

增强现实抬头显示现状与展望

周婷[†], 乔文^{*†}, 华鉴瑜, 陈林森

苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006

摘要 驾驶员通常利用车载显示器和个人设备获取导航信息, 这种多界面信息交互容易分散对行车环境的注意力, 影响驾驶安全。随着汽车智能化的推进, 增强现实抬头显示(AR-HUD)通过将虚拟信息投影到远处, 并与真实的驾驶环境相融合, 大大提高了驾驶安全。回顾了AR-HUD技术, 主要包括单平面抬头显示、多平面抬头显示和3D抬头显示的发展现状。介绍了评价HUD性能的主要光学指标, 阐述了不同技术的基本原理和最新进展, 分析了现有技术面临的挑战, 最后总结了AR-HUD技术的未来发展方向。

关键词 抬头显示; 3D显示; 虚实融合

中图分类号 TN26; O438.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230490

Status and Prospect of Augmented Reality Head-Up Display

Zhou Ting[†], Qiao Wen^{*†}, Hua Jianyu, Chen Linsen

School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract Drivers usually use in-car displays and portable electronic devices to obtain navigation information. However, the focus transition between near distance and far distance distracts drivers' attention from the driving environment and affects driving safety. With the advancement of automobile intelligence, augmented reality head-up display (AR-HUD) projects virtual information to the distance. As a result, the physical driving environment is superimposed with virtual information, which considerably improves driving safety. The present study reviews the development of AR-HUD technology, including single-plane head-up display, multi-plane head-up display, and 3D head-up display. The key optical parameters that evaluate the HUD display is introduced. The working principles, state-of-the-art performances, and critical challenges of various technologies are highlighted. Finally, the potential future development of AR-HUD technology is discussed.

Key words head-up display; 3D display; virtual and real fusion

1 引言

汽车行业是世界大国经济的支柱产业之一, 在社会经济全局中的重要性逐渐提高。随着微型计算机的不断发展, 以电动化、智能化为代表的汽车产业百年变革逐步深化, 智能座舱成为汽车智能化发展的核心。研究表明, 驾驶员在行驶过程中, 目光离开前方路线超过 2 s, 相比正常的基线驾驶, 发生碰撞的风险至少增加 2 倍^[1]。道路环境变化莫测, 驾驶员的目光在车内近距离车辆行驶信息和车外远距离实时路况之间来回切

换时, 极易导致交通事故。此外, 汽车作为独立感知外部环境的智能体, 需要传递给驾驶员和乘客的信息丰富。车载辅助系统获取的汽车自身与周边环境的信息量高速增长^[2], 呈现方式繁杂多样。如图 1 所示, 车内多屏显示系统无法满足日益增长的驾驶舒适性、便捷性、交互性需求。抬头显示(HUD)系统应运而生, 通过将各类驾驶信息虚拟叠加在路况实景上, 驾驶员不用转头、低头就能看到关键数据, 从而使驾驶员始终保持抬头的姿态, 避免了目光切换引起的安全隐患^[3-6]。HUD有助于提升驾驶员的态势感知能力, 减少反应时

收稿日期: 2023-01-11; 修回日期: 2023-02-14; 录用日期: 2023-02-22; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3608200)、国家自然科学基金面上项目(61975140, 62075145)、江苏省重点研发项目(BE2021010)、江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20192003)、苏州市重点产业创新前瞻性应用研究项目(SYG201930)、江苏高校优势学科建设工程(PAPD)

通信作者: *wqiao@suda.edu.cn

[†] 共同第一作者

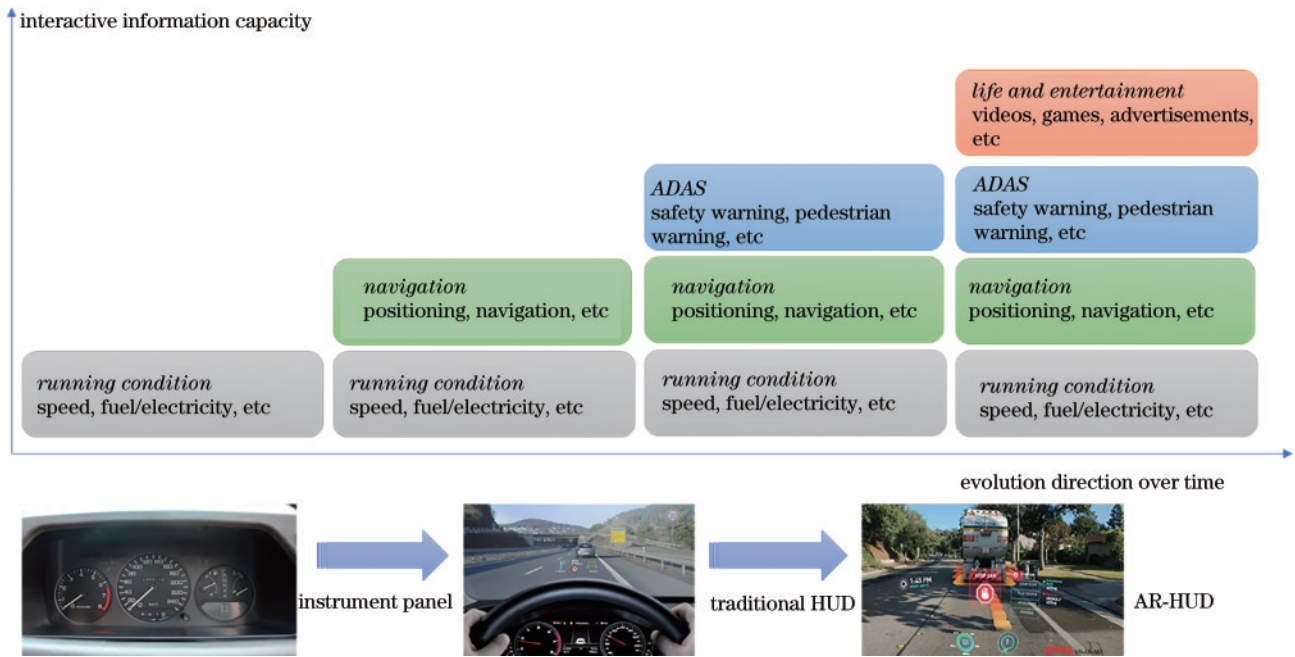


图 1 人机交互信息容量随时间变化过程

Fig. 1 Change process of human-computer interaction information capacity with time

间^[7-10],降低车辆发生碰撞的风险。抬头显示不仅仅是行车安全的守护者,更是元宇宙的车载硬件接口和人车信息交互终端。预计,HUD未来三年将持续保持65%以上增长速度,在2025年中国HUD市场规模将超过260亿元^[11]。

本文主要回顾增强现实抬头显示(AR-HUD)技术的最新进展,该技术按照不同的成像方式分为单平面抬头显示、多平面抬头显示和3D抬头显示3类,分别从基本原理、显示性能、面临挑战等方面进行概述,并对AR-HUD技术的发展进行了展望。

2 抬头显示的关键评价指标

视场角(FOV)、虚像距离(VID)、体积、3D景深等都是评价HUD光学特性的关键指标^[11-14],如图2所示。

FOV指的是驾驶员观察到虚拟图像的视野范围。

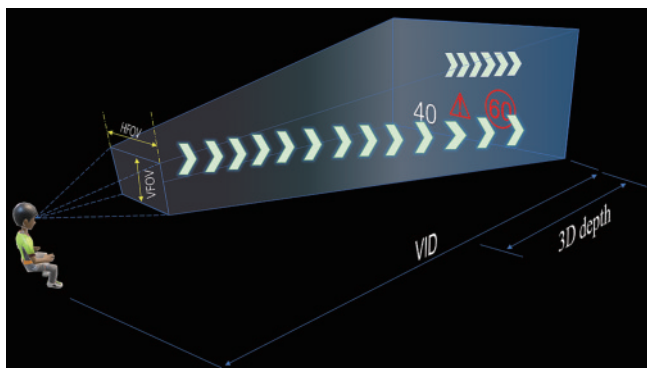


图 2 HUD系统光学特性的部分关键参数

Fig. 2 Main key parameters of optical characteristics of HUD system

在高速公路上行驶时,道路宽度约为3.5 m,为使显示信息叠加在两个车道的交通环境上(车辆行驶车道和左右相邻各半个车道),抬头显示的辅助驾驶系统界面水平视场角应该至少为20°^[15],如图3所示。然而,现有HUD技术所能实现的光学特性与实际需求存在巨大鸿沟。视野狭窄(10°×3°)是主要问题^[16],不能满足相邻车道信息提示需求,与高级驾驶辅助系统(ADAS)提供的驾驶辅助信息严重不匹配。

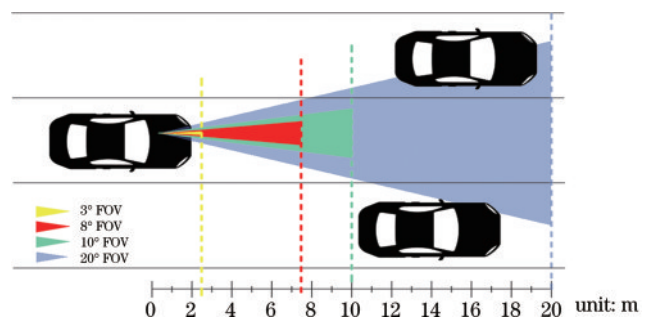


图 3 HUD不同光学特性对应的路况范围

Fig. 3 Range of road conditions corresponding to different display performances of HUD

