



微波电磁超材料设计与应用研究进展

田宇泽, 金晶*, 杨河林, 范绿蓉, 侯俊杰, 林海*

华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079

*联系人, 金晶, E-mail: jingjin@ccnu.edu.cn; 林海, E-mail: linhai@ccnu.edu.cn

收稿日期: 2023-05-08; 接受日期: 2023-07-19; 网络出版日期: 2023-08-18

装备预研教育部联合基金青年人才基金项目(编号: 8091B032227)和湖北省重点研发计划2023资助

摘要 电磁超材料在二十多年的发展历程中, 引发了学术界和产业界的广泛关注, 在军事、民用等领域扮演着重要的角色. 电磁超材料可以突破传统电磁器件电磁响应的局限, 具有自然媒质所不具备的电磁特性. 电磁超材料对不同频段的电磁波均具备优异的操控能力, 进而演化出了多样化的电磁超材料功能器件. 随着应用需求的不断提升, 电磁超材料结构日趋复杂, 功能趋向多元化. 新材料与新工艺在电磁超材料中的融合应用不断涌现, 以人工智能和优化理论为驱动力的超材料设计方法学研究蓬勃发展. 本文结合近年来涌现出的研究成果和行业发展状况, 简要总结了微波领域电磁超材料的发展应用态势. 同时本文以近年知网论文数据库中收录的4949篇电磁超材料论文作为语料库, 利用长短期记忆网络模型, 从大数据角度, 统计归纳了当前国内电磁超材料发展趋势. 为从事本领域研究的科研人员提供了可资借鉴的方向展望.

关键词 电磁超材料, 吸波体, 传感器, 超材料天线, 可重构超表面

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci, 73.20.Mf, 84.40.Ba, 07.05.Mh

1 引言

电磁超材料(Electromagnetic Metamaterial)在自然条件中无法单独生成, 主要由人工主导下的亚波长尺寸的单元结构, 又称“超原子”(Meta-atom), 以特定的形式组合而成^[1]. 相较于传统的电磁光学器件, 电磁超材料凭借其高自由化的单元设计和丰富灵活的结构组成方式, 在亚波长尺寸下与入射电磁波产生多种电磁谐振, 继而表现出多种异常散射特性. 随着从业人员对电磁波调控的需求逐渐强烈, 电磁超材料的功能由单一化向多元化不断发展, 电磁波调控精度不断提升,

电磁波调控的效率也不断提高. 近年来电磁超材料的设计和制造, 将凝聚态物理、光学、量子学、电磁理论、计算电磁学、微纳米制造、材料学、机械等学科结合起来, 呈现出多学科交叉的态势. 目前常见的电磁超材料包括频率选择表面(Frequency Selective Surface)^[2,3]、吸波体(Metamaterial Absorber)^[4,5]、吸透一体超材料(Rasorber)^[6,7]、光子晶体(Photonic Crystal)^[8]、智能可重构超表面(Reconfigurable Intelligent Metasurface)^[9]、极化转换器^[10,11]、超材料天线(Metamaterial Antenna)^[12]等, 广泛应用于军事、民用等各个领域.

引用格式: 田宇泽, 金晶, 杨河林, 等. 微波电磁超材料设计与应用研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 290016
Tian Y Z, Jin J, Yang H L, et al. Research progress on design and application of microwave electromagnetic metamaterial (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 290016, doi: [10.1360/SSPMA-2023-0172](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0172)

本文基于电磁超材料的行业发展状况, 结合近年来涌现出的研究成果, 简要总结了微波领域电磁超材料的发展应用态势, 包括宽带吸波体、超材料传感器、超材料天线和可重构超表面. 同时对结合人工智能技术的电磁超材料设计方法进行了详细阐述, 包括正向预测模型在超材料优化和设计中的加速作用以及逆向按需超材料结构设计. 最后以近年知网论文数据库中收录的电磁超材料论文作为语料库, 利用长短期记忆网络模型, 从大数据角度, 统计归纳了电磁超材料研究热点以及发展趋势.

