

文章编号 1004-924X(2010)02-0281-08

# 个体眼模型的横向色差随外置光阑偏心 and 视场的变化

王肇圻<sup>1</sup>, 张梅<sup>1</sup>, 王雁<sup>2</sup>, 左彤<sup>2</sup>

(1. 南开大学 现代光学研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071;  
2. 天津医科大学 天津眼科医院屈光手术中心, 天津 300020)

**摘要:** 为了研究外界因素, 如人工光阑偏心 and 轴外物点所引入人眼横向色差的变化规律, 构建了个体眼模型。由角膜地形图计算了 8 只人眼视轴与光轴的夹角。依据实际测得的角膜地形图数据、人眼波像差、眼轴数据以及计算的视轴与光轴间夹角, 运用 ZEMAX 光学设计软件构建了考虑视轴方向的个体化眼模型。基于这些眼模型, 研究了外置人工光阑相对视轴偏移在中心凹附近所引入的横向色差变化规律, 讨论了在 420~700 nm 边缘横向色差随入射视场角的变化规律。研究表明, 横向色差随人工光阑的偏移量线性增加, 增加的速率为 5.46~5.95(′)/mm, 平均值为 5.7(′)/mm, 但 8 只人眼存在一定的个体差异。在鼻侧 and 颞侧 20° 视场范围内, 8 只人眼的横向色差平均以 0.36(′)/(°) 的速率随视场角增加而增加, 不同个体的增长速率有所差别, 变化范围为 0.32~0.44(′)/(°)。另外, 横向色差在长波段的变化要比短波段处缓慢。由于横向色差随外置光阑偏移 and 视场有较大的增长, 因此, 在视网膜成像系统 and 现代头盔系统的设计中应当考虑横向色差的影响。

**关键词:** 视觉光学; 横向色差; 个体化眼模型

**中图分类号:** O435.2; R778 **文献标识码:** A

## Variation of transverse chromatic aberration with displacement of artificial stop and eccentricity based on individual eye model

WANG Zhao-qi<sup>1</sup>, ZHANG Mei<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, ZUO Tong<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China;*  
2. *Tianjin Eye Hospital, Refractive Surgery Center, Tianjin 300020, China*)

**Abstract:** In order to study the variation of Transverse Chromatic Aberration (TCA) with external factors, such as the displacement of artificial pinhole from the visual axis and eccentricity, this paper constructs individual eye models to investigate the characteristic of TCA. The angle between visual axis and optical axis is calculated from the cornea data for eight eyes. According to the measurements of the corneal surfaces, optical axis lengths, wavefront aberrations and the angle obtained from calculation, the individual eye models involving the angle between visual axis and optical axis are constructed with ZEMAX software. The constructed eye models are then used to investigate the variations of TCA at the fovea with the displacement of artificial pinhole from the visual axis and to analyze the var-

收稿日期: 2009-06-30; 修订日期: 2009-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60978068, No. 60777011); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20050055002)

iation of TCA with the eccentricity over spectra from 420 nm to 700 nm. The result shows that the TCA increases with the displacement linearly at an average ratio of  $5.7(')/\text{mm}$ , but there are some differences among the eight eyes over the range from  $5.46(')/\text{mm}$  to  $5.95(')/\text{mm}$ . Across the field of view of  $20^\circ$  both at nasal and temporal, the TCA increases with the eccentricity at an average ratio of  $0.36'/(^\circ)$  for the eight eyes over the range from  $0.32'/(^\circ)$  to  $0.44'/(^\circ)$ . Furthermore, the variation of TCA is slower at the end of long wavelength than that at the end of short wavelength. It is concluded that the influence of TCA should be considered in the designs of retina imaging systems and modern head-mounted display systems.

