

文章编号 1004-924X(2009)04-0701-06

折射/衍射球柱有晶体眼人工晶体的设计

王肇圻^{1,2}, 饶 丰^{1,2}, 王 雁³, 左 彤³, 赵堪兴³

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

摘要: 为了提高白光下人眼的视觉质量, 设计了一款折射/衍射球柱有晶体眼人工晶体 (PIOL)。根据实际人眼的角膜地形图、眼内各组分的轴向间距和波前像差, 运用 Zemax 光学设计软件, 构建了个性化眼模型; 然后, 运用该模型, 设计了球柱 PIOL 和折射/衍射球柱 PIOL。研究表明: 与球柱 PIOL 相比, 折射/衍射球柱 PIOL 能够全面提高人眼的白光调制传递函数 (MTF) 和非中心波长下的 MTF, 有利于获得良好的视觉质量。研究还表明: 折射/衍射球柱 PIOL 只需要在 4 mm 区域设计二元面就能够满足要求。最后, 分析了加工工艺问题。折射/衍射球柱 PIOL 在先进视觉矫正方面具有潜在的应用价值。

关键词: 视觉光学; 色差; 个性化眼模型; 调制传递函数; 有晶体眼人工晶体

中图分类号: O435. 2; R778 **文献标识码:** A

Design of refractive/diffractive spherocylindrical phakic intraocular lens

WANG Zhao-qi^{1,2}, RAO Feng^{1,2}, WANG Yan³, ZUO Tong³, ZHAO Kan-xing³

(1. *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China;*
2. *Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300071, China;* 3. *Refractive Surgery Center, Tianjin Eye Hospital, Tianjin Medical University, Tianjin 300020, China*)

Abstract: A refractive/diffractive spherocylindrical Phakic Intraocular Lens (PIOL) is designed to improve the white light visual quality of the human eye. On the basis of measured individual corneal data, eyeball depths and wavefront aberrations, an individual eye model is constructed with the optical design software Zemax, then the spherocylindrical PIOL and the refractive/diffractive spherocylindrical PIOL are designed by the established eye model. A comparison with spherocylindrical PIOL shows that the refractive/diffractive spherocylindrical PIOL can optimize overall white light Modulation Transfer Functions (MTF) and the MTFs of non-center wavelengths to improve the visual quality. The experiment also shows that a zone of 4 mm is enough for the binary structure. Finally, the fabrication issues are discussed. Obtained results indicate that the designed refractive/diffractive spherocylindrical PIOL has great potentialities in advanced vision correction.

Key words: visual optics; chromatic aberration; individual eye model; Modulation Transfer Function (MTF); Phakic Intraocular Lens (PIOL)

收稿日期: 2008-04-22; 修订日期: 2009-03-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60438030, No. 60777011); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20050055002)

1 引言

有晶体眼人工晶体(PIOL)具有可逆性好,保留了调节力,并发症少和效果稳定等优点^[1],已经成为一种重要的视力矫正方法。

长期以来,PIOL 为双球面设计,仅能矫正人眼的离焦^[2]。研究表明:在自然光谱范围内(400~700 nm),人眼色差达 2.0 m^{-1} ,可以明显地降低白光下视网膜成像的对比敏感度,引起视锐度的损失^[3]。为了矫正色差, Norberto 等基于 Navarro 眼模型,先设计双球面人工晶体(Intraocular Lens, IOL),然后在 IOL 的后表面上引入二元面,从而获得了一款普适的消色差 IOL^[4]。但是 Navarro 眼模型的各个折射面均是旋转对称的标准球面,不能全面地反映真实人眼的像散和高阶像差,另外,所设计的 IOL 也不能体现个体差别^[5]。2005 年,郭欢庆等人基于 Gullstrand-Le Grand 眼模型,结合 Hartman-Shark 波前像差仪测得的数据、眼轴数据和角膜地形图的数据,应用 Zemax 软件构建了个性化眼模型^[6],较好地描述了个体人眼的单色像差和色差特性。2007 年, Wang 等人根据个性化眼模型,设计了球柱 PIOL^[7],同时矫正离焦和散光,但是它并不能矫正色差,因此限制了白光视觉质量的进一步提高。

本文根据个体人眼实际测量的波前像差、角膜地形图和眼内各组分的轴向间距,构建了个性化眼模型,然后运用该模型,先设计了能够矫正离焦和像散的球柱 PIOL,再引入二元面,设计了同时矫正色差的 PIOL。最后分析了所设计的 PIOL 的光学性能,并讨论了二元面所需尺寸和加工工艺问题。

