

衍射光波导增强现实近眼显示的关键参数

赵宇暄^{1,2}, 孟祥峰¹, 冒新宇¹, 石磊¹, 曾理江^{2*}

¹北京至格科技有限公司, 北京 100083;

²清华大学精密仪器系, 北京 100084

摘要 衍射光波导是目前主流的实现增强现实近眼显示的技术方案,具有眼动范围大、体积小、量产性好等优点。但衍射光波导的一些关键参数的评价指标尚缺乏统一的定义。详细介绍了衍射光波导方案的关键参数和测量方法,通过明确这些关键参数来考察衍射光波导的优势和劣势,从而充分挖掘衍射光波导的技术潜力,实现更好的产品性能。

关键词 衍射光波导; 增强现实; 近眼显示; 关键参数

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011008

Key Parameters of Augmented Reality Near-to-Eye Display System Based on Diffractive Waveguide

Zhao Yuxuan^{1,2}, Meng Xiangfeng¹, Mao Xinyu¹, Shi Lei¹, Zeng Lijiang^{2*}

¹Greater Tech Co., Ltd., Beijing 100083, China;

²Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Diffractive waveguide is a mainstream technical solution to realize augmented reality near-to-eye display, which has the advantages of a large eye-box, light volume, and good mass production. However, unified definitions for the evaluation indexes of some key parameters of diffractive waveguides are still lacking. This work provides a detailed introduction to diffractive waveguide scheme main parameters and measurement methods. The advantages and disadvantages of diffractive waveguides are investigated by clarifying key parameters to maximize their technical potential and improve product performances.

Key words diffractive waveguide; augmented reality; near-to-eye display; key parameter

1 引言

增强现实(AR)是指将虚拟世界的信息和现实世界融合在一起的技术,增强现实近眼显示设备是指能够实现增强现实功能的贴近人眼的可穿戴硬件。通过在真实世界中叠加虚拟的图像信息,可以极大地提升使用者获取信息的即时性和沉浸感,从而给使用者“赋能”。由于增强现实技术的颠覆性和革命性,该技术从诞生起便得到了广泛研究和关注^[1-3]。特别是近年来伴随着谷歌公司的 Google glass、微软公司的 Hololens 等一系列面向消费者的产品问世,增强现实技术已经逐渐从实验室走向了千家万户,并在工业^[4]、教育^[5]、医疗^[6]等领域产生了若干示范性应用。

增强现实近眼显示设备的技术瓶颈之一是将虚拟

世界和现实世界融合在一起的光学合成器(optical combiner)^[7]。在现有的众多技术路线中,衍射光波导具有眼动范围大、体积小、量产性好等优点^[8],是被很多头部企业所青睐的一种技术方案,例如微软公司的 Hololens1^[9-10]、Hololens2, 奇跃公司的 Magic Leap One 等具有国际影响力的产品都使用了这种方案。然而,衍射光波导也存在很多技术瓶颈,例如色度均匀性较差^[11-13]、能量利用率较低^[14-15]等,而想要解决这些技术问题,充分发挥衍射光波导性能优势,就需要明确衍射光波导的关键性能参数和测量方法。本文旨在讨论基于衍射光波导的增强现实近眼显示技术中的关键参数和测量方法,通过明确这些参数的定义和测量方法来考察衍射光波导的优势和劣势,从而帮助研究者充分挖掘衍射光波导的技术潜力,实现更好的产品性能。

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-08-17; 录用日期: 2022-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2802100)

通信作者: *zenglj@tsinghua.edu.cn

2 衍射光波导的关键参数及测量方法

2.1 衍射光波导的原理

基于衍射光波导的近眼显示系统的原理如图 1 所示,该系统由微投影器、衍射光波导和人眼 3 部分组成。微投影器用于产生虚拟图像,它由微显示芯片和成像透镜组构成。微显示芯片位于成像透镜组的后焦面上,其上任意一点发出的光经成像透镜组后变成一束平行光照射到衍射光波导上,即微投影器将虚拟图像成像于无穷远。衍射光波导用于将虚拟图像“搬运”至人眼前,并同时起到复制出瞳的作用,它由一块平行度非常好的平板玻璃(即光波导)和在玻璃上制作的多块衍射光栅组成。图 1 中示例性地画出了两块光栅,分别称为耦入光栅和耦出光栅。当微投影器发出的平行光到达耦入光栅时会被光栅衍射,光栅的衍射级次 T_{+1} 满足在平板玻璃中的全反射条件,因此会在玻璃中

