪主要有目视刻度盘显示的光机调焦成像式焦度仪和4点投影式焦度仪。光机成像式焦度仪由于受人眼分辨率及光学系统成像质量等因素影响,其刻度间隔为 0.125 m^{-1} 或 0.25 m^{-1} ,手工操作刻度调节轮,速度慢且测量精度较低;4点投影式焦度仪虽然其测量精度能达到 0.01 m^{-1} ,但采用面阵 CCD 采集图像,可供分析的点极少,测量准确度极易受外界光线干扰及灰尘的影响,尤其镜片有划伤时,更会造成测量结果不准确,产生较大偏差。本文所研制的电机补偿式全自动焦度仪,通过调节米字型分划板的位置进行误差补偿,采用线阵 CCD 采集图像,在保证测量精度的同时,具有实时性好、测量速度快,准确性高,测量范围大等优点,在未来的眼镜服务行业有很好的应用前景。

2 工作原理

图1为焦度仪的结构图。其中 L_1 为聚光透镜, L_2 为准直透镜, L_3 为成像透镜, L_0 为待测镜片, A_1, A_2 为平面反射镜。光源由5个红色LED组成,中间的LED在整个光学系统的光轴上,其余

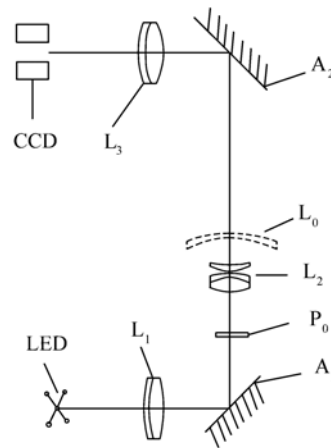


图1 焦度仪结构

Fig. 1 Structure of lensmeter

4个以中间LED为中心,上下左右均匀分布,分别以5组脉冲信号供电。点亮每个LED灯时,CCD就会接收到一组图像,接收到的5组图像求平均值,最终得出更为准确的测量结果。

由LED发出的发散光通过 L_1 聚光透镜后发出平行光,将米字型分划板 P_0 照亮, P_0 经过 L_2, L_3 后在CCD上成像。当放入待测镜片 L_0 后,破坏了 L_2, L_3 组成的共轭系统^[1],这时单片机通过分析CCD上采集的像^[2,3],驱动步进电机调整分划板的位置,使其在CCD上重新生成清晰的像,这时 L_0, L_2, L_3 组成一个新的共轭系统。然后通过电机移动的步数来确定 L_0 的实际度数。

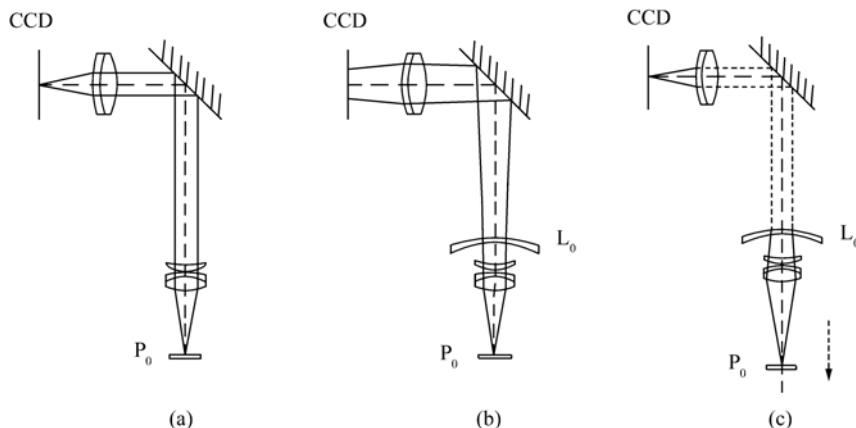


图2 分划板运动过程

Fig. 2 Motion process of partition board

未放入待测镜片 L_0 时,分划板 P_0 的中心点经过起准直作用的透镜 L_2 后以平行光发出,然后经成像透镜 L_3 成像于 CCD 的感光面上,如图 2(a) 所示。当焦距为 f 的待测球镜片 L_0 放置在准直透镜 L_2 与成像透镜 L_3 之间时,本为点像的 P_0 中心点由于离焦成为一半径为 d_0 的弥散斑,如图 2(b) 所示。此时要求电机带动分划板向下运动,寻找新的位置作为物点,使 CCD 接收到清晰的像^[4],如图 2(c) 所示。

