

文章编号: 0253-2239(2005)01-136-5

具有层状晶状体的人眼模型的光学性质*

刘永基 方志良 王肇圻

(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)

摘要: 为了更加符合眼睛的解剖学结构,用建立的层状结构晶状体模型代替了 Hway-Lan Liou 眼模型中的折射率连续变化的晶状体模型,从而建立了新的眼睛模型。在这个新的层状晶状体模型中,最外层前后表面的非球面系数与解剖学数据相符。由于层状结构使光线追迹具有特殊性,因此用 C 语言编制了光线追迹程序,并对此眼睛模型的光学性质进行了研究。结果表明,晶状体层数较少时,眼睛的球差曲线出现翼状结构,即层状晶状体的引入使眼睛具有多焦性,并对这种现象进行了解释;具有层状结构晶状体的眼睛和具有折射率连续变化的晶状体的眼睛能够给出等价的球差结果。

关键词: 视觉光学; 眼睛模型; 光线追迹; 球差; 层状晶状体; 晶状体内核

中图分类号: R778 文献标识码: A

A Study on Eye's Optical Characters with Anatomically Accurate Shell-Lens

Liu Yongji Fang Zhiliang Wang Zhaoqi

(The Key Lab of Optoelectric Information and Science and Technology, Institute of Modern Optics,
Nankai University, Tianjin, 300071)

Abstract: A human eye model based on anatomical data, which had been previously proposed by Hwey-Lan Liu, has been transformed into a new eye model considering the laminated structure of the lens. The anterior surface of the lens is prolate, whereas the posterior surface of the lens is oblate which is consistent with the anatomical data. A numerical program was written in C computer language to study the refractive structure of the eye and the optical characters of the model have been studied. The marginal wings appear in the longitude spherical aberration plot when the shell number is small, which means a lens with a small number of shells makes eyes a multifocal system. The result shows that eye with gradient-refractive-index-lens and that with shell-lens can get equivalent spherical aberration results.

Key words: visual optics; eye model; spherical aberration; shell-lens; lens core

1 引 言

自从将自适应波前校正方法^[1~3]应用于测量和校正人眼像差之后,就掀起了研究人眼像差的另一个高潮。这使得建立符合解剖学结构的人眼模型变得非常重要。这样的模型可用来估计晶状体移植手术的术后结果,了解眼睛的各个组成部分对眼睛像差的贡献等等。经过多年的发展,眼睛各折射面的非球面性以及晶状体的梯度折射率已经被考虑进眼睛模型中。在现有的眼睛模型中,对晶状体的模拟主要存在两种方式:一种是将晶状体的内部的折射率取为渐变

式,折射率的变化用一些公式来描述^[4,5];另外一种类型就是晶状体内部折射率的变化是按照一定的公式阶跃式地变化^[6,7]。在第二种模型中,晶状体被认为是同心层状结构。每一层具有相同的折射率,不同层折射率不同。晶状体是由大量纤维层组成的,而每一层纤维可以认为具有相同的折射率,所以第二种晶状体的模型更符合眼睛的解剖学结构。

但是,现有的层状晶状体模型与实际的晶状体的解剖结构并非完全符合。Al-Ahdali^[8]提出的层状结构晶状体模型,把晶状体的前后表面看作是球面;Masajada^[9]提出的层状晶状体结构虽然考虑了

* 超视觉及人眼波像差仪研究(033183711)资助课题。

作者简介: 刘永基(1977~),女,南开大学现代光学研究所博士研究生,主要从事视觉光学方面的研究。

E-mail: lyj@mail.nankai.edu.cn.