2 电磁超材料应用

2.1 宽带吸波体

2008年, Landy等人^[13]首次提出了超材料吸波体的概念. 超材料吸波体的功能是在工作频带内, 吸收入射电磁波, 减弱其反射效果. 超材料吸波体通常由印刷在衬底上的金属谐振结构制成, 通过调整金属谐振结构的形状大小、基底的厚度、电参数以及添加损耗材料等产生特定的吸收频带^[14]. 因此, 超材料吸波体可以实现电磁性能的可调节性, 更好地实现强吸收、宽频带、可调频率的目标, 具有非常广阔的应用前景. 近年来, 国内外在超材料吸波体的设计方法学、性能提升和工艺材料集成等多个方面产生了十分丰富的研究成果.

目前超材料吸波体的设计理论通常以阻抗匹配理论、等效电路模型和小反射理论为基础. 这类方法在准确性、复杂度方面均有待提升. 为了完善超材料吸波体的设计理论, 本课题组Wu等人^[15]提出了一种基于特征模分析的宽带超材料吸收体设计. 通过特征模分析, 仅需使用几个重要的模式即可近似地表征整个超材料吸波体的频谱响应. 特征模理论通常用于分析理想电导体(PEC)结构. 由于电阻膜是有损耗的, 其特性模式无法直接求解, Wu等人用四个步骤进行宽带吸波体设计: (1) 计算PEC构成的该吸波体单元结构的特征模; (2) 根据模态辐射在Z方向上达到最大值找出有效模态; (3) 分析有效模态的特征电流, 确定最大电流的位置. 将集总电阻添加到最大电流位置, 并改变电阻以扩展模式权重系数的带宽, 确保模式权重系数的带宽 ≥ 0.707 以覆盖所需频带; (4) 根据集总电阻值, 通过公式计算需要加载的表面电阻值. 当加载到顶层和中

间层的表面电阻为 $30 \Omega/\text{sq}$ 时, 该吸波体吸收频带范围为 $3.21\text{--}14.35 \text{ GHz}$, 吸收率超过90%, 相对带宽达到126.88%. 同时该吸波体具有良好的极化不敏感特性和角度稳定性.

在超材料与新工艺材料集成应用方面, 为了实现宽带吸收, 研究人员通过设计多层结构^[16], 加载集总电阻^[17,18], 或者使用电阻膜来扩宽吸收带宽^[19]. 在文献^[20]中, Zhou等人提出了一种将ITO膜插入两个聚氯乙烯(PVC)层中的周期性夹层结构, 实现了 $8\text{--}18 \text{ GHz}$ 的宽带吸收. 在文献^[21]中, Sheokand等人设计了两层不同图案的ITO膜, 实现 $6.06\text{--}14.66 \text{ GHz}$ 的宽带吸收. 在文献^[22]中, Deng等人使用导电墨水实现了 $6.58\text{--}16.38 \text{ GHz}$ 的吸收. 在文献^[23]中, Lu等人使用导电塑料实现了 $16.3\text{--}54.3 \text{ GHz}$ 的吸收带宽.

水在微波频率下具有较大的介电常数和较高的损耗系数, Zhao等人^[24]使用水基超材料设计了宽带微波吸波体, 这种超材料吸收体被称为全介电超材料. 在文献^[25]中, 本课题组Li等人提出了一种透射型水基超材料吸波体. 相比于上述水基吸波体包含一个金属背板, 该结构使用3D打印完成, 采用圆柱和矩形状的水谐振器结构, 不包含金属底板, 外壳由树脂包裹, 做到了严格意义上的全介电超材料吸波体. 在 $6.5\text{--}21.4 \text{ GHz}$ 的频率范围内该水基吸波体具有超过90%的吸收率. 根据水温不同, 温度在 $10^\circ\text{C}\text{--}60^\circ\text{C}$ 内依旧保持良好的吸收特性, 同时满足广角入射和极化不敏感的特性, 它可以应用于可变温度环境中吸收电磁能量.