VID是指透射的虚拟图像到人眼的距离。为使导航信息与道路实景有机融合,避免驾驶员目光远近切换,VID应至少大于10 m,理想情况大于20 m。虚像距离越远,投影尺寸越大,就能给驾驶员呈现更多的信息以增强互动性。传统的抬头显示系统的虚像距离短(2.5 m)^[17],和远处真实环境无法融合,所能呈现的信息量极少,信息显示较为集中,容易对驾驶员视线造成影响。扩大FOV和VID,来增大成像幅面,容纳更多信息,是实现车载级虚实融合交互显示的基础。

目前典型的汽车抬头显示光学特性如表 1 所示。如图 4 所示, HUD 经历了三轮技术发展: 直接反射式 HUD (C-HUD)、挡风玻璃式 HUD (W-HUD)、增强现实型 HUD^[18-21]。C-HUD 是放置于仪表台上方的一块独立光学面板, 因此 HUD 光学系统可进行独立设计与优化, 设计成本及难度较低, 安装便捷。受限于独立面板幅面, 显示区域小, 显示内容有限, FOV 和 VID 较小。更重要的, 显示屏位于车内, 驾驶员需要通过频繁的目光切换来获取显示屏信息和外界景物信息。基于以上弊端, 汽车厂商开始转向挡风玻璃式 HUD 和增强现实型 HUD。W-HUD 利用光学反射的原理, 在内外两层玻璃中间附上聚乙烯醇缩丁醛 (PVB) 薄膜夹层, 通过将挡风玻璃作为投影介质对投影信息进行显示。使用挡风玻璃作为投影介质, FOV 和 VID 较

C-HUD 都有了很大的提升。但其作为整车的部件, 开发成本与系统复杂性也大幅度增加了, 因此 W-HUD 现在还局限于中高端车型。AR-HUD 也是将挡风玻璃作为投影介质进行图像显示的, 但 AR-HUD 较 W-HUD 而言具有更大的 FOV 和 VID。AR-HUD 可以对导航信息、警示信息、娱乐信息等与真实道路进行融合, 实现人机交互, 极大地提升了驾驶安全性, 已经成为未来车载抬头显示系统的主要发展方向。

光学元件与系统构架决定了抬头显示系统的成像效果。AR-HUD 系统一般将图像生成单元的光线通过 2 块自由反射镜投射在挡风玻璃上, 为了实现更大的 FOV 和 VID, 根据光学可逆原理, 需要不断增加反射镜的尺寸。因此当前车载抬头显示系统的关键问题之一是解决 FOV、VID 和体积的天然矛盾。



图 4 三种 HUD 原理^[18]。(a)C-HUD; (b)W-HUD; (c)AR-HUD

Fig. 4 Three HUD principles^[18]. (a) C-HUD; (b) W-HUD; (c) AR-HUD

表 1 不同 HUD 技术的光学性能对比

Table 1 Comparison of optical performances of different HUD technologies

Parameter	C-HUD ^[22]	W-HUD ^[23]	AR-HUD ^[24]
FOV / [(°)×(°)]	5.54×1.85	7×3	10×4
VID / m	1.6-1.8	2.3-5	4.5-8
Resolution / (pixel×pixel)	480×240	800×480	1280×640
Volume / L	3-5	5-8	8-2

多个虚像深度平面或 3D 景深是另一个 HUD 的重要光学指标。直观上, 至少需要 2 个虚拟深度平面: 2~5 m 近处的深度平面, 用于呈现车速、油量等行车状态信息; 10 m 或更远处的虚拟平面, 用于呈现导航信息。有机分离的虚拟信息提高了信息呈现的有效性和流畅性。此外, 车外自然景物是三维的, 具有不同深度。理想的 HUD 系统应能提供与自然景物深度距离匹配的虚拟信息。然而现在的抬头显示系统的虚像平面缺乏深度感^[25-27], 导致驾驶员需要转换焦距来感知实景和虚像, 无法集中注意力^[28]。所以在不增加系统体积的情况下, 扩大视场角和虚像距离范围, 实现真正的 3D 景深效果, 已成为新型抬头显示系统的主要研究方向。

3 单平面成像抬头显示

基于自由曲面反射镜的抬头显示系统逐渐成熟^[29-33], 并进入商用市场。2021 年, 一种新型的 AR-HUD 系统利用离轴自由曲面镜矫正不对称像差, 将虚

拟图像与真实信息相结合, 在 2.8 m 虚像距离处获得了 11 inch (1 inch=2.54 cm) 尺寸的虚拟图像^[34]。得益于自由曲面光学元件, AR-HUD 光学特性较 W-HUD 有了较大提升, 如表 2 所示, 视场角为 10°×5°, 虚像距离为 10 m, 然而, 其体积高达 25 L 以上, 成为车辆安装的重要拦路虎。大众公司采用双层显示图像, 远处 (10 m) 显示导航信息, 近处 (3 m) 显示车速和车辆信息。此外, 如需要进一步扩大 FOV 或提高 VID, 系统体积需进一步增大。受离轴反射镜组光学原理限制, FOV、VID 与系统体积形成一组矛盾体, 顾此失彼, 无法兼得, 制约了该技术的发展。

表 2 AR-HUD 的典型光学特性

Table 2 Typical optical characteristics of AR-HUD

Car manufacturer	FOV / [(°)×(°)]	VID / m	Volume / L
Mercedes-Benz, Porsche ^[35-36]	10×5	10	25+
Volkswagen ID3/4 ^[37]	9×4/7×1	10/3	14+
Lincoln ^[38-39]	10×2.5	15-20	

利用空间光调制器 (SLM), 可以实现更高显示效率、低功耗的 AR-HUD^[40-43]。为解决系统分辨率、视场角和体积的制约问题, 引入相位型空间光调制器矫正大视场的像差^[44]。在相干光照明下, 矫正像差后的数字全息图可提升 HUD 系统的图像质量。该方法与中心凹成像思想结合, 在人眼凝视方向提供相对高分辨率的图像。搭建的 HUD 系统体积小于 2 L, 视场角为 11°×4°, 虚像距离为 2 m, 如图 5 所示。

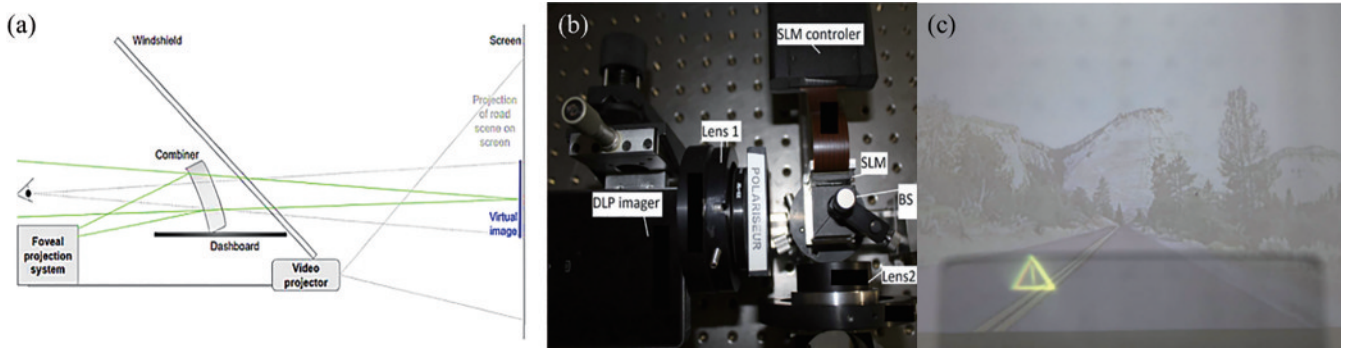


图 5 基于 SLM 的单平面 AR-HUD^[44]。(a) 中央凹成像抬头显示系统；(b) 中央凹成像抬头显示系统的光学部分实验装置；(c) 中央凹成像抬头显示系统的实验效果

Fig. 5 SLM-based single plane AR-HUD^[44]. (a) Schematic of foveal imaging head-up display system; (b) optical part experimental device of foveal imaging head-up display system; (c) experimental result of foveal imaging head-up display system

光波导器件省去多级反射镜结构, 可在较薄的光波导中实现传播和放大, 大幅减小 HUD 体积, 实现大视场角和远距离成像。光波导器件主要包括阵列波导器件、浮雕结构器件和全息光波导器件, 如图 6 所示。基于阵列光波导的抬头显示系统使用微米级反射式棱镜结构作为耦合光学元件, 通过调节微棱镜阵列区域中微棱镜排列周期, 控制反射出波导的光束能量, 进而实现光束沿传播方向一维出瞳扩展。这种抬头显示系统具有视场角大、成像均匀等优点, 但阵

列波导结构工艺制作成本高^[45-46]。2022 年, 李熠琳等^[47]提出一种基于反射式微棱镜阵列的波导增强现实抬头显示系统, 如图 7(a) 和图 7(b) 所示, 采用微棱镜阵列作为耦合和耦出元件, 减小了波导体积。通过调节微棱镜排列周期, 实现 4 倍一维出瞳扩展。视场角为 $10^{\circ} \times 5^{\circ}$ 、眼盒范围为 $130 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 内、观察距离为 500 mm 的情况下, 仿真获得的各视场照度均匀度大于 64% , 如图 7(c) 和图 7(d) 所示, 系统总体积小于 6.5 L 。

