

对比敏感度检测方法的研究进展

曹宁^{1,2}, 卢秀珍^{2,3}, 毕爱玲², 毕宏生^{1,2,3}

引用:曹宁,卢秀珍,毕爱玲,等.对比敏感度检测方法的研究进展.国际眼科杂志 2020;20(7):1192-1196

基金项目:山东省重点研发计划项目(No.2017CXGC1211, 2016GGH3119)

作者单位:¹(250014)中国山东省济南市,山东中医药大学;
²(250002)中国山东省济南市,山东省中西医结合眼病防治重点实验室 山东省高校中西医结合眼病防治技术(强化)重点实验室 山东中医药大学眼科研究所;³(250002)中国山东省济南市,山东中医药大学附属眼科医院

作者简介:曹宁,在读硕士研究生,研究方向:屈光不正及小儿斜弱视。

通讯作者:卢秀珍,教授,硕士研究生导师,研究方向:小儿斜视与弱视. luxzhluxzh@163.com;毕宏生,教授,博士研究生导师,研究方向:白内障. hongshengbi1@163.com

收稿日期:2019-08-13 修回日期:2020-05-28

摘要

对比敏感度(CS)的研究近些年来在眼科学和视觉光学领域受到广泛关注。相比视敏度(VA)检查,CS检查可全面准确地揭示患者的视功能状态,现已成为多项眼科疾病预测、诊断、病情进展及疗效评价的重要指标。为提高眼科临床及科研领域CS检测的精确度,CS检测方法不断得到改进与创新,主要包括客观检查和主观心理物理学检查。这两类检测方法都有其优点和局限性,且主要针对的受试人群也不同。而随着当前“互联网+”热潮的掀起,国内外许多研究机构先后开发出基于计算机测量空间CS的软件,为CS检查提供了更为便捷的方法。本文综述了常见CS检测方法的视标设计、测量要求及主要适用人群等特点。

关键词:对比敏感度;检测方法;眼科;视功能;视觉光学
DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2020.7.17

Research progress of contrast sensitivity detection

Ning Cao^{1,2}, Xiu-Zhen Lu^{2,3}, Ai-Ling Bi², Hong-Sheng Bi^{1,2,3}

Foundation item:Key Research and Development Plan of Shandong Province(No.2017CXGC1211,2016GGH3119)

¹Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, Shandong Province, China; ²Shandong Province Key Laboratory of Integrated Chinese and Western Medicine for Eye Disease Prevention and Control; Key Laboratory of Integrative Medicine for Prevention and Treatment of Ocular Diseases in Colleges and Universities of Shandong Province, Jinan 250002, Shandong Province, China; ³Affiliated Eye Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250002, Shandong Province, China

Correspondence to: Xiu-Zhen Lu. Shandong Province Key Laboratory of Integrated Chinese and Western Medicine for Eye Disease Prevention and Control; Key Laboratory of Integrative Medicine for Prevention and Treatment of Ocular Diseases in Colleges and Universities of Shandong Province, Jinan 250002, Shandong Province, China; Affiliated Eye Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250002, Shandong Province, China. luxzhluxzh@163.com; Hong-Sheng Bi. Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, Shandong Province, China; Shandong Province Key Laboratory of Integrated Chinese and Western Medicine for Eye Disease Prevention and Control; Key Laboratory of Integrative Medicine for Prevention and Treatment of Ocular Diseases in Colleges and Universities of Shandong Province, Jinan 250002, Shandong Province, China; Affiliated Eye Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250002, Shandong Province, China. hongshengbi1@163.com
Received:2019-08-13 Accepted:2020-05-28

Abstract

• Contrast sensitivity (CS) has been widely studied in the research of ophthalmology and optometry. Compared with visual acuity (VA) test, CS assessment can fully and accurately reveal the state of visual function, which has become an important indicator for the prediction, diagnosis of eye diseases and for the evaluation of the disease progression and therapeutic effect. To improve the accuracy of CS measurement, CS detection methods have been constantly improved and innovated, mainly including objective examination and subjective psychophysical examination. Both methods have their advantages and limitations and the main target population is slightly different. With the development of the current Internet Plus, the CS detect software based on computer technology has been successively developed by many research institutions, which provide more convenient detection methods. Therefore, this paper reviews the visual standard design, measurement requirements and main applicable characteristics of common CS detection.

