arXiv:2601.04370v1 [physics.optics] 7 Jan 2026

几何波导显示器的端到端可微设计

Xinge Yang[1] Zhaocheng Liu[2,*] Zhaoyu Nie[2] Qingyuan Fan[2]
Zhimin Shi[2] Jim Bonar[2] Wolfgang Heidrich[1,*]
阿卜杜拉国王科技大学[1],Meta[2],通讯作者*

摘要

几何波导是光学透视增强现实显示器的一种颇具前景的架构，但其性能严重受限于难以联合优化非序列光传输和偏振相关多层薄膜镀层。本文提出首个面向几何波导的端到端可微优化框架，将非序列蒙特卡罗偏振光线追迹与可微传输矩阵薄膜求解器相结合。可微蒙特卡罗光线追迹器避免了确定性光线分裂导致的指数级增长，同时支持将梯度从眼盒指标反向传播至设计参数。借助节省内存策略，我们在单台多 GPU 工作站上优化了逾一千个层厚参数以及数十亿个非序列光线-表面交点。我们从过参数化层堆出发，在离散可制造性约束下将冗余层的厚度压至零，从而实现自动层剪枝，并有效地执行拓扑优化以发现最优镀层结构。在一个具有代表性的设计中，从厚度范围内的随机初始化出发，我们的方法将光效率从 4.1% 提高到 33.5%，并分别使眼盒均匀性和视场均匀性提升 $\sim$17$\times$ 和 $\sim$11$\times$。此外，我们联合优化波导和图像预处理网络，以提升感知图像质量。我们的框架不仅能够在波导内部实现系统级、高维度的涂层优化，还拓展了可微光学在下一代光学设计中的应用范围。

引言

增强现实（AR）将数字内容叠加到真实世界中，因此需要用于近眼显示器的紧凑、轻巧的光学合光器 [1, 2, 3, 4]。现有的光学透视架构包括鸟浴式合光器 [5,6], ，这类合光器可提供较高的图像质量，但仍然体积庞大且会降低透明度；以及视网膜投影系统 [7, 8, 9],，这类系统的功耗效率较高，但需要精确校准，且眼盒有限。波导显示器 [10, 11]通过利用薄型透明板借助全内反射（TIR）引导光线，并在无需笨重光学元件的情况下复制出瞳，提供了一种极具吸引力的替代方案，是面向下一代 AR 显示器的有前景架构。

波导显示器通常包括衍射/全息波导 [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18] 和几何波导（GWG） [19, 20, 21, 22]。衍射方案利用与波长相关的衍射将光耦入薄板并从中耦出，通常还需要额外的设计工作来控制色彩和角度敏感性。相比之下，GWG 使用部分反射镜阵列（PRMA），通过几何光学重定向并提取光线。由于其耦合通过反射而非衍射实现，GWG 能够保留光谱内容，并为实现大眼盒、高图像质量提供切实可行的途径。反射耦合还可实现较高的光效率，使 GWG 成为明亮近眼显示器的理想选择。

尽管前景可期，GWG 的设计仍然颇具挑战，因为其性能取决于经过多次部分反射相互作用的非序列光传输，以及偏振相关多层涂层。首先，通常通过在每次 PRMA 相互作用处将光线分裂为反射分支和透射分支，来准确模拟非顺序光线路径；这可能导致光线数量呈指数级增长，并带来高昂的计算成本。其次，现有工作流程通常将几何设计与涂层设计 [20, 23, 22], 分开进行，使迭代优化变得缓慢

