

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600331



本刊网刊

HG-I 全息打印机的设计及全息打印

赵荣满¹, 周锦伦¹, 刘 森¹, 彭海炎^{1,2}, 张 云¹, 周华民¹, 解孝林^{1,2*}

(1. 华中科技大学 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 化学与化工学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:全息塑料在高端防伪和 VR/AR 显示领域应用广泛。针对全息塑料制造对加工装备的紧迫需求,通过硬件系统与软件系统的协同设计,制造了中国首台全息波前打印装备,即 HG-I 全息打印机。该全息打印机载有相位型空间光调制器,能够将包括裸眼三维的计算全息图独立打印到全息塑料上,也可以将全息图分切成小尺寸的基元全息图,通过阵列打印的方式实现大幅面大视场角的全息打印。采用自主研发的全息塑料,研究了基元全息图阵列打印的轨迹及拼接打印方式对全息图打印效果的影响。结果表明:单向步进的路径比“S”形路径能更有效地避免奇偶行间隙错位,所得全息图再现效果更好;重叠拼接、循环打印的方法可以使基元全息图的行间和列间缝宽分别从 355 μm 和 420 μm 减小到 231 μm 和 300 μm ,并使行间和列间缝隙灰度值平均偏差分别从 0.413 和 0.380 减小到 0.030 和 0.090,缝隙趋于柔和,大幅提升了大尺寸全息图的视觉连贯性。HG-I 全息打印机有望为高端防伪与先进增强现实显示器件的研发提供全息塑料的先进加工平台。

关键词:全息打印;全息塑料;高端防伪;增强现实

中图分类号: TP23; TP27; O63

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)05-0216-14

全息塑料是一类信息功能高分子材料,通过全息光栅结构存储光波的振幅、相位等全部信息,兼具塑料的轻、薄、柔、韧特点,以及裸眼三维(3D)显示、色彩衍射等独特功能,是塑料高端化与高值化发展方向^[1-4]。这类材料具有感光灵敏度高、信息存储容量大、衍射效率高、透光性优异、加工适应性强和质量轻等突出特性^[5-8],在高端防伪、增强现实(AR)等领域展现出难以替代的应用价值^[9-11]。

全息塑料传统加工工艺为模压转印^[4]。一般地,以银盐(卤化银乳胶、重铬酸银明胶等)或光刻胶为全息记录介质,采用相干激光曝光、光刻直写等方式记录全息图,经过显影、定影后在全息图的表面电镀金属镍,以此作为全息母版用于模压转印。模压转印工艺分为热模压和紫外(UV)模压两种。在热模压工艺中,对全息母版施加高温高压(195~230 $^{\circ}\text{C}$ 、1.5~2.0 MPa),促使与全息母版紧密接触的成像层树脂软化,形成与全息母版表面结构互补的全息光栅结构;经脱模、冷却后,成像层树脂进入玻璃态,使转印得到的全息光

栅结构稳定。UV 模压是在紫外光/近紫外光辐照下,通过树脂单体的光聚合反应将全息母版表面结构转印,制得全息塑料。与热模压转印技术相比,UV 模压技术无须高温高压,转印结构更深,光栅间距更窄,能够产生 3D 连续动感、零级衍射等光学效果。然而,不管是热模压还是 UV 模压,转印得到的全息图均为表面浮雕光栅结构,与原始全息母版相比,信息量大幅损失,存在全息图像亮度不高、三维立体感表现力较弱和色彩易失真等问题^[12]。因此,开发更加先进的加工方法并研制相应装备成为该领域亟待突破的前沿难题。

全息光聚合诱导相分离技术能够实现全息塑料的一步成型,无需蒸镀反射层就能显示高亮度全息图像,同时具有真彩色显示能力,是全息塑料加工技术的发展方向。该技术通过两束及以上相干激光同时辐照感光高分子材料,在材料内部通过光聚合诱导相分离原理形成全息光栅,完整存储相干光波的振幅、相位等全部信息。该技术最早由美国 Hughes 研究实验室的 Close 等^[13]开发,被美国 DuPont 公司^[14-16]和德国 Covestro(Bayer)公

收稿日期:2026-04-29 修回日期:2026-07-09 网络出版日期:2026-07-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52233005);国家自然科学基金创新群体项目(52521002)

作者简介:赵荣满(2003—),男,硕士生。研究方向:全息打印技术。E-mail:2336183044@qq.com

* 通信作者:解孝林,教授, E-mail:xlxie@hust.edu.cn

司^[17-19]商业化,已成为当前国际竞争的技术高地。中国在该领域起步较晚^[20-21],尽管在全息塑料的材料体系设计^[5-8]与先进制造技术^[22-23]方面已取得长足的进步,但在加工装备方面长期处于空白。

得益于空间光调制器(spatial light modulator, SLM)与计算全息图(computer generated hologram, CGH)的发展,全息打印技术应运而生^[24],已成为全息塑料加工的重要手段。根据物光的波前信息来源和干涉条纹的产生方式,全息打印可分为全息条纹打印、全息体视图打印和全息波前打印3种^[25]。全息条纹打印^[26-28]是采用计算机模拟物光和参考光的干涉过程,将计算得到的干涉条纹编码为CGH后加载至SLM,然后曝光缩印到全息记录介质,得到全息图。该方法不需要参考光与物光发生真实干涉,对系统抗振性要求低,但仅能制作透射式全息图,难以实现图像的白光再现。全息体视图打印^[29-31]是通过相机阵列获取三维场景中不同视角下的二维视差图像,编码为CGH后加载至SLM,再利用相干激光照射形成物光,与一束参考光在全息记录介质上相干,形成干涉条纹,得到全息图。该方法可以通过调整参考光的位置获得反射式体全息图,实现图像的白光再现,但三维显示效果依赖二维视差图像的合成,存在会聚-调节矛盾,易造成视疲劳和目眩感,且采样数据量大、计算负担重。全息波前打印^[32-35]则是通过数值计算将三维物体的波前信息编码为CGH,加载至SLM后,利用相干激光精确复现物体的波前,得到物光,随后与参考光在全息记录介质上相干,形成干涉条纹,制得全息图。该方法不仅能够获得能白光再现的反射式体全息图,且能准确重建出三维物体的全部波前信息,不存在会聚-调节矛盾,再现效果逼真^[25]。可见,全息波前打印是全息塑料加工的最佳技术路线。然而,全息波前打印技术的报道主要集中在日本、德国、美国 and 韩国等少数国家^[36-38],基于该技术开发打印装备更是被国外垄断,限制了全息波前打印的技术进步与应用。

在前期自主研发全息塑料的基础上^[39],本文开发出具有完全自主知识产权的全息波前打印装备^[40-42],即HG-I全息打印机。利用该装备能够打印出具有信息加密和防复印功能的高端防伪膜,也可打印白光再现的裸眼3D图像,还能打印AR显示用全息光学元件,具有大尺寸、大视角反射式体全息图打印的能力,且具备优异的长时间打印稳定性。

1 全息打印机设计

1.1 全息打印机的硬件系统设计

在所设计的全息打印机中,硬件系统主要包含激

光器、电子快门、光学系统(扩束系统、衰减系统、物光光束形成系统、参考光光束形成系统等)、温控系统、中央控制系统、材料控制系统、观测系统等。该系统的工作原理为:在中央控制系统的控制下,激光经过电子快门后进入扩束系统完成扩束与准直,随后被分光棱镜分为两束相干光,其中一束作为物光,携带SLM的波前信息,另一束则经过参考光光束形成系统成为参考光。两束光的强度经衰减系统调整后,分别从感光高分子材料的两侧入射,以干涉的方式在材料内部形成明暗相间的干涉条纹,在相干亮区触发光聚合反应,诱导有序相分离,形成体全息光栅,完整记录振幅、相位等全部信息。基元全息图(也称全息元, Hologel)是全息打印的最小单元。依据设定的轨迹控制材料移动,依次平铺打印基元全息图的阵列,得到一幅完整的全息图。图1为HG-I全息打印机的硬件系统设计。

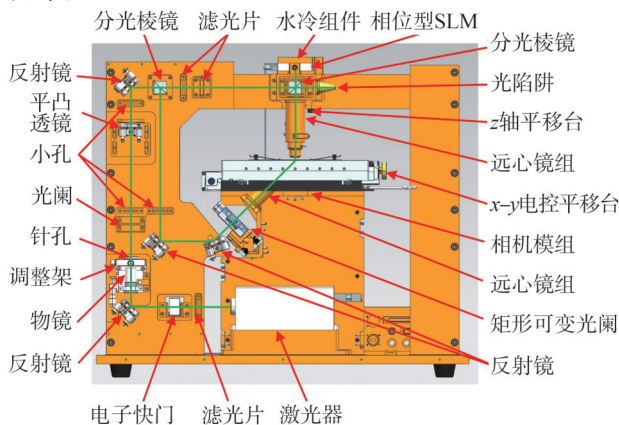


图1 HG-I全息打印机的硬件系统设计

Fig. 1 Hardware design of the HG-I holographic printer

相位型SLM、远心镜组和z轴平移台构成物光光束形成系统。基元全息图的尺寸越小,视场角越大^[43],但打印效率会降低。为平衡视场角与打印效率的矛盾,在HG-I全息打印机中设计了1倍和1/7.5倍缩放的两组远心镜组。远心镜组采用细螺纹定位与固定,z轴平移台便于两种镜组切换后在全息记录平面精准对焦。矩形可变光阑和另一个远心镜组构成参考光形成系统;为快速适配物光系统在不同放大倍率下的光斑尺寸变化,参考光路中特别设计了机械连杆式双光阑结构,将两个矩形可变光阑通过连杆机构刚性连接,实现联动调节。x-y电控平移台、控制器和样品夹构成材料控制系统。相机模组及与试样尺寸相当的单侧毛玻璃构成观测系统,用于监控全息记录平面上物光与参考光的光斑形态、强度及干涉图样,为光路对准、均匀性调试及系统维护提供直接的观测依据。激光器的水冷器和SLM的水冷组件构成温控系统。物镜、针孔、光阑和平凸透镜构成扩束系统。多个滤光片构成衰减系统。