• KEYWORDS: contrast sensitivity; detection method; ophthalmology; visual function; visual optics

Citation: Cao N, Lu XZ, Bi AL, et al. Research progress of contrast sensitivity detection. *Guoji Yanke Zazhi(Int Eye Sci)* 2020; 20(7):1192-1196

0 引言

临床上最常采用视敏度检查评估和监测视觉系统整体性能变化,而现实生活中,视觉系统要处理的光水平和对比度范围很广,若将视觉功能的评估限制在20/20或更高的分辨率,则会忽略约90%的视觉世界^[1-2]。临床中也

发现 20/20 视力的患者在空间频率 6c/d 的对比敏感度阈值存在显著差异^[3],这表明某些眼部疾病检查及预后评价若仅依靠单一的传统标准视力表,即便裸眼或最佳矫正视力 ≥ 1.0 ,也未必代表视觉质量良好,其视功能或许存在着不同程度的缺陷,相比之下,CS 可为早期诊断及鉴别诊断提供重要参考依据^[4]。而面对多种 CS 测量方法的选择,检查者需了解各方法之间的优势差异,并结合临床不同眼部疾病及眼科科研领域中因需求、目的和测量人群的不同,从而选择最适合的 CS 检测方法。

1 主观心理物理学检查

1.1 正弦波条纹显示器检测法 1956 年, Schade^[5] 研究采用电子示波器显示其设计的正弦条栅,用光度计计算屏幕照度,并用光电管测定对比度,首次测量了以空间频率为自变量的人眼对比敏感度函数(contrast sensitivity function, CSF)。1968 年, Campbell 等^[6] 基于 Schade 的设计,采用阴极射线管按一定速度的帧频在屏幕上产生光栅。该研究通过不同的调制波形产生光栅视标,射束强度在通过同步波形发生器信号调制后在屏幕上显示出固定空间频率的光栅。光栅的对比度通过调整调制电压进行改变。此后,研究者设计了计算机操控的正弦波条纹显示器,由于价格昂贵,故近年来改进为用电视屏来显示正弦波条纹^[7]。

1.2 图表检查法 图表法是采用本身并不发光,而须通过对外界环境光线的反射率的不同产生对比度差异的印刷图表来完成的。此类产品成本低,易携带,有利于野外作业和偏远地区的检查。但因受到制版、印刷、冲印等诸多条件的限制,且易受外界环境亮度影响,故该检查准确性相对较低。

1.2.1 Arden 光栅图片法 1978 年, Arden^[8] 将采用不同频率、不同对比度设计的正弦光栅图册首次应用于临床 CS 的检测,该套图册共有 7 张光栅卡片,大小为 $305 \times 280\text{mm}^2$,一侧边有测量对比度的对数尺。第 1 张用于示范,其余 6 张用于测试,以空间频率为 0.2、0.4、0.8、1.6、3.2、6.4c/d 依次递增,且在各个空间频率下的对比度又细分为 9 个梯度,检查者距离图册 57cm,可左右眼单独检查。该检查方法由于只设计了低、中空间频率的视标,故无法检测高频 CS。

1982 年, Vaegan 对 Arden 的光栅条纹图册法进行了改进^[9],将 Arden 的光栅图册分放在一组试验模板上,其中第 2~5 块圆盘直径为 7cm,第 6、7 块直径为 3cm,条栅的方向分别为垂直、水平和斜向,从高对比度到低对比度,依次测量左右眼,受检者只需回答是否看见即可。相比 Arden 光栅图册法,该检查方法更简单有效,但改进后的检查时间也随之延长至原来的 2 倍。