**Key words:** vision science; transverse chromatic aberration; individual eye model

## 1 引 言

影响人眼成像质量的色差分为轴向色差和横向色差,近年来,人们已经对这两种色差进行了广泛的研究<sup>[1-3]</sup>。轴向色差是由于人眼介质对不同波长光的折射率不同而产生的光焦度之差,一般来说,轴向色差的个体差异很小。横向色差为不同波长主光线交于视网膜不同位置点间的差距,存在一定的个体差异。由于实际人眼系统的不对称性,人眼在中心凹处存在着一定的横向色差;对不同视场的入射光线,在视网膜上不同成像位置产生的横向色差会随视场变化而变化。对视网膜成像系统,需要在一定视场范围内获得清晰的像,因此,研究色差随视场角的变化对系统的设计有参考价值。而一些目视系统<sup>[4-5]</sup>,如头盔显示系统,如果其光阑中心与人眼视轴有偏离则会在中心凹处引入一定的横向色差,影响其视觉质量。因此,目视系统的设计中也要充分考虑眼横向色差/人因素(Human Factors)对系统的影响。

1992年,L. N. Thibos<sup>[6]</sup>采用双色游标法测量并研究了8只人眼在433~622 nm波段由于外置人工小孔相对视轴的偏离在中心凹处引入横向色差的变化规律。实验中,首先令人眼透过人工小孔注视实际对齐的两个不同波长的视标,由于存在横向色差,人眼会感觉视标间未对齐,通过调节视标使其主观上对齐后,测得横向色差。试验中小孔相对视轴的偏移即相当于外置人工光阑中心与视轴不对齐的量。结果显示,引入的横向色差与小孔对视轴的偏移量呈线性增加关系。对于正视眼,色差是影响成像质量的主要因素之一<sup>[7]</sup>,

尤其对于边缘视觉影响更大。1987年,Youmay U. Ogboso<sup>[8]</sup>等采用双色游标的实验方法测量了8只人眼在435~572 nm波段针对不同入射视场光线产生的横向色差变化。结果表明,随视场角的增加,边缘视场横向色差亦增加。

综上所述,若要获得任意更多波段间的横向色差,采用以上实验方法必须重新设置实验条件,并进行更多的实验准备,如设定不同波长的光源等;而且对于较大视场的光线,人眼分辨率以及对颜色的感知都会有较大的降低,主观感知也不可避免会引入一定的误差。近期的研究提示,借助能重现人眼光学特性的眼模型有助于人眼色差的研究。1987年,L. N. Thibos<sup>[9]</sup>基于简化眼模型通过主光线追迹的方法理论推出了入射光线视场角与横向色差的关系,研究得出在430~770 nm边缘横向色差随光线入射角以 $0.28'/(^\circ)$ 的速度增加。但上述眼模型的构建均源于对大量人群进行统计平均的结果,是轴对称的结构,不具备个体差异,而实际不同人眼个体是存在一定差异的。另外,视轴与光轴存在平均 $5^\circ$ 的夹角,对人眼光学特性也有一定的影响。

本文根据实际测量的波前像差、角膜地形图数据和眼轴数据构建了8只考虑视轴与光轴夹角的个体化眼模型。基于这些眼模型,研究了所引入的中心凹处横向色差随外置人工光阑对视轴偏离的变化规律,而后研究了横向色差随视场角的变化规律。

## 2 方 法

为构建考虑视轴方向的个体化眼模型,首先

通过角膜地形图数据计算出视轴与光轴间的夹角。采用 Bausch & Lomb ORBSCAN 测得人眼角膜地形图。在角膜地形图测量中,人眼视轴和角膜地形图仪的轴向重合,仪器给出角膜相对某一参考球面的径向高度差。将所测径向高度差数据转化为沿视轴方向的角膜面型数据  $z(x, y)$ , 它可以拟合为两项之和:

$$z(x, y) = s(x, y) + r(x, y), \quad (1)$$

其中  $s(x, y)$  是规则部分,表示角膜的整体形状; $r(x, y)$  是不规则部分,表示角膜相对于  $s(x, y)$  的差量。已有的研究表明,实际人眼角膜的整体形状更接近于椭球面<sup>[10]</sup>。

