

突破全息近眼显示的空间带宽积瓶颈: 眼瞳箱扩展技术综述与展望

陶一卿¹, 张甜甜¹, 郑华东¹, 于瀛洁¹, 夏新星^{1,2}

(1. 上海大学 机电工程及其自动化学院, 上海 200444; 2. 上大通用智能机器人研究院, 上海 200444)

摘要: 全息近眼显示能够提供逼真的三维视觉体验, 但其固有的空间带宽积会导致眼瞳箱与视场角两者相互制约, 而眼瞳箱尺寸过小则会严重影响系统实用性。近年来, 全息近眼显示中的眼瞳箱扩展技术日益受到关注。为系统梳理该领域的研究进展, 本文从眼瞳箱受限的成因出发, 对现有眼瞳箱扩展方法进行了全面综述。首先, 依据原理与实现形式的不同, 对扩展方法进行多维度分类; 然后, 对比分析了各类方法在眼瞳箱尺寸、视场角以及重建图像质量(如峰值信噪比)等方面的性能表现, 总结其优缺点与适用性; 最后, 对当前技术面临的关键挑战进行了总结, 并对未来发展趋势作出了展望。

关键词: 眼瞳箱; 全息显示; 近眼显示; 三维显示; 空间带宽积

中图分类号: O 438 文献标志码: A

Breaking the space-bandwidth product bottleneck in holographic near-eye displays: a review and outlook of eyebox expansion techniques

TAO Yiqing¹, ZHANG Tianian¹, ZHENG Huadong¹, YU Yingjie¹, XIA Xinxing^{1,2}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shangda General Intelligent Robotics Research Institute, Shanghai 200444, China)

Abstract: Holographic near-eye displays can deliver realistic three-dimensional visual experiences, but their inherent space-bandwidth product leads to a trade-off between the eyebox and the field of view. An excessively small eyebox severely compromises the system's practical utility. In recent years, eyebox expansion techniques in holographic near-eye displays have attracted growing attention. To

收稿日期: 2025-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62575167, 62005154); 上海市科委元宇宙专项(24511106502)

第一作者: 陶一卿(2001—), 男, 博士研究生。研究方向: 全息显示。E-mail: tyq211218@163.com

通信作者: 夏新星(1986—), 男, 副教授。研究方向: 三维显示、近眼显示、虚拟现实和脑机交互。E-mail: xiaxinxing@shu.edu.cn

引文格式: 陶一卿, 张甜甜, 郑华东, 等. 突破全息近眼显示的空间带宽积瓶颈: 眼瞳箱扩展技术综述与展望[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(6): 640-654.

Citation: TAO Yiqing, ZHANG Tianian, ZHENG Huadong, et al. Breaking the space-bandwidth product bottleneck in holographic near-eye displays: a review and outlook of eyebox expansion techniques[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(6): 640-654.

systematically review the research progress in this field, this paper started from the causes of eyebox constraints and provided a comprehensive review of existing methods for expanding the eyebox. First, the expansion techniques were categorized along multiple dimensions based on their underlying principles and implementation forms. Subsequently, a comparative analysis was conducted on the performance of various methods in terms of eyebox, field of view and reconstruction image quality (such as peak signal-to-noise ratio), summarizing their advantages, limitations and applicability. Finally, the challenges of current technologies were summarized, and future development trends were discussed.

Keywords: *eyebox; holographic display; near-eye display; 3D display; space-bandwidth product*

虚拟现实 (virtual reality, VR) 与增强现实 (augmented reality, AR) 技术正以前所未有的速度渗透消费电子、工业制造、医疗健康、教育培训及娱乐社交等领域，重塑着人机交互的体验^[1]。作为这一浪潮的核心，近眼显示技术是连接数字信息与人类视觉感知的桥梁，决定着 VR/AR 的沉浸感、舒适度与实用性^[2]。在近眼显示技术路线中，全息近眼显示技术因其独特的优势而备受学术界与产业界的瞩目^[3]。

全息显示是通过干涉记录并衍射从而再现物体光波的振幅与相位信息。将全息的方法应用到近眼显示中，能够呈现完整的光场信息和深度暗示，从而有效缓解视觉辐辏调节冲突，而这是全息显示技术独特的优势^[4]。该技术的核心构成包含空间光调制器 (spatial light modulators, SLM)、相干光源 (如激光器) 两大部分：SLM 负责编码携带物体波前信息的全息图；相干光源则提供稳定的照明光^[5]。

在全息图生成策略方面，计算方法创新提升了显示质量与效率^[6]。基于衍射理论的数值计算常受限于散斑噪声与高计算负载，而近年涌现的新颖算法不断提高全息图生成的上限^[7]：物理模型驱动的直接求解高质量相位全息图，有效抑制噪声并且提升重建精度^[8]；端到端深度学习框架利用神经网络替代迭代计算^[9-12]的方法实现了实时全息图生成，结合“相机在环”策略实时校准^[13-14]又达到了更高显示质量^[15]；相空间调控技术通过在更高维的维格纳域优化全息图生成过程，最终扩展了视场角并提升色彩保真度^[16-17]，为动态彩色全息显示提供新范式^[2]；此外，一些全息图生成算法针对紧凑型全息显示系统的轻量化策略^[18-19]，实现了高衍射效率与低噪声的协同优化^[20]，推动全息显示向应用级三维显示方向发展^[21]。

然而，尽管全息近眼显示技术前景广阔，但其性能受限于一个物理参数——空间带宽积 (space-bandwidth product, SBP)。在相空间分析中，SBP 上限由 SLM 的像素数量与像素密度决定^[22-24]。在全息近眼显示中，有限的 SBP 必须在眼瞳箱尺寸与视场角 (field of view, FoV) 之间进行权衡，二者呈此消彼长的反比关系。这一矛盾成为了阻碍全息近眼显示走向实用化的瓶颈。具体而言，当 FoV 增大时，为保持图像分辨率，每个视角方向的信息必须来自 SLM 上更小的子区域，这等效于减小了出瞳直径，导致眼瞳箱缩小。

眼瞳箱指的是用户眼球在空间中可以自由移动而仍能清晰完整地观察到显示图像的三维区域^[25]。形象地说，它是眼前方一个允许瞳孔“舒适存在”并接收到良好图像质量的“盒子状”空间^[26]。眼瞳箱直接决定了用户佩戴头显时的适配宽容度、使用舒适度以及图像稳定性^[27]。在 VR/AR 应用中，8~12 mm 的眼瞳箱尺寸已能基本满足多数用户在头部自然运动下的稳定观测需求^[28]。眼瞳箱过小 (<5 mm) 意味着头部或眼球的微小移动就会导致图像消失、色彩偏移甚至完全丢失图像，损害显示的沉浸感。因此，突破 SBP 瓶颈，实现大视场角与大眼瞳箱的协同优化，是推动下一代 VR/AR 设备走向消费爆款的必由之路。

1 全息近眼显示眼瞳箱扩展方法

在全息近眼显示系统中，眼瞳箱尺寸受限于系统能够在出瞳平面上引导至观察者的光束，并且这些光束需具备足够的衍射效率。光学系统遵循光学扩展量守恒原理，即光束穿过面积与发散角的乘积保持不变。因此，在追求大视场角和高分辨率的同时，往往难以实现大尺寸的眼瞳箱^[29]。

尤其在计算全息显示中，全息图本质上是模拟记录的参考光与物光干涉或通过光波空间传播所形成的调制模板。因此，全息显示系统的光学扩展量实际上由加载全息图的 SLM 的像素间距决定。这也意味着，系统的视场角与眼瞳箱尺寸最终受限于 SLM 的带宽^[30]。固有眼瞳箱尺寸 E 为

$$E = \frac{L\lambda}{2p\sin(F/2)} = \frac{M\lambda}{2\sin(F/2)}$$

(1)

式中： L 为 SLM 水平或垂直方向的尺寸； λ 为光源波长； p 为 SLM 像素间距； F 为 FoV； M 为

SLM 上水平或垂直方向的像素个数。眼瞳箱尺寸 E 与 FoV 之间存在相互制约关系，FoV 定义了用户单眼可观察图像的最大角度范围。然而，根据光学扩展量守恒，在 SLM 能力固定的前提下，增大 FoV 必然引起眼瞳箱尺寸减小。

为突破此瓶颈，研究者们提出了多种眼瞳箱扩展方法。依据不同的扩展原理可以分为静态式扩展、扫描式扩展和眼动追踪式扩展；依据 SBP 变化情况可分为 SBP 不变的扩展方法和 SBP 改变的扩展方法，如图 1 所示。

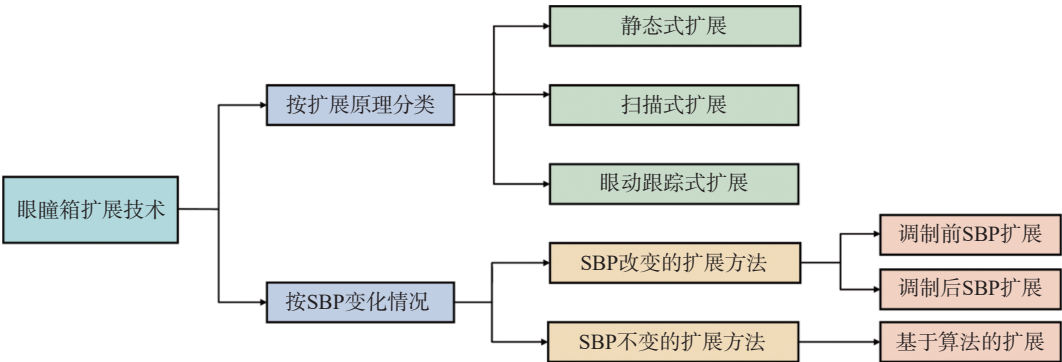


图 1 全息近眼显示的眼瞳箱扩展方法分类

Fig.1 Classification of eyebox expansion methods for holographic near-eye displays

