

用特殊眼模型研究人眼像差与色差对视觉的影响

翟奕^{1,2} 王肇圻^{1,2} 王雁³ 刘永基^{1,2} 张琳³ 何远清^{1,2} 常胜江^{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

³ 天津医科大学天津市眼科医院眼科研究所眼科学与视觉科学重点实验室, 天津 300020

摘要 在光轴和视轴不重合的眼球模型中,设计了一种仅消轴向色差(LCA)而保持横向色差(TCA)不变的元件,建立了仅有TCA的眼模型。进而将实测的人眼高阶像差数据沿视轴方向引入眼模型,用以研究色差和高阶像差的相互作用。建立了三款个性化眼球模型,研究了明视觉状态下高阶像差、色差(LCA+TCA)、LCA和TCA对视觉的影响以及它们之间的相互作用。结果表明:对于多数人眼,色差对视觉的影响远大于高阶像差的影响,并且色差的存在进一步抑制了高阶像差的影响。在色差对视觉的影响中,LCA是具有统治地位的因素;对于多数人眼,TCA的影响可以忽略。

关键词 视觉光学;人眼模型;视觉影响;光学设计

中图分类号 O439; R778 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1133001

Impact of Chromatic and Higher-Order Aberrations of Human Eyes on Vision Based on Special Eye Models

Zhai Yi^{1,2} Wang Zhaoqi^{1,2} Wang Yan³ Liu Yongji^{1,2} Zhang Lin³
He Yuanqing^{1,2} Chang Shengjiang^{1,2}

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

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

³ Tianjin Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Science, Tianjin Eye Hospital and Eye Institute, Tianjin Medical University, Tianjin 300020, China

Abstract In the eye model involving the angle formed by visual and optical axis, an achromatic element eliminating longitudinal chromatic aberration (LCA) only while maintaining transverse chromatic aberration (TCA) is designed and the eye model of TCA-only is constructed. Furthermore, the actual data of human eye's higher-order aberrations are introduced into the eye model along visual axis to investigate the interaction between chromatic and higher-order aberrations. Three kinds of individual eye models are constructed to investigate the impact of higher-order aberrations, chromatic aberration (LCA+TCA), LCA and TCA on vision under the photopic condition, as well as their interactions. The results show that for most of the eyes the impact of chromatic aberration on vision is far greater than that of higher-order aberrations and the presence of chromatic aberration further reduces the impact of higher-order aberrations. Among the impact of chromatic aberration on vision, LCA is a dominant factor, and the impact of TCA can be ignored for most of the eyes.

Key words visual optics; eye model; optical effect on vision; optical design

OCIS codes 330.7326; 330.4595; 220.4830; 330.7325

收稿日期: 2014-05-20; **收到修改稿日期**: 2014-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(81170873, 11104149)

作者简介: 翟奕(1989—),女,硕士研究生,主要从事眼视光学、光学设计等方面的研究。

E-mail: zhaiyi@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 王肇圻(1944—),男,博士,研究员,主要从事眼视光学、光学设计、光折变非线性光学和光信息处理等方面的研究。E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

现代研究表明人眼存在诸多的高阶单色像差,高阶像差的矫正可使视觉质量得到改善。眼球是个大色差的光学系统,在 420~660 nm 波长范围内,其轴向色差(LCA)约为 1.82 D^[1],并且随个体不同无显著变化。横向色差(TCA)随个体不同存在一定的差异,其典型值约为 0.6 arcmin^[2-4]。单色像差和色差共同存在于眼球系统,它们对视觉的影响成为人们关注的热点。Yoon 等^[5]利用自适应光学技术对高阶像差和色差进行了研究。Ravikumar 等^[6]利用复色计算光学评估了不同水平的单色像差对复色图像视觉质量的影响。2008 年,Ravikumar 等^[7]计算了复色视网膜像的质量,以视觉斯特列尔比(VSOTF)作为评价标准评估了高阶像差、LCA、TCA 的作用。

借助合适的人眼模型可研究人眼单色像差、色差对视觉的影响。Autrusseau 等^[8]采用 Thibos & Bradley 眼模型,从视网膜像对 S、M、L 三种视锥细胞的刺激上研究了单色像差和 LCA 对视觉的影响。Zhang 等^[9]、He 等^[10]构建了视轴与光轴相重合、视轴与光轴不重合的两类个性化眼模型,前者只包含 LCA,用于分析 LCA 对视觉的影响;后者同时