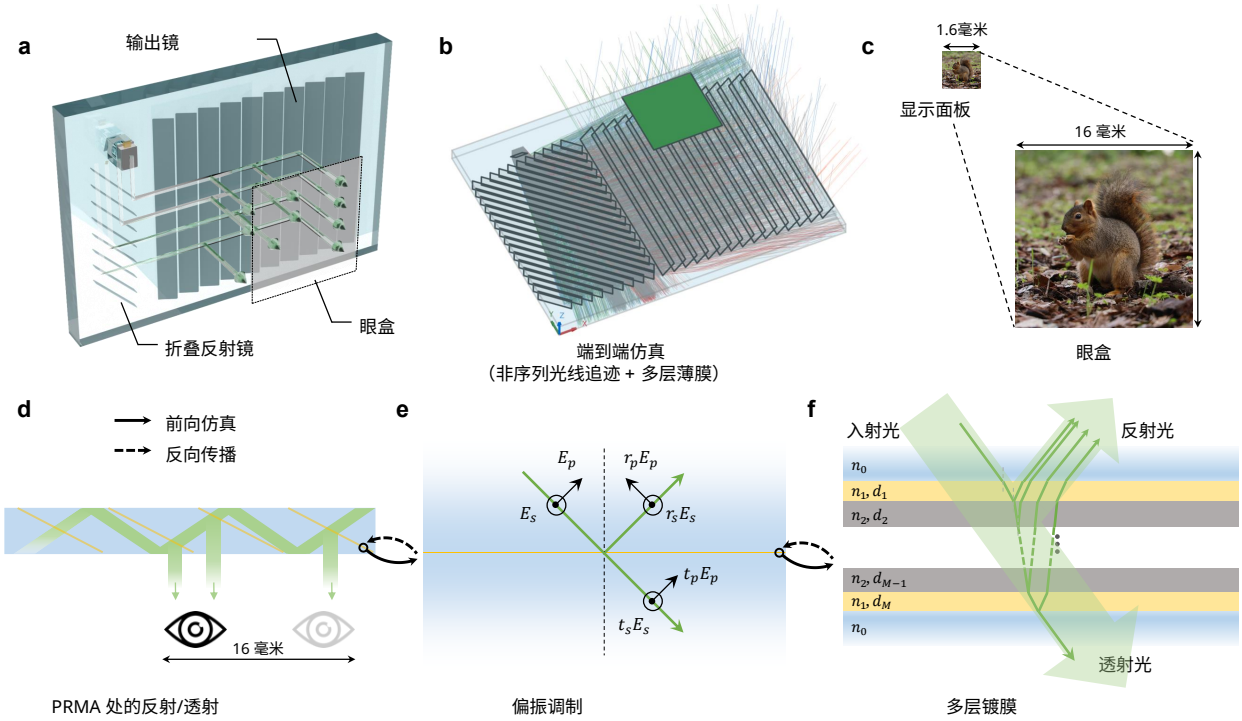

图 1：**几何波导架构及我们提出的可微优化方法示意图。a**GWG 采用部分反射镜阵列，将光线从显示引擎引导至用户瞳孔。出瞳相对于输入瞳孔（显示面板）进行复制和扩展。**b** 我们建立了端到端可微仿真，涵盖 PRMA 几何结构以及每个反射镜上的多层涂层，从而实现系统级优化。**c** 一个代表性的 GWG 实现了 100× 瞳孔扩展，使眼盒处的尺寸从 1.6 毫米 × 1.6 毫米显示面板增至 16 毫米 × 16毫米，视场为 38° × 38°。**d** 在每个部分反射镜处，光线会被反射或透射。我们使用可微的非序列蒙特卡洛光线追迹来模拟 GWG 内的这些光路。在眼盒区域，输出镜阵列将光线耦出至较大的区域。**e** 每个反射镜均镀有可调制偏振的多层薄膜。**f** 可微传递矩阵求解器 [27] 可计算多层涂层的有效菲涅耳系数。在前向传播过程中，光线沿采样路径携带梯度信息。在反向传播过程中，系统会自动计算眼盒图像相对于薄膜厚度的梯度，从而实现基于梯度的优化。

且阻碍系统级优化。更关键的是，这些相互独立的方法往往无法在设计阶段考虑偏振效应，导致制成的原型性能显著下降。第三，光学优化通常采用基于采样的策略（例如遗传算法）或有限差分梯度估计。前者通常效率低下，且在高维参数空间中容易陷入局部极小值；后者则在处理多层堆叠结构时计算成本高昂。尽管可微光学已支持多种光学系统的基于梯度的设计 [24, 25, 9, 26], 但据我们所知，它在 GWG 中的应用仍未得到探索，而这类应用涉及耦合的非序列光传输和薄膜偏振物理。综上，这些局限使 GWG 设计耗时且计算成本高昂；为达到光效率和均匀性目标，往往需要使用集群级计算资源并进行数日优化。

在此，我们通过涵盖 PRMA 几何结构与多层薄膜的端到端可微仿真，实现对 GWG 涂层进行可扩展的基于梯度的优化。具体而言，我们（i）提出可微的非序列蒙特卡罗偏振光线追迹，在每个部分反射镜处以概率方式采样反射/透射事件；（ii）集成一种基于传输矩阵法的可微薄膜求解器 [27]，以捕捉涂层引起的偏振效应。这种端到端可微的表述能够实现高效仿真，并将梯度从眼盒指标直接反向传播至设计参数。此外，我们（iii）结合节省内存的策略，以支持在单台多 GPU 工作站上进行优化；并提出一种离散优化策略，通过将不必要涂层层的厚度减至零，实现自动剪除。综上，我们将 GWG 涂层设计从相互分离的逐镜调优，转变为可处理的系统级梯度优化问题。

为展示这些能力，我们对一种具有代表性的 GWG架构进行端到端优化。我们采用可微蒙特卡洛估计器和传输矩阵薄膜模型，在可制造的厚度范围内从随机初始值出发，对所有 PRMA涂层堆叠进行联合优化。尽管涉及一千多个层厚参数以及数十亿个非序列光线-表面交点，整个优化过程仍可在单台多 GPU 工作站上运行，并在数小时内自动收敛。在这一设计中，光效率和均匀性（视场与眼盒）均得到显著提升。我们通过与确定性光线分裂及参考薄膜求解器进行交叉验证（补充说明），并证明其收敛速度快于遗传算法基线且所得最优解更优。最后，我们将该框架扩展至系统级光学-数字协同设计，通过联合优化波导和神经图像预处理网络，补偿眼盒处残留的不均匀性。

结果

我们通过对非顺序蒙特卡洛偏振传输和传输矩阵薄膜模型进行可微分计算，联合优化所有 PRMA涂层堆叠。我们从层厚度范围内的随机初始化开始，并在优化过程中对过参数化堆叠进行剪枝，使光效率提高 $\sim 8\times$，同时分别将整个视场内和眼盒内的非均匀性降低 $\sim 11\times$ 和 $\sim 17\times$，性能优于遗传算法基线（图 2）。我们首先详细介绍波导架构和目标函数，然后分析优化后的堆叠及剪枝行为，并量化支持大规模优化的节省内存策略。最后，我们将介绍光学-数字协同设计，作为一种系统级扩展。