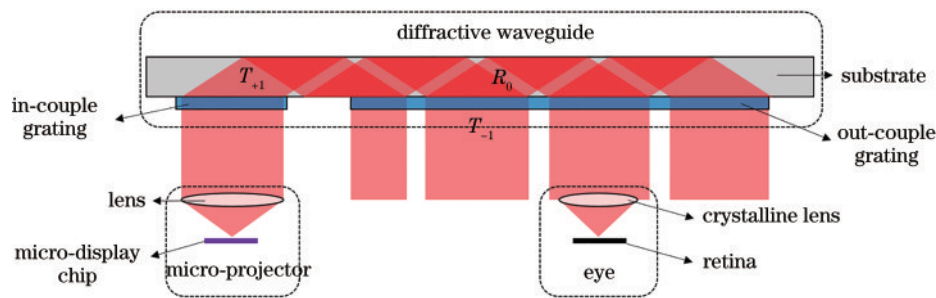


图 1 衍射光波导原理示意图

Fig. 1 Schematic of diffractive waveguide principle

2.2 视场角

根据图 1 所述的衍射光波导原理,虚拟图像上的某一点被微投影系统转换为某一方向的平行光,平行光经衍射光波导传播、扩展后又被晶状体会聚于视网膜上某一点。由上述过程可知,人眼观察到的虚拟图像上的点对应于空间中一个方向传播的平行光,而平行光的角度范围决定了人眼所见图像的大小,因此通常使用视场角(FOV)这一参数来衡量衍射光波导所显示虚拟图像的大小,视场角越大所显示的虚拟图像越大。越大的视场角可以提供越丰富的信息,并且可以营造更充分的沉浸感,因此提升视场角是研究者不懈追求的目标^[17-22]。

衍射光波导所呈现的虚拟图像范围通常是矩形,因此至少需要两个参数来确定视场角的大小。常用的视场角表示方法有两种:一种方法是给出横向视场角 H 和纵向视场角 V ,如图 2(a)所示;另一种方法则是给出横纵视场角的比值 $a(a = \tan H/2 : \tan V/2)$ 和对角线视场角 D ,如图 2(b)所示。根据简单的几何关系可知,这两种表示方法的换算关系为

$$D = 2\arctan \sqrt{\left(\tan \frac{H}{2}\right)^2 + \left(\tan \frac{V}{2}\right)^2} \quad (1)$$

全反射传播,直至遇到耦出光栅。耦出光栅的透射级次 T_{-1} 被耦出玻璃,同时耦出光栅的反射级次 R_0 会继续全反射传播,该过程不断重复,光束多次遇到耦出光栅,每次遇到耦出光栅时都会有一部分光被耦出,这样就起到了复制出瞳的作用。被耦出波导的平行光经晶状体聚焦后在视网膜上成像,从而被人眼所接收,而来自现实世界的图像则可以直接透过平板玻璃进入人眼,即人眼可以同时接收虚拟图像和现实世界。根据上述原理,衍射光波导的一个特点是可以复制入射光束,从而使得人眼可以在较大范围内看到完整的虚拟图像,因此衍射光波导具备眼动范围大的优势。此外,衍射光波导厚度仅由平板玻璃决定,因此足够轻薄,可以满足消费者的用户体验。在可量产性方面,衍射光波导可以通过纳米压印技术保证足够产能^[16],能很好控制成本。这些优势使衍射光波导成为了一种主流的增强现实近眼显示方案。

需要强调的是,必须通过两个参数才能完整地确定视场角范围,但很多研究者常常仅关注对角线视场角 D ,而忽略了横纵视场角的比值 a 。事实上对衍射光波导而言,即便对角线视场角都是 40° ,不同的 a 所导致的设计难度也是完全不一样的。

视场角的测量方法如图 3 所示,在人眼观察的位置放置校正好像差的测量镜组,不同视场角的平行光会聚在接收屏上不同的点,通过测量在接收屏上所成像的大小即可计算得到视场角的大小。图 3 中测量镜组的焦距为 f ,所接受的像半宽为 l ,则对应的水平视场角大小为

$$H = 2\arctan \frac{l}{f} \quad (2)$$

需要强调的是,根据图 3 所测量得到的是实际视场角的大小,然而人眼所感知到的虚拟图像大小除与实际视场角大小相关外,还会受到图像清晰度、均匀性、模组的眼动范围等诸多因素的影响。例如对于两个真实视场角完全相同的近眼显示模组,眼动范围较大的模组会给使用者带来视场角更“大”的错觉,但目前这些因素对视场角的影响尚无定量研究。另外,模组对外界环境的遮挡程度也会影响使用者对视场角大小的判断^[23]。因此,在设计衍射光波导近眼显示模组