表 1 视轴与光轴相重合眼模型的结构参数

Table 1 Structural parameters of the eye model with visual axis accordant to optical axis

| Surface | Radius /mm | Thickness /mm | Refractive index (555 nm) | Abbe number | Semi-diameter /mm | Conic |
|------------------|------------|---------------|------------------------------|-------------|-------------------|-------|
| Anterior cornea | 7.8 | 0.55 | 1.38 | 55.8 | 1.69 | |
| Posterior cornea | 6.5 | 3.05 | 1.34 | 52.8 | 1.67 | |
| Pupil | Infinity | 0.00 | 1.34 | 52.8 | 1.50 | |
| Anterior lens | 10.2 | 4.00 | 1.42 | 49.8 | 1.49 | |
| Posterior lens | -6.0 | 16.55 | 1.34 | 52.8 | 1.27 | -6.74 |
| Retina | -12.5 | | | | 6.00 | |

2.2 第二类眼模型——视轴与光轴有夹角眼模型

为研究 TCA+LCA 对视觉的影响,基于表 1 的眼模型结构参数,构建视轴与光轴有夹角眼模型。视轴与光轴相交于晶状体后表面附近的节点处,其夹角 α 的典型值为颞侧 5°,下方 1.5°^[11]。将其转化为 Zemax 中的视场角 [FOV(θ)],如图 1 所示。沿视轴方向的光线所成的视网膜像高对应于 FOV(θ) 的视场主光线所成的视网膜像高,其转化关系为

$$y = l \tan \theta = l' \tan \alpha, \quad (1)$$

式中 y 为视网膜上的像高, l 为晶状体前表面到视网膜的距离, l' 为晶状体后表面到视网膜的距离。代入 α 的典型值可得视场角 θ 颞侧(y 方向)为 4°,下方(x 方向)为 1.2°。在表 1 结构的眼模型中增加视场

包含 LCA 和 TCA。然而利用目前报道的眼模型均不能单独地分析 TCA 对视觉的影响。

本文从光学系统设计角度出发,提出了一种新型的含有仅消 LCA 元件的眼模型,能够在消除 LCA 的同时保留原有 TCA 不变,用以分析 TCA 对视觉的影响。根据实际测量的人眼高阶像差数据建立了三种眼球模型,用以分析仅 LCA、LCA+TCA 和仅 TCA 对视觉的影响,进而研究了色差和高阶像差的相互作用。

2 三种眼球模型的建立

2.1 第一类眼模型——视轴与光轴相重合眼模型

应用光学设计软件 Zemax 构建视轴与光轴相重合的眼模型,用以研究仅 LCA 的视觉特性。考察明视觉下的视觉特性,以改进的 Gullstrand-Le Grand 眼模型^[10]作为初始结构,设置瞳孔直径为 3 mm,主波长为 555 nm,以晶状体后表面的二次曲面系数及其到视网膜的距离为变量进行优化,优化后的调制传递函数(MTF)曲线接近于衍射极限。表 1 给出了此眼模型的结构参数。在研究 LCA 对视觉的影响中,设置 470,510,555,610,650 nm 5 个波长,其权重符合明视觉下的视见函数曲线。

(1.2°,4°),进行两步优化。

1) 设置角膜前表面面型为泽尼克边缘矢高面,以其第 4~15 项泽尼克系数作为变量进行第一步优化。

2) 将晶状体后表面面型设置为非球面,以其第 4 阶、6 阶、8 阶多项式系数作为变量进行第二步优化。

优化后两个视场的 MTF 曲线均接近衍射极限。如图 2 (a)所示,此时沿 FOV(0°,0°)的方向为光轴(蓝线),沿 FOV(1.2°,4°)的方向为视轴(绿线)。以晶状体后表面中心为旋转中心旋转整个眼模型,使得 FOV(0°,0°)方向为视轴,FOV(-1.2°, -4°)方向为光轴,如图 2 (b)所示。重复上述步骤

