

适用于大范围角膜非球面系数的双区域非球面衍射型人工晶体

谷健达^{1,2}, 刘永基^{1,2*}, 边亚燕^{1,2}, 刘宝凯^{1,2}, 于浩^{1,2}

¹南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300350;

²天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350

摘要 为了使白内障患者在术后获得良好的视觉效果, 提出一种扩展焦深的双区域非球面衍射人工晶状体(IOL)设计。在Zemax软件中基于无晶状体眼模型对其进行了优化和分析。分析结果表明, 在 $\pm 4^\circ$ 的视场内, 从0.75 m到无穷远的物距, 佩戴此人工晶体的人眼模型在550 nm波长、2.5 mm瞳孔直径的条件下调制传递函数(MTF)值在空间频率为50 cycles \cdot mm⁻¹时保持在0.30以上。对角膜非球面系数的变化进行了蒙特卡罗分析, 结果表明, 当角膜非球面系数在-0.70~0.60的范围内变化时, 从0.75 m到无穷远的物距, 空间频率为50 cycles \cdot mm⁻¹处约有90%的MTF大于0.29。此外, 理论分析表明, 所设计的人工晶体在不同瞳孔和白光照明的情况下, 其成像性能基本保持稳定。

关键词 光学设计; 人工晶体; 角膜非球面系数; 调制传递函数

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1022001

A Dual-Area Aspheric Diffractive Intraocular Lens for Large Corneal Asphericity Variation

Gu Jianda^{1,2}, Liu Yongji^{1,2*}, Bian Yayan^{1,2}, Liu Baokai^{1,2}, Yu Hao^{1,2}

¹Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;

²Tianjin Key Laboratory of Micro-Scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China

Abstract To obtain a continuous range of clear vision in pseudophakia, an intraocular lens (IOL) with a dual-area aspheric surface and an extended depth of focus was proposed. The IOL was optimized based on a model of aphakia, and its optical performance was analyzed using Zemax. The modulation transfer function (MTF) values remained > 0.30 at 50 cycles \cdot mm⁻¹ for eyes with a pupil diameter of 2.5 mm and object distance ranging from 0.75 m to infinity at a full field of view of $\pm 4^\circ$ and wavelength of 550 nm. Monte Carlo analysis showed that the MTF value at 50 cycles \cdot mm⁻¹ was > 0.29 , with a probability of 90% for eyes with anterior corneal asphericity ranging from -0.70 to 0.60 when the object distance ranged from 0.75 m to infinity. In addition, theoretical analysis showed that the optical performance remained stable at different pupil diameters and in polychromatic light.

Key words optical design; intraocular lens; corneal asphericity; modulation transfer function

OCIS codes 220.2740; 220.1250; 330.4460; 330.1070

1 引 言

由晶状体混浊引起的白内障是失明和视力障碍的主要诱因, 将人工晶状体(IOL)植入人眼置换病变的晶状体来恢复视力是白内障的主要治疗手段^[1-2]。但是, 单焦点人工晶体取代晶状体时, 术后

人眼^[3]仍看不清特定距离外其他位置处的物体, 虽然双焦点和多焦点人工晶状体的设计, 能够提供更多的清晰视物^[4], 但还无法实现连续的清晰视物范围。扩展焦深(EDOF)人工晶体的设计有望在从远到近连续物距范围内提供清晰的图像, 从而使肉眼能够在连续范围内清晰视物。

收稿日期: 2019-12-12; 修回日期: 2020-02-24; 录用日期: 2020-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400)、天津市自然科学基金重点项目(19JCZDJC36600)

* E-mail: yjliu@nankai.edu.cn

有关 EDOF 人工晶体的研究在近年已引起广泛关注。最先提出的可调节人工晶体,运用某些特别的方式,如较为灵活的连接设计、可调的制作材料,试图模拟人眼晶体的调节,但临床研究表明其提供的焦深范围有限^[5-7]。强生(Johnson & Johnson Vision Care, Inc.)公司近来提出的一款具有 1.5 D ($1\text{ D}=1\text{ m}^{-1}$)焦深的 Symphony 人工晶体,已经被众多眼科医院商业化应用于临床视力矫正。应用此款晶体看近处物体时的效果,要比应用多焦晶体时更加清晰。此外, Symphony 晶体的像质在白光与单色光下几乎没有差异,但其设计细节还没有公布。Fernández 等^[8]设计了一款具有大焦深性能的非球面人工晶体,通过建立多重结构的方法直接优化了人工晶体的表面几何参数,基于该晶体可以实现 0.4~5.0 m 物距范围内的视力矫正,且其成像性能基本不随瞳孔尺寸变化而变化。本课题组也进行了相关的研究,樊若愚等^[9]模拟了光剑人工晶体的设计, Wang 等^[10]提出了基于人眼剩余调节力的非球面人工晶体,该晶体均可实现 0~4 D 连续范围内的视力矫正。Jiang 等^[11]提出了一种非球面衍射类的具有 2 个区域的人工晶体,可看清从 0.4~8.0 m 之间的目标物,且视觉质量在 3.0 mm 和 4.5 mm 瞳孔下基本不变,但上述结构的有效光学直径均小于 5 mm,且没有考虑人眼角膜存在的非球面系数差异。Bian 等^[12]提出了一种双区域非球面衍射型人

