

# 利用 Hwey-Lan Liou 模型眼研究的复曲面人工晶状体焦深的变化

杨欣 张斌 刘丹岩 杜颖华 郭从容 崔月先

**【摘要】** 背景 复曲面人工晶状体(IOL)虽然能有效矫正角膜散光,提高患者的视觉质量,但由于其光学结构复杂,故许多条件下其光学质量与球面 IOL 存在差异。目的 评价和比较复曲面 IOL、球面 IOL 和非球面 IOL 在复色光环境下的焦深变化。方法 用 Zemax 光学设计软件建立 Hwey-Lan Liou 模型眼,采用光线追迹法进行计算,评价并比较 Tecnis ZA9003 IOL、SN60AT IOL、Arcysof Toric IOL 在复色光条件下和在不同瞳孔直径条件下的焦深变化,并绘制离焦曲线。结果 瞳孔直径为 3 mm 时,球面和复曲面 IOL 在离焦=0 的情况下均有较好的调制传递函数(MTF),上述 3 种 IOL 的焦深范围非常接近,正负方向的离焦曲线对称。瞳孔直径为 5 mm 时,球面和复曲面 IOL 的 MTF 明显较瞳孔直径为 3 mm 时降低,离焦 MTF 曲线向负离焦方向偏移,焦深较瞳孔直径 3 mm 时减小。非球面 IOL 的离焦 MTF 稳定,不随瞳孔直径的增大而发生明显变化,但焦深明显减小。结论 复曲面 IOL 有与球面 IOL 相近的焦深变化规律,焦深随着瞳孔直径的增大而减小,对负离焦耐受较好。

**【关键词】** 人工晶状体; 散光; 模型眼; 焦深

**Change of the focused depth of biconvex Toric intraocular lens in Hwey-Lan Liou schematic eye** Yang Xin, Zhang Bin, Liu Danyan, Du Yinghua, Guo Congrong, Cui Yuexian. Department of Ophthalmology, Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, China  
Corresponding author: Zhang Bin, Email: hebeizhangbin@aliyun.com

**[Abstract]** **Background** Toric intraocular lens (IOL) has two optical powers in two perpendicular directions, and it could result in many different optic performance from spherical IOL. **Objective** This study was to evaluate the depths of focus of spherical, aspherical and Toric IOL under polychromatic light by Hwey-Lan Liou schematic eye. **Methods** Hwey-Lan Liou schematic eye was created using Zemax software, and the alterations of focusing depth of Tecnis ZA9003 IOL (a spherical IOL), SN60AT IOL (a aspherical IOL), Arcysof Toric IOL were evaluated and compared based on Hwey-Lan Liou schematic eye by ray tracing method. **Results** The modulation transfer function (MTF) was perfect and the depth of defocus was equal under the zero defocus and under the pupil diameter of 3 mm with symmetrical focus curve in plus or minus two-axis in both spherical IOL and Toric IOL. The MTF decreasing with 5 mm pupil compared with that with 3 mm pupil. The MTF was declined under the pupil diameter of 5 mm compared with 3 mm in spherical IOL and Toric IOL along with the decrease of focus depth and the drifting of MTF toward negative axis. However, only the focus depth was decreased but MTF appeared to be stable in aspherical IOL. **Conclusions** Toric IOL and spherical IOL exhibit similar trends in focus depth change, and their focus depths decrease with the increase of pupil diameter. In addition, Toric IOL and spherical IOL show good light focus during minus defocus shifting.

