

矫正近视和老视的非球面衍射型隐形眼镜

姜 来^{1,2}, 刘永基^{1,2}, 王晓琳^{1,2}, 王肇圻^{1,2}

¹南开大学现代光学研究所, 天津 300071;

²南开大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071

摘要 近视人眼随年龄的增长会出现老视, 为了实现一副眼镜矫正近视并发老视人眼的远、近视力, 设计了一种非球面衍射型隐形眼镜(CL), 通过非球面 CL 矫正近视, 并通过衍射环的设计矫正老视。在一个有 200 度近视和 2 D 调节力的近视并发老视眼模型上优化 CL, 选取的 5 个设计物距介于 250 mm 到无限远。研究了 0° 视场和 ±4° 视场时设计物距下佩戴 CL 的近视并发老视眼模型的光学性能。结果表明, 佩戴该 CL 后, 在明视觉条件下 (2.8 mm 瞳孔直径), 注视不同距离物体时, 人眼视力最低可达 1.3, 最高可达 1.5; 在间视觉条件下 (4.5 mm 瞳孔直径), 除注视无穷远处物体时视力略差 (0.9), 注视其他距离物体时, 视力均在 1.0 以上。此外, 佩戴 CL 后, 眼模型的大视场彗差、像散和畸变均在合理范围内。可见, 所设计 CL 能够在 0~4 D 物距范围内提供良好的光学质量和视觉质量, 且中间距离也实现了高质量成像, 成像性能几乎不受瞳孔变化的影响。

关键词 光学设计; 隐形眼镜; 近视并发老视; 光学性能; 视力

中图分类号 O439; R778 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0122003

Diffraction Aspheric Contact Lens to Correct Myopic-Presbyopia

Jiang Lai^{1,2}, Liu Yongji^{1,2}, Wang Xiaolin^{1,2}, Wang Zhaoqi^{1,2}

¹Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China;

²Key Laboratory of Information Science and Technology of the Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract The myopia will suffer presbyopia with aging. A diffractive aspheric contact lens (CL) is designed, aiming to correct myopic-presbyopia with a pair of glasses. In this design, myopia is corrected by the aspheric surface of the CL and presbyopia is corrected by the diffractive rings. The CL is optimized based on a myopic-presbyopia eye model considering 2.00 diopters of myopia and an accommodation of 2 D. Five object locations covering a range from infinity to 250 mm are considered. The optical properties of the myopic-presbyopia eye model with CL of 0° and ±4° field of view are researched. As a result, with the CL, the visual acuity looking at different locations are in a range from 1.3 to 1.5 in photopic vision (2.8 mm pupil diameter), except slightly worse infinity visual acuity (0.9), and the visual acuity looking at different locations remains above 1.0 in mesopic vision (4.5 mm pupil diameter). Additionally, the aberrations, such as coma, astigmatism and distortion, of the central visual field are reasonable after CL is worn. Therefore, the designed CL provides high optical performance and visual performance for myopic-presbyopia at 0 D and 4 D as well as high optical performance at intermediate distances, and the imaging performance is almost unaffected by the pupil.

Key words optical design; contact lens; myopic-presbyopia; optical performance; visual acuity

OCIS codes 220.1250; 330.1070; 330.7322; 050.1380

1 引 言

近视人眼随年龄的增长会丧失调节能力, 导致近处和远处都不能看清, 即所谓的近视并发老视。对于近

收稿日期: 2016-07-18; **收到修改稿日期:** 2016-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(11474172)

作者简介: 姜 来(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计、视光学方面的研究。E-mail: 2120150298@nankai.edu.cn

导师简介: 刘永基(1977—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事眼视光学、光学设计等方面的研究。

E-mail: jyliu@nankai.edu.cn(通信联系人)

视并发老视人群的视力矫正,传统的方法为佩戴框架眼镜。视远时佩戴一副眼镜,视近时佩戴另一副眼镜,十分不便^[1]。能够同时矫正近视和远视的隐形眼镜(CL)具有实际的应用价值和商业价值。