1.2.2 Pelli-Robson 对比敏感度图表法 1988 年, Pelli 等^[10] 推出的 Pelli-Robson CS 图现已成为用字母测量 CS 的标准参考。该图表的对比度测试范围很广(100%~0.56%),由 8 行 48 个单一大小的 Sloan 字母组成(每行 2 组,每组 3 个字母),同一组内对比度相同,每 3 个一组的 CS 降低 0.15Log 单位。测量 CS 时,一般要求检查距离为 1m,受检者从左到右、从上到下依次读出每个字母,若能识别出一组中 2 个及以上的字母,则认为其达到该组的对比度水平,最终的取值为该受检者能达到的最低对比度,此距离下测得的 CS 空间频率接近 1c/d。若增大检查

距离,对应的空间频率也将改变。如距离为 3m 时,反映的 CS 空间频率接近 3c/d。若受检者不认识字母,则给其印有该表所有字母的卡片,让其找出与检查者指示相同的字母。该测试图为临床及科研中测量 CS 采用的最广泛的方法之一。

1.2.3 Mars 字母对比敏感度图法 2005 年, Arditi^[11] 在 Pelli-Robson CS 图基础上对其进行了改进,采用与之类似的半色调筛选方法,设计出 Mars CS 图。该图中 Sloan 字母上下呈对数递减,对比度衰减(0.04Log 单位)比 Pelli-Robson CS 图(0.15Log 单位)小得多,故其测量结果更加精确。由于其打印在长宽分别为 22.8、35.6cm 的树脂涂布纸上,体积小,从而易使图表照亮一致,且易于储存以保护其免受机械和光照等物理降解的损害,故进一步提高了 CS 测量的精度。测试时受检者可手持或放在支架上,故检测方便不需占太大空间。

1.2.4 Vistech 图表法 1984 年, Ginsburg^[12] 首次提出 Vistech CS 视力表。该表是基于 Arden 的光栅图册法研制的一套光栅图片,并引入调制传递函数(modulation transfer function, MTF)的概念,根据灰度调制曲线的变化制成宽窄、明暗不同的条栅图检查表。条栅包括垂直、右斜和左斜 3 种方向。该表由 6 行直径为 3 英寸的圆形光栅组成,每行有 1、2、4、8、16、24c/d 不同空间频率,自左至右对比度依次下降,其中第 1 个为高对比度范例,中间 8 个为测试图,第 9 个为无条栅空白图。测量时,受检者逐行测试,依次往下,检查者将其所能看清的最大 CS 视标标定在记录纸上。检查完后,将记录纸上不同空间频率的 CS 等级连线即可得 CSF 曲线。

1986 年和 1990 年, Ginsburg 先后又报道了 VCTS-6500^[13] 和 MCT-8000^[14],与 Vistech CS 视力表不同的是,挂壁式 VCTS-6500 有 5 行,每行由 1.5、3、6、12、18c/d 不同空间频率构成。1996 年, Ginsburg 推出了第二代 Vistech 图表,即功能性视力对比测试(functional acuity contrast test, F.A.C.T)^[15],其空间频率及光栅方向与第一代相同,不同的是采用了更小的步长(0.15Log)和自动频率控制(automatic frequency control, AFC)方法,从而大大地提高了 CS 检测的可重复性。

1.2.5 Cardiff 对比敏感度检测卡法 该测试卡是由亮度不同的亮灰色和暗灰色轮廓图形(宽度一致)构成。其主要功能是运用“优先注视”的方法。测量时,检查者只需观察受检者眼睛,看其视线是否注视着卡片图形所在的位置,无需语言交流,检查者就可判断受检者是否可分辨出图形^[16]。该检查法尤其适用于幼童(12mo~3岁)、脑卒中、智力障碍、脑部损伤及阿尔兹海默症患者等配合度较差的人群使用。

