

doi:10.3788/gzxb20144312.1222002

基于 Zemax 接口技术的人眼晶状体模型研究

孔梅梅

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210023)

摘 要: 对人眼模型中晶状体的面型和折射率分布进行了研究, 基于晶状体的光学特性, 利用光学设计软件 Zemax 接口技术的调入, 采用不同连续公式法分别给出了晶状体不同的梯度渐变折射率分布形式; 结合晶状体不同的非球面面型, 比较分析了晶状体不同面型和不同梯度折射率分布的组合模型对人眼模型重现实测像差的影响; 给出了重现我国人眼实测像差误差最小的晶状体模型. 结果显示: 晶状体的面型越复杂得到人眼模型的像差与真实人眼的测量像差就越接近; 当晶状体采用 Zernike 面, 梯度渐变折射率采用分段函数公式形式时, 重现实测像差误差最小.

关键词: 医用光学与生物技术; 视觉光学; Zemax 接口技术; 晶状体模型; 成像质量; 光的折射; 光学设计; 光学性能; 折射率

中图分类号: R778

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1222002-5

Research of the Crystalline Lens Model in Human Eye Optical System Based on Zemax Interface Technology

KONG Mei-mei

(School of Opto-Electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210023, China)

Abstract: Lens surface type and refractive index distribution of the crystalline lens model in eye optical model was researched. Based on the lens optical properties, the effect of different lens combined models on the human eye model to reproduce the measured eye aberrations was analyzed comparatively with Zemax interface technology. The lens combined models included different surface types and different gradient-index distributions by different continuous formulas. The lens model with the minimum reproduce precision was also presented. The results show that the aberrations of the eye model with complex lens surface is close to measured eye aberrations, the lens model with the minimum reproduce precision includes Zernike surface and gradient-index distribution by piecewise function formulas.

Key words: Medical optics and biotechnology; Visual optics; Zemax interface technology; Crystalline lens model; Image quality; Light refraction; Optical design; Optical properties; Refractive index

OCIS Codes: 220.2740; 330.4060; 330.4595; 330.7321; 330.7326

0 引言

人的眼球是一个典型的复合光学系统, 其由外向里分别为角膜、房水、瞳孔、晶状体、玻璃体和视网膜^[1]. 其中, 晶状体是人眼光学系统中的核心组成部分, 可平衡整个眼球屈光力、是唯一具有调节能力的屈光元件, 从解剖学和光学角度而言, 人眼的晶状体是一

个高度复杂的组织结构, 由放射状的纤维层构成^[2], 排列规则, 形成对称的衍射光晕, 类似于“洋葱”的层层包围结构, 外层纤维对内层纤维的挤压作用, 使晶状体成为一种非均匀折射率的光学介质, 其面型和折射率都与人的调节状态、人的年龄大小有关^[3-5]. 由于晶状体位于人眼内部, 增加了人们对其具体参量的测量和认知难度^[6]. 文献[7]和[8]分别从力学角度研究了人

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61302026)、江苏省自然科学基金(Nos. BK2012432, BK2011752)、江苏省高校自然科学基金项目(Nos. 13KJB510025, 11KJD140002)和南京邮电大学科研基金(Nos. NY209011, NY211102)资助

第一作者: 孔梅梅(1983-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为光学设计、光学测试与眼视光学. Email: kongmm@njupt.edu.cn

收稿日期: 2014-05-14; **录用日期:** 2014-07-03

<http://www.photon.ac.cn>

眼晶状体调节机制的有限元模型与其实验材料的性能;文献[9]对晶状体随着年龄的增长而产生白内障的因素、机制等建立了模型并通过实验仪器进行了测量.建立晶状体的光学模型是模型眼研究关键问题中的一大难点.晶状体模型可被应用于眼内屈光手术,例如白内障摘除加人工晶体植入术,及人工晶体参量的设计^[10-11]与术前眩光的评估等.

由于晶状体的复杂性和测量技术的限制,人眼晶状体的面型和折射率分布都是未知参量,本文结合我国人眼实测数据,在人眼晶状体平均模型的逆向构建研究基础之上^[12],选择不同的面型模型和不同的折射率分布分别进行优化.通过 Zemax 调用 VC 编译的折射率分布,体现不同的晶状体模型在模型眼中的光学特性;以最小化人眼模型重现实测像差的均方根(Root Mean Square, RMS)误差为目标,对晶状体模型的面型和折射率分布进行了优化分析,得到了相应误差最小的晶状体模型结构.