目前,佩戴隐形眼镜已经被人们普遍接受,国外提出了一些用于矫正老视的多焦点隐形眼镜,主要分为两类:交替型隐形眼镜和同时视型隐形眼镜。交替型隐形眼镜至少有两个屈光度不同的区域,视远时进入瞳孔的光线来自隐形眼镜的一个屈光度区域,视近时进入瞳孔的光线来自隐形眼镜的另一个屈光度区域。这类隐形眼镜的缺陷在于,当进入瞳孔的光线同时来自两个区域时(比如注视中间距离物体),视网膜成像质量降低^[2-3]。

同时视型隐形眼镜至少有两个屈光度,能将特定几个(多为两个)物距上的物体同时成像在视网膜上,可分为基于折射的设计和基于衍射的设计。对于基于折射的设计如 Purevision (Bausch & Lomb)和 OASYS high adds (Vistakon Division of Johnson & Johnson Vision Care),这类隐形眼镜的中心区域用来视远,边缘区域用来视近,或者相反。总的来说,中心和边缘区域提供两个不同的屈光度用来矫正近视与远视,但瞳孔的变化会影响成像质量^[4]。而基于衍射的设计解决了瞳孔变化影响成像的问题^[4],这是由于视网膜所接收的来自远距离和近距离的光占的比例不随瞳孔变化而变化。国外一些专利和文献中虽然阐述了一些衍射设计的原理,但未提及相关的技术细节^[5-7]。

在国内,少有文献提及多焦点隐形眼镜的设计,只有古普塔等^[8]大致提出了一种多焦点隐形眼镜设计的方法,但未提及实现该方法的结构以及通过该方法矫正视力的程度。

上述隐形眼镜的设计,从实用的角度考虑,需要对多个物距甚至是连续的物距成像清晰;另外,由于人眼瞳孔在不同的环境中大小会发生变化,因此隐形眼镜提供的成像性能需要不受瞳孔变化影响,即成像具有瞳孔稳定性。本文提供了矫正近视并发老视的衍射型非球面隐形眼镜的设计方法并对其矫正性能进行了分析。分析结果表明,在5个不同的物距上,所设计的隐形眼镜成像质量高,且其成像性能几乎不受瞳孔影响。

2 基本原理

2.1 个性化眼模型

使用 Gullstrand-Le Grand 眼模型^[9]作为初始结构,设置人眼近视为200度,调节为2 D。视远时,200度近视的眼模型的结构如表1所示。

表1 200度近视的眼模型结构

Table 1 Eye model with 2.00 diopters of myopia

	Radius /mm	Conic	Thickness /mm	Refractive index	Abbe number
Anterior cornea	7.8	-0.250	0.550	1.38	55.8
Posterior cornea	6.5	0	3.050	1.34	52.8
Pupil	Infinity		0		
Anterior lens	10.2	-5.570	4	1.42	49.8
Posterior lens	-6.0	-2.337	17.152	1.34	52.8
Retina	-12.5				

人眼通过调节晶状体的曲率半径来看清不同物距的物体,本文模拟了屈光度为2 D的调节人眼。由于调节力主要依靠晶状体前表面的曲率变化^[10-11],因此考虑调节无穷远处以及2,0.6,0.5 m物距处晶体的前表面半径变化来实现,在视光学中常用聚散度表示物距,以上物距对应的聚散度分别为0,0.5,1.67,2 D。只考虑前表面变化的晶状体提供了与考虑前、后表面曲率以及折射率变化的晶状体相同的调节力与屈光度,简化了眼模型,并且不影响隐形眼镜的设计与佩戴隐形眼镜眼模型光学性能的模拟。具体方法为在 Zemax 光学设计软件中使用多重结构,将物距设为变量,优化晶体前表面的曲率半径,得到不同距离下个性化眼模型晶体前表面的曲率半径,如表2所示。

表2 不同距离下200度近视眼模型晶体前表面的曲率半径

Table 2 Curvature radius of the anterior surface of crystal for eye model with 2.00 diopters of myopia at different locations

Object location /D	0	0.5	1.67	2	4
Anterior surface radius /mm	10.200	9.434	7.937	7.576	7.576

2.2 隐形眼镜的结构

1) 隐形眼镜前表面的基础面型为偶次非球面,用来矫正具有一定调节力的近视并发老视人眼的近视。偶次非球面可表示为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - k)c^2r^2}} + a_1r^4 + a_2r^6 + a_3r^8 + a_4r^{10}, \quad (1)$$