**[Key words]** Lenses, intraocular; Astigmatism; Eye, artificial; Focused depth

角膜散光是一种常见的屈光不正,研究发现15% ~ 30% 的白内障患者角膜散光大于 1.0 D<sup>[1-2]</sup>。散光型

人工晶状体(intraocular lens, IOL)是将散光矫正与球镜度数相结合的一种新型屈光型 IOL,其矫正散光的 Toric 面与球面相融合,也被称为复曲面 IOL。复曲面 IOL 能有效矫正角膜散光,提高患者的裸眼视力,但 Toric IOL 光学结构复杂,在 2 条相互垂直的子午线屈光度不同,使其在光学成像方面的效果仍然存在疑问,

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.04.012

基金项目:河北省 2013 年医学科学研究课题计划项目(冀卫函[2013]167 号)

作者单位:050000 石家庄,河北医科大学第二医院眼科

通信作者:张斌,Email:hebeizhangbin@aliyun.com

如单眼植入 Toric IOL 后,因双眼径线成像不等大而造成融合困难及复曲面 IOL 的径线屈光度差异对术眼焦深、纵向色差的影响。复曲面 IOL 不可避免地存在偏心、倾斜和散光轴位旋转等位置误差,故其成像质量是目前研究的热点。本研究在 Zemax 光学设计软件中建立 Hwey-Lan Liou 模型眼,对不同材料的复曲面 IOL 和球面、非球面 IOL 复色光环境的焦深进行研究。

1 材料与方法

1.1 IOL 光学参数和模型眼的结构参数

1.1.1 IOL 光学参数 (1)复曲面 Arcysof Toric IOL 参数见表 1。(2)球面 IOL 和非球面 IOL 参数见表 2。

1.1.2 Hwey-Lan Liou 模型眼结构参数 Hwey-Lan Liou 模型眼的结构参数<sup>[3]</sup>见表 3。(1)角膜顶点至 IOL 前表面的距离为 4.5 mm。(2)角膜、房水及玻璃体的阿贝数分别为 55.5、50.4 和 51.3<sup>[4]</sup>。

表 1 Arcysof Toric IOL 的光学参数

	Toric T3	Toric T4	Toric T5
屈光度(D)	22.0	+22.0	+22.0
光学材料	丙烯酸	丙烯酸	丙烯酸
折射率	1.55	1.55	1.55
前表面	球面	球面	球面
曲率半径(mm)	19.609	19.609	19.607
厚度(mm)	0.688	0.694	0.699
后表面	Toric 面	Toric 面	Toric 面
曲率半径(mm)	陡峭轴 -18.613 平坦轴 -21.400	陡峭轴 -18.174 平坦轴 -22.472	陡峭轴 -17.836 平坦轴 -23.782
光学直径(mm)	6.0	6.0	6.0
全长(mm)	13.0	13.0	12.0
A 常数	118.4	118.4	119.0
IOL 平面柱镜屈光度(D)	1.50	2.25	3.00
角膜平面柱镜屈光度(D)	1.03	1.55	2.06
阿贝数	37	37	37

注:IOL:人工晶状体

表 2 球面和非球面 IOL 的光学参数

	SN60AT	Tecnis ZA9003
屈光度(D)	+22.0	+22.0
光学材料	丙烯酸	硅胶
折射率	1.550	1.458
前表面	球面	非球面
曲率半径(mm)	19.220	11.043
Q 值		-1.036 13
4 <sup>th</sup> 阶 Q 值		-9.44E-4
6 <sup>th</sup> 阶 Q 值		-1.37E-5
厚度(mm)	0.600	1.164
后表面	球面	球面
曲率半径(mm)	-19.220	-11.043
光学直径(mm)	6.0	6.0
全长(mm)	13.0	12.0
A 常数	118.4	119.0
阿贝数	37	55

注:IOL:人工晶状体

表 3 Hwey-Lan Liou 模型眼的光学参数

	曲率半径(mm)	非球面系数(Q)	厚度(mm)	折射率
角膜前表面	7.77	-0.18	0.50	1.376
角膜后表面	6.40	-0.60	3.16	1.336
晶状体前表面	12.40	-0.94	1.59	1.368-1.407
折射率渐变区	∞		2.43	1.407-1.368
晶状体后表面	-8.10	+0.96	16.70	1.336
视网膜	-12.30	0.00		

1.2 方法

1.2.1 模型眼的建立 在 Zemax 光学设计软件(美国 ZEMAX 公司)中建立 Hwey-Lan Liou 模型眼,并用 IOL 替代自然晶状体。实验中对 512×512 条光线进行追踪,用光线追迹方法计算函数变量,评价 IOL 的光学质量。在模型眼中复曲面 IOL 后表面的平坦轴置于 x 轴,陡峭轴置于 y 轴,各光学面垂直于光轴且中心位于光轴。