图2为HG-I全息打印机的实物图。为抑制杂散光对打印过程的干扰,装备中配有光陷阱,并采用全封闭式外壳和镀有防反射层的内部腔壁。考虑到振动会对全息图的打印质量产生较大影响, x - y 电控平移台与光学系统被分别固定于不同的金属基座上,从结构上阻断二者之间的振动传递路径。此外,使用刚性底板对打印机底部进行密封,提高整体结构的稳定性。

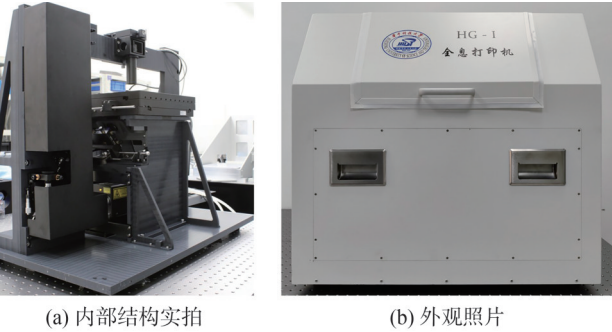


图2 HG-I全息打印机的实物图
Fig. 2 Photograph of the HG-I holographic printer

1.2 全息打印机的软件系统设计

为实现对全息打印机的集成控制,开发了基于Windows平台的控制软件。该软件的开发环境为Vi-

sual Studio,采用C++语言进行编写,并通过Qt软件包建立图形用户界面。

控制软件的工作流程如下:系统启动后,首先监测电子快门、 x - y 电控平移台、相位型SLM和CCD相机的通讯状态,并自动载入默认打印参数、系统基础配置和可供选择的工艺参数文件,完成初始化工作。当通讯均正常时,用户可根据需求选择手动和自动两种打印模式。在手动模式下,用户可以手动加载CGH并对电子快门、 x - y 电控平移台和激光器下达对应操作指令,手动完成全息图的打印。在自动模式下,用户需要根据打印参数新建或者修改工艺参数文件;加载后,通过上/下料操作将感光高分子材料置于指定位置。当打印命令开始执行后,系统会依据预设参数自动控制硬件系统,逐域打印指定的基元全息图。每完成一次打印,系统会判断是否满足结束条件,只有在完成所有基元全息图的打印或者接收到停止指令时,打印流程才会结束。

图3为控制软件的用户操作界面。各功能页面顶部都设有统一的状态栏,包含时间显示、错误列表、实时工作状态和Logo。错误列表会动态提示通讯状态异常的电控组件;实时工作状态有“忙碌”和“就绪”两种,以便提醒用户是否可以发送新指令。

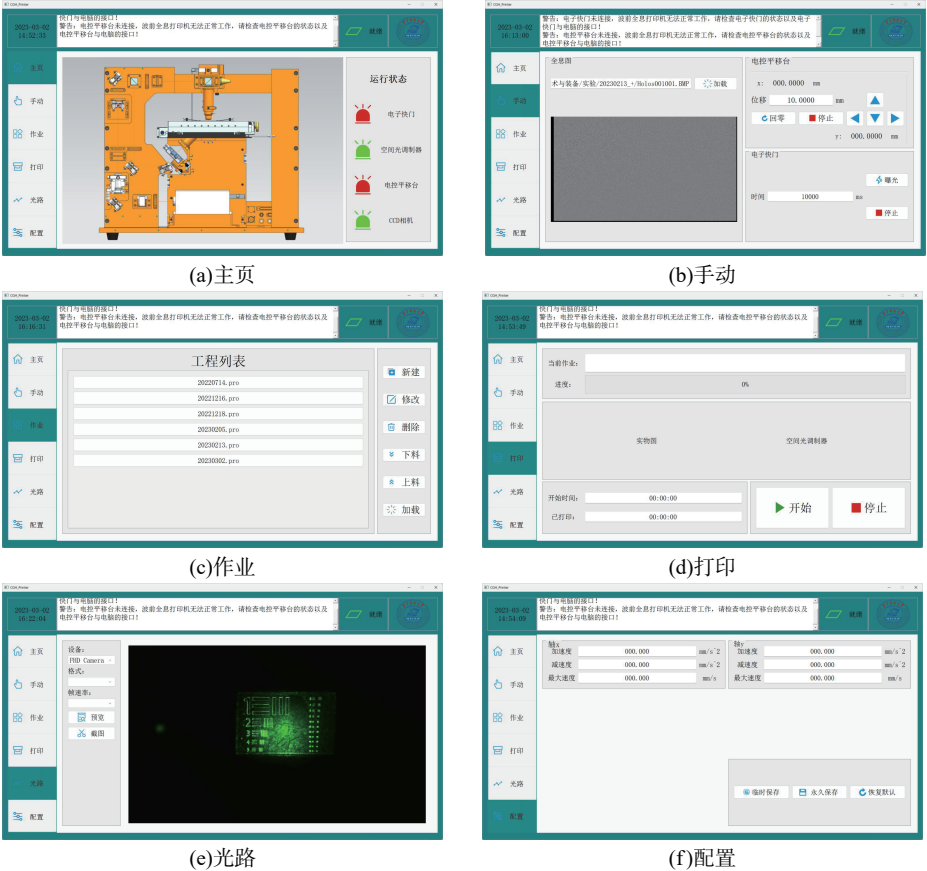


图3 控制软件的用户操作界面
Fig. 3 User interfaces of the control software

图3(a)为主页功能页,主窗口(左栏功能列表和顶栏状态栏以外的窗口)的左侧显示有装备的设计图,右侧为错误源的可视化设计,可实时显示电子快门、相位型SLM、 x - y 电控平移台和CCD相机的通讯状态。图3(b)为手动功能页,可以手动加载需要打印的CGH、规划打印路径、控制电子快门开关及设定曝光时间,还可以实时监测平移台的绝对坐标。图3(c)为作业功能页,主窗口的左侧为工程(工艺参数文件)列表,每个文件内都记录着预设的打印参数,右侧为功能键,除了能对工艺参数文件进行操作,还可以通过上/下料指令完成感光高分子材料的固定。图3(d)为打印功能页,主窗口的上方实时显示当前作业的名称及打印进度,中间显示加载至相位型SLM的CGH图,下方左侧显示开始时间和已打印时间,右侧为自动打印程序的开始与停止控制按钮。图3(e)为光路功能页,主窗口左侧为相机模组控制区,右侧为相机拍摄到的画面。图3(f)为参数配置功能页,可分别对 x - y 电控平移台的两个轴配置相关移动参数,并根据需要对设定的参数进行临时或永久修改操作,也可直接恢复轴的初始移动参数。

1.3 全息打印机的频谱面调控

1.3.1 相位型SLM衍射光场的组成及频谱分析

图4为一个分辨率 $N \times N$ 的相位型SLM的外观和像素化结构示意图。设像素边长为 p ,像素距离为 Δp 。SLM的显示区域由有源区(active area)和死区(dead area)两部分构成。有源区为有效显示区,可依据加载的CGH对入射光波进行对应的相位调制,使物光携带目标波前信息。死区为相邻有源区之间的物理间隙,会在入射光波中引入一个固定的、非期望的相移^[44-45]。此外,受限于SLM的显示区域尺寸,入射光波还会受到孔径函数的调制^[46]。

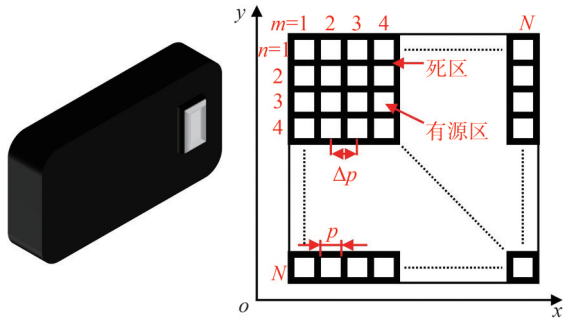


图4 相位型SLM的外观示意图(左)及其像素结构示意图(右)

Fig. 4 Appearance of the phase-only SLM (left) and schematic of its pixel structure (right)

有源区的调制函数 $\tau_a(x, y)$ 表示为^[46]:

$$\tau_a(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{p}, \frac{y}{p}\right) \otimes \left\{ \exp[i\varphi(x, y)] \sum_{m, n=0}^{N-1} \delta(x - m\Delta p, y - n\Delta p) \right\} \quad (1)$$