1.1 根据扩展原理分类

根据眼瞳箱扩展在时间和空间上的呈现形式以及对用户瞳孔位置的响应方式，可分为静态式扩展、扫描式扩展和眼动追踪式扩展 3 类。

1.1.1 静态式扩展

静态式眼瞳箱扩展通过光场调控，在空间上同时产生多个等效的出瞳或一个连续的大出瞳^[31]。无论用户瞳孔处于静态扩展眼瞳箱内的任何位置，只要其位于该区域内，都能接收到重建图像的全部视场信息。眼瞳箱的扩展是非时序依赖的，主要依赖出瞳复制的光学结构或其他调制元件实现，如全息光学元件、微透镜阵列等。

1.1.2 扫描式扩展

扫描式眼瞳箱扩展利用人眼视觉暂留效应，高速、时序地改变有效出瞳，使其在眼瞳平面上不同位置快速扫描^[32]。在任意单一时刻，系统仅提供一个有效出瞳。然而，当扫描速度够快，多个离散出瞳位置就被感知为一个连续、扩展的眼瞳箱^[30]。扫描式眼瞳箱扩展方法需要考虑眼瞳箱的离散问题及其导致的图像混叠问题。该方法主要依赖高速物理扫描机制实现，例如高速振镜使光在 SLM 上扫描照射，从而重建出在眼瞳平面移

动的出瞳。

1.1.3 眼动追踪式扩展

眼动追踪式眼瞳箱扩展在任意时刻也仅提供一个有效出瞳^[33]。其核心区别在于系统通过集成的眼动追踪模块，实时、高精度地检测用户瞳孔在三维空间中的位置。根据检测到的瞳孔坐标，有针对性地调整有效出瞳的位置。可通过快速更新 SLM 上全息图进行光束偏折、改变液晶调制器件的状态或光源照明方向，确保重建图像光锥的中心时刻精准对准当前瞳孔位置^[34]。其优势在于效率高，不需要高速物理器件。系统光学扩展量仅需覆盖单出瞳大小加上眼动范围，远小于实现同等扩展范围的静态式方案，有利于系统小型化和轻量化，无大面积照明或多路复用带来的额外功耗。

1.2 根据 SBP 变化情况分类

全息近眼显示中的眼瞳箱扩展方法中有些扩展了 SBP，有些没有扩展 SBP。扩展 SBP 的方法通过借助额外的硬件扩大光路的 SBP，在不牺牲视场角的前提下有效扩大眼瞳箱范围，此类方法通常作用于 SLM 前或 SLM 后。因此，基于 SBP 改变位置分为调制前眼瞳箱扩展与调制后眼瞳箱扩展。没有扩展 SBP 的方法通常使用算法优化全

息图,从而实现眼瞳箱扩展,通常作用于SLM上。

1.2.1 SBP改变的扩展方法

在SBP改变的方法中,调制前眼瞳箱扩展主要改变光路中SLM之前的照明光路,其主要策略是光源复用技术^[35]。传统全息显示中由单一光源照明,而光源复用技术通过时间或空间维度复制光源。当这个扩展后的照明光场入射到SLM上,其产生的重建光场自然携带了更大的SBP,从而产生大眼瞳箱。光源复用技术分为光源时分复用(光束转向技术)和光源空分复用(多光源同时照明)。光源时分复用使用单个可快速移动或切换的光源,依次照亮SLM。在刷新率快于人眼视觉暂留时,人眼将感知到多个子眼瞳,并融合成一个连续扩展的眼瞳箱。光源空分复用同时使用多个在空间上分离的光源并行照明SLM。每个光源贡献一个子眼瞳箱或构成一个大眼瞳箱的一部分,它们在空间上并置拼接成扩展的眼瞳箱。

在SBP改变的方法中,调制后眼瞳箱扩展主要应用在SLM之后的光路中,对调制后的携带目标图像信息的出射光场进行处理,实现眼瞳箱的扩展。调制后眼瞳箱方法主要为:散射介质法^[36]利用眼瞳箱中的随机结构破坏入射波前的空间相干性,将集中在特定传播方向的光束分配到更宽范围内而实现眼瞳箱扩展;出瞳复制法利用透镜阵列^[37]、全息光学元件^[38-40](holographic optical element, HOE)等特殊光学元件在空间上复制SLM产生的原始出瞳;掩膜法^[41-42]通常配合多光源照明策略,在光路中放置具有特殊透过率分布的掩模板,在傅里叶平面上打乱多光源光束之间的干扰,协助多光源照明策略实现大眼瞳箱;液晶调制法^[43]通过电控方式动态改变光束的偏折角度或聚焦位置,实现可重构的眼瞳箱扩展或出瞳扫描;超表面法利用亚波长尺度人工结构对光场的波前进行精密调控。

1.2.2 SBP不变的扩展方法

SBP不变的扩展方法主要依赖计算全息图(computer-generated hologram, CGH)生成算法的改进,在不增加硬件的前提下,通过全息图复用的方式实现眼瞳箱的扩展^[44]。这类方法灵活性强,根据不同的眼瞳箱扩展需求、目标图像,可以生成不同功能的CGH。但通常以牺牲图像显示效率、增加计算负载为条件。

直接扩展法中的算法可进一步分为主动优化

算法和被动优化算法。主动优化算法在CGH计算过程中利用全息图空分复用策略,通过设计特定的全息图编码,使SLM分区调控,从而形成使多个相邻的视点,同时携带有效图像信息^[45]。当人眼位于不同位置时可接收来自不同视点的图像,扩大了有效眼瞳箱;被动优化算法的核心在于感知人眼瞳孔位置^[46-47]。根据检测到的瞳孔位置,动态调整CGH的内容以预补偿像差、更新视窗位置。其核心思想并非物理上扩大光场覆盖范围,而是确保瞳孔在眼动追踪系统的有效工作范围内移动,使用户都能感知到完整的图像。这种方法对系统光学扩展量要求较低,但高度依赖快速、精准的眼动追踪技术。

2 全息近眼显示眼瞳箱扩展方法概述

主流的眼瞳箱扩展方法如图2所示。若按照SBP改变情况,算法(全息图复用法)是SBP不变的眼瞳箱扩展,多光源照明法和光源导向法是SLM调制前SBP扩展以实现眼瞳箱扩展的方法,而全息光学元件法、透镜阵列法、散射介质法是SLM调制前SBP扩展以实现眼瞳箱扩展的方法。下文将按照图2的顺序依次介绍各个眼瞳箱扩展方法^[48-53]。

2.1 基于算法的眼瞳箱扩展方法

基于算法的眼瞳箱扩展方法以计算全息术为基础,通过全息图优化算法,使SLM复用和衍射级次复制以实现静态瞳孔阵列化,在紧凑的全息近眼显示系统中实现大眼瞳箱。

Chang等^[54]提出了一种视网膜扫描式近眼显示系统,通过全息图复用实现眼瞳箱扩展,如图3所示。该软件法是一种主动优化算法,其并不改变光路中的光学扩展量,但人为增加了出瞳视点个数。其核心在于CGH中复用多个离轴平面波载波,使瞳孔阵列化复制。具体来说,算法首先基于菲涅尔衍射模型计算含会聚相位的复全息图,然后添加不同角度的平面载波相位生成多路子全息图,每路对应一个空间偏移瞳孔,最终将子全息图叠加为复合全息图,并采用振幅型计算机生成全息(AO-CGH)编码技术实现振幅调制。经过实验验证,该系统在FoV约为2.75°时,理论最大眼瞳箱扩展至9 mm。在无透镜紧凑构型下,该工

