

神经对比敏感度的亮度变化机制研究

葛婧菁^{1,2} 王肇圻^{1,2}

(¹南开大学现代光学研究所, 天津 300071
²光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 研究了明视觉下亮度变化对神经对比敏感度函数(NCSF)的影响。分别测量人眼的对比敏感度函数(CSF)和调制传递函数(MTF),而后通过计算的方法获得白光的NCSF。运用这种方法对4只人眼进行白光(15, 210和310 cd/m²)下的NCSF测定。测试结果表明:白光的NCSF均随着亮度的增加有较大幅度的提高,并且曲线向着高空间频率方向移动,提高的幅度和移动的大小存在个体上的差异。CSF的变化趋势类似于NCSF的变化趋势,但在亮度的影响下,CSF的相对增长幅度要高于NCSF的相对增长幅度,这种情形在高频部分尤为突出。由于NCSF反映的是排除了眼屈光系统的从视网膜到大脑的视觉特性,因此NCSF随亮度的变化才是视觉的神经系统对亮度敏感特性的客观反映。

关键词 视觉光学;神经对比敏感度;亮度变化;对比敏感度

中图分类号 O439

OCIS 330.2210 330.5370

文献标识码 A

Luminance Effects on Neural Contrast Sensitivity Function at Photopic Level

Ge Jingjing^{1,2} Wang Zhaoqi^{1,2}

(¹Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China
²Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology,
Ministry of Education, Tianjin 300071, China)

Abstract The influence of the luminance at photopic level on the neural contrast sensitivity function (NCSF) of visual system is studied. The contrast sensitivity function (CSF) of the visual system and the modulation transfer function (MTF) of the eye's optical system are firstly measured. Then the NCSF is gotten through the calculation method. NCSFs of four individual eyes are respectively determined in the cases of white light (with the luminance of 15, 210 and 310 cd/m²). The results show that, the NCSF of white light mounts up considerably and the curves shift toward higher spatial frequency as the luminance increases. However, the change of NCSF is somehow different from individual to individual. With the increase of luminance, the variation tendency of the CSF is similar to that of the NCSF, while the gain is much larger than that of the NCSF, especially in the region of higher spatial frequency. It is the NCSF, rather than CSF, that reflects the luminance sensitivity in the retina-brain neural system, because the influence of the eye's optical system is excluded.

Key words visual optics; neural contrast sensitivity; luminance changes; contrast sensitivity

1 引言

视觉过程有两个阶段,首先眼屈光系统将外部世界成像到视网膜上,然后经由视网膜接收,视神经传输,到大脑视中枢。神经对比敏感度(NCSF)曲线是评价从视网膜经视神经至大脑神经中枢的视觉特性,而对

收稿日期: 2010-06-08; 收到修改稿日期: 2010-07-14

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

作者简介: 葛婧菁(1984—),女,博士研究生,主要从事眼视光学中的神经对比敏感度方面的研究。

E-mail: gejingjing977@gmail.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(CSF)曲线是评价包含了眼屈光系统在内的整体视觉系统的特性。视觉显示特性一直是人们所研究的对象^[1~3]。Floris L. Vannes 等^[4,5]研究了单色光在不同亮度下的 CSF 特性曲线。然而当亮度变化时,不仅视网膜和视神经受到的光刺激有变化,而且眼屈光系统也发生了变化。因此单纯的 CSF 测量不能准确反映从视网膜到大脑的视神经系统对亮度的敏感特性。另外,视网膜是由三种分别感受蓝(短波段)、绿(中波段)、红(长波段)不同色光的视锥细胞 S,M,L 构成,而视觉信息又是以白-黑,红-绿,黄-蓝四色对抗的通路向大脑传输,因此仅仅研究视觉在单色光下的行为是不充分的,还需要研究视觉在白光下的特性。

传统的视觉 NCSF 测量是基于激光干涉技术^[6,7],即在视网膜上形成对比度和空间频率可调的干涉条纹来实现的。该技术的缺点是不可避免的激光散斑和相干噪声使系统的信噪比降低,另外它只能在单色光下工作,无法实现白光 NCSF 测量。我们在前面的文章中报道了一种新的 NCSF 的测量方法^[8],即先测量 CSF 和眼波前像差,然后通过计算来求得 NCSF。该技术克服了上述激光干涉法的缺点,不仅信噪比高,而且可以得到白光下的 NCSF。

