



Editorial

超材料——从工程化材料到工程材料

John Pendry^a, 周济^b, 孙竞博^b^a Department of Physics, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK^b School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

John Pendry

周济

孙竞博

作为材料科学领域前沿方向之一，超材料在过去20年中经历了蓬勃发展。起初，这一领域主要是针对电磁学属性，通过人工设计获得的超常性能的人工结构材料，其超常属性来源于所设计的结构，而非非构成结构的材料本征属性。时至今日，超材料已扩展到包括电磁学在内，覆盖光学、力学、热学和声学等多领域的一大类具有超常、高性能的人工材料系统。超材料研究的重点逐渐从起初的新机理、新现象和新结构向针对实际应用的新特性和新功能倾斜，为解决工程技术中的诸多挑战提供新的解决方案。因此，超材料本身正在从研究型工程材料向应用型工程材料转变。本期超材料专题反映了这一科学发展过程中的重要历程。

第一种超材料诞生于20世纪末，当时主要是为获得具有负折射率，通过人工设计而获得的一种全新材料。英国著名物理学家、帝国理工学院的John Pendry爵士的两个具有里程碑性的重要理论工作是人类进行人工设计材料属性的开端：一是通过金属线的低等离子体频率实现有效

的负介电常数；二是通过开口环谐振器模拟分子中的分子环流产生人工磁性获得等效负磁导率。这两项重要的研究成果为实现介电常数和磁导率为负值的负折射率铺平了道路，而在此基础上，最终发展成为一种材料学研究的全新理念，即通过基于人工设计的工程单元获得超越自然界的物理特性，在实现负折射现象的同时，也为人们提供了一种人工操控介电常数与磁导率的方法，进而带来了一系列具有超材料电磁属性的新材料。例如，负折射率超材料可以用作一个完美透镜，可以突破显微镜成像中的衍射极限。此外，具有特殊折射率分布的超材料可以引导光束绕过中心区域，从而使其对入射光不可见，这就是所谓的“隐身衣”。其他成果，如超材料完美吸波介质、零折射率材料和电磁诱导透明行为皆基于通过人工设计获得所需介电常数和磁导率而实现。这些工作均出现在超材料首次被提出后的十年期间。在那十年里，超材料在电磁学领域蓬勃发展，并扩展到光学领域。

随着这一新概念的成功，人们的眼光也不再局限于电磁学或光学中的超常属性。目前，超材料正在推动力学、声学 and 热力学等多个领域中的创新，开拓着整个物理领域的新边界。在过去20年的发展中，超材料的设计思想和制造技术得到了长足的发展。从科学的角度来看，超材料为物理学中新机制、新效应的研究提供了非常强有力的平台；从工程的角度来看，超材料俨然成为一种材料设计的新工具，随时等待着人们将其投入实际应用。今天，研究

人员越来越关注如何通过超材料显著提升现有技术或发展出完全不同于传统观念的新技术。因此，超材料这种工程化的材料正从科学研究向工程应用领域过渡。在本期超材料专题中，我们介绍了超材料领域几个顶尖研究团队的最新研究成果，进而展示了超材料和基于超材料的器件、设备在工程中的创新应用。

微波超材料是目前最广泛研究的超材料，超材料概念的首次实现即在微波波段。许多新的电磁效应也多在微波段内得到首次证实，一方面可以获得高频下难以出现的材料特性，另一方面可以避免微纳加工中的复杂的加工制备问题。如今，微波超材料也是超材料家族中最接近工业应用的典型，尤其是在通信工程方面。在本期超材料专题中，我们带来了东南大学崔铁军院士团队设计的基于数字可重构天线阵列组成的信息超表面，该研究成果可以巧妙地实现数字编码，其所具有的一系列重要的特性贴近在雷达和无线通信系统中的实际应用。

在光学领域，纽约州立大学布法罗分校的 Qiaoqiang Gan 教授团队及其东北大学的合作者为我们带来了一个巧妙的生物传感设计：一种基于等离子共振的超高分辨率超材料器件。在该设计中，来自等离子体沟槽结构的“彩虹”耦合用于实现光的极强色散响应。这种非常紧凑的设计可与芯片集成，文中展示了基于该机制用于肺癌诊断的外泌体表皮生长因子受体（EGFR）的高性能芯片尺寸传感器及其所表现出的优异性能。

光与物质的非线性相互作用一直是光学领域的一个重要热门话题。杜克大学的 Litchinitser 教授团队是研究光学非线性超材料的顶尖团队之一。在本期超材料专题中，Litchinitser 教授对具有角动量或柱面矢量极化的结构光在饱和介质这种具有悬浮粒子的工程液体材料中的非线性效应研究进

行了全方面的综述。饱和介质可模拟水下、雾、云或生物组织等混浊环境，其中的非线性效应涉及自聚焦、调制不稳定性和空间孤子的形成等。该方向的研究对于包括生物成像、水下应用和自由空间通信等多场景中的光学应用具有极其重要的指导意义。

与电磁波类似，声波是自然界的另一个普遍存在的现象，超材料在声学工程中也发挥着重要作用。我们本期收录了南京大学陈延峰教授团队的一篇展望，该文系统论述了声学超材料在未来声学工程领域中的应用，如隔声、声学成像和隐身等，其中，部分研究成果近年来正在投入应用，不仅在空气中，而且包括水下，乃至人体等重要应用场景。

近年来，古老的折纸艺术在力学超材料领域中备受研究人员的关注，并激发出机械超材料方面的许多创新。在本期超材料专题中，我们收录了牛津大学 Zhong You 教授团队的一篇研究论文，文中介绍了一种可编程折纸超材料，刚性和非刚性折纸单元的组合搭配可以极大地提高超材料的机械性能。此外，通过使用镶嵌规则实现了超材料特性的可预测与可控性。文章中报道的超材料具有像素化形式，可编程，从而实现超材料力学性能的按需定制，因此对工程应用具有重要意义。

最后，武汉理工大学张联盟院士团队的一篇综述论文概述了机械超材料的最新进展，包括刚性和强度材料以及具有各种拓扑结构的超材料的性能。该文建设性地讨论了当前面临的挑战，并介绍了增材制造技术在机械超材料领域中的广阔发展前景。

历经近 20 年的积淀，超材料设计思想和制造技术已相当完善。我们可以期待，这种新型工程材料将在工程领域发挥越来越重要的作用，极大地改变未来的世界。