式中 $a_1 \sim a_4$ 依次为 4~10 阶的偶次非球面系数, c 为非球面顶点处的曲率, r 为非球面上任一点到光轴的距离, k 为二次圆锥系数。

2) 矫正近视后,由于近视并发老视人眼的调节力不够,不能看清近距离物体,所以在隐形眼镜的前表面增加了提供附加光焦度的衍射环。能够在矫正近视并发老视人眼近视的同时,提供近距离的清晰视力,衍射环相位描述为

$$\Phi = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i}, \quad (2)$$

式中 N 是级数中多项式系数的序号, A_i 是 ρ 的第 $2i$ 次幂的系数, ρ 是归一化的径向孔径坐标, M 是衍射级次。

3) 隐形眼镜的后表面与人眼角膜贴合,曲率半径与角膜表面一致。

2.3 隐形眼镜的设计

在个性化眼模型上设计隐形眼镜,设计步骤如下:

1) 设计波长设为 555 nm,瞳孔直径设为 4.5 mm,隐形眼镜后表面曲率半径设为 7.8 mm,前表面设为二元面,选用的材料是硬性高透氧隐形眼镜材料,折射率为 1.432,阿贝数为 55.15,光学区(即隐形眼镜的直径)设为 10 mm。

2) 建立多重结构,优化物距设为 0,0.5,1.67,2,4 D,以上物距在二元面上对应的衍射系数为 0,0,0,0,1。

3) 使用 Zemax 光学设计软件中的衰减最小平方法,优化获得隐形眼镜的前表面参数,包括曲率半径、非球面系数、二次圆锥系数以及相位参数获得隐形眼镜的结构。

最终获得中心厚度为 0.2 mm 的隐形眼镜,前表面曲率半径为 8.11 mm,非球面系数为 $a_1 = 1.654 \times 10^{-4}$ 、 $a_2 = -4.354 \times 10^{-5}$ 、 $a_3 = 4.095 \times 10^{-6}$ 、 $a_4 = -7.011 \times 10^{-8}$,二元面系数为 $A_1 = -263.661$ 、 $A_2 = 40.763$ 、 $A_3 = -951.738$ 、 $A_4 = -1350.342$ 、 $A_5 = 10580$,二次圆锥系数为 $c = -0.178$ 。

3 结果与讨论

3.1 结 果

将设计好的隐形眼镜加入近视并发老视眼模型上,并在 Zemax 光学设计软件中分析其 0° 视场下的调制传递函数(MTF)。考虑到人眼需要在不同的亮度环境下工作,为此检验了佩戴隐形眼镜的近视并发老视眼模型在不同瞳孔直径(分别为 2.8,3.5,4.5,6 mm,其中 2.8 mm 是白天老视人眼的瞳孔直径、4.5 mm 是间视觉时的瞳孔直径,而 6 mm 是 50 岁以上老视人眼低照度条件下最大的瞳孔直径,因为人眼的瞳孔直径随年龄的增长会变小^[4],所以对于 50 岁以上的老视患者,其瞳孔直径在低照度下一般不大于 6 mm^[4])下,5 个设计物距下的 MTF。为简洁又不失代表性,给出了 0° 视场下佩戴非球面衍射型隐形眼镜的近视并发老视眼模型在 3.5 mm 瞳孔直径下的 MTF,如图 1(a)所示。可以看出,当瞳孔直径为 3.5 mm 时,MTF 下降缓慢,在 100 cycle/mm 处,所有设计物距上 MTF 值均大于 0.4。图 1(b)给出了在 100 cycle/mm 处,不同瞳孔条件下的 MTF 值。可以看出,在眼睛常用的工作条件,即明视觉条件下(瞳孔直径 2.8 mm),100 cycle/mm 处不同物距下的 MTF 值大于 0.48,表明此时具有很好的成像性能;在间视觉条件下(瞳孔直径 4.5 mm),在各物距下 100 cycle/mm 处的 MTF 值大于 0.17;而在暗视觉条件下(瞳孔直径 6 mm),除无穷远外,其他物距下 100 cycle/mm 处的 MTF 值也均大于 0.15。总体而言,瞳孔变化时,特别是在明视觉条件下,不同物距处成像性能具有很好的稳定性。

