

特邀专稿

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2021.04.002

新型显示视觉感知与健康研究进展*

王莉莉^{1**}, 屠彦¹, 牟同升², 刘卫东³, 李新国⁴,
赵英⁵, 张宇宁¹, 王保平¹

(1. 东南大学信息显示与可视化国际合作联合实验室, 南京 210096; 2. 浙江三色光电技术有限公司, 浙江德清 313216; 3. 海信视像科技股份有限公司, 山东青岛 266071; 4. 京东方科技集团股份有限公司, 北京 100176; 5. 中国电子技术标准化研究院, 北京 100007)

摘 要: 针对新型显示高亮度、广色域、高对比度、高临场感这几大技术趋势, 介绍、分析了在亮度感知及调节、色域表现及光谱影响、高动态范围优化实现和近眼显示等方面的视觉感知与健康研究进展, 为新型显示技术的发展提供参考。

关键词: 亮度感知; 广色域; 高动态范围; 近眼显示; 视觉感知; 视觉健康

中图分类号: O436; TN27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2021)04-0246-08

Research Progress on Visual Perception and Vision Health for New Display Technologies

WANG Lili¹, TU Yan¹, MOU Tongsheng², LIU Weidong³, LI Xinguo⁴, ZHAO Ying⁵,
ZHANG Yuning¹, WANG Baoping¹

(1. Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization, Southeast University, Nanjing 210096, CHN; 2. Zhejiang Sensing Optronics Co., Ltd., Deqing Zhejiang 313216, CHN; 3. Hisense Visual Technology Co., Ltd., Qingdao Shandong 266071, CHN; 4. BOE Technology Group Co., Ltd, Beijing 100176, CHN; 5. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, CHN)

Abstract: With reference to the major technological trends of high luminance, wide colour gamut, high contrast and high immersion in new display technologies, the progress of research on visual perception and health were introduced and analyzed in the areas of luminance perception and adjustment, colour performance, high dynamic range optimization and near-eye display, in order to provide a reference for the development of new display technologies.

Key words: perceived brightness; wide color gamut; high dynamic range; near-eye display; visual perception; vision health

收稿日期: 2021-11-01

* 基金项目: 十三五国家重点研发计划(2016YFB0401200); 中央高校基本科研业务费专项资金(2242021k30002)

作者简介: 王莉莉(1983—), 女, 博士, 副教授, 主要从事信息显示与视觉感知研究; (E-mail: wll@seu.edu.cn)

屠彦(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事信息显示与视觉感知研究; (E-mail: tuyan@seu.edu.cn)

牟同升(1963—), 男, 硕士, 教授, 主要从事光生物安全性及光学测量技术研究。 (E-mail: tsmou@zju.edu.cn)

** 通讯作者

引言

新型显示是国家重点发展的战略性新兴产业,中国显示产业已经实现跨越式发展,成为全球显示产业的重要力量。在全球显示产业格局的巨变中,我国占有广阔的应用市场、优越的环境,新型显示技术的发展必将为我国国民经济的发展提供重要支撑与保障。

显示器件的性能一直以来都是依据各种光电测量参数进行衡量的,比如亮度、色域、功耗等。但是显示器件的最终服务对象是观看者,传统仅依靠物理测量的方法无法准确反映人眼所看到的现象。如图1左图所示,人眼能明显感觉A方块比B方块暗。但当我们仅保留A、B两个方块不变,而抹去它们周围其它方块的亮度和阴影信息,如右图,则可以看到A、B两个方块的亮度是一样的。由此可见,人眼对亮度的实际感知效果受到周围环境的影响。因此,对显示器件实际显示效果的评价除了必要的物理测量以外,应当充分考虑人们在观看过程中的感受。

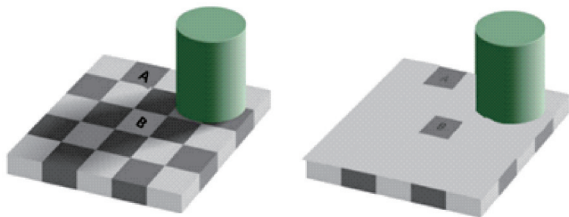


图1 棋盘格阴影错觉(图源:Wikimedia Commons)

Fig.1 Checker-shadow illusion (source: Wikimedia Commons)

近年来,显示器件在技术上向着高亮度、高动态范围、高分辨率、高刷新率、广色域、高临场感等方向迅速发展,同时在应用上考虑到便携性和沉浸感的特殊需求,正逐渐发展出新的器件形态。伴随着显示技术的发展,人们使用显示设备的时间越来越长、使用场景越来越多样化,新型显示的这些发展在给观看者带来体验革新的同时,也对视觉健康造成无法忽视的影响。国内外产学研各界对于显示器件对观看者视觉感受的影响也日益关注,显示器件相关的视觉感知与健康研究已成为重要课题。

