

---

# 超表面材料最新设计及前沿应用进展综述

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/24374.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！*

超表面材料最新设计及前沿应用进展综述。 1. 引言

作为具有低深度剖面的二维平面材料，超表面可以在其界面处为透射和反射的电磁波产生特定的相位分布。因此，它提供了更大的灵活性来控制波前。传统的超表面设计过程主要采用时域有限差分等前向算法并结合人工参数优化。然而，这些方法非常耗时，而且很难使设计的光谱与理想的光谱保持一致。此外，由于在单元设计过程中使用周期性边界条件，而在阵列模拟中使用非周期性条件，相邻单元之间的耦合导致不可避免的误差。

近期，来自荷兰代尔夫特理工大学的研究人员以Recent Advances in Metasurface Design and Quantum Optics Applications with Machine Learning, Physics-Informed Neural Networks, and Topology Optimization Methods为题在Light: Science Applications发表综述文章，对超表面智能设计方法的进展进行了全面的总结与展望。

在该综述中，作者详细介绍和讨论了具有代表性的超表面智能设计方法，包括机器学习、物理信息神经网络和拓扑优化方法，同时阐述了每种方法的原理，剖析了各自的优点和局限性，并讨论了它们的潜在应用。本文强调了智能超表面设计的优势，并为超表面和超材料领域的研究人员提供了最新的参考，具体包括：

## 2.1 机器学习设计超表面的基本原理

用于超表面设计的机器学习方法的基本原理流程图如图1所示。一般设计过程如下：对于简单的圆柱结构，可以使用具有多种参数组合的正向求解器算法获得电磁响应的数据集。然后可以使用这些数据集来训练深度神经网络，该网络可以在提供输入时计算电磁响应，这被称为前向网络。通过同样的训练过程，也得到了一个逆向网络。逆向网络的不同之处在于，输入是期望的响应，输出是结构的几何参数。最后使用前向求解器算法评估优化的解决方案，以确定响应是否可达到预期。