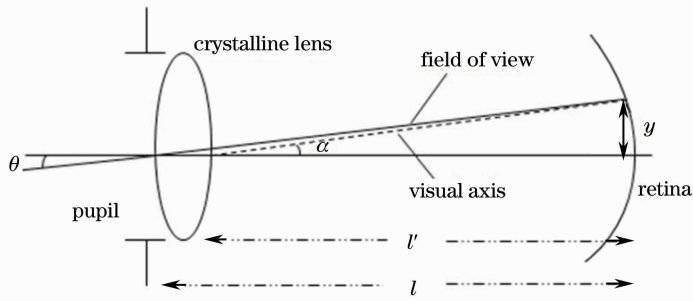


图1 视轴与光轴的夹角 α 和视场角 θ 的转化示意图

Fig. 1 Layout of the relationship between the angle α and angle θ

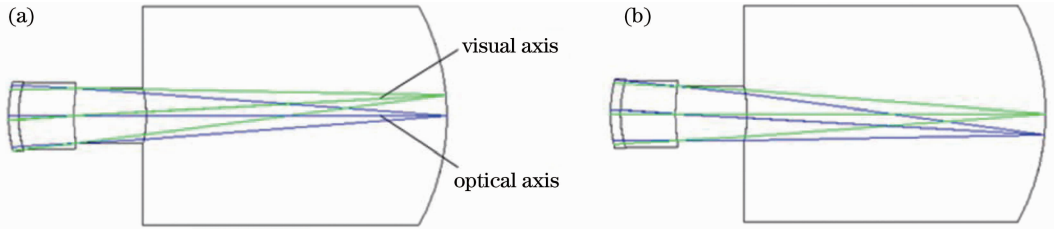


图2 视轴与光轴不重合眼模型的结构示意图。(a)旋转前；(b)旋转后

Fig. 2 Layout of the eye model involving the angle forming by visual and optical axis. (a) Before rotation; (b) after rotation

1)和2)再次进行优化,完成视轴和光轴不重合的眼模型构建。此眼模型在470~650 nm波长范围内,轴向色差约为1.33 D,横向色差约为4.94 μm 。

2.3 第三类眼模型——含仅消LCA元件的视轴与光轴有夹角眼模型

为分析仅TCA对视觉的影响,在图2(a)眼模型的基础上,加入消色差元件构建消LCA的眼模型。消色差元件通常为双胶合镜,根据不同光学材料的不同色散特性,合理分配凹、凸镜的光焦度,可实现消色差的目的。由于消色差元件将引入额外的单色像差,设计中需要考虑单色像差的矫正。衍射光学元件具有优异的消色差功能并具有正屈光度,它与折射元件共同构成的折射/衍射混合系统所引入的单色像差较小^[12]。在Zemax中以二元面表征衍射元件面型,其相位表达式为

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

式中 ρ 为归一化的径向孔径坐标, A_i 为 ρ 的第 $2i$ 次幂系数, M 为衍射级次, N 为多项式系数的序号。二

阶相位系数 A_1 用于矫正系统色差。衍射级次 M 为1。为单独分析TCA对视觉的影响,需要消色差元件在消除LCA的同时保证TCA不变。消色差元件在系统中的位置不同,所起到的作用也不同^[13-14]。设计了三款折射/衍射混合型消LCA元件,分别放置于角膜前、瞳孔前和晶状体后三个典型位置处,有如下设计步骤。

2.3.1 置于角膜前

在图2(a)所示的眼模型角膜前处依次置入一个凸透镜和一个凹透镜,凹透镜距角膜前表面0.1 mm,如图3所示,进行两步优化。

1) 设定有效焦距操作符EFFL为优化函数,以凹凸透镜各面的曲率半径为变量进行优化。

2) 设置凹透镜靠近角膜的一面为二元面,设定矫正LCA的操作符AXCL为优化函数,以二元面的曲率半径和二次相位系数 A_1 为变量再次优化。

优化后残余LCA仅为0.03 D,而TCA却由4.94 μm 增大到8.95 μm ,其结构参数由表2给出。

表2 置于角膜前的消LCA元件结构参数

Table 2 Structural parameters of the LCA corrector located before the cornea

| | | Radius /mm | Thickness /mm | Glass |
|--------------|-------------------|------------|---------------|-------|
| Convex lens | Anterior surface | -21.872 | 0.5 | BK6 |
| | Posterior surface | -6.325 | 0.3 | |
| Concave lens | Anterior surface | -6.165 | 0.4 | F8 |
| | Posterior surface | -17.299 | | |

