

文章编号:1002-2082(2010)04-0557-05

# 非球面人工晶体设计及人眼瞳孔对其光学性能的影响

朱海丰, 张亚萍, 李书光, 黄柳宾, 刘彦民

(中国石油大学(华东)物理科学与技术学院, 山东 东营 257061)

**摘要:**给出一种非球面人工晶体的设计方法。以Holladay角膜模型为基础,设定其球差大小为非球面人工晶体球差值,并在晶体位置发生移动及不同人眼瞳孔直径下,对所设计的非球面人工晶体光学性能与球面人工晶体进行对比分析。结果表明:当晶体植入人眼位置并且瞳孔直径相同时,设计的非球面人工晶体所在人眼光学系统的MTF,对比敏感度及离焦MTF的改善程度都明显优于传统的球面人工晶体,人眼成像质量均随人眼瞳孔直径的增大而下降;当晶体前移时,晶体所在人眼光学系统的MTF均随瞳孔直径的增大而下降,设计的非球面人工晶体仍表现出优于球面人工晶体的光学性能。

**关键词:**非球面人工晶体;瞳孔直径;成像质量;光学性能

中图分类号:O799;R778

文献标志码:A

## Aspherical IOLs design and influence of pupil on optical performance of AIOL

ZHU Hai-feng, ZHANG Ya-ping, LI Shu-guang, HUANG Liu-bin, LIU Yan-min

(College of Physics, China University of Petroleum (huadong), Dongying 257061, China)

**Abstract:** One design method of aspherical intraocular lens (AIOL) was presented. Based on the corneal model of Holladay, the spherical aberration of the cornea was set as the SA value of the AIOL. The optical performances of aspherical and spherical IOL were analyzed comparatively when the IOL moved forward and the pupil diameter changed. As a result, the MTF, contrast sensitivity and off focus MTF of the eye implanted with aspherical IOL designed by this method were better than those of spherical IOL when the implanted position and the pupil diameter were the same. The imaging quality of the eye decreased with the pupil diameter as the IOL moved forward, the MTF of the eyes decreased with the pupil diameter. However, the aspherical IOL still presented more excellent optical performance than traditional spherical IOL.

**Key words:** aspherical IOL; pupil diameter; imaging quality; optical performance

### 引言

人眼并非理想的光学系统,由于角膜和晶状体的光学性能并非完美,存在的像差限制着人眼的视觉质量。对于年轻人,角膜的正球差(Zernike球差)可以通过晶状体的负球差得到补偿,因此人眼的总

球差较小,人眼具有最佳的视功能。角膜在人的一生中处于一个相对稳定的状态,晶状体的老化是视力和对比敏感度随着年龄下降的主要影响因素<sup>[1-2]</sup>,甚至晶状体有可能会发生白内障病变。目前治疗白内障最有效的方法就是植入人工晶体,如果

收稿日期:2009-11-02; 修回日期:2009-12-15

作者简介:朱海丰(1977—),男,河北唐山人,讲师,主要从事视觉光学方面的研究。E-mail:zhufeng\_1997@163.com

植入的人工晶体能够将眼的像差状态恢复到年轻人的水平,患者就可获得较高的对比敏感度和更好的视觉质量。传统的球面人工晶体本身具有正的 Zernike 球差,屈光行为与老化的人工晶体相似,不能够补偿正性的角膜球差,以致术后人眼的成像质量不够理想。而非球面人工晶体则可以被设计成具有负球差的人工晶体,能够在一定程度上抵消人眼角膜的正球差,使得整个人眼系统的球差较小<sup>[3]</sup>,其光学性能更加接近人类自然晶状体。但由于人眼瞳孔在不同视光条件下将会随之改变,且人眼睫状肌的收缩会使晶体在眼内移动来满足人眼屈光调节的部分需要<sup>[4-5]</sup>,这些因素的变化对人眼成像质量必定会有一定程度的影响。因而研究人眼瞳孔及晶体眼内位置的变化对非球面人工晶体的光学性能的影响,将对非球面人工晶体的设计及临床应用提供一定的理论基础。