1.3 透射式光栅简易装置测量法 Arden 的光栅图册法不能测试更高空间频率下的 CS,透射式光栅设备的发明和利用弥补了 Arden 光栅图册法的不足。该装置由视标板、高演色荧光灯和扩散板等组成,用微机控制将正弦光栅感光在视标底片上。视标上对比度依次递增,且各处的平均透光率均一致。由于此类仪器在检测时不易受周围环境亮度等的影响,具有较好的稳定性和可重复性,故广泛应用于眼科临床及科研工作中。

1.3.1 CSV-1000E CSV-1000E 是一种灯箱式 CS 检测仪,具有极好的精确性,可早期发现很多疾病导致的细微

视网膜功能变化,为临床提供可靠、敏感的诊断依据^[17-20]。除可测试CS外,该检测仪还可进行眩光CS、低视锐度和低视力测试。由于其运用光控制技术,采用标准的真实自然光,故可根据环境光的亮度,自动使背景光恒定保持在 $85\text{cd}/\text{m}^2$ (明适应)或 $3\text{cd}/\text{m}^2$ (暗适应),从技术上保证了光亮度的标准化和极好的重复性。该仪器除符合美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)的标准正弦曲线光栅空间频率(3、6、12、18c/d)要求外,还可提供1.5、4.5、9、27c/d等其他空间频率,其特殊检查距离还包括1、1.25、3、4m等,故极大地拓展了应用范围。测量CSF时,其标准测试距离为2.5m,通常有A、B、C、D四排视标,每排由8对不同对比度的条栅图(上下2个条栅图为1对)组成,对比度顺次降低,每对条栅图中有1个为空白,受检者需回答有条栅的图在上还是下,根据测试结果即可绘制出CSF。

1.3.2 OPTEC-6500 视功能测试系统 该系统是一种接触式(幻灯片模拟式)CS仪,其不仅可检查视力、视野、色觉、立体式及CS等传统意义上所讲的视功能,还可检查融合视、低视力、失能眩光^[19-22]。其微处理器可持续控制目标照明和眩光亮度,以确保可重复性及精确性。其测试的目标照明为白天 $85\text{cd}/\text{m}^2$,夜晚 $3.0\text{cd}/\text{m}^2$;其远距离的眩光亮度为夜晚眩光(28Lx)和白天眩光(135Lx)。仪器上部的透视系统用于远距离测试(6m),受检者需直视前方;下部的透视系统用于近距离测试(45cm),受检者需保持垂直下看。测量CSF时,在F.A.C.T统计表格中选择适当的测试条件,要求受检者在室内自然光线下适应5min,测试窗将显示不同的视标图片,每个空间频率的测试图均有9个线形正弦光栅,受检者需依次回答光栅方向,测量结束后相应软件便会自动生成CSF。

1.4 激光干涉条纹仪测量法 该仪器采用氩-氟激光光束产生背景光和干涉光,这些光束同时汇聚到眼节点面上,再发散投射到视网膜上,从而形成可变对比度干涉视标,作为特殊视标来测定CS。此类仪器不受间质混浊和屈光状态的影响,可直接测定视网膜至大脑系统的视功能、激光视力和激光CSF^[23-24],故该仪器适用于角膜混浊、白内障及高度屈光不正等特殊人群。

1.5 基于计算机测量空间对比敏感度软件 随着当前“互联网+”热潮的掀起,国内外许多研究机构先后开发出此类基于计算机测量空间CS的软件,为CS检查提供了更为便捷的测量手段。

1.5.1 基于C/C++编写的单机操作的空间对比敏感度测量程序 这类软件限定在一些特殊的实验基础及运行条件下方能测量,因不同平台下部分C语言的语法特性不同,所以其无法兼容各平台统一运行而限制了该测量软件的应用^[7]。