3 镜片参数的计算

图 3 中,若 L_3 的焦距为 f_3 ,由 $\triangle ABC$ 和 $\triangle A'B'C'$

相似可得出下式:

$$f = \frac{d}{d_0} f_3^{[5]}. \quad (1)$$

设待测透镜 L_0 的球镜度数为 S ,则:

$$S = \frac{1}{f} = \frac{d_0}{df_3}. \quad (2)$$

已知 f_3 和 d ,根据 CCD 对分划板成像点的记录数据可以计算出 d_0 的值,这样即可求得待测镜片球镜度数 S 值。若待测镜片 L_0 的球镜度太大,CCD 无法检测出分划板成像点的值,此时则需要调节分划板的位置。根据待测镜片度数的正负,电机带动分划板向上或向下移动到位置 x 时,使得 P_0 可以在 CCD 上重新形成清晰的像,如图 4 所示。

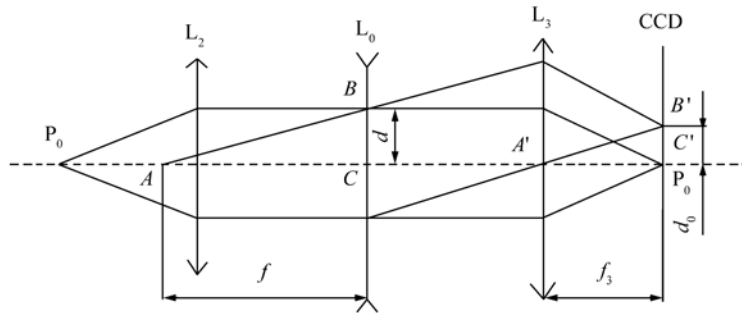


图 3 放入待测镜片 L_0 后,分划板未作调整时的光路图

Fig. 3 Layout of light path of partition board without adjustment after placing L_0 in

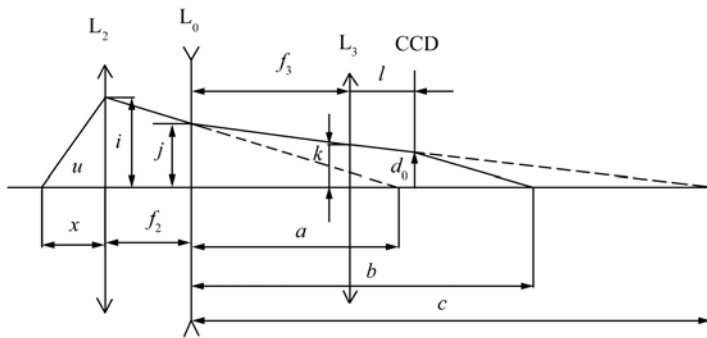


图 4 放入待测镜片 L_0 后,分划板调整后的光路图

Fig. 4 Layout of light path of partition board with adjustment after placing L_0 in

此时由透镜成像公式,对透镜 L_2 可得:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{a + f_2} = \frac{1}{f_2} \quad (3)$$

对待测透镜 L_0 可得:

$$\frac{1}{c} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f} = S. \quad (4)$$

对透镜 L_3 可得:

$$\frac{1}{b-f_3} - \frac{1}{c-f_3} = \frac{1}{f_3}. \quad (5)$$

又由图中的几何关系可得:

$$\frac{i}{j} = \frac{a}{a+f_2}, \quad (6)$$

$$\frac{k}{j} = \frac{c-f_3}{c}, \quad (7)$$

$$\frac{d_0}{k} = \frac{b-f_3-1}{b-f_3}. \quad (8)$$

由式(1)~(8)可得:

$$S = -\frac{d_0}{f_2 f_3 \tan u} - \frac{x}{f_2^2} + \frac{f_3-1}{f_3} + \frac{1}{f_2}. \quad (9)$$

