

# 人眼模型中各折射面对人眼像差的贡献\*

刘永基 王肇圻 方志良 母国光

(南开大学现代光学研究所, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘 要** 将计算光学系统各个折射面对系统像差贡献的理论应用于人眼中. 用 C 语言编制光线追迹程序, 计算了人眼各个折射面对眼睛像差的贡献及各种像差经过眼睛不同折射面的变化. 给出了眼睛中各个折射面对眼睛彗差的贡献, 并发现角膜与晶状体对眼睛彗差的贡献有相互补偿的作用. 在眼睛中, 角膜前表面对人眼像差的贡献最大, 晶状体后表面对眼睛像差的贡献次之, 这两个折射面比其他两折射面对眼睛像差的贡献大得多. 这说明晶状体后表面也是改善人眼像差的参数之一.

**关键词** 像差; 眼睛; 角膜; 晶状体

**中图分类号** R778 **文献标识码** A

## 0 引言

自 1961 年 Smirnov 首次测量人眼波前像差以来, 对人眼像差的测量取得了巨大的进步, 从而掀起了研究人眼像差的高潮<sup>[1~6]</sup>. 研究眼睛各个部分对像差的贡献和作用是人眼像差研究的热点之一. 众所周知, 改变角膜形貌能够很好地改善眼睛的成像质量<sup>[4]</sup>. 可以把眼睛看作是由角膜和晶状体组成的光学成像系统. 由于测试方面存在难度, 人们还不能确切地了解人眼的各个折射面对人眼像差的贡献. 然而, 这对激光角膜手术、白内障人工晶状体置换手术以及人工晶状体的设计和研制等方面, 具有重要科学意义和实用价值. 因此, 本文将从理论上研究人眼各个折射面对人眼像差的贡献.

## 1 计算各个折射面对像差贡献的基本理论

F. Weidert 提出了计算一般光学系统各个折射面对系统总的球差的贡献公式, 母国光<sup>[7]</sup>将其推广到像散的计算; M. Berek 提出了计算各种垂轴像差的贡献公式, 母国光又将其推广到各个折射面对系统彗差的贡献. 在这里主要采用了 F. Weidert 公式、M. Berek 公式及母国光的推广公式, 计算眼睛的各个折射面对眼睛像差的贡献及像差经过各个折射面的变化情况. 本文中所采用的具体公式可参阅文献<sup>[7]</sup>.

## 2 眼模型的选择

选取被广泛认可的 Gullstrand\_Le<sup>[8]</sup> 眼模型进

行研究, 此眼模型的具体结构参数如表 1.

表 1 Gullstrand\_Le 眼睛模型的结构参数

折射面	曲率半径 /mm	非球面 系数	厚度 /mm	折射率 543nm	介质
角膜前表面	7.8	0	0.55	1.3771	角膜
角膜后表面	6.5	0	3.05	1.3374	房水
晶状体前表面	10.2	0	4.0	1.42	晶状体
晶状体后表面	-6	0		1.336	玻璃体

用 C 语言编制了光线追迹程序, 计算了眼睛的各个折射面对眼睛总的像差的贡献及像差经过各个折射面的变化情况.

## 3 计算结果及讨论

在各个折射面对眼睛像差贡献的各图中, 实心正方形、实心圆形、实心上三角和实心五角星分别表示角膜前表面、角膜后表面、晶状体前表面、晶状体后表面对眼睛像差的贡献; 空心圆形表示各个折射面对眼睛像差贡献之和. 表示像差经过各个折射面后变化的下列各图中, 实心正方形、实心圆形、实心上三角和实心下三角分别表示经过角膜前表面、角膜后表面、晶状体前表面和晶状体后表面后的像差.

如图 1, 在 Gullstrand-Le 眼睛模型中, 角膜的前面和晶状体的后表面对眼睛球差的贡献相当, 且为负值; 角膜的后表面对眼睛球差的贡献为正, 而晶状体的前表面对球差的贡献几乎为零. 角膜的前表面和晶状体的后表面对眼睛球差的贡献远大于其它两个折射面, 因此对其他两面像差的补偿作用很小. 所以, 各个折射面对球差贡献之和大于各个折射面各自对球差的贡献. 从图 2 可以看出, 经过角膜后表面后, 由于角膜后表面对球差的贡献为正, 与前表面相反, 所以球差略有减少; 由于晶状体的前表面对眼睛球差的贡献几乎为零, 所以球差经过晶状体的前表面后基本保持不变, 而经过晶状体的后表面后,

\*天津市光电联合科学研究中心资助项目(60438030)  
Tel: 022-23503690 Email: lyj@mail.nankai.edu.cn  
收稿日期: 2004-08-05

眼睛的球差明显增大. 从上面的分析可以看出, 角膜前表面对球差的贡献大, 而角膜后表面对球差的贡献很小, 这与实验结果<sup>[9]</sup>是一致的.