## 1 非球面人工晶体设计方法

### 1.1 角膜结构参数

由于个体人眼角膜之间的像差存在着一定的差别,因而非球面人工晶体具有多大的球差值将是一个关键问题。这个问题可以通过将多个人眼角膜球差值进行加权平均来解决。当该值确定后,应以该球差值为基础来设计非球面人工晶体的参数。Holladay 等人测量了 16 人的角膜地形图<sup>[6-7]</sup>,并对每个角膜的波前像差图进行了分析,得到了一个角膜球差的平均值,建立了单折射面的角膜模型,模型结构如表 1 所示。我们以该角膜模型为基础,利用 ZEMAX 光学设计软件求得其球差  $Z_4^0$  为  $0.48 \mu\text{m}$ ,光瞳直径为 6 mm。

表 1 角膜模型结构参数

Table 1 Parameters of the corneal model

折射面	曲率半径 /mm	中心厚度 /mm	折射率 (555 nm)	二次非球面系数
物体		不确定	1.0	
角膜	7.575	3.60	1.3375	-0.14035
虹膜		0.9	1.336	
网膜				

### 1.2 角膜的球差

设定角膜的平均球差值为非球面人工晶体的球差值,为  $-0.48 \mu\text{m}$ ,选取等双凸形球面人工晶体,仍然利用 ZEMAX 光学设计软件优化球面人工

晶体前表面的二次非球面系数,保证非球面人工晶体所具有的负球差为我们预定的  $-0.48 \mu\text{m}$ ,人工晶体材料选为硅凝胶,折射率为 1.427,光瞳直径仍为 6 mm。

### 1.3 晶体光学部直径

屈光度 10D~30D 之间,以 0.5D 为间隔的非球面人工晶体都按照该方法进行设计。从考虑晶体边缘厚度的角度出发,10D~25D 之间人工晶体光学部直径设计为 6 mm,25D~30D 之间人工晶体光学部直径设计为 5.5 mm。

## 2 非球面人工晶体光学性能分析

### 2.1 晶体植入位置和瞳孔直径相同

通过上述方法,我们能够得到不同屈光度值的非球面人工晶体结构参量,但所设计的非球面人工晶体相比于传统的球面人工晶体是否能够提高人眼视觉质量则有待验证。我们根据天津市眼科中心提供的实际人眼参量数据选取 1 例,如表 2 所示。假如患病眼发生了晶状体白内障病变,那么如果要进行白内障手术置换人工晶体,则应先确定要植入的人工晶体屈光度值,目前临床上常用的人工晶体屈光度预算公式当属 SRK-T<sup>[8]</sup>公式比较准确。因此,首先根据患病眼结构参量,利用该公式对球面人工晶体和非球面人工晶体常数 A(该参数为人工晶体固有参数,由生产厂家给定)都取为 118,经计算得到患病眼所需植入 9.563 4D 的人工晶体,预计前房深度 ACD 为 6.635 mm。由于人工晶体的制造一般是以 0.5D 为间隔生产的,因此,对患病眼我们植入的是 9.5D 人工晶体。

表 2 实际人眼结构参数及相应的需置换人工晶体参数

Table 2 The parameters of practicable eye and implanted IOL

	眼轴长度	角膜屈光力 K	预计前房深度	预计 IOL 屈光度	实际 IOL 屈光度	常数 A
眼睛	26.002 mm	46.5D	6.635 mm	9.5634D	9.5D	118

根据上面设计非球面人工晶体的方法,计算得到 9.5D 的非球面人工晶体前表面曲率半径为 19.123 mm,二次非球面系数为  $-65.25$ ,中心厚度为 1.1 mm,边缘厚度为 0.68 mm,折射率为 1.427。根据实际的人眼结构参量,通过 ZEMAX 光学设计软件建立个体人眼模型<sup>[9]</sup>。其中瞳孔直径取 6 mm,工作波长为 555 nm,视场角为  $0^\circ$ 。非球面人工晶体和与其屈光度相同的球面人工晶体都各自植入到