1 晶状体面型表示

晶状体非球面面型的具体特点未知,分别选用二次曲面(Conic)、双二次曲面(Biconic)和 Zernike 标准面三种表示方式进行比较.光学设计软件 Zemax 中,这三种面型表面矢高 z 的方程分别如式(1)~(3)所示,其中 Zernike 标准面的面型表达式与二次曲面相似,仅在式(1)的基础上叠加了径向 r 方向上的附加项以及 Zernike 多项式.

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (1)$$

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k_x)c_x^2 x^2 - (1+k_y)c_y^2 y^2}} \quad (2)$$

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 a_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \varphi) \quad (3)$$

式(1)中, c 为晶状体表面顶点的曲率,即曲率半径的倒数, r 为径向坐标, $r^2 = x^2 + y^2$, k 为二次曲面系数(当 $k < -1$ 时表示双曲面; $k = -1$ 时表示抛物面; $-1 < k < 0$ 时表示椭球面; $k = 0$ 时表示球面; $k > 0$ 时表示扁椭球面);式(2)中,表面的顶点为坐标原点,光轴为 z 轴,弧矢面在平面 xoz 内,子午面在平面 yoz 内, c_x 和 c_y 分别

表示角膜在弧矢面和子午面内顶点的曲率, $c_x = 1/R_x$, $c_y = 1/R_y$, R_x 和 R_y 分别为弧矢半径和子午半径, k_x 和 k_y 分别表示角膜在弧矢面和子午面内的二次曲面系数;式(3)中, Z_i 项是标准矢高形式描述的 Zernike 多项式.在二次曲面的基础上,选取了 36 项 Zernike 多项式,即 $N=36$,来描述晶状体的前表面面型,在优化构建模型眼过程中,将 Zernike 多项式的系数 A_i 的初值取零后设为变量,而有关 r 的附加项并未引入.

2 晶状体折射率分布

人眼解剖研究的结果已经表明晶状体的折射率是梯度分布的^[13];晶状体由多层不同折射率的物质组成,向着中心在光学上变得更为致密,使晶状体的光学复杂化.即从前极到后极,从中心到赤道,有一个折射率梯度^[14].因此采用连续公式法来表示晶状体的梯度渐变折射率分布形式^[15].

为了寻求合适的晶状体折射率分布表达形式,分别选用 Liou & Brennan^[16] A. V. Goncharov & C. Dainty^[16] 和 Blaker^[17] 提出的三个具有代表性的模型眼,其相应的描述晶状体折射率分布的公式分别为

$$n(r, z) = \begin{cases} 1.368 + 0.049057z - 0.015427z^2 - 0.001978r^2 & 0 < z \leq 1.59 \\ 1.407 + 0.0z - 0.006605z^2 - 0.001978r^2 & 1.59 < z \leq 4.02 \end{cases} \quad (4)$$

$$n(r, z) = 1.362 - 0.0021490r^2 - 0.0000106r^4 + 0.049467z - 0.015958z^2 + 0.0001715z^3 + 0.000141z^4 \quad (5)$$

$$n(r, z) = 1.387 + 0.014z - 0.00384z^2 - 0.0012r^2 \quad (6)$$

式中, z 表示晶状体的中心厚度, r 为晶状体的径向坐标.

由于 Liou & Brennan 在提出的人眼模型中,将晶状体分为前后两部分,分别给出了这两部分晶状体内部折射率的梯度渐变式分布方程,即式(4).但是当厚度 z 取值范围为 $1.59 < z \leq 4.02$ 时,需进行一定的修改:用“ $z-1.59$ ”代替式(4)“ z ”,否则后部分的函数值就与前部分的函数值不连续,出现了跳跃,不符合实际.对式(4)的第二个方程式,修改可得

$$n(r, z) = \begin{cases} 1.368 + 0.049057z - 0.015427z^2 - 0.001978r^2 & 0 < z \leq 1.59 \\ 1.407 + 0.0(z-1.59) - 0.006605(z-1.59)^2 - 0.001978r^2 & 1.59 < z \leq 4.02 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)、(5)和(6)应用于晶状体模型的研究中时,首先是通过 VC 编译,然后再利用 Zemax 与 VC 的接口技术,在应用 Zemax 研究的人眼模型中,将分别含有这三个渐变折射率分布公式的 VC 文件调入,来表示晶状体的三种不同折射率分布形式.针对式(5)的编译语