各 IOL 均在 550 nm 波长、3 mm 瞳孔直径的条件下,以 Zernik 多项式离焦项  $C_2^0=0$  为目标优化 IOL 后表面到视网膜的长度,使来自于物空间无限远、平行于光轴的光线汇聚于视网膜表面,获得最佳成像质量。瞳孔直径和模拟光线波长改变时不再进行优化。角膜散光的模拟是在 3 mm 瞳孔直径条件下,分别在 +22.0 D 的 Toric T3、T4、T5 IOL 模型眼的角膜顶点前插入一片理想薄透镜( $n=1.376$ ,阿贝数=55.5),以 Zernik 多项式散光项  $C_2^{-2}$  和  $C_2^2$  等于 0 为目标,优化薄透镜的前表面 x 轴和 y 轴曲率半径以建立植入 Toric IOL 的散光模型眼,该模型的角膜散光完全被相应的 Toric IOL 矫正(图 1)。

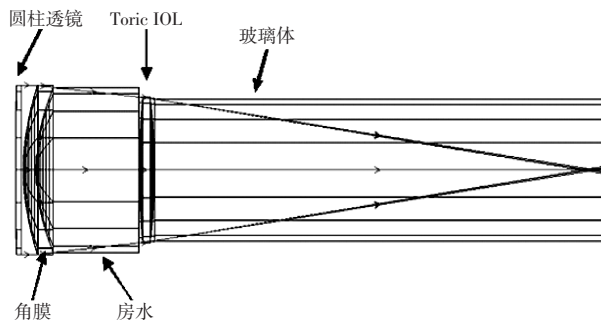


图 1 用 Zemax 光学设计软件建立的复色光环境 IOL 模型眼 注:IOL:人工晶状体

1.2.2 IOL 模型眼的焦深 模拟复色光条件,在 Zemax 软件中设置波长为 470、510、555、610 和 650 nm 的光,其权重系数分别为 0.091、0.503、1.000、0.503 和 0.017<sup>[8]</sup>。Toric IOL 和球面、非球面 IOL 模型眼在复色光条件下模拟空间频率为 6 c/d、焦深为 0.3 个离

焦调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 的参数, 计算不同 IOL 模型眼的离焦 MTF, 瞳孔直径分别设为 3、4 和 5 mm。采用 Originpro 7.5 数据分析和制图软件(美国 OriginLab 公司)绘图。

## 2 结果

### 2.1 复曲面 IOL 离焦 MTF

#### 2.1.1 复曲面 IOL 在不同瞳孔直径下的离焦 MTF

瞳孔直径为 3 mm 时, Toric T3、T4、T5 IOL 在离焦 = 0 的情况下均有较好的 MTF, 焦深的范围基本相同, 离焦曲线在正负方向对称(图 2A)。瞳孔直径为 5 mm 时, Toric T3、T4、T5 IOL 的 MTF 明显较瞳孔直径 3 mm 时降低, 离焦 MTF 曲线向负离焦方向偏移, 在负离焦侧下降缓慢。测定结果显示在大瞳孔时 Toric IOL 对负离焦耐受较好, 焦深较瞳孔直径为 3 mm 时减小(图 2B)。Toric T4 IOL 的离焦 MTF 曲线在瞳孔直径为 3、4 和 5 mm 范围内随瞳孔直径的增大而降低, 逐渐降低。随着瞳孔直径的增大, Toric IOL 的离焦 MTF 曲线向负离焦方向偏移(图 2C)。