工晶体,口径可达 6 mm,可以实现 0.66 m 至无穷远景深范围内的连续清晰成像。但其设计所适用的人眼角膜非球面系数范围仅为 $-0.25\sim 0$ 。而临床数据显示,中国人眼角膜前表面非球面系数的范围在 $-0.70\sim 0.60$ 之间,为了使所设计的人工晶体适用于更广的人群,需保证人工晶体植入不同角膜非球面系数的人眼后,其性能保持稳定。

为了解决上述问题,提出了一种基于衍射的非球面人工晶体设计。通过在已建立的眼睛模型中优化人工晶体的参数,其景深范围为无穷远至 0.75 m,有效光学直径为 6 mm,适用的角膜非球面系数范围为 $-0.70\sim 0.60$ 。该人工晶体可以有效地改善远距离和中间距离的成像质量。且该款人工晶体在不同瞳孔、白光照明和不同角膜非球面系数的情况下,其成像性能均能基本保持稳定,具有潜在的应用价值。

2 基本原理

2.1 人眼模型的构建

该眼模型以经典的 Gullstrand-Le Grand 正视近轴眼模型为基础^[13],去掉其人工晶体,建立无晶状体眼模型,如表 1 所示。在设计时,将人工晶体植入该无晶状体眼模型中,根据白内障术后人工晶体的位置数据^[14-15],将人工晶体植入位置设置在角膜后 3.5 mm 处。为了使植入人工晶体的人眼能够清晰成像,调整眼模型的眼轴长度为 23.471 mm。

表 1 无晶状体眼模型结构参数

Table 1 Structural parameters of the aphakia model

Component	Radius /mm	Conic	Thickness /mm	Refractive index	Abbe number
Anterior cornea	7.8	-0.21	0.5	1.376	50.2
Posterior cornea	6.6	0	3.5	1.336	50.2
Pupil	Infinity	0	0	1.336	50.2
Anterior IOL	—	—	—	1.494	57.5
Posterior IOL	—	—	—	1.336	50.2
Retina	-12.5	—	—	—	—

上述眼模型中的角膜前表面非球面系数是根据统计平均结果得出的。但是,对于每只具体的人眼而言,非球面系数存在很大的个体差异。张萌等^[16]对 40~86 岁范围内,404 例老年白内障病人的 558 只人眼结构进行了统计分析,得到老年人眼角膜前表面非球面系数范围为 $-0.70\sim 0.60$,平均值为 -0.21 ± 0.23 ,满足正态分布,其显著水平 $P=0.30$ 。本研究对人工晶体的设计目标是:角膜的非

球面系数在上述范围变化时,人工晶体可提供的成像性能基本不变。因此,在对人工晶体成像效果进行分析时,需要分析上述范围内不同非球面系数对人工晶体成像质量的影响。

2.2 人工晶体的材料和面型

为便于加工,此款人工晶体选用折射率为 1.494,阿贝数为 57.5 的材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),此材料价格较低,是一种成熟的商用材料。

为了实现在 0.75 m 到无穷远范围内清晰成像, 选取的人工晶体的前表面为双区域非球衍射面, 后表面为双区域偶次非球面, 其中衍射面由偶次非球面外加衍射相位结构构成, 表现在矢高上, 即为非球面矢高与衍射相位转换矢高的叠加。在 Zemax 中以多区域非球衍射面型 binary4 实现。

该多区域非球衍射面型可被 n 个径向坐标 A_1, A_2, \dots, A_n 分为 n 个径向区域 ($0 < A_1 < A_2 < \dots < A_n$), 每个区域具有独立的曲率半径、二次项系数、各阶非球多项式系数以及衍射相位系数, 第 j 个区域的面型矢高公式可表述为

$$Z_j(r) = \frac{c_j r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_j)c_j^2 r^2}} + \sum_{i=1}^{N_a} \alpha_{ji} \rho_j^{2i} + Z_0, \quad A_{j-1} < r < A_j, \quad (1)$$

式中: c_j 表示第 j 个区域面型中心处的曲率; r 代表面型上的点距离光轴的径向长度; k_j 代表第 j 个区域的二次曲面项系数; N_a 是非球面系数的项数; α_{ji} 为第 j 个区域的各阶非球项系数; ρ_j 为第 j 个区域的归一化坐标, $\rho_j = r/A_j$; Z_0 是每个区域与前一个区域的矢高偏移值。

各个区域具有独立的上述各项系数和一个矢高偏移值 Z_0 , 此偏移值使得各区域在边界处保持连续, 可表述为

$$Z_0 = Z_{j-1}(A_{j-1}) - Z_j(A_j). \quad (2)$$

各个区域均有一个衍射相位结构, 每个区域具有独立的相位系数, 第 j 个区域的相位可表述为

$$\varphi_j = M_j \sum_{i=1}^{N_p} \beta_{ji} \rho_j^{2i} + \delta_0, \quad A_{j-1} < r < A_j, \quad (3)$$