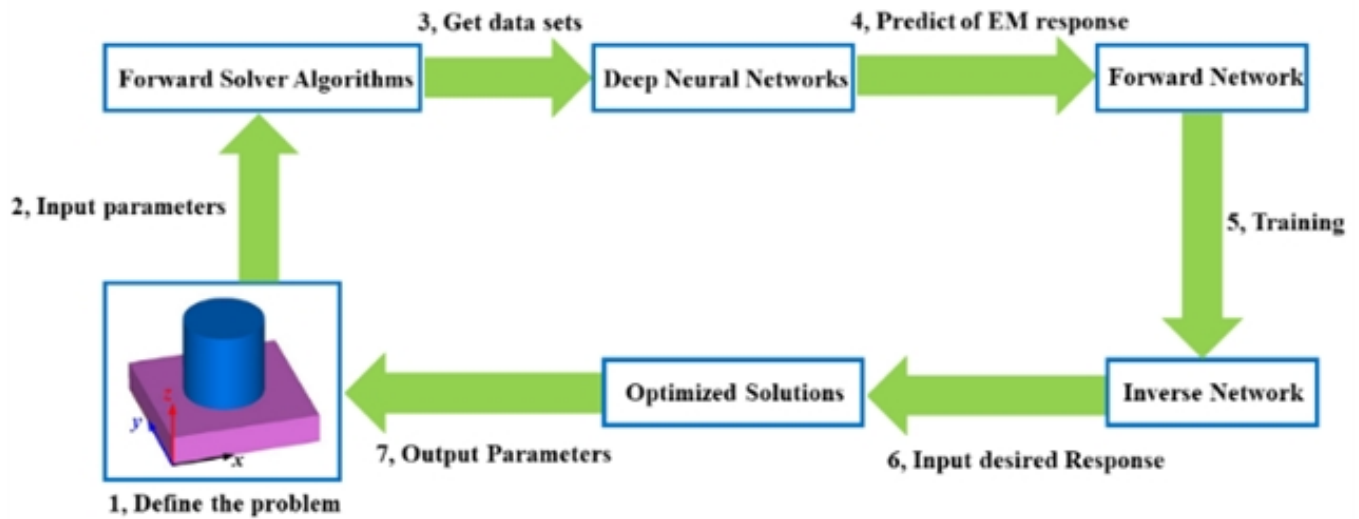


图1 超表面设计机器学习基本原理流程图步骤：定义问题，收集数据集，预处理数据，训练模型，验证模型，训练逆网络，输入期望响应，迭代优化，实现期望的性能。

## 2.2 物理信息神经网络设计超表面的基本原理

该方法是将有关物理定律的信息添加到神经网络中，例如麦克斯韦方程或其他一些偏微分方程。该操作可以通过将偏微分方程控制数据集合并到框架的损失函数中来实现。我们在图2中说明了用于超表面设计的物理信息神经网络的流程图。多柱单元结构具有复杂的设计和多个参数，与前一种的方法相比具有更大的自由度。数据集是通过正向求解器模拟结构得到的，但是随着麦克斯韦方程和电磁边界条件等物理定律嵌入神经网络，所需的数据集大小减少，计算时间显著减少。其余设计过程与机器学习方法一致。

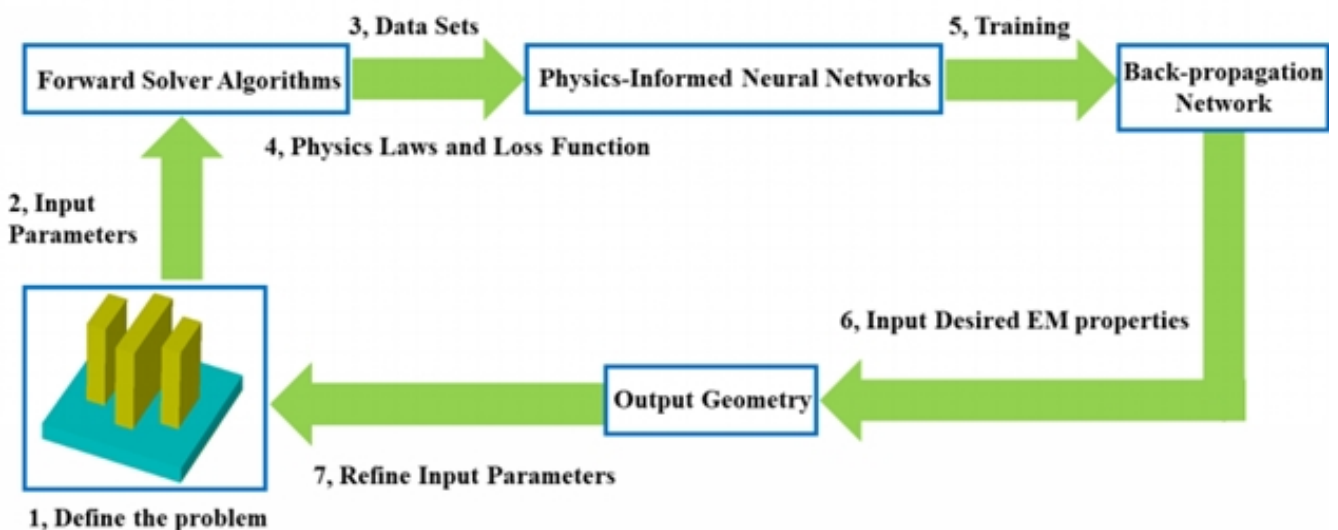


图2 物理信息神经网络设计超表面的流程图步骤：定义问题，创建训练数据，定义物理原理和损失函数，定义网络架构，验证网络，训练反向传播网络，输入期望的电磁响应，迭代设计过程，并获得所需的超表面设计参数。

## 2.3 拓扑优化设计超表面的基本原理

图3说明了用于超表面设计的拓扑优化过程的流程图。该过程从初始结构和相关参数开始，然后使用严格耦合波分析方法等光学理论计算结构的电磁响应。随后通过将当前的电磁响应与所需响应进行比较来确定损失函数。然后使用诸如自动微分的梯度算法确定输入参数的损失函数的梯度。该梯度信息用于在使损失函数最小化的方向上更新结构的参数。重复该过程，直到损失函数达到其最小值。最终输出是针对所需结构的优化参数集。