1.5.2 Psychtoolbox/Vision Egg 开发的空间对比敏感度检查软件 该测量软件具有不错的测试效果,但操作者不仅需要安装相应的支持软件,还需有一些装载Matlab或Python方面的技术,对操作者的要求相对较高^[7]。

1.5.3 Spaeth/Richman 对比敏感度测试 Spaeth/Richman对比敏感度测试(SPARCS)^[25-26]是一种通过访问<https://www.sparcscontrastcenter.com>的测试方法,旨在确定受检者中心视觉和周边视觉的对比度阈值。其被设计用于1024×768分辨率、256灰度级和至少宽22cm、高

26.5cm的显示器上。患者距显示器50cm,水平视野约30°,垂直视野约23.5°,其中中心测试区水平视野为5°,垂直视野为3.5°。受检者需注视中心区域,当寻找出不一样的区域(5个测试区域之一会出现0.3s空间频率为0.4c/d的垂直方波光栅)时,暂时中断固视,选择区域,随后再次注视中心区域,激活程序,显示下一张图片(带有光栅的区域随机出现)。SPARCS测试的对比度范围为100%~0.45%,在不同级别之间降低约0.15Log单位。患者初始回答正确会向前推进4个级别,直到回答错误时,呈现2个容易的级别,然后每次前进或后退1个级别,直到在某级别上2次回答错误,从而确定阈值。因SPARCS可测量中央和周边区域的CS,且成本低,易执行,不依赖于读写能力,也不受一般认知能力的影响,且具有较高的复测可靠性,故现被证明为评估鉴定青光眼、屈光不正及白内障患者CS的可靠方法^[27]。

1.5.4 基于B/S的空间对比敏感度的测量方法 基于B/S的空间对比敏感度的测量方法^[7]为一款基于浏览器/服务器模式(Browser/Server, B/S)的CS测量软件,该软件只需通过浏览器访问服务器网页即可进行CSF测量,其分为通过键盘输入和鼠标输入两种不同方式的测量方法。研发者对空间频率分别为0.5、1、2、4、8、16c/d下的高斯模糊的正弦光栅的刺激源进行了伽马校正处理,以使刺激源灰度更符合正弦分布变化效果。当后台程序对测量结果处理后,便进行对比度提高10%、降低10%或维持不变的反馈调整,并对各空间频率下对比度变化的拐点值进行平均值计算。该测量方法有效地降低了CS测量难度及费用。

1.5.5 视觉灵敏度测试仪 视觉灵敏度测试仪(MAV-III)^[28]视标设计为不同偏光频率和不同CS水平的圆形正弦光栅图像,测试包括6个空间频率(0.75、1.5、3、6、12、18c/d)和8个对比度水平,每个空间频率包括9个条栅图,各自对应不同的CS值。受检者需矫正视力,坐于距液晶屏3m处的位置,双眼与液晶屏保持水平。双眼分别测试,遮盖一眼,按照从低频到高频,从高对比度到低对比度的顺序,逐个分辨每个条栅图里条纹的方向。系统自动变化图片(垂直、向右倾斜或向左倾斜),受检者需尽可能多的分辨图中条纹方向直至不能辨别,系统软件自动记录检查结果。

1.5.6 视觉监视系统 视觉监视系统(Monpack3)^[29]为法国Metrovision公司研发生产的一种多功能视觉生理学检查系统,可提供全面的视觉电生理检查和视觉心理物理学检查。其针对不同的检测对象,专门在软硬件上进行了优化设计以满足不同需求,可完成多种视觉功能如视野、CS、VA、眩光测试等检查,还可执行视网膜电图(electroretinogram, ERG)及视觉诱发电位(visual evoked potentials, VEP)检查。测量CSF时,每个测量点至少测量3次,取后2次的平均值为结果,若这2次相差过大,则再次测量,直至得到2次相近的测量结果,再求其均值。该检查系统自带正常人体数据库,因此可同时提供统计学偏差图以供临床医师判断病情。