为了更加直观地表现佩戴隐形眼镜的近视并发老视眼模型对不同位置的成像清晰度,模拟了 20/20 Sellen E 视网膜像,它是人眼观察视力表的情况。图 2(a)~(d)为 0° 视场下,瞳孔直径为 2.8,3.5,4.5,6 mm 时设计物距上的 20/20 Sellen E 视网膜像。模拟结果与图 1 的 MTF 相对应,不同瞳孔直径下,在远距离

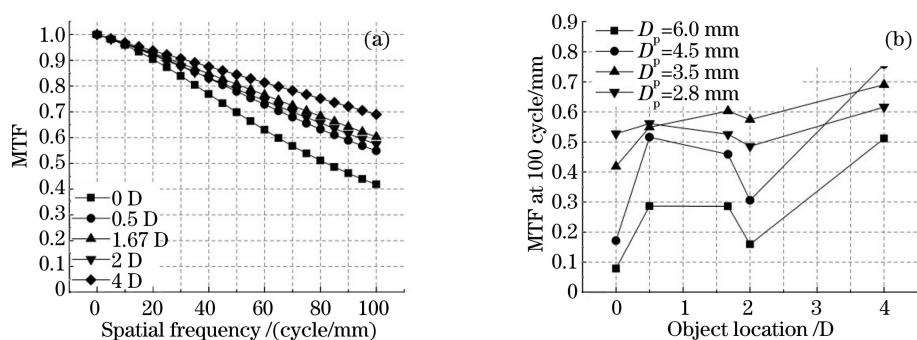


图 1 0°视场下的结果。(a) 3.5 mm 直径瞳孔下的 MTF 曲线;(b) 100 cycle/mm 处的 MTF 数值
Fig. 1 Results of 0° field of view. (a) MTF curves of 3.5 mm pupil diameter; (b) MTF values at 100 cycle/mm

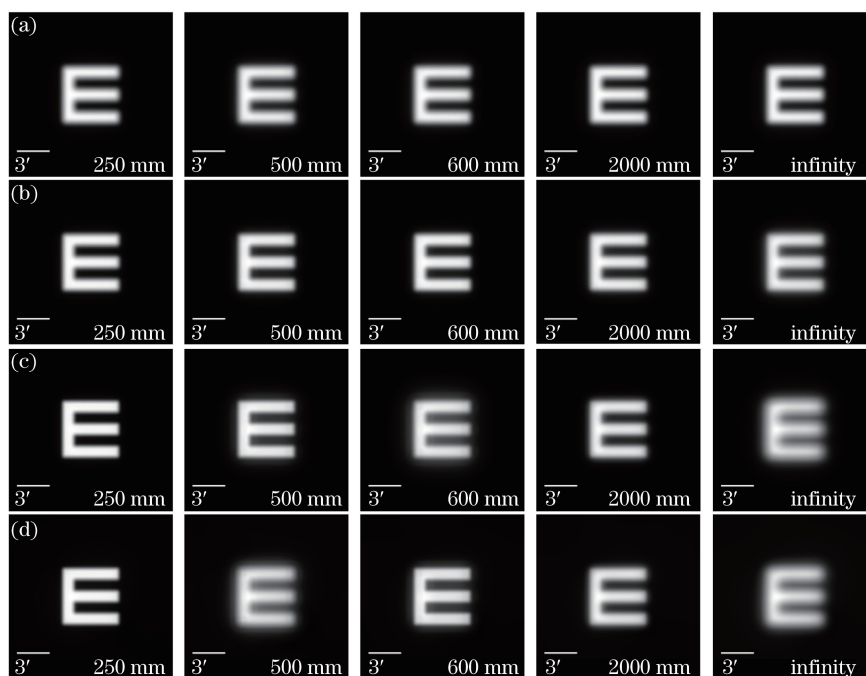


图 2 0°视场下不同设计物距以及无穷远处的 20/20 Sellen E 视网膜像。(a) $D_p=2.8$ mm;
(b) $D_p=3.5$ mm;(c) $D_p=4.5$ mm;(d) $D_p=6.0$ mm