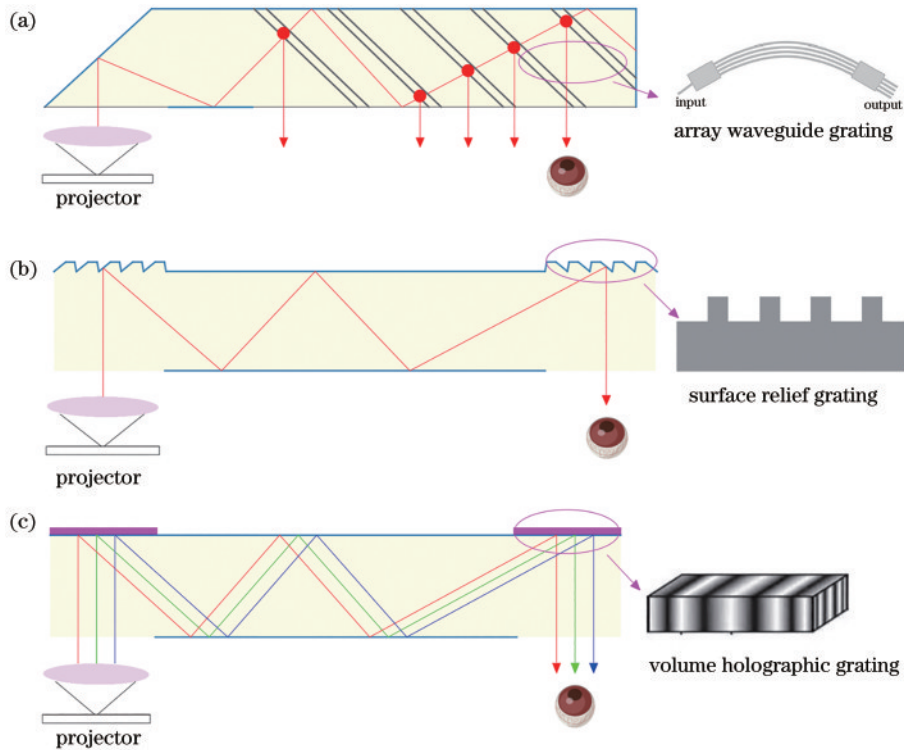


图 6 基于光波导的 HUD 光学原理。(a) 基于阵列波导光栅的抬头显示系统原理；(b) 基于表面浮雕光栅的抬头显示系统原理；(c) 基于体全息光栅的抬头显示系统原理

Fig. 6 Schematic of HUD optical principle based on optical waveguide. (a) Principle of head-up display system based on arrayed waveguide grating; (b) principle of head-up display system based on surface relief grating; (c) principle of head-up display system based on volume holographic grating

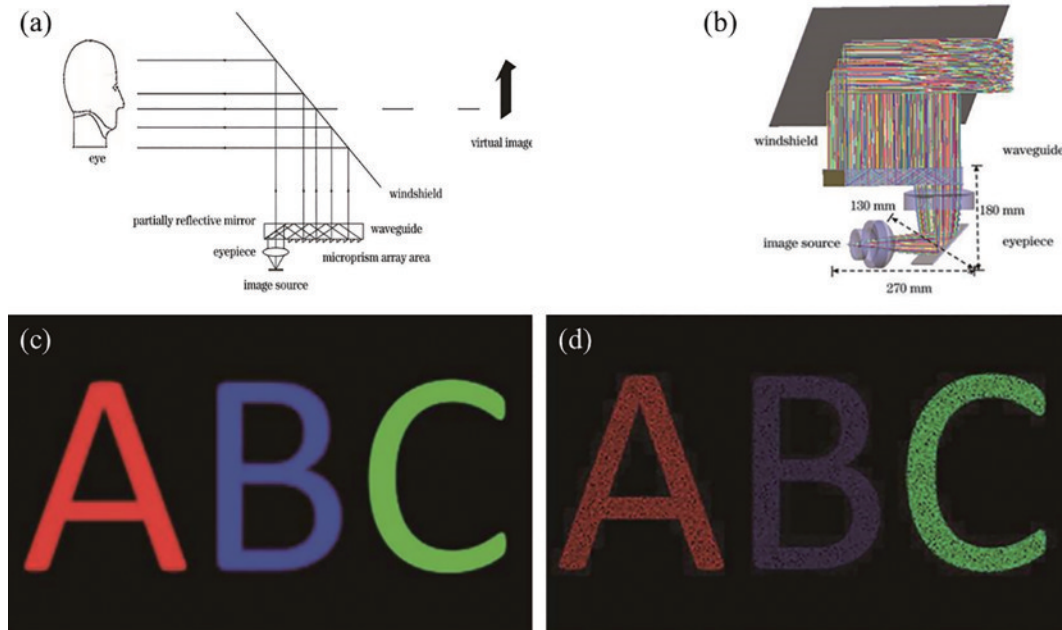


图7 基于阵列波导的单平面AR-HUD^[47]。(a)基于微棱镜阵列的波导增强现实抬头显示系统的原理;(b)基于微棱镜阵列的波导增强现实抬头显示系统的整体结构;(c)系统测试原图;(d)基于微棱镜阵列的波导增强现实抬头显示系统的成像效果
 Fig. 7 Single plane AR-HUD based on array waveguide^[47]. (a) Schematic of the principle of waveguide augmented reality head-up display system based on microprism array; (b) schematic of the overall structure of waveguide augmented reality head-up display system based on microprism array; (c) original drawing of system test; (d) imaging effect of waveguide augmented reality head-up display system based on microprism array

体全息光学元件(HOE)利用两束相干光照照明光敏薄膜,基于双光束干涉记录光场相位,在光敏薄膜上形成折射率周期性调制分布。HOE是增强现实显示、透明显示等领域非常重要的光子器件。HOE是一种体全息图,可有效调控光场,实现透镜、匀光器、透镜阵列等器件功能。波长选择性和角度选择性还赋予了HOE较高的效率和高透明度,使HOE非常适合用于抬头显示应用^[48]。

WayRay公司提出在弯曲的挡风玻璃中间集成HOE薄膜的方法^[49],该方法利用角度选择性和波长选择性的特点,实现窄带波长光线反射、其余宽光谱范围内透射的虚实融合功能。与作为半反射镜的挡风玻璃相比,HOE的偏转角度和光功率可以根据记录方法进行控制,因此它具有更大的设计自由度,并且可以减小投影部件的尺寸,扩大FOV。

基于表面浮雕光栅和HOE的光波导的原理类似。利用表面浮雕光栅或HOE的衍射效应改变光线的传播方向,光线进行一系列传播之后,耦出波导进入人眼。2018年,DigiLens公司和大陆集团合作,提出了一种基于可切换布拉格光栅(SBG)的全息光波导虚实融合抬头显示系统^[48],该系统具有体积小、衍射效率高优点。通过混合光聚合物和液晶制作新型全息材料(reactive monomer liquid crystal mix, RMLCM),设计了“主动式”可切换布拉格光栅,可利用在光波导两侧施加电压的方式来改变液晶分子方向,从而实现折射率的调制。该显示系统使用3个波导耦合不同波长的

光束,将满足布拉格条件的光以一定的角度传输出去,从而在挡风玻璃上叠加形成三色图像,最终实现的彩色虚拟图像视场角可达 $15^\circ \times 5^\circ$,如图8(a)~(c)所示。为进一步提升FOV,可增加全息光波导面积,而投影光机体积不受影响。因此,基于光波导的HUD打破了FOV、VID和体积的固有矛盾,为体积极度受限的车载应用提供超大FOV的技术途径。此外,也可设计与制备带有屈光度的耦入或耦出全息器件进一步提升FOV^[50-51],带有屈光度的人射全息图使水平和垂直方向出瞳分别放大了 $1.9 \times$ 和 $1.6 \times$,视场角为 $24^\circ \times 12.6^\circ$,观察距离仅114 mm^[50],如图8(d)~(f)所示。利用曲面全息光波导结构,也可扩大FOV,补偿系统像差,减小体积^[52-53]。

进一步地,为了分别给驾驶员和乘客提供互不干扰的驾驶辅助信息,利用体全息光波导可实现双视图HUD^[54]。该系统由1个图像生成单元和1个全息光波导构成。其中图像生成单元由小型激光投影仪和匀光器件构成,用来生成目标图像并将其耦入全息光波导。基于波长和角度复用的两个体全息光栅利用波长和角度选择性,使驾驶员和乘客分别看见绿色和蓝色光源展示的不同信息,并同时看见红色光源展示的警报信号。该系统分别为驾驶员和乘客提供的视场角为 $10^\circ \times 5^\circ$ 和 $8^\circ \times 4^\circ$,眼盒范围为 $147 \text{ mm} \times 81 \text{ mm}$ 和 $105 \text{ mm} \times 87 \text{ mm}$,具有质轻体薄的优点。