一方面,人们在日常生活和生产活动中,面对各类显示屏幕的时间越来越多,使用屏幕的时间急剧增加。2018年由爱尔眼科发布的《国民手机用眼行为大数据》显示,参与调查的数万名网友平均每天使用电子屏时长就将近6h;2020年以来随着新冠疫情的蔓延,居家办公、线上学习越来越普遍,根

据美国媒体研究机构尼尔森(Nielsen)的一项研究预计,2020年第三季度美国18岁以上的成年人平均每天面对各种屏幕的总时间超过13h^[1],显示屏幕在生活中占据越来越重要的地位。显示质量以及感知绩效直接关系到生活质量和生产效率,因此,针对新型显示的视觉感知和健康研究日益迫切。

另一方面,新型显示技术快速发展,显示种类和器件形态越来越丰富,亮度、对比度、色域等显示器件参数设置范围越来越大。以前的CRT屏幕亮度只能到大约200 nit,色域达到约70%NTSC,随着技术的发展,现在QLED电视在显示SDR图像时峰值亮度能达到近1000 nit,色域能达到108%DCI-P3(约108%NTSC)^[2],在显示HDR图像时峰值亮度甚至能超过2000 nit。而便携、柔性等特性带来显示应用场景大幅拓展的同时,也面临环境多变带来的新挑战。用户有了越来越多选择的同时,也带来新的问题。由技术进步推动的对物理参数的极致追求是否能符合人们对观看体验和健康保障的更高要求?

围绕当前主要的新型显示技术趋势,着眼于亮度感知、色域表现、动态范围、沉浸体验等几个方向,分析、介绍相应的视觉感知和健康研究进展,为新型显示技术的发展提供参考。

1 亮度的感知与自适应调节

传统的显示器件应用,如电视机和监视器等,大都有固定的使用地点,而且一般都是室内环境。随着显示以及整个信息技术的发展,使用场景的多样化对显示设备的环境适应性提出了更高要求,其中一个典型的问题就是显示屏幕亮度的感知与优化设置。同样的手机屏幕亮度,在户外阳光下感觉不够亮看不清;而到了室内特别是晚上关灯之后又会觉得太亮刺眼,如图2所示。

东南大学高昕等人针对对角线165 cm(65英寸)

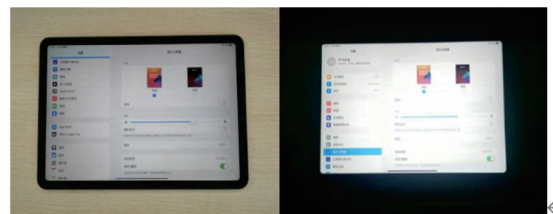


图2 同样的屏幕亮度在不同照明环境中会带来不一样的亮暗感受

Fig.2 Different perceived brightness of the same screen with different ambient illuminations

大屏幕电视的舒适亮度进行了研究,结果表明,在暗环境下显示亮度对感知效果和视觉舒适度均有显著影响。主观问卷和基于近红外脑功能成像技术(fNIRS)实验的研究结果均表明,在实验条件下,屏幕显示的最佳亮度范围为130~400 cd/m²[3-4]。韩国庆熙大学Minkoo Kim等人开展的一项针对室内照明条件对显示舒适亮度的研究表明,在暗环境下观看高亮度显示容易引起无法忍受的眩晕感,而在亮环境下观看低亮度显示则会降低显示内容的可读性,显示亮度的舒适范围随环境照度增加升高[5];当屏幕最大亮度为800 cd/m²时,10 000 lux照度下的舒适亮度为582 cd/m²,在100 000 lux下预计将达到700 cd/m²,而当显示器能显示更大亮度范围时,人们要求的舒适亮度会更高[6]。

随着移动终端显示、车载显示等新应用的兴起,显示设备的应用场景不再局限于室内,很多时候需要在更强的光照下使用。同时,随着显示终端在生产生活包括军事领域的应用拓展,在夜间或者暗环境中使用显示屏幕的场景越来越多,在暗环境中则需要调节显示屏幕亮度至较低值,不致引起观看者的不舒适感。显然,使用场景多样化对显示设备的环境适应性提出了更高的要求。很多显示设备为了适应环境多样性,已经配备了亮度自适应调节功能,当前普遍采用的做法是按照预先设置好的查找表,根据传感器得到的环境光强度来确定当前屏幕亮度设置。这种方法在手机、平板、笔电等显示终端中得到很好的应用,但同时,因为预设查找表无法顾全所有的环境条件,所以在很多时候尚不能完全匹配观看者的实时感受。