式中: M_j 是第 j 个区域的衍射级数; N_p 是多项式系数的个数; β_{ji} 表示第 j 个区域的各阶多项式系数; δ_0 表示相邻区域之间的相位偏移值 δ_0 , 其使得相位在相邻区域的边界处保持连续, 可表述为

$$\delta_0 = \varphi_{j-1}(1) - \varphi_j(A_{j-1}/A_j). \quad (4)$$

此设计中选用的区域个数为 2, 即该设计的面型被 2 个径向坐标 A_1, A_2 分为 2 个径向区域 ($0 < A_1 < A_2$), 每个区域具有独立的曲率半径、二次项系数、各阶非球面多项式系数以及衍射相位系数。根据人眼在不同环境中的瞳孔大小以及隐形眼镜的面型分布, 确定了各个区域的径向坐标大小, 其中 $A_1 = 1.5 \text{ mm}$; $A_2 = 3.0 \text{ mm}$ 。

2.3 人工晶体的设计

1) 采用眼睛最敏感的 555 nm 波长, 视角为 0° 的中心视场, 瞳孔直径设为 2.5~4.0 mm, 人工晶体

直径设为 6 mm、厚度设为 0.66 mm, 基础屈光度为 22 D。同时, 考虑到加工能力, 设计过程中非球面系数取到第 5 项。

2) 输入物距 1.50 m, 用方均根 (RMS) 默认评价函数对前表面的曲率半径进行优化, 此时得到物距 1.50 m 时的单焦点透镜, 并将其作为初始结构。

3) 将人工晶体的面型设为衍射面, 并设置内部半口径为 1.5 mm, 外部半口径为 3.0 mm。根据初始结构, 输入两个区域的初始曲率半径。建立不同物距和不同角膜非球面系数的多重结构。设置衍射级数为 0, 建立 RMS wavefront 默认评价函数, 控制人工晶体的边缘厚度不小于 0.5 mm。

4) 对人工晶体的两个区域分别进行优化。优化参数分别包括: 曲率半径、二次项系数, 以及非球面系数 ($\alpha_2 - \alpha_{10}$)。将瞳孔直径设置为 2.5 mm 时, 优化内部区域的各个参数, 使得不同物距下 (1.00~6.00 m) 的调制传递函数 (MTF) 在空间频率 50 cycles · mm⁻¹ 以内均大于 0.2; 再将瞳孔直径设置为 4 mm, 优化外部区域的各个参数, 使得不同物距下 (1.00~6.00 m) 的 MTF 在空间频率 50 cycles · mm⁻¹ 以内均大于 0.1。

5) 改变多重结构中的物距, 如 1.00、0.80、0.75 m, 并设置衍射级数为 1, 重新建立 RMS wavefront 默认评价函数。将瞳孔直径设置为 2.5 mm, 优化人工晶体前表面内部区域 ($r \leq A_1$) 的前 5 个相位系数 $\beta_{11} - \beta_{15}$, 使得不同结构下的 MTF 值在空间频率 50 cycles · mm⁻¹ 以内均大于 0.2。此时就得到了折衍射混合型的人工晶体, 可以实现从 0.75 m 到无穷远景深范围内的清晰成像。

3 设计结果

经过上述优化, 本文得到了一款有效光学区域直径为 6 mm, 中心厚度为 0.66 mm, 边缘厚度为 0.5 mm 的双区非球衍射型晶体, 其有效光学区的侧视图如图 1 所示。

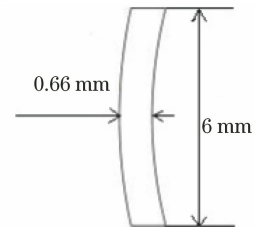


图 1 双区域非球衍射型人工晶体有效光学区的侧视图
Fig. 1 Cross-section profile of the effective optical zone of the dual-area aspheric diffractive IOL

此款人工晶体的前后表面被两个径向坐标 A_1 、 A_2 分为 2 个同心径向区域,其中 $A_1=1.5$ mm, $A_2=3$ mm,其前后表面的面型参数分别如表 2、3 所示。

此款双区域非球面衍射晶体前表面中心内部区

域($r \leq 1.5$ mm)的曲率半径为 18.77095 mm,圆锥曲线系数为 155.39308,相位系数如表 4 所示。外部(第 2 个)区域($1.5 \text{ mm} < r < 3 \text{ mm}$)的曲率半径为 15.08832 mm,圆锥曲线系数为 -38.66047 。

表 2 晶体前表面的面型参数

Table 2 Parameters of the anterior surface of intraocular lens

Zone	α_2	α_4	α_6	α_8	α_{10}
Inner zone ($r \leq 1.5$ mm)	0.22346	0.03220	0.15373	-0.17209	0.01857
Outer zone ($1.5 \text{ mm} < r < 3.0$ mm)	3.06507	2.92466	-65.75065	213.58046	-201.15646

表 3 晶体后表面的面型参数

Table 3 Parameters of the posterior surface of intraocular lens

Zone	α_2	α_4	α_6	α_8	α_{10}
Inner zone ($r \leq 1.5$ mm)	0.18195	-0.02084	0.30258	-0.35517	0.14948
Outer zone ($1.5 \text{ mm} < r < 3.0$ mm)	-3.35135	33.36130	-127.86373	268.44985	-215.58112

表 4 人工晶体前表面内部区域($r \leq 1.5$ mm)的衍射相位系数

Table 4 Diffraction phase coefficients of the inner zone ($r \leq 1.5$ mm) of the anterior surface of intraocular lens

β_{11}	β_{12}	β_{13}	β_{14}	β_{15}
5.97340	-151.39364	487.98294	-642.15233	271.37588