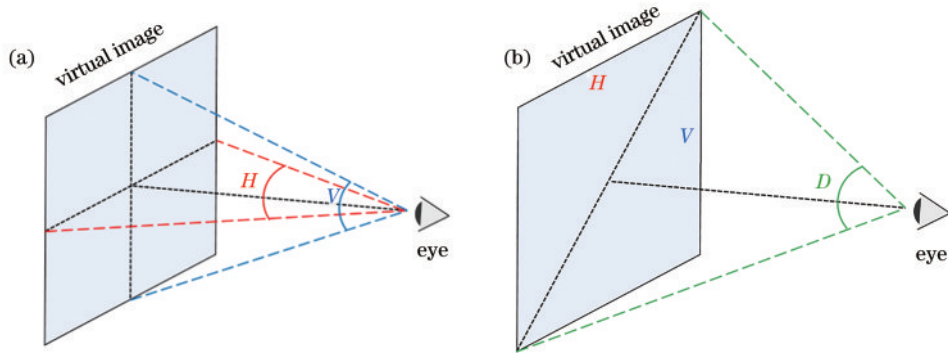


图 2 视场角的定义示意图。(a) 横向视场角 H 和纵向视场角 V ; (b) 横纵视场角的比值 a 和对角线视场角 D

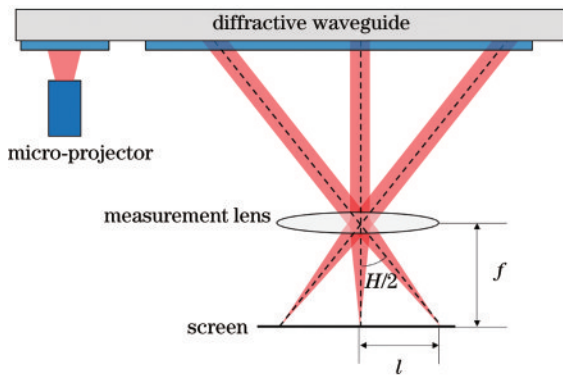


图 3 视场角的测量方法示意图
Fig. 3 Schematic of FOV measurement method

时不应单纯地追求视场角这一单一参数,而更应保证关键参数之间的平衡,以避免人眼所感知到的视场角并未达到设计预期。

2.3 眼动范围

眼动范围是近眼显示模组的重要指标之一,它是指位于显示模组和人眼之间的三维区域,在该区域内人眼可以观察到满足一定成像标准的虚拟图像。图 4 展示了衍射光波导的眼动范围。微投影器发出的不同方向的平行光束构成了一个光棱台,这个光棱台的边界由微投影器的视场角和出瞳大小决定。当光束被衍

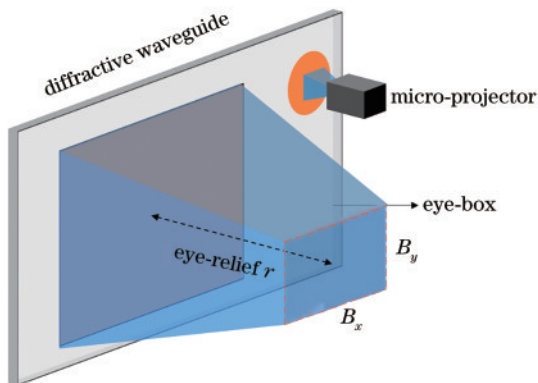


图 4 衍射光波导眼动范围示意图
Fig. 4 Schematic of eye-box of diffractive waveguide

射光波导耦合后,所有被耦合光束在空间中重叠的区域也会构成一个光棱台,人眼只有位于这个光棱台内才有可能接收到所有视场角的光线,否则就会损失某些角度的信息,因此这个光棱台内的区域就是衍射光波导的理论眼动范围。

需要强调的是,眼动范围是一个三维区域,但由于模组通常存在对称性,文献[24]和产品手册中仅使用适眼距离 r 和该适眼距离下人眼观察区域的大小 $B_x \times B_y$ 来描述它,如图 4 虚线框区域所示。然而,随着衍射光波导越来越走近消费者,人们对模组的舒适性提出了更高的要求,因此衍射光波导常常具有更复杂的姿态。如图 5 所示,微投影器被组装在眼镜腿支架中,为了佩戴舒适,眼镜镜片与垂直方向存在一定的夹角 θ ,在这种情况下如果仅用适眼距离和人眼观察区域大小就不能完整描述眼动范围,还需要明确观察平面与衍射光波导的相对姿态,这一点常常被忽视。

眼动范围的概念具有一定模糊性,目前尚不存在

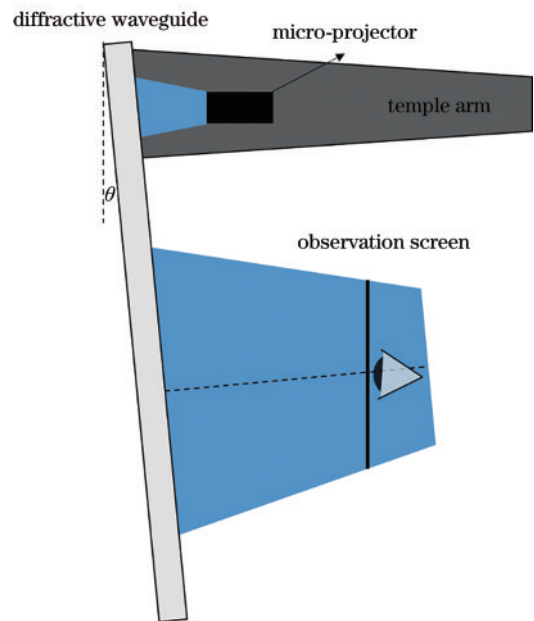


图 5 具有一定夹角的近眼显示模组眼动范围示意图
Fig. 5 Schematic of eye-box of near-to-eye display module with a tilt angle