2 方法

2.1 个性化眼模型的建立

采用角膜地形仪 Obscan II 测量角膜前后表面的参考球面半径及相对于参考球面的径向高度差,然后运用 Matlab 软件将其转换成沿光轴方向的高度差,最后将此高度差用最小二乘法拟合成 Zemax 软件中的高次非球面函数,得到了用

Zernike fringe sag 形式描述的角膜表面^[8-9]。

采用超声测厚仪测量术前人眼各部分轴向间距,为了减少误差,本文取多次测量的平均值。

眼内光学系统包括角膜、房水、晶状体及玻璃体的介质折射率阿贝数采用 Gullstrand-Le Grand 眼模型的数值。

用波前像差仪测量实际人眼的波前像差,并把它们加入到光学设计软件 Zemax 的优化函数中。最后,运用 Zemax 软件的优化功能,优化晶状体的前后表面,使得全眼的波前像差与用波前像差仪测量得到的实际波前像差相等,此时,个性化眼模型构建完毕。

2.2 球柱 PIOL 的设计

本研究中,PIOL 的厚度为 0.5 mm,光学区直径为 6 mm,材料为 PMMA,其折射率为 1.49,阿贝数为 58。PIOL 植入前房内,其后表面距虹膜 0.5 mm。设计时采用明视光谱,Zemax 中采用 470、510、555、610、650 nm 五种光波长表示,中心波长为 555 nm,不同波长的权重由明视光谱敏感度决定。

球柱 PIOL 可以同时矫正离焦和像散,它的一个表面为球面,另一个表面为柱面。本设计采用前表面为柱面,后表面为球面。在 Zemax 中,球面的表达式如式(1)所示:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{R + \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)}}, \quad (1)$$

其中, x , y 是竖直方向和水平方向坐标, z 为光轴, R 是球面曲率半径。柱面的表达式如式(2)所示:

$$z = \frac{x'^2}{R' + \sqrt{R'^2 - x'^2}}, \quad (2)$$

x' 和 y' 分别是柱面的垂轴坐标和轴向坐标, R' 是柱面曲率半径。 y' 与 y 的夹角为散光角。

球柱 PIOL 的设计方法:

- (1) 建立个性化眼模型,植入球柱 PIOL;
- (2) 在 Zemax 光学设计软件中,设定 PIOL 的球面曲率半径、柱面曲率半径和散光角为变量;
- (3) 在优化函数 ZERN 中设定 Z_4 (离焦)、 Z_5 和 Z_6 (像散)为 0;
- (4) 通过优化,得到球柱 PIOL 的具体结构参数,同时构建了植入球柱 PIOL 的个性化人工

晶体眼模型。

2.3 折射/衍射球柱 PIOL 的设计

本文采用二元面实现消色差。在 Zemax 光学设计软件中,二元面的相位表达式为^[10]:

$$\varphi(\rho) = A_1\rho^2 + A_2\rho^4 + A_3\rho^6 + \dots, \quad (3)$$

其中, $A_i (i=1, 2, \dots)$ 为第 i 阶相位系数, ρ 是归一化半径。 A_1 为二次相位系数, 通常用来矫正色差。其他各项通常用来矫正单色像差。

折射/衍射球柱 PIOL 设计方法:

(1) 构建植入球柱 PIOL 的个性化眼模型, 在 PIOL 中的球面上加入二元面, 根据所需要的要求, 在优化设计中只取第一项;

(2) 设 PIOL 的球面曲率半径 R , 相位系数 A_1 为变量;

(3) 在优化函数 ZERN 中设定 Z_4 (离焦) 和色差 (AXCL) 为 0, 优化得到结果;

(4) 按照要求修正球面曲率半径 R 并保持它不变, 优化相位系数 A_1 , 然后保持相位系数 A_1 不变, 优化球面曲率半径 R , 此时, 优化函数接近于 0。这样得到了折射/衍射球柱 PIOL 的具体参数, 同时构建了植入折射/衍射球柱 PIOL 的个性化人工晶体眼模型。