言节选如图 1,其中,“index”代表晶状体的折射率, N_0 至 N_6 分别代表式(5)中每一项相应的系数.为了便于研究,在基于人眼实测参量的我国人眼平均模型中,将含有式(7)、(5)和(6)表示的晶状体的模型眼分别设为模型 1(Model 1)、模型 2(Model 2)和模型 3(Model 3).

case 6;

```

N0=FD->param[2];
N1=FD->param[3];
N2=FD->param[4];
N3=FD->param[5];
N4=FD->param[6];
N5=FD->param[7];
N6=FD->param[8];
x=UD->x;
y=UD->y;
z=UD->z;
t=FD->thic;r2=x*x+y*y;
index=N0+N1*r2+N2*r2*r2+N3*z+N4*z*z
+N5*z*z*z+N6*z*z*z*z;
if (index<1.0) index=1.0;
UD->index=index;
UD->dndx=2.0*N1*x+4.0*N2*r2*x;
UD->dndy=2.0*N1*y+4.0*N2*r2*y;
UD->dndz=N3+2*N4*z+3*N5*z*z+4*N6
*z*z*z;
break;
```

图1 用于 Zemax 中晶状体折射率分布(式(5))
的 VC 编译节选

Fig. 1 The lens refractive index distribution (Eq. (5))
with VC Compiler (excerpts) used in Zemax

3 模型眼的建立

3.1 数据来源

为了解决我国人眼特点的临床资料和实测数据收集的问题,分别与上海复旦大学附属耳鼻喉科医院眼视光中心和南京中医药大学附属医院(江苏省中医院)的眼科中心合作,采集我国人眼各光学部分的临床数据,并测量志愿者眼睛获取原始数据。医院所用仪器由美国 Baush & Lomb(博士伦)公司和德国 Zeiss 公司等国外公司生产,测量数据在实际医学临床应用中都有较高的可信度,能够提供较高准确度的我国人眼数据。

在大量被测对象中根据所需的正视眼要求,选取了裸眼视力 ≥ 0.8 、球镜度 $+0.75 \sim -1.75$ DS、柱镜度 < 0.75 D、无眼科疾病的被测正视眼 50 例,其中女 18 人,男 9 人,年龄 19~45 岁,平均年龄 (26.64 ± 5.22) 岁。

实际可测量的参量主要有:角膜前后表面的曲率半径、角膜的中心厚度,包括前房深度、晶状体中心厚度在内的眼内间距和整个眼轴长,以及人眼的像差;眼内玻璃体的中心厚度可通过眼轴长减去其他眼内间距获得。对每个可测参量的测量至少进行 3 次,再求平均值,测量时所用的医学仪器分别为:人眼角膜表面参量和人眼像差由具有角膜地形图测量和波前像差分析双重功能的 CRS-Master Twinline 系统(Carl Zeiss,

Jena, Germany),以及 Orbscan II 一体式全功能眼前节分析诊断系统和 Zywave 像差仪(Bausch & Lomb, USA)测得;角膜厚度、前房深度、晶状体厚度和眼轴长由 Pentacam 眼前节分析系统仪(Oculus, Wetzlar, Germany),IOL-Master 光学生物测量仪(Carl Zeiss, Jena, Germany)以及眼科专用 A/B 超声诊断仪(BVI, France)测得。

3.2 建立方法

建立我国人眼平均模型时,主要通过建立以实测人眼像差为主体的评价函数,以重现实测人眼像差为目标,迭代优化求得晶状体的等效光学模型。优化的过程为:首先将晶状体面型设为变量进行优化,优化完成后,将面型设为定量,再将晶状体的折射率分布设为变量进行优化。

由于测量人眼像差的仪器都是基于 Shack-Hartmann 像差测量原理^[18],入射光进入到人眼在视网膜上成为一个点后经视网膜反射出来,测量时 Shack-Hartmann 像差仪中的微透镜阵列与人眼的瞳孔相共轭,即测得的是反射出的光波前在人眼入瞳平面上的像差,而在人眼系统模型建立中,模拟的是入射光进入人眼的成像情况,与反射光波前存在一个反向的关系。所以,为了便于建模,在人眼的入瞳位置,引入一个反映实测人眼像差的相位平面,则可以在优化过程中,将最小化包含该相位平面在内的整个大系统的波像差(RMS)值作为优化的目标,当优化结束时该大系统的波像差 RMS 值即为人眼光学模型重现实测像差的准确度,撤去该相位平面,剩下的光学系统像差就符合实测人眼像差结果,此时的光学系统即为所需的人眼光学模型。其中,对系统的优化算法是基于阻尼最小二乘法,通过求评价函数的极小值解,使像差残量逐步减小,达到最小化系统波像差 RMS 值的目的。