预计的前房深度处,计算出人眼系统的MTF值和对比敏感度。其中对比敏感度的计算是利用MTF值与空间像调制度曲线的比值求得的<sup>[10]</sup>。通过球面与非球面人工晶体所在人眼系统的MTF曲线和对比敏感度,可比较球面和非球面人工晶体的光学性能。

图1为9.5D屈光度的球面和非球面人工晶体植入人眼后眼光学系统的MTF曲线(图2a)、对比敏感度曲线(图2b)和离焦MTF曲线(图2c)。从图2中可以看出,非球面人工晶体所在人眼系统的MTF和对比敏感度都要高于球面人工晶体所在的人眼系统,非球面人工晶体所在人眼系统的离焦量

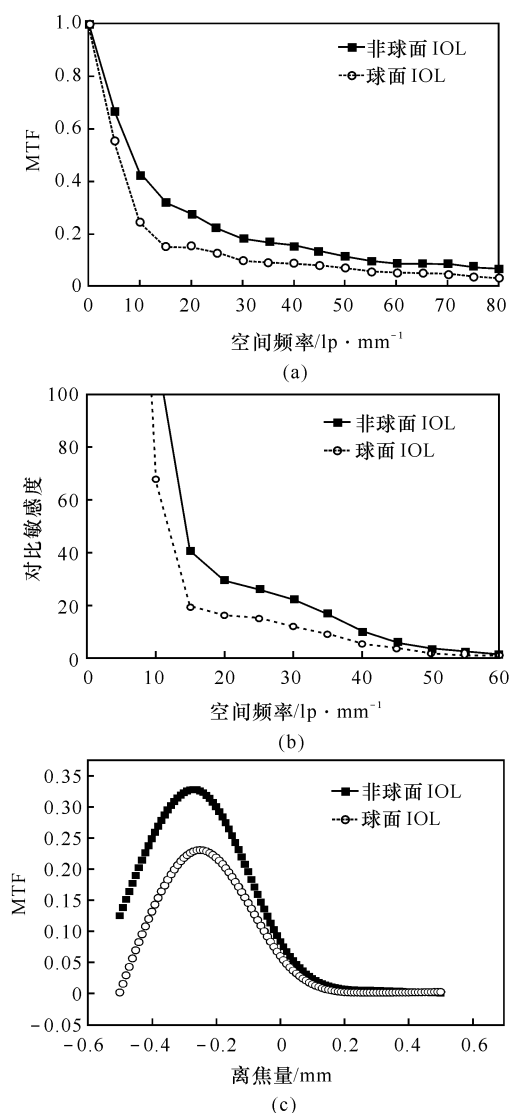


图1 9.5D非曲面人工晶体与球面人工晶体所在人眼系统的MTF,对比敏感度和离焦MTF

Fig. 1 MTF (a), contrast sensitivity (b) and through focus MTF (c) of eye implanted 9.5D aspherical IOL and spherical IOL

在0 mm 和-0.2 mm 时,MTF 都高于球面人工晶体所在的人眼系统。

## 2.2 晶体植入位置和瞳孔直径不同

人眼实施白内障手术后,原有的自然晶状体被摘除,换之以人工晶体,但由于人眼睫状肌收缩能力依然存在,这会使得植入的人工晶体在眼内能够有一定幅度的移动距离。因此,分析晶体移动后人眼瞳孔对晶体光学性能的影响将对非球面人工晶体的设计提供一定的理论参考。

我们以Hwey-Lan Liou 眼模型<sup>[11]</sup>为基础来分析瞳孔直径和晶体移动对非球面人工晶体光学性能的影响。采用Hwey-Lan Liou 眼模型是因为该模型是根据最新的生理解剖学数据建立起来的,其不仅考虑了角膜和晶状体的非球面性,也考虑了晶状体折射率的梯度变化,是到目前为止最为接近眼睛解剖结构的人眼模型。在建立眼模型中最难确定的晶状体参数在本模拟实验中无需考虑。