当 $l=f_3$ 时, 可得:

$$S = -\frac{d_0}{f_2 f_3 \tan u} - \frac{x}{f_2^2} + \frac{1}{f_2}. \quad (10)$$

令 $C = \frac{1}{f_2}$, $K_1 = -\frac{d_0}{f_2 f_3 \tan u}$, $K_2 = -\frac{1}{f_2^2}$, 那么可得:

$$S = C + K_1 \times d_0 + K_2 \times x. \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 已知 d_0 和分划板中心 P_0 到透镜 L_2 的中心距离 x , 便可求得待测镜片的度数。

在整个光学系统中, 没有放待测镜片时, 除去轴上 LED 灯外的 4 个 LED 灯分别为 A, B, C, D , 当它们依次照亮分划板时, 分划板 P_0 的中心点在 CCD 上成像的像点为 A', B', C', D' , 此时, 这 4 个点重合于一点; 当测量柱面镜片时, 分划板中心点形成的并不是半径为 d_0 的弥散斑^[6], 4 个 LED 灯分别照亮时成像为如图 5 所示的平行四边形。现设放入球面镜片时, 分划板 P_0 的中心点在 4 个点光源轮流照亮下成像为 A, B, C, D 4 点, 放入柱面镜片后成像于 A', B', C', D' 4 点。分别令 $A(0, c), B(c, 0)$, 测出柱面镜成像点 A' 和 B' 相对于中心的坐标分别为 $A'(x_2, y_2)$ 和 $B'(x_1, y_1)$ 。那么, 由图 5 中的几何关系, 可知:

$$c = \frac{(y_2 + x_1) - \sqrt{(y_2 - x_1)^2 + 4x_2y_1}}{2}. \quad (12)$$

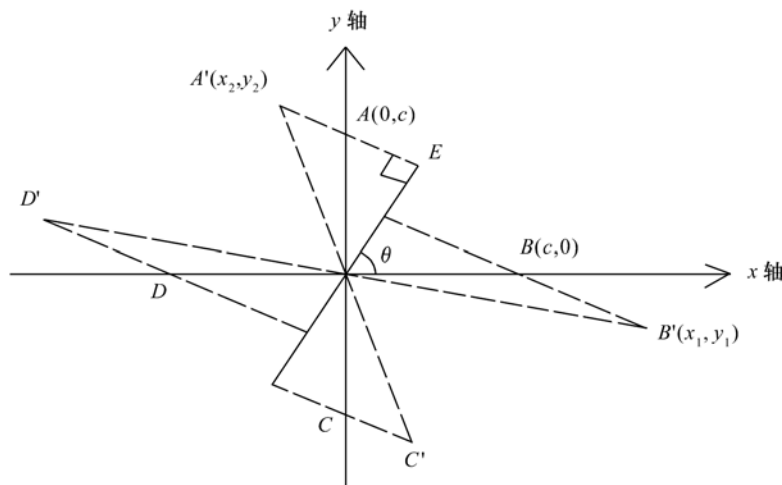


图 5 测量柱面镜时分划板 P_0 中心在像面上出现的点像

Fig. 5 Image of the center of partition board P_0 when measuring cylinder lens

c 值即为所检测镜片在 CCD 上的投影高度, θ , 那么: 代入式(2)得出屈光度 Q_1 的值:

$$Q_1 = \frac{c}{df_3}. \quad (13)$$

柱面透镜最小屈光度方向与 X 轴的夹角为

$$\tan \theta = \frac{c - x_1}{y_1},$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{c - x_1}{y_1} \right). \quad (14)$$

由于柱面透镜可以等价于一个球面透镜和另一个柱面透镜叠加后形成的新的柱面镜,它只在一个方向上对入射光线起偏折作用,那么在这个方向上相当于一个球面镜。光线经过柱面透镜前后在 CCD 像面上的投影高度的比值为:

$$\tau = \frac{AE}{A'E} = \frac{AE}{A'A + AE} \quad (15)$$

又因为: $AE = c \cos \theta, AA' = \sqrt{x_2^2 + (y_2 - c)^2}$
则:

$$\tau = \frac{c \cos \theta}{c \cos \theta + \sqrt{x_2^2 + (y_2 - c)^2}} \quad (16)$$