4 结果

利用不同的面型分别对人眼晶状体进行模拟,优化结果如图 2。可知一般二次曲面(Conic)优化后的重现实测像差的 RMS 误差比双二次曲面(Biconic)优化

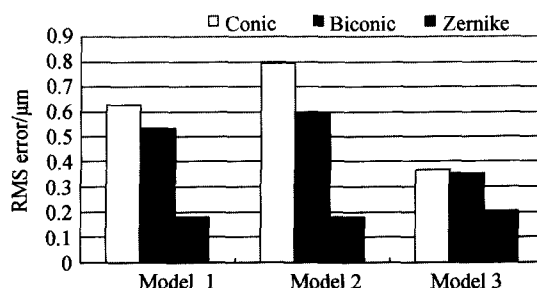


图2 含有不同面型晶状体的人眼模型重现实测像差的 RMS 误差

Fig. 2 The reproduce precision (RMS error) comparison of eye models with the lens of different surface types

后的要大,而 Zernike 面的优化结果是三者之中最好的,三个模型的 RMS 值都在 $0.2\ \mu\text{m}$ 左右,远远小于其它两个面型的优化结果,即晶状体的面型越复杂得到人眼模型的像差与真实人眼的测量像差就越接近,因此在建立我国人眼的平均模型中可选 Zernike 面来模拟晶状体面型。

图 3 为同时优化晶状体的面型和折射率后得到的重现实测像差的 RMS 误差。对于二次曲面和双二次曲面,模型 2 重现实测像差的 RMS 值都是最大的,效果

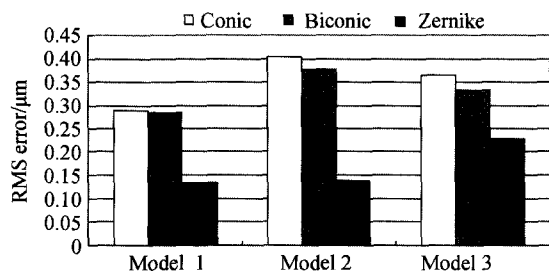


图 3 同时优化晶状体面型和折射率分布后人眼模型重现实测像差的 RMS 误差

Fig. 3 The reproduce precision (RMS error) comparison of eye models with the lens of different surface types and different gradient-index distributions

表 2 晶状体前表面的 Zernike 系数

Table 2 The lens anterior surface Zernike coefficients

Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}	Z_{15}
0	0	0	-8.066×10^{-3}	-1.139×10^{-3}	1.679×10^{-2}	-1.743×10^{-3}	-1.026×10^{-3}	5.473×10^{-4}	-1.886×10^{-3}	-2.687×10^{-3}	-3.201×10^{-5}	1.211×10^{-4}	-2.765×10^{-4}	-1.096×10^{-5}

表 3 晶状体的折射率分布系数

Table 3 The coefficients of lens refractive index distribution

	n_{00}	n_{01}	n_{02}	n_{10}
Anterior part	1.368	0.04952	-0.01568	-0.002053
Posterior part	1.407	0	-0.007181	-0.002053

5 结论

利用 Zemax 的接口技术在人眼模型中引入不同折射率分布形式的晶状体模型,结合晶状体的非球面面型,对晶状体的光学模型进行了进一步的比较分析,结果显示,当晶状体面型选取 Zernike 面、折射率选取 Liou & Brennan 模型眼采用的梯度折射率分布形式时,模型眼与实测结果的吻合度最高,为人眼模型的深入研究和应用提供了丰富的晶状体模型。有关实际测量可能引入的误差会影响模型分析的问题,需在今后和医院进一步合作来进行深入的研究,以提高模型分析的准确度。

感谢 感谢上海复旦大学附属眼耳鼻喉科医院眼视光中心的瞿小妹老师和南京中医药大学附属医院(江苏省中医院)眼科中心的丁淑华老师,在人眼实

最差;而对于 Zernike 面则模型 3 的效果最差;但是对于所有三个面型,模型 1 的优化效果都是最好的,即在梯度折射率分布中, Liou & Brennan 的模型眼采用的式(7)的效果最佳。因此,在模型眼中可选用式(7)来模拟晶状体的梯度折射率分布。

基于分析结果,重现实测像差 RMS 误差最小的人眼模型中晶状体模型的具体参量如表 1~3。其中,晶状体的非球面表示分别为前表面采用 Zernike 面(Z_1 至 Z_{15} 为 Zernike 系数),后表面采用一般的二次曲面,晶状体的梯度折射率分布采用式(7)的渐变形式(n_{00} 至 n_{10} 分别为折射率表达式中相应的系数)。