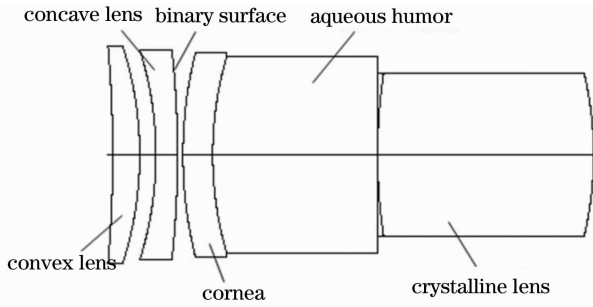


图 3 置于角膜前的消 LCA 元件

Fig. 3 LCA corrector located before the cornea

2.3.2 置于晶状体后

凸镜、凹镜依次放置于眼模型晶状体后,凸透镜距晶状体后表面0.1 mm,如图4所示,进行上述

1)、2)两步优化,其中凹透镜靠近视网膜的一面设为二元面。优化后残余 LCA 仅为 0.004 D,而 TCA 却由 4.94 μm 减小到 1.46 μm ,其结构参数由表 3 给出。

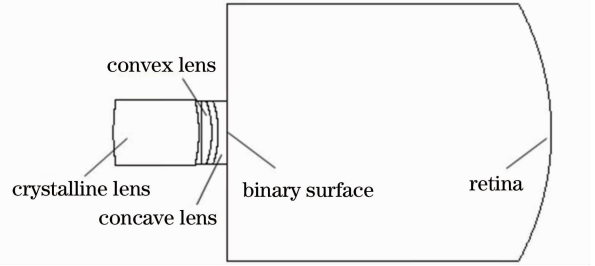


图 4 置于晶状体后的消 LCA 元件

Fig. 4 LCA corrector located after the crystalline lens

表 3 置于晶状体后的消 LCA 元件结构参数

Table 3 Structural parameters of the LCA corrector located after the crystalline lens

| | | Radius /mm | Thickness /mm | Glass |
|--------------|-------------------|------------|---------------|-------|
| Convex lens | Anterior surface | 122.662 | 0.6 | BK6 |
| | Posterior surface | -3.328 | 0.26 | |
| Concave lens | Anterior surface | -3.511 | 0.4 | F8 |
| | Posterior surface | -23.670 | | |

2.3.3 置于瞳孔前

凸镜、凹镜依次放置于眼模型前房中,凹透镜紧靠瞳孔面,如图 5 所示,进行上述 1)、2)两步优化,其中设定凹透镜靠近瞳孔的一面为二元面。调整凸镜和凹镜的厚度以及放置位置,反复进行优化,使得消除 LCA 的同时保证 TCA 不变。优化后残余 LCA 仅为 0.03 D,而 TCA 基本保持不变,为 4.99 μm 。其结构参数由表 4 给出。

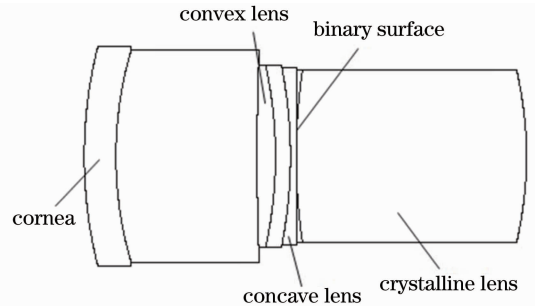


图 5 置于瞳孔前的消 LCA 元件

Fig. 5 LCA corrector located before the pupil

表 4 置于瞳孔前的消 LCA 元件结构参数

Table 4 Structural parameters of the LCA corrector located before the pupil

| | | Radius /mm | Thickness /mm | Glass |
|--------------|-------------------|------------|---------------|-------|
| Convex lens | Anterior surface | 44.781 | 0.32 | BK6 |
| | Posterior surface | -7.328 | 0.26 | |
| Concave lens | Anterior surface | -7.966 | 0.1 | F8 |
| | Posterior surface | 671.905 | | |

由此可以看出,只有将消色差元件放置于孔径光阑(瞳孔)附近,才能在消 LCA 的同时保持 TCA 不变。以图 5 所示的眼模型为基础,在 1)、2)两步优化步骤后,继续下面 3)、4)的步骤构建仅 TCA 眼模型。

3) 由于消色差元件引入了额外的单色像差,需要对角膜前表面和晶状体后表面的面型重新优化,优化后两个视场的 MTF 曲线均接近衍射极限。

4) 对消 LCA 的眼模型进行旋转,使得 FOV ($0^\circ, 0^\circ$)方向为视轴,FOV ($-1.2^\circ, -4^\circ$)方向为光轴,而后再对角膜前表面和晶状体后表面的面型进行优化,完成仅 TCA 的眼模型构建。