式中: $\varphi(x, y)$ 为有源区解码CGH后得到的相位分布,可视为像素中心相位 $\varphi_{m, n}$ 的分段延拓; $\otimes$ 为卷积运算; δ 为冲激函数, i 为虚数单位。

死区的调制函数 $\tau_d(x, y)$ 可表示为^[46]:

$$\tau_d(x, y) = \left[\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta p}, \frac{y}{\Delta p}\right) - \text{rect}\left(\frac{x}{p}, \frac{y}{p}\right) \right] \otimes \left\{ \exp(i\varphi_0) \sum_{m, n=0}^{N-1} \delta(x - m\Delta p, y - n\Delta p) \right\} \quad (2)$$

式中, φ_0 为死区导致的恒定相移。

相位型SLM显示区域的孔径函数 $a(x, y)$ 可表示为^[46]:

$$a(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{N\Delta p}, \frac{y}{N\Delta p}\right) \quad (3)$$

则平面入射光波经相位型SLM调制后的衍射光场 $\tau(x, y)$ 可以表示为^[46]:

$$\tau(x, y) = a(x, y) [\tau_a(x, y) + \tau_d(x, y)] \quad (4)$$

由于相位型SLM结构的像素化,有源区和死区的调制函数均出现了与二维梳状函数的卷积。根据傅里叶光学原理,衍射光场除了承载目标波前信息外,还包含死区调制带来的直流增强项和离散像素结构导致的上述两项沿横向与纵向的周期性复制的多级衍射光^[44-45]。直流增强项会使波前重建像的对比度下降;多级衍射光则会产生“鬼影”,干扰主像的观察,影响全息图的质量。

死区和有源区可以分别视作两个二维反射式光栅,根据夫琅禾费理论和光栅衍射方程^[47],死区和有源区在最小光栅周期下的衍射角 θ_d 和 θ_a 分别满足如下条件:

$$\theta_d = \arcsin\left(\frac{k_1 \lambda}{\Delta p}\right) \quad (5)$$

$$\theta_a \leq \arcsin\left[\frac{(k_2 + 1)\lambda}{2\Delta p}\right] \quad (6)$$

式(5)~(6)中: k_1 为死区衍射级次,且 $k_1=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$; k_2 为有源区衍射级次,且 $k_2=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$; λ 为波长。

为验证理论的正确性,利用透镜的光学傅里叶变换作用,可直接在其后焦面观察相位型SLM出射光场的空间频谱分布,如图5所示^[48-49],其中,光斑的位置反映衍射光的空间频率,强度反映衍射光的能量。图5中, f_1 为双胶合透镜 L_1 的焦距。

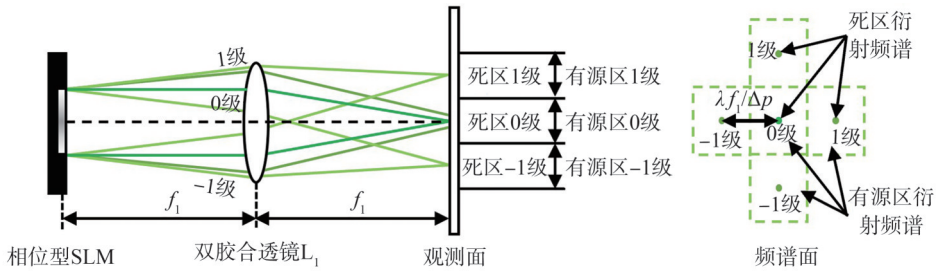


图5 衍射光场频谱的观测光路

Fig. 5 Optical setup for observing the diffraction field spectrum

激光波长为 532 nm, 双胶合透镜的焦距为 100 mm, 所用相位型 SLM 的像素间距在横、纵方向上均为 3.74 μm 。基于以上理论分析可知, 死区 1 级衍射光的频谱与观测屏中心的水平、竖直间距均为:

$$D_1 = f_1 \tan \theta_d \approx \frac{f_1 \lambda}{\Delta p} \approx 14.22 \text{ mm} \quad (7)$$

有源区 0 级衍射光的边缘与观测屏中心的水平、竖直间距均为:

$$A_1 = f_1 \tan \theta_a \approx \frac{f_1 \lambda}{2\Delta p} \approx 7.11 \text{ mm} \quad (8)$$

图 6 为在实验光路频谱面上拍摄到的空间频谱强度分布。由图 6 可知, 死区与有源区的衍射频谱分布和理论预期一致。死区的恒定相位调制使其每一级衍射光仅具有单一的空间频率, 在频谱面上表现为间距约 14 mm 的离散点阵。有源区不同像素对入射光的相位调制有所不同, 同一级衍射级次应包含一个空间频率带, 在频谱面上表现为边长约 14 mm 的方形亮面。同时, 可以观察到, 随着衍射级次的增加, 衍射光偏离光轴的角度也增大, 即空间频率增高, 但能量降低。

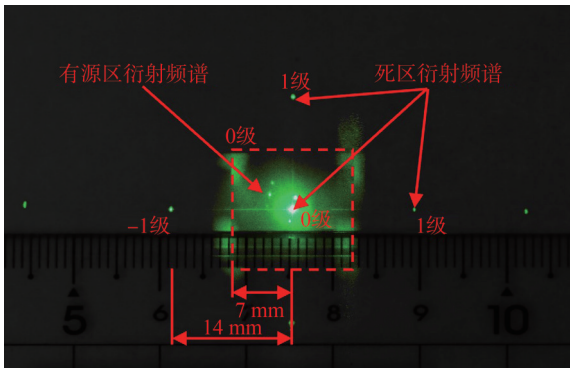


图6 相位型 SLM 衍射光场的频谱强度分布

Fig. 6 Spectral intensity distribution of the diffracted optical field from the phase-only SLM

1.3.2 全息打印的频谱滤波

为实现高质量全息打印, 需要抑制相位型 SLM 离散像素结构导致的噪声频谱, 包括死区产生的衍射光 (尤其是其中的直流增强项), 以及有源区产生的高级次衍射光。为此, 比较了基于带通滤波器和数字闪耀光栅的两种滤波方案。

1) 带通滤波方案

图 7 为基于带通滤波器的 4f 滤波系统示意图。图 7 中: 带通滤波器设计为一个中心带有圆形挡光板的方形孔径, 孔径的边长 L_f 满足 $L_f < \lambda f_1 / \Delta p$; 圆形挡光板的半径 r_f 取 0.5~1.5 mm, 以保证能完全遮挡直流衍射斑; f_2 为双胶合透镜 L_2 的焦距。

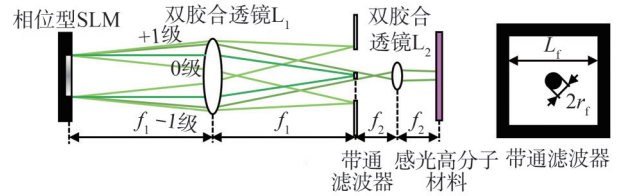


图7 基于带通滤波器的 4f 滤波系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the 4f filtering system based on a band-pass filter

该滤波器的屏函数 $H(u, v)$ 可表示为:

$$H(u, v) = \left[1 - \text{circ} \left(\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{r_f} \right) \right] \cdot \text{rect} \left(\frac{u}{L_f}, \frac{v}{L_f} \right) \quad (9)$$

式中, (u, v) 为带通滤波器平面的频谱坐标。

从相位型 SLM 出射的衍射光场经过双胶合透镜 L_1 和带通滤波器后的频谱分布函数 $G(u, v)$ 可表示为:

$$G(u, v) = \mathcal{F} \{ \tau(x, y) \} H(u, v) = T(u, v) H(u, v) \quad (10)$$

最后, 在双胶合透镜 L_2 的光学傅里叶反变换作用下, 得到物光的像场函数:

$$g(x', y') = \mathcal{F}' \{ G(u, v) \} = \tau^*(x', y') \otimes h(x', y') \quad (11)$$

其中:

$$\tau^*(x', y') = \mathcal{F}' \{ \mathcal{F} \{ \tau(x, y) \} \} = \tau^* \left(-\frac{f_2}{f_1} x, -\frac{f_2}{f_1} y \right) \quad (12)$$

$$h(x', y') = \mathcal{F}' \{ H(u, v) \} = \left[L_f^2 \text{sinc} \left(\frac{L_f}{\lambda f_2} x', \frac{L_f}{\lambda f_2} y' \right) \right] \otimes \left[\delta(x', y') - 2\pi r_f^2 \text{jinc}(2\pi r_f \rho) \right] \quad (13)$$

式(10)~(13)中: $\mathcal{F}$ 表示傅里叶变换; $T(u, v)$ 表示从相位型 SLM 出射的衍射光场经双胶合透镜 L_1 后的频谱分布; $\mathcal{F}'$ 表示傅里叶反变换; (x', y') 为物光像场在感光材料上的坐标; $\tau^*(x', y')$ 为 $\tau(x, y)$ 的复共轭函数; ρ 为感光材料上任意像点到坐标原点的径向距离, 即 $\rho =$

$$\sqrt{x'^2+y'^2}.$$

由以上分析可知,经过4f系统中带通滤波器的滤波处理后,死区的直流增强项和有源区高级次衍射光被抑制,最终得到一个以 f_2/f_1 为缩放比的倒立的物像。

图8为方形孔径 L_f 取不同值时,三维CGH的全息打印效果图,打印时参考光和物光的光强比约为1:1。由图8可以看到,使用方形孔径的带通滤波器均能成功打印出目标三维图像,并能在白光下实现裸眼三维显示。随着带通滤波器开口尺寸的减小,全息图再现时的重复像逐渐消失;当开口尺寸 L_f 满足 $L_f < \lambda f_1/\Delta p \approx 14.22\text{ mm}$ 时,重复像基本消失。值得注意的是,减小开口尺寸会使空间频率为高频的衍射信息丢失、空间带宽积减小、全息图视角变小。所以,带通滤波器的设计应当在临界值内选择合适的尺寸。

