混合概率采样网络实现超高准确性结构色设计

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41166.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

混合概率采样网络实现超高准确性结构色设计。 导读

结构色利用纳米结构对光的散射与干涉等作用呈现出丰富的色彩，在高清显示、信息加密等领域拥有巨大潜力。然而，颜色与纳米结构间存在一对多的复杂映射关系，导致逆设计过程难以兼顾高精度与多解输出。现有神经网络方法如混合密度网络、串联网络等，面临精度不足或预测结构单一的限制。近日，同济大学物理科学与工程学院程鑫彬、严钢、施宇智、魏泽勇等人与新加坡国立大学仇成伟团队合作提出混合概率采样网络（MPSN），通过输出结构参数的混合高斯分布并多次采样评估，实现了高精度、高容量、宽色域的结构色逆设计，网络预测准确率高达99.9%。该研究为纳米光子器件逆设计提供了新范式，在超分辨成像、动态显示与光学加密等领域应用前景广阔。相关研究成果以Ultraprecision, high-capacity, and wide-gamut structural colors enabled by a mixture probability sampling network，为题发表于《Light: Science Applications》。

研究背景

随着纳米光子学与人工智能的发展，基于深度学习的逆设计方法成为实现高性能超表面器件的关键途径。结构色作为一个典型应用，其设计目标是从目标颜色反向求解具备特定光谱响应的纳米结构。然而，光学响应与几何参数间存在严重的非唯一性映射，即同一颜色可由多种不同结构实现，导致传统神经网络在训练中难以收敛，或仅能输出单一解，无法满足实际应用对结构多样性与设计自由度的需求。尽管串联网络、混合密度网络、条件生成对抗网络等方法在一定程度上缓解了该问题，但仍受限于精度损失、分布失配或随机噪声干扰，难以在复杂多参数结构中实现高精度多解输出。

研究亮点

1.提出混合概率采样网络框架，实现分布采样与最优筛选

MPSN将混合密度网络与预训练前向网络串联，构成端到端的颜色—结构—颜色映射通路。逆网络输出结构参数的混合高斯分布，通过重复采样生成多个候选结构，再经前向网络预测其颜色，选取误差最小的样本进行反向传播，如图1。该策略既扩展了解空间，又通过物理约束保障了解的有效性，显著提升训练稳定性与设计精度。

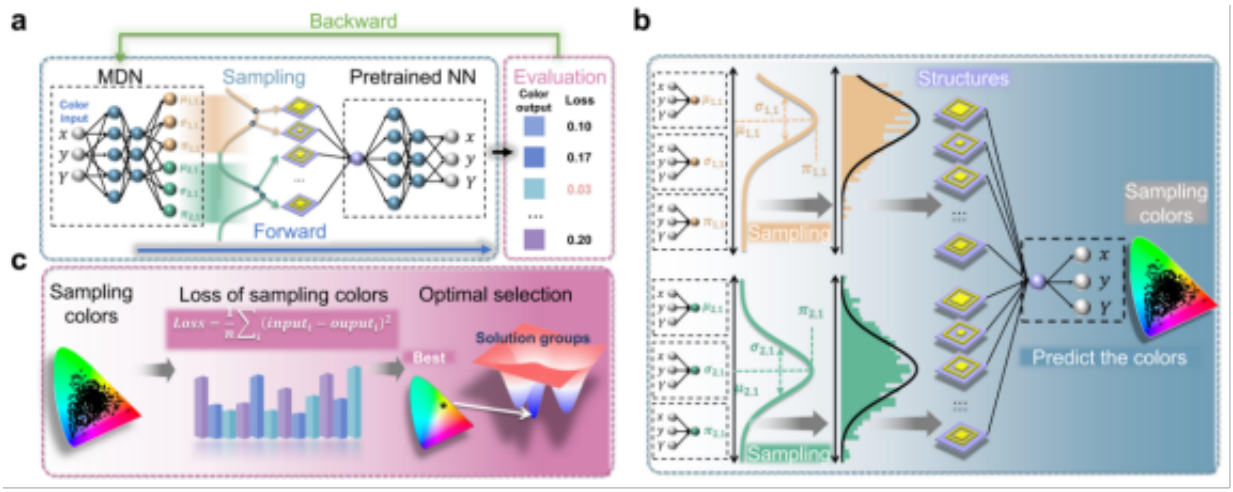


图1：a. MPSN架构，通过混合密度网络将目标颜色映射为结构参数的混合高斯分布，结合预训练前向网络实现端到端优化。b.
网络细节：混合高斯分布经多次采样生成多种候选结构，经由前向网络预测其光学响应。c.
评估机制：通过对比采样颜色与真实颜色的均方误差，智能筛选最优结构用于网络训练