收稿日期:2004-04-09;收到修改稿日期:2004-06-15

晶状体前后表面的非球面性,但前后表面的非球面系数分别取为 5.25 和 1.25,这与晶状体的解剖学数据相差很多,另外这两个模型中晶状体的折射率是按幂指数规律变化的,也与现有的实验结果不相符。其他层状结构的晶状体模型^[7,10],层数很少,每层的厚度与晶状体中纤维层的厚度不符,因此都不能很好地符合晶状体的解剖学结构。本文采用最新的解剖学数据,建立了符合解剖学结构的层状晶状体模型;采用了符合实验结果的晶状体内折射率的变化规律;对具有层状晶状体结构的眼模型的光学特性进行

表 1 层状晶状体眼模型的结构参量

Table 1 Parameters of schematic eye model with shell-lens

Surface	Radius /mm	Asphericity	Thickness /mm	Index	Media
Anterior of cornea	7.77	-0.18	0.50	1.3777	Cornea
Posterior of cornea	6.40	-0.60	3.16	1.3371	Aqueous
Anterior of lens	12.40	-0.94	4.02	shells	Lens
Posterior of lens	-8.10	+0.96		1.3377	Vitreous

在此模型中,眼睛的各折射面用下式表示:

$$x^2 + y^2 + (1 + Q)z^2 = 2Rz, \quad (1)$$

其中 z 轴为光轴, R 为过坐标原点的折射面的曲率半径。 Q 为折射面的非球面系数。

如图 1 所示,晶状体的弧矢剖面看作由若干层组成。其中,左边各层为一组同心扁长椭圆,右边各层为一组同心扁圆椭圆。左右两边相应各层形成闭合曲线。已知晶状体的厚度为 4.02 mm,把晶状体内核前表面到晶状体前表面的距离取为 1.2 mm,晶状体内核后表面到晶状体后表面的距离取为 1.8 mm。考虑到晶状体纤维的厚度是 6 μm ,将晶状体分成 602 层,其中 301 层属于晶状体的前半部分,另外的 301 层属于晶状体的后半部分。

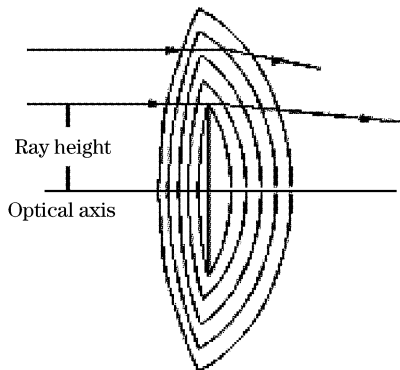


图 1 眼模型中层状水晶体的示意图

Fig. 1 Schematic presentation of the shell-lens of the eye model

层状晶状体的建立,需要解决两个主要问题:一个是各层的折射率变化规律,一个是各层曲率半径

了研究,发现当晶状体层数较少时,眼睛具有多焦性,这对人工晶状体的研究具有一定的理论意义。

2 层状晶状体模型的建立

Liou^[5]提出的眼睛模型,是近年来最符合眼睛的解剖学结构的眼睛模型。所以,在本文的眼睛模型中,除了晶状体的折射率选用了阶跃式变化(即层状结构)之外,其他的各结构参量均与 Hwey-Lan Liou 眼模型相同。其具体结构参量如表 1 所示。

的变化规律。

在此模型中,晶状体的折射率用(2)式表示^[11]:

$$N(r) = c_0 + c_1 r^2 + c_2 r^4 + c_3 r^6 + \dots, \quad (2)$$

其中 r 表示晶状体内各点到晶状体竖直中心轴线的归一化距离, c_0, c_1, c_2 和 c_3 分别为 1.4033, -0.03283, 0.064979 和 -0.09836。由(2)式可知,晶状体内核的折射率为 1.4033。

考虑到晶状体的层状结构,为了便于光线追迹,对(2)式进行了修改。从晶状体前表面到晶状体内核前表面,晶状体各层的折射率按(3)式变化:

$$n(I) = c_0 + c_1(I - N)^2/N^2 + c_2(I - N)^4/N^4 + c_3(I - N)^6/N^6, \quad (3)$$