本文采用文献[8]的技术,研究了在明视觉条件下,不同亮度对白光的 NCSF 的影响,并与相应的 CSF 的情形进行了比较,得到了从视网膜到大脑的神经系统对亮度的敏感特性。

2 方 法

通过描述人眼特性的全视觉 CSF 和屈光系统的调制传递函数(MTF)与反应视网膜到大脑神经系统部分的 NCSF 的关系,通过计算方法获得 NCSF。它们的关系是

$$W_{\text{NCSF}} = W_{\text{CSF}} / W_{\text{MTF}}, \quad (1)$$

式中 W 代表白光。

眼屈光系统的 MTF 可以由眼波前像差的测量来获得。采用 Hartmann-Shack 波前传感器进行人眼波前像差的测量,其工作原理由图 1 给出。所搭建系统的技术参数为:瞳孔测量范围大于 2 mm,采样点数大于 400,Zernike 阶数(项数)为 12(90),屈光范围为球±10 D 和柱±6 D,球面精度为 0.1 D,柱面精度为 0.1 D,Zernike 像差精度均方根(RMS)值为 0.1 μm ,测量时间小于 0.2 s。由于传感器的工作波长为 833 nm,为得到人眼在白光下的波前像差,所测得的波前像差还需要进行变换。从前期的研究^[9]可知,Zernike 波前像差中的离焦项随波长的变化显著并有特定的规律,而散光及其他高级像差随波长变化相对较小。这样根据离焦随波长的变化曲线就可以得到白光下的波前像差。

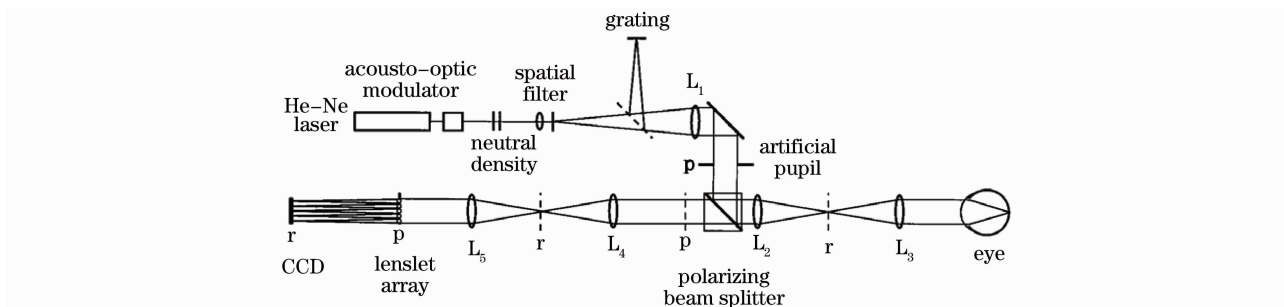


图 1 Hartman-Shack 波前传感器测量人眼波前像差的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of Hartman-Shack wave-front sensor

白光的 MTF 可由可见光不同波长下的光学传递函数加权平均,然后取模^[10]得到

$$W_{\text{MTF}} = |W_{\text{OTF}}| = \left| \frac{\sum_{i=1}^N \omega_{\lambda_i} W_{\text{OTF}-\lambda_i}}{\sum_{i=1}^N \omega_{\lambda_i}} \right|, \quad (2)$$

式中 ω_{λ_i} 为权重因子,计算中所需要的不同波长下的波前像差数据由文献[9]的方法给出。

CSF 的测量是用自行设定的基于显微镜(CRT)视标显示的系统实现。测量系统的空间频率变化范围为 2.4~48.6 c/deg,对比敏感度变化范围 1~200,视标采用圆形正弦条纹,尺寸大小为 68 mm×68 mm,测

试者距视标 6.27 m 处,视场为 0.62° 。为了研究在明视觉下亮度变化对人眼 NCSF 的影响,考虑到人眼对不同亮度下的白光的敏感特性不同^[11],设计了一组 CSF 测试:白光在平均亮度分别是 15,210 和 310 cd/m^2 下的实验。

测试对象是 ZL 和 ZZH,共 4 只正常人眼(无眼疾病)。ZL 的年龄为 26,ZZH 的年龄为 25。为了测量结果的准确性,个体眼如有在明视觉下存在离焦或像散问题均配镜矫正,达到 1.0 正视眼。测试时,测试者均处于暗室,人眼瞳孔处于自然状态,其直径大小随测试时的平均亮度改变。

