

文章编号: 0253-2239(2010)s100504

时间频率下神经对比敏感度的研究

李蕊^{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 对全眼时间频率下的对比敏感度(CSF)和人眼波前像差分别进行了测量,利用两者关联计算获得了人眼在时间频率下的神经对比敏感度(NCSF)曲线。测量结果表明,NCSF随着时间频率的增高曲线整体降低,对4只被试眼,在所选取的低时间频率到高时间频率(其中两只眼的测量时间频率为1~30 cycle/s另两只眼为1~24 cycle/s)范围内,NCSF降低的相对值分别约为90%,87%,60%和68%。与时间频率下的CSF相比较,各时间频率下的NCSF值在中低空间频率范围内[2~10 cycle/(°)]变化相对平缓,在高频[大于10 cycle/(°)]略有衰减。被试4只眼的NCSF曲线在相同的时间频率下取值近似,表明不同人眼(无视神经疾病)的视觉神经系统对于时间频率的响应特性相似。

关键词 应用光学;眼波前像差;神经对比敏感度;时间频率;眼模型;调制传递函数

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100504

Study on Neural Contrast Sensitivity Function at Temporal Frequencies

Li Rui^{1,2} Wang Zhaoqi^{1,2}

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

²*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China*

Abstract Human eyes' contrast sensitivity function (CSF) at temporal frequencies and wave-front aberrations of optical system of the eye have been measured respectively, and then the neural contrast sensitivity function (NCSF) is calculated by the correlation between them. The results demonstrate that the overall value of NCSF decreases as the temporal frequency increases. From the low to the high temporal frequencies (the testing temporal frequencies of 1~30 cycle/s for two eyes and 1~24 cycle/s for the other two), the relative decreasing amounts of NCSF are: 90%, 87%, 60% and 68%, respectively. Comparing with the corresponding CSF at temporal frequencies, the NCSF curve is smooth at low and middle spatial frequencies [2~10 cycle/(°)] and decreases appreciably at high spatial frequencies [greater than 10 cycle/(°)]. The values of NCSF curves at the same temporal frequency for 4 subjects' eyes are approximate, which demonstrates that the responding of the human eyes (without optic nerve disease) to the same temporal frequency is identical.

Key words applied optics; wave-front aberration; neural contrast sensitivity function; temporal frequency; eye model; modulation transfer function

OCIS codes 080.1010; 330.1800

1 引言

全视觉系统的认知包括两个过程,即物体经过人眼屈光系统成像在视网膜上和视网膜上的图像信

息经过视神经传递到大脑的过程^[1]。对比敏感度函数(CSF)为全视觉系统的特性,它反映视觉系统对外界不同对比度物体的分辨能力,与视锐度相比,对

收稿日期: 2010-06-10; 收到修改稿日期: 2010-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(60978068,60777011)资助课题。

作者简介: 李蕊(1983—),女,博士研究生,主要从事眼视光学方面的研究。E-mail: lrui@126.com

导师简介: 王肇圻(1944—),男,博士,研究员,主要从事眼视光学、衍射光学和光学信息等方面的研究。

E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

比敏感度给出了视觉功能的更多信息,深化了人们对形觉的认识,能够更加全面的评价视功能^[2]。神经对比敏感度函数(NCSF)为视神经系统的特性,它反映视觉系统对视网膜上不同对比度空间像的分辨能力。与CSF相比较,NCSF集中反映了从视网膜到视神经乃至大脑的视觉特性。为了全面描述人眼对于形觉的认识,对比敏感度函数应该综合考虑空间频率和时间频率的影响。H. de Lange^[3]用正弦条纹视标作了时间频率对比敏感度测试;David C. Burr等^[4]测量了移动的正弦条纹的时间对比敏感度函数等;Branka Spehar^[5]研究了视标的周边亮度及对比度对时间对比敏感度的影响。

上述研究涉及的是全视觉系统的整体视功能即CSF,而时间频率对视觉的影响本质上是对视神经系统的影响。本文利用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前像差仪测量被试者眼睛的波前像差,并将测得的泽尼克(Zernike)系数加入到光学设计软件ZEMAX的优化函数中,对用Zernike矢高面描绘的角膜前表面进行优化^[6,7],从而建立个性化的眼模型,由此眼模型得到被试眼的调制传递函数(MTF)。再利用基于阴极射线管(CRT)显示的正弦条纹视标测量在某一固定的时间频率下全眼CSF。利用MTF与CSF二者间的关联获得人眼在特定时间频率下的NCSF。由于日常生活中观察的事物均是动态的,且眼球观察事物时也是不断运动的,因此,测定时间频率下的全视觉对比敏感度函数及其神经对比敏感度函数对于辅助实际临床诊断有重要的参考意义。