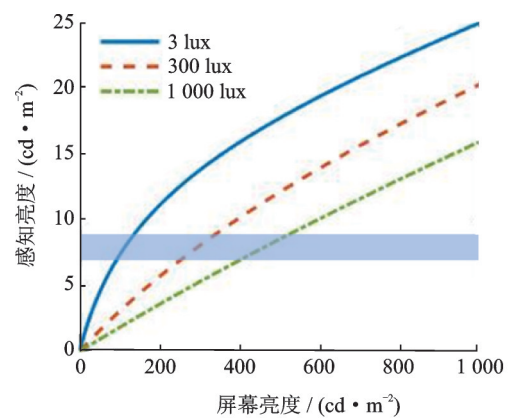
为了能准确匹配不同环境下人眼对显示亮度的真实感知,东南大学张宇宁等人从人眼对亮暗感受的根本模型出发,基于人眼观察视野范围内的空间物理亮度分布 $L(x,y)$,提出采用有效角膜通量密度 F (单位为 $\text{cd}/\text{m}^2 \cdot \text{deg}^2$,式(1))来定量估计瞳孔直径 D (单位为 mm ,式(2)),进而计算感知亮度 E (式(3)),从而建立主观感知亮度与空间光分布的估算模型[7],为研究显示设备在不同环境条件下的亮度优化设置提供了精准的理论支持。

$$F = \iint L(x,y) \cdot e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_1^2} + \frac{y^2}{2\sigma_2^2}\right)} \cdot \frac{1}{(1+x^2)(1+y^2)} dx dy \quad (1)$$

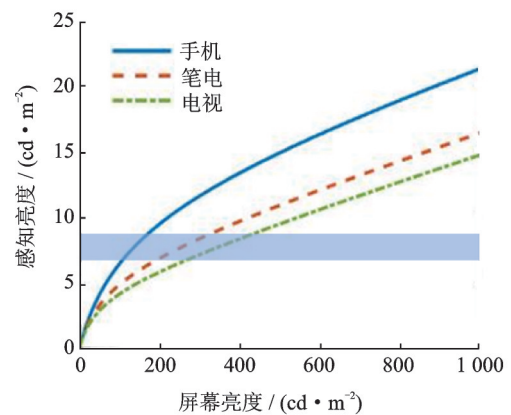
$$D = D_0 - D_\Delta \left(\frac{\left(\frac{F}{2506}\right)^{0.8}}{\left(\frac{F}{2506}\right)^{0.8} + 5} \right) \quad (2)$$

$$E = 1.4\tau L \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \quad (3)$$

式中, E 为感知亮度(cd/m^2), D 为瞳孔直径(mm), f' 为人眼像方焦距(mm), L 为观察平面平均亮度(cd/m^2), τ 为眼睛的透过率。基于该模型,图3进一步给出了不同照明环境或不同应用场景中,亮暗感受随屏幕亮度的变化关系,并通过舒适区域范围给出了显示亮度的推荐设置。该模型对于不同应用场景不同光照环境下显示亮度的自适应调节提供了理论支撑。



(a) 不同照明环境中,手机屏幕亮暗感受变化曲线



(b) 3 lux照度环境下,手机、笔电、电视三种场景中,屏幕亮暗感受变化曲线

图3 不同照明环境中或不同应用场景中,亮暗感受随屏幕亮度的变化关系

Fig.3 The perceived brightness as function of screen luminance under different ambient illumination and various usage scenarios