系统架构

图 **1a** 展示了所考虑的 GWG配置。该波导采用厚度为 1.7 mm、折射率为 1.9 的玻璃基底。输入镜将光线从 1.6 mm $\times$ 1.6 mm 的显示面板耦合进入波导，光线在其中经历多次全内反射（TIR），随后到达部分反射镜阵列（PRMA）。GWG包含 30 个用于垂直瞳孔扩展的折叠反射镜，以及 16 个用于水平扩展并向眼盒出耦合的输出镜（图 **1b,c**）。在每次 PRMA相互作用中，光线会被反射或透射（图 **1d**）；随后，光线在反射镜与波导边界之间以非顺序方式传播，直至向眼盒出射。眼盒尺寸为 16 mm $\times$ 16 mm，出瞳距离为 15 mm，对应于 $10\times$ 的水平瞳孔扩展和 $10\times$ 的垂直瞳孔扩展；视场为 $38^\circ \times 38^\circ$。反射和透射具有偏振依赖性，并通过多层涂层借助有效菲涅耳系数进行控制（图 **1e,f**）。每个反射镜均镀有 23 层 Ta_2O_5/SiO_2 堆栈，在所有 PRMA中产生超过一千个可优化层厚度。层厚度被限制在 20–200 nm 之间，此外还设有一种机制，可通过将层厚度驱动至 0 来对层进行剪枝。

我们采用非序列蒙特卡洛光线追迹模拟光传播，并使用薄膜求解器对镀膜引起的偏振效应进行建模（图 **1b**）。对于每个视场采样点，我们从显示面板发射平行光线，并追迹其在波导中的传播。为模拟色差效应，我们对每个 RGB 通道的三个波长取平均值（红色：620/660/700 nm；绿色：500/530/560 nm；蓝色：450/470/490 nm）。对视场角进行采样，可得到每个瞳孔位置对应的二维 RGB 图像。我们在眼盒内评估瞳孔位置的 a 3×3 网格，并将相应的瞳孔图像作为优化目标（见补充说明）。

端到端可微镀膜设计

端到端可微模型使得我们能够沿采样光线路径，将眼盒图像的梯度反向传播至多层膜厚度参数。我们使用多目标损失函数优化亮度和均匀性：

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{bright}} + w_f \cdot \mathcal{L}_{\text{FoV}} + w_e \cdot \mathcal{L}_{\text{eyebox}}, \tag{1}$$

其中，$\mathcal{L}_{\text{bright}} = -I$ 用于提升亮度，I 为眼盒通光率的平均值（到达眼盒的输入功率占比），该值在瞳孔位置、视场采样点和颜色通道上取平均。为量化非均匀性，我们采用变异系数（CV；标准差除以均值）。与方差相比，它对尺度不那么敏感，有助于避免收敛到强度接近零的解。我们设定 $\mathcal{L}_{\text{FoV}} = \text{CV}_{\text{FoV}}$ 和 $\mathcal{L}_{\text{eyebox}} = \text{CV}_{\text{eyebox}}$，并采用权重$w_f = 10.0$ 和 $w_e = 3.0$。我们执行 1,000 次优化迭代，使用 32×32 角度视场网格，每个视场采样点发射 10,000 条光线；每条光线最多追迹 100 次相互作用。

层厚度初始化为厚度范围中点处的高斯分布。经过可微优化后，眼盒通光率从 4.1% 提升至 33.5%（$\sim 8\times$）。均匀性也有所改善：CV_{FoV}从 1.181 降至 0.105（$\sim 11\times$），$\text{CV}_{\text{eyebox}}$ 从 1.369 降至 0.081（$\sim 17\times$）（图 **2a**）。我们采用基于采样的遗传算法基线进行比较，其眼盒通光率达到 7.9%。为保守起见，在正向仿真设置相同的条件下，我们为遗传算法提供了六倍的实际运行时间（72 小时，而非 12 小时）