2.结构色逆设计精度突破99.9%，色域覆盖广泛

研究团队以方形环-柱复合结构为设计单元，通过严格耦合波分析构建包含8411组数据的数据集。MPSN在测试集上实现了99.9%的预测精度，平均绝对误差低于0.002。在CIE 1931色度图中，所设计颜色覆盖远超sRGB色域，展现出优异的色彩还原能力与宽广的色域表现，如图2。

3.多项性能对比验证MPSN优越性

与混合密度网络、串联网络、变分自编码器及条件生成对抗网络相比，MPSN在均方误差收敛速度、预测一致性与结构多样性方面均表现最佳。其输出的多峰分布准确反映了解空间中的多个高概率区域，在保证高精度的同时，提供丰富的可选结构方案。

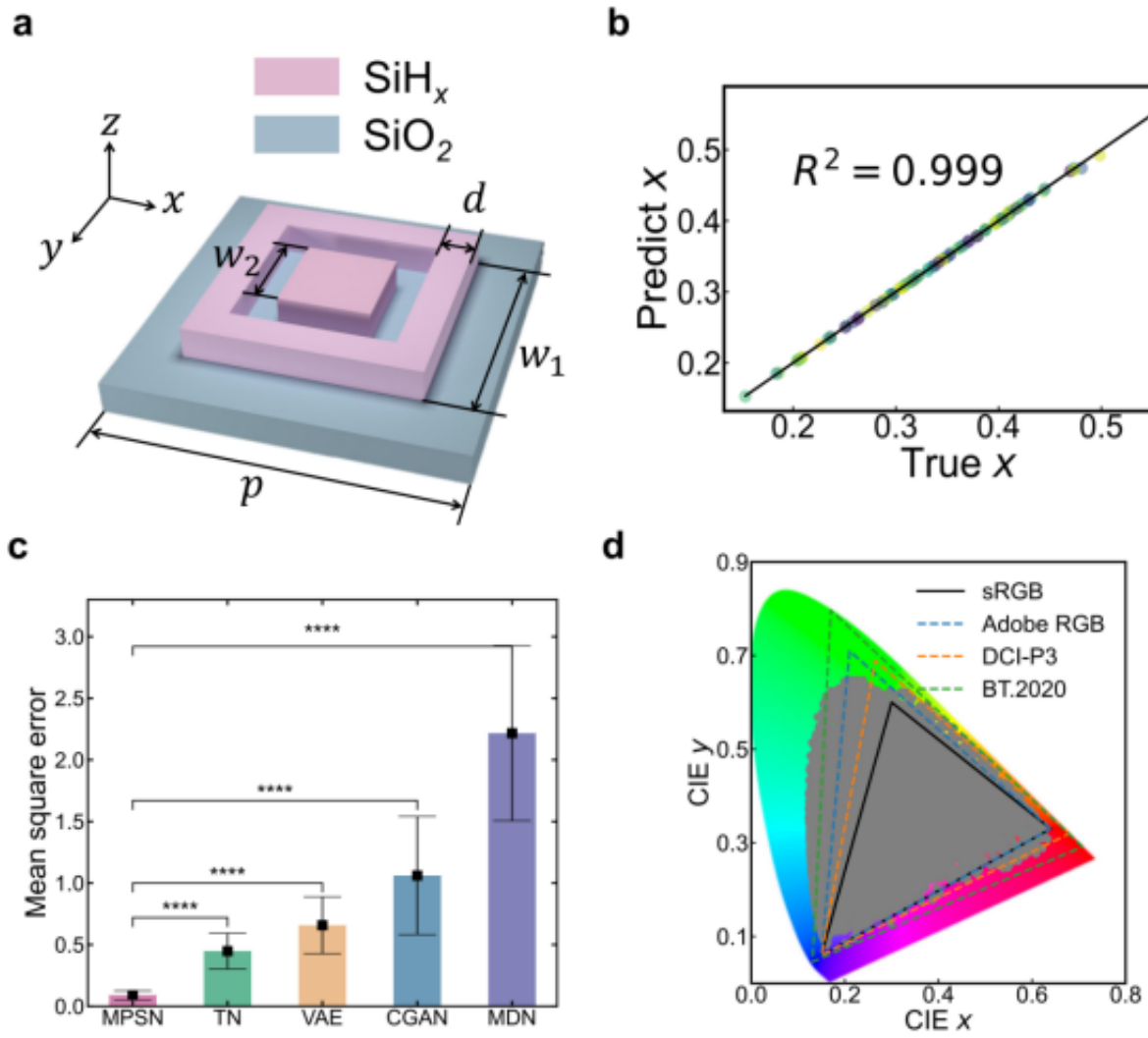


图2：a. 元结构示意图：由方形环与中心柱组成，通过周期、环宽、柱宽与环间隙四个几何参数调控光学响应。b. MPSN在测试集上的准确率。c. 五种模型测试集上均方差对比。d. 所设计颜色在CIE1931色度图中的覆盖范围。

4.实验验证与实用化演示

如图3所示，研究团队通过电子束光刻制备了16色色卡以及同济大学、新加坡国立大学、同济大学精密光学工程技术研究所三所机构徽标的结构色图像，实验测量结果与设计目标高度一致，RGB误差小于10。此外，单像素尺寸为6.7微米，色彩分辨率优于传统三单元分立设计，展示了MPSN在高分辨率图像生成与大规模制备和应用方面的潜力。