2 实验方法

2.1 时间频率对比敏感度的测量

采用本课题组开发的基于阴极射线管CRT显示器的正弦条纹视标显示系统对不同时间频率下的对比敏感度函数进行测量。在暗背景下显示的矩形视标对位于距视标6.27 m远的被试者,张角为 $1.24^\circ \times 0.62^\circ$,显示器的亮度控制在 180 cd/m^2 。采用中心波长为555 nm的绿光正弦条纹视标进行测试。整个测试过程在暗室进行,被试者的瞳孔直径约为3 mm^[8]。

闪烁光栅视标^[9]在视网膜成像时,视网膜上各个位置感受到的光强调度不同^[10],而视网膜感光器间是互相关联的,因此用闪烁光栅视标在评价视神经的时-空域的CSF时有一定的局限。因此,采用运动方向与条纹走向垂直的正弦光栅条纹进行测

量,从而使得视网膜上每一点感受到的随时间变化的光强度近似相同。正弦光栅条纹的光强随时间频率及空间频率变化的关系^[10]如下:

$$I = I_0 \{1 + M \sin[2\pi(f_s x + f_t t)]\}, \quad (1)$$

式中 f_s 是空间频率,单位是cycle/(°), f_t 是时间频率,单位是cycle/s, $f_t/f_s = v$, v 是条纹的运动速度,单位是(°)/s。 M 是条纹的对比调制度,定义为 $M = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 。

本文采用主观的心理物理学方法对被试者进行对比敏感度的测量。在某一时间频率下,保持空间频率不变,逐渐降低视标的对比度,且每次条纹的运动方向随机,观察者不仅要看到条纹还要分辨其运动方向直至不能分辨为止,记录对比度并取倒数,作为该空间频率下的对比敏感度的值,然后改变空间频率继续测量^[11,12]。

测试系统空间频率的变化范围为1~48 cycle/(°)。时间频率的变化范围为1~30 cycle/s。对于某一个时间频率下的每一个空间频率的对比敏感度分别在不同天的同一时间重复测量3次取平均。测试过程中,被试者用单眼注视视标。被试者YSY;23岁,ZZH;26岁。

2.2 调制传递函数的测量

眼睛光学系统的调制传递函数,是从空间频率域评判眼睛屈光系统的成像质量,反映了成像物体的不同空间频率组分通过眼睛光学系统后的衰减和截断特性。采用基于Hartmann-Shack波前传感技术的眼波前像差仪^[13]测量波前像差,并以Zernike多项式的形式表达出来,即

$$W(x, y) = \sum_k C_k Z_k(x, y), \quad (2)$$

式中 $Z_k(x, y)$ 是Zernike多项式第 k 个模, C_k 是系数。

在ZEMAX中建立眼模型,其结构参数采用Hwey-Lan Liou眼模型的相关数值^[14],具体参数如表1所示。表1中的Grad表示晶状体的折射率用梯度折射率来表示,即 $\text{Grad}(A) = n_0 + n_{r2} r^2 + n_{z1} z + n_{z2} z^2$,其中 $n_0 = 1.368$, $n_{r2} = -0.001978$, $n_{z1} = 0.049057$, $n_{z2} = -0.015427$; $\text{Grad}(P) = n_0 + n_{r2} r^2 + n_{z1} z + n_{z2} z^2$,其中 $n_0 = 1.407$, $n_{r2} = -0.001978$, $n_{z1} = 0$, $n_{z2} = -0.006605$ 。

为了使眼模型计算所得的光学特性与实际波前像差计算结果一致,在ZEMAX中用测得的各项Zernike系数建立评价函数,选择Zernike矢高面作为角膜前表面的面型,通过优化代表角膜前表面的