此外, 吸波功能与其他电磁调控功能的集成也引发了研究人员的广泛关注, 多功能的集成极大丰富了传统超材料吸波体的应用领域. 在文献^[26]中, Lin等人提出一种双向三维超材料吸收体, 该结构具有非互易性. 如图1所示, 该单元结构由五个金属环印刷在Rogers RO4003C基板上, 三个集总电阻分别安装在前后金属环的中心处. 当电磁波从 $-z$ 方向入射时, 该超材料吸波体可以实现 $3.45\text{--}4.82 \text{ GHz}$ 范围内的宽带吸收. 当电磁波从 $+z$ 方向入射时, 它具备实现 $1.89\text{--}3.84 \text{ GHz}$ 范围内的吸收功能.

同时, 在吸收带外还存在低频部分和低频部分两个透射带. 该吸波体极化不敏感, 在倾斜入射达 40° 时依旧保持良好的角度稳定性.

在这里, 特征模理论引入宽带吸波体设计, 丰富了超材料吸波体的设计理论. 根据超材料与新工艺材料

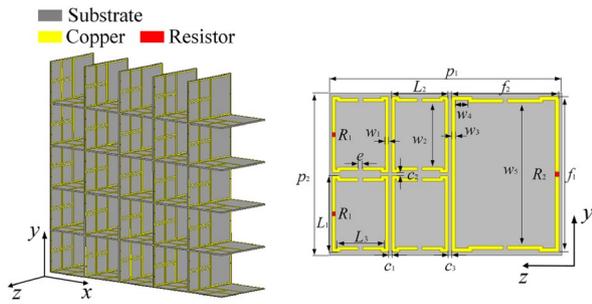


图1 (网络版彩图)三维超材料吸收体示意图^[26]
Figure 1 (Color online) Structure diagram of three-dimensional metamaterial absorber [26].

集成, 将宽带吸收超材料概括为多层结构、负载集总元件、三维结构和水基结构. 当然, 对宽带吸波体的研究远远不止这些, 未来的研究将朝着全频带隐身、耐高温、多功能、智能可调谐、小型化、全介质等方向发展, 以实现“薄、轻、宽、强”为最终目标.

2.2 传感器

人工局域表面等离激元(Spoof Localized Surface Plasmons, SLSPs)通过亚波长周期结构实现等效负介电常数, 在微波频段重现光频的局域表面等离激元深度亚波长的场束缚、近场电场增强、对介电环境的高度敏感性等优异特性^[27]. 该概念与传输型人工表面等离激元(Spoof Surface Plasmons, SSPs)概念一脉相承, 可理解为传输的人工表面等离激元波绕谐振器一周形成的驻波. 人工局域表面等离激元作为微波谐振式传感的原理之一, 利用谐振峰频移、谐振峰展宽和劈裂效应实现传感信号之间的关联以及传感信号有效检测, 展示了优异的物理性能和重要的应用前景.

通过非对称设计和插入干涉模态, 具有高 Q 因子的谐振器广泛应用于传感器^[28]. 在肖特基势垒二极管和变容二极管调谐下, 人工表面等离激元可以轻松地在不同频率下工作^[29,30]. 在文献^[31]中, 本课题组Wu等人提出了一种人工局域表面等离激元(Spoof Localized Surface Plasmons)用来进行溶液浓度检测. 该超材料由一个顶部有环、底部有金属研磨的开槽圆形组成微波环形等离子体共振腔结构. 微带线的馈电很好地激发了Mie谐振的多模, 通过重建结构, 该结构灵敏度高达3.68 GHz/RIU, Q 因子为340.6. 用于葡萄糖溶液浓度检测时, 随着浓度降低, 谐振处在5.62 GHz时从

-10.54 dB逐渐上升为-7.98 dB, 高灵敏度、高 Q 因子和紧凑的尺寸使其成为传感应用的良好选择.