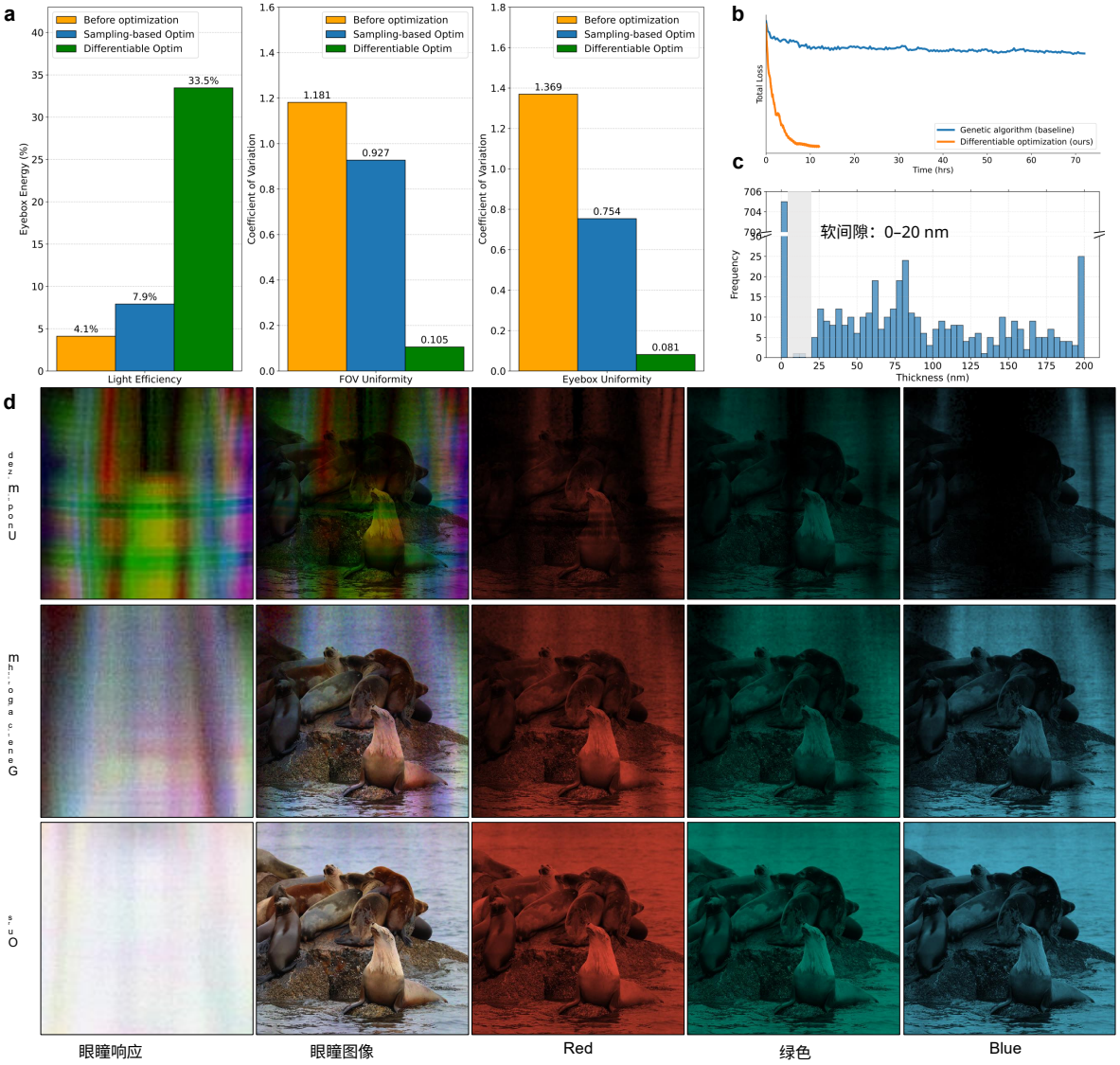

图 2：**GWG 涂层端到端可微优化的评估。a** 初始设计、遗传算法基线和我们的可微优化方案的光效率与均匀性，以眼盒通光率衡量 I （到达眼盒的输入功率比例）、$\mathrm{CV}_{\mathrm{FoV}}$ 和 $\mathrm{CV}^{\mathrm{eyebox}}$ （所有指标均为采用不同随机种子的五次蒙特卡洛运行的平均值）。**b** 可微优化和遗传算法基线的损失曲线。基于梯度的优化收敛更快，且达到的损失更低。**c** 优化后多层堆叠结构的厚度分布。若干层的厚度趋近于零，表明它们可在最终设计中移除。离散优化策略支持从过参数化初始堆叠结构开始，并在优化过程中进行剪枝。**d** 初始设计、遗传算法和可微优化方案在眼盒中心的模拟瞳孔响应（256×256）、显示图像及 RGB通道（512×512）。可微优化提高了亮度，并降低了视场和眼盒不均匀性。

。基于梯度的优化收敛更快，且达到的损失低于遗传算法基线；遗传算法基线难以有效探索高维空间（图 2**b**）。相较于该基线，¯可微优化使 ∼4提高了2×，并分别将 $\mathrm{CV}_{\mathrm{FoV}}$ 和 $\mathrm{CV}^{\mathrm{eyebox}}$ 降低了 ∼9× 和 ∼9×。优化过程中，部分层的厚度趋近于零（图 2**c**），从而能够对过参数化初始堆叠结构进行拓扑剪枝。在离散厚度策略下，我们在 0 至 20 nm 之间设置软间隙，以体现实际中的最小厚度，同时仍允许层被消除。图 2**d** 展示了模拟的中心瞳孔响应（512×512）、初始设计、遗传算法和可微优化所对应的显示图像及 RGB通道。初始设计显示的图像存在明显的不均匀性和死区，