3 高阶像差的测量与引入

选取来自 79 个被试者的 127 只眼睛作为研究对象,其中 96 只眼睛来自 48 个被试者。被测眼均

为正常人眼,未患有眼部疾病,未接受过角膜手术。采用 Hartmann-Shack 波前像差仪进行波前像差测量,在暗室条件下,瞳孔自然放大到 5.5~7.5 mm 直径范围。为了考察明视觉下的视觉特性,在 Matlab 中完成从测试时的大瞳孔直径到 3 mm 直径的波前像差数据的转换^[15]。127 只被试眼的高阶像差(3~6 阶泽尼克项)均方根(RMS)值在 0.009~0.097 μm 范围内,其中 RMS 小于 0.01 μm 的被试眼有 3 只;在 0.01~0.019 μm 范围内有 35 只;在 0.02~0.029 μm 范围内有 40 只;在 0.03~0.039 μm 范围内有 32 只;在 0.04~0.09 μm 范围内有 16 只;RMS 大于 0.09 μm 的被试眼有 1 只。根据高阶像差 RMS 值(V_{H-RMS})的分布,选取 RMS 值分别为 0.01、0.04、0.09 μm 的被试眼,用以代表最小水平、正常水平和大水平的高阶像差,分析高阶像差对视觉的影响。

将实测的人眼波前像差数据输入到所建立的三种眼球模型中。为了将高阶像差沿视轴方向[FOV ($0^\circ, 0^\circ$)方向]引入眼模型,在眼模型的角膜前置入一相位面,设置面型为泽尼克边缘相位面,其各项泽尼克系数为相对应的实际人眼的高阶像差值。

4 高阶像差与色差对视觉质量的影响

在视轴与光轴不重合的第二类眼模型中,单色

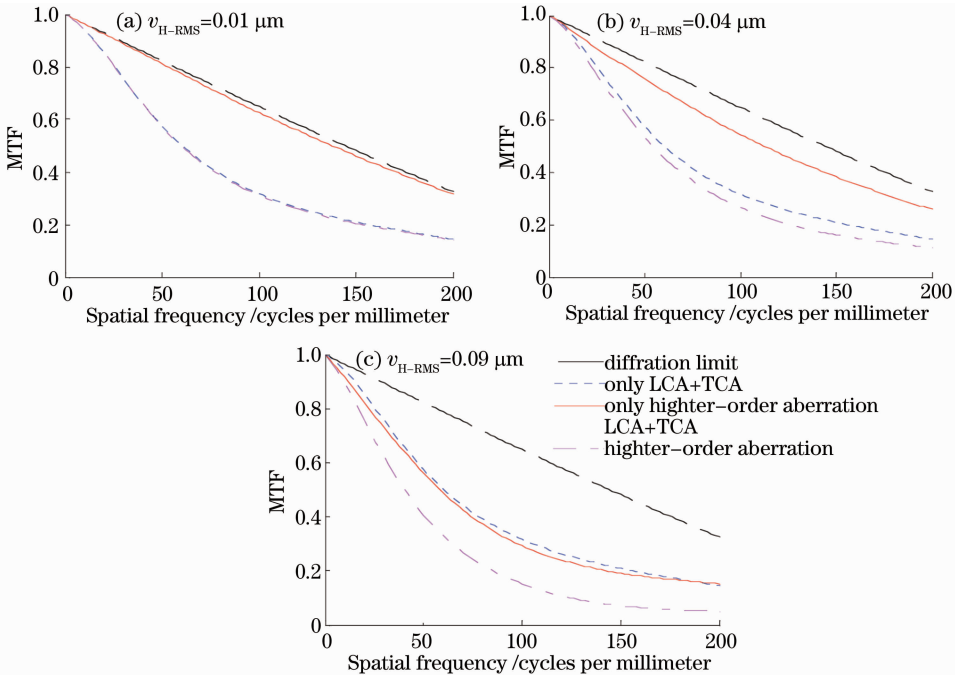


图 7 同时存在高阶像差和色差、仅有高阶像差以及仅有色差的径向平均 MTF 曲线
Fig. 7 Radial averaged MTFs of chromatic together with higher-order aberrations, only higher-order aberrations and only LCA+TCA (dotted lines)