2 色域表现与光谱影响

LED、OLED、QLED、激光等新技术的出现使得新型显示设备能呈现出比传统LCD显示器更鲜艳的色彩和更宽广的色域(如图4(a)所示)。视觉感

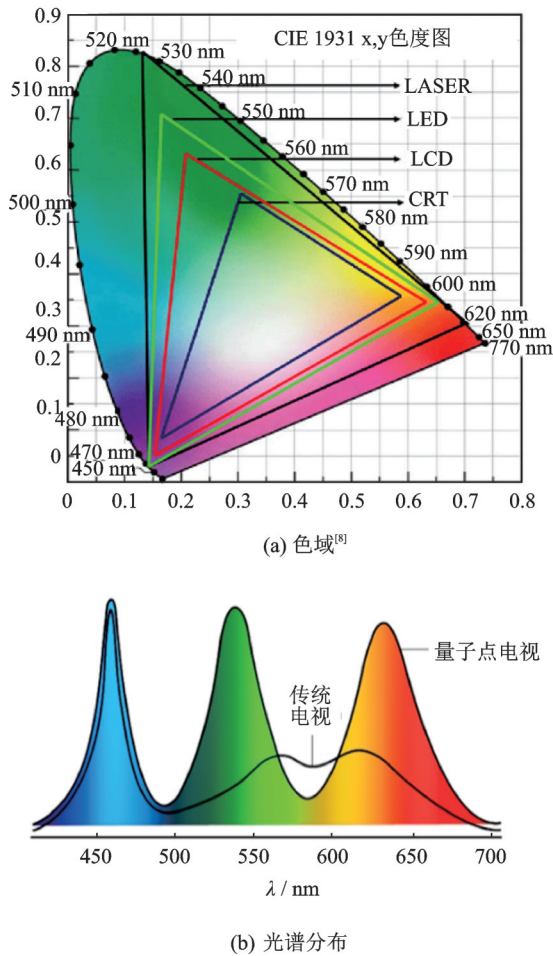


图4 新型显示器件色域及光谱分布示例

Fig.4 Examples of color gamut and spectral distribution of new type displays

知实验研究表明,色饱和度对视觉舒适度和图像感知均有显著影响,低饱和度图像会影响图像质量、降低观看者的主观评价,但是高饱和度图像对感知的影响尚未有共识。东京大学Erika Kumakura等人的研究发现,在广色域显示器上图像色度增加会提高观看者对于图像的主观感受^[9];而东南大学高昕等人的研究发现,在暗环境下约90% NTSC的色域范围具有最佳显示效果,过高或过低均会影响显示效果同时引起视觉不适^[3]。广色域显示中的最佳色度范围还需要展开进一步的研究。

新技术在显示器件基色光谱分布上也与传统显示器不同,QLED、激光显示等均呈现出非常明显的窄带光谱特性(如图4(b)所示)。这一窄带特性一方面能产生色纯度极高的颜色从而扩展色域;但另一方面,由于观察者个体间的颜色匹配函数(CMFs)可能存在较大差异,使得这些观看者在看同一台窄带广色域显示器时感知的颜色差异较大,称为由观察者同色异谱现象引起的颜色失配^[10]。对

于传统显示器,由于基色光谱的分布带宽较宽,个体间的CMFs偏差不足以引起明显的颜色失配现象,而在新型显示中,基色光谱的分布带宽变窄、能量集中,使得这一现象得以凸显。图5所示为不同观看者根据LCD显示器上显示的图片对另一台窄带光谱激光显示器进行调校匹配后得到的图片,可以看到不同观看者之间的匹配结果差别很大。与之类似,由于目前的色度测量设备都是基于标准观察者的CMFs进行校准的,因此在测量窄带光谱显示器时,很容易出现测量颜色和观看者感知颜色失配的现象^[11]。



图5 由观察者同色异谱现象引起的颜色失配示例^[12]

Fig.5 Example of metameric failures^[12]

此外,光谱中蓝光成分的影响越来越引人关注,长时间的蓝光照射和短时间、高强度的蓝光照射均能引起不同类型的视网膜损伤^[13-14]。多项研究结果已明确显示,400~470 nm范围的蓝光主要对视网膜产生影响^[15-18],而470~490 nm范围的蓝光主要对生理节律产生影响,在短时间内对眼睛的伤害小,但在晚上容易抑制褪黑素的分泌,干扰生理节律^[19-20]。而伦斯勒理工学院Bullough J.D.指出,屏幕发出的亮度(通常为几百cd/m²)比能在视网膜上产生与蓝光危害有关的光化学病变所需的亮度(>10 000 cd/m²)低得多,因此认为由显示屏幕造成的蓝光危害风险可以忽略不计^[21]。与此同时,相关研究也表明显示器件光谱中的蓝光成分对视觉感知和视疲劳存在影响。中国标准化研究院张运红等人的研究显示,观看减弱蓝光成分的显示屏可

以改善主观舒适感,减轻视觉疲劳,提高视觉搜索性能^[22-23];东南大学史韞杨等人通过对比实验得出,适当往长波方向偏移蓝光波峰位置也能有效减少视觉疲劳^[24]。

为量化人眼视网膜上的辐照光生物安全,研究

者通过模拟人眼瞳孔尺寸的孔径光阑,模拟人眼瞳孔、晶状体、视网膜之间视觉生理特性,形成专用光学成像装置,对光辐射在视网膜上形成的有效辐照量进行测量,开发出一套符合人眼视觉健康的视网膜光辐射损伤亮度测量装置,如图6所示。

