

文章编号 1674-2915(2012)05-0525-06

应用折-衍射元件校正人眼色差

张梅*, 耿征

(中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190)

摘要:提出了采用两个折射-衍射元件对人眼系统在 14° 范围内进行色差校正的光学系统设计方法。基于系统光学性能的评价与单片折射-衍射元件色差校正系统的对比验证了本文提出的色差校正系统的性能。结果表明:两种色差校正系统都可以很好地校正人眼的轴向色差。但是,单片折射-衍射色差校正系统引入了横向色差,其由校正前的 $14.51\ \mu\text{m}$ 增加到 $81.4\ \mu\text{m}$,严重影响了边缘视场处的成像质量。而采用双片折射-衍射元件的色差校正系统可同时对轴向色差和横向色差进行校正,使横向色差降为 $1.64\ \mu\text{m}$ 。设计的色差校正系统可有效提高视网膜的成像质量,并可用于视觉仪器。

关键词:色差校正系统;波前色差;广角眼模型;折/衍射混合元件

中图分类号:O436.1; TH703 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120505.0525

Correction of chromatic aberration for human eyes with diffractive-refractive hybrid elements

ZHANG Mei*, GENG Zheng

(State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems,
Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: changenk@163.com

Abstract: A chromatic corrector with two refractive-diffractive hybrid elements is designed for a wide field-of-view of 14° to correct chromatic aberrations in human eyes. The performance of the corrector based on several optical criteria is compared with a chromatic corrector with single refractive-diffractive element. Results show that both correctors can correct for Longitudinal Chromatic Aberration (LCA). However, it is demonstrated that the chromatic corrector with a single element introduces serious eccentric Transverse Chromatic Aberration (TCA) that increases from $14.61\ \mu\text{m}$ to $81.4\ \mu\text{m}$. This deteriorates the image quality at the edge field-of-view. On the chromatic corrector with two refractive-diffractive elements, both the LCA and the TCA can be corrected and the TCA is just $1.64\ \mu\text{m}$. The designed chromatic corrector can be used to improve the retinal

收稿日期:2012-07-11;修订日期:2012-08-13

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA011903)

image quality and has potential applications in the design of visual instruments.

Key words: chromatic aberration corrector; wavefront chromatic aberration; wide-angle schematic eye model; diffractive-refractive hybrid element

1 引言

人眼作为一个精密光学系统,不仅存在着轴向色差,还存在着横向色差,这些人眼色差的存在,大大降低了复色光物体在人眼视网膜上所成像的质量^[1-3]。另外,在诸如眼底相机等相关视觉仪器设计中,也需要考虑人眼色差的影响。因此,针对人眼特性设计出适于大多数人的消色差系统,对提高视觉质量具有重要的实际意义。

已经有不少文献对两种人眼色差进行了研究^[4-6]。由于眼睛光学介质对不同波长的折射率不同而引起的各波长间光焦度的差别称为轴向色差,一般单位为(m^{-1}),可通过主观方法和客观仪器测得,个体间差异相对较小。人眼横向色差定义为:由通过瞳孔中心的主光线中不同波长的光线,交于视网膜上不同位置点而引起的像差,通常采用不同位置点的间距或不同位置点相对于人眼节点的张角表示。目前,人眼视网膜的横向色差只有主观测量方法,个体间差异相对较大。

在光学设计中,根据光学材料在特定波长下的色散特点,通常使用双胶合或三片镜,通过适当分配光焦度使2种或3种波长下的焦距一致实现消色差。A. C. S. Van Heel于1946^[7]年首次提出一款旋转对称的三胶合消色差元件,但其设计波段较窄,为486.1 nm至656.3 nm。A. L. Lewis于1982^[8]年提出另一款旋转对称的三胶合系统,亦能很好地矫正轴向色差。但以上这些三胶合消色差系统的效果均受到视场角的限制,因为边缘视场的横向色差却随着视场的增大而快速增加。L. Powell于1981^[9]年提出一款更为复杂的系统,由一组双胶合和一组三胶合组成,以此来解决边缘横向色差增大的问题。Y. Benny在2007^[10]年基于R. Navarro广角眼模型提出一款双-三胶合系统,此系统具有与人眼相反的倍率色差,其在矫正轴向色差的同时并未引起边缘视场横向色差的