若柱面透镜的最小屈光度与 X 轴重合,那么,入射光线在 CCD 面上的投影高度为:

$$d_0 = \frac{c}{\tau} = \frac{c \cos \theta + \sqrt{x_2^2 + (y_2 - c)^2}}{c \cos \theta} \quad (17)$$

d_0 即为计算柱面透镜另一屈光度 Q_2 的入射光线在 CCD 上的投影高度,代入式(2)可得:

$$Q_2 = \frac{d_0}{df_3} = \frac{c + \frac{\sqrt{x_2^2 + (y_2 - c)^2}}{\cos \theta}}{df_3} \quad (18)$$

由式(13)和(18)可得该柱面镜片的柱镜度 Z:

$$Z = Q_2 - Q_1 = \frac{\sqrt{x_2^2 + (y_2 - c)^2}}{df_3 \cos \theta} \quad (19)$$

该柱面镜片的轴位角 θ 值可由式(14)求出。

当柱面透镜最小屈光度方向(即屈光度为零时的方向)与 X 轴的夹角在 $90 \sim 180^\circ$ 时,此时 4 个 LED 等照亮的分划板的中心点的像经柱面透镜在 CCD 上分别成 A', B', C', D' 4 点的像出现在直角坐标系的一、三象限,那么依然可按上述步骤进行计算。为了方便起见,可将 4 点坐标沿 Y 轴做镜像,这时只需坐标变换,纵坐标不变,横坐标变为原来的相反数,即可根据上述公式计算出球镜度、柱镜度^[7]。计算出的柱透镜最小屈光度方向与 X 轴的夹角 θ 的补角 δ :

$$\delta = 180 - \theta \quad (20)$$

其中, δ 即是在经过坐标变换后计算出的柱透镜最小屈光度方向与 X 轴的夹角。

4 测量结果

利用研制出样机对部分标准镜片^[8]进行测量,测量结果如表 1 所示。

表 1 的测量结果可以看出,利用该样机测量的标准球镜镜片、标准棱镜镜片及标准散光镜片,其测量误差均在 $\pm 0.02 \text{ m}^{-1}$ 范围内,测量结果完全符合中华人民共和国国家计量检定规程^[9]的精度要求。

表 1 部分标准镜片测量结果

Tab. 1 Measurement results of partial standard lenses

标准镜片	测量次数				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
$S/\text{m}^{-1} (-2.50)$	-2.50	-2.51	-2.51	-2.50	-2.49
$S/\text{m}^{-1} (+2.50)$	+2.50	+2.51	+2.51	+2.50	+2.51
$S/\text{m}^{-1} (-5.00)$	-5.00	-5.01	-5.01	-5.00	-4.99
$S/\text{m}^{-1} (+5.00)$	+5.02	+5.01	+5.00	+5.00	+5.01
$S/\text{m}^{-1} (-10.00)$	-10.00	-10.02	-9.99	-10.02	-10.01
$S/\text{m}^{-1} (-15.00)$	-15.01	-15.00	-14.99	-15.01	-15.00
$\Delta/(\text{cm} \cdot \text{m}^{-1})(2.00)$	$2.00 \times 0^\circ$	$2.01 \times 45^\circ$	$1.99 \times 90^\circ$	$1.99 \times 120^\circ$	$2.00 \times 270^\circ$
$\Delta/(\text{cm} \cdot \text{m}^{-1})(5.00)$	$5.00 \times 0^\circ$	$4.99 \times 45^\circ$	$5.01 \times 100^\circ$	$4.98 \times 135^\circ$	$5.00 \times 255^\circ$
$Z/\text{m}^{-1} (+5.00)$	S: -0.01	S: -0.02	S: -0.02	S: -0.01	S: -0.01
	Z: $5.01 \times 0^\circ$	Z: $5.01 \times 45^\circ$	Z: $5.02 \times 60^\circ$	Z: $5.01 \times 90^\circ$	Z: $5.01 \times 120^\circ$
$Z/\text{m}^{-1} (-1.50)$	S: -0.00	S: -0.02	S: -0.00	S: -0.01	S: -0.01
	Z: $1.51 \times 0^\circ$	Z: $1.51 \times 45^\circ$	Z: $1.50 \times 60^\circ$	Z: $1.50 \times 90^\circ$	Z: $1.49 \times 120^\circ$