2 客观检查法

心理物理的方法测定CS是在某一空间频率下,逐渐变换条栅的对比度,直到受检者辨认不出条栅为止,此时的对比度视为该空间频率下的对比度阈值。而用电生理

的方法测试,则是采集不同空间频率、不同对比度时的稳态 VEP。

2.1 视觉诱发电位 VEP^[30]是利用不同的对比度、空间频率、色彩及视角的刺激模型,依照国际标准电极系统,记录下大脑视皮质细胞的总合电反应,以衡量从视神经到视皮层之间的视觉通路的完整性。该电位非常小,表示视皮层对呈现在人眼视野中央的刺激响应,其振幅和延迟可用来评估视觉系统正常与否,但其亦会受到介质混浊及视网膜疾病等影响。由于视皮层对中央视野的表征区域大于周边视野,因此 VEP 被认为主要反应的是中央区视觉活动。测试时受检者需坐在舒适、安静、具有电磁屏蔽的暗室内,以最佳视力平视 1m 处屏幕中央“十”字,在耳后乳突、枕骨粗隆及前额正中处分别放置地电极、记录电极及参考电极。先测视力较好眼,再测视力较差眼,同一对比度下,刺激光栅从低频到高频翻转一定次数,然后进入下一对比度检测,每只眼刺激光栅对比度按 2.0、1.7、1.4、1.1、0.9、0.7、0.5、0.3、0.1、0 从低到高依次测量,检查后将各空间频率对应的振幅值输入分析系统,从而确定每个空间频率对应的最小对比度值,作为其对比敏感度阈值,最终做出以空间频率为横坐标,以对比度值为纵坐标的 CSF^[31]。由于 VEP 能够较为客观地反映视觉功能情况,且测量时间短,不易受心理物理因素影响,故主要针对老人、婴幼儿等不能进行准确主观判断而配合度较差的人群。

2.2 视觉质量分析仪 光学技术在眼科领域中的应用近些年备受关注,双通道技术自 1955 年由 Flamant 提出后便一直得到广泛应用。客观综合评价视觉质量变得越来越重要,各种新颖的视觉质量分析仪^[28]逐渐应用于眼科临床,如双通道客观视觉质量分析系统(OQASTM II)^[32]、光线追踪波阵面像差分析系统(iTrace visual function analyzer, iTrace)^[33]等能够更加快捷且准确地检测人眼视觉质量情况,为角膜塑形术、近视和老视等屈光手术、人工晶体植入术和白内障诊断分级等临床应用提供综合的视觉质量评估^[34],且其各项指标均有较好的重复性。

2.2.1 双通道视觉质量分析系统 OQAS^[35-36]是一种采用双通道技术的视觉质量分析仪,用于评估视网膜成像质量,自 2002 年开始应用于眼科视觉功能的检测。OQASTM II^[37]为 OQAS 的最新版本,与第一代 OQAS 相比,OQASTM II 在设计、软件及硬件等方面均有提升,能更快测得结果并作出更全面的视觉质量分析。该分析仪使用激光二极管发射的近红外光线(波长 780nm)通过人眼屈光介质后成像于视网膜上,光线经原通路返回后被接收,收集到的图像能够反映眼内光学成像质量的更多信息。其可通过测量散射指数(objective scatter index, OSI)、MTF、截止频率(MTF cut off)、斯特列尔比(strehl ratio, SR)、模拟对比度视力(OV100%、OV20%、OV9%)等参数对视觉质量进行更加全面且客观的评价。其中 MTF 是指不同空间频率的成像与物对比度之间的差异,反映影响 CS 的光学因素,最佳矫正视力则为 MTF 曲线上的一点,一般来说 MTF 值随着空间频率的增加而逐渐降低,MTF 值越大,证明成像质量越好。

测试时,受检者需在暗室环境下,瞳孔直径需 $\geq 4\text{mm}$,屈光不正给予矫正,光标对准瞳孔中央,显示屏上清晰成像,检查一只眼时,遮盖对侧眼,要求受检者始终保持头部

固定不动,以保证测量的准确性和可重复性。测量时快速捕捉 6 次点扩散函数图像,计算出各项指标。测量前嘱受检者眨眼以保持泪膜的完整,进行 MTF 测量,并记录 5、10、15、20、25、30c/d 空间频率的平均值。连续测量至少 3 次,每次间隔 30s。