增大。然而,此系统所具有的54 mm厚度对于人眼佩戴有些过大。

不同于传统折射光学元件,衍射光学元件的色散具有负向性,光焦度与波长成正比,且与材料无关,这非常有利于消色差,同折射元件组合可构成综合性能更好的混合消色差系统。J. A. Díaz于2004^[11]年提出一款由一片折射/衍射混杂元件构成的消色差系统。此系统对轴向色差的矫正达到很好效果,同时,与传统折射光学系统相比,其体积和重量都得到缩减。

在消色差系统设计中,选择能准确体现实际人眼光学特性的眼光学结构是很关键的环节。L. N. Thibos^[2]基于人群统计平均的数据提出一种简化眼模型,其能很好地再现人眼轴向色差的特性。R. Navarro和I. Escudero-Sanz^[12]基于解剖学数据提出一种更为理想的广角眼模型。此眼模型不仅能够解释一些低阶单色像差,同时在较大视场范围内亦能很好地体现出与人眼实际情况相一致的光学特性。

迄今为止,采用双片折射/衍射混杂的消色差系统尚未见报道。本文基于R. Navarro广角眼模型设计了一款双片折射/衍射混杂的消色差系统,系统的各项参数由光学设计软件ZEMAX辅助进行优化获得。然后,针对轴向色差、横向色差以及复色光斑RMS等各项参数对所设计的消色差系统进行性能评价。

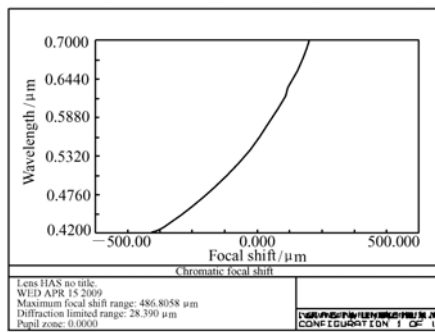
2 广角眼模型

本文研究所采用的Navarro广角眼模型是建立于人眼解剖数据的基础上,对大量人群进行统计平均的结果,各项参数如表1所示。此眼模型在较大视场范围内所具有的低阶单色像差和色差均与实际人眼实验测量获得的统计平均数据吻合得很好,不仅轴向色差其横向色差也能在较大视场范围内很好地再现实际人眼的情况。

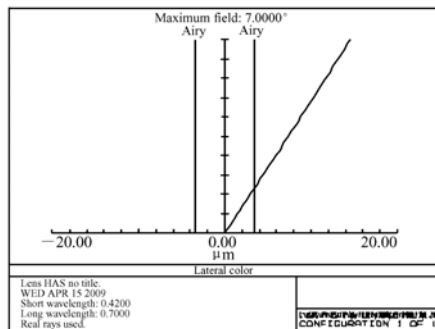
表 1 Navarro 广角眼模型的光学参数及折射率(589.3 nm)

Tab.1 Geometrical parameters and refractive indexes for Navarro wide-angle eye model(589.3 nm)

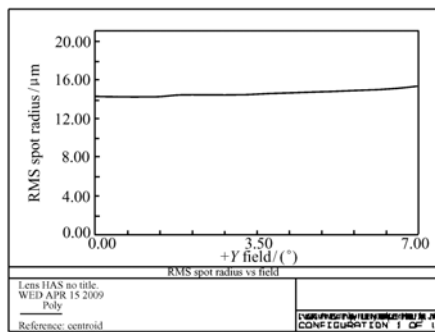
折射面	类型	二次曲面常数	半径/mm	厚度/mm	折射率	阿贝数
1	二次型	-0.26	7.72	0.55	1.376	56.5
2	球型	0	6.5	3.05	1.337 4	49.61
光阑	平面	0	-	0	1.42	48
4	二次型	-3.131 6	10.2	4	1.42	48
5	二次型	-1	-6	16.320	1.336	50.9
像面	球型	-	12.00			