3 结 果

选择病人 LQ 右眼, 用超声测厚仪 BMF-200 A/B 测量眼内各部分的厚度, 结果如表 1 所示, 其中角膜厚度由 Obscan II 角膜地形仪给出。

表 1 LQ 右眼的眼内各组分轴向间距/mm

Tab.1 Axial lengths of each element in LQ right eye

	角膜厚度	前房深度	晶体厚度	玻璃体厚度
长度	0.57	3.11	3.96	17.19

用 Obscan II 角膜地形仪测量角膜前后表面曲率半径及相对于参考球面的径向高度差, 并拟合成 Zernike fringe sag 形式, 结果如表 2 所示, 其中包括角膜前后表面的曲率半径, 前后表面的泽尼克系数, 本研究中角膜泽尼克系数共 15 项, 为了节省空间, 表 2 中仅给出了其中的 3 项, 其中

α_4 表示离焦, α_5 和 α_6 表示像散。

表 2 LQ 右眼的角膜参数

Tab.2 Corneal parameters of LQ right eye

	曲率半径 (mm)	Zernike 系数/ μm		
		α_4	α_5	α_6
前表面	7.9	0.015 3	0.003 4	-0.017 7
后表面	6.49	0.001 3	0.006 6	0.057 1

表 3 是用 Wavescan-II 型波前像差仪测量的 LQ 右眼的波前像差, $Z_4 \sim Z_{11}$ 表示第 4 到第 11 项泽尼克多项式系数。由于 Wavescan-II 给出的测量值是 OSA 标准, 而 Zemax 软件中使用 Zernike fringe sag 标准, 因此这里将测量值进行了适当的变化, 以便于在 Zemax 中使用。本研究中, 人眼波前像差用 15 项描述, 其中前 3 项分别为常数项和倾斜项, 所以表 3 从第 4 项列出, 为了节省空间, 仅给出 8 项, 其中, Z_4 表示离焦, Z_5 和 Z_6 表示像散, Z_7 和 Z_8 表示三叶草, Z_9 表示球差, Z_{10} 和 Z_{11} 表示四叶草。

表 3 LQ 右眼的波前像差

Tab.3 Wavefront aberrations of LQ right eye

Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}
14.81	-3.56	-1.33	0.26	0.76	0.64	-0.12	-0.41

将各参数输入 Zemax, 优化出晶状体参数, 如表 4, 其中包括晶状体前后表面的曲率, 前后表面的泽尼克系数, 本研究采用的泽尼克系数仍为 15 项, 这里仅给出了其中的 3 项。这样就成功构建了 LQ 右眼个性化眼模型。

表 4 LQ 右眼晶体参数

Tab.4 Parameters of the lens in LQ right eye

晶体	曲率半径 /mm	Zernike 系数		
		α_4	α_5	α_6
前表面	9.37	0.050 2	-0.094 9	-0.012 9
后表面	-5.85	-0.047 6	0.159 8	0.030 3

根据个性化眼模型所设计的球柱 PIOL 的柱面曲率半径为 93.63 mm, 散光角为 10.8° , 球面曲率半径为 26.92 mm。

表 5 是所设计的 6 款折射/衍射球柱 PIOL 的结构参数。由于引入二元面不改变柱面曲率半

径和散光角,因此表 5 只给出球面曲率半径,二次相位系数和二元面所承担的屈光度。其中,设计 1 完全矫正了色差,自 2 至 6,随着 A_1 的减小,消色差的能力逐渐降低。二元面的二次相位系数 A_1 越大,环带越密集,特征尺寸越小,要求的加工工艺越高,因此,设计中要控制 A_1 。

表 5 折射/衍射球柱 PIOL 的结构

Tab. 5 Structures of refractive/diffractive spherocylindrical PIOL

序号	二次相位系数 A_1	二元面的屈光度/ m^{-1}	球面曲率半径/ mm
1	183.11	1.706 1	16.50
2	122.73	1.104 2	18.97
3	102.81	0.945 6	19.95
4	69.20	0.618 4	21.92
5	39.37	0.347 9	23.87
6	26.19	0.228 1	24.85

图 1 是植入不同 PIOL 后人眼的白光 MTF 曲线,最上实线表示衍射极限,最下实线表示植入球柱 PIOL 的白光 MTF,中间 6 条曲线由上到下分别表示设计 1~6(如表 5)6 款折射/衍射球柱 PIOL 的白光 MTF。可以看出:球柱 PIOL 的白光 MTF 最低,对于折射/衍射球柱 PIOL,随着 A_1 的不断增大,白光 MTF 不断接近衍射极限,但是由于存在剩余像差,完全消色差后的白光 MTF 与衍射极限还是有一定差距的。