设坐标系  $(x, y, z)$  的  $z$  轴沿着视轴方向,用最小二乘法将角膜面型数据拟合成式(1),其中角膜规则部分  $s(x, y)$  用椭球面的一般形式来表达:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + a_{12}xy + a_{13}xz + a_{23}yz + a_1x + a_2y + a_3z + a_0 = 0, \quad (2)$$

假设在坐标系  $(x_0, y_0, z_0)$  中,角膜的规则部分取椭球面的标准形式,则:

$$\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2} + \frac{z_0^2}{c^2} = 1, \quad (3)$$

其中,椭球面的中心位于坐标原点,三主轴位于坐标轴上。将椭球面的一般形式通过正交变换转换为标准形式,相当于坐标系的旋转和平移<sup>[11]</sup>。光轴沿着坐标系  $(x_0, y_0, z_0)$  的  $z_0$  轴方向。则  $z$  轴与  $z_0$  轴间的夹角即为视轴与光轴间的夹角。

采用角膜地形图仪测得了 8 只正常人眼(均无眼部疾病,未接受过角膜手术)的角膜地形图,表 1 给出 8 只人眼的视轴与光轴的夹角。这里规

表 1 视轴与光轴之间夹角的水平和数值分量

Tab. 1 Horizontal and vertical angles between visual axis and optical axis (°)

眼序号	水平	竖直
1	6.325	-0.706
2	4.456	-1.790
3	6.110	-0.863
4	4.210	1.804
5	6.510	1.627
6	5.174	0.250
7	5.539	1.385
8	5.56	1.630

定在水平方向上,正值表示视轴相对于光轴指向鼻侧;在竖直方向上,正值表示视轴相对于光轴指向下方。8 只眼睛在水平方向上的视轴均指向鼻侧,平均值为  $(5.513 \pm 0.791)^\circ$ ;在竖直方向视轴指向不确定,平均值为  $(0.579 \pm 1.508)^\circ$ 。

人眼内的各部分轴向间距包括角膜厚度、前房深度、晶状体厚度和玻璃体厚度均采用医用 BMF2200A/B 型超声波测厚仪获得。每只眼睛进行 10 次测量后取平均值。人眼的波像差采用哈特曼-夏克波前传感器测得<sup>[12]</sup>。被测者处于暗室使瞳孔自然放松。

应用光学设计软件 Zemax 对上述 8 只人眼构建了包含视轴与光轴夹角的个体化眼模型。以传统 Gullstrand-Le Grand 眼模型作为初始光学结构,角膜面型参量和眼内各部分轴向间距参量由实际测量数据来取代,其中角膜不规则部分拟合为泽尼克边缘矢高面。以视轴为参考轴,依据视轴与光轴间的夹角来设置晶状体相对  $x$ 、 $y$  轴的倾斜和偏心,在晶状体的初始结构上附加泽尼克边缘矢高面。以实际测量的波像差作为优化函数,以晶状体面型各项参量作为优化变量进行优化,优化后得到晶状体形状,从而构建完成考虑视轴方向的人眼模型。图 1 给出其中一只个体化眼模型的外观图,视轴与光轴相交于晶状体后表面附近的节点处,相对于光轴,其视轴向鼻侧偏转。

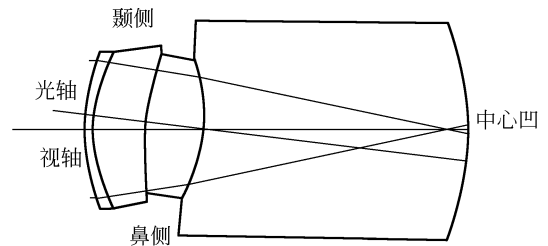


图 1 眼模型外观图

Fig. 1 Layout of individual eye model

基于所构建的 8 只眼模型进行两个实验模拟。第一个实验测量在 420~700 nm 由外置人工光阑对视轴的偏移引入的横向色差的变化。如图 2 所示,在人眼角膜前垂直于视轴放置一个人工小孔(偏离视轴  $H$ )来限制入射主光线的位置,