(a) 不同波长焦点位移图
(a) Chromatic focal shift



(b) 横向色差
(b) Lateral color aberration



(c) 复色光斑RMS尺寸随视场变化曲线
(c) Polychromatic RMS spot radius

图 1 Navarro 广角眼模型的光学性质

Fig.1 Optical properties for wide-angle schematic eye model over visible spectrum

图 1 给出 Navarro 广角眼模型在 14° 视场范围内的光学性能,工作波段为 420 ~ 700 nm,各波段权重符合明视觉视见函数曲线,瞳孔直径为 4 mm。其中,图 1(a) 给出不同波长焦点的位移图,即表征出轴向色差;图 1(b) 为横向色差示意图;图 1(c) 为视网膜上复色光光斑 RMS 尺寸随视场角变化的示意图。由图 1(a) 可以看出,在 420 ~ 700 nm 波段,眼模型的轴向色差为 486.8 μm。利用牛顿公式可以计算出由此轴向色差所引起的离焦量:

$$xx' = ff', \quad (1)$$

式中: x 为物面到物方焦面的距离, x' 为像面到像方视场的距离, f 和 f' 分别为物方焦距和像方焦距。因此,对于此眼模型主波长取 555 nm 的情况下, x' 、 f 和 f' 分别为 486.8 μm、22.04 mm 和 16.49 mm,由此计算得 x 数值为 0.75 m,即由轴向色差而引起的离焦量为 1.34 m⁻¹。如图 1(b) 中所示,眼模型在全视场处的横向色差为 14.51 μm。图 1(c) 所示视网膜处复色光光斑的 RMS 尺寸半径在中心视场和全视场下分别为 14.32 和 15.16 μm,这是由各种单色像差和色差造成的。

3 消色差系统的设计方法

利用衍射元件负色散的特性,本文引入衍射元件来设计比传统消色差系统体积和重量更小的系统,以提高其成像性能。在设计过程中,眼模型的工作波段为可见光,即将 420、470、510、555、610、650 和 700 nm 依据明视觉视见函数所对应权重(分别为 0.004、0.091、0.503、1、0.503 和 0.107)在光学设计软件 ZEMAX 中进行设定,瞳

孔直径保持为 4 mm。本设计中,整个系统(即色差矫正系统和眼模型)的视场与以往系统一致,设定为 14°。

首先设计了一款由单片折/衍射混杂光学元件构成的消色差系统,其主要设计和优化过程如下:

(1)在眼模型前适当距离 15 mm 处附加一片镜片。定义镜片其中一面的曲率半径为变量,同时保持另一面的曲率半径为平面。然后,保证系统的焦距不变,设定系统第一阶位相参数为优化函数来进行优化。(2)设定所附加镜片曲率半径为平面的一面为二元面。在光学设计软件 Zemax 中衍射元件的位相分布为:

$$\varphi(r) = - (A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots) , \quad (2)$$

式中: r 为归一化半径, A_1 为二次相位系数,该系数用于矫正色差, A_2 、 A_3 等各项系数为非球面相位参数,用于矫正系统的高阶像差。在设计中只用到前两项。首先,对第一项的系数 A_1 进行优化来矫正色差,然后,对第二项的系数 A_2 和另一面的曲率半径进行优化来矫正单色像差。图 2 给出所设计消色差系统结合眼模型的外观图。

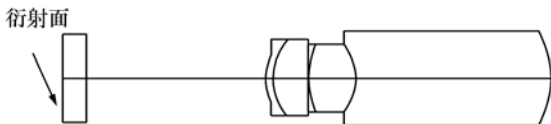


图 2 结合 Navarro 眼模型的单片折/衍射混杂的消色差系统外观图

Fig.2 Layout of corrector with single refractive-diffractive element and wide-angle eye model