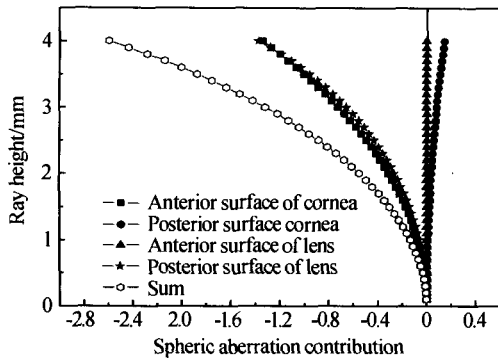


图 1 Gullstrand\_Le 眼模型中各个折射面对球差的贡献  
Fig. 1 Contributions of each surface of Gullstrand\_Le eye model to the spherical aberrations

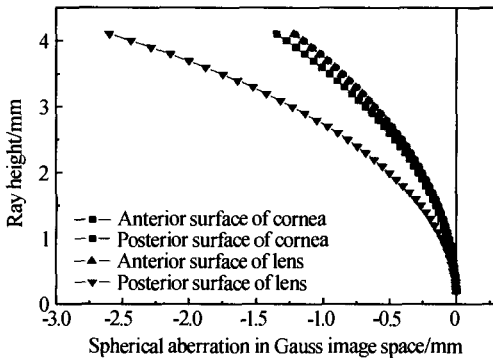


图 2 Gullstrand\_Le 眼模型中球差经过各个折射面后的改变情况  
Fig. 2 The variation of the spherical aberration after passing through each surface in the Gullstrand\_Le eye model

由图 3 可以看出, 入射角大于 4° 时, 角膜前表面对眼睛彗差的贡献为负, 其贡献量的绝对值最大; 晶状体后表面对眼睛彗差的贡献量绝对值仅次于角膜前表面, 但是它对眼睛彗差的贡献是正值. 角膜后表面对眼睛彗差的贡献亦为正值, 但其贡献量比较小; 而晶状体的前表面对眼睛彗差的贡献几乎为零. 因此, 这几个面对彗差的贡献能够相互补偿, 使各个折

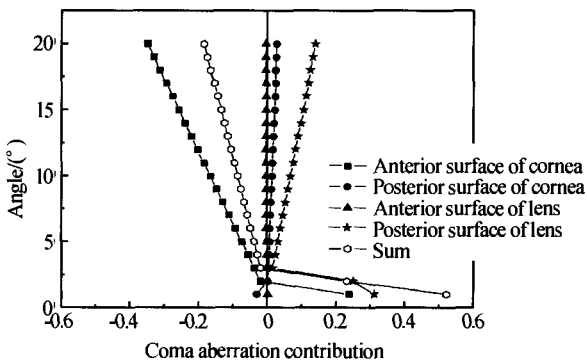


图 3 Gullstrand\_Le 眼模型中各个折射面对彗差的贡献  
Fig. 3 Contributions of each surface of Gullstrand\_Le eye model to the comatic aberration

射面的贡献之和减小, 这与 Pablo Artal 和 Antonio Guirao<sup>[4]</sup> 的试验结果相一致. 从图 4 中也可以看出, 经过晶状体后表面后, 眼睛的彗差绝对值是比较小的. 另外从计算结果我们发现当入射角小于 4° 时, 人眼的彗差为正. 当入射角大于 4° 时, 人眼的彗差为负.

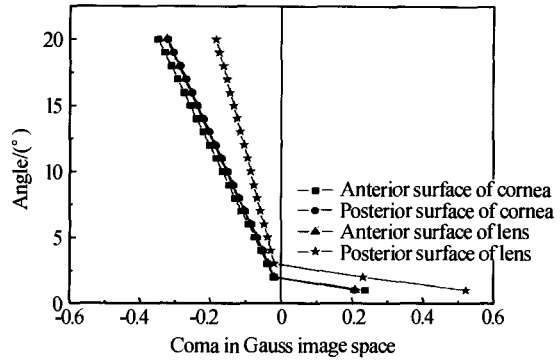


图 4 Gullstrand\_Le 眼模型中彗差经各个折射面后的变化  
Fig. 4 The variation of the comatic aberration after passing through each surface in the Gullstrand\_Le eye

由图 5、6 可以看出, 角膜的前表面对眼睛的像散差贡献最大, 其值为负. 角膜的后表面对像散差的贡献为正, 因此角膜前后表面对像散差能够起到一定的补偿作用. 像散差经过各个折射面后的变化印证了上面的结果. 另外, 对于子午像差、弧矢像差

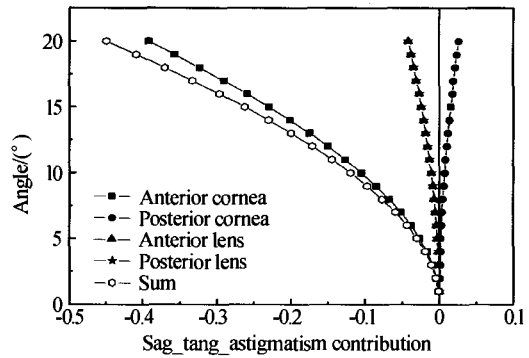


图 5 Gullstrand\_Le 眼模型中各个折射面对像散差的贡献  
Fig. 5 Contributions of each surface of Gullstrand\_Le eye model to the astigmatism