各阶 Zernike 项系数,得到使评价函数取最小值时符合实际情况的角膜形状,且保证了由眼模型得到的波前像差与由波像差仪实际测量的值相等^[6,7]。

进而可以得到与实际人眼相符的调制传递函数。建模过程中,Zernike 系数采用瞳孔直径为 3 mm 下对应的像差数据。

表 1 眼模型相关参数

Table 1 Parameters of the eye model

Surface	Radius /mm	Conic constant	Thickness /mm	Refractive Index(555 nm)	Abbe number
Anterior cornea	7.77	-0.18	0.50	1.376	61.7
Posterior cornea	6.40	-0.60	3.16	1.336	55.1
Anterior lens	12.40	-0.94	1.59	Grad(A)	60.3~
	Infinity	-	2.43	Grad(P)	66.8
Posterior lens	-8.10	+0.96	16.27	1.336	55.1
Retina	-12.3	0	-	-	-

3 实验结果及分析

3.1 调制传递函数

本文构造了被试者 YSY(OD, OS)以及 ZZH(OD, OS)的眼模型,这 4 只眼的近/远视度数均小于 0.5D。由优化后的眼模型计算得到的 MTF 曲线如图 1 所示。横坐标为空间频率,单位为 cycle/°,纵坐标为 MTF 的数值。各条曲线所代表的眼睛序号由图例给出。

由图 1 可见,由于存在个体差异,图中的 MTF 曲线的斜率及 MTF 值的大小在相应空间频率上均有不同,在 30 cycle/°处,YSY OD,YSY OS,ZZH OD 及 ZZH OS 的 MTF 值分别约为:0.20,0.20,0.28,0.10。可见,ZZH OD 眼屈光系统的 MTF 较好。

3.2 对比敏感度函数

被试者在测试过程中被要求辨认出条纹的运动方向,直至其表明视场中无条纹不能看到视标的闪烁为止^[10]。每次视标的运动持续时间约为 2 s,条纹的运动方向随机。

图 2(a)和(b)所示分别为被试者 YSY 的 OD 和 OS 在时间频率为 1,16,24 和 30 cycle/s 时的 CSF 曲线。图 3(a)和(b)所示分别为 ZZH 的 OD 和 OS 在时间频率为 1,16 和 24 cycle/s 时的 CSF 曲线。由于被试者 ZZH 在时间频率为 30 cycle/s 时的低空间频率段已不能分辨条纹的运动方向,因此这里仅选用其被测得的 3 个时间频率下的 CSF 曲线。时间频率下 CSF 曲线的横坐标为空间频率的对数,纵坐标为 CSF 的对数。

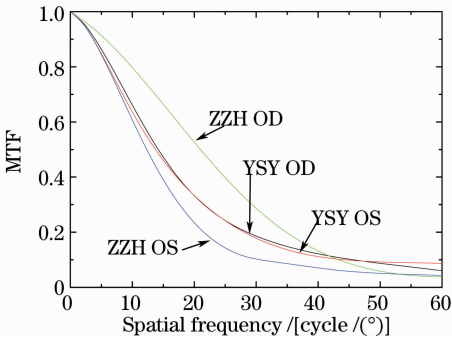


图 1 4 只人眼的调制传递函数曲线

Fig. 1 MTF curves of the four subjects' eyes

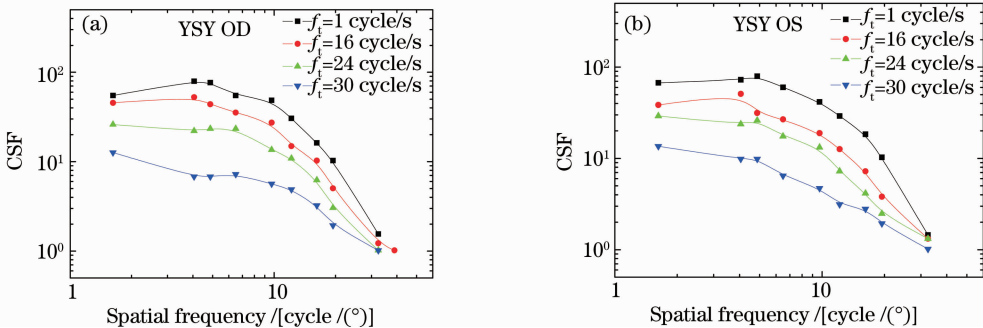
图 2 YSY OD 和 OS 分别在时间频率 $f_t=1,16,24$ 和 30 cycle/s 下的 CSF 曲线

Fig. 2 CSF curves of subject YSY at the testing temporal frequencies of 1, 16, 24 and 30 cycle/s