其中 $n(I)$ 为第 I 层的折射率, N 为 1 ~ 301 之间的值。晶状体的后半部分的变化规律与(3)式相似。

由于缺少晶状体各层的曲率半径的具体数据,我们作了如下的假设:

1) 从晶状体的外表面到晶状体的内核,各层的曲率半径按线性规律递减;

2) 晶状体左半部分各层的非球面系数与晶状体前表面的非球面系数相同;晶状体右半部分各层的非球面系数与晶状体后表面的非球面系数相同。

3 新建眼模型光线追迹程序的编制

用层状结构模拟人眼晶状体的梯度折射率变化,不能采用梯度变折射率透镜的光线追迹方法。因此根据 Welford^[12]提出的公式用 C 语言编制程序实现光线追迹,并计算了眼睛的后焦距和轴向球

差。本文中的轴向球差是这样定义的:设系统的近轴焦距为 f' , 平行于光轴且通过入射光瞳内某一给定高度的光线, 经过眼睛光学系统后, 同光轴的交点为 A , A 到像方主面的距离为 d , 则以屈光度为单位的球差定义为 $n/d - n/f'$, 其中 n 为玻璃体的折射率。取一组平行于光轴的光线入射到角膜的前表面, 由于夜间人眼瞳孔的最大半径约为 4 mm, 所以光线的最大入射高度为 4 mm, 每条入射光线之间的间隔为 0.01 mm。每条光线都根据折射定律在各个折射面之间传播。注意到由于晶状体层状结构的存在, 距光轴近的光线通过的折射面数多于边缘光线通过的折射面数, 而且距光轴较远的一部分光线只通过部分折射面, 如图 1 所示。在编程的过程中, 对这种情况进行了适当的处理。本文中暂时没有考虑晶状体的色差。

4 结果与讨论

4.1 晶状体层数的作用

经计算, 眼睛的后焦距同晶状体层数的关系如图 2 所示。实心方块表示由本文的眼模型计算出来的结果, 曲线是三次指数拟合的结果。当晶状体的层数小于 30 时, 随着晶状体层数的增多, 眼睛的后焦距急剧减小; 层数介于 30 与 400 之间时, 随着层数的增多, 眼睛的后焦距缓慢减小; 层数大于 400 层时, 眼睛的后焦距几乎不变, 其值约为 23.62 mm。后焦距与层数存在着三级幂级数关系:

$$y = 23.6138 + 0.14456 \times \exp\left(-\frac{x}{13.09139}\right) + 0.0063 \times \exp\left(-\frac{x}{516.53013}\right) + 0.03356 \times \exp\left(-\frac{x}{72.84002}\right).$$

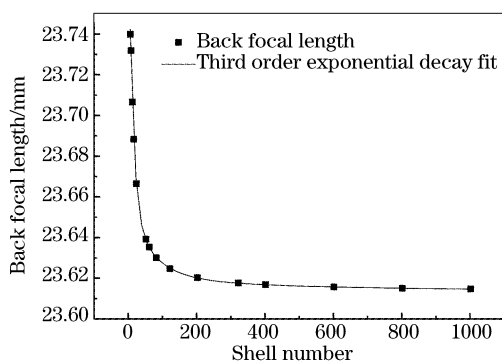


图 2 眼睛的后焦距同水晶体层的关系

Fig. 2 Effective back focal length of the eye as a function of the number of shells in the crystalline lens

图 3(a) 和图 3(b) 表示 $N=12$ 和 $N=301$ 时, 眼睛的球差曲线。由图 3(a) 可以看出, 当晶状体的层数较少时, 眼睛的球差曲线的尾部出现了翼状分布; 而当晶状体的层数高达 $2N=602$ 时, 眼睛球差曲线的尾部的翼状分布基本消失。Masajada^[6] 也在 1999 年观察到了类似的现象。在他的眼睛模型中晶状体的折射率变化如下:

$$n(i) = n_o + (n_o - n_e) \frac{1 - \exp[-\beta/(i-1)]}{1 - \exp[-\beta(N-1)]}, \quad (4)$$