依据该眼模型结构参数,经计算,该眼模型中需植入屈光度为22D 的人工晶体。根据本文方法所设计的该屈光度值非球面人工晶体结构参数如下:前后表面曲率半径为8.234 3 mm,前表面二次非球面系数为-6.82,晶体折射率为1.427,晶体中心厚度为1.1 mm,晶体边缘厚度为0.166 mm,晶体植入位置ACD为5.10 mm。利用ZEMAX 光学设计软件实现光线追迹,模拟人工晶体对人眼成像质量的影响。其中光瞳直径表示人眼瞳孔大小,工作波长仍为555 nm,视场角为0°。

图2为植入22D 球面人工晶体和非球面人工晶体的人眼MTF 曲线图,晶体植入位置ACD为5.1 mm。从图2中可以看出,人眼瞳孔直径从3 mm 增大到7 mm,人眼的MTF 曲线都下降了,即人眼成像质量随瞳孔直径增大而降低。但对于非球面人工晶体来说,其瞳孔直径为3.0 mm 时的MTF 曲线和瞳孔直径为4.0 mm 时的MTF 曲线几乎重合。相同瞳孔直径条件下的非球面人工晶体人眼系统的MTF 曲线均高于球面人工晶体,表明所设计的非球面人工晶体的光学性能优于球面人工晶体。

图3为晶体在眼内前移0.3 mm 时,球面人工晶体人眼系统和非球面人工晶体人眼系统的MTF 曲线图。从图3中可以看出,对于球面和非球面人工晶体人眼系统,人眼瞳孔直径越大,人眼的MTF 曲线越低,人眼成像质量越差。在相同瞳孔直径条件下,非球面人工晶体人眼系统的MTF 高于球面人工晶体人眼系统的MTF。图4为晶体在眼内前移

0.9 mm 时,球面人工晶体人眼系统和非球面人工晶体人眼系统的MTF 曲线图。从图4 中可以看出,人眼像质随瞳孔变化的结果与人工晶体前移

0.3 mm时的结果一致。可见当晶体在人眼内移动后,非球面人工晶体仍具有优于球面人工晶体的光学性能。

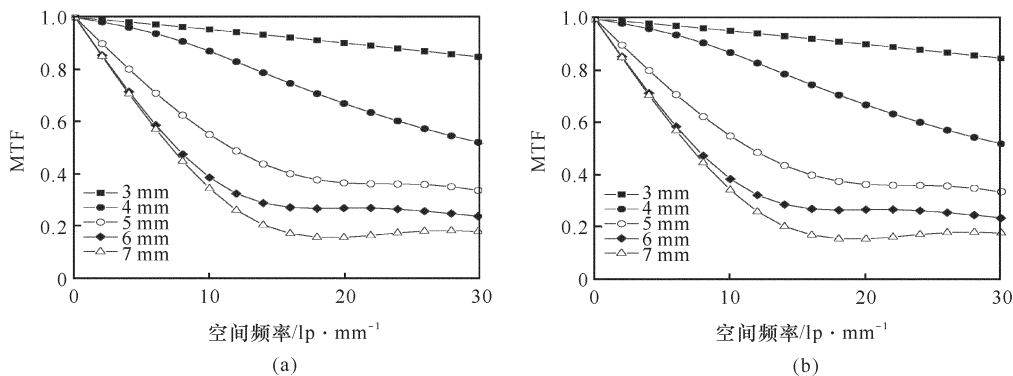


图2 植入球面晶体(a)和非球面晶体(b)后人眼 MTF 随瞳孔直径的变化(ACD=5.10 mm)  
 Fig. 2 MTF of the eye implanted spherical IOL (a) and aspherical IOL (b) with different pupil diameter (ACD=5.10 mm)