为了定量分析亮度对 CSF 和 NCSF 的影响,首先对白光下(亮度分别为 310 和 15 cd/m^2)个体眼的 CSF 和 NCSF 取对数,计算在两个亮度下 CSF 的对数值之比和 NCSF 的对数值之比,然后对 4 只个体眼的比值取平均,得到在白光下的平均增益曲线。在计算中采用 CSF 和 NCSF 的对数值,是因为视觉对 CSF 和 NCSF 的敏感性,是和它们的对数值成线性关系^[12],其中 H 代表高亮度, L 代表低亮度

$$R = \frac{\lg H_{\text{NCSF}} (\text{or } \lg H_{\text{CSF}})}{\lg L_{\text{NCSF}} (\text{or } \lg L_{\text{CSF}})} \quad (3)$$

3 计算结果和分析

3.1 白光下的眼屈光系统

通过眼波前像差仪进行波前像差测量和 MTF 计算,可以得到不同瞳孔下白光的人眼 MTF 曲线。由于对比敏感度的测量环境分别是 15,210 和 310 cd/m^2 ,所以根据人眼瞳孔尺寸和环境亮度之间的关系^[13]:

$$\lg d = 0.8558 - 0.000401(\lg B + 8.1)^3, \quad (4)$$

式中 d 为正常人眼的直径, B 为环境的亮度。通过实际测量并与计算对照,得出 4 只人眼在这 4 种亮度下的瞳孔直径分别约为 3.84,2.90 和 2.77 mm。根据不同的瞳孔直径,可以得到不同亮度下个体眼高阶像差的数值。表 1 给出了这 4 只个体眼的高阶像差 RMS 值。

表 1 高阶像差的 RMS 值

Table 1 RMS values of higher-order aberrations

	High-order aberration (μm) RMS		
	2.77	2.90	3.84
Pupil size /mm	2.77	2.90	3.84
ZLD / 10^{-5}	3.7	4.5	25
ZLS / 10^{-5}	9.4	11	33
ZZHD / 10^{-5}	11	13	67
ZZHS / 10^{-5}	4.2	5.2	40

根据(2)式和不同波长下的波前像差数值可以得到白光的 MTF 曲线。图 2 给出了 4 只个体眼在不同亮度下的白光 MTF 曲线,(a)~(d)分别是个体眼 ZLD,ZLS,ZZHD 和 ZZHS 的 MTF 曲线,其中空心虚线代表白光 MTF,方形符号、圆形符号和三角形符号分别对应白光下的瞳孔直径为 2.77,2.90 和 3.84 mm。

3.2 白光下的 CSF 和 NCSF

运用心理物理学的方法,对测试者进行不同亮度白光的 CSF 测试。为了保证结果的准确性,每种环境下的个体眼测试都进行 4 次测试,并取其平均。个体眼在视标为 39 c/deg 以上的空间频率出现了伪频现象,实验排除出现伪频现象对应的空间频率。图 3 给出了 4 只个体眼在白光下 CSF 的测试结果,3 种条件下的亮度分别是 15(方形符号),210(圆形符号)和 310 cd/m^2 (三角形符号),横、纵坐标分别代表以对数坐标表示的空间频率和对比敏感度,(a)~(d)分别是个体眼 ZLD,ZLS,ZZHD 和 ZZHS 的 CSF 曲线。

同样利用 NCSF,CSF 和 MTF 的关联公式(1),获得相应亮度下白光的 NCSF 曲线,由图 4 给出。图 4(a)~(d)分别是个体眼 ZLD,ZLS,ZZHD 和 ZZHS 的 NCSF 曲线,其中方形符号、圆形符号和三角形符号分别表示亮度在 15,210 和 310 cd/m^2 下的结果。这 4 只眼在 3 种亮度下的峰值点对应的空间频率由表 2 给出。

为了从统计平均的观点分析亮度变化对白光 NCSF 的影响,图 5(a)给出了这 4 只个体眼的 NCSF 的平均曲线。可以看出,随着亮度的增加,NCSF 的幅值提高,曲线的带宽加大,并且向高空间频率方向移动。在