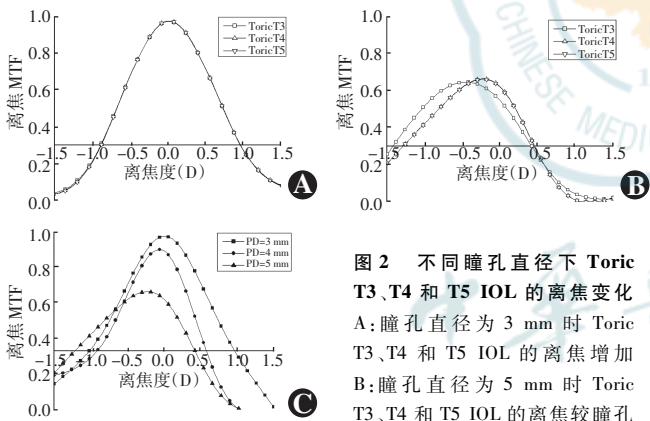


图 2 不同瞳孔直径下 Toric T3、T4 和 T5 IOL 的离焦变化 A: 瞳孔直径为 3 mm 时 Toric T3、T4 和 T5 IOL 的离焦增加 B: 瞳孔直径为 5 mm 时 Toric T3、T4 和 T5 IOL 的离焦较瞳孔直径为 3 mm 时降低 C: Toric

T4 IOL 在瞳孔直径分别为 3、4 和 5 mm 时的离焦 MTF MTF: 调制传递函数 PD: 瞳孔直径

#### 2.1.2 复曲面 IOL 与球面和非球面 IOL 在不同瞳孔直径下的离焦 MTF

瞳孔直径 3 mm 时 Toric T4、Tecnis ZA9003、SN60AT IOL 在聚焦良好的情况下均有较好的 MTF, 正负离焦的范围基本对称。3 种 IOL 的焦深非常接近(图 3A)。瞳孔直径为 5 mm 时, Tecnis ZA9003 IOL 仍有较好的离焦 MTF, 正负离焦的范围基本对称, 但焦深较瞳孔直径为 3 mm 时减小。随着瞳孔直径的增大, Toric IOL 和 SN60AT IOL 的 MTF 明显降低, 2 种 IOL 的离焦 MTF 曲线向负离焦方向偏移, 焦深较瞳孔直径 3 mm 时略有减少。Toric IOL 的离焦特性与球面 IOL 非常接近(图 3B)。

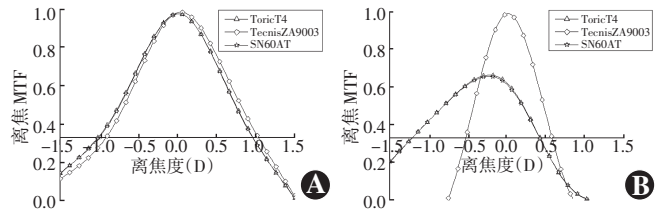


图 3 不同 IOL 在不同瞳孔直径下的离焦 MTF 变化比较 A: 瞳孔直径为 3 mm 时 Toric T4、SN60AT 和 Tecnis ZA9003 IOL 的离焦 MTF 变化曲线接近 B: 瞳孔直径为 5 mm 时 Toric T4 IOL 和 SN60AT IOL 的离焦曲线下降 MTF: 调制传递函数

## 3 讨论

使位于焦点上的物像锐度降低可被耐受并且不引起可察觉的像距的变化称为焦深, 焦深常用屈光度表示, 该屈光度的数值在光学系统的物空间和像空间相等<sup>[5-6]</sup>。景物经过眼的的光学系统与视网膜所成图像实现共轭时, 视网膜像才是绝对清晰的。轻度的离焦使每一点在视网膜的成像是弥散斑, 如果弥散斑的直径小于瑞利判据, 则图像仍然被认为是清晰的。人眼焦深受到很多因素的影响, 如环境照度、对比度、色彩、视标的空间频率等环境因素, 以及受试者的视力、屈光状态、眼轴长度、瞳孔直径、调节、年龄等内在因素。关于瞳孔直径与焦深大小的关系尚存争议, 不同研究方法的实验结果有所不同, 部分学者认为瞳孔直径与焦深的关系与理想光学系统的成像规律相似, 即随着瞳孔直径的增大, 焦深相应地减小<sup>[7-8]</sup>, 但也有研究发现与此不同, 随着瞳孔直径的增加而焦深并未显著减小<sup>[9]</sup>。