其中 n_o 和 n_e 分别为 1.386 和 1.406, $n(i)$ 是第 i 层的折射率, N 是层数, β 是与个体有关的描述晶状体内折射率分布的可变参量, 折射率同 β 的关系如图 4 所示。Masajada 发现, 当 $\beta < 0.03$ 时, 眼睛的球差曲线会出现翼状结构。他对此现象进行了初步的分析, 阐明球差曲线翼状结构的出现, 是由于层状结构晶状体具有如图 5 所示的多焦性。

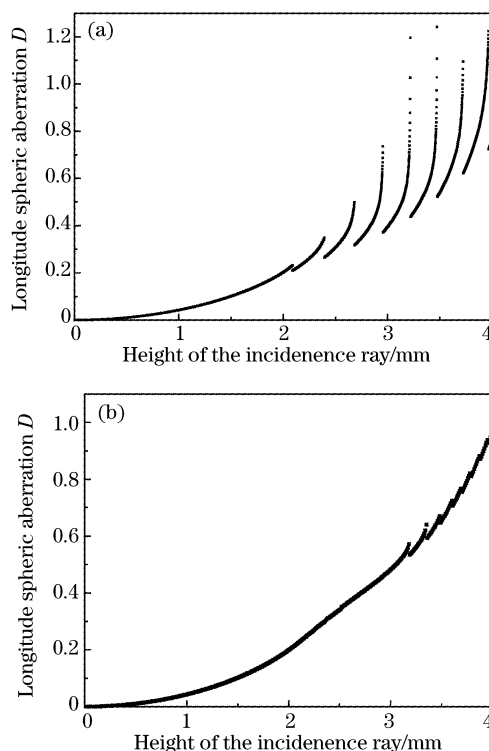


图 3 眼睛的球差分布曲线

Fig. 3 Spherical aberrations of the model

但是, 为什么只有在 β 值比较小时才会出现此现象, Masajada 并没有给出解释。而建立的模型能够对他们观察到的现象进行解释。翼状结构的出现是由于晶状体层数的不同而引起的。当晶状体的层数少时, 层与层之间的折射率变化比较大; 而当晶状体的层数增多时, 层与层之间的折射率变化较小, 当

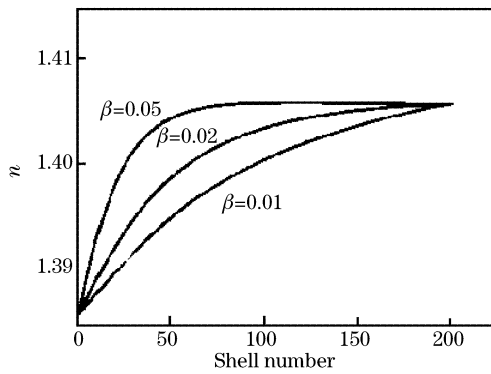


图 4 β 不同时晶状体内部的折射率分布
Fig. 4 Refractive index distributions inside the lens for different parameter β

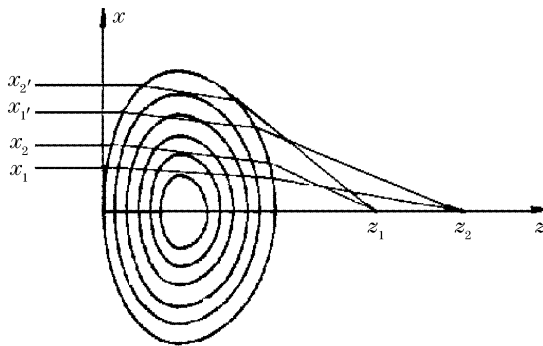


图 5 眼睛晶状体的多焦距效果图
Fig. 5 Schematic presentation of the multifocal behavior of the crystalline lens