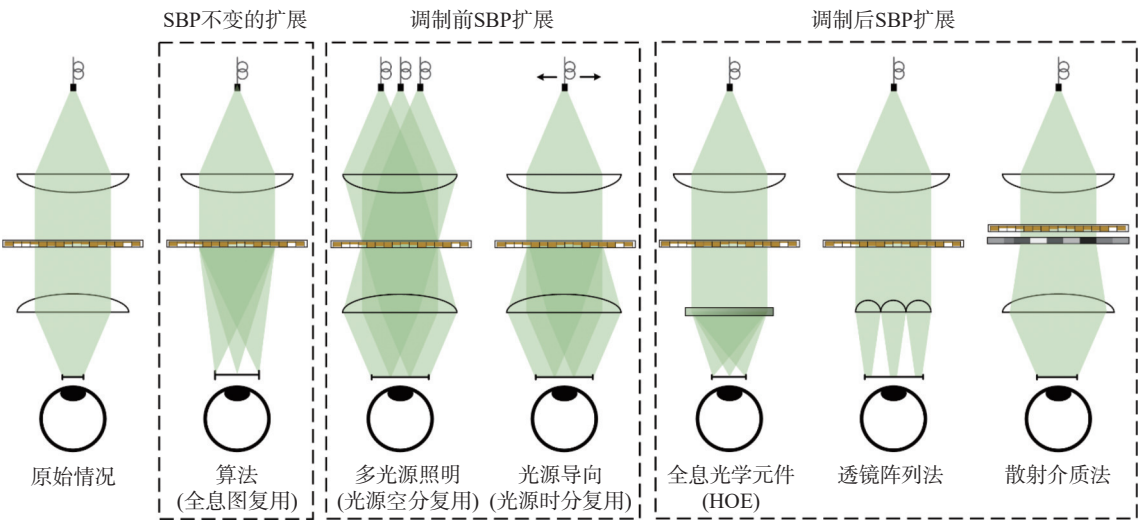


图 2 不同眼瞳箱扩展方法概览

Fig.2 Illustration of baseline eyebox expansion configurations

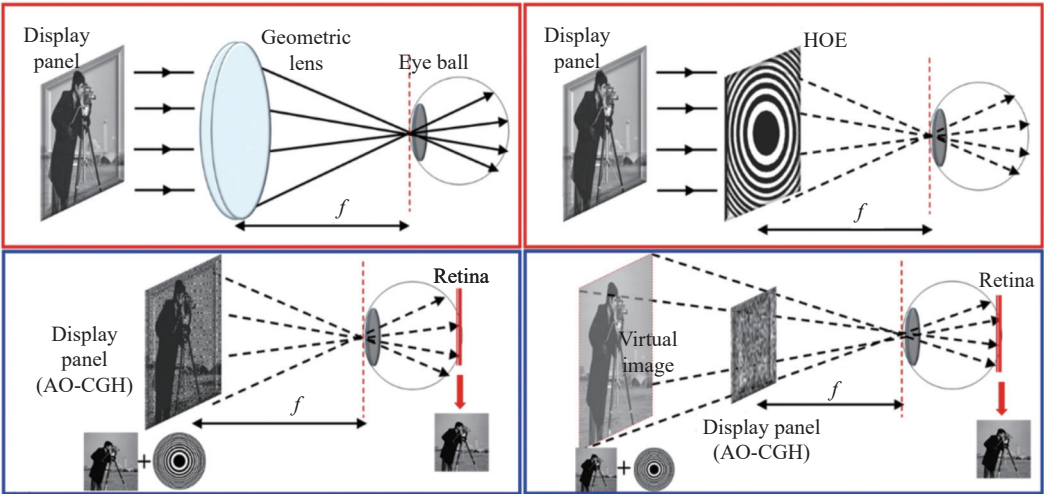


图 3 振幅型计算全息图示意图^[54]

Fig.3 Schematic diagram of amplitude-only computer-generated hologram (AO-CGH)^[54]

作验证了视网膜扫描式全息显示的眼瞳箱扩展能力，为可穿戴设备提供了新方案。每个离轴载波通道都需要独立的波前计算与叠加，该方法的计算负载随复用通道数量的增加而线性增长。这使得其在追求大眼瞳箱时（如超过 5 个瞳孔复制点）难以实现高帧率的全息图生成。

Shi 等^[44]提出的“人因工程全息术”实现眼瞳箱的实质性扩展，如图 4 所示。虽然该算法通过瞳孔掩膜进行图像优化，但是显示过程并不依赖眼瞳位置，因此属于主动优化算法。该方法结合 RGBD 图像与非相干波传播模型生成精确的三维 CGH，并且改进了高级次梯度下降（high-order gradient descent, HOGD）算法，以支持多全息图时间复用来抑制散斑噪声。并且该算法创新性地采

用混合瞳孔采样策略，将静态瞳孔与动态随机瞳孔联合优化。通过对不同瞳孔位置的约束优化，使得显示图像在眼瞳箱边缘位置的显示质量得到提升，事实上扩展了眼瞳箱的范围边界。最终实验表明，在 8 mm×8 mm 眼瞳箱内，即使瞳孔偏移至边缘或尺寸缩减，该算法仍维持图像强度与质量稳定。其突破在于通过频域能量分布的优化重组，将有效眼瞳箱扩展至中央衍射级形成的理论边界之外。该方案的核心挑战在于其高昂的计算成本。HOGD 等迭代优化算法本身计算密集，而结合非相干波传播模型与多位置约束进一步增加了每次迭代的复杂度。

Dashdavaa 等^[45,55]提出了一种用于全息近眼显示的二维出瞳复制方法，旨在扩展眼瞳箱的同时

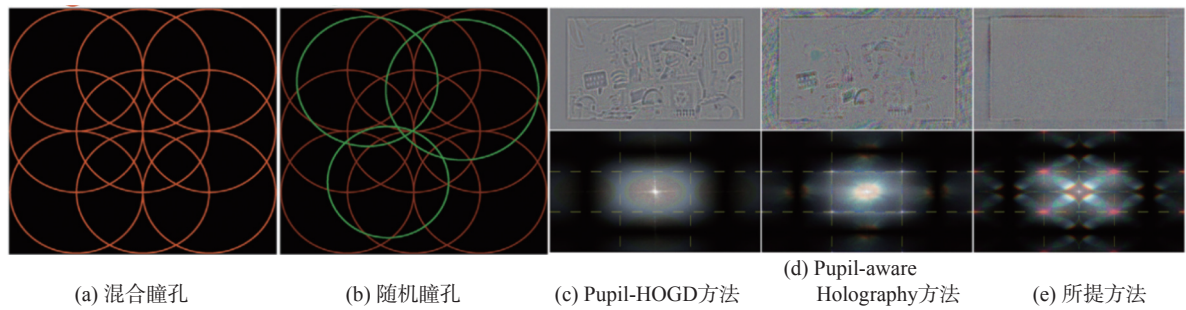


图 4 人因工程全息所述的基于随机瞳孔位置的优化策略与结果^[44]

Fig.4 The optimization strategies and results based on random pupil positions in ergonomic-centric holography^[44]

而不牺牲视场角。该方法的核心在于利用球面波照明 SLM 时产生的强度均衡化的高阶衍射, 将数字编码的二维闪耀光栅与球面透镜相位轮廓直接集成到 SLM 显示的预补偿 CGH 中, 无需额外折射光学元件。这种集成设计主动抑制了零级衍射伪影, 并产生了一个空间分离且强度均匀的二维高阶衍射级次阵列。衍射级次阵列中每一个级次即为一个出瞳或视点, 实现了二维出瞳复制。经过实验验证, 将眼瞳箱水平扩展约 10 mm, 垂直扩展约 7 mm, 同时维持了约 11°的对角线视场角。相较于前两种基于迭代优化的算法, 此方法的计算效率显著提高。但其计算速度的优势是以牺牲部分设计自由度(如难以实现复杂的多深度场景)和引入高阶衍射固有的能量损失为代价的。

综上所述, 基于算法的眼瞳箱扩展方法在硬件简洁性上具有无可替代的优势, 但其普遍面临“计算负载”与“显示性能”之间的根本权衡。当前的研究趋势是利用深度学习等人工智能技术, 通过训练好的神经网络直接、快速地由 2D/3D 目标图像映射出高质量相位全息图, 将计算时间从“分钟/小时”量级压缩至“毫秒”量级, 从而为基于算法的扩瞳技术注入新的生命

力。面向特定算法的专用硬件加速(如 FPGA、GPU 并行计算)也是推动其走向实用的关键路径。

2.2 基于多光源照明的眼瞳箱扩展方法

Jo 等^[42]提出了一种基于多角度照明与二值掩模的空间带宽积扩展方法, 通过打破 SLM 的衍射角限制实现眼瞳箱扩展, 如图 5 所示。该方法采用激光二极管阵列从不同角度照射 SLM, 并且在 4f 系统中的傅里叶平面引入随机二值掩模。该掩模通过差异化调制各照明通道的频谱分量, 有效解决了多光源共用相同 SLM 区域导致的图像混叠问题: 当波前通过二值掩模时, 每个激光二极管对应的频谱分量被独立滤波, 显著降低了信号间的相关性。该方案优势在于规避了时间复用策略的帧率损耗与空间复用策略的硬件复杂性, 且对校准误差的准确性要求低于散射介质方案。其多光源照明与掩膜优化策略, 为近眼全息显示的实用化提供了新路径。然而, 二值掩模对光强有固定比例的衰减, 加之多个光源并非同时被眼球接收利用, 导致系统光能利用率(etendue)较低和潜在能效下降的问题。

Kuo 等^[35]提出一种基于双 SLM 的多光源全息显示系统, 通过空间中非相干的光源阵列实现眼

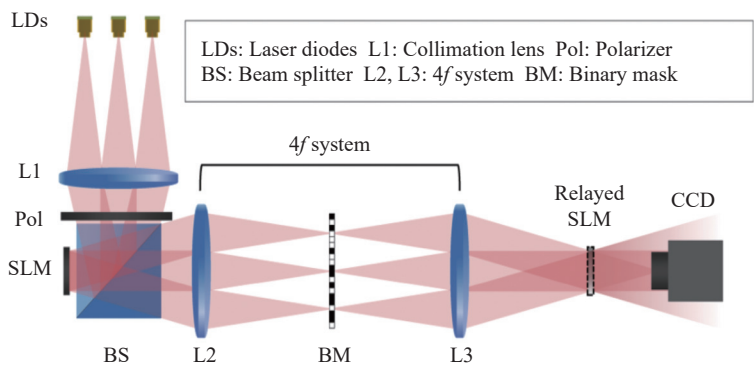


图 5 基于多角度照明与二值掩模的眼瞳箱扩展^[42]