2.2.2 光线追踪波阵面像差分析系统 iTrace 系统^[33]测量 MTF 方法与 OQASTM II 相同,同样需在暗室环境下,瞳孔直径 $\geq 4\text{mm}$,嘱咐受检者注视像差仪的红色光标,测量受试眼的波阵面像差。经 iTrace 3.1 软件去除低阶像差后模拟受检者仅受高阶像差影响的 MTF 曲线,记录 5、10、15、20、25、30c/d 空间频率的 MTF 值,连续测量至少 3 次,每次间隔 30s。评价人眼 MTF 的目的是客观评价和预测受检者真实的视力和 CS 的表现。OQASTM II 检测的 MTF 值与最佳矫正视力和 CS 所有空间频率均呈正相关,而 iTrace 检测的 MTF 值与最佳矫正视力和 CS 的部分空间频率相关。

3 展望

CS 已然被视为是衡量人类空间视觉最全面的单一指标^[4],其在眼科疾病预测、诊断、病情进展及疗效评价中的应用得到了学者们的一致认可。相信未来在科研工作者的努力下,更完善的 CS 检测方法将会广泛地应用于眼科临床及基础科研等诸多领域中,为人类视觉质量的改善提供更为有效的检测手段。

参考文献

- 1 Roark MW, Stringham JM. Visual Performance in the "Real World": Contrast Sensitivity, Visual Acuity, and Effects of Macular Carotenoids. *Mol Nutr Food Res* 2019;63(15):e1801053
- 2 Pelli DG, Bex P. Measuring contrast sensitivity. *Vision Res* 2013;90:10-14
- 3 Niemeyer JE, Paradiso MA. Contrast sensitivity, V1 neural activity, and natural vision. *J Neurophysiol* 2017;117(2):492-508
- 4 Adams RJ, Courage ML. Using a single test to measure human contrast sensitivity from early childhood to maturity. *Vision Res* 2002;42(9):1205-1210
- 5 Schade OH Sr. Optical and photoelectric analog of the eye. *J Opt Soc Am* 1956;46(9):721-739
- 6 Campbell FW, Robson JG. Application of fourier analysis to the visibility of gratings. *J Physiol* 1968;197(1):551-566
- 7 周小强. 基于 B/S 的空间对比敏感度测量研究. *中国生物医学工程学报* 2015;34(1):124-128
- 8 Arden GB. *Advances in Diagnostic Visual Optics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 1983:198-206
- 9 Banks MS. The development of spatial and temporal contrast sensitivity. *Curr Eye Res* 1982;2:191-198
- 10 Pelli DG, Robson JG, Wilkins AJ. The design of a new letter chart for measuring contrast sensitivity. *Clin Vis Sci* 1988;2:187-199
- 11 Arditi A. Improving the design of the letter contrast sensitivity test. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2005;46(6):2225-2229
- 12 Ginsburg AP. A new contrast sensitivity vision test chart. *Am J Optom Physiol Opt* 1984;61:403-407
- 13 Corwin TR, Richman JE. Three clinical tests of the spatial contrast sensitivity function: a comparison. *Am J Optom Physiol Opt* 1986;63(6):413-418
- 14 Ginsburg AP, Waring GO, Steinberg EB, et al. Contrast sensitivity under photopic conditions in the Prospective Evaluation of Radial Keratotomy (PERK) Study. *Refract Corneal Surg* 1990;6(2):82-91
- 15 Rosenthal B, Cole R. *Functional Assessment of Low Vision*. St Louis: Mosby Year Book Inc 1996:77-88
- 16 王育良, 李凯. *眼视光学*. 北京: 人民军医出版社 2008: 112-113