研究发现,此色差矫正系统对眼睛轴向色差起到了很好的矫正效果,但大视场的横向色差却随着视场角的增大而更快速增大,如上节中的详细结果分析。因此,为了在整个视场范围内同时消除轴向色差和横向色差,本文设计了双片折/衍射混杂的消色差镜。主要的设计和优化过程如下:

(1)在所设计的第一款色差矫正系统前 5 mm 处附加另外一个折/衍射混杂元件。为了避免两片元件的衍射面遭受环境的损坏,两片元件的衍射面呈对向设置。

(2)重复设计第一款色差矫正系统的步骤

(1)和(2),完成第二款折/衍射混杂的色差矫正元件的设计。图 3 给出了所设计色差矫正系统结合眼模型的外观图。

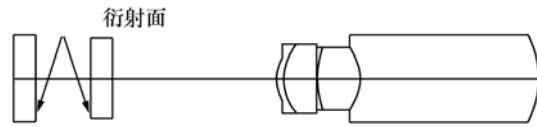
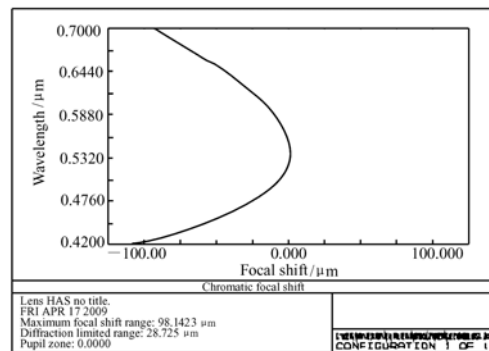


图 3 结合 Navarro 眼模型的双片折/衍射混杂的消色差系统外观图

Fig.3 Layout of corrector with two refractive-diffractive elements and wide-angle eye model

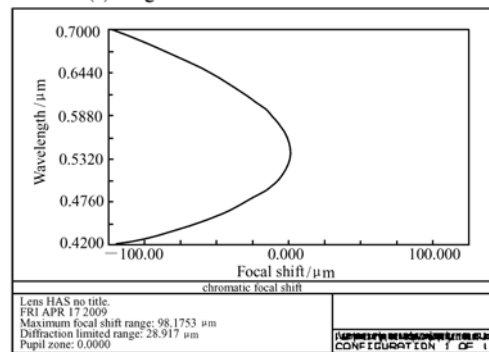
4 消色差系统的评价

从矫正模型眼色差后的剩余轴向色差、横向色差和视网膜上复色光斑 RMS 尺寸半径 3 个方



(a) 单片折/衍射混杂消色差系统

(a) Single refractive-diffractive element



(b) 双片折/衍射混杂消色差系统

(b) Two refractive-diffractive elements

图 4 单片和双片折/衍混合系统的不同波长焦点位移图

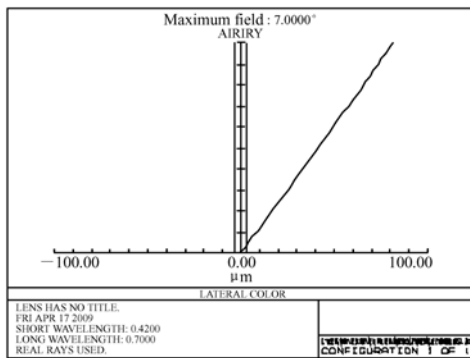
Fig.4 Curves of the chromatic focal shift of the optical systems with single refractive-diffractive element and two refractive-diffractive elements