Fig.5 Eyebbox expansion based on multi-angle illumination and binary mask^[42]

瞳箱均匀扩展，如图 6 所示。该方法采用多角度入射的非相干光源阵列，使每个光源在像平面生成独立图案。系统设置有 2 mm 轴向间距的双 SLM 结构，利用其角度选择性响应打破光源间的关联性，避免单 SLM 架构下的图像重叠问题。实验验证中，双 SLM 通过联合优化算法独立控制各光源的调制图样，使光源输出在眼瞳箱区非相干叠加，最终在保持 SLM 原生分辨率前提下，眼瞳箱能量分布均匀性显著优于平滑相位全息图。该架构在光学压缩特性下支持超过双 SLM 自由度的光源数量，但光源间距与数量存在权衡关系：过密导致分辨率损失；过疏或过多则引起图像雾化模糊。实验原型机实现了全彩色的低散斑的二维图像与自然离焦模糊的全息影像渲染，为大眼瞳箱全息近眼显示提供新思路。双 SLM 架构不仅增加了系统的体积、重量和硬件成本，其精确的对准与校准过程也更繁琐。

Chao 等^[56]提出了一种基于多光源照明与内容

自适应的动态傅里叶调制的全息近眼显示眼瞳箱扩展方法，原理如图 7 所示。单光源系统因傅里叶平面频谱覆盖范围有限，导致眼瞳箱尺寸与视场角相互制约。为解决此问题，该方法采用 3×3 多光源阵列(间距 8.17 mm 光源生成 9 个光源组成的阵列背光)来扩大可寻址空间频率范围。创新性地 在相位空间光调制器的傅里叶平面引入动态振幅 SLM，联合优化相位图案与傅里叶振幅调制。实验验证表明，该系统在 8.53 mm×8.53 mm 眼瞳箱内实现 7.78° 对角线视场角，相较单光源、静态随机傅里叶掩模及光束扫描方案，重建质量显著提升的同时无需高速 SLM 或眼动追踪支持。该方案同样面临技术难点，系统中包含相位与振幅两个 SLM，其协同控制算法的复杂度和实时处理延迟是实现动态显示的瓶颈。

2.3 基于光源时分复用的眼瞳箱扩展方法

Xia 等^[32]和 Zhang 等^[57]提出了一种基于角度扫描照明的全息近眼显示眼瞳箱扩展方法，如图 8

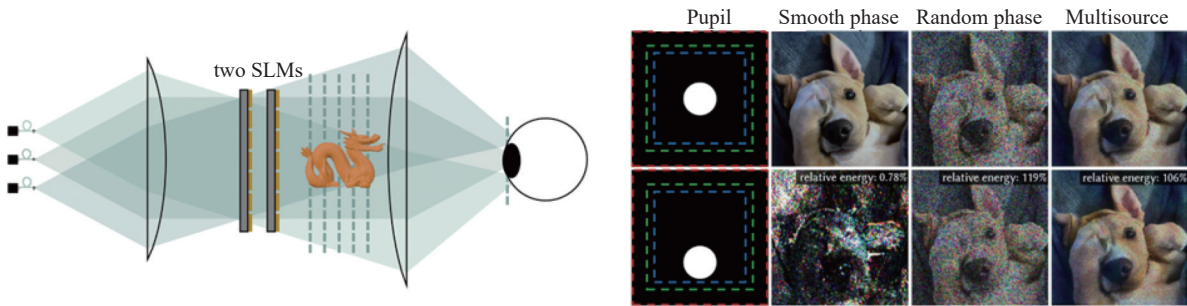


图 6 基于多角度照明与双空间光调制器的眼瞳箱扩展^[35]

Fig.6 Eyebox expansion based on multi-angle illumination and dual spatial light modulators (SLM)^[35]

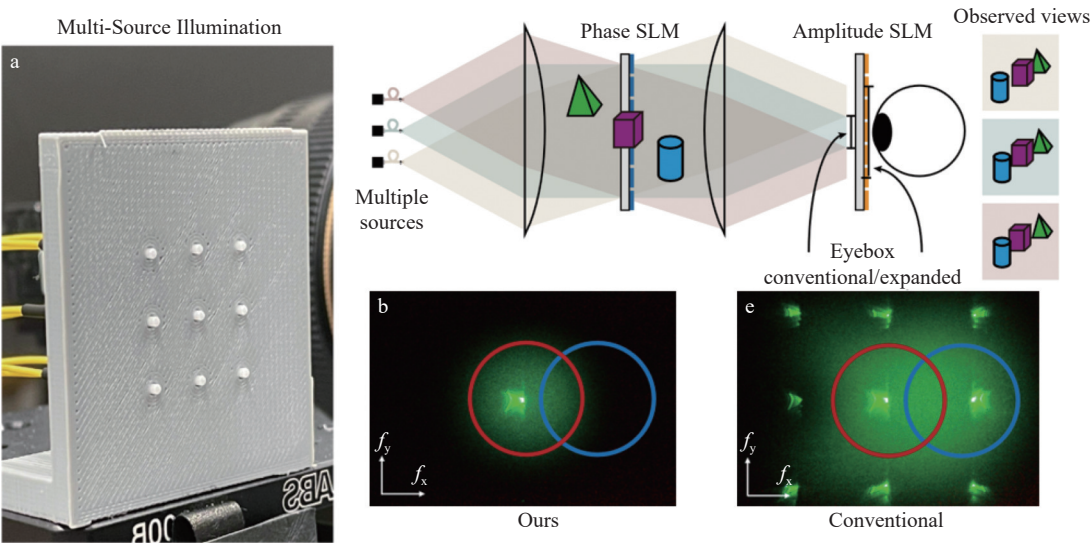


图 7 基于多光源照明与动态傅里叶调制的眼瞳箱扩展^[56]

Fig.7 Eyebox expansion based on multi-source illumination and dynamic Fourier modulation^[56]

所示。该方法通过二维转向镜动态调节照明光束入射至空间光调制器的角度，使二维转向镜与SLM 高帧率刷新同步运动以刷新广域眼瞳箱范围内的图像。通过转向镜结合目镜能够实现的相邻出瞳间距仅 $1.1\text{ }\mu\text{m}$ ，远小于人眼瞳孔直径，从而避免传统扫描方法中因出瞳稀疏分布导致的盲区或重影问题。实验一共搭建了VR 与AR 两套原型系统，二者均实现 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的眼瞳箱扩展。但本系统局限性包括近距离下的对比度下降、实时计算瓶颈及系统体积较大，未来需通过相机闭环优化、快速算法及光学元件小型化改进等问题。

Choi 等^[33]提出了一种结合合成孔径波导全息技术与人工智能驱动算法的创新方案，能够显著扩展了全息近眼显示的眼瞳箱，原理如图 9 所示。该方案协同设计光学硬件与计算框架，其光学架构采用角度编码的体积布拉格光栅波导替代传统表面浮雕光栅，解决双向衍射导致的侧光泄漏问题，并且结合消色差全息目镜消除色散，形成仅 3 mm 厚度的超薄模组。利用 MEMS 镜扫描入射角，在 SLM 平面合成 $9\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的眼瞳箱，同时支持水平 34.2° 、垂直 20.2° 的视场角。该协同设计在保持设备紧凑性的同时，实现大眼瞳箱（容

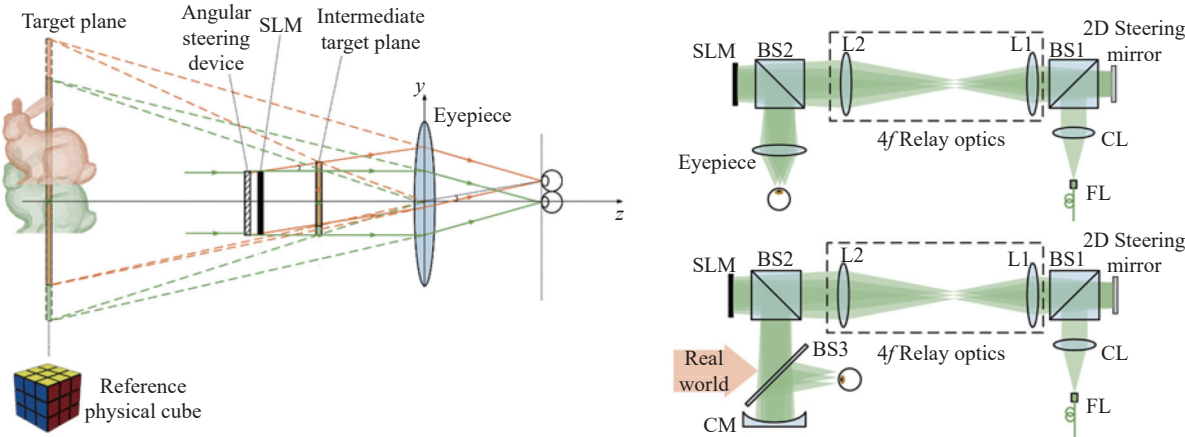


图 8 基于角度转向照明的扫描式眼瞳箱扩展^[32]

Fig.8 Scanning-type eyebox expansion based on angular-steering illumination^[32]