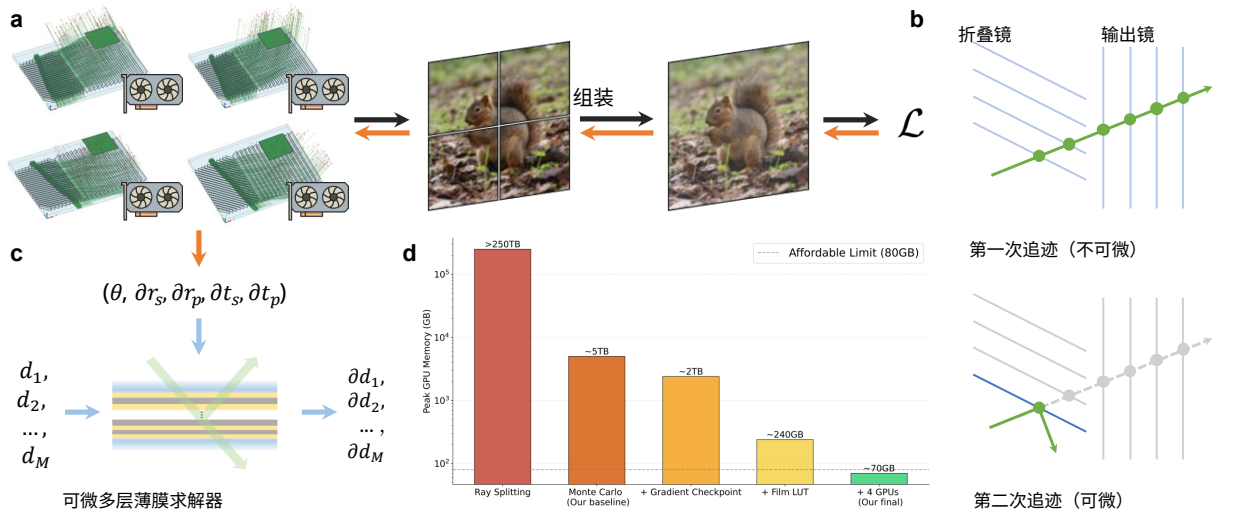

图 3：**GWG 系统大规模可微优化的节省内存策略。a**眼盒处的瞳孔图像被划分为视场分块，并分配到多个图形处理器上。将这些分块组合成完整视场图像以计算损失；在反向传播过程中，先在完整图像上计算梯度，再将其分散回对应的图形处理器。**b** 可微蒙特卡洛光线追迹采用两遍相交策略。第一遍中，我们在不追踪梯度的情况下计算光线-表面交点，并记录相交的表面。第二遍中，我们仅以可微模式重新计算这些交点。**c** 我们使用梯度检查点，将光线追迹和薄膜求解器中的反向传播解耦。首先将梯度反向传播至有效菲涅耳系数并存储；随后通过多层薄膜求解器进行反向传播，利用存储的中间结果更新层厚度。**d** 采用这些策略时的 GPU 内存峰值用量，使得在单台工作站上进行大规模可微优化成为可能。

而可微优化则提高了亮度，并减少了视场和眼盒的非均匀性。所有报告的指标均为五次使用不同随机种子的蒙特卡洛运行的平均值。补充说明中提供了其他评估结果。

为使这种大规模优化具有可行性，我们在 PyTorch 中实现了多种节省内存策略（图 3）。我们将瞳孔图像划分为跨图形处理器分配的视场分块，以实现计算并行化（图 **3a**）；采用两遍相交策略进行可微非序列光线追迹（图 **3b**）；并应用梯度检查点，将光线追迹和薄膜求解器中的反向传播解耦（图 **3c**）。此外，我们预先计算离散入射角集合上的薄膜响应，并使用可微插值处理中间角度。综合采用这些策略可降低峰值内存使用量（图 **3d**）；更多细节请参见补充说明。

网络-光学协同设计

涂层优化主要校正全局通光量和大尺度非均匀性，而残余伪影（例如条纹图案）源于离散的 PRMA 几何结构，仅靠涂层很难消除。因此，我们将框架扩展为联合优化神经图像预处理器和 GWG 涂层（光学-数字协同设计），以补偿这些残余伪影。我们使用以下损失函数

$$\mathcal{L}' = \|T - \mathcal{N}(T) \odot I\| + \omega\mathcal{L}, \tag{2}$$

其中，T 是目标显示图像，I 是模拟的 GWG 眼盒响应，$\mathcal{N}$ 是神经网络，$\odot$表示逐元素乘法。权重因子 ω 用于平衡图像保真度和光学损失。我们使用 NAFNet [28] 作为紧凑型主干网络（含 268 万个参数），以实现低延迟部署。我们使用 1,000 张训练图像从头开始训练，并使用 100 张验证图像进行评估。数据集由数码单反相机拍摄而成，提供高分辨率自然图像（裁剪为 1024×1024），同时避免版权限制。该流程与数据集无关，这些图像仅用于优化通用预处理器。

显示面板发出的图像首先由神经网络处理，然后再射入 GWG（图 **4a**）。网络和涂层参数经过联合优化，以提升眼盒处的感知图像质量。在验证集上，峰值信噪比/结构相似性从 12.04 dB/0.388（未优化）提升至仅涂层优化后的 24.67 dB/0.798，并在端到端协同设计后达到 31.04 dB/0.955（图 **4b**），图像保真度显著提升

联合优化提升了图像保真度。图 **4c**展示了示例输出。涂层优化降低了整体不均匀性，但由于波导几何结构的影响，仍存在细微尺度的伪影；联合优化则进一步补偿了这些伪影，并提升了图像质量。