面来评价所设计的两款色差矫正系统的性能。图 4 给出两款光学系统不同波长的焦点位移曲线,其中,图 4(a) 对应单片折/衍射混杂的消色差系统,图 4(b) 对应双片折/衍射混杂的消色差系统。如图 4(a) 所示,经过第一款消色差系统矫正色差后的剩余轴向色差减小到 $88.14 \mu\text{m}$,依据牛顿公式(式(1))计算其相当于 0.24 m^{-1} 。如图 4(b) 所示经过第二款消色差系统矫正色差后的剩余色差为 $97.17 \mu\text{m}$,即相当于 0.27 m^{-1} 。与矫正前的正视眼模型的轴向色差(1.34 m^{-1})相比较,两款消色差系统都很好地矫正了眼睛的轴向色差。

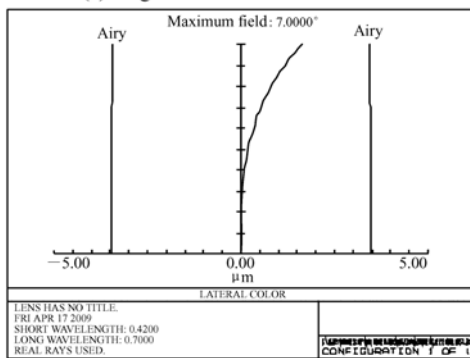
图 5 给出两款消色差系统的横向色差随视场变化的示意图,其中,图 5(a) 对应单片折/衍射混杂的消色差系统,图 5(b) 对应双片折/衍射混杂

的消色差系统。如图 5(a) 所示,经过第一款消色差系统矫正色差后的剩余横向色差最大值为 $81.4 \mu\text{m}$,而图 5(b) 所示的经过第二款消色差系统矫正色差后的剩余横向色差最大值为 $1.64 \mu\text{m}$ 。很明显,与矫正前的眼模型相比较可看出第一款色差矫正系统在大视场处引入了大量的横向色差。这个缺陷严重限制了单片折/衍射混杂的消色差系统的应用,而双片折/衍射混杂的消色差系统不仅对轴向色差而且对横向色差的矫正都达到了非常好的效果。

由光学软件 ZEMAX 中给出的视网膜处复色光斑的 RMS 半径可以用来评价消色差系统的整体性能。图 6 给出两款系统的复色光斑 RMS 尺寸随视场变化的示意图,同样,图 6(a) 对应单片折/衍射混杂的消色差系统,图 6(b) 对应



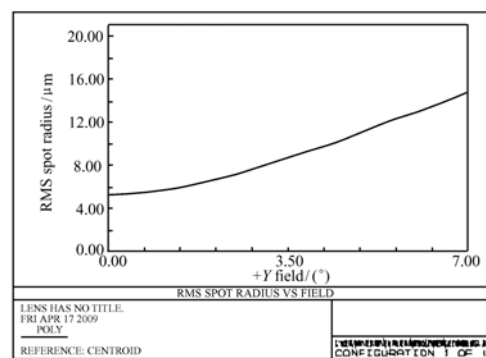
(a) 单片折/衍射混杂消色差系统
(a) Single refractive-diffractive element



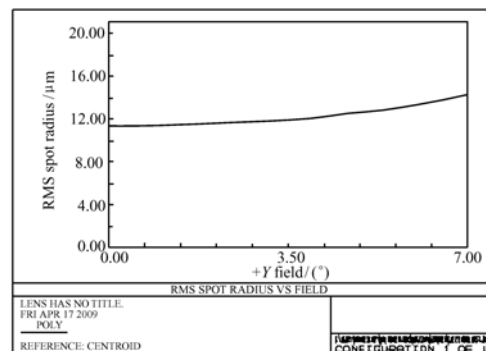
(b) 双片折/衍射混杂消色差系统
(b) Two refractive-diffractive elements

图 5 单片和双片折/衍混合系统的剩余横向色差示意图

Fig. 5 Curves of lateral chromatic aberration of the optical systems with single refractive-diffractive element and two refractive-diffractive elements



(a) 单片折/衍射混杂消色差系统
(a) Single refractive-diffractive element



(b) 双片折/衍射混杂消色差系统
(b) Two refractive-diffractive elements

图 6 单片和双片折/衍射混合系统的复色光斑 RMS 尺寸随视场变化曲线

Fig. 6 Polychromatic RMS spot radii of the optical systems with single refractive-diffractive element and with two refractive-diffractive elements