Fig. 2 20/20 Sellen E optograms at different locations and infinity of 0° field of view.
(a) $D_p=2.8$ mm; (b) $D_p=3.5$ mm; (c) $D_p=4.5$ mm; (d) $D_p=6.0$ mm

(0 D)与近距离 0.25 m (4 D)处均获得了较为清晰的视网膜像。而在远距离(0 D)到 0.5 m(2 D)范围内,通过眼模型具有 2 D 的调节力获得了较清晰的视网膜像。值得注意的是,虽然在瞳孔直径 6 mm 时的光学性能比其他瞳孔直径时低,但此时的视网膜像也较为清晰。

MTF 是对人眼成像性能的客观描述,但视觉不仅受人眼的光学性能影响,还受到神经和大脑的影响,临床上通常用视觉敏锐度即视力来反映人眼、神经以及大脑整个系统的特性。根据像空间调制度(AIM)与 MTF 在某空间频率处的交点即可计算人眼的视力,实验室之前已经展开过 AIM 的测量工作,得到了临床上多数人眼的 AIM 统计平均值^[12]。图 3 给出了佩戴非球面衍射型隐形眼镜的近视并发老视眼在 0°视场下,不同瞳孔条件下的视力。可以看出,在眼睛常用的工作条件,即明视觉条件下,不同物距下的视力好于 1.3,表明此时具有很好的视觉性能;在间视觉条件下,除无穷远时视力略差(0.9),其他物距处视力均在 1.0 以上;而在暗视觉条件下,除无穷远外,其他物距下的视力也均好于 0.85。瞳孔变化时,各个物距的视力均高于 0.78,说明不同物距处视觉性能具有很好的稳定性。

由于人眼具有一定的视场范围,为了更好地体现本文设计的隐形眼镜对近视并发老视眼的矫正,分析了佩戴非球面衍射型隐形眼镜的近视并发老视眼模型在 ±4°视场下的 MTF 曲线(子午方向与弧矢方向的平

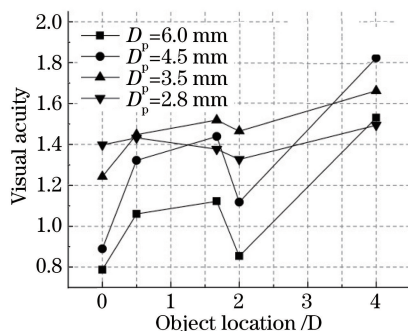


图 3 0°视场下不同瞳孔直径处的视力

Fig. 3 Visual acuity with different pupil diameters of 0° field of view

均值)。±4°视场范围对应的是视网膜中心凹黄斑的大小^[13-14]。结果发现,在±4°视场下,视网膜上的 MTF 与 0°视场下相比下降并不多,也能获得较好的光学质量。如图 4(a)所示,瞳孔直径为 3.5 mm 时,MTF 下降缓慢,在 100 cycle/mm 处设计物距上 MTF 都好于 0.48。如图 4(b)所示,在 100 cycle/mm 处在以上瞳孔直径下的不同设计物距处 MTF 都好于 0.15,瞳孔变化时具有较好的稳定性。

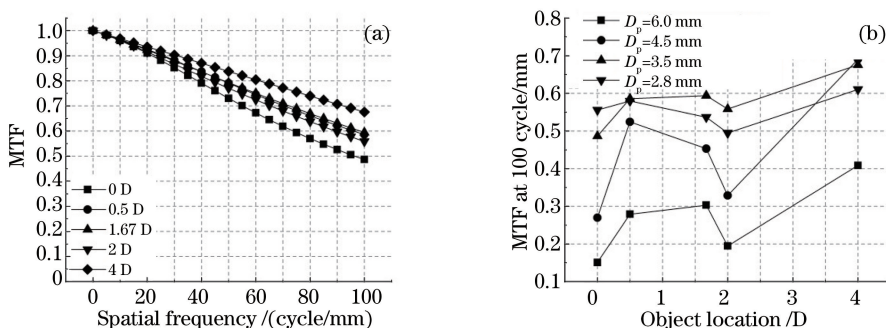


图 4 ±4°视场下的结果。(a) 3.5 mm 直径瞳孔下的 MTF 曲线;(b) 100 cycle/mm 处的 MTF 数值

Fig. 4 Results of ±4° field of view. (a) MTF curves of 3.5 mm pupil diameter; (b) MTF values at 100 cycle/mm