标准定义,最大的争议体现为如何判定眼动范围的边界,尤其是衍射光波导的成像均匀性欠佳^[13],在这种情况下如何合理确定满足人眼观察所需的成像标准就更值得探讨。通常确定眼动范围边界的方法是:确定某一参数 A (如亮度或均匀性指标)作为评价指标,在确定的适眼距离 r_0 下测量一定范围 $B_{x0} \times B_{y0}$ 内参数 A 的值,记该范围内参数 A 的最大测量值为 A_{max} ; 设定某一阈值 β ,当虚拟图像的参数 A 变化为 βA_{max} 时判定此位置为适眼距离 r_0 下的眼动范围边界;如果要确定三维区域的眼动范围边界,则需要在不同适眼距离下测量参数 A 的值,并使用同样的判定标准确定眼动范围的边界。目前已有一些研究者关注到评价参数 A 的选择会影响眼动范围的大小, Kress^[24] 指出参数 A 可以是虚拟图像的亮度,这种判据简单直观,适用于对亮度要求比较高的使用场合,例如户外信息提示; Cakmakci 等^[25] 则将参数 A 明确为均匀性指标,这种方法计算相对复杂,更适用于对图像质量要求较高的场合,例如休闲娱乐; Li 等^[26] 则将参数确定为调制传递函数 (MTF),但这种参数更适用于基于折反射的几何光学近眼显示方案,因为衍射光波导的原理决定了不同位置的 MTF 不会有较大区别。事实上,衍射光波导的各项参数指标在不同观察位置处是缓慢变化的,人眼可见完整虚拟图像的区域也不存在明确的边界,因此在测量眼动范围大小时需要明确评价眼动范围的标准,并且要根据用户的使用场景确定合理的评价参数。

2.4 亮度、亮度均匀性及能量利用率

增强现实近眼显示模组的亮度是非常重要的指标,它决定了人眼所见虚拟图像的亮暗程度,亮度不足会使模组不能在户外强光条件下使用^[27],因此提升衍射光波导的亮度是非常重要的。此外,衍射光波导的成像亮度并不均匀,而是一个随角度变化的分布,因此成像亮度的均匀性也是一个重要的指标,它决定了人眼所观察图像的舒适度,并且影响了人眼所感知到的视场角、眼动范围等指标。除亮度外,近眼显示模组还需要重点考虑能量利用率,提高能量利用率可以降低模组功耗,延长电池使用时间。亮度、亮度均匀性和能量利用率之间是互相联系的。

根据光度学原理,一般使用光亮度 L 来评价所见物体的亮暗程度,即给定方向上单位面积、单位立体角内的光通量,单位是 cd/m^2 ; 一般微投影系统更多使用光通量 Φ 来描述其提供的总光能,单位是 lm 。入眼光亮度和光机通量的测量方法如图 6 所示。测量入眼亮度的光路如图 6(a) 所示,在适眼距离下放置亮度计,亮度计由仿人眼镜头、光电探测器和光谱仪组成。仿人眼镜头是一个光圈位于镜头表面的成像镜头,它的光学性能与人眼相近,可以模拟人眼的视觉特性。光电探测器可以接收镜头所成的像,并将中心一定视场的光输入到光谱仪中,根据光谱仪和光电探测器的成像结果即可得到全视场的亮度和色度信息,更细节的测量原理读者可参看文献^[28]。测量微投影器的光路如图 6(b) 所示,微投影器所发出的光被积分球接收,经光电探测器处理即可得到光通量。

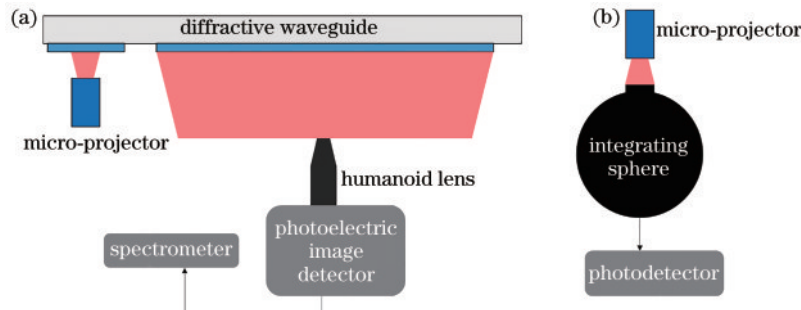


图 6 衍射光波导亮度、色度和微投影器通量测量方法示意图。(a) 入眼亮度、色度测量原理;(b) 微投影器通量测量原理

Fig. 6 Schematic of measurement method for brightness, chromaticity, and micro projector flux of diffractive waveguide.

(a) Measurement principle of brightness and chromaticity; (b) measurement principle of micro projector flux

衍射光波导的成像亮度是一个随角度变化的分布,因此如何根据图 6 的测量结果评价成像亮度和均匀性是值得探讨的课题。如图 7 所示,将人眼所观测到的虚拟图像平均划分为 9 个子区域(如果亮度变化很剧烈也可以划分为更多的子区域),测量每个区域的中心点亮度 $L_1 \sim L_9$, 则虚拟图像的平均亮度可定义为这 9 个点亮度的平均值。为了更全面地反映视场边缘的亮度情况,还可以再测量视场 4 个顶点的光亮度 $L_{10} \sim L_{13}$, 用 $L_1 \sim L_{13}$ 这 13 个点的亮度来衡量平均亮度。

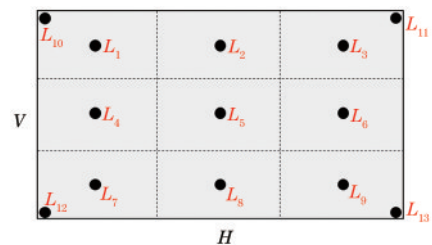


图 7 衍射光波导的入眼亮度评价方法示意图

Fig. 7 Schematic of the method for evaluating the brightness of diffractive waveguides