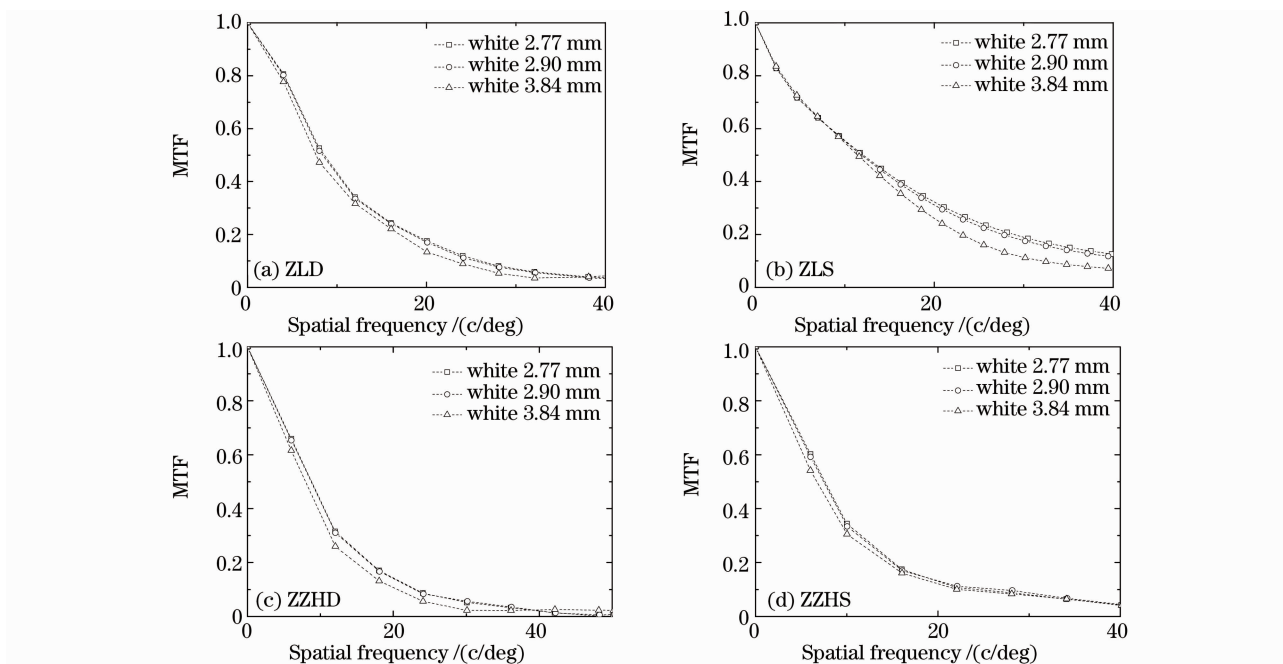


图 2 4 只人眼在白光不同瞳孔下的 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curves for four individual eyes at different luminance levels for the white light