- 17 Ulrich K, Palmowski-Wolfe A. Comparing Three Different Contrast Sensitivity Tests in Adults and in Children with and without Amblyopia. *Klin Monbl Augenheilkd* 2019;236(4):434-437
- 18 Öner Ö, Akça BS, Oto S, et al. Contrast Sensitivity in Microtropic and Anisometropic Eyes of Successfully Treated Amblyopes. *Turk J Ophthalmol* 2017;47(2):74-79
- 19 Koefoed VF, Assmuss J, Høvdng G. Correlation between observation task performance and visual acuity, contrast sensitivity and environmental light in a simulated maritime study. *Acta Ophthalmol* 2018;96(4):390-396
- 20 Lin L, van de Pol C, Vilupuru S, et al. Contrast Sensitivity in Patients With Emmetropic Presbyopia Before and After Small-Aperture Inlay Implantation. *J Refract Surg* 2016;32(6):386-393
- 21 Zhao PF, Li SM, Lu J, et al. Effects of higher-order aberrations on contrast sensitivity in normal eyes of a large myopic population. *Int J Ophthalmol* 2017;10(9):1407-1411
- 22 Koefoed VF, Baste V, Roumes C, et al. Contrast sensitivity measured by two different test methods in healthy, young adults with normal visual acuity. *Acta Ophthalmol* 2015;93(2):154-161
- 23 Gutzeit A, Sutter R, Froehlich JM, et al. ECG-triggered non-contrast-enhanced MR angiography (TRANSE) versus digital subtraction angiography (DSA) in patients with peripheral arterial occlusive disease of the lower extremities. *Eur Radiol* 2011;21(9):1979-1987
- 24 Chen WR, Ye HH, Qian YY, et al. Comparison of higher-order aberrations and contrast sensitivity between Tecnis Z9001 and CeeOn 911A intraocular lenses: a prospective randomized study. *Chin Med J (Engl)* 2006;119(21):1779-1784
- 25 Richman J, Zangalli C, Lu L, et al. The Spaeth/Richman contrast sensitivity test (SPARCS): design, reproducibility and ability to identify patients with glaucoma. *Br J Ophthalmol* 2015;99(1):16-20
- 26 Sun Y, Erdem E, Lyu A, et al. The SPARCS: a novel assessment of contrast sensitivity and its reliability in patients with corrected refractive error. *Br J Ophthalmol* 2016;100(10):1421-1426
- 27 Thakur S, Ichhpujani P, Kumar S, et al. Assessment of contrast sensitivity by Spaeth Richman Contrast Sensitivity Test and Pelli Robson Chart Test in patients with varying severity of glaucoma. *Eye (Lond)* 2018;32(8):1392-1400
- 28 周灵. 早期白内障的视觉质量评估. 重庆医科大学 2018
- 29 赵冠华. 对比敏感度函数在视觉功能鉴定中的应用研究. 第四军医大学 2017
- 30 李孙平, 廖琦, 胡宇, 等. 图形 P-VEP 评估儿童弱视治疗效果的临床价值. 西南国防医药 2018;28(5):468-470
- 31 杜婉丽. 客观对比敏感度检查在弱视患者中的应用研究. 国际眼科杂志 2009;9(2):321-324
- 32 毕青云. OQAS 对糖尿病视网膜病变激光术后视觉质量的评价. 中国医科大学 2018
- 33 Qiao L, Cai X, Wan X, et al. Comparison of ocular modulation transfer function measurements by ray tracing wavefront technology and double-pass system. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi* 2015;51(1):20-25
- 34 Chen T, Yu F, Lin H, et al. Objective and subjective visual quality after implantation of all optic zone diffractive multifocal intraocular lenses: a prospective, case-control observational study. *Br J Ophthalmol* 2016;100(11):1530-1535
- 35 林佳. 个性化选择非球面人工晶状体的视觉质量研究. 川北医学院 2017
- 36 谷天瀑. OQAS 评估配戴角膜塑形镜前后的视觉质量和眼内散射变化研究. 天津医科大学 2016
- 37 夏风杰. 双通道视觉质量分析系统对青年近视患者视觉质量的客观评估. 南京大学 2016