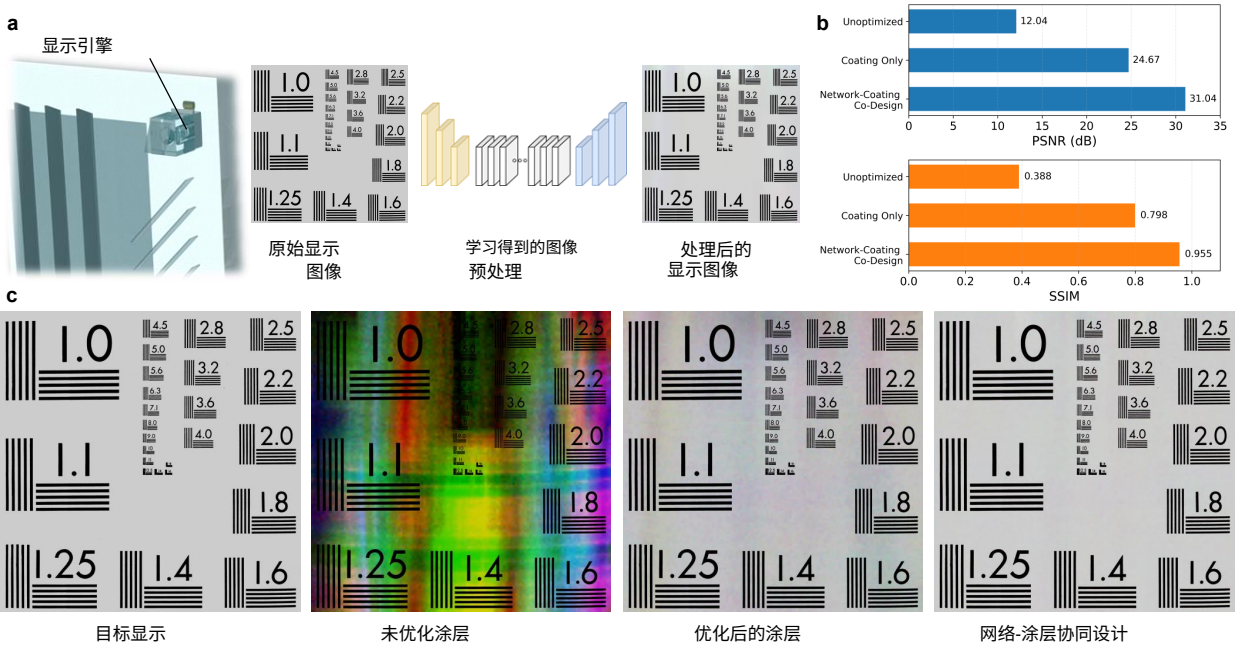

图4：**图像预处理与 GWG 涂层的端到端协同设计**。**a** 图像显示前，神经网络会对其进行处理，然后将其送入 GWG。通过联合优化神经网络和涂层参数，提升眼盒处的感知图像质量。**b** 在验证集上测得的峰值信噪比和结构相似性。仅涂层优化和端到端协同设计均能提升图像质量，而端到端协同设计还能进一步补偿残余伪影，改善图像质量。**c** 输出示例。未经优化的涂层会产生亮度较暗且存在不均匀性的图像；涂层优化可提升亮度并减少整体不均匀性；端到端协同设计则能进一步补偿残余伪影，改善图像质量。

讨论

我们提出了一种面向几何波导显示器的大规模端到端可微优化框架，将非序列光传输与偏振相关多层薄膜建模相结合。该方法能够在复杂光学系统中对高维涂层堆栈进行基于梯度的优化，并且相较于基于采样的基线方法加快了收敛速度。通过结合概率路径采样、可微传输矩阵薄膜求解器和节省内存策略，我们能够优化过参数化层堆，并在离散约束下将不必要层的厚度趋近于零，从而实现剪枝。在一项具有代表性的设计中，这些能力显著提升了眼盒范围内的效率和均匀性；同一框架还支持与神经图像预处理器进行系统级协同设计，以进一步提升感知图像质量。

这种端到端可微表述将 GWG 涂层设计从彼此割裂的逐镜调优转变为系统级基于梯度的优化问题，使其能够快速迭代并探索高维设计空间。从过参数化层堆出发，并在离散约束下对层进行剪枝，可减少预先指定堆栈拓扑结构的必要性；同一可微流水线还支持与显示引擎协同优化（例如，基于学习的图像预补偿），以实现感知目标。不过，要实现部署仍缺少一些环节，例如实验验证。

若干局限性为未来改进指明了方向。首先，我们主要在固定 PRMA 几何结构的条件下优化涂层厚度。将参数化范围扩展至镜面倾斜和旋转，可增加塑造能量流的自由度，并有望进一步提升效率和均匀性。其次，我们的目标函数针对假设系统模型下的眼盒图像质量进行优化。纳入与实际部署相关的其他物理因素，例如杂散光、波导漏光和环境反射，可让优化器明确权衡透视质量与伪影抑制。最后，尽管我们通过

独立的正向仿真工作流（补充说明）验证了优化设计，但实验原型将是迈向实际部署的重要一步。

更广泛地说，可微非序列框架开辟了多个研究方向。通过参数化基底曲率来支持曲面波导几何，将能够针对消费级产品形态中的人体工学与美学进行协同优化 [29, 11]。集成更真实的投影光学系统（包括像差、对准公差和耦合效率）将推动从光源到眼盒的真正端到端优化。除波导之外，通过将鬼影路径分析直接纳入损失函数，可将可微光线追迹与薄膜建模相结合的方法应用于折射光学元件的抗鬼影涂层设计或透镜涂层设计。

方法

多层薄膜求解器

每个反射镜上的多层涂层会调制反射光线和透射光线的偏振。我们使用介质 i 与介质 j界面处的菲涅耳系数。对于 s偏振（TE）和 p偏振（TM），这些系数为:

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{n_i\cos\theta_i - n_j\cos\theta_t}{n_i\cos\theta_i + n_j\cos\theta_t}, \qquad t_s = \frac{2n_i\cos\theta_i}{n_i\cos\theta_i + n_j\cos\theta_t} \\ r_p &= \frac{n_j\cos\theta_i - n_i\cos\theta_t}{n_j\cos\theta_i + n_i\cos\theta_t}, \qquad t_p = \frac{2n_i\cos\theta_i}{n_j\cos\theta_i + n_i\cos\theta_t} \end{aligned} \tag{3}$$

其中， n_i 与 n_j 分别为介质 i 和 j的折射率， θ_i 为入射角， θ_t 为根据斯涅尔定律确定的透射角。为对薄膜进行建模，我们通过对多次内部反射的振幅求和（艾里公式），计算单层薄膜的有效复反射（r_{eq}）和透射（t_{eq}）系数:

$$r_{eq} = \frac{r_{12} + r_{23}e^{-2i\delta}}{1 + r_{12}r_{23}e^{-2i\delta}}, \quad t_{eq} = \frac{t_{12}t_{23}e^{-i\delta}}{1 + r_{12}r_{23}e^{-2i\delta}} \tag{4}$$

其中， r_{12}, t_{12} 和 r_{23}, t_{23} 是两个层边界处的菲涅耳系数。相位厚度为 $\delta = 2\pi n d\cos\theta/\lambda$，其中 d是层厚度，n是折射率， λ是波长， θ是层内的传播角。为获得多层堆叠结构的有效反射系数和透射系数（适用于 s 偏振和 p 偏振），我们采用传输矩阵法（TMM） [27]。精度和效率评估见补充说明。