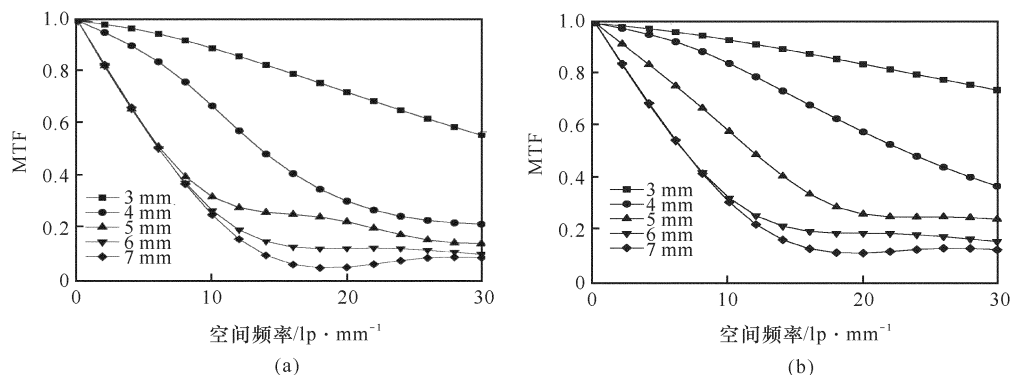


图3 植入球面晶体(a)和非球面晶体(b)人眼 MTF 随瞳孔直径的变化(晶体前移 0.3 mm, ACD=4.80 mm)  
 Fig. 3 MTF of the eye implanted spherical IOL (a) and aspherical IOL (b) with different pupil diameter (forward movement of IOL is 0.3 mm, ACD=4.80 mm)

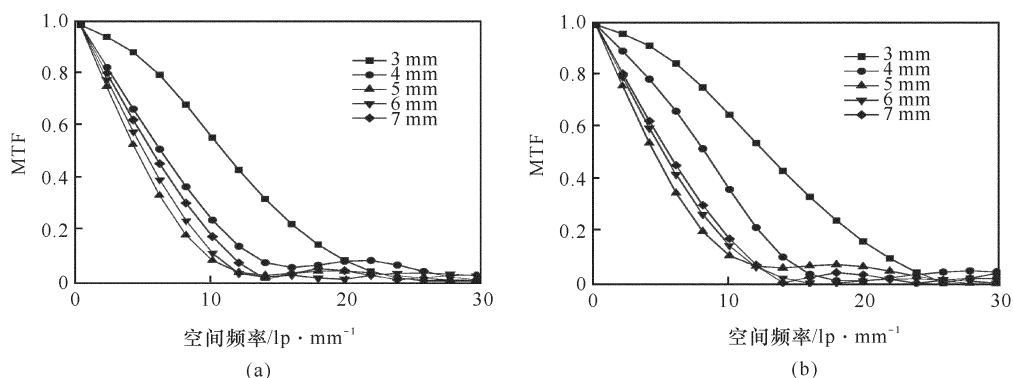


图4 植入球面晶体(a)和非球面晶体(b)后人眼 MTF 随瞳孔直径的变化(晶体前移 0.9 mm, ACD=4.20 mm)  
 Fig. 4 MTF of the eye implanted spherical IOL (a) and aspherical IOL (b) with different pupil diameter (forward movement of IOL is 0.9 mm, ACD=4.20 mm)

图5 为晶体前移不同距离时球面晶体和非球面晶体人眼系统的 MTF 曲线,瞳孔直径为 4.0 mm。从图5 中可以看出晶体前移距离越大,人眼的 MTF 曲线即人眼像质下降越快,但在晶体前

移量相同条件下,非球面人工晶体人眼系统的 MTF 曲线比球面人工晶体的要高,说明在人眼瞳孔直径相同和晶体前移量相同条件下,非球面人工晶体也表现出了优于球面人工晶体的光学性能。