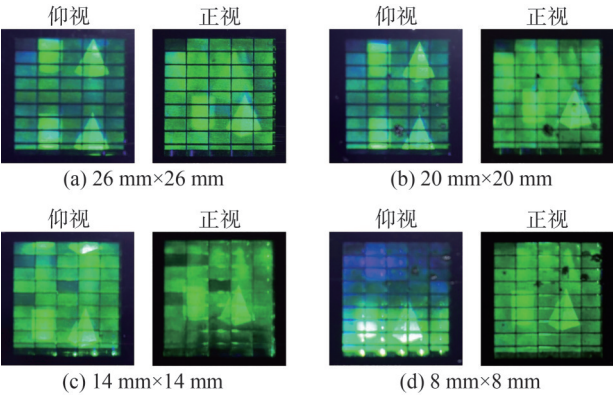


图8 改变带通滤波器方形孔径 L_f 的全息打印结果
Fig. 8 Holographic printing results when varying the square aperture L_f of the band-pass filter

2)数字闪耀光栅方案

图9为基于数字闪耀光栅的滤波系统局部示意图。该方案通过在相位CGH上叠加二维数字闪耀光栅,使有源区衍射光场的频谱分布在频谱面上产生一定偏移,从而使零级衍射光直接与直流分量分离^[50]。同时,将相位型SLM倾斜一定角度,使有源区衍射光场的频谱中心重新调整到原始频谱中心处。最后,利用低通滤波器使有源区的零级衍射光通过,以抑制相位型SLM的噪声频谱干扰。图9中, θ_s 为相位型SLM的水平倾斜角度。

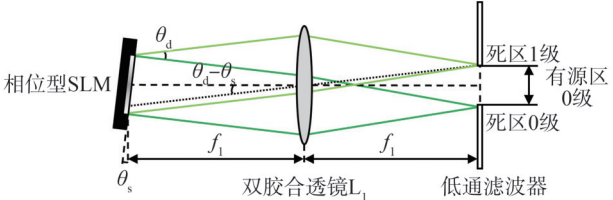


图9 基于数字闪耀光栅的滤波系统局部示意图
Fig. 9 Partial schematic of the filtering system based on a digital blazed grating

二维数字闪耀光栅的函数表达式为^[50]:

$$\varphi_g(x,y)=\frac{2\pi}{\Delta w}\text{mod}(bx+cy,\Delta w) \quad (14)$$

式中: $-N/2 \leq x \leq N/2-1, -N/2 \leq y \leq N/2-1$; b, c 分别控制数字闪耀光栅的水平 and 竖直闪耀方向; Δw 为数字闪耀光栅的周期,决定了光栅的闪耀角。

低通滤波器开口尺寸 L'_f 满足 $L'_f < \lambda f_1/\Delta p \approx 14.22\text{ mm}$,数字闪耀光栅取 $b=1, c=0$,并使有源区的衍射光场沿水平方向偏移 $\lambda f_1/2\Delta p \approx 7.11\text{ mm}$,相位型SLM的水平倾斜角度 θ_s 为:

$$\theta_s=\theta_a=\arcsin\left(\frac{\lambda}{2\Delta p}\right)\approx 4.078^\circ \quad (15)$$

图10为开口尺寸 L'_f 为 $14\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ 时的全息打印效果。由图10可以看到,通过该方案可以成功打印出目标三维图像,并能在白光下实现裸眼三维显示。使用临界尺寸的低通滤波器,可以使全息图再现时出现的重复像不被打印出来。

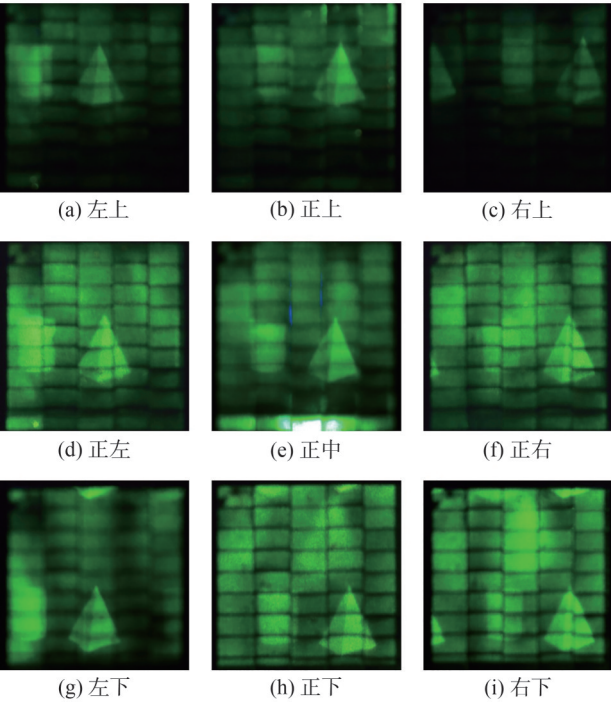


图10 加载水平数字闪耀光栅并倾斜相位型SLM的全息打印图像的多角度观测结果

Fig. 10 Multi-view observation of holographic printing results using a horizontal digital blazed grating and a tilted phase-only SLM

3)两种滤波方案的对比

首先,对比分析两种情况下物光的分布情况。实验中激光功率保持在 3 mW ,带通滤波器和低通滤波器的开口尺寸均选为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。图11为物光场在频谱面的频谱分布和在成像面的像场分布。图11中:方法一为基于带通滤波器的滤波方案,方法二为基于数字闪耀光栅的滤波方案,下同;图11(a)、(b)分

别为全息图阵列第 5 行、第 3 列(记为 Holo005003)和
第 5 行、第 5 列(记为 Holo005005)的相机拍摄结果。
由图 11 可以看出,加载同一基元全息图时,两种方法
在成像面上得到的三维图像基本保持一致,但在频谱
面上显著不同。

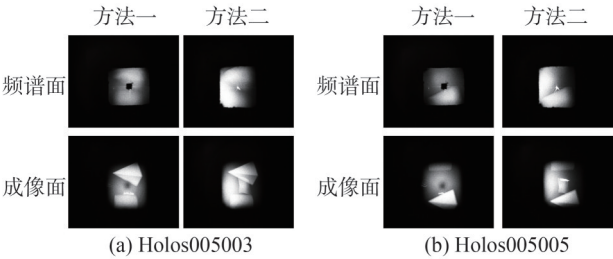


图 11 物光场在频谱面和成像面的记录结果
Fig. 11 Recorded images of the object optical field at the
spectrum plane and the image plane

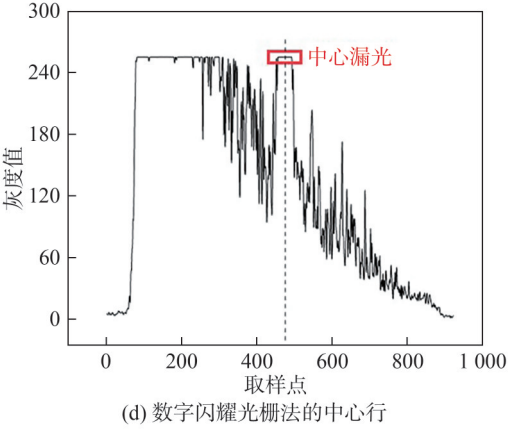
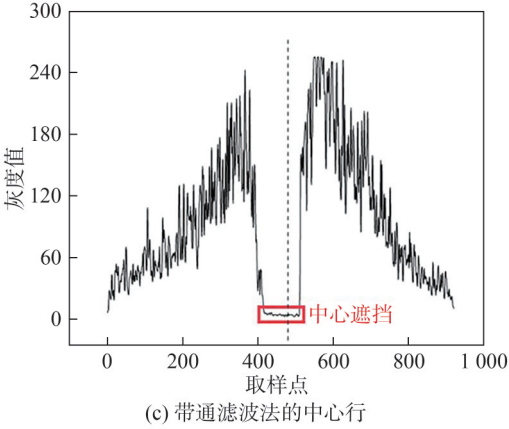
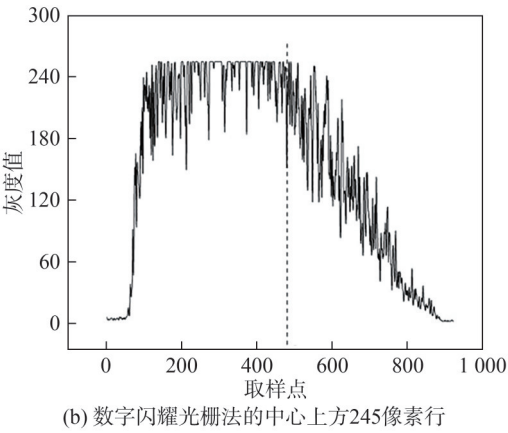
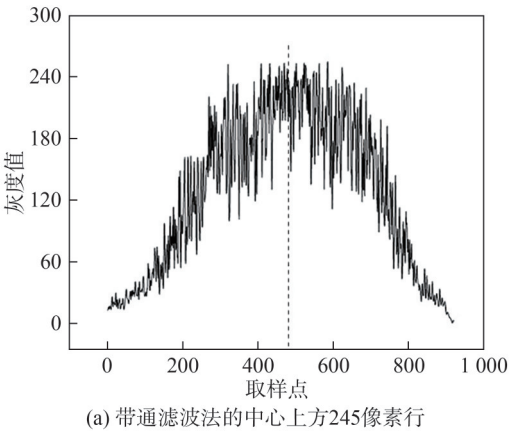