层数很多时,可以近似认为晶状体的折射率是连续变化的。晶状体多焦性的产生,即球差曲线翼状结构的出现,是由于晶状体层与层之间的折射率变化较大引起的。从图 4 中可以看出,当 $\beta < 0.03$ 时,晶状体的折射率变化较慢,当层数接近 200 时,晶状体的折射率才接近折射率的最大值,也就是晶状体各层之间的折射率差别比较大;而当 $\beta > 0.04$ 时,当晶状体的层数不到 100 时,晶状体的折射率已经基本上接近最大值,也就是说,100 层到 200 层之间,晶状体内的折射率没有太大的变化,即各层之间的差别不大。所以,当 β 较大时球差曲线边缘不会出现翼状结构。通过以上分析,我们知道晶状体内,层与层之间折射率变化大时,晶状体才具有多焦性,这对人工晶体的设计具有一定的理论指导和启发意义。

4.2 晶状体内核的大小对球差曲线的影响

保持晶状体前表面到晶状体内核前表面的距离不变,仍为 1.2 mm;晶状体内核后表面到晶状体后表面的距离分别取为:2.4 mm、2.0 mm、1.8 mm、1.2 mm。则晶状体内核的大小分别为 0.42 mm, 0.82 mm, 1.02 mm, 1.62 mm, 对它们分别命名为

core1, core2, core3, core4。具有不同厚度晶状体内核的眼睛的球差分布曲线如图 6 所示。

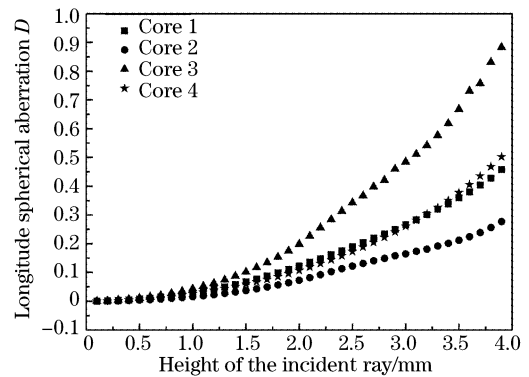


图 6 晶状体内核厚度不同时眼睛球差的变化曲线
Fig. 6 Spherical aberrations of the model eye with different lens core thickness

由图 6 可以看出,晶状体内核的大小对眼睛球差存在十分明显的影响,也就是说,除了眼睛各个介质的折射率、各折射面间的距离、各个折射面的曲率半径及非球面系数之外,晶状体的内核厚度也能起到影响眼睛球差的作用。如图 7 所示,当晶状体的内核厚度为 1.02 mm 时,眼模型的球差曲线与 Hway-Lan Liou 眼模型的球差曲线相似,当入射光线的高度小于 2 mm 时,具有层状结构晶状体的眼模型得出的球差曲线与 Hway-Lan Liou 眼模型的球差曲线重合,当入射光线的高度大于 2 mm 时,本文中的眼模型估计出的球差略大于 Hway-Lan Liou 眼模型估计出的球差,但差别不大。我们知道, Hway-Lan Liou 眼模型的球差曲线与实验数据相当吻合,所以,也可以认为采用本文中的眼模型,在

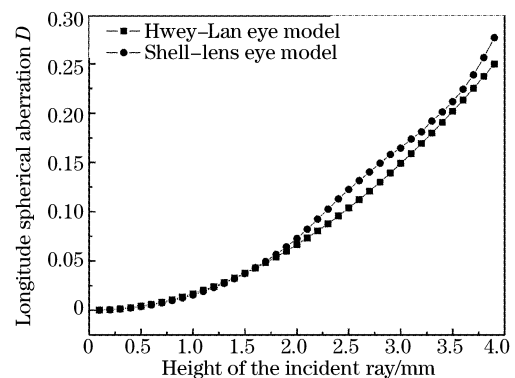


图 7 晶状体内核厚度为 1.02 mm 时,眼模型的球差曲线与 Hway-Lan Liou 眼模型比较
Fig. 7 Comparison of the spherical aberration predicted by the shell model which thickness of its core is 1.02 mm with the spherical aberration estimated by Hway-Lan Liou's model eye