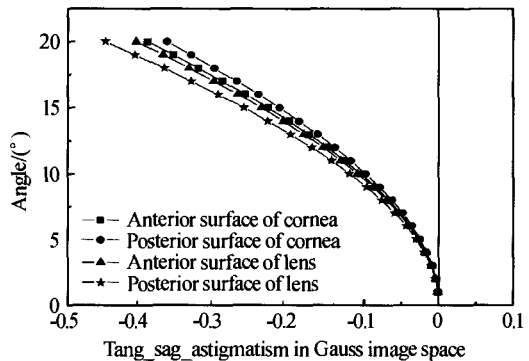


图 6 Gullstrand\_Le 眼模型中像散差经过各个折射面后的变化  
Fig. 6 The variation of the comatic aberration after passing through each surface in the Gullstrand\_Le eye

也进行了研究,发现了与上面类似的结果. Tetsuro Oshika<sup>[7]</sup>等人研究过角膜前后表面的像散,同他们的结果一致,发现角膜后表面对眼睛像散的贡献比较大,不能近似认为是零.

对其他的眼模型也进行了计算,得出的结果与上面类似.

#### 4 结论

分析结果可以看出,在 Gullstrand\_Le 眼睛模型中,角膜前表面和晶状体后表面对眼睛像差的作用比较大. 人眼像差主要是由角膜和晶状体贡献的,这与现有的实验结果相一致. 对球差而言,角膜前表面和晶状体后表面对球差的贡献均为负;对彗差而言,角膜前表面对彗差的贡献为负,晶状体后表面对彗差的贡献为正,正是由于这两个折射面的补偿作用,使眼睛总的彗差减小. 角膜前表面对眼睛像散差的贡献最大. 从上面的一系列曲线分析可知,在眼睛中,角膜对像差的作用是最大的,晶状体的后表面对眼睛像差的贡献也相当大. 这说明,通过改变晶状体的后表面也能改善人眼像差,这对人工晶体的设计具有很好的启发意义.

#### 参考文献

- 1 Liang Junzhong, Bernhard Grimm, Stefan Goelz, *et al.* Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of Hartmann-Shack wave-front sensor. *J Opt Soc Am A*, 1994, **11**(7):1949~1957
- 2 Miller J D T, Williams D R, Morris G M, *et al.* Images of cone photoreceptors in the living human eye. *Vision Res*, 1996, **36**(8):1067~1079
- 3 Guirao, DR Williams, Cox I G. Effect of rotation and translation on the expected benefit of ideal contact lenses. *Vision Science and Its Applications*, OSA Technical digest, Washington DC, OSA, 2000
- 4 赵秋玲,王肇圻,张春书. 非球面和梯度折射率在眼光学成像中的应用. *光子学报*, 2002, **31**(11):1409~1412  
Zhao Q L, Wang Z Q, Zhang C S. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11):1409~1412
- 5 赵秋玲,王肇圻,全薇,等. 用于复色哈特曼人眼波像差测量的折/衍混合调焦系统. *光子学报*, 2004, **33**(3):342~345  
Zhao Q L, Wang Z Q, Quan W, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3):342~345
- 6 全薇,王肇圻,宋贵才,等. 用 SVGAI 薄膜晶体管液晶显示器矫正人眼波像差. *光子学报*, 2004, **33**(12):1445~1448  
Quan W, Wang Z Q, Song G C, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):1445~1448
- 7 母国光. Tessar 照相物镜的像差分析与 Protar, Dagor, Cooke 物镜的比较. *南开大学学报*, 1957:59~86  
Mu G G. *Acta Nankai University*, 1957:59~86
- 8 Grand Y L. *Optique Physiologique*, vol. 1: La Dioptrique de l'Oeil et sa Correction, Paris, France: Editions de la Revue d'Optique, 1964. 123~136
- 9 Tetsuro Oshika, Atsuo Tomidokoro, Hideki Tsuji. Regular and irregular refractive powers of the front and backsides of the cornea. *Exp Eye Res*, 1998, **67**(4):443~447

## The Contributions of Each Refractive Surface of the Human Model Eye to the Aberrations

Liu Yongji, Wang Zhaoqi, Fang Zhiliang, Mu Guoguang

*Institute of Modern Optics, Nankai University, the Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, MOE, Tianjin 300071*

Received date: 2004-08-05

**Abstract** The theory of computing the contributions of each refractive surface of the optical system to total aberrations was applied to the human eye model for the first time. To compute the contributions of each refractive surface and the variation of the aberrations after each surface, a ray tracing program has been written in C language. For the first time the contributions of each refractive surface to the coma were computed. And the coma aberrations caused by cornea and that caused by lens can be compensated for each other. Cornea anterior surface contributes most to the eye aberrations and the posterior surface of the lens played the second role which can give good information to the design of artificial crystalline lens.

**Keywords** Aberration; Human eye; Cornea; Crystalline lens



**Liu Yongji** was born in 1977, received her B. S. degree from Hebei Normal University in 1999 and her M. S. degree from Huazhong University of Science and Technology. Now she is pursuing her Ph. D. degree in Nankai University. Her current research interest is visual optics.