图 12 频谱面的能量分布

Fig. 12 Optical energy distribution at the spectrum plane

其次,对比分析了滤波器尺寸不同时物光强度,
如图 13 所示。由于不同基元全息图携带的相位信息
不同,在滤波方案和滤波器尺寸相同的情况下,加载不同
基元全息图时物光强度差别较大。对于滤波方案不同、
滤波器尺寸相同的情况,加载同一基元全息图时,带通
滤波方案的物光强度均高于数字闪耀光栅方案,滤波器
尺寸为 14 mm×14 mm 时平均高 80.9%,滤波器尺寸为

为定量比较两种方案在频谱面上的能量分布差异,
提取了图 11(a)频谱面中心及其上方 245 像素行的灰度
值,结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出,带通滤波方案的频谱能量呈中
心强、边缘弱的正态分布,数字闪耀光栅方案的频谱能
量从左向右依次减弱。这归因于后者加载了数字闪耀光
栅并倾斜了相位型 SLM,相对于死区衍射频谱中心,有
源区衍射频谱中心发生了 $\lambda f_1/2\Delta p$ 的水平偏移,导致左
侧靠近死区衍射中心的能量高并向右依次衰减。结果还
显示:带通滤波器的中心遮挡有效消除了死区衍射的直
流增强项,并丢失了部分空间频率为低频的衍射信息;
数字闪耀光栅方案使用的低通滤波器无法抑制分光棱
镜漏光等外部因素带来的低频噪声,使得频谱中心的低
频信息能量较高。

10 mm×10 mm 时平均高 199.4%。这归因于相位型 SLM
衍射光场的频谱能量分布特性为中心强、边缘弱,而数
字闪耀光栅使物光频谱中心水平偏移,最大衍射效率并
非 100%。此外,使用小尺寸滤波器会丢失更多高频信
息,导致两种滤波方案下,加载同一基元全息图时物光
强度均有所下降,其中,带通滤波方案平均下降 29.8%,
数字闪耀光栅方案平均下降 55.2%。

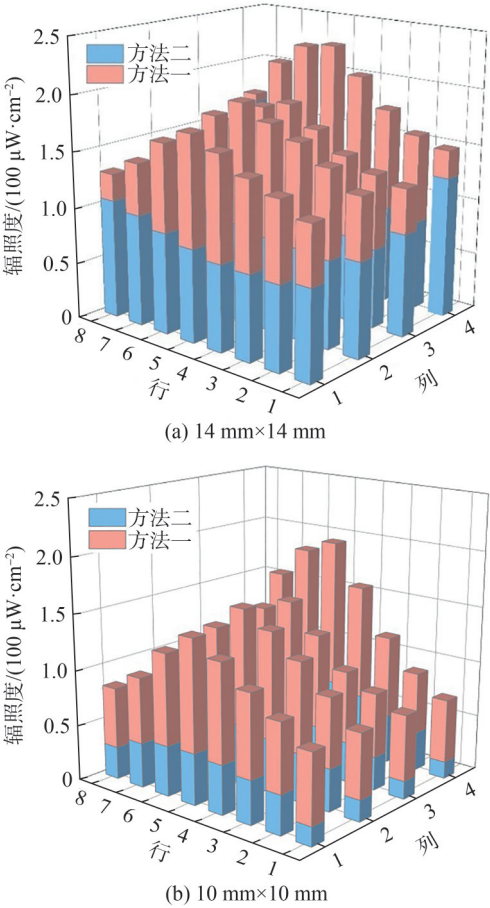


图 13 滤波器尺寸不同时的物光强度分布
Fig. 13 Object light intensity distributions with different filter sizes

综上所述,两种滤波方案均可以抑制相位型SLM离散像素结构导致的噪声频谱,使全息图再现时不产生重复像。带通滤波方案中物光的能量利用率更高且无须将相位型SLM倾斜,光路系统的搭建更为简便。若追求更高质量的全息图打印,数字闪耀光栅方案更优,因为该方案不会使低频信息丢失,再现图像的还原度更高。

1.4 全息打印的基元全息图尺寸控制

基元全息图的尺寸 W 与相位型SLM的像素间距 Δp 、像素数量 N 和光学系统的缩放倍率 M 有关:

$$W=MN\Delta p \tag{16}$$

全息图的视场角 θ 与激光波长 λ 、相位型SLM的像素间距 Δp ,以及光学系统的缩放倍率 M 有关:

$$\theta=2\sin^{-1}\frac{0.5\lambda}{M\Delta p} \tag{17}$$

因此,全息图的尺寸 W 与视场角 θ 存在耦合关系:

$$W\times\sin\frac{\theta}{2}=0.5\lambda\times N \tag{18}$$

由式(18)可知,基元全息图的尺寸和视场角成反比关系,即大视场角全息图的打印将以减小基元

全息图尺寸、牺牲打印效率为代价。式(18)还表明,大尺寸、大视场角全息图的制造不仅受限于相位型SLM自身的物理参数,还依赖光学系统所具有的缩放能力。

为满足不同应用场景对全息图尺寸与视场角的差异化需求,设计了如图14所示的 $M=1$ 和 $1/7.5$ 两种规格的远心镜组。二者具备可互换性且光学总长度相等,以提升装备的适用性与系统兼容性。其中,前者可用于视场角要求较小(8.15°)的全息打印,后者可用于具有较大视场角(64.47°)的全息打印。

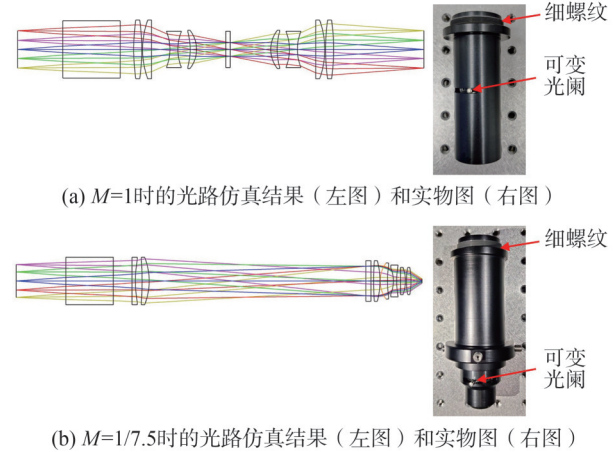


图 14 远心镜组
Fig. 14 Telecentric lens system

1.5 基元全息图阵列打印的轨迹规划

相位型SLM的有效显示区域面积有限,在制备大尺寸全息图时,需要将加载至相位型SLM的全息图切分为一组基元全息图阵列,基元全息图的尺寸不超过相位型SLM显示区域,通过电控平移台驱动感光高分子材料的步进移位,将基元全息图逐次曝光、顺序拼接而获得完整的大幅面全息图。其中,电控平移台的移动方式,即基元全息图阵列打印的轨迹和步进距离会直接影响全息图的打印质量。图15展示了“S”形和单向扫描两种典型的阵列打印方式。

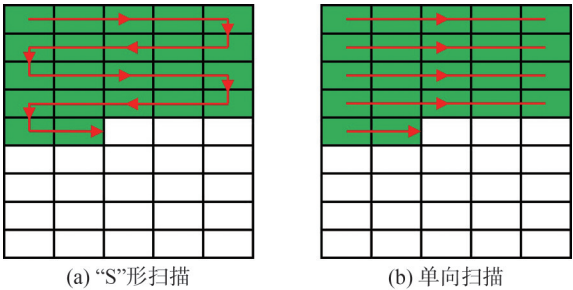


图 15 两种典型的基元全息图阵列打印方式
Fig. 15 Two typical array printing methods for elemental holograms

在“S”形打印路径下,奇数行和偶数行基元全息图的打印过程如图16所示。图16中,设位移台的列步

进距离为 l_s ,基元全息图宽度为 l_w 。当 $l_s \leq l_w$ 时,相邻两个基元全息图间存在部分重叠区域,即图 16 中红色阴影部分。由于重叠区域经历了两次曝光,累积曝光剂量易进入过调制区,再现时该区域会因衍射效率低于单次曝光区域、亮度较低而形成拼接缝隙。同时,后一次曝光是在既有折射率调制基础上进行的,因此缝隙的位置和形态主要由先曝光基元在边界处建立的初始调制所决定。当 $l_s > l_w$ 时,相邻基元全息图之间不存在重叠区域,“S”形路径打印的奇数行和偶数行的列间隙在位置和形态上不会有太大区别且与单方向打印下的列间隙特征基本一致。