(555 nm)MTF 曲线表示衍射极限,复色 MTF 曲线表征仅色差(LCA+TCA)对视觉的影响。分别引入不同水平的人眼高阶像差,此时各单色 MTF 曲线表征仅高阶像差对视觉的影响,相应的复色 MTF 曲线表征高阶像差和色差同时存在对视觉的影响。图 6 给出了三个典型的仅有高阶像差(V_{H-RMS} 分别为 0.01、0.04、0.09 μm , 红色、深黄色和品红色实线)以及仅有色差(虚点线)时的径向平均 MTF 曲线,虚线表示衍射极限。可以看出,仅色差会严重地衰减 MTF 曲线。高阶像差对 MTF 曲线的衰减会随着其 V_{H-RMS} 值的增大而逐渐增加。当高阶像差增大到 $V_{H-RMS} = 0.09 \mu\text{m}$ 时,其对 MTF 曲线的衰减与

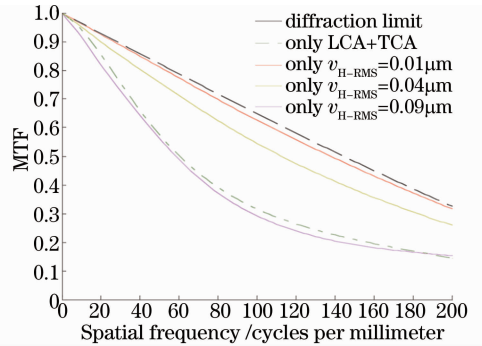


图 6 仅有高阶像差、仅有色差时的径向平均 MTF 曲线
Fig. 6 Radial averaged MTFs of only higher-order aberrations and only LCA+TCA

仅色差时的情形相近。然而本文的人眼统计中,高阶像差 RMS 值达到 $0.09 \mu\text{m}$ 的被试眼只有 1 只,大多数被试眼的 $V_{\text{H-RMS}}$ 值小于 $0.04 \mu\text{m}$ 。由图 6 可见, $V_{\text{H-RMS}}=0.04 \mu\text{m}$ 的高阶像差所引入的 MTF 衰减远小于仅色差所引入的衰减。表明明视觉下色差对视觉的影响远大于高阶像差的影响。

对于实际人眼,高阶像差和色差是同时存在并且相互作用的。图 7 给出了高阶像差水平分别为 $0.01, 0.04, 0.09 \mu\text{m}$ 时,仅有色差(点线)、仅有高阶像差(实线)以及高阶像差和色差均存在(虚点线)三种情况下的径向平均 MTF 曲线,虚线表示衍射极限。从图 7(a)和图 7(b)可以看出,虽然高阶像差对无色差系统的 MTF 有较明显的影响(实线和虚线的比较),但是对有色差系统的 MTF 影响很小(点线和点虚线的比较),这是色差与高阶像差作用的结果。考虑到多数被试眼的高阶像差 RMS 值小于 $0.04 \mu\text{m}$,对于实际人眼高阶像差的矫正通常是不必要的。从图 7(c)可以看出,对于极少数的人眼,其高阶像差的单独作用可以和色差的作用相比拟,此时高阶像差对视觉的影响才表现出来。

图 8 给出了仅 LCA(红色点线)、仅 TCA(蓝色点线)、LCA + TCA(虚点线)和仅高阶像差(RMS 值分别为 $0.01, 0.04$ 和 $0.09 \mu\text{m}$,品红色、深黄色和

灰色实线)的径向平均 MTF 曲线,虚线表示衍射极限。可以看出仅 LCA 所引入的衰减远大于仅 TCA 所引入的衰减,特别是在中、低空间频率段,而中、低空间频率段对于视觉更具重要性。仅 LCA 的 MTF 曲线与 LCA + TCA 的 MTF 曲线非常接近,表明在存在 LCA 的条件下 TCA 的作用可以忽略。在和仅高阶像差($V_{\text{H-RMS}}=0.04 \mu\text{m}$)的比较中可以看出,仅 LCA 所引入的衰减远大于高阶像差所引入的衰减,仅 TCA 所引入的衰减近似于高阶像差所引入的衰减。