不同波长光线(如图中  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ )交于视网膜中心凹附近不同位置。由于视轴为通过人眼节点和中心凹的光线,当外置光阑主光线恰与视轴重合时引入的横向色差为零。以视轴为参考轴,分别向鼻侧和颞侧以 0.5 mm 的间隔移动至 3 mm 范围进行横向色差计算。

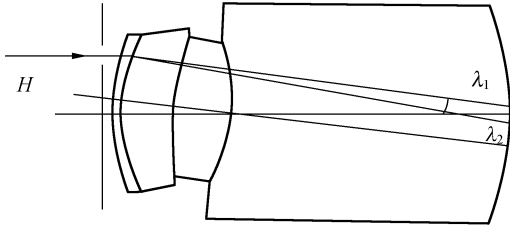


图 2 外置人工光阑的眼模型示意图

Fig. 2 Schematic illustration of eye model with artificial pinhole

第二个实验测定人眼在 420~700 nm 的不同视场的横向色差。人眼视网膜上感光细胞分为视锥细胞和视杆细胞,视锥细胞感受强光和色觉,视杆细胞感受弱光。视锥细胞主要分布在黄斑区,中心凹密度最大,约 147 300/mm<sup>2</sup>,随着偏离黄斑区则越来越少,当距中心凹 10°时,视锥细胞密度降为 5 000/mm<sup>2</sup>,人眼分辨率及对色彩的感知大大降低。因此,本文对视场在鼻侧和颞侧 20°内的人眼主要感光区域进行边缘横向色差的研究,并对视轴分别向鼻侧和颞侧方向偏转 5°, 10°, 15°, 20°进行了实验计算。

### 3 分析

横向色差亦可表达为不同波长主光线交于视网膜上不同位置点的间距相对人眼节点所成的夹角<sup>[13]</sup>。通过追迹各波长主光线计算获得角度表达的横向色差。图 3 给出在实验一中 8 只人眼随人工光阑偏移量不同所引入的横向色差值变化规律。横轴为人工光阑偏移视轴的量,正半轴为向颞侧偏移,负半轴为向鼻侧偏移。纵轴为所测得横向色差量,当短波光线交于视网膜位置点相对长波长的光线偏向鼻侧时,所测横向色差为正,反之为负。8 只人眼数据比较一致,标准差为

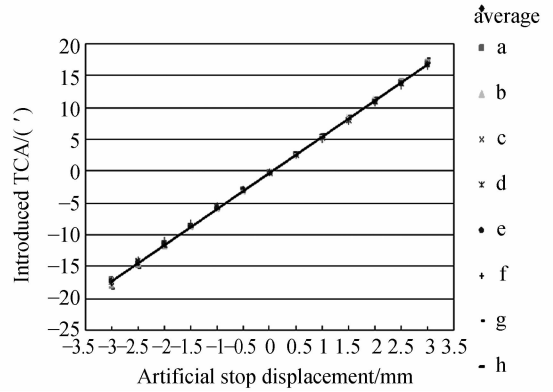


图 3 在 420~700 nm 8 只人眼横向色差随人工光阑偏移量变化的示意图

Fig. 3 Variation of TCA with displacement of artificial stop over spectra from 420 nm to 700 nm for 8 eyes

0.091~0.534', 最大标准差 0.534' 出现在人工光阑向鼻侧偏离视轴 3 mm 处。随着外置人工小孔偏离视轴越远,8 只人眼中所引入的横向色差随人工光阑偏移量的变化规律存在一定得差异,最大的以 5.95(')/mm 线性增加,变化最小的以 5.46(')/mm 线性增加,平均以 5.70(')/mm 线性增加,即图中直线所示。当小孔在视轴上,横向色差几乎为 0,而向鼻侧和颞侧 3 mm 的偏移便分别引入 17.523' 和 16.995' 的平均横向色差,其中在鼻侧 3 mm 处最大值为 18.475', 最小值为 17.045', 在颞侧 3 mm 处最大值为 17.604', 最小值为 16.499'。为与文献 6 中的结果比较,图 4 给出在 433~622 nm 人工光阑偏移视轴引起横向色差变化的规律。标准差为 0.052 9'~0.405', 最大标准差 0.405' 亦出现在人工光阑向鼻侧偏离视轴 3 mm 处。在鼻侧 3 mm 处引入横向色差最大值为 13.944', 最小值为 13.037'; 在颞侧 3 mm 处最大值为 13.277', 最小值为 12.623'。随着外置人工小孔偏离视轴越远,所引入的横向色差最大的一只以 4.49(')/mm 线性增加,最小的以 4.12(')/mm 线性增加,相差 0.37(')/mm, 平均横向色差以 4.30(')/mm 线性增加,比文献中结果约大 0.3(')/mm, 和本文 8 只眼个体间差异量在同一个量级,这主要是由于统计人群的差异性造成的。