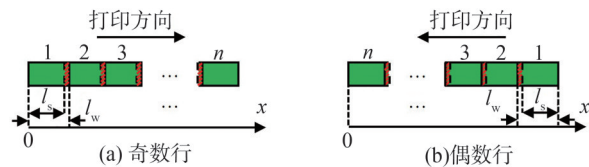


图 16 “S”形扫描时基元全息图的打印过程
Fig. 16 Printing process of elemental holograms during S-shaped scanning

图 17 为两种陈列打印路径下,行步进固定为 1.147 mm、列步进分别为 1.995 mm 和 2.095 mm 时的全息打印效果。

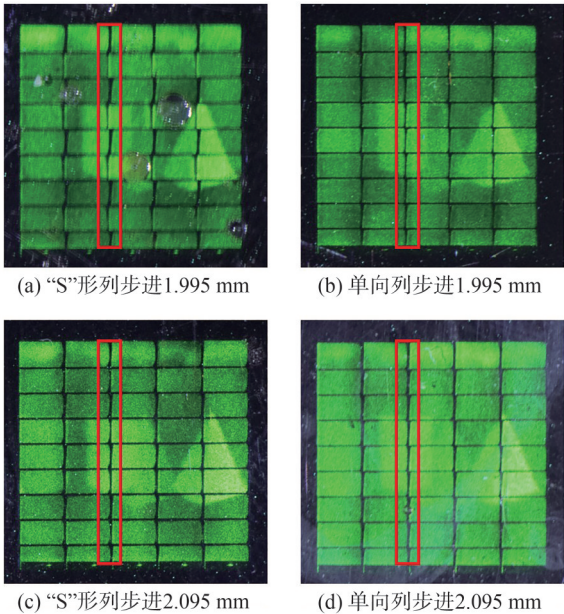


图 17 两种阵列打印路径输出全息图的再现结果
Fig. 17 Reconstruction results of holograms produced by two routes to array printing

结合图 16、17 可知:在 1.995 mm 的列步进下,“S”形路径打印的全息图中奇数行列间的缝隙相对于偶数行向右偏移,但各奇数行、偶数行的列间隙基本在同一位置处;采用单向步进方式打印的全息图,各行列间缝隙的位置基本一致。在 2.095 mm 的列步进下,“S”形与单向打印的全息图在各行列间的缝隙基

本位于同一直线上。因此,采用单向打印的方式制备全息图,其列间缝隙基本不受平移台移动步距的影响,所得到的全息图再现效果更好。

1.6 全息塑料打印

所设计制造的 HG-I 全息打印机具备个性化、定制化打印能力。图 18 为单个基元全息图的打印效果。每个基元全息图是一幅尺寸为 15.31 mm × 8.98 mm 的完整的全息图,内容包含一个裸眼可见的三棱锥和立方体。CGH 的分辨率为 4 094 × 2 400,立方体的衍射距离为 40 mm,三棱锥的衍射距离为 80 mm。白光再现时,聚焦于立方体观察,立方体图像清晰,三棱锥图像模糊,反之亦然,三维立体感强。

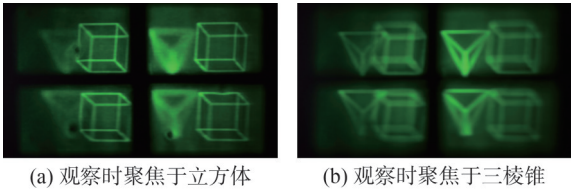


图 18 单个基元全息图的打印效果
Fig. 18 Printing results of individual elemental holograms

基元全息图的阵列打印还能够打印更大幅面的全息图,这需要先计算大幅面的 CGH,然后分切成基元全息图阵列,再逐一打印。这种方式最大的问题是基元全息图之间会产生缝隙。为解决这一问题,设计了重叠拼接、循环打印的方法进行工艺优化。具体步骤为:根据 SLM 的有效显示区域,将 CGH 切分为一组基元全息图阵列,并保证相邻基元全息图在边缘一定区域内重叠(图 19)。打印时严格控制平移台的移动步距使重叠区域对齐,最后在低激光功率下将曝光流程循环多次以完成全息图的打印。

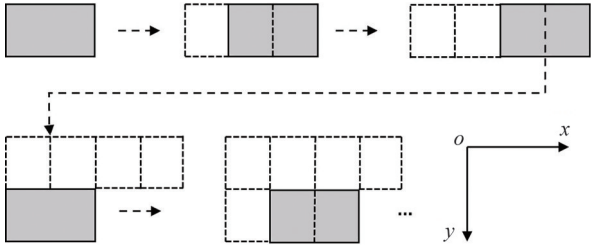


图 19 重叠全息打印示意图
Fig. 19 Schematic diagram of overlapping holographic printing

为对比分析,按照表 1 所示的打印参数得到重叠打印前、后两张全息图的再现图像,如图 20 所示,幅面尺寸均为 45.84 mm × 35.60 mm。表 1 中,静台时间为在 x-y 电控平移台每次移动后全息打印机静置的时间。由于干涉条纹对振动极为敏感,设置该静台时间可以减少平移台运动时产生的振动对全息图打印质量的负面影响。两张图像的再现质量见表 2,其中行间或

列间缝隙灰度值平均偏差是目标图像(缝隙以外的部分)的像素灰度值与缝隙处的像素灰度值之差与打印区域内像素灰度平均值的比值,该指标反映了缝隙与全息图像的对比度,值越小则缝隙观感越不显著。由表2可以看出,每次全息打印时在横向和纵向均重叠

表1 重叠打印前后的全息打印参数

全息打印方式	行距/mm	列距/mm	单次曝光时间/s	循环打印次数	静台时间/s	激光功率/MW
单次曝光	8.901	15.280	10	1	1	600
重叠打印	4.451	7.619	4	3	1	300



图20 重叠打印前后两张全息图的再现图像对比

Fig. 20 Comparison of the reconstructed images of two holograms without and with overlapped printing

表2 重叠打印前后全息图再现图像的质量

Tab. 2 Reconstructed image quality of holograms without and with overlapped printing

全息打印方式	行间缝宽/ μm	列间缝宽/ μm	行间缝隙灰度值平均偏差	列间缝隙灰度值平均偏差
单次曝光	355	420	0.413	0.380
重叠打印	231	300	0.030	0.090

HG-I型全息打印机不仅能够打印出白光再现的裸眼3D图像,也能够打印出具有信息加密和防复印功能的高端防伪膜,还能打印AR显示用全息光学元件,为全息塑料的个性化与定制化制造提供了先进加工平台,鉴于篇幅问题,不再赘述。

本文报道了中国首台全息打印机,实现了尺寸为 $15.31\text{ mm}\times 8.98\text{ mm}$ 的裸眼三维全息图的无缝打印。与国际全息波前打印装备相比,立陶宛Geola公司的White Phoenix 1000^[51]采用RGB脉冲激光实现真彩色打印,最大幅面达 $100\text{ cm}\times 150\text{ cm}$,最小Hogel尺寸为 $0.8\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$;法国Ultimate Holography公司的CHIMERA^[31]可实现 120° 全视场角真彩色打印,最大幅面达 $60\text{ cm}\times 80\text{ cm}$,最小Hogel尺寸为 $0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ mm}$;瑞士HoloTech公司的H.1^[52]可实现全视差真彩色打印,最大幅面达 $60\text{ cm}\times 80\text{ cm}$,最小Hogel尺寸为 $0.2\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$ 。本文开发的全息打印机实现了光学系统设计和配套控制软件系统的自主开发,形成了完备的软硬件一体装备,为国产全息波前打印装备的自主发展奠定了基础;然而,在视场

50%的区域,全息图再现时的列间缝隙和行间缝隙均明显减小,缝隙变得柔和,图像割裂感减弱,再现质量得到极大提升。由于所设计的HG-I全息打印机具有较好的长时间打印稳定性($>4\text{ h}$),重叠打印方法可用于大幅面全息图的高质量全息打印。

2 结 论

本文针对全息塑料的先进加工需求,通过软、硬件的协同设计开发了全息波前打印装备,即HG-I全息打印机,形成了完全自主知识产权。具体结论如下:

1)解决了SLM离散像素结构给全息打印带来的频谱面噪声问题。对比实验表明,基于数字闪耀光栅和基于带通滤波器的滤波方案在滤波器开口尺寸合适的情况下,均能有效滤除噪声频谱。

2)通过设计缩放比为1和1/7.5的两组可更换远心镜组,分别实现了小视角(8.15°)和大视角(64.47°)CGH的全息打印,满足不同场景应用需求。

3)优化了基元全息图阵列打印的轨迹。理论分析与实验结果均表明,单向步进打印路径比“S”形路径能更有效避免奇偶行间隙错位,所得全息图再现效果更好。

4)实验证实,HG-I型全息打印机能够打印大尺寸、大视角全息图,再现图像能够完整保留目标物体的三维信息且具有较好的长时间打印稳定性($>4\text{ h}$)。通过重叠拼接、循环打印的方法可以使基元全息图之间的缝隙减小并趋于柔和,大幅提升了大尺寸全息图的视觉连贯性。

【致谢】衷心感谢北京理工大学刘娟教授团队友情提供图8、10、17中的相位型计算全息图。

参考文献:

[1] Yao Ming,Wei Wei,Qiao Weiguo,et al.High-security plastic with integrated holographic and phosphorescent images[J].Advanced Materials,2025,37(12):2414894.