光波导HUD展现了在有限体积下获得大FOV和VID的光明前景,已成为重要研究热点^[55]。然而,光波

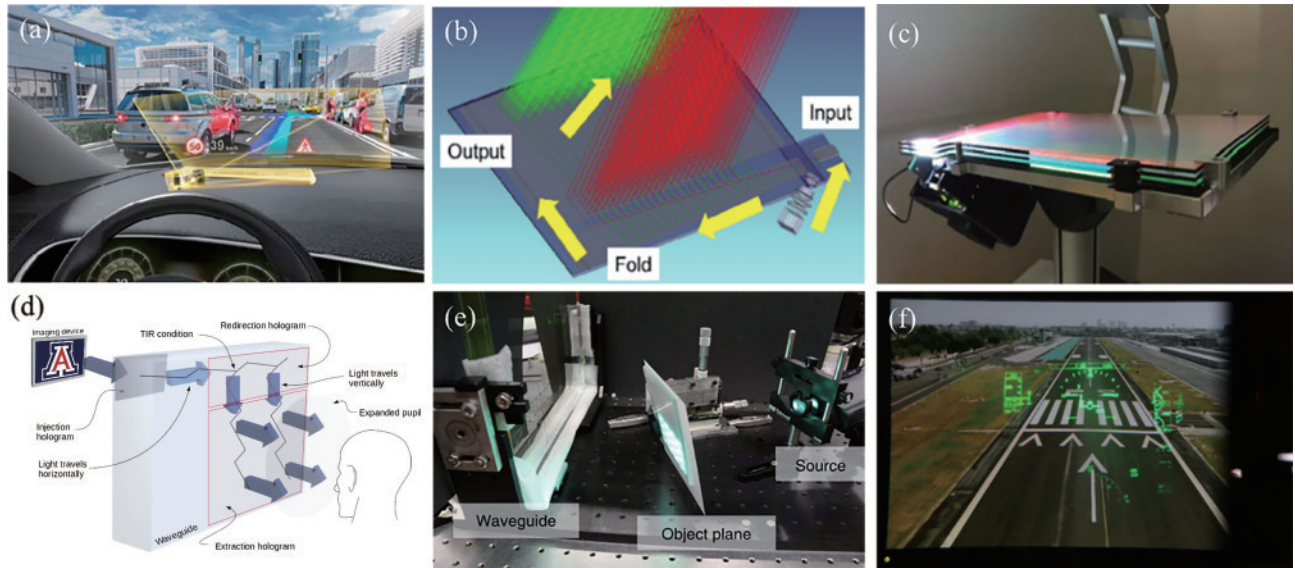


图 8 基于体全息单平面 AR-HUD。(a) 大视野增强现实抬头显示器的效果^[48]；(b) 基于 SBG 的全息光波导抬头显示系统的原理^[48]；(c) 基于 SBG 的全息光波导抬头显示系统的实验装置^[48]；(d) 基于体全息抬头显示系统的原理^[50]；(e) 基于体全息抬头显示系统的实验装置^[50]；(f) 基于体全息的抬头显示系统的实验效果^[50]

Fig. 8 Single plane AR-HUD based on volume holography. (a) Effect of large field-of-view augmented reality head-up display^[48]; (b) principle of SBG-based holographic optical waveguide head-up display system^[48]; (c) experimental device of holographic optical waveguide head-up display system based on SBG^[48]; (d) principle of head-up display system based on volume holography^[50]; (e) experimental device of head-up display system based on volume holography^[50]; (f) experimental rendering of head-up display system based on volume holography^[50]

导 HUD 对结构设计与制备提出了新的挑战。以全息光波导为例,在出瞳距离(1 m)、眼盒范围(130 mm×50 mm)一致的情况下,提升 FOV 需要更大的衍射波导面积。表 3 给出了光波导型 HUD 所需最小耦出光栅面积与 FOV 的对应关系。大幅面全息光波导和浮雕光波导对材料或制备的一致性和保真度提出了极高要求。此外,光波导式 HUD 的光效率常常低于自由反射镜式 HUD。考虑到 HUD 对显示亮度有比较苛刻的要求(大于 10000 cd/m²),不可避免地提升图像引擎亮度和系统功耗。

表 3 光波导型 HUD 所需耦出光栅面积与 FOV 的对应关系
Table 3 Corresponding relationship between area of the coupling grating required by the optical waveguide HUD and the FOV

FOV / [(°)×(°)]	Area of the coupling grating / (mm×mm)
10×5	304.98×137.32
15×7	393.30×172.33
20×10	482.65×224.98

4 多平面成像抬头显示

单焦面抬头显示系统将所有的信息都呈现在一个平面,容易造成混淆。例如,驾驶员注视路面实况时,始终清晰的仪表盘数据会干扰驾驶员的注意力并遮挡路面状况。为更灵活方便地呈现日益丰富的行驶信

息,具有多深度虚拟平面的抬头显示系统日益受到研究工作者关注^[56-59]。

在基于离轴自由反射镜的 HUD 系统构架中,可通过多个图像生成单元实现多个深度平面,其代价是系统复杂度提升和系统体积增大^[60-61];或通过物理分割单个图像生成单元,也可实现多个深度平面,其代价是空间分辨率降低^[62]。2019 年, Qin 等^[62]将一块 6.6 cm 尺寸 LCD 屏幕分为 2 个区域,如图 9(a)所示,生成了 VID 为 9 m 和 2.5 m 的两个虚拟图像,视场角分别为 10°×3°和 6°×2°,体积为 8.5 L,如图 9(b)~(d)所示。此外,利用激光无焦特性,激光扫描方法也可方便地分离远近两个深度平面^[63-64]。

在一个光学系统中,通过改变光学元件相对位置,可改变成像距离^[65]。使用动态变焦组件是多焦平面显示的另一个解决方案^[66]。液体透镜通过改变界面型貌,可大范围动态调控光学屈光度,从而调控虚像距离^[67-68]。引入新型光子器件,如利用 Pancharatnam-Berry phase optical elements (PBOEs) 的光学可调谐性、偏振选择性等优点,也可实现 AR-HUD 显示系统^[69-70]。

基于动态调整空间光调制器(LCoS 等),在不引入任何机械运动部件的条件下,可调节投影图像位置。Mu 等^[71]提出一种新型抬头显示系统,该系统将相位型硅上液晶和反射镜结合,如图 10(a)所示,可在 3~30 m 区域连续调节深度,如图 10(b)~(d)所示。具有动态深度变化的全息图像通过凹面镜成虚拟放大的

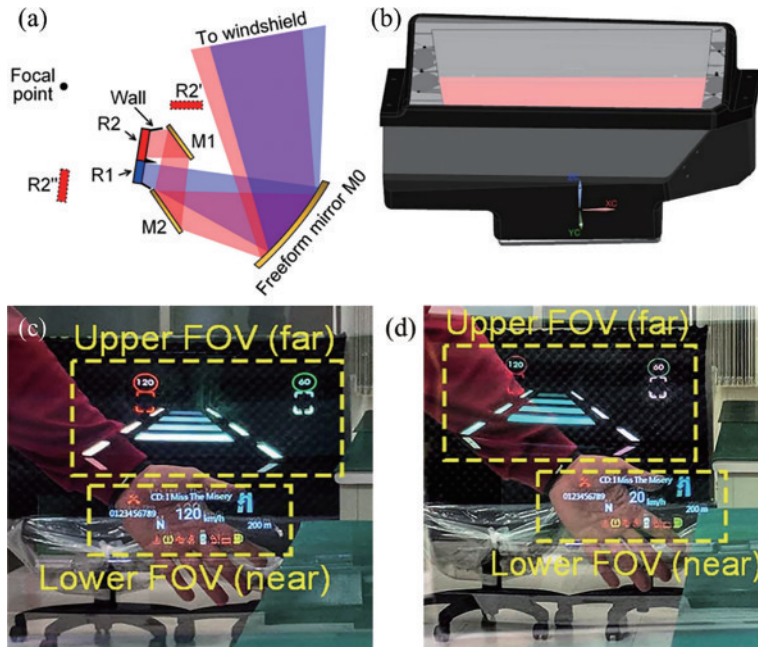


图 9 基于自由反射镜的多平面 AR-HUD^[62]。(a) 基于单个图像生成单元的抬头显示系统的原理；(b) 基于单个图像生成单元的抬头显示系统的原型；(c) 基于单个图像生成单元的抬头显示系统的近距离显示效果；(d) 基于单个图像生成单元的抬头显示系统的远距离显示效果

Fig. 9 Multi plane AR-HUD based on free mirror^[62]. (a) Principle of head-up display system based on a single image generation unit; (b) head-up display prototype based on a single image generation unit; (c) close display effect of head-up display system based on a single image generation unit; (d) remote display effect of head-up display system based on a single image generation unit

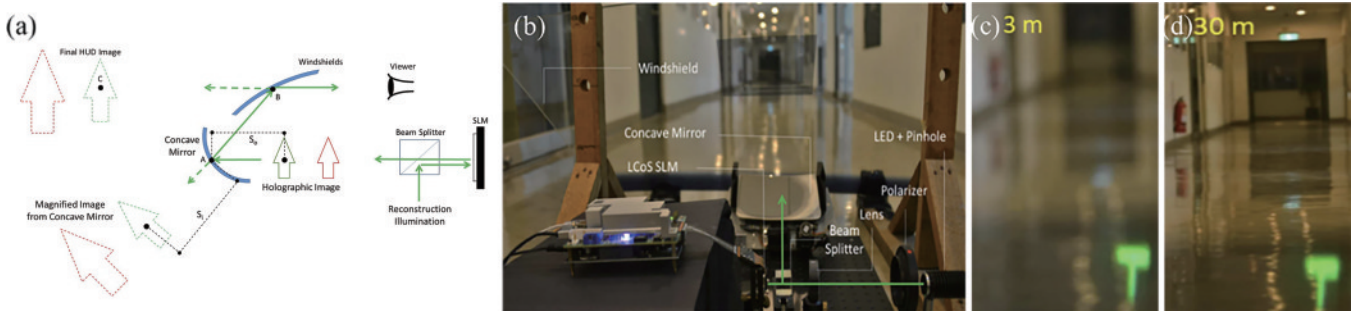


图 10 基于 SLM 的多平面 AR-HUD^[71]。(a) 基于 SLM 的抬头显示系统的原理；(b) 基于 SLM 的抬头显示系统的原型；(c) 基于 SLM 的抬头显示系统在 3 m 处的实验效果；(d) 基于 SLM 的抬头显示系统在 30 m 处的实验效果