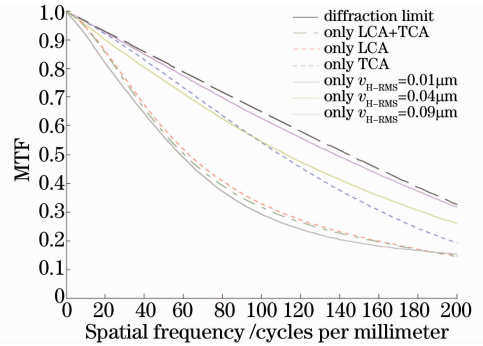


图 8 仅有高阶像差、仅有色差、仅有 LCA 以及仅有 TCA 时的径向平均 MTF 曲线

Fig. 8 Radial averaged MTFs of only higher-order aberrations, only LCA + TCA, LCA-only and TCA-only

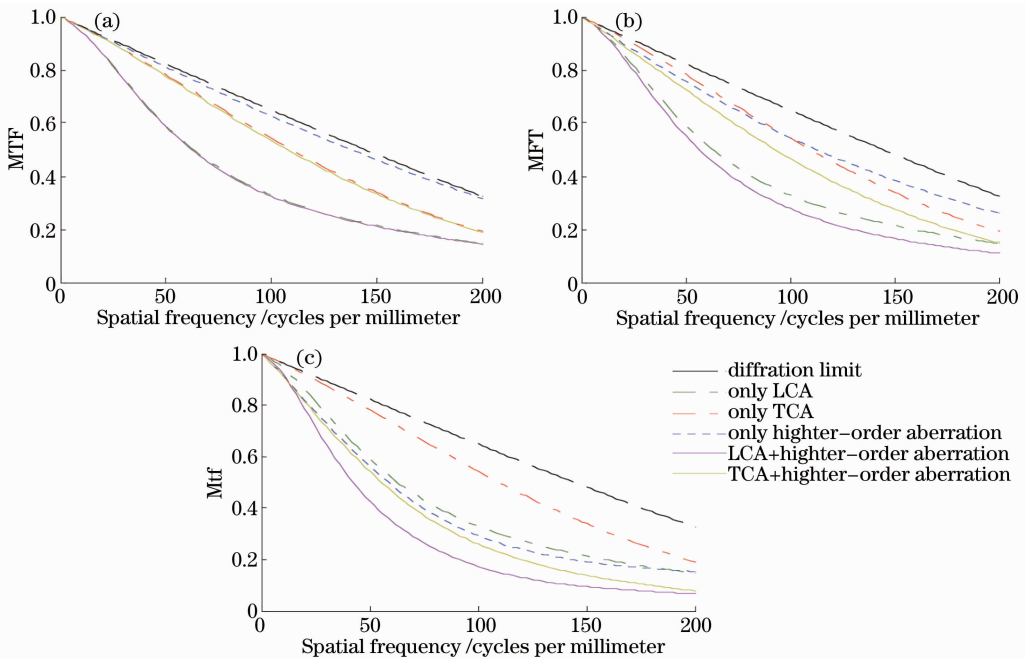


图 9 仅有 LCA、仅有 TCA、仅有高阶像差、同时存在高阶像差和 LCA 以及同时存在高阶像差和 TCA 时的径向平均 MTF 曲线

Fig. 9 Radial averaged MTFs of LCA together with higher-order aberrations, TCA together with higher-order aberrations, that of LCA-only, TCA-only and only higher-order aberrations

将 RMS 值为 0.01、0.04、0.09 μm 的高阶像差,分别引入到仅 LCA 眼模型和仅 TCA 眼模型中,考察 LCA 与高阶像差的相互作用以及 TCA 与高阶像差的相互作用,结果如图 9 所示。图中虚线代表衍射极限的情形,品红色实线代表高阶像差和 LCA 共同存在的情形,深黄色实线代表高阶像差和 TCA 共同存在的情形。图 9 也给出了仅高阶像差(点线)、仅 LCA(绿色虚点线)、仅 TCA(红色虚点线)的径向平均 MTF 曲线。由图 9 可以看出,一般水平的高阶像差对 LCA 系统的影响很小[绿色虚点线和品红色实线的比较,图 9(a)和图 9(b)],只有高水平的高阶像差才会对 LCA 系统的 MTF 造成一定程度的衰减[图 9(c)]。TCA 进一步衰减仅高阶像差的 MTF(点线和深黄色实线的比较),并随着高阶像差 RMS 的增大,TCA 的作用逐渐减弱。对于 $V_{H-RMS}=0.09 \mu\text{m}$ 的高水平高阶像差,TCA 的作用很小,如图 9(c)所示。