然而对亮度的评估也应充分考虑人眼特性和使用场景,如图 8 所示,两幅纯绿色的图片 9 点平均亮度基本相同,区别在于图 8(a)视场中心亮度高、边缘亮度低,而图 8(b)则在视场左侧存在明显的暗区。人眼会感觉图 8(a)比图 8(b)要亮,这是因为人眼对中心视场的亮度信息比较敏感,更容易将中心视场偏亮的图片感知为平均亮度更高。因此在评估亮度时应充分考虑人眼特性,例如给不同点的亮度赋予不同的权重,中心点权重比边缘点高,从而得到符合人眼观感的亮度测量值。亮度测量值的表达式为

$$\bar{L}_e = \sum_{i=1}^{13} \alpha_i L_i, \quad \sum_{i=1}^{13} \alpha_i = 1. \quad (3)$$

关于亮度均匀性,可以用 $L_1 \sim L_{13}$ 的标准差除以平均值 \bar{L} 作为衡量标准,即

$$U_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} (L_i - \bar{L})^2}}{\bar{L}}. \quad (4)$$

式(4)中之所以要除以平均值,是为了排除亮度的绝对值对均匀性的影响, U_1 越接近于 0, 代表亮度均匀性越好。虽然 U_1 充分利用了各测量点信息,但并不直观,另一种更直接而简单的评价方式是使用 $L_1 \sim L_{13}$ 中的最小值比最大值作为评价指标,即

$$U_2 = \frac{\min_{i=1 \sim 13} L_i}{\max_{i=1 \sim 13} L_i}. \quad (5)$$

U_2 的取值范围是 $[0, 1]$, 越接近 1 代表均匀性越好。 U_2 取值范围明确,相较于 U_1 , 物理含义更容易被理解。

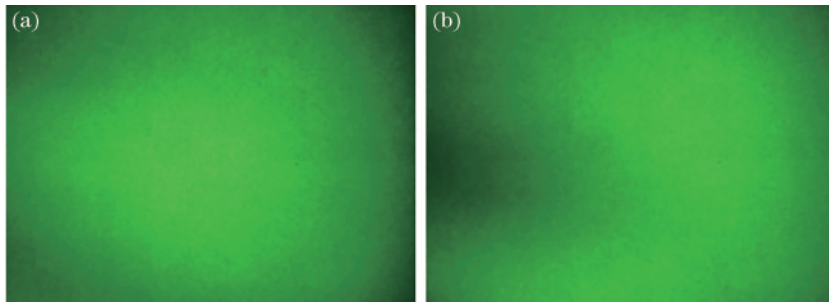


图 8 不同亮度分布对人眼的影响。(a) (b) 平均亮度相同但分布不同的两幅纯绿色图片

Fig. 8 Effect of different brightness distributions on human eyes. (a) (b) Two pure green pictures with the same average brightness but different distributions

关于能量利用率,研究者通常使用入眼亮度 L 与微投影机入射通量 Φ 的比值 $\eta_D = L/\Phi$ 来评价衍射光波导的光能利用率,单位是 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lm}^{-1}$, 图 9 给出了能量利用率的评价方式。使用该单位的好处是可以快速得到入眼亮度,从而让工程技术人员迅速判断能否在适合的场景下使用。例如衍射光波导的能量利用率是 $200 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lm}^{-1}$, 当搭配一个 10 lm 的微投影机时,最高入眼亮度为 $2000 \text{ cd}/\text{m}^2$, 这个亮度可以满足大部分室内的使用场景,但在户外强光下使用则会稍显不足,更多关于人眼所需亮度的要求,读者可参考文献[27]。如果要评价整个模组的能量利用率,就需要测量微投影机

的发光效率 γ , 即每单位功耗所产生的光通量,单位是 lm/W , 则模组的能量利用率为 $\eta_M = \gamma \eta_D$ 。需要说明的是,以入眼亮度评价能量利用率时忽略了眼动范围内其他位置的能量。事实上因为衍射光波导眼动范围大,能量被分散在眼动范围内,因此很多位置的光并没有进入人眼,如图 9 虚线以外的光线,由此导致上述测量方法所得到的衍射光波导能量利用率不高。因此在选择近眼显示装置时,需要权衡眼动范围和能量利用率;评价模组时,也应该给出在什么样的眼动范围条件下的能量利用率。

2.5 色度均匀性

2.4 小节指出衍射光波导的亮度均匀性通常有待提升,当显示白色图像时,不同颜色的亮度分布还有可能完全不同,这就会造成图像存在明显的色度不均匀,即人眼所观察到的图像存在较明显的色差,因此合理评价衍射光波导的成像色度均匀性是至关重要的。根据色度学原理,任意的颜色可以使用色空间中的一个点的坐标来描述,推荐使用 CIE1976 $L^*u^*v^*$ 均匀色空间来描述某一点的颜色,这种色空间的优点是色空间中两点的距离能够反映人眼对两个颜色的知觉差异大小,即两种颜色在色空间中的距离越远,人眼所感知到的颜色差异越大。色度的测量方法与亮度相同,都如图 6(a)所示。与评价亮度类似,可以将人眼所见虚拟