Fig. 10 Multi plane AR-HUD based on SLM^[71]. (a) Principle of head-up display system based on SLM; (b) Head-up display system prototype based on SLM; (c) experimental rendering of head-up display system based on SLM at 3 m; (d) experimental rendering of the head-up display system based on SLM at 30 m

像,最终通过挡风玻璃传输到人眼。在该系统中,显示图像大小、分辨率和视场角受 SLM 像素数和像素大小限制。

利用 2 块具有不同屈光度或者光学特性的 HOE,可获得多个深度平面图像。例如,利用全息透镜和全息光栅的组合,可实现远近两个虚拟图像^[72],如图 11(a)~(d)所示;或利用全息透镜和全息匀光器件的组合,可实现具有实像-虚像双模式的多平面 AR-HUD 系统^[73],如图 11(e)所示。具有实像-虚像双模式的多平面 AR-HUD 系统虚拟图像成像距离为 5 m,实像和虚像区域视场角分别为 $10^{\circ} \times 4^{\circ}$ 和 $8^{\circ} \times 4^{\circ}$,透过率分别为 50.25% 和 78.85%,眼盒范围分别达 $492 \text{ mm} \times 560 \text{ mm}$

和 $123 \text{ mm} \times 86 \text{ mm}$,如图 11(f)和图 11(g)所示。2021 年, Lü 等^[74]提出了一种基于三堆叠 HOE 的多平面 AR-HUD 系统。堆叠放置的红绿蓝三波长 HOE 具有不同屈光度,能分别将红绿蓝显示图像投影至 150 cm、500 cm 和 1000 cm 距离处,FOV 和眼盒范围分别为 $12^{\circ} \times 10^{\circ}$ 和 $9.5 \text{ cm} \times 11.2 \text{ cm}$,具有体积小、亮度高、成像距离远等优点。

当基于新型光子器件的 HUD 系统从前沿研究向产业应用转换时,不同程度地遇到材料稳定性、光学器件幅面一致性、随角度变化的色偏特性等问题。由于车基系统对环境耐受性有苛刻要求,需更多工程化角度的考虑和研究。

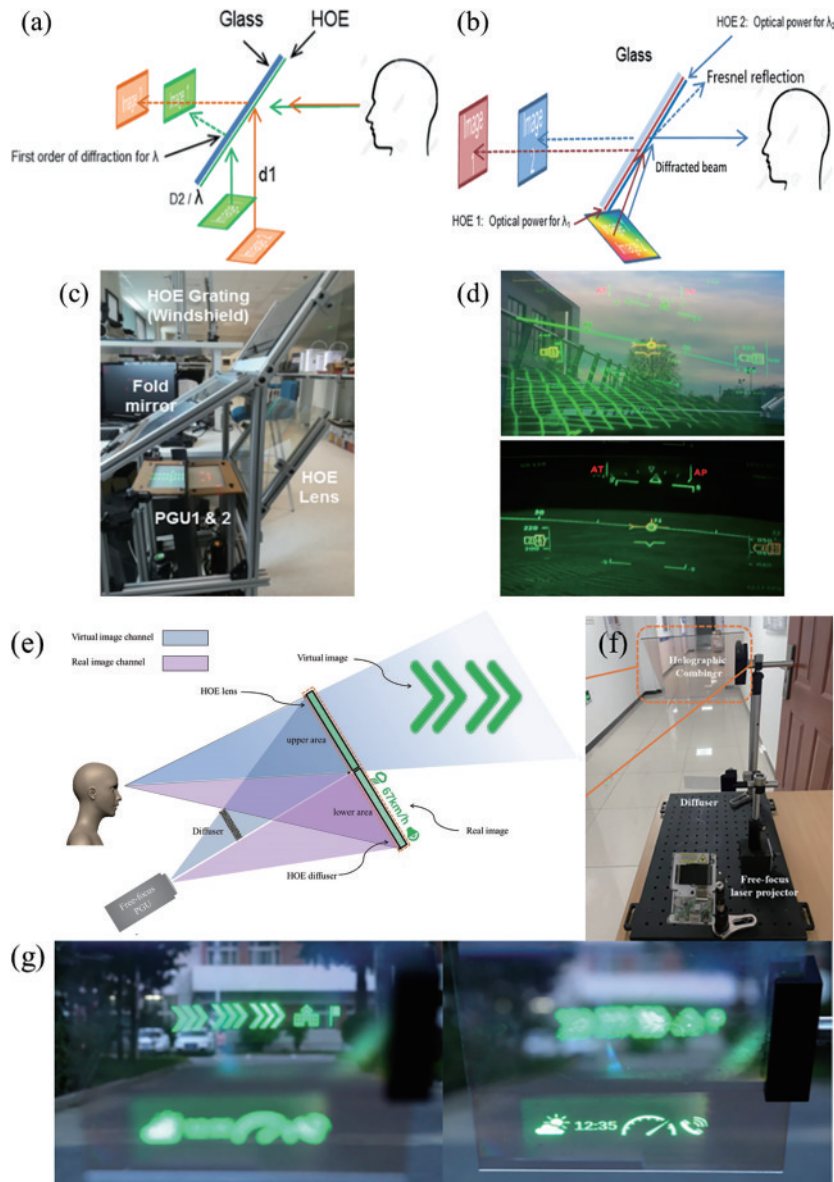


图 11 基于 HOE 的多平面 AR-HUD。(a) 使用 HOE 角度选择性的多平面 HUD 的原理^[72]；(b) 使用 HOE 波长选择性的多平面 HUD 的原理^[72]；(c) 基于体全息的双深度抬头显示系统的原型^[72]；(d) 基于体全息的双深度抬头显示系统的显示效果^[72]；(e) 具有真实-虚拟双模式的增强现实抬头显示系统的原理^[73]；(f) 具有真实-虚拟双模式的增强现实抬头显示系统的原型^[73]；(g) 具有真实-虚拟双模式的增强现实抬头显示系统的显示效果^[73]

Fig. 11 HOE-based multiplanar AR-HUD. (a) Principle of multi plane HUD using HOE angle selectivity^[72]; (b) principle of multi plane HUD using HOE wavelength selectivity^[72]; (c) prototype of double depth head-up display system based on volume holography^[72]; (d) display effect of double depth head-up display system based on volume holography^[72]; (e) principle of augmented reality head-up display system with real-virtual dual mode^[73]; (f) prototype of real-virtual dual mode augmented reality head-up display system^[73]; (g) display rendering of real-virtual dual mode augmented reality head-up display system^[73]

5 3D 抬头显示

多平面抬头显示仍具有有限个深度图像屏幕, 无法实现不同景深的自然转换。将抬头显示与三维显示结合, 实现虚拟三维图像与自然景物融合的 3D-HUD 系统是抬头显示发展的必然趋势。3D-HUD 系统可及时更新车辆运行状况, 并将反映车辆运行状况的各类信息投射至不同景深, 有利于驾驶员对虚实融合动态信息的准确把控。

3D-HUD 的一个技术路径是将现有 HUD 投影引擎构架与已有裸眼 3D 显示方法结合。根据视角产生器件, 光场显示技术主要有: 视差屏障、柱透镜阵列、时空复用、集成光场、压缩光场和向量光场等^[75-84]。2020 年, 三星公司提出了一种 AR-3D-HUD 系统^[85], 如图 12(a) 所示。该系统由眼球跟踪系统、基于柱透镜阵列的 LCD 显示模块、自由曲面反射镜组组成。裸眼 3D 景象由双目视差产生, 串扰小于 1.5%。该系统与现有 AR-HUD 系统极大兼容, 视场角为 $10^\circ \times 5^\circ$,

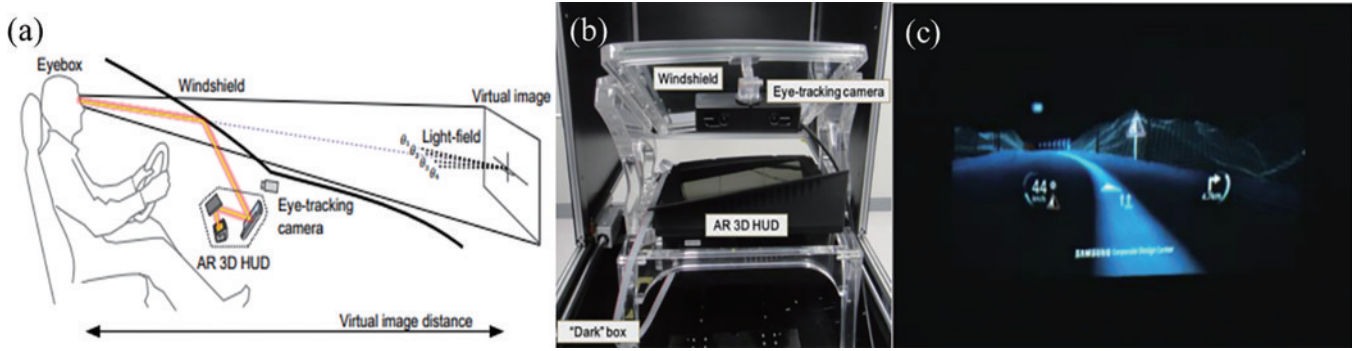


图 12 基于几何元件的 AR-3D-HUD^[85]。(a) 光场虚拟投影抬头显示系统的原理；(b) 光场虚拟投影抬头显示系统的原型；(c) 光场虚拟投影抬头显示系统的显示效果