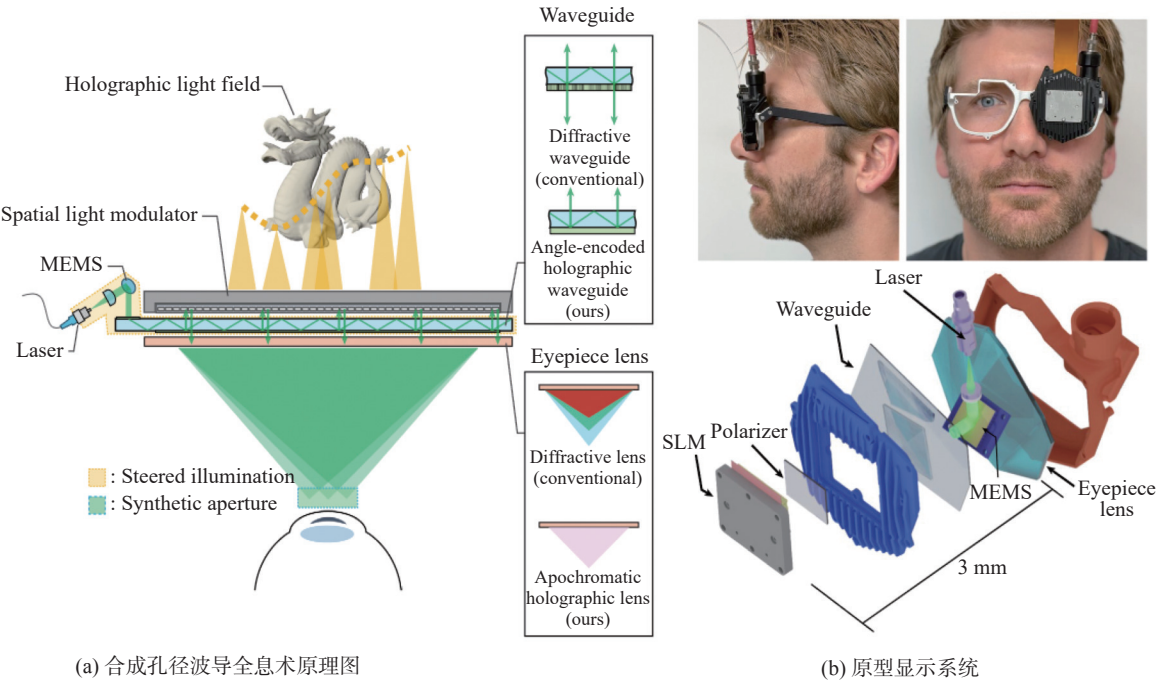


图 9 基于光源转向与合成孔径技术的扫描式眼瞳箱扩展^[33]

Fig.9 Scanning-based eyebox expansion based on light source steering and synthetic aperture technology^[33]

积扩大2个数量级)下的高质量三维全息显示,为轻量化混合现实眼镜提供关键技术路径。

2.4 基于HOE的眼瞳箱扩展方法

Jeong等^[39]提出一种基于全息打印的定制化光学合束器技术,其通过HOE的波前调控实现眼瞳箱水平方向和垂直方向上的扩展,如图10所示。该方法的核心创新在于定制化眼瞳箱设计,将眼瞳箱扩展需求集成在全息打印系统中,制备出定制化的辅助眼瞳箱扩展的HOE。实验验证表明:眼瞳箱双向扩展量达4 mm,通过瞳孔位置切换可分别显示定制化图像。该方法突破传统HOE复制光学元件的局限,实现非机械式眼瞳箱双向扩展,但当前眼瞳箱仍为离散分区,连续扩展需进一步研究。

Kim等^[58]提出了一种基于复用HOE的透视式全息近眼显示系统,旨在解决传统视网膜投影显示的眼瞳箱限制问题,如图11所示。该方法利用HOE替代光学凹面镜从而实现光学透视功能,使虚拟图像叠加于真实环境之上以实现增强现实显示。并且通过多重曝光技术将多个凹面镜结构记录于单块HOE中,最终在眼瞳平面形成横向间距为3 mm的离散焦点阵列。当观察者眼球在眼瞳箱内横向移动时,仅单个焦点进入瞳孔,将眼瞳箱扩展至9 mm×3 mm。该方案在扩展眼瞳箱的同

时,保留了视网膜投影显示免内容预处理、高分辨率的优势,但需注意其仍存在轴向失配敏感、眼动引起虚拟图像位移等固有挑战。

Choi等^[38]提出了一种方法以解决全息近眼显示的眼瞳箱尺寸受限问题,如图12所示。该方法通过结合HOE和SLM的高阶衍射特性,实现了眼瞳箱在水平与垂直方向上的连续扩展。其核心原理是,在水平方向利用HOE记录的多焦点凹面镜功能,垂直方向则通过修改4f光学系统中的傅里叶平面滤波器,允许多个SLM高阶衍射级通过从而实现垂直复制。并且,该团队提出动态角谱修正算法,可以根据眼动追踪获取的瞳孔位置将目标空间频段映射至SLM支持的空间频率范围。通过实验测试,成功将眼瞳箱扩展至9.00 mm×17.29 mm(水平扩展3倍、垂直扩展2倍)。但该方法受限于SLM高阶衍射效率下降,导致垂直方向亮度不均。此工作实现全息近眼显示眼瞳箱的二维无缝扩展,为高舒适度近眼显示提供了有效解决方案。

针对全息近眼显示中光学扩展量对眼瞳箱尺寸的物理限制,Jang等^[59]提出了突破性的动态出瞳偏移方案,如图13所示。该研究实现了瞳孔追踪驱动的眼瞳箱扩展,通过设计瞳孔偏移全息光学元件(pupil-shifting holographic optical element,

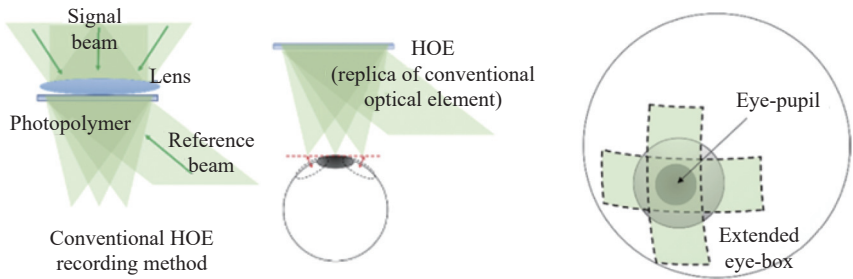


图 10 基于全息打印定制全息光学元件的眼瞳箱扩展^[39]

Fig.10 Eyebox expansion based on customized holographic optical elements fabricated via holographic printing^[39]

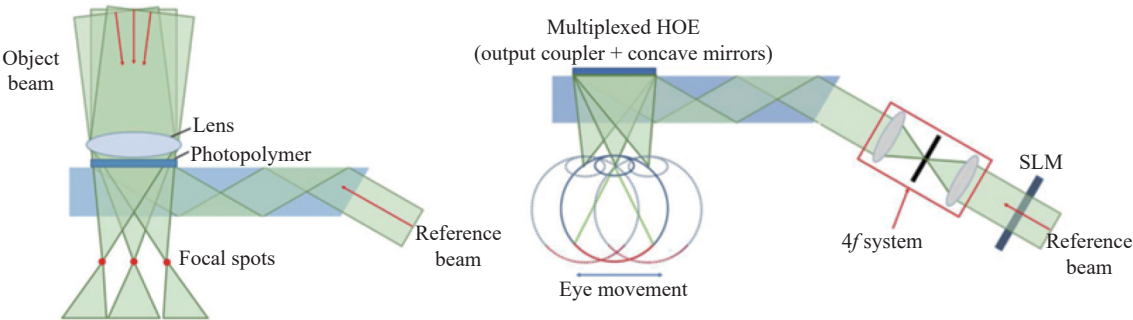


图 11 基于复用凹面镜型全息光学元件的眼瞳箱扩展^[58]

Fig.11 Eyebox expansion based on multiplexed concave-mirror-type holographic optical element^[58]

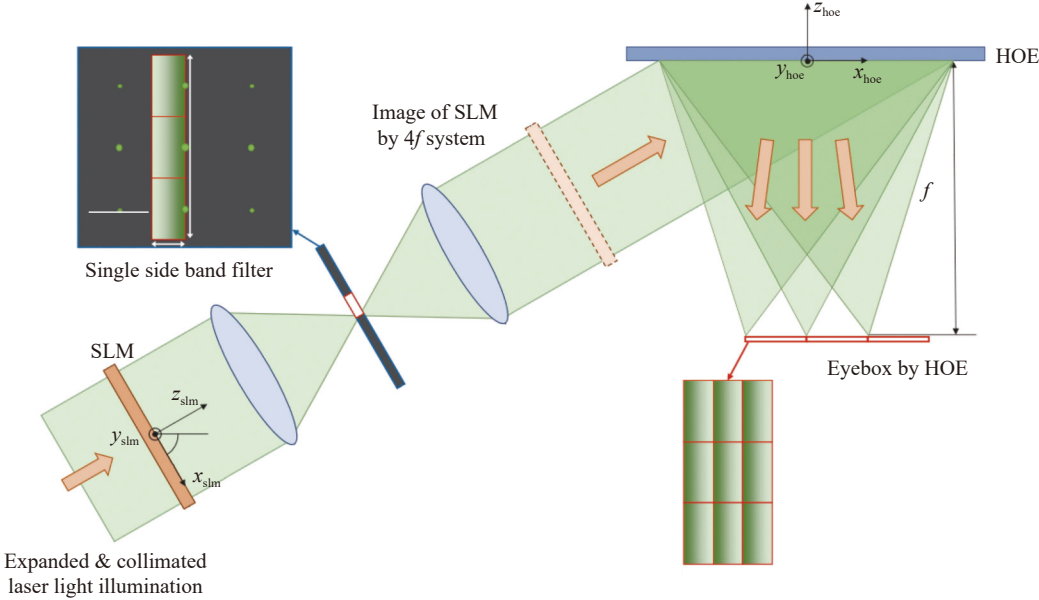


图 12 基于复用全息光学元件的二维眼瞳箱扩展^[38]