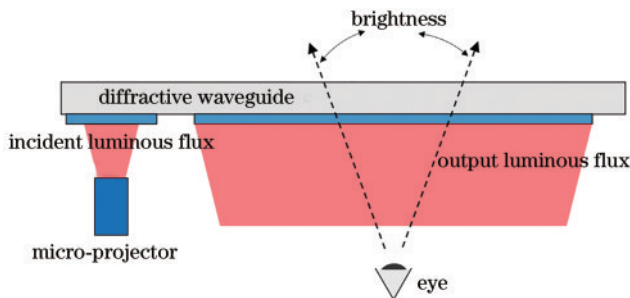


图 9 衍射光波导的光能利用率评价指标示意图

Fig. 9 Schematic of optical efficiency of diffractive waveguide

图像分割为 N 个小区域, 记每个小区域内中心点的色度值为 (u_i', v_i') , 则色度均匀性的衡量指标可以定义为

$$\Delta u'v' = \max_{i,j=1 \sim N} \sqrt{(u_i' - u_j')^2 + (v_i' - v_j')^2}, \quad (6)$$

即用所有测量点在色度图上最远的距离来衡量色度不均匀性, 如图 10 所示。图 10 中给出了虚拟图像上 13 个点在色空间中的位置(这 13 个点在虚拟图像上的位置如图 7 所示), 其中相距最远的两个点(已标红)之

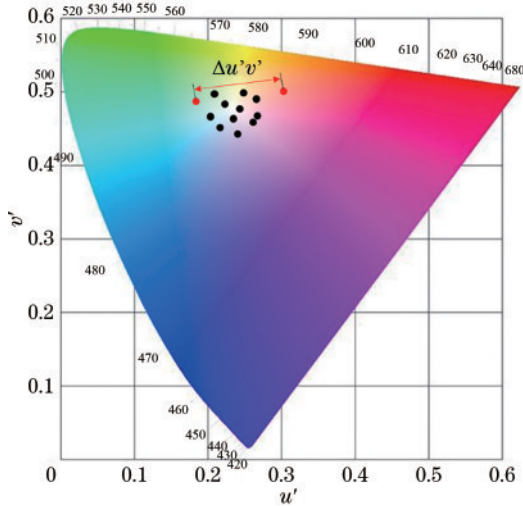


图 10 衍射光波导的色度不均匀性测量方法示意图
Fig. 10 Schematic of measurement method for chromaticity nonuniformity of diffractive waveguide

间的距离即为色度均匀性的衡量指标 $\Delta u'v'$ 。由于光栅的色散特性, 衍射光波导容易存在色度不均匀的问题。但一旦光栅制作完成, 色度不均匀性就是确定的, 因此可以通过标定和软件校正来补偿^[29]。

2.6 光栅杂散光和对比度

对于衍射光波导而言, 光栅的杂散光水平是一个很重要但又常常被忽略的参数指标。所谓光栅的杂散光是指在光栅衍射方向(指由光栅方程确定的方向)之外的方向上存在的杂光, 它主要来自于表面粗糙、栅线弯曲等光栅的高频误差。图 11 对比了不同的光栅微观形貌及所造成的杂散光^[30]。图 11(a)和图 11(c)是较为理想的光栅槽形和对应的衍射光点, 图 11(a)所展示的光栅栅线笔直, 表面粗糙度低, 因此衍射光点[如图 11(c)所示]能量集中, 非衍射级次方向上不存在杂光。而图 11(b)所示的光栅存在明显的栅线弯曲, 因此对应的衍射光点[如图 11(d)所示]能量分散, 非衍射级次方向上存在大量杂光。光栅的杂散光会使原本暗的地方变亮, 即存在一个较大的背景噪声, 导致图像对比度(最亮与最暗的亮度比值)下降^[31]。图 12(a)和图 12(c)、图 12(b)和图 12(d)分别是低对比度和高对比度的成像效果^[32], 不难看出对比度降低会使观察者感觉到图像细节不清晰、颜色不够艳丽, 进而降低用户的使用体验。因此应当关注光栅的杂散光水平, 这对改善工艺水平以提升衍射光波导的对比度有重要意义。

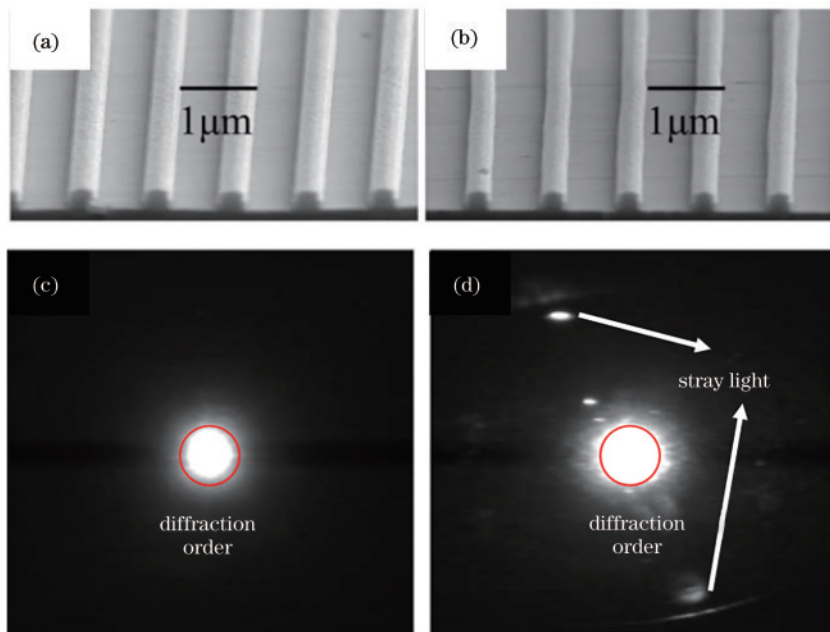


图 11 衍射光栅栅线弯曲及杂散光示意图^[30]。(a) (b)不同的光栅扫描电子显微镜照片; (c) (d)对应图 11(a)和图 11(b)所产生的衍射光点图像