双片折/衍射混杂的消色差系统。图中可以看出,在中心视场处,经两款消色差系统矫正后的复色光斑 RMS 半径分别为 $5.3\ \mu\text{m}$ 和 $5.67\ \mu\text{m}$ 。与矫正前的 $14.32\ \mu\text{m}$ (如图 1(c)所示)比较,都有了很大的降低。在全视场处,经过第二款消色差系统矫正后的光斑半径减小到 $7.1\ \mu\text{m}$,远远小于矫正前的 $15.16\ \mu\text{m}$ 。然而,经过第一款消色差系统矫正后的光斑半径为 $14.87\ \mu\text{m}$,几乎与矫正前的一样。这与图 5 给出的结果是一致的,第一款消色差系统并未消除大视场的横向色差,因此弥散斑尺寸并未减小,而第二款消色差系统对大视场横向色差的矫正使弥散斑尺寸得到了相应缩减。

参考文献:

- [1] THIBOS L N, BRADLEY A, ZHANG X. The effect of ocular chromatic aberration on monocular visual performance[J]. *Optom. Vis. Sci.*, 1991, 68: 599-607.
- [2] THIBOS L N, YE M, ZHANG X X, *et al.*. The chromatic eye: a new reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans[J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(19): 3594-3600.
- [3] MEETEREN A V, W C J, UNNEWOLD D. Image quality of the human eye for eccentric entrance pupils[J]. *Vis. Res.*, 1983, 23: 573-579.
- [4] BEDFORD R E, WYSZECKI G. Axial chromatic aberration of the human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1957, 47: 564-565.
- [5] THIBOS L N, BRADLEY A, STILL D L, *et al.*. Theory and measurement of ocular chromatic aberration[J]. *Vis. Res.*, 1990, 30: 33-49.
- [6] RYNDERS M, LIDKEA B, CHISHOLM W, *et al.*. Statistical distribution of foveal transverse chromatic aberration, pupil centration, and angle psi in a population of young adult eyes[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, 12: 2348-2357.
- [7] van HEEL A C S. Correcting the spherical and chromatic aberrations of the eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1946, 36(4): 237-239.
- [8] LEWIS A L, KATZ M, OEHRLEIN C. A modified achromatizing lens[J]. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.*, 1982, 59(11): 909-911.
- [9] POWELL I. Lenses for correcting chromatic aberration of the eye[J]. *Appl. Opt.*, 1981, 20(24): 4152-4155.
- [10] BENNY Y, MANZANERA S, PRIETO P M, *et al.*. Wide-angle chromatic aberration corrector for the human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, 24(6): 1538-1544.
- [11] DIAZ J A, IRLBAUER M, MARTINEZ J A. Diffractive-refractive hybrid doublet to achromatize the human eye[J]. *J. Mod. Opt.*, 2004, 51(14): 2223-2234.
- [12] ISABEL E, NAVARRO R. Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye model[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1999, 16(8): 1881-1891.

作者简介:张梅(1984—),女,北京人,助理研究员,主要从事光学系统系统设计、眼视光学等方面的研究。

E-mail: changenk@163.com

5 结 论

本文利用衍射元件的特殊色散特性,提出了一款新型的双片折/衍射混杂的人眼消色差系统,结合 Navarro 广角眼模型,通过与单片折/衍射混杂消色差系统进行比较评价了所设计系统的性能。两种消色差系统均能很好地矫正人眼的轴向色差。然而,单片折/衍射元件组成的消色差系统导致边缘横向色差随着视场的增大而快速增加,这个缺陷大大限制了此消色差系统的应用。由双片折/衍射混杂元件构成的消色差系统在较大视场范围内无论对轴向色差还是横向色差都达到非常好的矫正效果,视网膜的成像质量在整个视场内都得到很好的改善。