Fig.12 Two-dimensional eyepiece expansion based on multiplexed holographic optical element^[38]

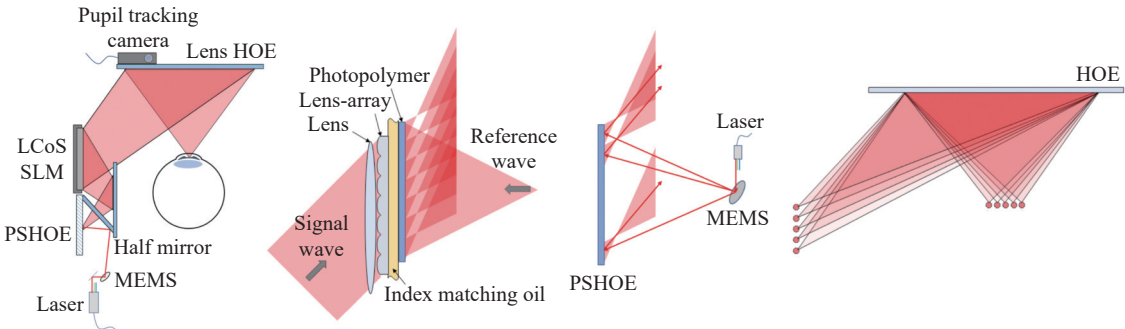


图 13 基于瞳孔偏移全息光学元件的眼动追踪式眼瞳箱扩展^[59]

Fig.13 Eye-tracking-enabled eyepiece expansion based on pupil-shifting holographic optical element^[59]

PSHOE)替代传统机械扫描结构,在紧凑型系统中完成微秒级出瞳切换。其核心创新在于结合 MEMS 反射镜与 PSHOE 生成可切换点光源阵列,使系统眼瞳箱从固有的 2 mm 扩展至 9 mm,同时保持 45° 视场角。实验验证表明,该系统在 7 mm×7 mm 眼瞳箱内能够实现 60 Hz 实时显示。该工作是一例实用化全息眼瞳箱扩展方案,为后续波导全息混

合近眼显示系统提供了新型技术路径。
如表 1 所示,通过横向比较可以发现,HOE 方案设计在眼瞳箱的连续性与系统的复杂性之间存在技术权衡。Jeong 等和 Kim 等的方案无需眼动追踪,系统相对简单,但代价是眼瞳箱呈离散状态,用户体验存在“跳跃感”。而 Choi 等和 Jang 等的方案通过引入眼动追踪和更复杂的光学

表 1 基于全息光学元件的眼瞳箱扩展方案对比

Tab.1 Comparison of eyepiece expansion schemes based on holographic optical element

研究团队	扩展维度	眼瞳箱连续性	是否眼动追踪	核心优势
Jeong等 ^[39]	二维	离散(分区)	否	定制化设计,突破传统光学复制局限
Kim等 ^[58]	一维	离散(焦点阵列)	否	保留视网膜投影免预处理、高分辨率优势
Choi等 ^[38]	二维	连续	否	实现了二维无缝连续扩展,舒适度高
Jang等 ^[59]	一维	准连续	是	微秒级切换,系统紧凑,实时性强

或光电结构(如动态 SLM 滤波、MEMS+PSHOE),实现了连续或准连续的扩展,显著提升了舒适度,但同时也大幅增加了系统控制的复杂度和实现成本。未来,如何在不显著增加系统复杂度的前提下实现大范围、高均匀性的连续眼瞳箱扩展,仍是该领域研究的重点与难点。

2.5 基于液晶光栅的眼瞳箱扩展方法

Li 等^[43]提出了一种基于可调液晶光栅的全息 3D 显示系统,通过二次衍射机制实现眼瞳箱扩展,如图 14 所示。该系统在 SLM 后方引入可调液晶光栅,并且利用双电极结构实现光栅周期的动态调控。该系统有眼瞳箱扩展模式,此模式加载原始分辨率全息图后,对液晶光栅施加电压使其工作于小周期模式。此时重建光场经光栅二次衍射产生多级衍射像,并通过偏振光阀调控各级次光强均匀性,最终生成空间分布的 7 个视点。该机制将眼瞳箱范围从单 SLM 系统的 8.2°扩展至

57.4°,且各视点重建图像强度均匀。该方法突破传统全息显示受限于 SLM 像素尺寸的眼瞳箱约束,同时保持系统结构简洁。

2.6 基于透镜阵列的眼瞳箱扩展方法

Chae 等^[60]提出了一种基于透镜阵列的稀疏眼瞳箱生成方法,突破传统全息近眼显示的光学扩展量限制,如图 15 所示。该方法针对 SLM 有限像素导致的视场角与眼瞳箱尺寸间的固有矛盾,创新性地重构了光瞳平面能量分布。通过将传统连续密集的眼瞳箱转换为离散稀疏结构,在保持眼瞳箱物理尺寸(8 mm×9 mm)的同时实现视场角扩展。实验结果显示,在眼瞳箱内不同瞳孔位置均能观测到完整图像,且系统没有使用遮光掩模或散射片,能够保证较高的亮度效率。相比微观尺度掩膜方法,该宏观稀疏化方案降低了光学系统对准的高精度要求,为实用化近眼显示提供了新路径。

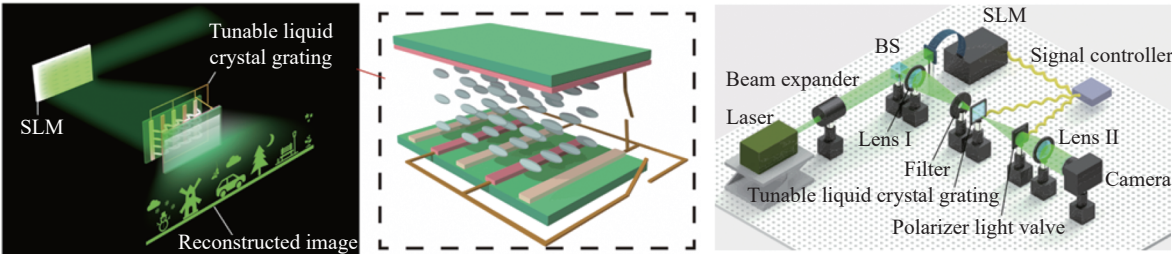


图 14 基于液晶光栅的眼瞳箱扩展^[43]

Fig.14 Eyebox expansion based on liquid crystal grating^[43]

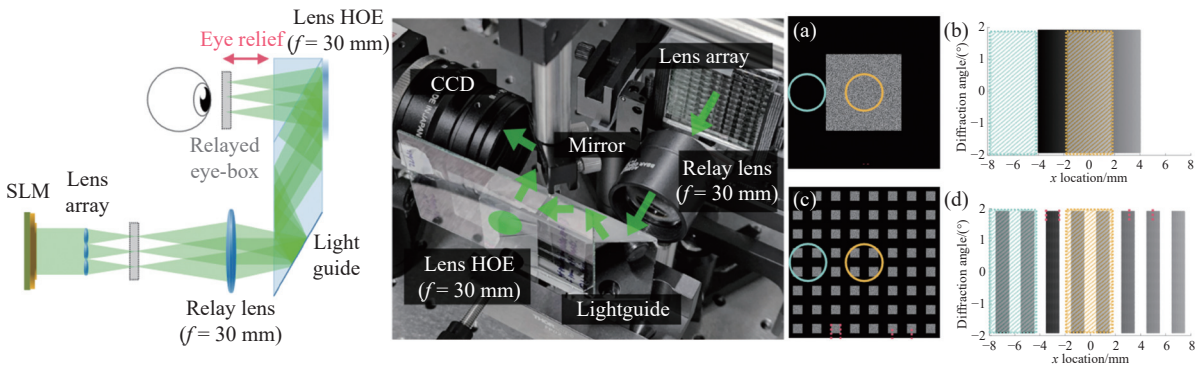


图 15 基于透镜阵列的稀疏眼瞳箱扩展^[60]

Fig.15 Sparse eyebox expansion based on lens-array^[60]

Wang 等^[37]提出了一种基于透镜阵列的扩展方法,如图 16 所示。该方法通过计算全息图重建三维子图像阵列,每个子图像对应三维物体的特定视角。利用透镜阵列对子图像阵列进行成像放大并整合为完整三维图像。该方法能够同时扩展显示的 FoV 和眼瞳箱尺寸。透镜的大数值孔径扩展了 FoV(实验达 17.6°),而透镜阵列生成的大间距