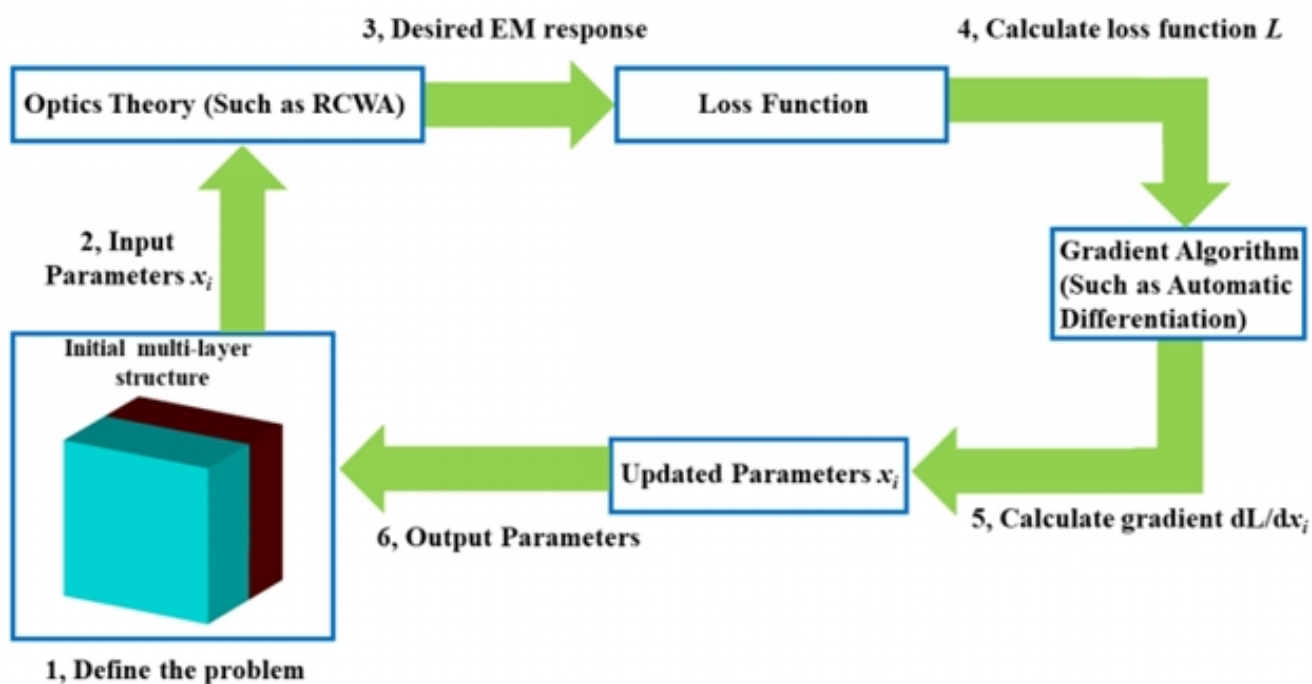


图3 拓扑优化超表面设计基本原理流程图步骤：定义问题，输入参数，确定所需的电磁响应，计算损失函数，计算损失函数的梯度，更新和输出参数，迭代设计过程，得到所需的参数。

## 3. 总结与展望

该综述阐述了超表面智能设计的多种重要方法。这些方法将成为未来超表面和超材料设计的热点与前沿，在物理精度和计算时间上具有明显优势。此外，上述方法可以扩展到其他光学器件的设计，例如光子晶体、光学腔和集成光路。智能超表面是一个快速发展的方向，在几个新的革命性领域具有重要的应用前景，尤其是在近期迅速发展的量子光学领域。

另外，超表面技术在工业中也具有多种潜在应用。超材料显示出非凡的特性，例如反常反射、波前操纵和偏振控制，这些独特的特性使超表面能够彻底改变传统光学，并为广泛的工业应用提供创新解决方案。在不久的将来，超表面可用于传感器、天线、和太阳能电池，从而提高光学效率和灵敏度。它们还可用于成像和全息，提供高成像分辨率和3D显示功能。此外，超表面可以集成到各种设备和系统中，以改善其功能。因此，将超表面转化为工业应用的潜力是巨大的，并且该领域的进一步研究有望为其实际应用开辟新的可能性。

## 4. 主要作者介绍

---

一作：季文焯，代尔夫特理工大学应用科学学院(Imphys department)博士生，主要研究方向为太赫兹调控，光学成像，超材料及光子晶体器件。

一作通讯：常进，代尔夫特理工大学应用科学学院博士后研究员(Quantum Nanoscience department)，主要研究方向为超导单光子探测，光力学，光/声子晶体及其量子传感应用。

其他合作作者包括空军工程大学许河秀教授（通讯），代尔夫特理工大学Imphys系的Jian Rong Gao, Paul Urbach（通讯），Aurèle J.L. Adam教授，以及代尔夫特理工大学Quantum Nanoscience系的Simon Gröblacher教授。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-023-01218-y>

作者：季文焯等 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](https://www.iikx.com)转发