3.2 讨 论

设计了一款可以同时矫正近视和老视的隐形眼镜。在不同的瞳孔直径下,该款隐形眼镜的成像性能稳定,且模拟结果显示,佩戴该隐形眼镜能够对设计物距为 0~4 D 范围内 5 个设计物距清晰成像。0~2 D 的清晰成像范围,是隐形眼镜矫正和人眼调节共同作用的结果。当去掉隐形眼镜只有眼模型时,由于眼模型存在 200 度近视,0~2 D 范围内,即使模型眼具有调节能力,成像的像质也很差。此外在佩戴隐形眼镜的眼模型上,若去掉眼模型的调节,眼模型只对 0 D 物距的物体具有很好的成像像质,在 0~2 D 范围内成像的像质很差。只有在佩戴隐形眼镜眼模型上,加上眼模型的调节,眼模型在 0~2 D 范围内成像的像质才会很好。由此可以看出,设计的隐形眼镜具有一般近视镜的性能,即佩戴近视镜后通过存在的调节看清调节距离内的物体。所设计的隐形眼镜和一般隐形眼镜的显著区别在于,其在提供了一般近视隐形眼镜矫正效果的同时,还能矫正老视。这主要体现在所建立的眼模型只有 2 D 的调节,无法看清阅读距离(4 D 物距)处的物体。而分析表明,该款隐形眼镜对 4 D 处的物体也能够清晰成像,表明实现了对老视的矫正。

在隐形眼镜的实际佩戴过程中,不可避免地会存在隐形眼镜的偏心情况。在偏心存在时隐形眼镜仍保持良好的成像质量,是隐形眼镜实际应用时应该考虑的重要因素。为此分析了隐形眼镜偏心 1 mm 后,佩戴隐形眼镜眼模型的成像质量。由于隐形眼镜后表面半径与角膜前表面相同,偏心后的隐形眼镜还是会与角膜贴合,只是贴着角膜前表面滑动了 1 mm。具体实现方法为将设计好的隐形眼镜无偏心地加入近视并发老视眼模型上,接着以角膜前表面曲率半径的圆心为轴转动,即隐形眼镜在角膜上滑动 7.33°(对应于 1 mm 偏心)即可。计算此时佩戴非球面衍射型隐形眼镜的近视并发老视眼模型的 MTF(子午方向与弧矢方向的平均值),如图 5(a)所示,瞳孔直径为 3.5 mm 时,MTF 下降缓慢,在 100 cycle/mm 处设计物距上 MTF 都优于 0.17。如图 5(b)所示,在 100 cycle/mm 处在以上瞳孔直径下的不同设计物距处 MTF 都优于 0.06。可

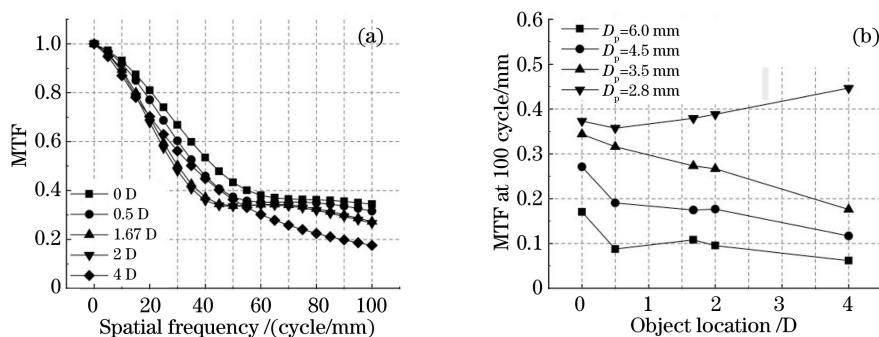


图 5 偏心 1 mm 0°视场下的结果。(a) 3.5 mm 直径瞳孔下的 MTF 曲线;(b) 100 cycle/mm 处的 MTF 数值

Fig. 5 Results with 1 mm off center of 0° field of view. (a) MTF curves of 3.5 mm pupil diameter; (b) MTF value at 100 cycle/mm