此款双区域非球面衍射晶体后表面内部区域的半径是 -8.32889 mm,圆锥曲线系数是 -1.00652×10^4 ;外部区域的半径是 -13.07590 mm,圆锥曲线系数是 28.84355。

4 结果分析

4.1 设计结果分析

用 Zemax 光学设计软件分析了此款双区域非球面衍射型人工晶体在人眼模型中的成像质量,由

于人眼最敏感的波长为 555 nm,因此首先分析了此波长下的成像质量。人眼的视网膜中心凹区域用来帮助人眼分辨物体的细节,此区域对应于人眼的 $4^\circ \sim 5^\circ$ 视场,因此主要分析此款人工晶体在人眼模型中 0° 和 4° 视场下的成像质量。为分析明视觉下的成像性能,将瞳孔直径 Φ 设定为 2.5 mm,选定了从 6.00 m 到 0.75 m 之间的 9 个物距($L=6.00, 5.00, 4.00, 3.00, 2.00, 1.50, 1.20, 1.00, 0.75$ m),分析了植入此款晶体人眼的 MTF 曲线,如图 2 所示。

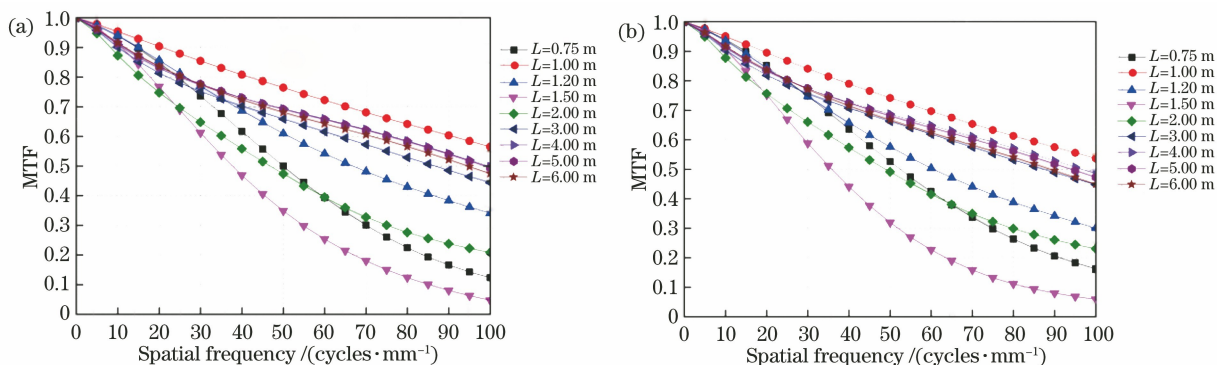


图 2 植入此款设计的人眼在 555 nm 波长下的 MTF 曲线($\Phi=2.5$ mm)。(a) 0° 视场;(b) 4° 视场

Fig. 2 MTF of human eyes with the proposed IOL under a 2.5 mm pupil at wavelength of 555 nm.

(a) 0° FOV; (b) 4° FOV

根据国际标准组织的建议,本研究使用空间频率为 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的 MTF

来评价人工晶体的成像质量^[17-18]。

如图 2 所示,在 0° 视场下,当物距从 0.75 m 到

6.00 m 变化时,MTF 在空间频率 $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处位于 $0.33 \sim 0.78$ 之间,这表明此款大焦深人工晶体在 0° 视场下的整个物距范围($0.75 \sim 6.00 \text{ m}$)内具有良好的成像性能。在 4° 视场下,物距在 $0.75 \sim 6.00 \text{ m}$ 的范围内变化时,MTF 值在空间频率 $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处位于 $0.31 \sim 0.75$ 的范围内,其中 3 m 的物距对应的 MTF 在空间频率 $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处依然处于 0.60 之上。与 0° 视场相比, 4° 视场下的 MTF 值没有出现下降。以上分析表明,此款双区域非球面衍射型人工晶体在 $0^\circ \sim 4^\circ$ 视场的整个物距范

围内具有良好的成像性能。

因为人眼是在白光环境中视物,故有必要分析白光条件下人工晶体的性能。由波长分别为 $470, 510, 555, 610, 650 \text{ nm}$ 组成的复色光分析了植入此人工晶体的人眼模型在明视觉环境下的光学性能。根据人眼的视见函数,分别将这 5 个波长的权重系数设为 $0.091, 0.503, 1.000, 0.503, 0.107$ 。将瞳孔直径设为 2.5 mm ,选定了从 $0.75 \sim 6.00 \text{ m}$ 之间的 9 个物距,作出了植入此款设计的人眼在 0° 和 4° 视场下的成像 MTF 曲线,如图 3 所示。