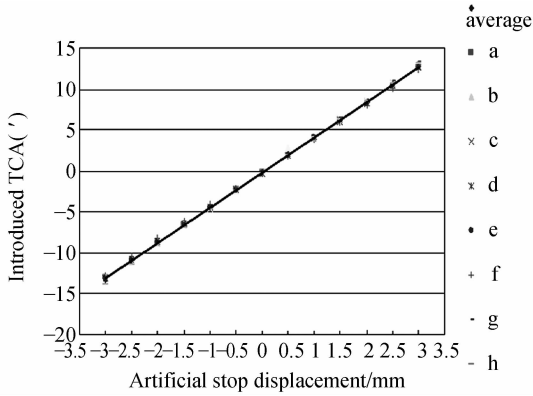


图 4 在 433~622 nm 8 只人眼横向色差随人工光阑偏移量变化的示意图

Fig. 4 Variation of TCA with displacement of artificial stop over spectra from 433 nm to 622 nm for 8 eyes

表 2 在 420~700 nm 8 只人眼对应不同视场角产生的横向色差量

Tab. 2 Magnitude of TCA located at various eccentricities for eight eyes over spectra from 420 nm to 700 nm

眼序号	鼻侧(°)				0°	颞侧(°)			
	20	15	10	5		5	10	15	20
1	8.085	7.135	5.778	4.141	2.306	-0.425	-1.681	-3.567	-5.278
2	10.286	6.928	6.838	4.552	2.107	-1.044	-3.367	-4.565	-7.971
3	8.521	7.434	6.026	4.356	2.486	0.561	-1.465	-3.37	-5.119
4	8.696	7.659	6.206	4.501	2.640	1.199	-2.161	-4.006	-5.760
5	7.946	7.092	5.818	4.256	2.502	0.715	-1.402	-3.182	-4.850
6	7.094	6.12	4.824	3.264	1.605	-0.716	-2.194	-3.843	-5.282
7	7.896	6.900	5.531	3.899	2.119	0.533	-1.809	-3.56	-5.190
8	8.235	7.182	5.745	4.020	2.167	-0.743	-2.173	-4.041	-5.747
平均值	8.345	7.056	5.846	4.124	2.241	0.116	-2.032	-3.767	-5.650

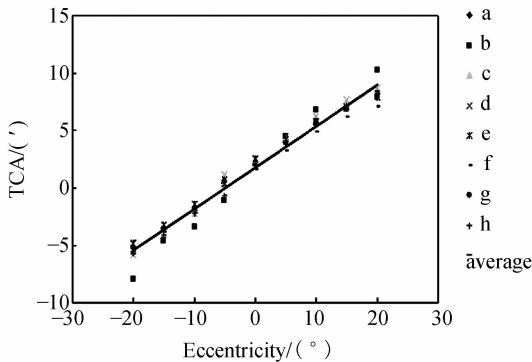


图 5 在 420~700 nm 8 只人眼横向色差随视场角变化的示意图

Fig. 5 Variation of TCA with eccentricity over spectra from 420 nm to 700 nm for 8 eyes