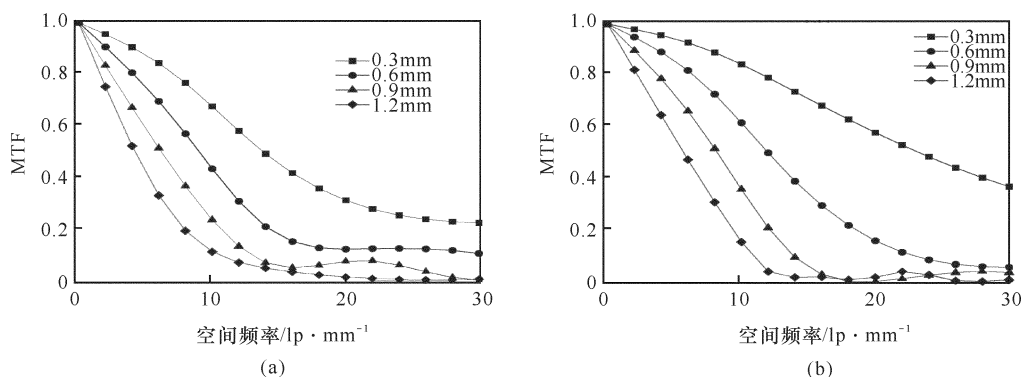


图5 晶体前移不同距离时球面晶体(a)和非球面晶体(b)人眼系统的MTF曲线(瞳孔直径为4.0mm)

Fig. 5 MTF of the eye implanted spherical IOL (a) and aspherical IOL (b) with different forward movement of IOL (pupil diameter is 4.0 mm)

### 3 结论

针对传统球面人工晶体不能补偿人眼角膜所具有的正球差而造成人眼成像质量不高这一不足,给出了非球面人工晶体的设计思路及方法,并针对人眼瞳孔及晶体在眼内位置这些因素的变化,对晶体的光学性能进行了分析。结果表明,当晶体植入人眼位置及瞳孔直径相同时,所设计的非球面人工晶体人眼光学系统的MTF,对比敏感度及离焦MTF的改善明显优于传统的球面人工晶体,人眼成像质量均随人眼瞳孔直径的增大而下降;当晶体前移时,晶体所在人眼光学系统的MTF均随瞳孔直径的增大而下降,但采用本文方法设计的非球面人工晶体仍表现出优于球面人工晶体的光学性能。所得结论为非球面人工晶体的设计及临床应用提供了一定的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] ARTAL P, BERRIO E, GUIRAO A, et al. Contribution of the cornea and internal surface to the change of ocular aberrations with age[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002,19:137-143.
- [2] GUIRO A, REDONDO M, ARTAL P. Optical aberrations of the human cornea as function of age[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000,17:1697-1702.
- [3] LIANG J Z, BERNHARD G, STEFAN G, et al. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of Hartmann Shack wave front sensor[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994,11(7):1949-1957.
- [4] SUGITANI Y, KOMORI T, KATO H R. Apparent accommodation on pseudophakia [J]. *Floia Opt-halmo Jpn.*, 1979,30:326.
- [5] NAKAZAWA M, OHTSUKI K. Apparent accommodation in pseudophakic eyes after implantation of posterior intraocular lenses [J]. *Am. J. Ophthalmol.*, 1983,96:435.
- [6] HOLLADAY J T, PIERS P A, KORANYI G, et al. A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eye [J]. *J. Refract Surg.*, 2002,18(8):683-691.
- [7] GRIFFITH E A, LOUIS D N, STEPHEN S L, et al. Optical performance of 3 intraocular lens designs in the presence of decetration[J]. *J. Cataract Refract Surg.*, 2005,31(3):574-585.
- [8] KRIECHBAUM K, FINDL O, PREUSSNER P R, et al. Determining postoperative anterior chamber depth[J]. *J. Cataract Refract Surg.*, 2003,29(11):2122-2126.
- [9] GUO H Q, WANG Z Q, ZHAO Q L, et al. Individual eye model based on wavefront aberration. *Optik*, 116(2):80-85.
- [10] 王扬, 王肇圻, 郭欢庆, 等. 人眼的高级像差对视功能的影响[J]. *光学学报*, 2005,25(11):1519-1525. WANG Yang, WANG Zhao-qi, GUO Huan-qing, et al. Impact of higher-order wavefront aberrations of human eyes on vision performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005,25(11):1519-1525. (in Chinese with an English abstract)
- [11] LIOU H L, BRENNAN N A. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997,14(8):1684-1695.