偏振光线追迹

我们执行偏振光线追迹 [30]，以传播每条光线的复电场矢量。在每个涂层界面处，我们将电场投影到局部 s 和 p 基底上。利用上文计算得到的有效菲涅耳系数，反射和透射的复振幅为

$$\mathbf{E}_{\text{reflected}} = r_s\mathbf{E}_s\hat{s} + r_p\mathbf{E}_p\hat{p}, \quad \mathbf{E}_{\text{transmitted}} = t_s\mathbf{E}_s\hat{s}' + t_p\mathbf{E}_p\hat{p}', \tag{5}$$

其中，$\hat{s}$ 和 $\hat{}p$ 是反射光线的局部 s 和 p 单位矢量，$\hat{s}'$ 和 $\hat{}p'$ 是透射光线对应的单位矢量。系数（r_s, r_p, t_s, t_p）是上一节计算得到的有效菲涅耳系数。由于 s/p 基底取决于表面法向量和光线方向，因此我们在每个界面处都会重新计算基底并重新投影电场，然后再进行变换。

方程（3）、（4）和（5）将镀膜性能与设计参数（层厚度）、入射角及偏振态关联起来。该求解器基于 PyTorch 实现，支持自动微分，因此能够通过基于梯度的优化来优化层厚度。在我们的实验中，第一层和最后一层采用 SiO_2 ($n = 1.46$)，中间各层采用 Ta_2O_5($n = 2.13$)；玻璃基底的折射率为 $n = 1.9$。每层的厚度限制在 20 nm 至 200 nm 之间。更多实现细节请参阅补充说明。

可微蒙特卡罗非序列光线追迹

传统的非序列光线追迹会在每次交互时将一条光线分成反射和透射分支 [31]。对于复杂的 GWG架构，这会导致光线数量呈指数级增长，并带来高昂的计算和内存开销。它

也难以高效求导，因为完全可微的实现会进一步增加内存和计算开销。因此，我们采用可微蒙特卡罗非序列光线追迹。在每个部分反射镜处，光线会以随机方式发生反射或透射。为在偏振光线追迹中保持能量守恒，我们根据采样概率缩放采样路径的复振幅：

$$\mathbf{E}'_{\text{reflected}} = \frac{\mathbf{E}_{\text{reflected}}}{\sqrt{\omega}}, \quad \mathbf{E}'_{\text{transmitted}} = \frac{\mathbf{E}_{\text{transmitted}}}{\sqrt{1-\omega}} \tag{6}$$

其中 ω 是光线在反射镜处的反射概率。蒙特卡洛采样使光线数量保持不变，从而在内存有界的情况下实现高效的 GPU 并行计算。为使梯度能够通过随机采样传播，我们采用了一种重参数化方法，将事件采样与物理系数解耦，使梯度能够在反向传播过程中传播。为进一步降低内存占用，我们采用了上述两遍相交策略（图 3b），将自动微分计算图限制在每条光线实际相交的表面上。

与可微分序列光线追迹类似， [25, 24, 26], 这一公式使基于梯度的优化成为可能，同时保持高效的 GPU 并行计算。在我们的实现中，有界的内存占用使得配备四块 NVIDIA A100（80GB）图形处理器的单台工作站能够进行大规模 GWG 优化模拟。眼盒处的强度通过复振幅平方的非相干和计算：$\mathrm{I} = \sum_i |\mathbf{E}_i|^2$。重参数化使梯度能够从损失函数（公式 1）经由光线追迹反向传播至涂层厚度参数。更多实现细节见补充说明。

学习得到的反射概率

为提高采样效率和优化稳定性，我们在优化过程中使用学习得到的反射概率(ω)。首先，我们运行预优化阶段，确定每个反射镜的 ω，以最大化到达瞳孔平面的通光量。在此阶段，将每种镀膜理想化为标量反射率（反射能量占入射能量的比例），并进行不考虑偏振的几何光线追迹。随后，我们在进行偏振追迹的同时优化多层膜厚度，并使用学习得到的 ω 进行蒙特卡洛采样。若不进行预优化，到达瞳孔平面的光线会很少，导致优化不稳定且梯度噪声较大。更多详情请参阅补充说明。

参考文献

[1] Seungjae Lee、Mengfei Wang、Gang Li、Lu Lu、Yusufu Sulai、Changwon Jang 和 Barry Silverstein。《Scientific Reports》，10(1):16127，2020年。[2] Jianghao Xiong、En-Lin Hsiang、Ziqian He、Tao Zhan 和 Shin-Tson Wu。增强现实与虚拟现实显示：新兴技术与未来展望。*Light: Science & Applications*，10(1)，2021年10月。[3] Bernard Kress 和 Thad Starner。头戴式显示器（HMD）技术及其在消费电子领域应用综述。*Photonic Applications for Aerospace, Commercial, andHarsh Environments IV*，8720:62–74，2013年。[4] Zhujun Shi、Risheng Cheng、Guohua Wei、Steven A Hickman、Min Chul Shin、Peter Topalian、Lei Wang、Dusan Coso、Youmin Wang、Qingjun Wang 等。通过大规模光子集成电路实现平板激光显示。《自然》，644(8077):652–659，2025年。[5] Hong Hua 和 Bahram Javidi。三维积分成像光学透视式头戴显示器。*Optics express*，22(11):13484–13491，2014年。[6] Jannick P Rolland。大视角、离轴透视式头戴显示器。*Optical engineering*，39(7):1760–1767，2000年。[7] Changwon Jang、Kiseung Bang、Seokil Moon、Jonghyun Kim、Seungjae Lee 和 Byoungho Lee。视网膜三维：通过瞳孔追踪光场投影至视网膜实现的增强现实近眼显示。*ACM Transactions onGraphics*，36(6):1–13，2017年11月。[8] Gun-Yeal Lee、Jong-Young Hong、SoonHyoung Hwang、Seokil Moon、Hyeokjung Kang、Sohee Jeon、Hwi Kim、Jun-Ho Jeong 和 Byoungho Lee。用于增强现实的超表面目镜。《自然·通讯》，9(1)，2018年11月。[9] Ethan Tseng、Grace Kuo、Seung-Hwan Baek、Nathan Matsuda、Andrew Maimone、Florian Schiffers、Praneeth Chakravarthula、Qiang Fu、Wolfgang Heidrich、Douglas Lanman 和 Felix Heide。用于超广角高保真全息显示的神经网络展度扩展器。《自然·通讯》，15(1)，2024年4月。