多视点(4×4 视点)则扩展了眼瞳箱(50 mm)。实验表明,观察者通过视点阵列可感知明显的运动视差,且保留了正确的视觉调节线索。作者指出,可通过增加透镜密度或结合振动阵列技术改善视点离散性,并支持双目观察。相较于类似研究文献^[60],该方法通过多视角渲染整合了阴影、遮挡等复杂物理效应,提升了三维重建的真实感。

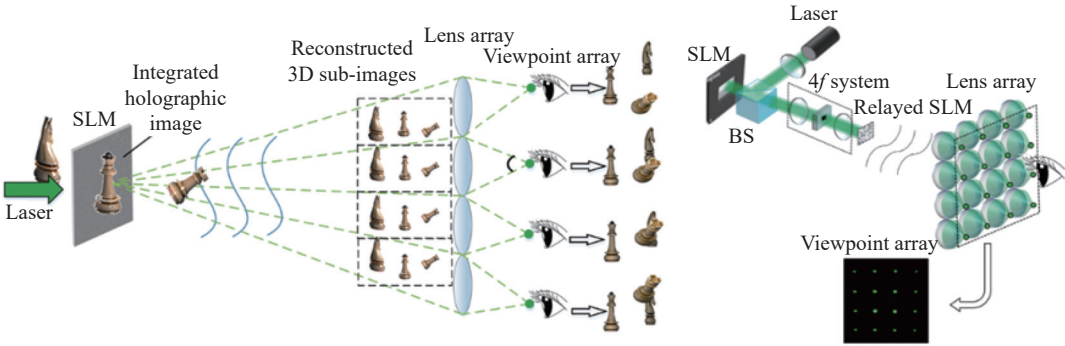


图 16 基于透镜阵列的光场全息眼瞳箱扩展^[37]

Fig.16 Light-field holographic eyebox expansion based on lens-array^[37]

2.7 基于散射介质的眼瞳箱扩展方法

Tseng 等^[36]提出神经光展扩展器，它一种通过自然图像数据集优化得到的静态光学元件，可在保持紧凑结构与内容保真度的同时突破衍射角限制，如图 17 所示。该方法将神经光展扩展器置于 SLM 后方，其亚微米级像素间距提升最大衍射角，使得光学扩展量增大。实验表明，在 64 倍光

学扩展量下，全彩自然图像的重建峰值信噪比超过 29 dB，相较于随机散射体扩展方法，其保真度能够提升一个数量级，且支持全彩 3D 全息显示。此外，神经光展扩展器对眼瞳位置变化具有鲁棒性，克服了透镜阵列类方法因瞳孔位置约束导致眼瞳箱缩小的缺陷，为沉浸式 AR/VR 设备提供了兼具大视场角、大眼瞳箱与高保真度的解决方案。

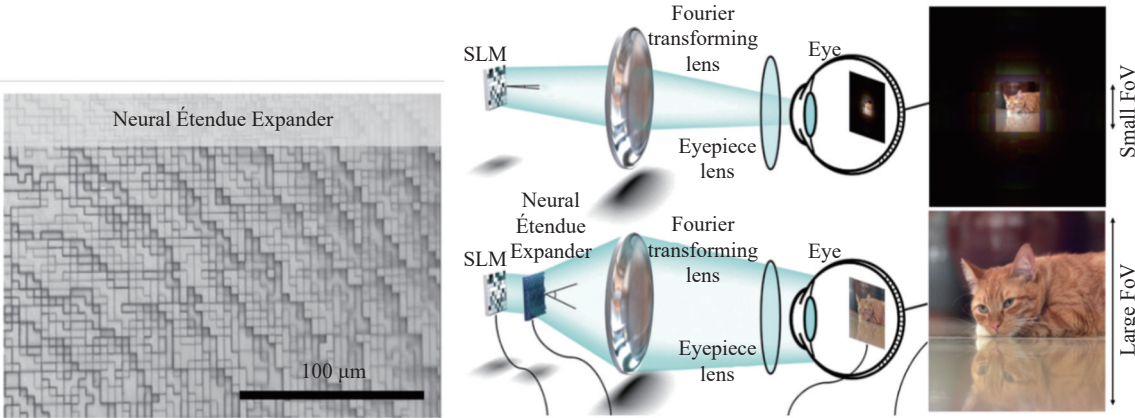


图 17 基于散射介质的静态式眼瞳箱扩展^[29]

Fig.17 Static eyebox expansion based on scattering medium^[29]

2.8 各技术路径发展前景分析

通过对上述 7 个技术路径的深入剖析，我们认为不同技术路径并非相互排斥，而是面向不同应用场景的并行选择。然而，从技术颠覆潜力和产业落地可行性两个维度综合判断，以下路径尤为值得关注：

a. 光源空分复用与散射介质的结合。传统的多光源系统需要极高的对准精度来避免图像串扰。而散射介质本身就是一个“混光器”，其对光源位置的不敏感性可以放松对多光源阵列的装配精度要求，降低制造难度和成本。这种技术路径结合有望以最低的硬件复杂度实现最佳的显示效果。

b. 光源时分复用与 HOE 的融合。对于 VR 等体积限制较小的设备，将 MEMS 激光扫描与 PSHOE^[46]等动态 HOE 技术相结合，能在保持较高性能(大 FoV、连续眼瞳箱)的同时，有效控制系统的复杂度和成本，是当前最有可能在高端 VR 产品中落地的技术路径之一。

3 总结与展望

本文系统梳理了全息近眼显示系统中扩展眼瞳箱的多种技术路径，将不同的眼瞳箱扩展技术进行了具体的分类，并且剖析了各类方法的原理以及优势与局限：基于算法的方法通过全息图复

用和优化算法(如离轴载波复用、瞳孔掩膜优化或高阶衍射级利用)在无额外光学元件下实现眼瞳箱扩展,但依赖复杂计算且有较高的计算载荷,难以实现实时全息显示;多光源照明方法利用多角度光源阵列和频谱调制打破 SLM 衍射角限制,扩展眼瞳箱的同时避免帧率损失,但其硬件复杂度高且需平衡光源间距和较高的对准精度;光源时分复用方法通过高速扫描照明实现连续眼瞳箱覆盖,但存在高速机械设备成本高昂、系统体积大和噪音问题;基于 HOE 的方法(如定制打印 HOE 或多焦点凹面镜 HOE)可实现波前调控和瞳孔复制,支持轻薄结构下的眼瞳箱扩展,但通常产生离散眼瞳箱且对轴向失配敏感或存在亮度不均问题;透镜阵列方法将眼瞳箱稀疏化或多视点整合,同时扩展视场角和眼瞳箱,降低了对准精度要求,但视点离散性可能影响连续观看体验;散射介质方法采用神经光展扩展器突破衍射角限制,实现全彩显示且对瞳孔位置鲁棒,但面临分辨率下降的问题。总体而言,这些方法在扩展眼瞳箱、平衡视场角和系统紧凑性方面取得进展,但仍面临计算负荷、硬件复杂性、眼瞳箱连续性或亮度均匀性等问题。所以,全息近眼显示的眼瞳箱扩展技术的研究应聚焦新型器件、算法、科学标准等方向,以寻求根本性突破。

a. 面向器件物理的智能驱动算法。

当前基于 HOE、散射介质等方案在眼瞳箱连续性、亮度均匀性方面存在固有局限。未来的器件创新应超越“被动记录”,走向“主动设计”。这包括探索超表面与 HOE 的混合器件来精确调控大角度、多波长光波。这些新型器件的潜力,亟需能与之同优化的智能控制算法来充分释放。

b. 破解核心瓶颈的智能计算与映射。

当硬件遇到瓶颈时,实现高效计算与智能算法突破是提高性能的核心。卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、Transformer 等深度学习模型,其核心价值在于建立从“目标显示效果”到“最优硬件驱动信号”之间的端到端非线性映射。例如从目标图像/光场到最优相位全息图。旨在用单一前向网络推理替代耗时的迭代算法,将全息图计算时间从秒级降至毫秒级,直接解决 2.1 节所述算法的“计算负载”问题。轻量化模型可部署于 FPGA 或专用 AI 芯片,甚至

可探索光学神经网络(optical neural network, ONN)将其部分计算在光域内以光速、零功耗完成,为实现移动平台上的实时全息显示提供核心算力。

c. 融合人因工效的科学评估体系。

需要建立一套超越传统峰值信噪比和结构相似性评价、融合人因工效学的科学评估标准。该体系应能量化评价视觉舒适度、疲劳度等主观体验,并将这些指标反馈给上述智能算法,作为其模型训练的损失函数,最终实现从“物理图像质量”到“感知视觉质量”的跨越。

综上所述,未来的突破在于三者的深度闭环:为新型器件设计专用的智能驱动算法,并采用反映真实用户体验的科学标准进行验证与迭代,从而系统性地攻克眼瞳箱扩展技术的核心难题。

参考文献:

[1] XIA X X, GUAN Y Q, STATE A, et al. Towards a switchable AR/VR near-eye display with accommodation-vergence and eyeglass prescription support[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019, 25(11): 3114–3124.

[2] CHANG C L, BANG K, WETZSTEIN G, et al. Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective[J]. *Optica*, 2020, 7(11): 1563–1578.

[3] 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.

[4] GOPAKUMAR M, LEE G Y, CHOI S, et al. Full-colour 3D holographic augmented-reality displays with metasurface waveguides[J]. *Nature*, 2024, 629: 791–797.