见偏心1 mm佩戴隐形眼镜与无偏心佩戴隐形眼镜相比成像质量略有下降,但成像质量也可以接受。因此该款隐形眼镜具有潜在的应用价值。

在模拟分析 MTF 时,由于隐形眼镜是旋转对称的,所以在加入±4°视场的佩戴隐形眼镜眼模型以及引入 1 mm 偏心的佩戴隐形眼镜眼模型后不再对称,因此在子午方向与弧矢方向的 MTF 有所不同。对子午方向与弧矢方向的 MTF 做平均处理是视光学中常用的数据处理手段^[15-16],本文也采用了这种处理方式。

该设计是基于具有一定剩余调节能力的眼模型进行设计的。实际人眼在调节时,晶状体的前、后表面曲率以及折射率均会发生变化。相关的研究表明^[10-11],晶状体的前表面曲率半径的变化在调节中起的作用最为重要,后表面曲率半径的变化并不大。同时,由于晶状体具有梯度折射率,在调节过程中,梯度折射率的分布会发生变化,但实际测量困难,数据匮乏。因此,在设计中,为了简便起见,只通过晶状体前表面曲率半径的变化来模拟人眼的调节。这种简化不会对该设计造成影响。因为不管人眼的调节是通过改变晶状体的哪些参数来实现的,对于人眼的整体效果而言,调节的效果都是使人眼看清近距离的物体。而该模拟关心的是人眼有 2 D 的剩余调节,因此简化调节机制,不会对该设计造成影响。

3.1 节主要对人眼的 0°及±4°视场的成像性能进行了讨论,在人类的视觉活动中,周边视野也起到了重要的作用。因此,对佩戴隐形眼镜后的主要像差进行讨论也具有十分重要的实际意义。分析了佩戴隐形眼镜的眼模型在瞳孔直径为 2.8 mm 和 4.5 mm 时的彗差、像散以及畸变的分布,选取的视场大小为±30°。计算了 Navarro 构建的普适的广角眼光学模型^[17]在相同条件下的像差分布,以便与该计算结果进行比较。Navarro 基于解剖学的数据构建了普适的广角眼光学模型,其像差(彗差、像散以及畸变等)与实验平均数据基本吻合,能够反映一般人眼的大视场性能。图 6(a)~(c)为彗差、像散以及畸变随视场角变化的曲线。由图可以看出,在 2.8 mm 与 4.5 mm 瞳孔直径时,佩戴隐形眼镜的眼模型在中心视野±15°内的彗差、像散均低于普适的广角眼光学模型,表明该隐形眼镜并未带入过多的轴外像差,甚至可能矫正了一定的轴外像差;而畸变曲线也与普适的广角眼光学模型几乎一致,表明佩戴该隐形眼镜没有使轴外像过度变形;而当视野大于中心视野时,佩戴隐形眼镜的眼模型彗差仍低于普适的广角眼光学模型;明视觉情况下(2.8 mm 瞳孔直径),像散

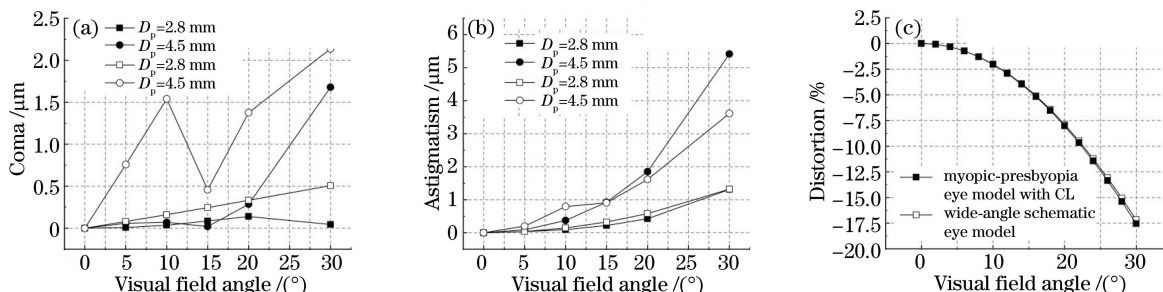


图 6 佩戴隐形眼镜的眼模型和普适的广角眼光学模型在不同瞳孔直径的(a)彗差,(b)像散和(c)畸变

Fig. 6 (a) Coma, (b) astigmatism and (c) distortion of eye model with contact lens and wide-angle schematic eye model of different pupil diameters