Fig. 11 Schematic of diffraction grating lines and stray light^[30]. (a) (b) Different scanning electron microscope photos of gratings; (c) (d) diffraction spot images generated from Fig. 11 (a) and Fig. 11 (b), respectively

光栅杂散光的测量方法^[33]如图 13 所示, 一束激光入射到待测光栅上, 经过一个特殊的透光片到达白纸

屏上。该透光片中心区域镀有不透光的金属膜, 该区域大小恰巧可以将透射级次遮挡而不影响其余杂散光

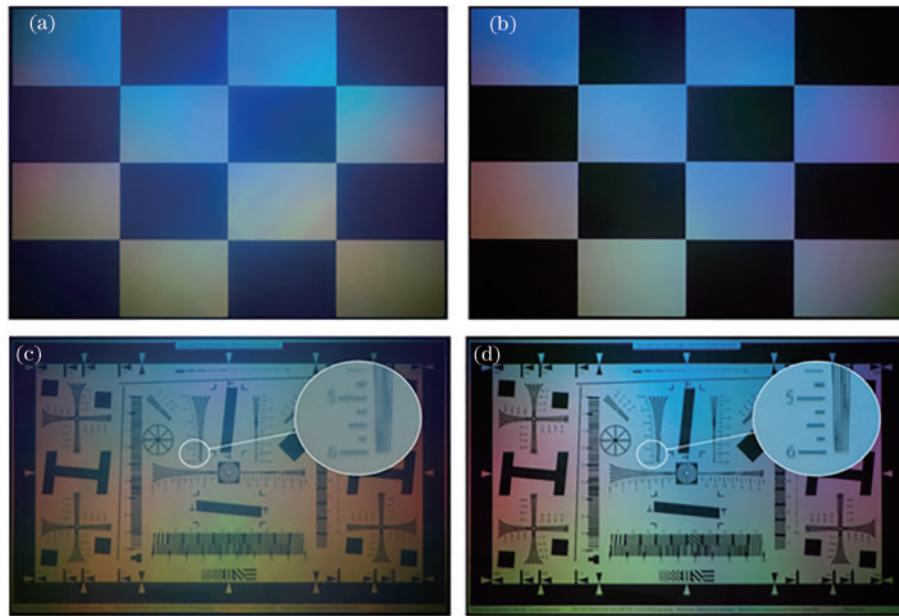


图 12 不同对比度下的成像效果示意图^[32]。(a)(c)低对比度时的成像效果;(b)(d)高对比度时的成像效果

Fig. 12 Schematic of imaging effects under different contrast^[32]. (a) (c) Imaging effect at low contrast; (b) (d) imaging effect at high contrast

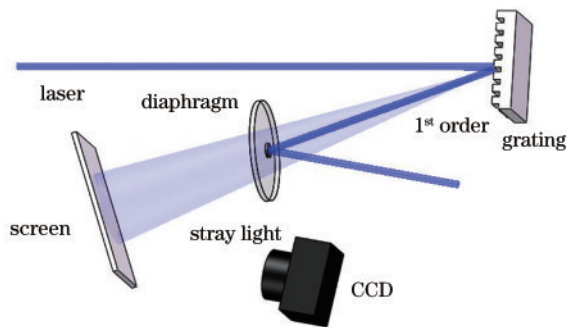


图 13 杂散光的测量方法^[33]

Fig. 13 Measurement method of stray light^[33]

透过。使用 CCD 记录白纸屏上一定范围内的图像灰度值,当 CCD 的参数固定时,灰度值即可反映光栅的杂散光水平。衍射光波导对比度的测量方法是使用一张 4×4 的黑白棋方格,如图 12(a)所示,用所有白色区域点的亮度平均值 L_w 与所有黑色区域点的亮度平均值 L_b 的比值 $C=L_w/L_b$ 来衡量对比度。

3 结 论

详细讨论了基于衍射光波导的近眼显示模组中的关键参数和测量方法,包括视场角、眼动范围、亮度、亮度均匀性、色度均匀性、能量利用率、杂散光及对比度,明确了各项关键参数对产品性能的影响。目前衍射光波导这一技术路线尚有若干重大技术问题需要解决,眼动范围、亮度均匀性等指标尚未有明确统一的定义,一些参数指标(例如能量利用率和眼动范围)之间存在互相制约的问题。因此在设计衍射光波导时需要充分考虑各参数之间的相互制约关系,并且针对特定的用户场景使用合理的评价方法,这样才能充分发挥衍射