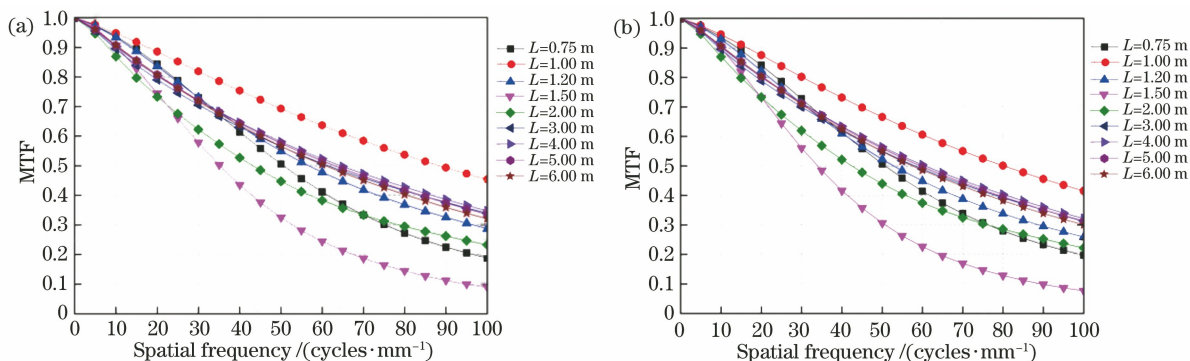


图 3 植入此款设计的人眼在明视觉中复色光条件下各个物距处的成像 MTF 曲线。(a) 0° 视场;(b) 4° 视场

Fig. 3 MTF of human eyes with the proposed IOL in polychromatic light at nine object locations in photonic vision condition.

(a) 0° FOV; (b) 4° FOV

由图 3 可知,在明视觉条件下,植入此人工晶体的人眼模型在 0° 视场下物距从 $0.75 \sim 6.00 \text{ m}$ 的范围内变化时,MTF 值在空间频率为 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处位于 $0.65 \sim 0.86$ 的范围内,在 $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处位于 $0.32 \sim 0.70$ 的范围内。在 4° 视场下物距从 $0.75 \sim 6.00 \text{ m}$ 的整个区间内,MTF 曲线在 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处位于 $0.64 \sim 0.84$ 之间,在 $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处位于 $0.30 \sim 0.67$ 之间。因此与单色光下的成像质量相比,此人眼模型在复色光下的成像质量并没有明显下降。结果表明,所设计的人工晶体的成像质量在 $\pm 4^\circ$ 视场范围内对明视觉条件下色差的影响不敏感。

距下,空间频率为 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处的 MTF 均大于 0.6 , $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处的 MTF 均大于 0.3 ,这表明约 70% 的老年人佩戴此人工晶体后成像效果良好。当角膜非球面系数在全范围($-0.70 \sim 0.60$)内变化时,仅在角膜非球面系数 Q 为 -0.70 ,物距为 0.75 m 的条件下,空间频率为 $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处的 MTF 为 0.2 ,其余各种情况下空间频率为 $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处的 MTF 均不低于 0.3 ,这表明成像质量仍较好,可以接受。此外,分析了 4° 视场下,角膜非球面系数变化对植入人工晶体眼成像质量的影响,结论同 0° 视场下一致。

由于不同个体的角膜非球面系数不尽相同,因此有必要分析在角膜非球面系数发生变化时成像质量的变化。根据角膜非球面系数的统计结果,选定了一 0.44 、 0.02 两个非球面系数,作出对应的 MTF 曲线,以分析约 70% 的老年人佩戴此人工晶体的成像效果,又通过对 -0.70 和 0.60 两个非球面系数下眼模型结果的分析来表征老年人佩戴此人工晶体的成像效果,如图 4 所示。由图 4 可知,当角膜前非球面系数在 $-0.44 \sim 0.02$ 范围内变化时,在不同的物

为了避免因取样较少造成误差,在 0° 视场明视觉条件下,将角膜非球面系数的范围设定为 $-0.70 \sim 0.60$,标准值设定为 -0.21 ,对植入人工晶体人眼模型的几何 MTF($50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$)进行了蒙特卡罗分析。表 5 给出了 MTF 经蒙特卡罗采样分析后的综合结果。由表可知,在各个物距,当非球面系数在选定范围内变化时,空间频率为 $50 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处约有 90% 的 MTF 大于 0.29 ,这表明非球面系数在此范围变化时,人工晶体成像质量未出现明显波动,符合设计要求。