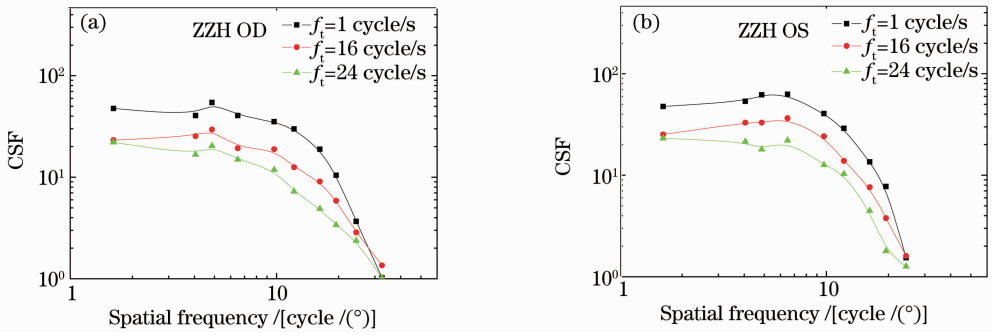


图 3 ZZH OD 和 OS 分别在时间频率 $f_t=1, 16$ 和 24 cycle/s 下的 CSF 曲线

Fig. 3 CSF curves of subject ZZH at the testing temporal frequencies of 1, 16 and 24 cycle/s

由图 2,3 可以看出,时间频率下的 CSF 曲线呈近似低通形式(时间频率为 30 cycle/s 的 CSF 曲线呈近似单调递减),随着时间频率的增加,CSF 曲线值整体下降。

在空间频率为 $1\sim 6$ cycle/° 时,各时间频率下的 CSF 值随空间频率的增加变化缓慢。不管在哪个时间频率下,在空间频率大于 10 cycle/° 以后 CSF 曲线均呈陡峭下降趋势。

对于每一只被试眼,其被测量的最低与最高时间频率的 CSF 差值随着空间频率的增加而显著降低,如 YSY OD,其在 $f_s=4$ cycle/° 时, $\Delta CSF_{f_t=1\sim 30} \approx$

91%,在 $f_s=16$ cycle/° 时, $\Delta CSF_{f_t=1\sim 30} \approx 81\%$,在 $f_s=24$ cycle/° 时, $\Delta CSF_{f_t=1\sim 30} \approx 41\%$,这可能是由于在越低的空空间频率下,不同的时间频率对应的条纹运动速度差值越大,其 CSF 曲线差值就越大^[15]。

根据各空间频率下相应的 MTF 数值以及 CSF 数值,通过相除运算(CSF/MTF),可获得时间频率下的神经对比敏感 NCSF 的度数值。

图 4,5 为 YSY OD,OS 和 ZZH OD,OS 在时间频率下的神经对比敏感度函数,横坐标为空间频率取对数坐标,纵坐标为 NCSF 取对数坐标。

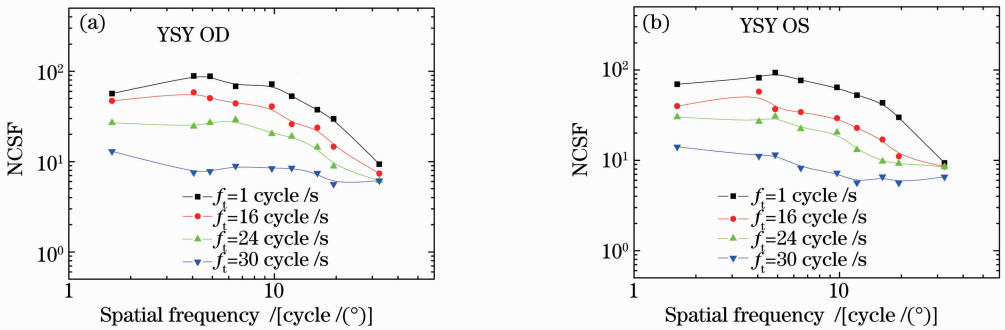


图 4 YSY OD 和 OS 分别在时间频率 $f_t=1, 16, 24$ 和 30 cycle/s 下的 NCSF 曲线

Fig. 4 NCSF curves of subject YSY at the testing temporal frequencies of 1, 16, 24 and 30 cycle/s