IOL 眼则受 IOL 光学结构和在眼内的位置等的影响。人的神经和感知可以耐受轻度的聚焦误差, 即不在焦点, 但在一定焦深内的图像都会被认为是清晰的图像。这一特性可以在一定范围内抵消 IOL 计算造成的误差, 同时也可以提供 IOL 眼的一部分伪调节。

角膜散光极大地影响白内障术后的裸眼视力。白内障手术中植入 Toric IOL 是一种有效减少术后散光的方法<sup>[10]</sup>。Arcysof Toric IOL 是设计用于手术中植入眼内的矫正角膜散光的 IOL, 其前表面为球面结构, 后表面为 Toric 面, 由 2 个相互垂直曲率半径不同的复合曲面构成。IOL 的球镜屈光度由前后表面共同提供, 柱镜屈光度由后表面提供。IOL 光学面的改变提供了 IOL 不同的光学性能, 同时也在特定条件下对光学质量造成影响。本研究使用 Hwey-Lan Liou 模型眼在光学设计软件 Zemax 中模拟复合曲面在矫正角膜散光的同时对 IOL 焦深的影响。该模型眼是 Liou 等<sup>[3]</sup>提出的目前比较全面的一种眼模型, 它的设计基于临床

活体测量数据,且由角膜前后表面、晶状体前后表面、4 个非球面折射面和渐变折射率的晶体内部结构组成。在波长 550 nm 时,其眼轴长度为 23.95 mm,屈光度为 63.35 D;同时模型眼可加入光轴和视轴差异夹角和瞳孔偏心等因素,它不仅光学参数准确,还是一个精密的解剖模型,可以模拟各种条件下的成像质量,如屈光不正性远视或近视、角膜屈光手术前后状态、佩戴框架眼镜或角膜接触镜等<sup>[11-13]</sup>。

本研究表明,球镜屈光度相同,不同散光屈光度的复曲面 IOL 离焦特性基本相同。随着瞳孔增大,复曲面 IOL 离焦 MTF 降低的同时焦深也减小,并且离焦曲线随瞳孔直径的增大向负离焦方向偏移,最佳 MTF 出现在 -0.25 ~ -0.50 D,说明复曲面 IOL 对负离焦耐受较好。非球面的 -0.27  $\mu\text{m}$  球差 Tecnis IOL 完全矫正了角膜的正球差,瞳孔直径增大时,始终保持了较好的 MTF,3 mm 瞳孔直径时与球面 IOL 和 Toric IOL 有相近的 MTF 及焦深,但随着瞳孔直径由 3 mm 增大到 5 mm, Tecnis IOL 仍然保持了很好的 MTF,但离焦 MTF 曲线范围较球面 IOL 明显缩小。球差是人眼主要的高阶像差,由于球差的存在,光线经过屈光系统后不能在视网膜汇聚成理想像点,远轴光线和近轴光线汇聚在光轴上前后不同的点,在视网膜上形成弥散的光斑,在一定程度上降低了成像质量,同时也提供了一定范围的焦深<sup>[14-17]</sup>。复曲面 IOL 与 SN60AT 球面 IOL 的离焦 MTF 的比较结果显示,相同瞳孔直径条件下,SN60AT IOL 和 Toric IOL 的 MTF 非常接近,IOL 的复曲面并未影响到离焦 MTF。Arcysof Toric IOL 是设计用于手术中植入眼内的矫正角膜散光的 IOL,后表面为 Toric 面,由 2 个相互垂直曲率半径不同的复合曲面构成,其各光学面子午线的曲率设计都是以球面为基础,所以在离焦特性上与球面 IOL 非常接近。

本研究通过在模型眼中 IOL 的对比研究表明,复曲面 IOL 与球面 IOL 有相近的焦深及离焦 MTF 特性。由于本研究是基于角膜散光完全矫正的条件下进行的,所以在散光残留及复曲面 IOL 旋转情况下对焦深及离焦 MTF 的影响仍需进一步探讨。