Fig. 12 AR-3D-HUD based on geometric elements^[85]. (a) Principle of light field virtual projection head-up display system; (b) prototype of light field virtual projection head-up display system; (c) display effect of light field virtual projection head-up display system

如图 12(b) 和图 12(c) 所示, 基于眼球跟踪, 分辨率损失小。自由曲面矫正挡风玻璃畸变小、像差小、串扰低, 有可能成为 3D-HUD 的主流方案。此外, 视差屏障、微透镜阵列等器件与投影系统结合, 也可实现 3D-HUD^[86]。在车载环境下, 驾驶员的位置相对固定, 眼球跟踪系统常用于 3D-HUD, 优化显示效果。2021 年, Kang 等^[87] 提出一种新的瞳孔跟踪系统, 优化了瞳孔跟踪过程, 该系统能适应驾驶过程中头部姿势变化, 解决戴太阳镜导致的眼睛遮挡等问题。

计算全息技术 (CGH) 针对目标光场, 通过计算机

对光的相位或振幅进行解算, 再输入空间光调制器对光的相位或者振幅进行调制。使用相干光对 SLM 进行照射, 即可生成可刷新的动态全息 3D 图。由于 CGH 能在任意焦平面成像, 所以引起众多研究团队和企业的兴趣^[88-90]。

2022 年, Seereal 公司介绍了基于计算全息 3D-HUD 方案^[91], 通过消除散斑噪声, 减少挡风玻璃重影。最终展示了一个视场角为 $5^\circ \times 3^\circ$, 在 1.9~4.5 m 具有连续深度的原型样机, 如图 13(a)~(c) 所示。全息 HUD 被认为是理想的 3D 虚拟图像生成方法, 其显示

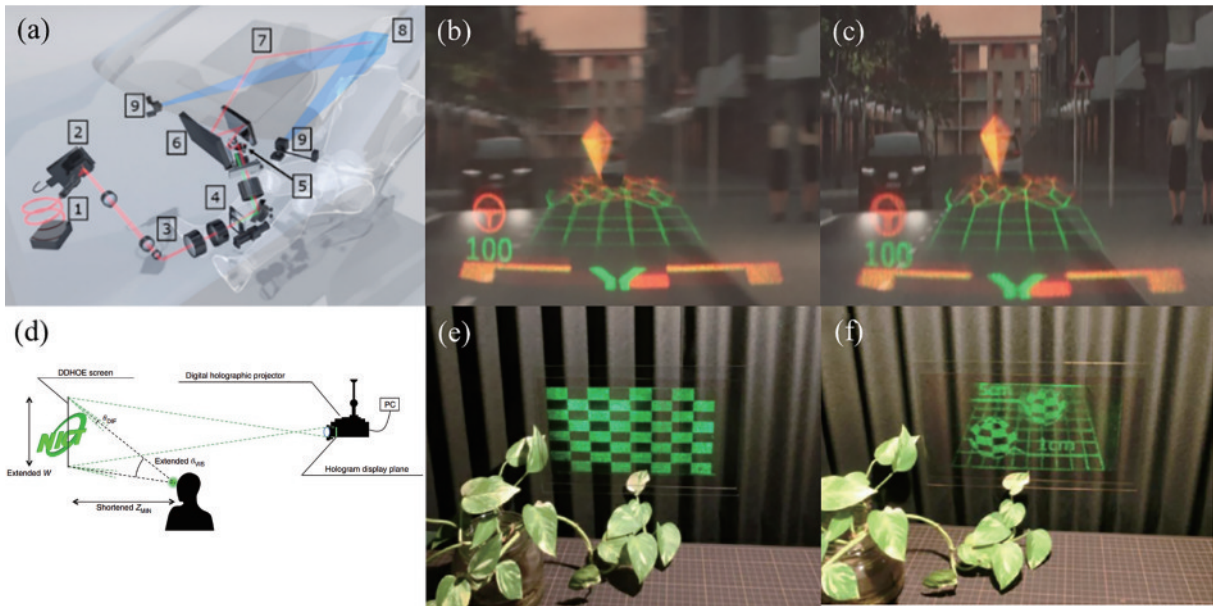


图 13 基于体全息 AR-3D-HUD。(a) Seereal 公司介绍的 AR-HUD 原型^[91]; (b) Seereal 公司介绍的 AR-HUD 在 1.9 m 距离处的显示效果^[91]; (c) Seereal 公司介绍的 AR-HUD 在 4.5 m 距离处的显示效果^[91]; (d) 投影型全息 3D 显示系统的原理^[92]; (e) 投影型全息 3D 系统通过重建在目标观察点观察到的棋盘^[92]; (f) 在全息屏幕后 1 cm 和 5 cm 处用两个方格重建的三维场景^[92]

Fig. 13 AR-3D-HUD based on volume holography. (a) AR-HUD prototype introduced by Seereal corporation^[91]; (b) display effect of AR-HUD introduced by Seereal corporation at 1.9 m distance^[91]; (c) display effect of AR-HUD introduced by Seereal corporation at 4.5 m distance^[91]; (d) principle of projection holographic 3D display system^[92]; (e) chessboard reconstructed by projection holographic 3D system observed at the target observation point^[92]; (f) three-dimensional scene reconstructed with two squares at 1 cm and 5 cm behind the holographic screen^[92]

效果提升,严重依赖 SLM 的进一步发展。为解决 SLM 的空间带宽积限制,将 HOE 和全息投影技术结合^[92],显示尺寸放大了 2 倍,FOV 放大了 6 倍,如图 13(d)~(f)所示。目前,彩色动态全息 HUD 尚不能满足高速驾驶需求。

透明 3D 显示的部分研究进展也对 3D-HUD 应用有借鉴作用^[93]。基于稀疏排布的像素化微纳结构阵列,对光场视角进行重构,实现了透明度为 75%、视场角为 47°的 32 inch 的 3D 显示效果^[94]。进一步地,利用 HOE 记录像素化微纳结构矩阵器件,实现了衍射效率高达 78.59%、透过率为 80% 的透明 3D 显示^[95]。该系统具有高光效、高透过率、无视觉疲劳等优点,在抬头显示方向有潜在的应用前景。

综上,根据投影虚像平面数目,本文依次介绍了

单平面、多平面和立体抬头显示技术,具体参数如表 4 所示。基于自由曲面反射镜的 AR-HUD 由于视场角大、易于实现等优点最早得到应用。为满足车载虚实融合交互需求,研究工作者通过引入新材料、新器件或新方法进一步提升 FOV,减小系统体积,或扩大 VID 范围。基于光波导的 AR-HUD 取代传统的多层自由反射镜结构,让光束在光波导内传播,在增大 FOV 和 VID 的情况下减小系统体积,成为有望实现产业应用的下一代 AR-HUD 技术。HOE 可有效调控复杂光场,波长选择性和角度选择性还赋予了 HOE 较高的效率和透明度,是 HUD 领域重点关注的光学功能材料。计算全息技术可在较小体积下对光场进行实时调控与重构,是 3D-HUD 重要发展方向。

表 4 抬头显示技术的主要参数

Table 4 Typical parameters of head-up display

Technology	Technical classification	FOV /[(°)×(°)]	VID /m	Volume /L
Single plane head-up display	Free-form reflector ^[35-36]	10×5	10	25+
	Arrayed waveguide ^[47]	10×5	infinity	6.5-
	Volume holography ^[50]	24×12.6		
Multi plane head-up display	Free-form reflector ^[62]	6×2/10×3	2.5/9	8.5
	Spatial light modulator ^[71]		3-30	
	Holographic element ^[73]	8×4/10×4	5/in plane	
3D head-up display	Lenticular lens array ^[85]	10×5		
	Computer-generated hologram ^[91]	5×3	1.9-4.5	

6 结论及展望

元宇宙技术的快速兴起促使 AR-HUD 技术持续发展。作为增强现实终端,在新的人车交互方式下,HUD 技术日新月异,有望变革未来车载 HUD 的人车交互模式,重塑智能座舱硬件生态。

受篇幅限制,本文主要关注了近几年 HUD 在提升 FOV、VID 等光学参数上的技术路径。需要注意的是,图像质量、亮度等也是评价 HUD 的重要指标^[13]。图像质量评价方法与传统显示屏评价评价指标类似,主要包括图像清晰度、对比度、畸变、色差等评价参数。由于人眼最小分辨角是 1'^[96],一般要求 HUD 系统的调制传递函数(MTF)高于 0.3@60 ppi。此外,HUD 显示效果也与投影光线的亮度和环境光亮度息息相关。考虑到晴天环境下阳光直射时环境亮度较高,HUD 系统一般要求亮度高于 10000 cd/m²,部分要求高于 12000 cd/m²。图像生成技术会影响亮度。已在 HUD 系统中成熟商用的图像生成单元主要包括液晶(LCD)、硅基液晶(LCoS)、数字光处理(DLP)等技术。根据 HUD 所需亮度和系统光利用率,可反推出图像生成单元所需的照明光功率。然而,受热管理问题影响,尤其考虑到驾驶舱前方因为阳光直射导致温度本身就很高,一方面需具备足够高效的散热结构和