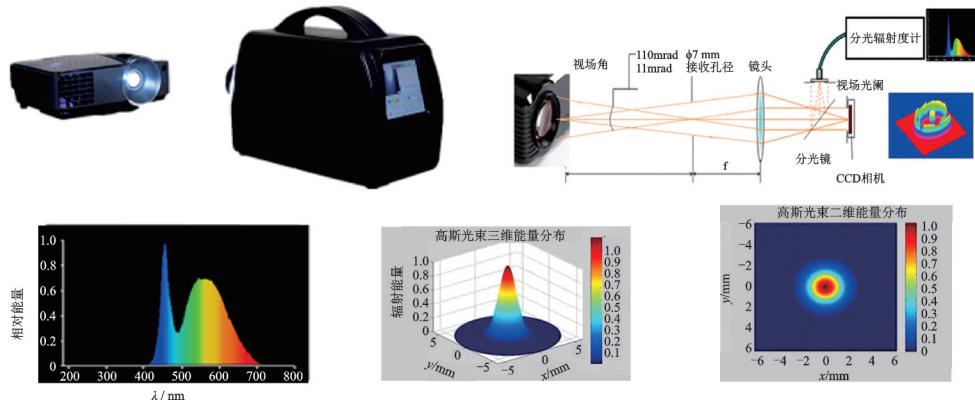


图6 视网膜光辐射损伤亮度测量装置

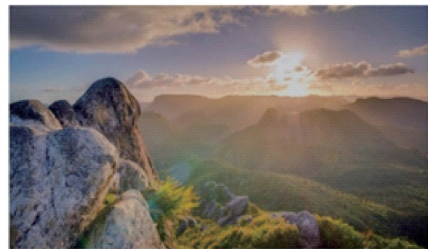
Fig.6 Brightness measurement device for retinal light radiation damage

3 高动态范围的优化与实现

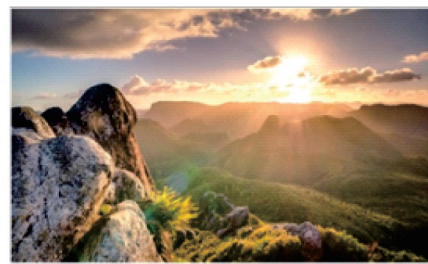
显示图像的层次感和细节呈现一向是关注的焦点,传统显示的标准动态范围(SDR)已无法满足人们对显示效果的要求。随着 Mini LED、Micro LED 等传统技术的革新、OLED 等新技术的应用,显示器件已能够实现高动态范围(HDR)显示,可提供更广的亮度范围,使得亮处更亮,暗处更暗,同时细节更清晰,如图7所示,以更好地匹配人们对真实场景亮度、对比度等特性的认知,给人们带来更好的视觉体验,因此受到人们的追捧。

但是 HDR 技术在实际应用中也存在一些问题。比如在用 mini LED 作为 LCD 显示的背光,加上区域调光技术来实现 HDR 时,在暗背景包围下的明亮物体边缘通常会出现光晕现象,也称为“Halo artifact”^[25-26](如图8),而在能实现像素级调光的 OLED 显示中这种现象几乎不可见。中佛罗里达大学 Tan G、En-Lin Hsiang 等人的研究表明,提高 LCD 本身的对比度和增加区域调光的数量或者提高环境光照度都可以有效减弱这种光晕现象^[27-28]。国内公司推出的叠屏液晶电视(Dual Cell),采用液晶面板像素规模级别的分区调光控制,实现数百万个单独区域的局部背光调制,在带来超高对比度的同时保证图像显示的质量^[29]。

OLED 由于其材料特性和自发光特点能实现高亮度和高对比度,因此是实现 HDR 显示的重要途径。然而 OLED 本身面临着寿命不长的问题,特



(a) 标准动态范围



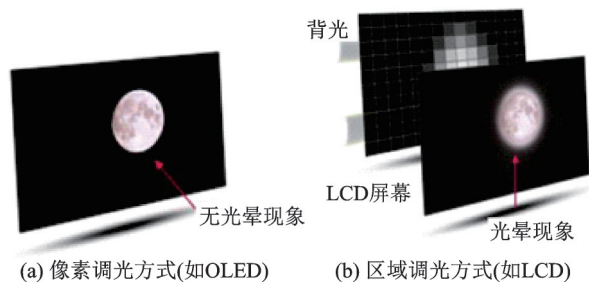
(b) 高动态范围

图7 标准动态范围(a)和高动态范围(b)效果示意(图源:essentialinstall.com)

Fig.7 Examples of SDR (a) and HDR (b) (source: essentialinstall.com)

别是在 HDR 显示模式下。哥伦比亚大学 Kevin A. Kam 等人的研究结果显示,1 200 h 老化实验后, OLED 屏会表现出明显的色偏现象^[31]。

目前关于 HDR 显示的视觉感知研究非常有限,作为未来的显示技术趋势之一,值得投入更多关注。

图8 光晕现象示例^[30]Fig.8 Illustrations of "Halo" effect^[30]

4 近眼显示中的视觉感知

随着技术的发展,人们对显示器件高临场感视觉体验的要求不断提高,兼具体积小、重量轻、视野范围大、感知体验好的AR(增强现实)和VR(虚拟现实)近眼显示成为技术发展新热点。