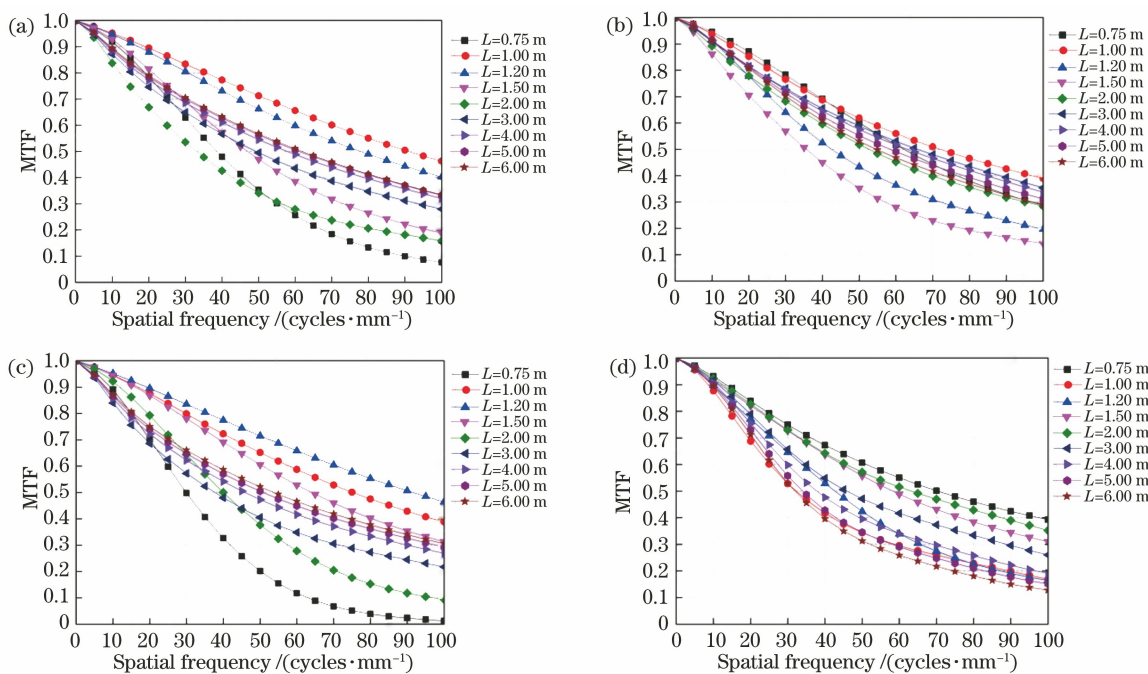


图 4 植入此款人工晶体的具有不同角膜非球面系数的人眼在 0° 视场白光下明视觉环境中不同物距下的 MTF 曲线。

(a) $Q = -0.44$; (b) $Q = 0.02$; (c) $Q = -0.70$; (d) $Q = 0.60$

Fig. 4 MTF of human eyes with the proposed IOL with different corneal aspherical coefficients as a function of the object distance in the bright vision and 0° FOV. (a) $Q = -0.44$; (b) $Q = 0.02$; (c) $Q = -0.70$; (d) $Q = 0.60$

表 5 空间频率为 50 cycles · mm⁻¹ 时 MTF 经蒙特卡罗采样分析后的统计结果

Table 5 Statistical results of MTF after the Monte Carlo sampling analysis at spatial frequency of 50 cycles · mm⁻¹

Sampling ratio	$L = 0.75$ m	$L = 1.00$ m	$L = 1.20$ m	$L = 1.50$ m	$L = 2.00$ m	$L = 3.00$ m	$L = 4.00$ m	$L = 5.00$ m	$L = 6.00$ m
90 %	0.3454	0.6158	0.4286	0.2976	0.3360	0.4903	0.5166	0.5245	0.5285
50 %	0.4766	0.6903	0.5727	0.3733	0.4208	0.5515	0.5736	0.5687	0.5671
10 %	0.5973	0.7139	0.6646	0.4766	0.5151	0.5856	0.5834	0.5781	0.5739

选取了 0.75 ~ 6.00 m 范围内的 9 个物距, 作出植入此人工晶体眼模型在 0° 视场下空间频率为 50 cycles · mm⁻¹ 处的 MTF 值随瞳孔尺寸变化的曲线, 如图 5 所示。由图可知, 当瞳孔直径在 2.25 ~ 4.00 mm 的区间内变化时, 随着瞳孔直径的增加, 50 cycles · mm⁻¹ 处的 MTF 呈下降趋势, 说明人工晶体在间视觉下的成像质量有明显下降, 但 MTF 曲线在整个物距改变过程中都位于 0.15 以上。考虑到人工晶体植入人眼后, 人眼在 50 cycles · mm⁻¹ 处的 MTF 在 0.1 左右, 因此此款设计的结果仍优于临床结果^[19-20]。由此表明植入此人工晶体眼模型的瞳孔直径在 2.25 ~ 4.00 mm 的范围内变化时, 对物体仍能清晰成像。此外, 分析了 4° 视场下, 瞳孔直径变化对植入人工晶体眼成像质量的影响, 结论同 0° 视场下一致。

综上所述, 该款人工晶体在 0.75 m 至无穷远的

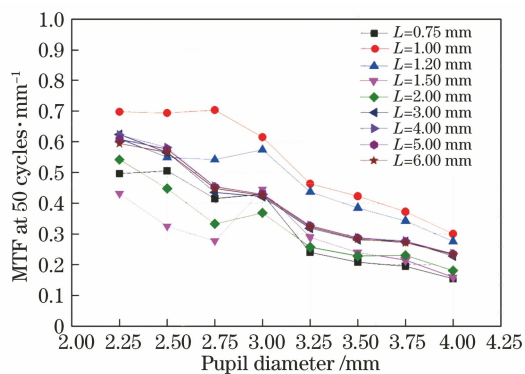


图 5 植入此款人工晶体的人眼在不同物距 0° 视场下 50 cycles · mm⁻¹ 处的 MTF 随瞳孔直径的变化曲线

Fig. 5 MTF of the human eyes with the proposed IOL at 50 cycles · mm⁻¹ for 0° FOV as a function of the pupil diameter at nine object distances

范围内可以提供良好的成像效果, 并且受非球面系数变化的影响较小, 在临床应用中, 此款人工晶体可

以结合单视眼^[21]的方法提供全物距范围内的清晰视力,即一只眼佩戴此人工晶体,另一只眼佩戴视近的单焦点人工晶体,基于两眼之间的模糊抑制,使大脑皮质抑制模糊像而接受另一眼的清晰像,从而在视远和视近下均可获得清晰的图像。但是,此款人工晶体仍存在间视觉下成像质量有明显下降的缺点。