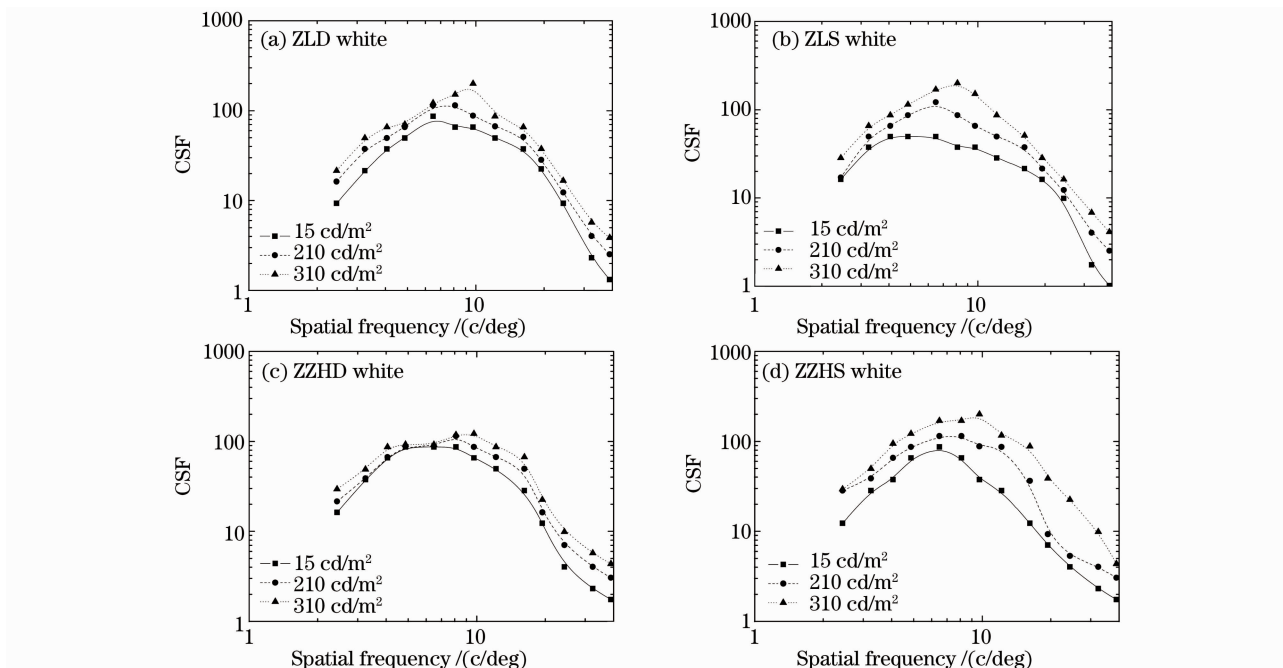


图 3 4 只人眼在白光下的 CSF 曲线

Fig. 3 CSF of white light for four eyes

亮度为 15 cd/m^2 时, NCSF 曲线的峰值是 270, 对应的空间频率出现在 8 c/deg 上, 当亮度增加到 310 cd/m^2 时, NCSF 曲线的峰值是 610, 对应的空间频率出现在较高的 16 c/deg 上。另外, 由图 5 和表 2 还可以看出, NCSF 随亮度的变化而幅值提高和曲线频移的特点也存在着个体上的差异, 例如 ZLD 和 ZLS 两只眼的差异。作为对照, 图 5(b) 给出了这 4 只个体眼的 CSF 的平均曲线。可以看到白光 CSF 曲线和白光 NCSF 曲线也有类似的变化趋势, 随着亮度的增加同样存在幅值提高和峰值点向高频方向偏移的情况。但是作为整体来说, CSF 的幅值要比 NCSF 的幅值低许多, 并且曲线相对地向低频方向移动^[8]。