VR给用户带来高沉浸感视觉体验的同时也会带来一些负面效应,最突出一项为由视觉诱导的晕动症^[32-33]。视觉诱导晕动症是指用户在观看显示器时,出现诸如恶心和眩晕等症状,引发原因有很多,例如视觉信息与肢体运动信息之间的冲突、过度的双眼视差和视差的不连续变化等。上海大学田丰等人的研究发现,双眼图像的色相(hue)差异对于整体舒适度评分的影响最大;当显示内容的饱和度(saturation)过低或过高时,人眼对于饱和度的差异容忍度大幅降低;一定范围内,显示内容的亮度(lightness)越高,人眼可以接受的差异也提高^[34]。

与VR设备不同,AR设备因其特有的虚实融合特性,在使用中对环境的适应性要求更高,也因此产生了更多感知问题。浙江三色光电技术有限公司牟同升教授团队针对光学透视型AR设备的研究发现,由于杂散光、反光等原因,AR镜片不同方位上成像的对比度和色度均有显著差异,极大影响了AR场景的成像效果^[35]。同时,人眼对亮度和对比度的感知受到环境的显著影响,因此在AR应用中探索不同背景环境与显示亮度的交互作用对图像感知的影响尤为重要。另外,在虚实融合的应用中,为了保证良好的临场感和沉浸感,观看者对显示画面深度感知的精确性也非常关键^[36-37]。

除了成像质量之外,在使用AR/VR近眼设备时,视觉疲劳是无法回避的问题。目前主流的近眼显示设备主要基于双目视差原理。在这种显示原理下,人眼的调节和辐辏机制发生冲突,调节作用使得双眼焦点落在图像显示位置,即物理成像屏,以形成清晰视网膜成像;而辐辏作用使双眼视线脱

离物理成像屏汇聚到实际成像位置。这种调节和辐辏的不一致性,导致了观看双目视差显示时容易产生视觉疲劳。澳大利亚迪肯大学J Iskander等人一项针对头戴VR设备对眼球辐辏系统和眼睛注视交互能力影响的研究发现,当成像深度较小时,被试能更好地控制他们的眼睛注视物体,但会增加辐辏系统的负荷,而深度较大时,能够减轻眼睛辐辏系统的负荷,但会降低被试的注视能力^[38]。光学透视式AR头盔显示器的固定焦距使得被试在观看虚实叠加的增强现实场景时无法同时聚焦于虚拟物体和真实场景,进而导致焦距竞争现象的发生,使得人眼视觉系统在增强现实场景中无法自然感知虚实叠加场景,从而造成对视觉系统的感知限制并引发视觉疲劳^[37]。近年来,全息光场技术得到快速发展^[39],该技术通过模拟自然物体的光学传播实现图像显示,提供真正意义上的虚实融合与沉浸式体验,将有助于改进人工显示与自然成像不匹配带来的感知问题。

5 国内外标准现状

随着显示技术的推陈出新,显示设备在人们生活中占据越来越重要的地位,人们对显示设备的依赖达到了前所未有的程度,因此正确评价新型显示对视觉感知和健康的影响、制订相关标准指导产业发展关乎国民健康。用先进标准倒逼“中国制造”升级,从视觉健康角度出发,为企业与用户提供完整的显示视觉健康评价标准体系,督促与引导企业从视觉健康角度设计与改进显示器件,有利于引领显示产业的健康发展,提升国际竞争力,保障国家利益。近年来,我国深度参与了国际电工委员会(IEC)、国际标准化组织(ISO)有关显示光视觉舒适度、光视觉健康以及产品性能的国际标准化研究,在国际标准制定中取得话语权,同时在国内相关标准制定方面也取得了极大进展,详见表1~表3。

6 小结

新型显示技术的出现丰富了人类视觉感知的形式和内容,促进了信息社会的快速发展。这些新型显示在成像效果、感知机理和使用场景上与传统显示差异较大。文章针对新型显示相关技术特点,介绍了在亮度感知与调节、色域表现和光谱影响、高动态范围优化实现及近眼显示方面的视觉感知

表 1 相关国际标准

Tab.1 Related international standards

标准号	标准名称	标准内容
IEC 63207	Measuring methods of blue-light characteristics and related optical performances for visual display terminal	规定了视觉显示终端蓝光特性和相关光学测试方法,并对测试环境、测试设备和测试场地等进行了规定
IEC TR 63308:2021	VR equipment and system-market, technology and standards requirements	讨论了与VR设备及系统相关的技术领域,明确了如何使用现有标准,并强调了TC 100范围内对标准的进一步需求
IEC 63145-20-10	Eyewear Display-Part 20-10: Fundamental measurement methods-optical properties	规定了亮度、对比度、色度、均匀性、色域、视场、眼盒、像素密度等眼戴显示器的光学特性基本测量方法
IEC 63145-20-20	Eyewear Displays-Part 20-20: Fundamental measurement methods-image quality	规定了畸变、颜色偏差、MTF、虚像距、基于MTF的FOV和眼盒等图像质量参数的测量方法