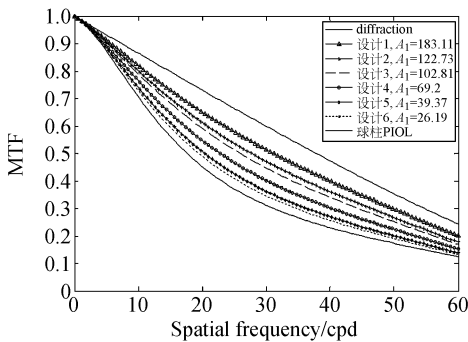
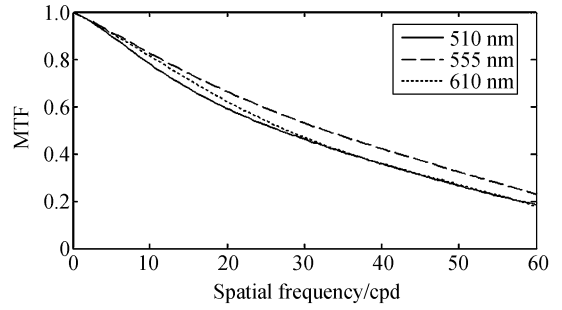


图 1 不同 PIOL 的白光 MTF

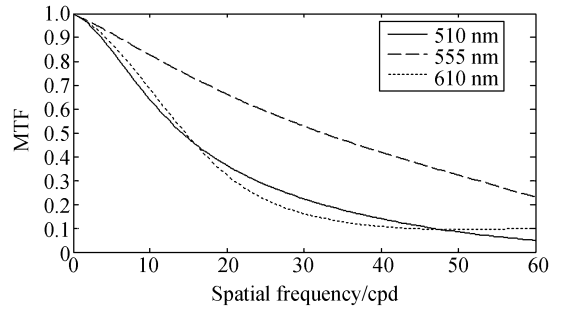
Fig. 1 White light MTF with different PIOLs

在 6 种设计中,设计 2 的白光 MTF 较高,同时二次相位系数 A_1 较小,二元面所承担的屈光度大小适当,结合制造工艺和人眼的实际需要(详见本文第 4 部分),本文选择设计 2 为最终方案。



(a) 折射/衍射球柱 PIOL

(a) Refractive/diffractive spherocylindrical PIOL



(b) 球柱 PIOL

(b) Spherocylindrical PIOL

图 2 不同光波长下的 MTF

Fig. 2 MTF for different wavelengths

图 2(a)、(b)是分别植入所选择的折射/衍射球柱 PIOL 和球柱 PIOL 后,人眼在 3 种波长下的 MTF,其中,实线、长虚线和短虚线分别表示 510 nm、555 nm 和 610 nm 波长下的结果。可见:植入折射/衍射球柱 PIOL 后,不同波长下的 MTF 均较高且差别较小;而植入球柱 PIOL 后,555 nm 下的 MTF 较高,510 nm 和 610 nm 下的 MTF 较低,相差较大。因此,矫正色差后,人眼能同时在多个光波长下获得相似的分辨率,当观察彩色物体时,不同颜色部分的分辨率相似,有利于获得较高的视觉质量。

4 加工

根据二元面的位相表达式(3),当仅取第一项时,归一化环带 n 由下式给出:

$$-2\pi n = A_1 \rho^2, \quad (4)$$

第 n 阶的归一化环带半径为:

$$\rho_n = \sqrt{\frac{-2\pi n}{A_1}}, \quad (5)$$

最大环带数为:

$$n_{\max} = \text{Int} \left| \frac{A_1 \rho_{\max}^2}{2\pi} \right|, \quad (6)$$

式中, ρ_{\max} 表示二元面的归一化半径。

环带间隔可以表示成:

$$\Delta\rho_n = \rho_n - \rho_{n-1}, \quad (7)$$

在明视条件下,人眼通过视锥细胞感光,它分辨率高且有色觉,因此色差的影响较大。而在此条件下,正常人眼的瞳孔直径仅为 3 mm 左右,因此加工时不必将 PIOL 整个光学区(6 mm)加工成二元面,而只需对直径略 > 3 mm 区进行加工就完全满足需要。本研究取二元面直径为 4 mm。对于直径 4~6 mm 环行光学区,虽然失去了二元面的屈光度,造成了一定的屈光不正,但是可以选择较小的二次相位系数 A_1 来减小这种屈光不正。同时,该区域只在暗视条件下起作用,在此条件下,人眼通过视杆细胞感光,它没有色觉,且若干个视杆细胞与一个视神经节细胞相连,不可能有较高的分辨率,因此这种屈光不正对视觉质量的影响可以忽略。结合式(4)~(7),可以求得所设计的折射/衍射球柱 PIOL 的最大环带数为 8,