[10] Jannick PRolland 和 JeremyGoodsell。基于波导的增强现实显示器：综述。*Light: Science&Applications*，13(1):22，2024。

[11] Jiacheng Weng、Chunyang Pei、Haifeng Li、Rengmao Wu 和 Xu Liu。基于自由曲面偏振体全息图的曲面波导显示器设计与制造。Optics Express，33(7):15362，2025年3月。[12] Manu Gopakumar、Gun-Yeal Lee、Suyeon Choi、Brian Chao、Yifan Peng、Jonghyun Kim 和 Gordon Wetzstein。采用超表面波导的全彩3D全息增强现实显示器。《自然》，629(8013):791–797，2024年5月。[13] Changwon Jang、Kiseung Bang、Minseok Chae、Byoungho Lee 和 Douglas Lanman。面向3D增强现实眼镜的波导全息术。《自然·通讯》，15(1)，2024年1月。[14] M. G. Moharam 和 T. K. Gaylord。介质表面浮雕光栅的衍射分析。《美国光学学会杂志》，72(10):1385，1982年10月。[15] J. Michael Miller、Nicole de Beaucoudrey、Pierre Chavel、Jari Turunen 和 Edmond Cambril。用于平面光互连的二元倾斜表面浮雕光栅设计与制造。《应用光学》，36(23):5717，1997年8月。[16] Dongwei Ni、Dewen Cheng、Yue Liu、Ximeng Wang、Cheng Yao、Tong Yang、Cheng Chi 和 Yongtian Wang。利用粒子群优化提升二维表面浮雕光栅波导显示器的均匀性。Optics Express，30(14):24523，2022年6月。[17] Yishi Weng、Yuning Zhang、Wei Wang、Yuchen Gu、Chuang Wang、Ran Wei、Lixuan Zhang 和 Baoping Wang。基于偏振体光栅的衍射波导高效紧凑二维出瞳扩展设计。Optics Express，31(4):6601–6614，2023年。[18] Suyeon Choi、Changwon Jang、Douglas Lanman 和 Gordon Wetzstein。用于大展度紧凑型混合现实显示器的合成孔径波导全息术。《自然·光子学》，19(8):854–863，2025年。[19] Yochay Danziger、Ronen Chiki 和 Jonathan Gelberg。具有二维扩展功能的光导光学元件光学系统，2021年4月。[20] Dewen Cheng、Qiwei Wang、Li Wei、Ximeng Wang、Lijun Zhou、Qichao Hou、Jiaxi Duan、Tong Yang 和 Yongtian Wang。采用单层二维瞳孔扩展几何波导的广角增强现实显示器设计方法。《应用光学》，61(19):5813，2022年6月。[21] Luo Gu、Dewen Cheng、Qiwei Wang、Qichao Hou 和 Yongtian Wang。二维无杂散光几何波导抬头显示器的设计。《应用光学》，57(31):9246–9256，2018年。[22] Miaomiao Xu 和 Hong Hua。增强现实显示器中带微结构反射镜的几何光波导的优化与评估方法。Optics Express，27(4):5523，2019年2月。[23] Ningye Ruan、Feng Shi、Ye Tian、Peng Xing、Wanli Zhang 和 Shuo Qiao。基于正向光线追迹和最大视场分析的超薄二维几何波导近眼显示器设计方法。Optics Express，31(21):33799，2023年9月。[24] Xinge Yang、Qiang Fu 和 Wolfgang Heidrich。从头学习的深度折射光学的课程学习。《自然·通讯》，15(1)，2024年8月。[25] Congli Wang、Ni Chen 和 Wolfgang Heidrich。do：用于计算成像系统深度镜头设计的可微引擎。《IEEE计算成像汇刊》，8:905–916，2022年。[26] Xinge Yang、Matheus Souza、Kunyi Wang、Praneeth Chakravarthula、Qiang Fu 和 Wolfgang Heidrich。利用可微光线-波模型进行端到端混合折射-衍射镜头设计。载于 SIGGRAPH Asia 2024会议论文集，第1–11页，2024年。[27] Oskar Sigmund Heavens。薄膜的光学性质。《物理学进展报告》，23(1):1，1960年。[28] Liangyu Chen、Xiaojie Chu、Xiangyu Zhang 和 Jian Sun。《图像复原的简单基线》，第17–33页。Springer Nature Switzerland，2022年。[29] Craig T. Draper 和 Pierre-Alexandre Blanche。用于抬头显示/增强现实且具有一维瞳孔扩展功能的全息曲面波导合光器。Optics Express，30(2):2503，2022年1月。[30] Russell A Chipman。偏振光线追迹的力学。《光学工程》，34(6):1636–1645，1995年。[31] Donald C. O’Shea 和 Julie L. Bentley。使用 Zemax OpticStudio® 进行光学设计。SPIE，2024年1月。