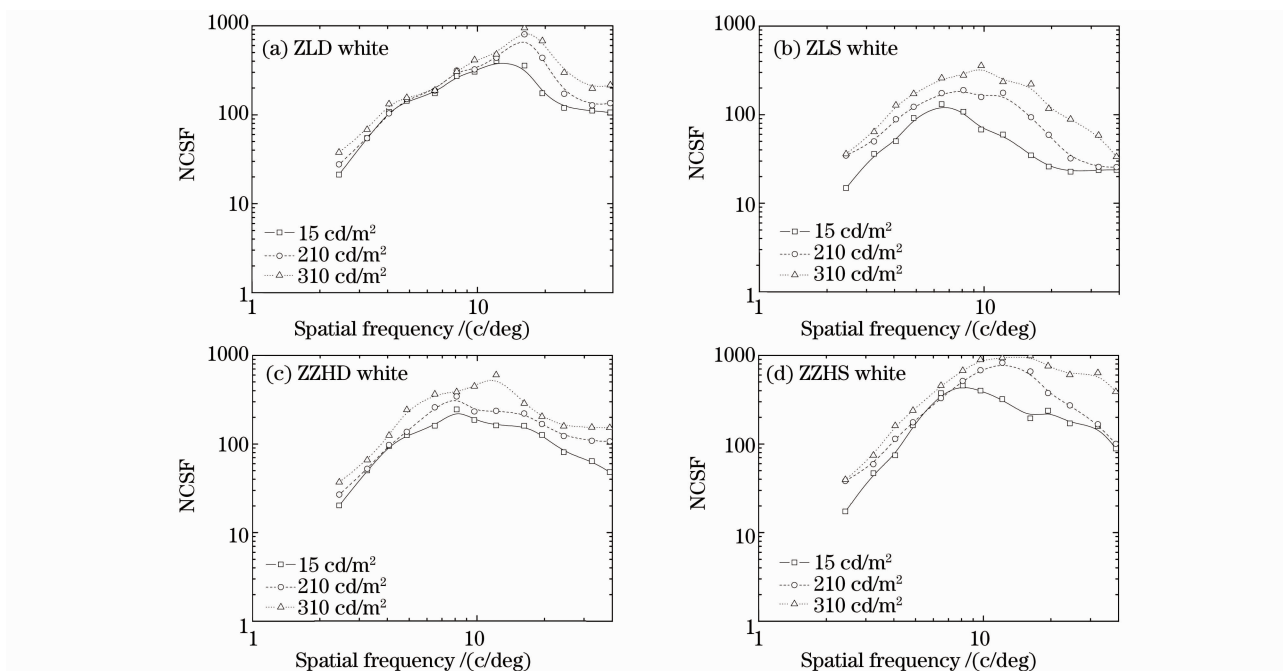


图 4 4 只人眼在白光下的 NCSF 曲线

Fig. 4 NCSF of white light for four eyes

表 2 白光下 4 只人眼及其平均在 3 种亮度下的峰值点对应的空间频率

Table 2 Spatial frequencies corresponding to the peak for four individual eyes in white light

Luminance / (cd/m ²)	Spatial frequency of CSF's peak			Spatial frequency of NCSF's peak		
	15	210	310	15	210	310
ZLD / (c/deg)	6.5	8.0	10	12	16	16
ZLS / (c/deg)	4.0	7.0	9	6.5	8	10
ZZHD / (c/deg)	6.5	8.5	10	8	12	12
ZZHS / (c/deg)	6.5	8.5	10	8	12	16
AVE / (c/deg)	6.5	8.5	10	8	12	16

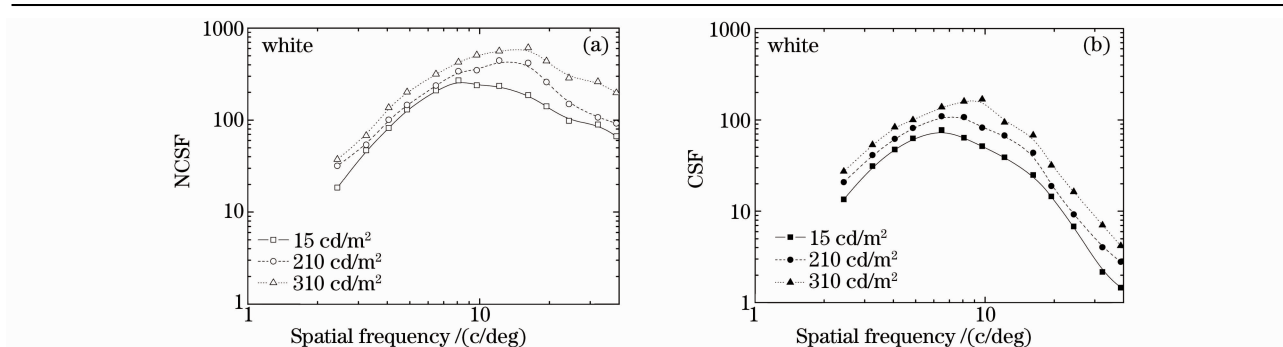


图 5 4 只人眼在白光下的平均 NCSF 曲线(a)和平均 CSF 曲线(b)

Fig. 5 Mean NCSF (a) and mean CSF (b) in the white light for four individual eyes, respectively

为了定量地描述亮度对白光 NCSF 的增益,根据(3)式计算了 4 只个体眼在亮度为 310 cd/m² 与 15 cd/m² 时的白光 NCSF 对数比值和 CSF 对数比值。图 6 给出了比值随空间频率的变化特性,其中虚线表示 4 只个体眼的白光 NCSF 对数比值的平均曲线,实线表示相应的白光 CSF 对数比值的平均曲线,个体眼之间的差异由误差棒给出。可以看出,NCSF 和 CSF 比值的最低点均出现在空间频率 5 c/deg 上,而 NCSF 的比值曲线低于 CSF 的比值曲线,尤其是在高空间频率区域,它们的差异更为明显。NCSF 比值曲线在整个空间频率上变化相对平稳,其最低值为 1.09,最高值是在 16 c/deg 空间频率处的 1.28。而 CSF 比值曲线在高空间频率区域急速上升,其最低值为 1.11,而最高值是在 39 c/deg 空间频率处的 3.8。由于只有 NCSF