表 2 相关国家标准

Tab.2 Related Chinese national standards

标准号	标准名称	标准内容
GB/T 38247-2019	信息技术 增强现实 术语	界定了增强现实各种概念的术语和定义,明确了条目间的关系
GB/T 38258-2019	信息技术 虚拟现实应用软件基本要求和测试方法	规定了虚拟现实应用软件的基本要求以及测试方法
GB/T 38259-2019	信息技术 虚拟现实头戴式显示设备通用规范	规定了虚拟现实头戴式显示设备的分类、基本要求、试验方法、检验规则及标志、包装、运输和贮存等
GB/T 40230.1-2021	视疲劳测试与评价方法第1部分:眼视光学	规定了视疲劳的眼视光学及视知觉功能测试方法和技术要求,适用于工作及生活等多种场所长时间使用视觉显示终端产品或照明产品等引起的眼视光学和视知觉功能方面影响的视疲劳测评
GB/T 40230.2-2021	视疲劳测试与评价方法第2部分:视知觉功能	

表 3 相关行业、团体标准

Tab.3 Related association standards

标准号	标准名称	标准内容
T/CVIA-57-2016		
T/CVIA-73-2019 (中国电子视像行业协会)	显示终端视觉疲劳测试与评价方法	眼视功能测试方法、量表评价方法等
T/CVIA-81-2021 (中国电子视像行业协会)	显示产品视觉健康技术要求	基于视觉健康目的的电子显示产品技术、评价指标和测试方法
T/CVIA-75-2019 (中国电子视像行业协会)	健康显示器件	移动显示终端用低蓝光器件技术要求与测试方法、显示器用显示器件低蓝光技术要求与测试方法、低闪烁显示器件技术要求与测试方法等

和健康研究进展。为了保证新型显示能为观看者提供更优质的显示效果和更舒适的观看体验,研究者需要针对各类新型显示的特点继续展开研究。

参 考 文 献

- [1] Healthcare-United. Time Screen 2020 Report [EB/OL]. <https://eyesafe.com/wp-content/uploads/2020/08/UHCScreenTimeReport2020.pdf>, 2020.2021-12-08.
- [2] Raymond M. Soneira. High TV Picture Quality in Real World Ambient Lighting With the Samsung 65Q9 QLED TV [EB/OL]. https://www.displaymate.com/TV_Performance_in_Ambient_Light_1.htm, 2020.2021-12-08.
- [3] 高 昕. 显示特性对视觉舒适度的影响研究[D]. 南京:东南大学,2020.
- [4] Shi Y, Tu Y, Wang L, et al. Influence of Display Luminance on Visual Discomfort in Dark Ambient Based on Haemodynamic Response[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 99:1.
- [5] Minkoo Kim, Jeon Dong-Hwan, Jeong-Sik Kim, et al. Optimum display luminance depends on white luminance under various ambient illuminance conditions[J]. Opt. Eng, 2018, 57(2): 1-9.
- [6] Seung-Ryeol Kim, Seung-Hyuck Lee, Jeon Dong-Hwan, et al. Optimum display luminance dependence on ambient illuminance [J]. Opt. Eng. 2017, 56(1):017110.
- [7] Zhang Y, Li S, Wang J, et al. Pupil size estimation based on spatially weighted corneal flux density [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 1-9.
- [8] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: A review[J]. Applied Optics, 2010, 49(25):79-98.
- [9] Kumakura E, Schmid K, Yokosawa K, et al. Subjective evaluation of natural high-saturated images on a wide gamut display