系统,另一方面需要尽量提升 HUD 系统光利用率。发光二极管(LED)和激光束扫描(LBS)技术具有光效高、体积小等优点,有潜力未来应用于 HUD 系统。

AR-HUD 系统将原始图像投射到汽车的不规则前挡风玻璃上,显示的图像会发生空间位置的变化和严重的失真^[97]。因此,HUD 系统通常采用补偿镜等光学元件矫正挡风玻璃引入的像差,并通过算法芯片数字化矫正图像,对投影图像进行校准和预失真处理,使观看的虚拟图像与原始图像相同。此外,根据国家安全标准,车辆前挡风玻璃透过率不得低于 70%,以保证驾驶员在行驶过程中的视野清晰度和行车安全。挡风玻璃透过率和对环境光的影响,是直接在挡风玻璃上贴合光学元件的 HUD 方案需特别考虑和关注的问题。

AR 技术通过模拟一个三维环境,给用户提视觉、听觉、触觉等感知上的体验。虚拟听觉也是虚拟现实中一个重要的研究内容。虚拟听觉是根据人的心理听觉特征,将声源信号通过耳机或扬声器播放,使听众通过听到的声音得到声源的整个空间印象,从而能够再现声场的空间信息的内容^[98]。现阶段的 AR 内容还停留在视觉阶段,三维虚拟听觉将给驾驶员提供更好的立体感和空间感,带来更强的视觉、听觉沉浸感。

可以预见地,HUD 将不断向着更大显示幅面的沉

浸式交互显示方面发展。需要注意的是,如果显示信息设计和图像质量不合理,也可能影响驾驶安全,阻碍 HUD 产业健康发展。

参 考 文 献

- [1] Klauer S, Dingus T, Neale V, et al. The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: an analysis using the 100-car naturalistic driving study data[M]. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2006.
- [2] 付兴领. 平显技术在汽车行业的应用[J]. 科技风, 2020(1): 5, 12.
Fu X L. Application of head-up display technology in automobile industry[J]. Technology Wind, 2020(1): 5, 12.
- [3] Liu Y C, Wen M H. Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2004, 61(5): 679-697.
- [4] Alejandro B J, Gilberto O G, David A J. Advances and trends of head-up and head-down display systems in automobiles[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9086: 90860E.
- [5] Gish K W, Staplin L. Human factors aspects of using head up displays in automobiles: a review of the literature, interim report[R]. Washington, D.C.: Joint Program Office for Intelligent Transportation Systems, 1995.
- [6] Smith S, Fu S H. The relationships between automobile head-up display presentation images and drivers' Kansei [J]. Displays, 2011, 32(2): 58-68.
- [7] Ablassmeier M, Poitschke T, Wallhoff F, et al. Eye gaze studies comparing head-up and head-down displays in vehicles[C]//2007 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, July 2-5, 2007, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2007: 2250-2252.
- [8] Wickens C D, Ververs P M. Allocation of attention with head-up displays[EB/OL]. [2022-11-12]. <https://ntlrepository.blob.core.windows.net/lib/39000/39800/39802/AM98-28.pdf>.
- [9] Fadden S, Wickens C, Ververs P. Costs and benefits of head up displays-an attention perspective and a meta analysis[C]//2000 World Aviation Conference, October 10-12, 2000, San Diego, CA, USA. Reston: AIAA Press, 2000: 5542.
- [10] Horrey W J, Wickens C D, Alexander A L. The effects of head-up display clutter and In-vehicle display separation on concurrent driving performance[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2003, 47(16): 1880-1884.
- [11] 任浪. 汽车 HUD 行业专题研究: AR~HUD 进阶, 叩开车载元宇宙大门[EB/OL]. <https://www.vzkoo.com/document/202211102feca061dcee2ed96d309462.html>.
Ren L. Special research on automobile HUD industry: AR~HUD advanced, opening the door of vehicle-mounted meta universe[EB/OL]. [2022-11-12]. <https://www.vzkoo.com/document/202211102feca061dcee2ed96d309462.html>.
- [12] Skirnewskaja J, Wilkinson T D. Automotive holographic head-up displays[J]. Advanced Materials, 2022, 34(19): e2110463.
- [13] 蔡锦浩. 衍射平视显示技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
Cai J H. Research on the technology of diffraction used in head-up display service[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [14] 陈晓伟, 曹妍, 薛嘉隆, 等. 双自由曲面平视显示系统光学模组优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0922001.
Chen X W, Cao Y, X J L, et al. Optimal design of optical module of the head-up display system with two free-form surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0922001.
- [15] Blankenbach K. Requirements and system aspects of AR-head-up displays[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2019, 8(5): 62-67.
- [16] Sulyok Á, Erdei G, Koppa P. Flat panel head-up display with motion parallax[C]//Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2022, August 1-4, 2022, Cambridge, United Kingdom. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2022: Th2A.11.
- [17] 欧高熔. 车载增强现实抬头显示光学系统设计与研究[D]. 重庆: 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 2019.
Ou G H. Research and design of augmented reality head-up display optical system for vehicles[D]. Chongqing: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [18] 曹妍. 车载平视显示系统光学模组优化设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
Cao Y. Optimized design of optical module for automotive head-up display system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [19] Singh I, Kumar A, Singh H S, et al. Optical design and performance evaluation of a dual-beam combiner head-up display[J]. Optical Engineering, 1996, 35(3): 813-818.
- [20] Park H S, Park M W, Won K H, et al. In-vehicle AR-HUD system to provide driving-safety information[J]. ETRI Journal, 2013, 35(6): 1038-1047.
- [21] Qin Z, Lin F C, Huang Y P, et al. Maximal acceptable ghost images for designing a legible windshield-type vehicle head-up display[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): .
- [22] 华阳多媒体. C-HUD 组合式抬头显示器 [EB/OL]. [2022-11-12]. <https://www.adayome.com/product/57.html>.
ADAYO. C-HUD combined head up display[EB/OL]. [2022-11-12]. <https://www.adayome.com/product/57.html>.
- [23] 华阳多媒体. W-HUD 风挡式抬头显示器 [EB/OL]. [2022-11-12]. <https://www.adayome.com/product/58.html>.
ADAYO. W-HUD windshield head up display[EB/OL].

- [2022-11-12]. <https://www.adayome.com/product/58.html>.
- [24] 华阳多媒体. AR-HUD 增强现实式抬头显示器 [EB/OL]. [2022-11-12]. <https://www.adayome.com/product/59.html>. ADAYO. AR-HUD augmented reality head-up display [EB/OL]. [2022-11-12]. <https://www.adayome.com/product/59.html>.
- [25] Gabbard J L, Fitch G M, Kim H. Behind the glass: driver challenges and opportunities for AR automotive applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(2): 124-136.
- [26] Tufano D R. Automotive HUDs: the overlooked safety issues[J]. Human Factors, 1997, 39(2): 303-311.
- [27] Ng-Thow-Hing V, Bark K, Beckwith L, et al. User-centered perspectives for automotive augmented reality [C]//2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality-Arts, Media, and Humanities (ISMAR-AMH), October 1-4, 2013, Adelaide, SA, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 13-22.
- [28] Ward N J, Parkes A. Head-up displays and their automotive application: an overview of human factors issues affecting safety[J]. Accident Analysis & Prevention, 1994, 26(6): 703-717.
- [29] Kim B H, Park S C. Optical system design for a head-up display using aberration analysis of an off-axis two-mirror system[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2016, 20(4): 481-487.
- [30] Kim K H, Park S C. Design of confocal off-axis two-mirror system for head-up display[J]. Applied Optics, 2019, 58(3): 677-683.
- [31] Wei S L, Fan Z C, Zhu Z B, et al. Design of a head-up display based on freeform reflective systems for automotive applications[J]. Applied Optics, 2019, 58(7): 1675-1681.
- [32] Gu L, Cheng D W, Liu Y, et al. Design and fabrication of an off-axis four-mirror system for head-up displays[J]. Applied Optics, 2020, 59(16): 4893-4900.
- [33] Okumura H, Hotta A, Sasaki T, et al. Wide field of view optical combiner for augmented reality head-up displays[C]//2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), January 12-14, 2018, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [34] An Z, Meng X P, Ji X, et al. Notice of violation of IEEE publication principles: design and performance of an off-axis free-form mirror for a rear mounted augmented-reality head-up display system[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(1): 7000215.
- [35] Hirokawa T, Yachida T. Head up display device: US9753289[P]. 2017-09-05.
- [36] Morohashi K, Sato M, Takahashi Y, et al. Projection device and head-up display device: US20170235138[P]. 2017-08-17.
- [37] 大众 [EB/OL]. [2022-11-12]. <https://id.vw.com.cn/pc/id4x.html>. Volkswagen [EB/OL]. [2022-11-12]. <https://id.vw.com.cn/pc/id4x.html>.
- [38] Eberhardt B, Schmidt F P. Head-up display with an adjusting device for a mirror: US06809872B2 [P/OL]. 2002-09-05[2004-10-26]. <http://www.google.co.in/patents/US06809872B2>.
- [39] Fan C, He S Y. Micromirror based virtual image automotive head-up display[J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(6): 1671-1676.
- [40] Mullins B, Greenhalgh P, Christmas J. 59-5: *Invited paper*: the holographic future of head up displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 886-889.
- [41] Christmas J, Collings N. 75-2: *Invited paper*: realizing automotive holographic head up displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2016, 47(1): 1017-1020.
- [42] Christmas J, Masiyano D, Collings N. Holographic automotive head up displays[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/273047366_Holographic_Automotive_Head_Up_Displays.
- [43] Wang W, Zhu X L, Chan K, et al. Digital holographic system for automotive augmented reality head-up-display [C]//2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), June 13-15, 2018, Cairns, QLD, Australia. New York: IEEE Press, 2018: 1327-1330.
- [44] Chakir S, Mermillod P, Heggarty K, et al. Wide field of view re-configurable foveal projection systems using a phase only spatial light modulator: an application to a new generation of automotive HUDs[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 12937-12951.
- [45] Hedili M K, Freeman M O, Urey H. Microlens array-based high-gain screen design for direct projection head-up displays[J]. Applied Optics, 2013, 52(6): 1351-1357.
- [46] Gu L, Cheng D W, Wang Q W, et al. Design of a two-dimensional stray-light-free geometrical waveguide head-up display[J]. Applied Optics, 2018, 57(31): 9246-9256.
- [47] 李熠琳, 陈建军, 孙秀辉, 等. 基于微棱镜阵列光波导的车载抬头显示系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(17): 1722004.
- Li Y L, Chen J J, Sun X H, et al. Design of vehicle-mounted head-up display system based on microprism array optical waveguide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(17): 1722004.
- [48] Richter P, von Spiegel W, Waldern J. 55-2: *Invited paper*: volume optimized and mirror-less holographic waveguide augmented reality head-up display[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49(1): 725-728.
- [49] WAYRAY [EB/OL]. [2022-12-01]. <https://wayray.com/>.
- [50] Draper C T, Bigler C M, Mann M S, et al. Holographic waveguide head-up display with 2-D pupil expansion and longitudinal image magnification[J]. Applied Optics, 2019, 58(5): A251-A257.
- [51] Bigler C M, Blanche P A, Sarma K. Holographic waveguide heads-up display for longitudinal image magnification and pupil expansion[J]. Applied Optics, 2018, 57(9): 2007-2013.
- [52] Bang K, Jang C, Lee B. Curved holographic optical