5 结 论

本文提出了利用步进电机调整分划板位置进行误差补偿,从而改变光学系统物像关系的方法来检测镜片的屈光度等参数。经过大量的调试、

试验及论证,并利用样机对典型镜片进行测量,结果表明,本文研制的焦度计具有测量精度高、测量范围大、准确性高等优点,且测量结果完全符合精度要求,在未来的眼镜服务行业中将得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] 刘晨,张辉,柯玉军.自动焦度计的研制[J].光学仪器,2003,25(6):40-44.
LIU CH,ZHANG H,KE Y J. Development of automatic lensmeter[J]. *Opt. Instruments*,2003,25(6):40-44. (in Chinese)
- [2] 王文华,何斌,任建岳.线阵 CCD 成像系统自校图形设计[J].光学精密工程,2009,17(8):2011-2015.
WANG W H,HE B,REN J Y. Design of self-check figures in linear CCD imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(8):2011-2015. (in Chinese)
- [3] 刘志艳,陈香才,江晓山,等.用于高速线阵 CCD 的数据获取系统[J].核电子学与探测技术,2010(6):722-725.
LIU ZH Y,CHEN X C,JIANG X SH,*et al.*. A data-acquisition system for high speed linear CCD[J]. *Nuclear Electronics Detection Technol.*,2010(6):722-725. (in Chinese)
- [4] 徐正平,翟林培,葛文奇,等.亚像元的 CCD 几何超分辨方法[J].光学精密工程,2008,16(12):2447-2453
XU ZH P,ZHAI L P,GE W Q,*et al.*. CCD geometric super resolution method based on sub pixel[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(12):2447-2453. (in Chinese)
- [5] 李林.工程光学[M].北京:北京理工大学出版社,2003.
LI L. *Engineering Optics*[M]. Beijing:Beijing University of Technology Press,2003. (in Chinese)
- [6] 胡家升.光学工程导论[M].大连:大连理工大学出版社,2002:835-846.
HU J SH. *Introduction to Optical Engineering*[M]. Dalian:Dalian University of Technology Press,2002:835-846 (in Chinese).
- [7] 王和顺,陈次昌,黄惟公.提高 CCD 测量精度的方法研究[J].光电子·激光,2010(1):63-65.
WANG H SH,CHEN C CH,HUANG W G. Research the method to improve CCD measurement accuracy[J]. *J. Optoelectronics · Laser*,2010(1):63-65. (in Chinese)
- [8] 马振亚,王莉茹,刘文丽. GB 17341-1998 中华人民共和国国家标准:光学和光学仪器-焦度计[S]//全国光学和光学仪器标准化技术委员会.北京:中国标准出版社,1998:3-6.
MA ZH Y,WANG L R,LIU W L. GB 17341-1998 National Standard of the People's Republic of China-Optics and Optical Instruments-Focimeters[S]//The national optical and optical instruments standardization technical committee. Beijing: China Standards Press,1998:3-6. (in Chinese)
- [9] 王莉茹,张吉焱,刘文丽,等. JJG580-2005 中华人民共和国国家计量检定规程-焦度计[S]//全国光学计量技术委员会.北京:中国计量出版社,2005:4-6.
WANG L R,ZHANG J Y,LIU W L,*et al.* JJG580-2005 The People's Republic of China National Metrological Verification Procedures:Focimeters[S]//The national optical measurement technology committee. Beijing: China Metrology Press,2005:4-6. (in Chinese)

作者简介:张永玲(1983—),女,山西大同人,硕士,助理工程师,主要从事视光学仪器的设计及图像处理方面的研究。

E-mail:tianlemxn@163.com