4.2 加工及装配公差分析

为了解加工公差对所设计的人工晶体成像性能的影响,选取了 0.75~6.00 m 物距范围内的 9 个物距,在 $\pm 4^\circ$ 视场内对植入人工晶体人眼模型的几何 MTF($25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$)进行了 200 次蒙特卡罗分析。根据目前加工的精度,人工晶体的公差参数分配如下:厚度公差为 $\pm 0.05 \text{ mm}$,折射率公差为 ± 0.005 ,衡量倾斜量的公差为 $\pm 0.015 \text{ mm}$,度量偏心量的公差为 $\pm 0.015 \text{ mm}$,前后表面的内外两个区域半径的公差为 $\pm 0.008 \text{ mm}$,各阶非球多项式系数的公差为 $\pm 2.2 \times 10^{-5} \text{ mm}$,前表面的衍射相位系数公差为 $\pm 2.2 \times 10^{-5} \text{ mm}$ 。公差分析结果如表 6 所示(MTF

表 6 考虑加工公差时 MTF 经蒙特卡罗采样分析的统计结果(空间频率为 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Table 6 Statistical results of MTF after the Monte Carlo sampling analysis when considering machining tolerances (spatial frequency of $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Sampling ratio	$L=0.75 \text{ m}$	$L=1.00 \text{ m}$	$L=1.20 \text{ m}$	$L=1.50 \text{ m}$	$L=2.00 \text{ m}$	$L=3.00 \text{ m}$	$L=4.00 \text{ m}$	$L=5.00 \text{ m}$	$L=6.00 \text{ m}$
90%	0.6895	0.7727	0.6729	0.5219	0.5925	0.6172	0.6078	0.6008	0.5890
50%	0.7619	0.8229	0.7389	0.5610	0.6172	0.6354	0.6284	0.6199	0.6147
10%	0.8205	0.8573	0.8071	0.5929	0.6340	0.6461	0.6446	0.6392	0.6344

表 7 考虑装配公差时 MTF 经蒙特卡罗采样分析后的统计结果(空间频率为 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Table 7 Statistical results of MTF after the Monte Carlo sampling analysis when considering assembly tolerances (spatial frequency of $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Sampling ratio	$L=0.75 \text{ m}$	$L=1.00 \text{ m}$	$L=1.20 \text{ m}$	$L=1.50 \text{ m}$	$L=2.00 \text{ m}$	$L=3.00 \text{ m}$	$L=4.00 \text{ m}$	$L=5.00 \text{ m}$	$L=6.00 \text{ m}$
90%	0.6198	0.7486	0.6180	0.4189	0.5198	0.5805	0.5887	0.5856	0.5798
50%	0.7306	0.7882	0.7369	0.5211	0.5881	0.6292	0.6370	0.6332	0.6304
10%	0.8102	0.8439	0.8072	0.6086	0.6554	0.6818	0.6830	0.6804	0.6788

由表 7 可知,考虑装配公差时,对于各个物距,人工晶体的植入位置出现 $\pm 0.7 \text{ mm}$ 内的前后偏差,或人工晶体在植入后出现 $\pm 0.3 \text{ mm}$ 范围内的偏心或者产生与视轴 $\pm 3^\circ$ 的范围内的倾斜时,空间频率为 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处约有 90%的 MTF 大于 0.40,这表明人工晶体的成像性能仍然能满足临床的要求。

5 结 论

通过在人眼模型中优化人工晶体的面型参数,

为 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 下的几何 MTF 平均值)。

由表 6 可知,考虑人工晶体加工公差的影响时,对于所有的物距,空间频率为 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处约有 90%的 MTF 大于 0.50,这表明人工晶体对物体轮廓的成像性能仍然良好。根据此结果可知,此款人工晶体可以按照现有的加工水平进行加工,加工公差对其成像效果没有明显的影响。

人工晶体通过手术植入人眼内,其位置会存在一定的前后移动、倾斜和偏心,从而导致人眼的实际成像效果通常低于理论设计效果。因此,根据临床对植入人工晶体后偏心 and 倾斜的统计情况^[15,22],基于蒙特卡罗模拟法对 $\pm 4^\circ$ 视场内人工晶体的前后移动、倾斜和偏心对人眼成像质量的影响进行了装配分析。人工晶体的装配公差参数分配如下:人工晶体沿着垂直于眼轴的方向的偏心公差为 $\pm 0.3 \text{ mm}$,倾斜公差为 $\pm 3^\circ$,植入位置沿光轴前后偏差范围为 $\pm 0.7 \text{ mm}$,其结果如表 7 所示(MTF 为 $25 \text{ cycles} \cdot \text{mm}^{-1}$ 下的几何 MTF 平均值)。

得到了一款双区域非球面衍射型人工晶体,其基础屈光度为 22 m^{-1} ,有效光学区的直径为 6 mm ,中心厚度为 0.66 mm ,边缘厚度为 0.5 mm ,采用了折射率为 1.494、阿贝数为 57.5 的 PMMA 材料。理论分析表明,所设计的人工晶体植入人眼模型后,可以在 $\pm 4^\circ$ 的视场范围内对 0.75~6.00 m 的连续物距范围清晰成像,且其对于白光、不同的瞳孔直径以及 $-0.70 \sim 0.60$ 范围内变化的角膜前表面非球面系数均具有良好的光学性能。以上分析结果表明此款人