表 2 给出 8 只人眼在 420~700 nm 波段对应不同视场角产生的横向色差量。这里规定短波长光线交于视网膜位置点相对长波长的光线偏向鼻侧,则所测横向色差为正,反之为负。入射角为 0°时,即入射光沿视轴方向,8 只人眼在中心凹处产生横向色差平均值为 2.241',其中最大值为 2.64',最小值为 1.605'。随着入射角向鼻侧偏转到 20°,平均横向色差增加到 8.345',最大值达到 10.286',最小值为 7.094'。在颞侧 5°时,横向色差平均值最小,这是由于人眼视轴相对光轴向鼻侧平均偏转了 5.512°。当向颞侧偏转到 20°时,横向色差平均值达到 5.747',最大值为 7.971',最小值为 4.85'。依据表 2,图 5 给出了 8 只人眼横向色差随入射光线视场角变化的示意图。横坐标为入射光线相对视轴角度,正半轴表示向鼻侧偏转,负半轴表示向颞侧偏转。横向色差随着入

射角的增加而线性增加,8 只人眼横向色差增加速率有一定的差别,最大的以 0.44(')/(°)增加,最小的以 0.32(')/(°)增加,平均以 0.36(')/(°)的速率增加。

为与文献 8 的实验测量结果做比较,表 3 给出 8 只人眼在 435~572 nm 不同视场下产生的横向色差值。8 只人眼横向色差变化范围与文献中所给出的 3 只人眼的的数据在相近范围内。如在中心凹处,8 只人眼的横向色差最大值为 1.622',最小值为 0.994';文献中 3 只人眼的最大值为 1.2',最小值为 0.6'。在颞侧 20°视场处,8 只人眼最大值为 3.854',最小值为 2.964';文献中 3 只人眼最

大为  $6.5'$ , 最小为  $2.5'$ 。这主要是人眼个体差异造成的。

表 3 在 435~572 nm 8 只人眼  
对应不同视场角产生的横向色差量

Tab. 3 Magnitude of TCA located at various eccentricities  
over spectra from 435 nm to 572 nm for 8 eyes

眼数	鼻侧( $^{\circ}$ )		$0^{\circ}$	颞侧( $^{\circ}$ )	
	20	10		10	20
1	4.992	3.560	1.425	-1.038	-3.245
2	4.975	3.327	1.019	-1.629	-3.854
3	5.218	3.708	1.537	-0.894	-3.124
4	5.301	3.809	1.622	-1.33	-3.538
5	4.877	3.568	1.557	-0.866	-2.964
6	4.361	2.951	0.994	-1.342	-3.235
7	4.856	3.390	1.304	-1.104	-3.183
8	5.047	3.516	1.321	-1.339	-3.534
平均值	4.953	3.479	1.347	-1.193	-3.335

为与文献[9]的理论计算结果比较,图 6 给出 430~770 nm 横向色差随入射光线视场角变化的示意图。文献[9]中简化眼的横向色差以  $0.28(')/(^{\circ})$  的速率增长。图 6 给出的 8 只人眼横向色差平均值是以  $0.36(')/(^{\circ})$  的速率增加的,而且 8 只人眼横向色差随视场角的增加速率存在一定差异,最大线性增长速率为  $0.39(')/(^{\circ})$ ;而最小线性增长速率为  $0.33(')/(^{\circ})$ 。文献中得到的数据均采用简约眼理论计算得来,甚至不考虑晶状体的影响,而本文数据是实际人眼横向色差变化的统计平均值,与实际情况更接近。

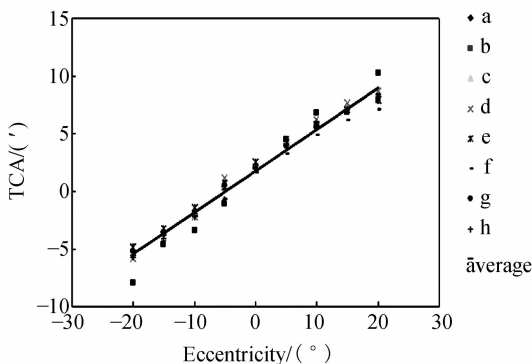


图 6 在 430~770 nm 人眼横向色差随视场角变化的示意图

Fig. 6 Variation of TCA with eccentricity over spectra from 430 nm to 770 nm for 8 eyes