光波导的技术潜力,实现更好的产品性能。

参 考 文 献

- [1] Azuma R. A survey of augmented reality[J]. Presence of Teleoperators & Virtual Environments, 1997, 6(4): 355-385.
- [2] Azuma R, Baillot Y, Behringer R, et al. Recent advances in augmented reality[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(6): 34-47.
- [3] van Krevelen D W F, Poelman R. A survey of augmented reality technologies, applications and limitations [J]. International Journal of Virtual Reality, 2010, 9(2): 1-20.
- [4] Lin C H, Hsu P H. Integrating procedural modelling process and immersive VR environment for architectural design education[J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 104(2): 03007.
- [5] Ibáñez M B, di Serio Á, Villarán D, et al. Experimenting with electromagnetism using augmented reality: impact on flow student experience and educational effectiveness[J]. Computers & Education, 2014, 71: 1-13.
- [6] de Buck S, Maes F, Ector J, et al. An augmented reality system for patient-specific guidance of cardiac catheter ablation procedures[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2005, 24(11): 1512-1524.
- [7] Xia X X, Guan F Y, Cai Y Y, et al. Challenges and advancements for AR optical see-through near-eye displays: a review[J]. Frontiers in Virtual Reality, 2022, 3: 838237.
- [8] Levola T. Diffractive optics for virtual reality displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2012, 14 (5): 467-475.
- [9] Hockett P, Ingleby T. Augmented reality with hololens:

- experiential architectures embedded in the real world[EB/OL]. (2017-02-27)[2022-07-05]. https://www.authorea.com/users/71114/articles/129932/_show_article.
- [10] Furlan R. The future of augmented reality: Hololens-Microsoft's AR headset shines despite rough edges[J]. IEEE Spectrum, 2016, 53(6): 21.
- [11] Nakamura T, Takashima Y. Design of discretely depth-varying holographic grating for image guide based see-through and near-to-eye displays[J]. Optics Express, 2018, 26(20): 26520-26533.
- [12] Hellmann C, Steiner S, Knoth R, et al. Innovative systematic design approach for lightguide devices for XR applications[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11062: 110620G.
- [13] Liu A, Zhang Y N, Weng Y S, et al. Diffraction efficiency distribution of output grating in holographic waveguide display system[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 7000310.
- [14] Laakkonen P, Siitonen S, Levola T, et al. High efficiency diffractive incouplers for light guides[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6896: 68960E.
- [15] Levola T, Laakkonen P. Replicated slanted gratings with a high refractive index material for in and outcoupling of light[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2067-2074.
- [16] Thanner C, Dudus A, Treiblmayr D, et al. Nanoimprint lithography for augmented reality waveguide manufacturing [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11310: 1131010.
- [17] Saarikko P. Diffractive exit-pupil expander with a large field of view[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7001: 700105.
- [18] Ayr as P, Saarikko P, Levola T. Exit pupil expander with a large field of view based on diffractive optics[J]. Journal of the Society for Information Display, 2009, 17(8): 659-664.
- [19] Vallius T, Tervo J. Waveguides with extended field of view: US20170299864[P]. 2017-10-19.
- [20] Vallius T, Pietil e P P. Extended field of view in near-eye display using optically stitched imaging: US20170363871 [P]. 2017-12-21.
- [21] 王闯, 沈忠文, 翁一士, 等. 基于双重体光栅的波导显示系统视场扩展研究[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0723001.
Wang C, Shen Z W, Weng Y S, et al. Field-of-view expansion of waveguide display system with double-layer volume grating[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0723001.
- [22] 鲁婷婷, 冯奇斌, 王梓, 等. 大角带宽高衍射效率体全息光栅的设计和制备[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0205001.
Lu T T, Feng Q B, Wang Z, et al. Design and fabrication of volume holographic gratings with large angular bandwidth and high diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0205001.
- [23] Wheelwright B, Sulai Y, Geng Y, et al. Field of view: not just a number[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10676: 1067604.
- [24] Kress B C. Optical architectures for augmented-, virtual-, and mixed-reality headsets[M]. Bellingham: SPIE Press, 2020: 37-42.
- [25] Cakmakci O, Hoffman D M, Balram N. 3D eyebox in augmented and virtual reality optics[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 438-441.
- [26] Li K, Lake A. 31-3: eyebox evaluation in AR/VR near-eye display testing[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 434-437.
- [27] Harding T H, Rash C E. Daylight luminance requirements for full-color, see-through, helmet-mounted display systems[J]. Optical Engineering, 2017, 56(5): 051404.
- [28] Penczek J, Boynton P A, Meyer F M, et al. Absolute radiometric and photometric measurements of near-eye displays: radiometric and photometric measurements of NED[J]. Journal of the Society for Information Display, 2017, 25(4): 215-221.
- [29] Messer K, Schuck M H, Morley N I, et al. Color uniformity correction of display device: US20210407365 [P]. 2021-12-30.
- [30] Ma D H, Zeng L J. Fabrication of low-stray-light gratings by broad-beam scanning exposure in the direction perpendicular to the grating grooves[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1346-1349.
- [31] Kuang Y, Liu J, Shi X L. Effect of surface roughness of optical waveguide on imaging quality and a formula of RSE tolerance and incident angle[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1103-1113.
- [32] Xu C L, Zhao Y X, Zeng L J. Low-stray-light gratings fabricated with scanning exposure method based on Lloyd's mirror for a high-contrast near-eye display in augmented reality[J]. Applied Optics, 2022, 61(19): 5626-5632.
- [33] 马冬晗. 用于制作全息光栅的宽光束扫描曝光方法[D]. 北京: 清华大学, 2017.
Ma D H. Broad-beam scanning exposure applied in the fabrication of holographic gratings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.