描述球差性质方面与实验结果能够很好的吻合。另外注意到,在 Hway-Lan Liou 眼模型中,晶状体的折射率是连续变化的,而本文中的眼模型中的晶状体各层中的折射率阶跃式变化的。由以上的结果可知,晶状体折射率的层状变化与晶状体折射率的连续变化具有一定的等价性,这正与 Smith^[13] 的研究结果相一致。

5 结 论

在本文中,以 Hway-Lan Liou 眼模型的结构参数为基础,对眼睛的晶状体采用了层状结构进行模拟。随着晶状体层数的增多,眼睛的后焦距长度减小。当晶状体层数较少时,眼睛球差曲线的尾部出现翼状结构;而当晶状体的层数增多时,眼睛球差曲线尾部的翼状结构消失。这主要是由于随着晶状体层数的增多,各层之间的折射率变化减小造成的。晶状体内核的厚度对眼睛的球差存在影响,具有层状折射率晶状体的眼睛与具有梯度变化折射率晶状体的眼睛能够给出相似的球差曲线。

参 考 文 献

- Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Ultimate curves of aberration and strel ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1065~1067 (in Chinese)
侯晶,姜文汉,凌宁. 像差与斯特列耳比的极限曲线[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1065~1067
- Duan Haifeng, Yang Zeping, Wang Shuqing *et al.*. Model wavefront reconstruction of Shack-Hartmann sensor on arbitrary area and wavefront expression by Zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 517~520 (in Chinese)
段海峰,杨泽平,王淑青等. 夏克-哈特曼传感器任意形状孔径波前的模式重构及 Zernike 多项式描述[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 517~520
- Wei Xueye, Yu Xin. An optical wavefront sensing and reconstruction method based on Zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(7): 718~723 (in Chinese)
魏学业,俞信. 一种基于 Zernike 多项式的波前探测和重构方法[J]. *光学学报*, 1994, **14**(7): 718~723
- Blaker J. W. Toward an adaptive model of the human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(2): 220~223
- Hway-Lan Liou, Noel A. Brennan Anatomically accurate finite model eye for optical modeling[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1997, **14**(8): 1684~1695
- Lotmar W. Theoretical eye model with aspherics[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(11): 1522~1529
- Mutti D O, Zadnik K, Adams A J. The equivalent refractive index of the crystalline lens in childhood [J]. *Vision Res.*, 1995, **35**(11): 1565~1573
- Issam H. Al-Ahdali, M. A. EI-Messierey. Examination of the effect of the fibrous structure of a lens on the optical characteristics of the human eye: a computer-simulated model[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(25): 5738~5745
- A. Popiolek Massajada. Numerical study of the influence of the shell structure of the crystalline lens on the refractive properties of the human eye[J]. *Ophthalm. Physiol. Opt.*, 1999, **19**(1): 41~49
- Sudi Patel, John M., Frederick W. F.. Model for predicting the Optical performance of the eye in refractive surgery[J]. *Refract. Corn. Surg.*, 1993, **9**: 366~375
- Smith G., Atvidon D. A., Pierscionek B. K.. Modeling the power of the aging human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1992, **9**(12): 2111~2117
- W. T. Welford. *Aberrations of the Symmetrical Optical System*[M]. Chen Huangming, Liang Lixuan trans. Beijing: Science Press, 1974. 49~67 (in Chinese)
W. T. 威尔福特著. 对称光学系统的像差[M]. 陈昆明,梁丽轩译. 北京: 科学出版社, 1974. 49~67
- David A. Atchison George Smith. Continuous gradient index and shell models of the human lens[J]. *Vision. Res.*, 1995, **35**(18): 2529~2538