- elements and applications for curved see-through displays [J]. *Journal of Information Display*, 2019, 20(1): 9-23.
- [53] Draper C T, Blanche P A. Holographic curved waveguide combiner for HUD/AR with 1-D pupil expansion[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2503-2516.
- [54] Lü Z L, Liu J, Yang Y. Dual-view and multi-content head-up display using a single picture generation unit and two-layer volume holographic grating[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 7035208.
- [55] Malcolm H. The use of optical waveguides in head up display (HUD) applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8736: 87360E.
- [56] Chou T A, Pan T H, Chuang C H, et al. P-145: *Student poster*: AR HUD system realized by holographic display technology[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2022, 53(1): 1185-1187.
- [57] Basak U Y, Kazempourradi S M K, Ulusoy E, et al. Wide field-of-view dual-focal-plane augmented reality display[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10942: 1094209.
- [58] Li S Q, Xu X W, Maruthiyodan Veetil R, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [59] Skirnewskaja J, Montelongo Y, Wilkes P, et al. LiDAR-derived digital holograms for automotive head-up displays [J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13681-13695.
- [60] Continental's 2017 Augmented Reality-Head Up Display prototype[EB/OL]. <http://continental-head-up-display.com/>.
- [61] Shi B C, Hong T, Wei W, et al. 34.3: a dual depth head up display system for vehicle[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49: 371-374.
- [62] Qin Z, Lin S M, Luo K T, et al. Dual-focal-plane augmented reality head-up display using a single picture generation unit and a single freeform mirror[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(20): 5366-5374.
- [63] Seo J H, Yoon C Y, Oh J H, et al. 59-4: a study on multi-depth head-up display[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 883-885.
- [64] Nakagawa J, Yamaguchi H, Yasuda T. Head up display with laser scanning unit[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11125: 111250C.
- [65] Wang Y J, Lin Y H. An optical system for augmented reality with electrically tunable optical zoom function and image registration exploiting liquid crystal lenses[J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 21163-21172.
- [66] Zou J Y, Hsiang E L, Zhan T, et al. High dynamic range head-up displays[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 24298-24307.
- [67] Li L, Wang Q H, Jiang W. Liquid lens with double tunable surfaces for large power tunability and improved optical performance[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(11): 115503.
- [68] Li K, Geng Y, Yöntem A Ö, et al. Head-up display with dynamic depth-variable viewing effect[J]. *Optik*, 2020, 221: 165319.
- [69] Zhan T, Lee Y H, Tan G J, et al. Pancharatnam - Berry optical elements for head-up and near-eye displays [J]. *Josa B*, 2019, 36(5): D52-D65.
- [70] Zhan T, Lee Y H, Xiong J H, et al. High-efficiency switchable optical elements for advanced head-up displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(4): 223-231.
- [71] Mu C T, Lin W T, Chen C H. Zoomable head-up display with the integration of holographic and geometrical imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35716-35723.
- [72] Coni P, Bardon J L, Damamme N, et al. 56-1: a multiplane holographic HUD using light selectivity of Bragg grating[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 775-778.
- [73] Lü Z L, Xu Y, Yang Y, et al. Multiplane holographic augmented reality head-up display with a real-virtual dual mode and large eyebox[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(33): 9962-9971.
- [74] Lü Z L, Liu J, Xu L F. A multi-plane augmented reality head-up display system based on volume holographic optical elements with large area[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(5): 5200108.
- [75] Zhou F B, Zhou F, Chen Y, et al. Vector light field display based on an intertwined flat lens with large depth of focus[J]. *Optica*, 2022, 9(3): 288-294.
- [76] Shi J C, Hua J Y, Zhou F B, et al. Augmented reality vector light field display with large viewing distance based on pixelated multilevel blazed gratings[J]. *Photonics*, 2021, 8(8): 337.
- [77] Hua J Y, Hua E K, Zhou F B, et al. Foveated glasses-free 3D display with ultrawide field of view via a large-scale 2D-metagrating complex[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-9.
- [78] Hahn J, Kim H, Lim Y, et al. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators[J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 12372-12386.
- [79] Ting C H, Chang Y C, Chen C H, et al. Multi-user 3D film on a time-multiplexed side-emission backlight system [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7922-7928.
- [80] Fattal D, Peng Z, Tran T, et al. A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display[J]. *Nature*, 2013, 495(7441): 348-351.
- [81] Li J C, Tu H Y, Yeh W C, et al. Holographic three-dimensional display and hologram calculation based on liquid crystal on silicon device[invited][J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): G222-G231.
- [82] Fan Z C, Weng Y T, Chen G W, et al. 3D interactive surgical visualization system using mobile spatial information acquisition and autostereoscopic display[J]. *Journal of Biomedical Informatics*, 2017, 71: 154-164.
- [83] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- [84] Son J Y, Javidi B. Three-dimensional imaging methods based on multiview images[J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(1): 125-140.
- [85] Lee J H, Yanusik I, Choi Y, et al. Automotive augmented reality 3D head-up display based on light-field

- rendering with eye-tracking[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29788-29804.
- [86] Matsumoto T, Kusafuka K, Hamagishi G, et al. P-87: glassless 3D head up display using parallax barrier with eye tracking image processing[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 1511-1514.
- [87] Kang D, Ma L. Real-time eye tracking for bare and sunglasses-wearing faces for augmented reality 3D head-up displays[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 125508-125522.
- [88] Xue G L, Liu J, Li X, et al. Multiplexing encoding method for full-color dynamic 3D holographic display[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18473-18482.
- [89] Display Daily[EB/OL]. [2022-11-12]. <https://displaydaily.com/>.
- [90] Siweivr. VividQ showed the optical engine for high contrast and full depth holographic display in AR earphones at SID Display Week[EB/OL]. [2022-11-12]. <http://www.siweivr.com/rdzx/34787.html>.
- [91] Teich M, Schuster T, Leister N, et al. Real-time, large-depth holographic 3D head-up display: selected aspects [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5): B156-B163.
- [92] Wakunami K, Hsieh P Y, Oi R, et al. Projection-type see-through holographic three-dimensional display[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-7.
- [93] Ma X L, Yuan R Y, Zhang L B, et al. Augmented reality autostereoscopic 3D display based on sparse reflection array[J]. *Optics Communications*, 2022, 510: 127913.
- [94] Shi J C, Qiao W, Hua J Y, et al. Spatial multiplexing holographic combiner for glasses-free augmented reality [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 3003-3010.
- [95] Lu F, Hua J Y, Zhou F B, et al. Pixelated volume holographic optical element for augmented reality 3D display[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 15929-15938.
- [96] 徐敏求. 关于人眼的最小分辨角[J]. *教材通讯*, 1990(4): 30-31.
- Xu M Q. On the minimum resolution angle of human eyes [J]. *China University Teaching*, 1990(4): 30-31.
- [97] Li K, Bai L, Li Y G, et al. Distortion correction algorithm of AR-HUD virtual image based on neural network model of spatial continuous mapping[C]//2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), November 9-13, 2020, Recife, Brazil. New York: IEEE Press, 2020: 178-183.
- [98] 邱福英. 头相关传输函数的个性化频谱修正及其在虚拟听觉中的应用[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- Qiu F Y. HRTF of personalized spectrum correction and its application in virtual auditory[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.