图 7 给出了第 6 只被测眼在不同视场角产生的横向色差随波长的变化规律,其横坐标为波长,纵坐标为横向色差,以 555 nm 为参考波长,各曲线表示不同入射角光线。可以看出,所有横向色差的变化曲线在短波段都比长波段变化得快。最上面变化最小的曲线是向颞侧偏转  $5^{\circ}$  的情况而非  $0^{\circ}$  入射光,这是因为被测眼的视轴相对光轴向鼻侧偏转了大约  $4.21^{\circ}$ ,此情况入射光线最接近光轴,横向色差最小。随着视场角的增大,曲线由长波向短波下降加快,即相同波段间横向色差的差值变大。与文献[9]中采用理论计算方法得出的结果很接近,但文献[9]中未给出  $0^{\circ}$  视场的情况,未能体现出视轴与光轴间夹角对横向色差的影响。

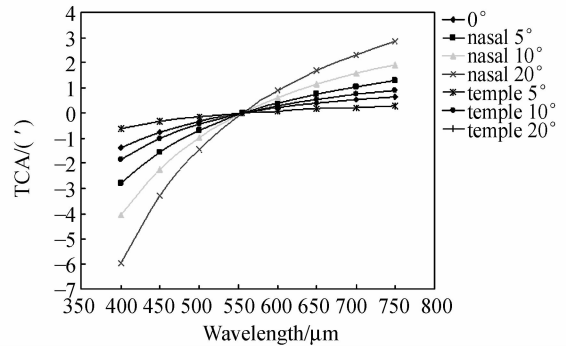


图 7 在 400~750 nm 不同视场角光线产生的横向色差随波长的变化规律

Fig. 7 Variation of TCA with wavelength across spectra from 400 nm to 750 nm located at various eccentricities from optical axis

## 4 结论

本文根据实测的角膜地形图数据、波前像差数据和眼轴数据构建了考虑视轴方向的个体化眼模型,基于所建眼模型,研究了人眼横向色差的特点。结果表明,外置光阑对视轴的偏离在中心凹处引入的横向色差随偏移量线性增加。8 只人眼存在一定的个体差异,在 420~700 nm,横向色差随外置光阑偏移量的增加速率,最大为  $5.95(')/\text{mm}$ ,最小为  $5.46(')/\text{mm}$ ,平均值则为  $5.7(')/\text{mm}$ 。在鼻侧和颞侧  $20^{\circ}$  的视场范围内,边缘横向色差随视场角的增加而增加,8 只人眼的增长速

率各不相同,最大增长速率为  $0.44(')/(^{\circ})$ ,最小为  $0.32(')/(^{\circ})$ ,平均值为  $0.36(')/(^{\circ})$ 。固定视角情况下,横向色差在短波段的变化要比在长波段的快,对应不同的入射角,变化的速率会不一