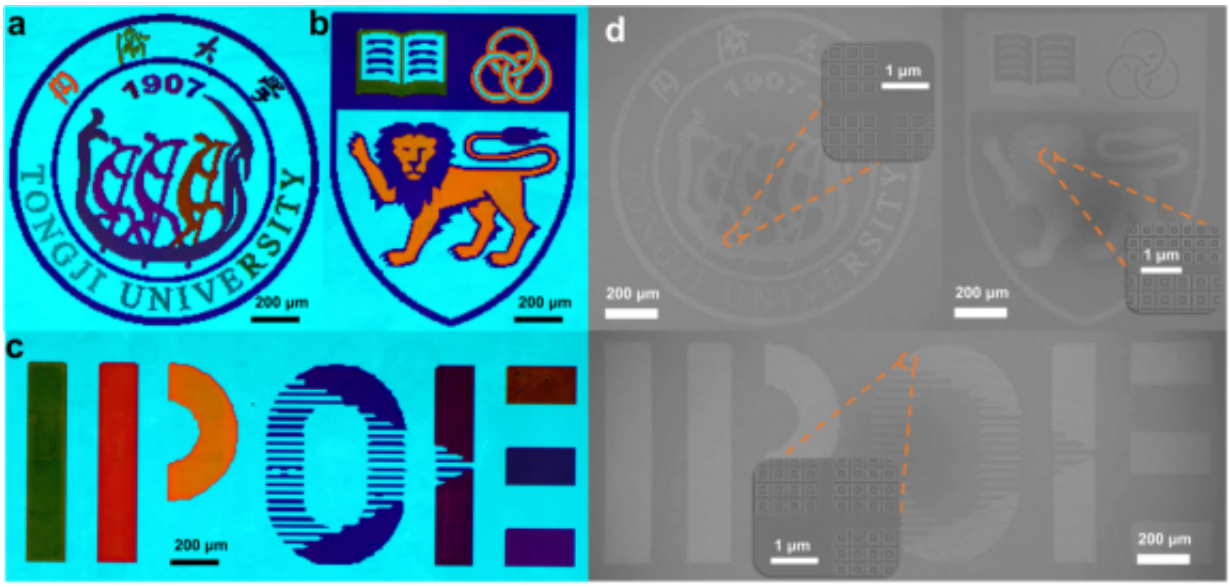


图3： 实验观测的徽标光学图像：a. 同济大学、b. 新加坡国立大学、c. 精密光学工程技术研究所。d. 三个样品的扫描电子显微镜图像。比例尺：200 μm。插图为不同颜色区域的局部放大展示，每个像素尺寸为6.7 μm且由相同纳米结构填充。局部比例尺：1 μm。

总结与展望

本研究提出的混合概率采样网络通过融合概率建模与物理约束，有效解决了纳米光子逆设计中的非唯一性问题，实现了高精度、多解输出的结构色设计。该方法不仅适用于超表面结构色工程，还可拓展至导模光学设计、等离子激元结构与新奇超材料物理等领域。未来，结合物理启发神经网络等框架，有望进一步降低对数据的依赖，增强模型的物理可解释性与泛化能力，促进智能光子设计在虚拟现实、生物传感与量子光学中的实用化进程。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-025-02122-3

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“ 来源 ”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：程鑫彬等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发