## 参考文献

- [1] Khan MI, Muhtaseb M. Prevalence of corneal astigmatism in patients having routine cataract surgery at a teaching hospital in the United Kingdom [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2011, 37(10): 1751-1755. doi: 10.1016/j.jcrs.2011.04.026.
- [2] De Bernardo M, Zeppa L, Cennamo M, et al. Prevalence of corneal astigmatism before cataract surgery in Caucasian patients [J]. *Eur J Ophthalmol*, 2014, 24(4): 494-500. doi: 10.5301/ejo.5000415.
- [3] Liou HL, Brennan NA. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling [J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 1997, 14(8): 1684-1495.
- [4] Zhao H, Mainster MA. The effect of chromatic dispersion on pseudophakic optical performance [J]. *Br J Ophthalmol*, 2007, 91(9): 1225-1229.
- [5] Atchison D, Smith G. *Optics of the human eye* [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003: 213.
- [6] Ciuffreda KJ. Accommodation, the pupil, and presbyopia [M]// Benjamin WJ. *Borish's clinical refraction*. Saint Louis: Elsevier, 2007: 77-121.
- [7] Charman WN, Whitefoot H. Pupildiameter and the depth-of-field of the human eye as measured by laser speckle [J]. *J Modern Optics*, 1977, 24(12): 1211-1216.
- [8] Nio YK, Jansonius NM, Fidler V, et al. Age-related changes of defocus-specific contrast sensitivity in healthy subjects [J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2000, 20(4): 323-334. doi: 10.1046/j.1475-1313.2000.00539.x.
- [9] Konijnenberg AP, Wei L, Kumar N, et al. Demonstration of an optimised focal field with long focal depth and high transmission obtained with the Extended Nijboer-Zernike theory [J]. *Opt Express*, 2014, 22(1): 311-324. doi: 10.1364/OE.22.000311.
- [10] Iovieno A, Yeung SN, Lichtinger A, et al. Cataract surgery with toric intraocular lens for correction of high corneal astigmatism [J]. *Can J Ophthalmol*, 2013, 48(4): 246-250. doi: 10.1016/j.jcjo.2013.02.011.
- [11] Chen YC, Jiang CJ, Yang TH, et al. Development of a human eye model incorporated with intraocular scattering for visual performance assessment [J/OL]. *J Biomed Opt*, 2012, 17(7): 075009 [2014-06-22]. <http://biomedicaloptics.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1351635>. doi: 10.1117/1.JBO.17.7.075009.
- [12] Camps VJ, Piñero DP, de Fez D, et al. Minimizing the IOL power error induced by keratometric power [J]. *Optom Vis Sci*, 2013, 90(7): 639-649. doi: 10.1097/OPX.0b013e3182927f50.
- [13] Charman WN. Optical modelling of the possible origins of transient refractive changes in diabetic patients [J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2012, 32(6): 485-491. doi: 10.1111/j.1475-1313.2012.00935.x.
- [14] Nio YK, Jansonius NM, Geraghty E, et al. Effect of intraocular lens implantation on visual acuity, contrast sensitivity, and depth of focus [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2003, 29(11): 2073-2081.
- [15] Chen L, Kruger PB, Hofer H, et al. Accommodation with higher-order monochromatic aberrations corrected with adaptive optics [J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2006, 23(1): 1-8.
- [16] Tarfaoui N, Nochez Y, Luong TH, et al. Use of "mix-and-match" aspheric intraocular lenses in cataract surgery to enhance depth of field and stereoscopic performance [J]. *J Fr Ophthalmol*, 2013, 36(1): 55-61. doi: 10.1016/j.jfo.2012.02.017.
- [17] Villegas EA, Alcón E, Mirabet S, et al. Extended depth of focus with induced spherical aberration in light-adjustable intraocular lenses [J]. *Am J Ophthalmol*, 2014, 157(1): 142-149. doi: 10.1016/j.ajo.2013.08.009.

(收稿日期:2014-09-13)

(本文编辑:尹卫靖)