5 结 论

利用光学设计软件 Zemax,设计了三款折射/衍射混合型消 LCA 元件,分别放置于眼模型的角膜前、瞳孔前和晶状体后。建立了视轴与光轴相重合、视轴与光轴有夹角以及含仅消 LCA 元件的视轴与光轴有夹角三种不同的眼球模型。根据实测的真实人眼的波前像差数据,以 MTF 曲线为评价标准,定性地研究了明视觉状态下,不同水平的高阶像差与 LCA+TCA、LCA 和 TCA 的相互作用以及对视觉质量的影响。

1) 当消色差元件放置于角膜前,尽管消除了 LCA 却使得 TCA 增加;当消色差元件放置于晶状体后,尽管消除了 LCA 却使得 TCA 减小;只有当消色差元件放置于瞳孔前,才能够在消除 LCA 的同时保证 TCA 不变。

2) 明视觉下,色差(LCA+TCA)对视觉质量的影响远大于高阶像差的影响。色差的存在进一步减弱了高阶像差对视觉质量的影响,因此对于多数人眼,高阶像差的矫正通常是不必要的。

3) LCA 对视觉质量的影响接近于 LCA+TCA 的影响;TCA 对视觉质量的影响近似于正常水平的高阶像差的影响。在 LCA 存在的条件下,TCA 对

视觉质量的影响可以忽略。

综上所述,明视觉状态下,和通常水平的高阶像差相比较,色差主要是轴向色差,对视觉的影响更为重要。尽管色差会对视觉质量造成一定的损失,但是色差的存在能够进一步削弱高阶像差的影响。

参 考 文 献

- 1 P A Howarth, A Bradley. The longitudinal chromatic aberration of the human eye, and its correction [J]. *Vision Research*, 1986, 26(2): 361-366.
- 2 Y U Ogboso, H E Bedell. Magnitude of lateral chromatic aberration across the retina of the human eye [J]. *J Opt Soc Am A*, 1987, 4(8): 1666-1672.
- 3 P Simonet, M C Campbell. The optical transverse chromatic aberration on the fovea of the human eye [J]. *Vision Research*, 1990, 30(2): 187-206.
- 4 L N Thibos, A Bradley, D L Still, *et al.*. Theory and measurement of ocular chromatic aberration [J]. *Vision Research*, 1990, 30(1): 33-49.
- 5 G Y Yoon, D R Williams. Visual performance after correcting the monochromatic and chromatic aberrations of the eye [J]. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19(2): 266-275.
- 6 S Ravikumar, A Bradley, L N Thibos. Do monochromatic aberrations protect the eye against chromatic blur [J]. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 2006, 47(5): 1505.
- 7 S Ravikumar, L N Thibos, A Bradley. Calculation of retinal image quality for polychromatic light [J]. *J Opt Soc Am A*, 2008, 25(10): 2395-2407.
- 8 F Autrusseau, L Thibos, S K Shevell. Chromatic and wavefront aberrations: L-, M- and S-cone stimulation with typical and extreme retinal image quality [J]. *Vision Research*, 2011, 51(21): 2282-2294.
- 9 M Zhang, Z Wang, Y Wang, *et al.*. Studies of transverse chromatic aberration based on individual eye model [J]. *Optik*, 2010, 121(22): 2080-2086.
- 10 Y He, Y Wang, Z Wang, *et al.*. Study on chromatic aberration in a population of Chinese myopic eyes by means of optical design [J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(5): 667-679.
- 11 Y L Grand, S G E Hage. *Physiological Optics* [M]. Berlin: Springer, 1980.
- 12 Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2008. 485-493.
张以谟. *应用光学* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 485-493.
- 13 M Zhang, Z Wang, Y Wang, *et al.*. The study of correction for chromatic aberrations of human eye with diffractive-refractive hybrid elements [J]. *Optik*, 2010, 121(24): 2209-2212.
- 14 Zhang Mei. *Research on Chromatic Aberration of Human Eye Based on Individual Eye* [D]. Tianjin: Nankai University, 2010. 44-49.
张梅. *基于个性化眼光学结构的人眼色差的研究* [D]. 天津: 南开大学, 2010. 44-49.
- 15 H Guo, Z Wang, Q Zhao, *et al.*. Individual eye model based on wavefront aberration [J]. *Optik*, 2005, 116(2): 80-85.