曲线是反映从视网膜到大脑的神经系统的视觉特性,因此 NCSF 的对数比值才能客观反映视觉的神经系统对亮度的敏感特性。

4 结 论

采用测量 CSF 和眼波前像差,通过计算来获得 NCSF 的方法,研究了明视觉下亮度变化对白光 NCSF 的影响。对 4 只人眼分别进行白光(15,210 和 310 cd/m^2)三种亮度的 NCSF 测定,并与相应的 CSF 的情形进行了比较。结果发现,白光的 NCSF 曲线随着亮度的增加而提升,并且曲线均向着高空间频率方向移动。对于 4 只眼的统计平均情形,白光下当亮度由 15 cd/m^2 增加到 310 cd/m^2 时,NCSF 曲线的峰值由 270 提高到 610,相应峰值点的空间频率由 8 c/deg 频移到 16 c/deg 。

高亮度和低亮度的 NCSF 的对数比值随空间频率的变化相对平稳,在所研究的两个亮度下,白光 NCSF 的平均增益在 1.09 到 1.28 之间变化。作为对比,相应的 CSF 的对数比值随空间频率的变化相对急剧,白光 CSF 的平均增益在 1.11 到 3.80 之间变化。由于 NCSF 反映的是排除了眼屈光系统的从视网膜到大脑的视觉特性,因此 NCSF 随亮度的变化才是视觉神经系统对亮度敏感特性的客观反映。

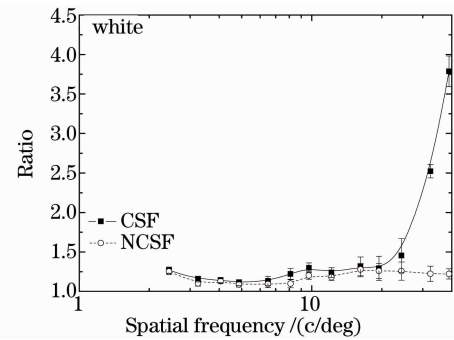


图 6 在白光下,平均亮度分别为 310 cd/m^2 与 15 cd/m^2 时的 4 只人眼的平均 CSF 和 NCSF 对数比值曲线。其个体眼的误差由误差棒给出

Fig. 6 Mean NCSF ratio and mean CSF ratio (the luminance are 310 cd/m^2 and 15 cd/m^2) in white light for four individual eyes. The error bar gives the individual diversity

参 考 文 献

- 1 Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1338~1342
雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1338~1342
- 2 Huang Min, Liao Ningfang, Liu Haoxue *et al.*. Cathode-ray tube color perceptible color difference threshold evaluation in visual color matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 599~603
黄敏, 廖宁放, 刘浩学等. 颜色视觉匹配中显示器颜色色差阈值的评价[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 599~603
- 3 Zhang Ziyang, Shi Junsheng, Yu Hongfei *et al.*. Accuracy of visual estimating gamma value for CRT monitor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1746~1750
张子扬, 石俊生, 余鸿飞等. 视觉估计阴极射线管显示器伽玛值精度研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1746~1750
- 4 Floris L. Vannes, Maarten A, Bouman. Spatial modulation transfer in the human eye[J]. *JOSA*, 1967, **57**(3): 401~406
- 5 Robert A. Smith, Jr. Luminance-dependent changes in mesopic visual contrast sensitivity[J]. *J. Physiol.*, 1973, **230**(1): 115~135
- 6 M. Dressler, B. Rassow. Neural contrast sensitivity measurements with a laser interference system for clinical and screening application[J]. *Invesr. Ophthalmol.*, 1981, **21**(5): 737~744
- 7 D. R. Williams. Visibility of interference fringes near the resolution limit[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(7): 1087~1093
- 8 Tao Liu. Measurements of retinal aerial image modulation (AIM) for white light based on wave-front aberration of human eye[J]. *Optik*, 2010, **121**(1): 101~106
- 9 Ming Liu, Zhaoqi Wang. The study of wavelength-dependent wavefront aberrations based on individual eye model[J]. *Optik*, 2008, **119**(8): 383~397
- 10 Yuan Xuncang. Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. 386~387
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. 386~387
- 11 Ge Jingjing. Measurement of neural contrast sensitivity function of human eyes based on visual chart and wave-front aberration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 662~668
葛婧菁. 利用视标和波前数据的 NCSF 测量[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 662~668
- 12 W. A. H. Rushton. Visual Adaptation[M]. London: Proc. Rpy. Soc., 1965. 40~46
- 13 S. G. de Groot, J. W. Gebhard. Pupil size as determined by adapting luminance[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1952, **42**(7): 492~495