表 1 RMS 误差最小的晶状体模型参量表

Table 1 The structural parameters of lens model with the minimum RMS error

Surface Type	Radius/mm	Conic coefficient	Central thickness/mm
Anterior surface	Zernike 15.01	-5.00	Anterior part 1.66 Posterior part 2.33
Posterior surface	conic -9.81	-5.00	16.20

测参量方面给予的帮助。

参考文献

- [1] 李凤鸣. 眼科全书 [M]. 北京:人民卫生出版社,1996.
- [2] LIU Yong-ji, FANG Zhi-liang, WANG Zhao-qi. A study on eye's optical characters with anatomically accurate shell-lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 136-140.
刘永基,方志良,王肇圻. 具有层状晶状体的人眼模型的光学性质[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 136-140.
- [3] KORETZ J F, COOK C A, KAUFMAN P L. Aging of the human lens; changes in lens shape upon accommodation and with accommodative loss[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, **19**(1): 144-151.
- [4] DUBBELMAN M, VAN DER HEIJDE G L, WEEBER H A, et al. Changes in the internal structure of the human crystalline lens with age and accommodation [J]. *Vision Research*, 2003, **43**: 2363-2375.
- [5] DUBBELMAN M, VAN DER HEIJDE G L, WEEBER H A. Change in shape of the aging human crystalline lens with accommodation[J]. *Vision Research*, 2005, **45**: 117-132.
- [6] SMITH G. The optical properties of the crystalline lens and their significance[J]. *Clinical & Experimental Optometry*, 2003, **86**(1): 3-18.
- [7] ZHANG Li-Yan. Finite element analysis of human crystalline lens accommodation and determination of elastic modulus of rabbit lens[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
张立艳. 人眼晶状体调节功能的有限元模拟及兔眼晶状体弹性模量确定[D]. 太原:太原理工大学, 2012.

- [8] SONG Fan, ZHAO Xi-yu, DU Rui-qi, *et al.* Accommodation theories and mechanical properties of human lens [J]. *Mechanics and Engineering*, 2012, **34**(1): 1-9.
宋凡,赵希宇,杜睿琪,等. 人眼晶状体调节机制和力学[J]. 力学与实践,2012, **34**(1):1-9.
- [9] MICHAEL R, BRON A J. The ageing lens and cataract; a model of normal and pathological ageing [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2012, **366**(1568): 1278-1292.
- [10] RAO Feng, WANG Zhao-qi, WANG Yan, *et al.* Construction of eye model and intraocular lens design after corneal refractive surgery[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1805-1810.
饶丰,王肇圻,王雁,等. 角膜手术后眼模型的构建和人工晶状体设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1805-1810.
- [11] ZHAO Xing, ZHANG Mei-hui, FANG Zhi-liang. Title analysis of the spherical aberration correction with conical anterior chamber phakic intraocular lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 865-871.
赵星,张美慧,方志良. 二次曲面前房型有晶体眼人工晶体的球差矫正特性分析[J]. 光子学报, 2011, **40**(6): 865-871.
- [12] KONG Mei-mei, GAO Zhi-shan, LI Xin-hua, *et al.* A generic eye model by reverse building based on Chinese population[J]. *Optics Express*, 2009, **17** (16): 13283-13297.
- [13] ZHAO Qiu-ling, WANG Zhao-qi, ZHANG Chun-shu. The actions of aspheric surfaces and gradient-index on optical image of the eye[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1409-1412.
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作用[J]. 光子学报, 2002, **31**(11): 1409-1412.
- [14] LÜ Fan. Eyeball optics[J]. *Chinese Journal of Optometry & Ophthalmology*, 2001, **3**(1): 53-55.
吕帆. 眼球光学(第一讲)[J]. 眼视光学杂志,2001,**3**(1):53-55.
- [15] LIOU H L, BRENNAN N A. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(8): 1684-1695.
- [16] BLAKER J W. Toward and adaptive model of the human eye [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1980, **70** (2): 220-224.
- [17] GONCHAROV A V, DAINTY C. Wide-field schematic eye models with gradient-index lens[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, **24**(8): 2157-2174.
- [18] NIRMAIER T, PUDASAINI G, BILLE J. Very fast wave-front measurements at the human eye with a custom CMOS-based Hartmann-Shack sensor[J]. *Optics Express*, 2003, **11** (21): 2704-2716.