[5] WANG D, LI Y L, ZHENG X R, et al. Decimeter-depth and polarization addressable color 3D meta-holography[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 8242.

[6] SUI X M, HE Z H, CHU D P, et al. Non-convex optimization for inverse problem solving in computer-generated holography[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 158.

[7] PI D P, LIU J, WANG Y T. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 231.

[8] CHOI S, GOPAKUMAR M, PENG Y F, et al. Time-multiplexed neural holography: a flexible framework for holographic near-eye displays with fast heavily-quantized spatial light modulators[C]//ACM SIGGRAPH 2022 Conference Proceedings. Vancouver: Association for Computing Machinery, 2022: 32.

- [9] SHI L, LI B C, MATUSIK W. End-to-end learning of 3D phase-only holograms for holographic display[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 247.
- [10] SHI L, LI B C, KIM C, et al. Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks[J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 234–239.
- [11] CHAKRAVARTHULA P, TSENG E, SRIVASTAVA T, et al. Learned hardware-in-the-loop phase retrieval for holographic near-eye displays[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2020, 39(6): 186.
- [12] XIA X X, YANG F R, WANG W S, et al. Investigating learning-empowered hologram generation for holographic displays with ill-tuned hardware[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(6): 1478–1481.
- [13] PENG Y F, CHOI S, KIM J, et al. Speckle-free holography with partially coherent light sources and camera-in-the-loop calibration[J]. *Science Advances*, 2021, 7(46): eabg5040.
- [14] PENG Y F, CHOI S, PADMANABAN N, et al. Neural holography with camera-in-the-loop training[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2020, 39(6): 185.
- [15] WANG D, LI Z S, ZHENG Y, et al. Liquid lens based holographic camera for real 3D scene hologram acquisition using end-to-end physical model-driven network[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 62.
- [16] CHEN C, NAM S W, KIM D, et al. Ultrahigh-fidelity full-color holographic display via color-aware optimization[J]. *Photonix*, 2024, 5(1): 20.
- [17] ZHU R Z, CHEN L Z, XIAO J S, et al. Three-dimensional computer holography with phase space tailoring[J]. *Photonix*, 2024, 5(1): 34.
- [18] JANG C, BANG K, CHAE M, et al. Waveguide holography for 3D augmented reality glasses[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 66.
- [19] GOPAKUMAR M, KIM J, CHOI S, et al. Unfiltered holography: optimizing high diffraction orders without optical filtering for compact holographic displays[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(23): 5822–5825.
- [20] KIM J, GOPAKUMAR M, CHOI S, et al. Holographic glasses for virtual reality[C]//ACM SIGGRAPH 2022 Conference Proceedings. Vancouver: Association for Computing Machinery, 2022: 33.
- [21] CHOI S, GOPAKUMAR M, PENG Y F, et al. Neural 3D holography: learning accurate wave propagation models for 3D holographic virtual and augmented reality displays[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2021, 40(6): 240.
- [22] XIAO J S, ZHU R Z, ZHANG H. Holographic near-eye display with phase-space synthesis[C]//Optica Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2024 (DH). Paestum: Optica Publishing Group, 2024.
- [23] CHLIPALA M, MARTINEZ-CARRANZA J, IDICULA M S, et al. Eyebox expansion with accurate hologram generation for wide-angle holographic near-eye display[J]. *Optics Express*, 2023, 31(13): 20965–20979.
- [24] ZHANG H, XIAO J S, CHEN L Z, et al. Computer holography based on phase space analysis[C]//Digital Holography and 3-D Imaging 2022. Cambridge: Optica Publishing Group, 2022.
- [25] CHOLEWIAK S A, BAŞGÖZE Z, CAKMAKCI O, et al. A perceptual eyebox for near-eye displays[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 38008–38028.
- [26] LIU T J, NING H L, CAO H K, et al. Research progress of large viewing-area 3D holographic near-eye display[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(4): 2300641.
- [27] CHAKRAVARTHULA P, BAEK S H, SCHIFFERS F, et al. Pupil-aware holography[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2022, 41(6): 212.
- [28] 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.
- [29] LI K, LAKE A. Eyebox evaluation in AR/VR near-eye display testing[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 434–437.
- [30] HONG H. Fast measurement of eyebox and field of view (FOV) of virtual and augmented reality devices using the ray trajectories extending from positions on virtual image[J]. *Current Optics and Photonics*, 2020, 4(4): 336–344.
- [31] KUO G, WALLER L, NG R, et al. High resolution étendue expansion for holographic displays[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2020, 39(4): 66.
- [32] XIA X X, WANG W S, GUAN F, et al. Exploring angular-steering illumination-based eyebox expansion for holographic displays[J]. *Optics Express*, 2023, 31(19): 31563–31573.
- [33] CHOI S, JANG C, LANMAN D, et al. Synthetic aperture waveguide holography for compact mixed-reality displays with large étendue[J]. *Nature Photonics*, 2025, 19(8): 854–863.
- [34] HONG H. Novel method for the fast measurement of the three-dimensional range of the eyebox of a VR device[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(9): 752–758.
- [35] KUO G, SCHIFFERS F, LANMAN D, et al. Multisource holography[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2023, 42(6): 203.
- [36] TSENG E, KUO G, BAEK S H, et al. Neural étendue expander for ultra-wide-angle high-fidelity holographic display[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2907.
- [37] WANG Z, LV G Q, PANG Y J, et al. Lens array-based holographic 3D display with an expanded field of view and eyebox[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(21): 5559–5562.
- [38] CHOI M H, JU Y G, PARK J H. Holographic near-eye

- display with continuously expanded eyebox using two-dimensional replication and angular spectrum wrapping[J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 533–547.
- [39] JEONG J, LEE J, YOO C, et al. Holographically customized optical combiner for eye-box extended near-eye display[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38006–38018.
- [40] XIA X X, MA D Q, MENG X Y, et al. Off-axis holographic augmented reality displays with HOE-empowered and camera-calibrated propagation[J]. *Photonics Research*, 2025, 13(3): 687.
- [41] LEE E, JO Y, NAM S W, et al. Speckle reduced holographic display system with a jointly optimized rotating phase mask[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(19): 5659–5662.
- [42] JO Y, YOO D, LEE D, et al. Multi-illumination 3D holographic display using a binary mask[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(10): 2482–2485.
- [43] LI Y L, LI N N, WANG D, et al. Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 188.
- [44] SHI L, RYU D, MATUSIK W. Ergonomic-centric holography: optimizing realism, immersion, and comfort for holographic display[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(4): 2300651.
- [45] DASHDAVAA E, ERDENEBAT M U, KHUDERCHULUUN A, et al. Eyebox expansion of a lensless near-eye display using diverging spherical wave illumination and a multiplexed holographic optical element[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 181: 108380.
- [46] CHEN T, WANG Z, WANG Y, et al. Multiple viewpoints optimization for holographic near-eye display based on a pupil mask[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 179: 111400.
- [47] TAO Y Q, MI P F, MENG X Y, et al. Pupil-aware holographic display with continuous eyebox expansion under multi-angle illumination[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2025, 56(1): 707–710.
- [48] ZHANG L, LIU X, CHEN Q, et al. EyeBox: a toolbox based on python3 for eye movement analysis[J]. *Procedia Computer Science*, 2022, 201: 166–173.
- [49] LIN J F, FU Y J, CHEN Y, et al. Gaze-matching eyebox expansion in retinal projection augmented reality display[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2025, 33(7): 833–841.
- [50] SOHN Y J, YANG D. Spatial incoherence-driven optical reconstruction of holograms with observer shift-invariance[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 191.
- [51] YAN S F, ZHANG E Q, GUO J D, et al. Eyebox uniformity optimization over the full field of view for optical waveguide displays based on linked list processing[J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 38139–38151.
- [52] WANG Z, ZHANG X, LV G Q, et al. Conjugate wavefront encoding: an efficient eyebox extension approach for holographic Maxwellian near-eye display[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5623–5626.
- [53] SHI X L, LIU J, ZHANG Z Q, et al. Extending eyebox with tunable viewpoints for see-through near-eye display[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11613–11626.
- [54] CHANG C L, CUI W, PARK J, et al. Computational holographic Maxwellian near-eye display with an expanded eyebox[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 18749.
- [55] DASHDAVAA E, ERDENEBAT M U, KHUDERCHULUUN A, et al. Exit pupil replication using uniformized high-order diffractions for eyebox expansion in holographic near-eye displays[J]. *Optics Communications*, 2025, 591: 132191.
- [56] CHAO B, GOPAKUMAR M, CHOI S, et al. Large Étendue 3D holographic display with content-adaptive dynamic fourier modulation[C]//SIGGRAPH Asia 2024 Conference Papers. Tokyo: Association for Computing Machinery, 2024: 26.
- [57] ZHANG T T, WANG W S, ZHENG H D, et al. Portable augmented reality holographic near-eye display with an expanded eyebox[C]//Proceedings of SPIE, Holography, Diffractive Optics, and Applications XIV. Nantong: SPIE, 2024: 141–144.
- [58] KIM S B, PARK J H. Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyebox[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 767–770.
- [59] JANG C, BANG K, LI G, et al. Holographic near-eye display with expanded eye-box[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2018, 37(6): 195.
- [60] CHAE M, BANG K, YOO D, et al. Étendue expansion in holographic near eye displays through sparse eye-box generation using lens array eyepiece[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2023, 42(4): 58.

(编辑: 董 伟)