[2] Guo Hongxi,Xie Ya,Lu Dengfu,et al.Reliable holographic plastic for augmented reality display[J].Advanced Optical Materials,2025,13(20):2500612.

[3] Wang Dan,Liu Sen,Wei Wei,et al.Holographic plastics with

- liquid crystals[J].Macromolecules,2024,57(6):2557–2573.
- [4] 解孝林,彭海炎,倪名立.全息高分子材料[M].北京:科学出版社,2020.
- [5] Wang Dan, Wang Yixuan, Zhou Xingping, et al. Photocycloaddition of Pt(II) complexes in supramolecular composites for three-dimensional + two-dimensional image integration *via* reaction orthogonality[J].CCS Chemistry, 2025, 7(8):2496–2507.
- [6] Chen Jie, Wei Wei, Peng Haiyan, et al. Initiation-confined holographic photopolymerization under visible light[J].Journal of the American Chemical Society, 2025, 147(26):22335–22343.
- [7] Zhao Ye, Zhao Xiaoyu, Li Mingde, et al. Crosstalk-free patterning of cooperative-thermoreponse images by the synergy of the AIEgen with the liquid crystal[J].Angewandte Chemie International Edition, 2020, 59(25):10066–10072.
- [8] Hu Yixiong, Hao Xingtian, Xu Lin, et al. Construction of supramolecular liquid-crystalline metallacycles for holographic storage of colored images[J].Journal of the American Chemical Society, 2020, 142(13):6285–6294.
- [9] Ni Mingli, Yang Song, Zhou Xingping, et al. Holographic polymer materials for VR/AR applications[J].Acta Polymerica Sinica, 2023, 54(4):418–431.[倪名立, 杨松, 周兴平, 等.面向VR/AR应用的全息高分子材料[J].高分子学报, 2023, 54(4):418–431.]
- [10] Bruder F K, Hagen R, Rölle T, et al. From the surface to volume: Concepts for the next generation of optical-holographic data-storage materials[J].Angewandte Chemie International Edition, 2011, 50(20):4552–4573.
- [11] Wang Dan, Peng Haiyan, Zhou Xingping, et al. Research progress of holographic polymer/liquid crystal composites[J].Chinese Journal of Applied Chemistry, 2021, 38(10):1268–1298.[王丹, 彭海炎, 周兴平, 等.全息高分子/液晶复合材料的进展[J].应用化学, 2021, 38(10):1268–1298.]
- [12] Guan Ailing, Zhang Wenbi, Zhong Liyun, et al. Comparison and evaluation of reflection volume hologram and embossed hologram[J].Journal of Yunnan Polytechnic University, 1998, 14(2):75–79.[官爱玲, 张文碧, 钟丽云, 等.反射全息与模压全息的比较和评价[J].云南工业大学学报, 1998, 14(2):75–79.]
- [13] Close D H, Jacobson A D, Margerum J D, et al. Hologram recording on photopolymer materials[J].Applied Physics Letters, 1969, 14(5):159–160.
- [14] Haugh E F. Hologram recording in photopolymerizable layers:US3658526[P].1972–04–25.
- [15] Smothers W K, Monroe B M, Weber A M, et al. Photopolymers for holography[J].Practical Holography IV, 1990, 1212:20–29.
- [16] Jurbergs D, Bruder F K, Deuber F, et al. New recording materials for the holographic industry[J].Practical Holography XXIII:Materials and Applications, 2009, 7233:72330K.
- [17] Bruder F K, Fäcke T, Grote F, et al. Mass production of volume holographic optical elements(vHOEs) using Bayfol® HX photopolymer film in a roll-to-roll copy process[J].Practical Holography XXXI: Materials and Applications, 2017, 10127:101270A.
- [18] Bruder F K, Hansen S, Manecke C, et al. Wavelength multiplexing recording of vHOEs in Bayfol HX photopolymer film[C]//Proceedings of the Digital Optics for Immersive Displays. Strasbourg: SPIE, 2018:16.
- [19] Bruder F K, Frank J, Hansen S, et al. Reliable photopolymer for new applications: VHOEs recorded into Bayfol® HX film resisting the environment[C]//Proceedings of the Practical Holography XXXVI: Displays, Materials, and Applications. San Francisco: SPIE, 2022:1.
- [20] Huang Mingju, Chen Zhongyu, Gan Fuxi. High density digital holographic recording characteristics in photopolymers[J].Physics, 2001, 30(12):766–771.[黄明举, 陈仲裕, 干福熹.光致聚合物的高密度数字全息存储特性综述[J].物理, 2001, 30(12):766–771.]
- [21] Gong Qiaoxia, Huang Mingju, Gu Donghong, et al. Effects of monomers and binders in the photopolymer on holographic data storage properties[J].Acta Optica Sinica, 2005, 25(3):396–401.[弓巧侠, 黄明举, 顾冬红, 等.光致聚合物中单体及粘结剂对全性能的影响[J].光学学报, 2005, 25(3):396–401.]
- [22] Hu Po, Chen Yuxin, Li Jinhong, et al. Impact of fullerene on the holographic properties of PQ/PMMA photopolymer[J].Composites Science and Technology, 2022, 221:109335.
- [23] Chen Yuxin, Hu Po, Huang Zhiyun, et al. Significant enhancement of the polarization holographic performance of photopolymeric materials by introducing graphene oxide[J].ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(23):27500–27512.
- [24] 王辉.波前再现三维显示[M].北京:科学出版社, 2016.
- [25] Huang Yingqing, Su Jian, Chen Yibei, et al. Progress in holographic printing technique[J].Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4):0406008.[黄应清, 苏健, 陈祎贝, 等.全息打印技术研究进展[J].红外与激光工程, 2018, 47(4):0406008.]
- [26] Yoshikawa H, Yamaguchi T, Kajiro S. Direct fringe printer for computer-generated holograms: Improvement of print-

- ing speed[J]. Practical Holography XXVII: Materials and Applications, 2013: 86440X.
- [27] Li Yong, Wang Hui, Ma Lihong, et al. Three-dimensional imaging and display of real-existing scene using fringe[J]. International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (IcOPEN2013), 2013: 87691I.
- [28] Jin Hongzhen, Li Yong, Wang Hui, et al. The design of auto-microcopy system for digital holograms[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(3): 233–236. [金洪震, 李勇, 王辉, 等. 数字全息图微缩输出系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(3): 233–236.]
- [29] Zacharovas S J. Digital holographic printing using pulsed RGB lasers[J]. Optical Engineering, 2011, 50(9): 091307.
- [30] Yamaguchi M. Ray-based and wavefront-based holographic displays for high-density light-field reproduction[J]. Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2011, 2011, 8043: 804306.
- [31] Gentet Y, Gentet P. CHIMERA, a new holoprinter technology combining low-power continuous lasers and fast printing[J]. Applied Optics, 2019, 58(34): G226–G230.
- [32] Yamaguchi T. Volume hologram printer to record the wavefront of three-dimensional objects[J]. Optical Engineering, 2012, 51(7): 075802.
- [33] Nishii W, Matsushima K. A wavefront printer using phase-only spatial light modulator for producing computer-generated volume holograms[J]. Practical Holography XXVIII: Materials and Applications, 2014, 9006: 90061F.
- [34] Kang H, Stoykova E, Kim Y, et al. Color holographic wavefront printing technique for realistic representation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(4): 1590–1598.
- [35] Jeong J, Cho J, Lee D, et al. Generation of wide viewing angle depth map hologram and its realization by complex wavefront printing[C]//Proceedings of the Digital Holography and Three-Dimensional Imaging. JeJu Island: OSA, 2016: W2A.20.
- [36] Hong K, Park S G, Yeom J, et al. Resolution enhancement of holographic printer using a hogel overlapping method[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14047.
- [37] Ichihashi Y, Yamamoto K, Wakunami K, et al. An analysis of printing conditions for wavefront overlapping printing[J]. Practical Holography XXXI: Materials and Applications, 2017, 10127: 101270L.
- [38] Choi H, Kang H, Kim N. Analysis of potential distortions corresponding to the hologram printed by a holographic wave-front printer[J]. Optics Express, 2021, 29(16): 24972.
- [39] Zhao Man, Chen Jie, Lu Dengfu, et al. Effects of epoxide compounds on the performance of holographic plastic[J]. Journal of Functional Polymers, 2025, 38(4): 309–317. [赵曼, 陈杰, 鲁登福, 等. 环氧化合物对全息塑料性能的影响[J]. 功能高分子学报, 2025, 38(4): 309–317.]
- [40] 解孝林, 周锦伦, 彭海炎, 等. 一种全息波前打印系统及方法: CN114859679B[P]. 2022–12–20.
- [41] Xie Xiaolin, Zhou Jinlun, Peng Haiyan, et al. Holographic wavefront printing system and method: US12222679B1[P]. 2025–02–11.
- [42] 解孝林, 刘森, 张云, 等. 一种数字滤波大尺寸全息波前重叠打印系统及打印方法: CN119781270B[P]. 2025–09–26.
- [43] An J, Won K, Kim Y, et al. Slim-panel holographic video display[J]. Nature Communications, 2020, 11: 5568.
- [44] Agour M, Kolenovic E, Falldorf C, et al. Suppression of higher diffraction orders and intensity improvement of optically reconstructed holograms from a spatial light modulator[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(10): 105405.
- [45] Wang Tao. Full color holographic display based on liquid crystal spatial light modulator[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011. [王涛. 基于液晶空间光调制器的彩色全息显示研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.]
- [46] Palima D, Daria V R. Effect of spurious diffraction orders in arbitrary multifoci patterns produced via phase-only holograms[J]. Applied Optics, 2006, 45(26): 6689–6693.
- [47] 钟锡华. 现代光学基础[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [48] Yan Hongxiu. Implementing optical wavelet filter based on 4F system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. [闫红秀. 基于4F系统的光学小波滤波器的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.]
- [49] Zhang Zhaohui, Liu Guochao. Abbe principle of image formation and spatial filtering experiment[J]. Physics Experimentation, 2017, 37(9): 23–29. [张朝晖, 刘国超. 阿贝成像原理和空间滤波实验[J]. 物理实验, 2017, 37(9): 23–29.]
- [50] Yu Yingjie, Wang Tao, Zheng Huadong. Optimization of optoelectronic reconstruction of phase hologram by use of digital blazed grating[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(5): 3154–3160. [于瀛洁, 王涛, 郑华东. 基于数字闪耀光栅的位相全息图光电再现优化[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3154–3160.]
- [51] Geola. Holographic Printer for Poster-Sized Holograms [EB/OL]. [2026–07–02]. <https://www.geola.com/product/holographic-printer/>.
- [52] HoloTech. Still platforms [EB/OL]. [2026–07–02]. <https://holotech.com/still-platforms/>.