略低于普适的广角眼光学模型;而间视觉条件下(4.5 mm 瞳孔直径),像散逐渐高于普适的广角眼光学模型。由此可见,佩戴该隐形眼镜,其轴外像差特别是中心视野的像差情况在一个合理的范围内。

4 结 论

设计了一款非球面衍射型隐形眼镜,该隐形眼镜不但可以矫正多个物距处的视力,而且可在瞳孔变化时稳定成像。对该隐形眼镜矫正性能的分析表明,在明视觉条件下,注视不同距离物体时,人眼视力在 1.3~1.5 之间;在间视觉条件下,注视不同距离物体时,人眼视力好于 0.9。在偏心 1 mm 佩戴隐形眼镜后成像质量略有下降,但在可以接受的范围内。此外,佩戴隐形眼镜后,眼模型的大视场彗差、像散和畸变均在合理范围内。可见,所设计隐形眼镜具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Fan Ruoyu, Liu Yongji. 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.
- [2] Charman W N, Walsh G. Retinal image quality with different designs of bifocal contact lens[J]. *Journal of the British Contact Lens Association*, 1986, 9: 13-19.
- [3] Wesley N K. Analysis of bifocal contact lenses[J]. *Am J Optom Arch Am Acad Optom*, 1971, 48(11): 926-931.
- [4] Charman W N. Developments in the correction of presbyopia I: spectacle and contact lenses [J]. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2014, 34(1): 8-29.
- [5] Freeman M H, Stone J. A new diffractive bifocal contact lens[J]. *Journal of the British Contact Lens Association*, 1987, 10: 15-22.
- [6] Lee C S, Simpson M J. Diffractive multifocal ophthalmic lens: US 5699142[P]. 1997-12-16.
- [7] Zhao H W. Pupil dependent diffractive lens for near, intermediate, and far vision: US20120140166[P]. 2016-06-17.
- [8] Gupta A, Needle S W. Method for designing multi-focus contact lens: CN101563641B[P]. 2013-07-24.
古普塔, 尼德尔. 设计多焦点隐形眼镜的方法: CN101563641B[P]. 2013-07-24.
- [9] Zhai Yi, Wang Zhaoqi, Wang Yan, *et al.* Impact of chromatic and higher-order aberrations of human eyes on vision based on special eye models[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1133001.
翟 奕, 王肇圻, 王 雁, 等. 用特殊眼模型研究人眼像差与色差对视觉的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1133001.
- [10] Xu Guangdi. *Ophthalmology refractive*[M]. Beijing: Military Medicine Press, 2001: 97-107.
徐广第. *眼科屈光学*[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2001: 97-107.
- [11] Plainis S, Charman W N, Pallikaris I G. The physiologic mechanism of accommodation[J]. *Cataract & Refractive Surgery Today Europe*, 2014, 40(4): 23-28.
- [12] Wang W, Wang Z, Wang Y, *et al.* Measurements of AIM for visible wave length based on individual eye model[J]. *Chin Phys Lett*, 2006, 23(12): 3263-3266.
- [13] 聂爱光. *现代黄斑疾病诊断治疗学*[M]. 北京: 北京医科大学中国协和医科大学联合出版社, 1997: 6-15.
- [14] Curcio C A, Sloan K R, Kalina R E, *et al.* Human photoreceptor topography[J]. *Journal of Comparative Neurology*, 1990, 292(4): 497-523.
- [15] Holladay J T, Piers P A, Koranyi G, *et al.* A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eyes[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2002, 18(6): 683-691.
- [16] 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.
- [17] Escudero-Sanz I, Navarro R. Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye model[J]. *J Opt Soc Am A*, 1999, 16(8): 1881-1891.