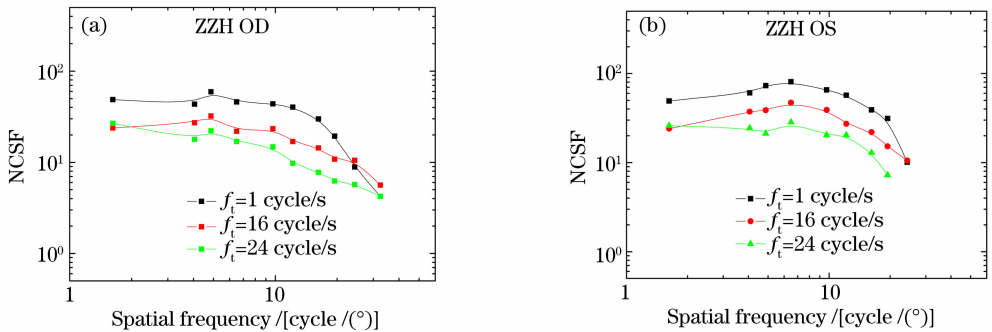


图 5 ZZH OD 和 OS 分别在时间频率 $f_t=1, 16$ 和 24 cycle/s 下的 NCSF 曲线

Fig. 5 NCSF curves of subject ZZH at the testing temporal frequencies of 1, 16 and 24 cycle/s

由图4,5可以看出,由于眼屈光系统和视神经系统的共同作用,NCSF值在相同的时间频率上高于相应的CSF值,尤其在大于 $10 \text{ cycle}/(^{\circ})$ 以后的空间频率段,其增长趋势尤为明显。

对于YSY OD,YSY OS,ZZH OD和ZZH OS 4只被试眼,在所选取的低时间频率到高时间频率(其中两只眼的测量时间频率为 $1\sim 30 \text{ cycle}/\text{s}$ 另两只眼为 $1\sim 24 \text{ cycle}/\text{s}$)范围内,NCSF降低的相对值分别约为 90% , 87% , 60% 和 68% 。与时间频率下的CSF相比较,各时间频率下的NCSF值在中低空间频率范围内 $[2\sim 10 \text{ cycle}/(^{\circ})]$ 变化相对平缓,在高空间频率段 $[>10 \text{ cycle}/(^{\circ})]$ 略有衰减。可见,时间频率下CSF值在不小于 $10 \text{ cycle}/(^{\circ})$ 的区域的

衰减,部分原因是由于眼屈光系统的MTF的影响,此外还可能与视神经对于高频区域的对比敏感度的衰减有关^[16]。

尽管4只被试眼的MTF曲线以及时间频率下的CSF曲线存在个体差异,但是对于正常眼(无视网膜疾病)而言,其反应视神经及大脑系统视觉特性的NCSF曲线应近似,图6即说明了此点,图中将4只被试眼在时间频率 $f_t=1, 16 \text{ cycle}/\text{s}$ 下的NCSF分别作了误差棒比较,其曲线趋势及其值在各自的时间频率下相近。且曲线平均趋势为:在大于等于 $10 \text{ cycle}/(^{\circ})$ 的区域有衰减,表明不管在哪个时间频率下视神经系统对于高空间频率的对比敏感度值均有衰减。

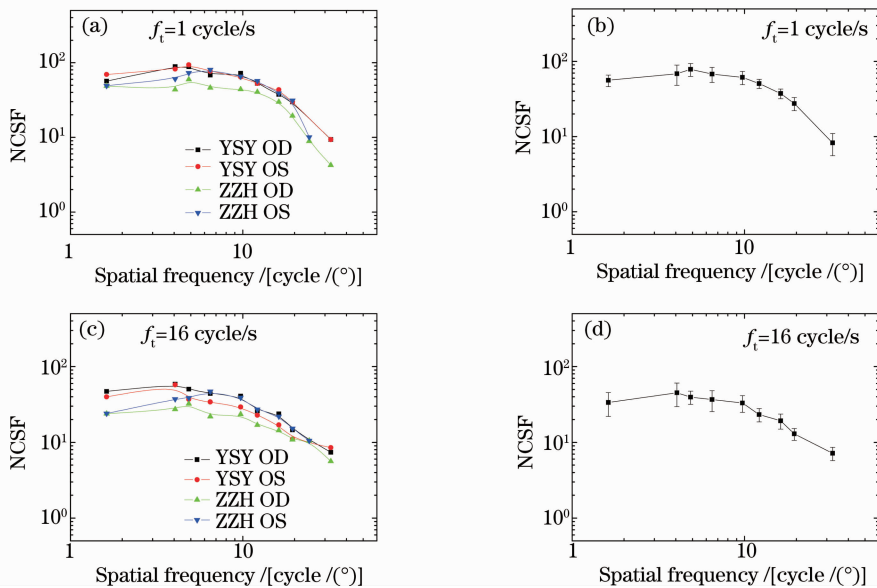


图6 $f_t=1 \text{ cycle}/\text{s}$ 和 $16 \text{ cycle}/\text{s}$ 四只眼睛的NCSF比较

Fig. 6 NCSF curves comparing of four subjects at the testing temporal frequencies of $1 \text{ cycle}/\text{s}$ and $16 \text{ cycle}/\text{s}$