若每环带刻蚀 8 个台阶(衍射效率可达 94.9%),二元面的特征尺寸为最边缘环带间隔的 $\frac{1}{8}$,其值为 14.42 μm ,现有的加工条件是完全可以实现的^[11]。

5 结 论

本文运用个性化眼模型,设计了基于衍射光学的折射/衍射球柱 PIOL,同时矫正了人眼的离焦、像散和色差,显著提高了白光光学质量,同时改善了非中心波长下的光学质量。最后结合人眼在明、暗条件下的不同,讨论了二元面尺寸和加工问题。

个性化眼模型还能够用来设计矫正其他像差的 PIOL,同时还可以用来评估植入 PIOL 后人眼的光学性能,以及手术中各类偏差对光学质量的影响,是预测植入 PIOL 后人眼视觉质量的有力工具。

参考文献:

- [1] 王幼生,廖瑞瑞,刘泉,等. 现代眼视光学[M]. 广州:广东科技出版社,2004.
WANG Y SH, LIAO R R, LIU Q, et al.. *Modern Optometry*[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [2] MORRIS G M, NORDAN T L. Phakic Intraocular Lens; the new focus in refractive surgery [J]. *Optics and Photonics News*, 2004, 15(9): 26-31.
- [3] MCLELLAN J S, MARCOS S, PRIETO P M, et al.. Imperfect optics may be the eye's defense against chromatic blur [J]. *Nature*, 2002, 417(5): 174-176.
- [4] NORBERTO L, ROBERT M. New intraocular lens for achromatizing the human eye [J]. *J. Cataract Refract. Surg.*, 2007, 33(3): 1296-1302.
- [5] NAVARRO R, SANTAMARIA J, BESCOIS J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, 2(8): 1273-1281.
- [6] GUO H Q, WANG ZH Q, ZHAO Q L, et al.. Individual eye model based on wavefront aberration [J]. *Optik*, 2005, 116(1): 80-85.
- [7] WANG Y, WANG ZH Q, WANG Y, et al.. Intraocular lens design for treating high myopia based on individual eye model [J]. *Optik*, 2007, 118(1): 88-93.
- [8] HOLLADAY J T, PIERS P A, KORANYI G. A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eye [J]. *J. Cataract Refract. Surg.*, 2002, 18(6): 683-691.
- [9] 郭欢庆,王肇圻,赵秋铃,等. 基于主观式测量人眼波前像差的眼模型研究 [J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1666-1669.
GUO H Q, WANG ZH Q, ZHAO Q L, et al.. Eye model based on wavefront aberration measured subjectively [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34

(11):1666-1669. (in Chinese)

- [10] 王肇圻,张轶楠,傅汝康,等. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. 光学精密工程,2005,13(1):1-4.
WANG ZH Q, ZHANG T N, FU R L, *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive petzval ob-

jective in visible band[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(1):1-4. (in Chinese)

- [11] WANG ZH Q, ZHANG H J, FU R L, *et al.*. Hybrid diffractive-refractive ultra-wide-angle eyepieces[J]. *Optik*, 2002,113(1):159-162.

作者简介:



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年于南开大学获硕士学位,1995年于英国丹第阿巴特大学获博士学位,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



左 彤(1968—),男,天津人,1989年毕业于天津医科大学,医疗技师,从事屈光手术相关的检查工作。E-mail: zuotong5188@vip.sina.com



饶 丰(1983—),男,江西湖口人,博士研究生,2004和2007年于江西师范大学分别获得学士和硕士学位,2007年至今,在南开大学攻读博士学位。主要从事眼视光学方面的研究。E-mail: jxsdrf@yahoo.com.cn



赵堪兴(1946—),男,天津人,博士,教授、主任医师,博士生导师,天津市眼科医院院长。1971年毕业于天津医科大学,1986年和1989年于北京医科大学眼科学专业分别获硕士和博士学位。主要从事眼科方面的研究。E-mail: zkx@tjmu.edu.cn



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学士和硕士学位。主要从事视觉矫正临床及其相关基础研究。E-mail: wangyan7143@vip.sina.com