【校友简介】



解孝林, 华中科技大学教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 科技部重点领域创新团队负责人, “万人计划”科技领军人才, 中国化学会会士, 英国皇家化学学会会士, 国务院学科评议组成员, *Compos. Sci. Technol.* 洲际主编, 中国印钞造币集团-华中科技大

学先进光学防伪材料与制造联合实验室主任, 国家防伪工程技术研究中心技术委员会副主任。分别于 1990 年和 1996 年取得四川大学硕士和博士学位。主要从事全息塑料、电子塑料、高分子加工流变学的研究。发表学术论文 300 余篇, 获授权发明专利 200 余件。以第一完成人获 2010 年国家自然科学奖二等奖、2020 年中国石油和化学工业联合会技术发明一等奖、2023 年中国轻工业联合会科学技术发明一等奖。

Design of the HG-I Holographic Printer and Holographic Printing Process

ZHAO Rongman¹, ZHOU Jinlun¹, LIU Sen¹, PENG Haiyan^{1,2}, ZHANG Yun¹, ZHOU Huamin¹, XIE Xiaolin^{1,2*}

(1.State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2.School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract:

Objective Most domestic holographic plastic processing equipment still relies on embossed holography technology. However, this conventional technology cannot fabricate reflection volume holograms with three-dimensional (3D) effects visible to the naked eye and cannot meet the high-quality printing requirements of holographic optical elements (HOEs). To address the urgent demand for advanced processing equipment for holographic plastic manufacturing, a holographic wavefront printing system, termed HG-I, was designed and manufactured. The system demodulated and projected a computer-generated hologram (CGH) using a phase-only spatial light modulator (SLM) onto a photosensitive polymer material, where the object beam carrying the encoded information interfered with a reference beam to form the holographic recording. The objective of this study was to demonstrate the feasibility of holographic plastic printing and to fabricate reflection volume holograms exhibiting 3D effects visible to the naked eye.

Methods The investigation began with a theoretical and experimental analysis of the diffracted light field of the object beam. The adverse effects and structural characteristics introduced by the discrete pixel structure of the SLM in the object diffraction field were systematically evaluated. To suppress these discrete artifacts, two improvement methods were proposed based on a spatial band-pass filter and a digital blazed grating, respectively. Corresponding 4f optical filtering systems were subsequently constructed in the optical path. These experimental setups were used for quantitative testing and comparative analysis, focusing primarily on two key indicators: spatial spectral distribution and object beam energy utilization. Second, the system was optimized at the optical design level to balance the inherent trade-off between the size of individual holographic elements and the overall viewing angle. A set of interchangeable telecentric lens groups with magnification ratios of 1 and 1/7.5 was designed and manufactured to meet the printing requirements under different operating conditions. Furthermore, motion planning strategies were optimized and investigated. Theoretical analysis combined with experimental validation was used to examine the effects of different scanning paths on stitching gaps, with particular emphasis on comparing S-shaped and unidirectional scanning paths. Finally, the overall printing quality of large-scale volume holograms was improved by introducing an overlap splicing strategy for adjacent holographic elements in combination with a cyclic exposure process.

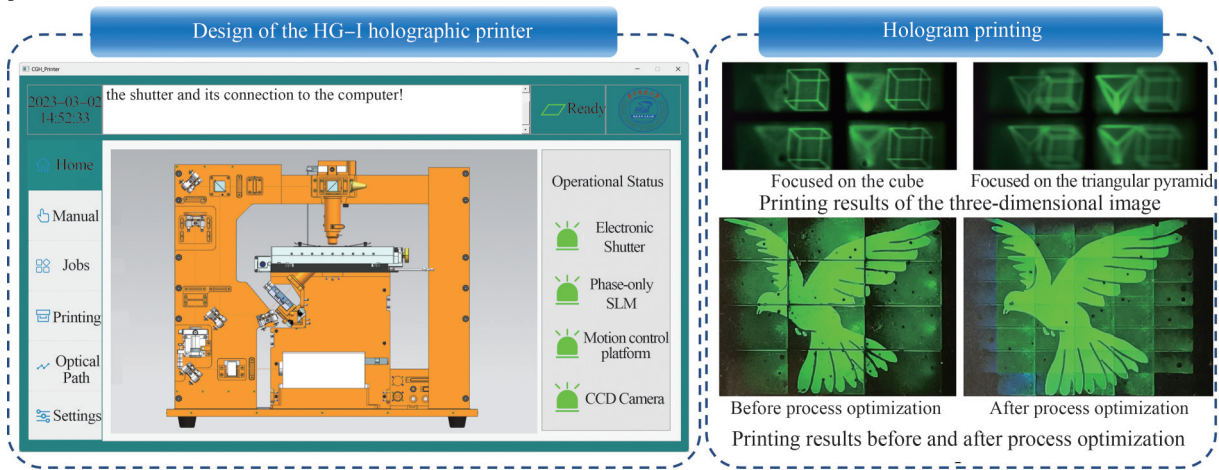
Results and Discussions Experimental results indicated that both filtering schemes were effective when critical conditions were met. High-order repeated ghost images were effectively eliminated when the filter aperture reached the critical threshold. Quantitative measurements revealed that the aperture size influenced object beam energy utilization. Under identical aperture conditions, the band-pass filtering method increased object beam energy utilization by up to 199.4% compared with the digital blazed grating method. Additionally, the band-pass filtering method offered the advantage of simpler optical path alignment in practical applications, although it simultaneously resulted in the loss of low-frequency spectral information. Furthermore, the introduction of interchangeable telecentric lens groups enabled the equipment to adapt to different application scenarios. The lens system successfully balanced two operating modes: high-efficiency printing of large-scale two-dimensional (2D) holograms with a narrow viewing angle (8.15°) and 3D display with a wide viewing angle (64.47°). Regarding mechanical motion planning, the trajectories of the translation stage were evaluated and analyzed. The results demonstrated that a unidirectional printing path effectively avoided gap misalignment between odd and even rows. Finally, implementing a 50% overlap splicing strategy combined with a multi-cycle, low-dose exposure process effectively improved the quality of the boundary regions. The row gap width decreased from 355 μm to 231 μm, while the column gap width decreased from 420 μm to 300 μm. Moreover, data analysis showed that the average grayscale deviation decreased from 0.413 to 0.030 for row gaps

and from 0.380 to 0.090 for column gaps. These quantitative results demonstrated that the microscopic stitching seams were significantly reduced and that the overall visual fragmentation of the large-scale holograms was markedly diminished.

Conclusions The developed reflection volume holographic wavefront printing equipment (HG-I) integrated an independently developed optical system with a control software system, forming a complete hardware–software integrated platform. The equipment demonstrated stable, continuous operation over extended periods and successfully fabricated reflection volume holograms capable of reconstruction under white light illumination while preserving 3D depth and parallax information. The implementation of overlap splicing and cyclic exposure effectively improved the printing quality of large-scale holograms. This study established a verified hardware and software configuration and a corresponding processing method, providing a foundation for the development of advanced domestic processing equipment for holographic plastic manufacturing.

Key words: holographic printing; holographic plastic; advanced anticounterfeiting; augmented reality

Graphical abstract:



(编辑 李轶楠)

引用格式: Zhao Rongman,Zhou Jinlun,Liu Sen,et al.Design of the HG-I holographic printer and holographic printing process[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(5):216–229.[赵荣满,周锦伦,刘森,等.HG-I全息打印机的设计及全息打印[J].工程科学与技术,2026,58(5):216–229.]