工晶体对于眼科应用具有十分重要的实际意义,具有潜在的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Flaxman S R, Bourne R R A, Resnikoff S, et al. Global causes of blindness and distance vision impairment 1990-2020: a systematic review and meta-analysis[J]. *The Lancet Glob Health*, 2017, 5(12): e1221-e1234.
- [2] Yao K, Wu R Y, Xu W, et al. Combined phacoemulsification, foldable intraocular lens implantation and trabeculectomy for cataract patients with glaucoma [J]. *Chinese Journal of Ophthalmology*, 2000, 36(5): 330-333.
姚克, 吴仁毅, 徐雯, 等. 超声乳化白内障吸除折叠式人工晶状体植入联合青光眼小梁切除术[J]. *中华眼科杂志*, 2000, 36(5): 330-333.
- [3] Wang X L. Design of Aspheric Intraocular Lens and Contact lens in Presbyopia Correction and Their Image Analysis [D]. Tianjin: Nankai University, 2016.
王晓琳. 用于老花矫正的非球面人工晶体和隐形眼镜的设计及成像分析[D]. 天津: 南开大学, 2016.
- [4] Packer M, Fine I H, Hoffman R S. Refractive lens exchange with the array multifocal intraocular lens [J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2002, 28(3): 421-424.
- [5] Cumming J S. Postoperative complications and uncorrected acuities after implantation of plate haptic silicone and three-piece silicone intraocular lenses[J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 1993, 19(2): 263-274.
- [6] Cumming J S, Slade S G, Chayet A, et al. Clinical evaluation of the model AT-45 silicone accommodating intraocular lens: results of feasibility and the initial phase of a Food and Drug Administration clinical trial [J]. *Ophthalmology*, 2001, 108(11): 2005-2009.
- [7] Langenbucher A, Huber S, Nguyen N X, et al. Measurement of accommodation after implantation of an accommodating posterior chamber intraocular lens [J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2003, 29(4): 677-685.
- [8] Fernández D, Barbero S, Dorrnsoro C, et al. Multifocal intraocular lens providing optimized through-focus performance [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5303-5306.
- [9] Fan R Y, Liu Y J. A new element for correcting presbyopia: intraocular lens based on light sword element [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(5): 051701.
樊若愚, 刘永基. 矫正老视新方法——光剑人工晶体[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(5): 051701.
- [10] Liu Y J, Wang X L, Wang Z Q. Large-focal-depth artificial lens based on residual accommodation force of human eyes: CN104849782B[P]. 2016-05-18.
刘永基, 王晓琳, 王肇圻. 基于人眼剩余调节力的大焦深人工晶体: CN104849782B[P]. 2016-05-18.
- [11] Jiang L, Liu Y J, Wang X L, et al. Multifocal intraocular lens to correct presbyopia[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10021: 1002115.
- [12] Bian Y Y, Liu Y J, Jiang L. Design of double-zone aspheric diffractive intraocular lens with extended depth of focus[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(9): 093301.
- [13] Xu Q. Physiological optics of the human eye [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2012: 165-199.
徐庆. 眼的光学成像原理[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2012: 165-199.
- [14] Dooley I, Charalampidou S, Malik A, et al. Changes in intraocular pressure and anterior segment morphometry after uneventful phacoemulsification cataract surgery[J]. *Eye*, 2010, 24(4): 519-527.
- [15] Kim M, Park K H, Kim T W, et al. Anterior chamber configuration changes after cataract surgery in eyes with glaucoma [J]. *Korean Journal of Ophthalmology*, 2012, 26(2): 97-103.
- [16] Zhang M. Distribution of astigmatism and analysis of aspheric corneal before cataract surgery for central Plains of age-related cataract crowd[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
张萌. 中原地区年龄相关性白内障人群术前角膜散光的分布及非球面性分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [17] Ophthalmic implants-Intraocular lenses-Part 9: Multifocal intraocular lenses: ISO 11979-9: 2006[S/OL]. [2019-12-01]. <https://www.iso.org/standard/40919.html>.
- [18] Ophthalmic implants-Intraocular lenses-Part 2: Optical properties and test methods: ISO 11979-2: 2014[S/OL]. [2019-12-01]. <https://www.iso.org/standard/55682.html>.
- [19] Ma R. The evaluation by modulation transfer function (MTF) of pseudophakic eyes after phacoemulsification[D]. Wenzhou: Wenzhou Medical University, 2008.
马蓉. 超声乳化术后早期人工晶体眼调制传递函数(MTF)的评价[D]. 温州: 温州医学院, 2008.
- [20] Fan Q Y, Teng Y, Bai J. An evaluation on visual quality for patients with high myopia complicated

with cataract post intraocular lens implantation by using double-pass optical quality analysis system[J].

China Medical Equipment, 2018, 15(4): 57-61.

樊秋阳, 滕妍, 白晶. 双通道视觉分析系统对高度近视合并白内障患者人工晶体植入术后的视觉质量评价[J]. 中国医学装备, 2018, 15(4): 57-61.

[21] Harris M G, Classe J G. Clinieolegal considerations

of monovision [J]. Journal of the American Optometric Association, 1988, 59(6): 491-495.

[22] Eppig T, Scholz K, Löffler A, et al. Effect of decentration and tilt on the image quality of aspheric intraocular lens designs in a model eye[J]. Journal of Cataract & Refractive Surgery, 2009, 35(6): 1091-1100.