上述结果也说明了,NCSF反映的仅是视神经系统的响应情况,CSF反映的是人眼屈光系统和视神经系统共同作用的结果。

4 结 论

本文提出了一种时间频率下NCSF的测定方法。利用Hartmann-Shack波前像差仪获得人眼在绿光下的波前像差数据,经过在ZEMAX中建立符合实际测得像差数据的眼模型从而得到其MTF曲线。通过全视觉对比敏感度测试系统获得时间频率下的CSF。最后利用CSF与MTF的关联作用,得到绿光的时间频率下的NCSF曲线。建模及测试结果表明,被试4只眼的CSF曲线呈近似低通的形状,且随空间频率增加逐渐递减,时间频率下的

NCSF曲线随空间频率的递增变化缓慢,在高空间频率段略有衰减,表明时间频率下CSF高频区域的衰减与眼屈光系统对于高频区域的影响有关,此外还由于视神经对高频部分有衰减。从而,说明了视觉系统的质量是由屈光系统和神经传导系统共同决定的。

参 考 文 献

- 1 Yan Honglu, Yu Xiumin. Physiology of Ophthalmology [M]. Beijing: People's Hygiene Press, 2001. 217
- 2 Li Fengming. System of Ophthalmology [M]. Beijing: People's Hygiene Press, 1996. 761
- 3 H. de Lange. Research into the dynamic nature of the human fovea-cortex systems with intermittent and modulated light. I.

- Attenuation characteristics with white and colored light [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1958, **48**(11): 777~784
- 4 David C. Burr, John Ross. Contrast sensitivity at high velocities [J]. *Vision Res.*, 1982, **22**(4): 479~484
- 5 Branka Spehar. Surround effects on the shape of the temporal contrast-sensitivity function [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(9): 2517~2524
- 6 Guo Huanqing, Wang Zhaoqi, Zhao Qiuling *et al.*. Eye model based on wavefront aberration measured subjective [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1666~1669
郭欢庆, 王肇圻, 赵秋玲. 基于主观式测量人眼波前像差的眼模型研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1666~1669
- 7 Rao Feng, Wang Zhaoqi, Wang Yan *et al.*. Construction of eye model and intraocular lens design after corneal refractive surgery [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **38**(7): 1806~1809
饶 丰, 王肇圻, 王 雁 等. 角膜手术后眼模型的构建和人工晶状体设计[J]. *光子学报*, 2008, **38**(7): 1806~1809
- 8 D. C. Hood, M. A. Finkelstein. Sensitivity to light. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance*, Volume 1: Sensory Processes and Perception [M]. New York: John Wiley & Sons, 1986. 874~875
- 9 D. O. Bowker, U. Tulunay-Keesey. Sensitivity to countermodulating gratings following spatiotemporal adaptation [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **73**(4): 427~435
- 10 F. L. Van Nes, J. J. Koenderink, H. Nas *et al.*. Spatiotemporal modulation transfer in the human eye [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(9): 1082~1088
- 11 K. Latham. Who uses contrast sensitivity in optometric practice [J]. *Ophthal Physiol Opt.*, 1998, **18**(s1): 2~13
- 12 Wang Wei, Wang Zhaoqi, Wang Yan *et al.*. The acquisition of the aerial image modulation with the wave-front aberrations of human eye [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 133~137
王 伟, 王肇圻, 王 雁 等. 基于波前像差的视网膜空间像调制度测定[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1): 133~137
- 13 Junzhong Liang, Bernhard Grimm, Stefan Goelz *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
- 14 Hwey-Lan Liou, Noel A. Brennan. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(8): 1684~1695
- 15 D. H. Kelly. Motion and vision. II. Stabilized spatio-temporal threshold surface [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(10): 1340~1349
- 16 J. G. Robson. Spatial and temporal contrast-sensitivity functions of the visual system [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**: 1141~1142