样,越接近光轴方向变化速率越小。本文研究的横向色差随外置光阑偏心 and 视场变化的特性为现代头盔系统和视网膜成像系统的设计提供了参考。

### 参考文献:

- [1] BEDFORD R E, WYSZECKI G. Axial chromatic aberration of the human eye [J]. *J. Opt. Soc. Am.* 1957,47(6):564-565.
- [2] THIBOS L N, BRADLEY A, STILL D L, *et al.*. Theory and measurement of ocular chromatic aberration [J]. *Vision Research*, 1990,30(1):33-49.
- [3] RYNDERS M, LIDKEA B, CHISHOLM W, *et al.*. Statistical distribution of foveal transverse chromatic aberration, pupil centration, and angle  $\phi$  in a population of young adult eyes [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995,12(10):2348-2357.
- [4] 王肇圻,许妍.基于眼模型的数字眼底相机设计[J].*光学精密工程*,2008,16(9):1567-1571.  
WANG ZH Q, XU Y. Design of digital retina camera based on eye model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(9):1567-1571. (in Chinese)
- [5] 范长江,王肇圻,孙强.双层衍射元件在投影式头盔光学系统设计中的应用[J].*光学精密工程*,2007,15(11):1639-1643.  
FANG CH J, WANG ZH Q, SUN Q. Design of head-mounted projective optical system using double-layer diffractive optical element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1639-1643. (in Chinese)
- [6] 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]. *Applied Optics*, 1992,31(19):3594-3600.
- [7] MEETEREN A V, DUNNEWOLD C J W. Image quality of the human eye for eccentric entrance pupils [J]. *Vision Research*, 1983,23(5):573-579.
- [8] OGBOSO Y U, BEDELL H E. Magnitude of lateral chromatic aberration across the retina of the human eye [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987,4(8):1666-1672.
- [9] THIBOS L N. Calculation of the influence of lateral chromatic aberration on image quality across the visual field [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987,4(8):1673-1680.
- [10] BUREK H, DOUTHWAITE W A. Mathematical models of the general corneal surface [J]. *Ophthalmic Physiol. Opt.*, 1993,13(1):68-72.
- [11] NAVARRO R, GONZÁLEZ L, HERNÁNDEZ J L. Optics of the average normal cornea from general and canonical representations of its surface topography [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006,23(2):219-232.
- [12] 王肇圻,饶丰,王雁,等.折射/衍射球柱有晶体眼人工晶体的设计[J].*光学精密工程*,2009,17(4):701-706.  
WANG ZH Q, RAO F, WANG Y, *et al.*. Design of refractive/diffractive spherocylindrical phakic intraocular lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):701-706. (in Chinese)
- [13] MOUROULIS P. *Visual Instrumentation: Optical Design & Engineering Principles* [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 1999:110-127.

## 作者简介:



张梅(1984—),女,河北人,博士研究生,2004年于河北大学物理科学与技术学院获得学士学位,主要从事眼视光学和光学设计方面的研究。E-mail: changenk@163.com



王雁(1962—),女,天津人,教授,主任医师,硕士生导师,美国 Nova Southeastern University(东南大学)客座教授,现任天津市眼科医院屈光手术中心主任,1982年、2002年于天津医科大学分别获得学士、硕士学位,主要从事视觉矫正临床及其相关基础研究。E-mail: wangyan7143@vip.sina.com



左彤(1968—),男,天津人,医疗技师,1989年于天津医科大学获学士学位,主要从事屈光手术相关的检查工作。E-mail: zuotong5188@vip.sina.com

## 导师简介:



王肇圻(1944—),男,山东人,研究员,博士生导师,1968年毕业于北京大学物理系,1982年于南开大学获得硕士学位,1995年于英国丹第阿巴特大学获得博士学位,主要从事眼视光学、衍射光学和信息光学等方面的研究。E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

## ● 下期预告

## 兴隆 1 m 光学望远镜消杂散光系统

赵飞<sup>1,2</sup>,王森<sup>1</sup>,邓超<sup>1,2</sup>,陈志远<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家天文台,北京 100012;2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

为优化兴隆 1 m 光学望远镜的杂散光效应,研制了附加在该望远镜 F/8 焦面后的“一倍放大率消杂散光镜头”,对消杂散光镜头的效果进行了仿真计算和观测验证。在 Tracepro 软件中对“圆顶-1 m 望远镜”和“圆顶-1 m 望远镜-消杂散光镜头”组合系统的“点源辐照度透过率(Point Source Normalized Irradiance Transmittance, PSNIT)”进行了计算分析并在大月夜进行了天文观测。计算结果表明:在视场外无限远点源方位与望远镜指向间夹角  $5^\circ \leq |\theta| \leq 30^\circ$  范围,使用消杂散光镜头后,该望远镜 PSNIT 全部降低到  $10^{-10}$  以下。2008 年 5 月 26 日对偏月  $22^\circ$  和  $25^\circ$  天区观测结果表明:使用消杂散光镜头后,该望远镜所观测的星像信噪比提高约 1.4 倍。仿真计算和观测结果表明:该方法对 Ritchey-Chrétien (R-C) 望远镜的杂散光抑制是有效的,可以提高望远镜的测光精度和观测极限星等。