- [J]. *Color Research & Application*, 2019, 44(6): 886-893.
- [10] Brill M H, Larimer J. Avoiding on-screen metamerism in N-primary displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2005, 13:509-516.
- [11] Young Jun Seo, Eunjung Lee, Yongwoo Yi, et al. Color correction model based on spectral distribution for solving metameric failure in wide color gamut displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52:454-457.
- [12] Asano Y, Fairchild M D, Blonde L, et al. Observer variability in color image matching on a LCD monitor and a laser projector [C]. *Color and Imaging Conference*, Boston, USA, 2014:1-6.
- [13] Noell W K. Retinal damage by light in rats [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1966, 5:450-473.
- [14] Ham Jr W T, Mueller H A, Sliney D H. Retinal sensitivity to damage from short wavelength light [J]. *Nature*, 1976, 260(5547): 153-155.
- [15] Tan E, Ding X Q, Saadi A, et al. Expression of cone-photoreceptor-specific antigens in a cell line derived from retinal tumors in transgenic mice[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci.*, 2004, 45(3):764-768.
- [16] Arnault E, Barrau C, Nanteau C, et al. Phototoxic action spectrum on a retinal pigment epithelium model of age-related macular degeneration exposed to sunlight normalized conditions [J]. *PLoS One*, 2013, 8:e71398.
- [17] Kuse Y, Ogawa K, Tsuruma K, et al. Damage of photoreceptor-derived cells in culture induced by light emitting diode-derived blue light[J]. *Sci Rep.*, 2014, 4:5223.
- [18] Tosini G, Ferguson I, Tsubota K. Effects of blue light on the circadian system and eye physiology [J]. *Mol. Vis.*, 2016, 24(22):61-72.
- [19] Yasukouchi A, Ishibashi K. Non-visual effects of the color temperature of fluorescent lamps on physiological aspects in humans [J]. *Journal Anthropology and Applied Human Science*, 2005, 24(1):41-43.
- [20] Lawrenson J G, Hull C C, Downie L E. The effect of blue-light blocking spectacle lenses on visual performance, macular health and the sleep-wake cycle: A systematic review of the literature[J]. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2017, 37(6): 644-654.
- [21] Bullough J D, Peana S. Investigating blue-light exposure from: Lighting and displays [J]. *Information Display*, 2020, 36: 17-20.
- [22] Zhang Y, Yang Y, Chen Y, et al. Evaluate fatigue of blue light influence on general LCD, low blue light LCD and OLED displays [C]. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, Los Angeles, USA, 2017: 166-174.
- [23] Isono H, Kumar A, Kamimura T, et al. The effect of blue light on visual fatigue when reading on LED-backlit tablet LCDs [C]. *Proceedings of International Display Workshops*, Sapporo, Japan, 2013.
- [24] Shi Y, Tu Y, Wang L, et al. Spectral influence of the normal LCD, blue-shifted LCD, and OLED smartphone displays on visual fatigue: A comparative study [J]. *Displays*, 2021, 69: 102066.
- [25] Seetzen H, Heidrich W, Stuerzlinger W, et al. High dynamic range display systems [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2004, 23(3): 760-768.
- [26] Chen H, Ha T H, Sung J H, et al. Evaluation of LCD local-dimming-backlight system [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2010, 18(1): 57-65.
- [27] Tan G, Huang Y, Li M C, et al. High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13):16572-16584.
- [28] En-Lin Hsiang, Yang Qian, He Ziqian, et al. Ambient light and human vision effects on high-dynamic-range displays [C]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, San Francisco, USA, 2021:646.
- [29] Liu W, Linjia M, Aichen X, et al. 4K HDR "stacked-panel" TV based on dual-cell LCD [C]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, San Jose, USA, 2020:243.
- [30] Yoo J J, Kang D W, Kwon J U, et al. Picture Quality and Sound Quality of OLED TVs [EB/OL]. <https://www.intechopen.com/chapters/67489>, 2019, 2021-12-08.
- [31] Kam K A, Fan W, Kymissis I. Color shifting in high dynamic range OLED displays [C]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, San Francisco, USA, 2021:706-709.
- [32] Somrak A, Humar I, Hossain M S, et al. Estimating VR sickness and user experience using different HMD technologies: An evaluation study [J]. *Future generations computer systems: FGCS*, 2019, 94:302-316.
- [33] Ng A, Chan L, Lau H. A study of cyber sickness and sensory conflict theory using a motion-coupled virtual reality system [C]. *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Reutlingen, Germany, 2018: 643-644.
- [34] 田丰, 许昊骏, 王攀, 等. 3D-VR色彩视觉舒适度评价 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(3):324-332.
- [35] Mou T, Mou X. Evaluation of optical see-through real scene image quality in AR eyewear displays [C]. *International Conference on Display Technology*, Beijing, China, 2021: 675-677.
- [36] Swan J E, Singh G, Ellis S. Matching and reaching depth judgments with real and augmented reality targets [J]. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2015, 21(11):1289-1298.
- [37] Gao Y, Liu Y, Normand J M, et al. A study on differences in human perception between a real and an AR scene viewed in an OST-HMD [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(1-3):155-171.
- [38] Iskander J, Hossny M, Nahavand S. Using biomechanics to investigate the effect of VR on eye vergence system [J]. *Applied Ergonomics*, 2019, 81:102883
- [39] Zhang Yuning, Zhu Xiuli, Liu Ao, et al. Modeling and optimizing the chromatic holographic waveguide display system [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(34):G84-G90.