电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency)是一种经典的物理现象, 它是三个能级之间的相消干涉过程. 在超材料中可以很容易实现电磁诱导透明和电磁诱导反射(Electromagnetically Induced Reflection)^[32]. Ding等人^[33]提出了太赫兹EIR超材料, 该结构在谐振频率为0.811和0.924 THz的两个反射谷之间的0.865 THz显示出尖锐的反射峰. Jiang等人^[34]提出了一种基于互补石墨烯的动态可调EIR超材料, 通过改变石墨烯的费米能来实现主动控制, 无需重新优化和设计结构. Shen等人^[35]提出了一种基于互补狄拉克半金属的EIR超材料, 反射峰位于0.874 THz处, Q 因子为87.6. EIR效应的超材料在反射窗口周围表现出异常色散, 导致光的群速显著降低, 在慢光效应、光学开关、传感器^[36]等方面具有广泛应用. 在文献^[37]中, 本课题组Shen等人提出了一种由具有正交环形谐振器(Orthogon Ring Resonator)和环形谐振器(Circle Ring Resonator)的周期波导组成的二维腔光栅超材料(Metamaterial-inspired 2D Cavity Grating), 通过实现电磁诱导反射来实现溶液浓度检测. 在15.15 GHz下, 正交环形谐振器和环形谐振器之间相互作用, 反射系数达到95%, 从而实现电磁诱导反射, 将葡萄糖溶液注入金属腔中, 灵敏度达到3.26 GHz/RIU, 品质因数为8.15, 表明该腔体结构具有良好的传感性能.

超材料传感器其特殊之处在于, 结构设计简单、易于制造、低成本、非接触式、具有高灵敏度和高品质因数. 超材料传感器应用十分广泛, 未来将广泛应用于检测温度、压力、湿度、识别物质确定其电特性等方面.

2.3 超材料天线

超材料应用于天线中有利于提升天线的增益^[38]、降低天线的RCS实现天线互耦隔离. 在文献^[39]中, Kundu等人提出了一种多层耦合频率选择表面来提高天线的增益. 在文献^[40]中, 多层梯度超表面被用作透镜加载于天线的孔径前面, 显著提高了天线的宽频增益.

本课题组Cheng等人^[41]提出了一种用于短脉冲探地雷达系统的新型紧凑型维瓦尔迪天线(Vivaldi Antenna). 该超材料天线加载了单层的超透镜(Artificial

Materials Lens)和旁瓣抑制器(Sidelobe Suppressor), 可以有效提高天线的孔径和侧面的辐射能力, 同时大幅度减小天线的尺寸, 使其更容易进行制备. 如图2所示, 其中图2(a)没有加载超材料, 图2(b)加载了超透镜和旁瓣抑制器. 超透镜和旁瓣抑制器单元结构如图2(c)和(d)所示.

仿真和实验结果表明, 该超材料天线-10 dB阻抗带宽在0.7–2.1 GHz内, 相对带宽100%, -3 dB带宽在1.0–2.1 GHz, 相对带宽70.9%. 在工作带宽内, 超透镜主要增强了天线的高频增益(1.4–2.1 GHz), 而旁瓣抑制器主要增强了天线的低频增益(0.7–1.4 GHz). 通过这种节省空间的设计布局, 在超透镜和旁瓣抑制器的作用下, 该超材料天线在低频和高频部分分别具有1

和2 dB的平均增益.

在无线通信系统中, 超材料天线设计十分灵活, 在满足高增益、低副瓣的同时使传输更加稳定. 根据使用场景不同, 也可以轻易实现超宽带、高指向性和更少的交叉极化等目标.

2.4 可重构超表面

可重构超表面由超表面阵列构成, 与传统的超表面相比, 可重构超表面表现出数字化、可编程性的特点. 与无源超材料相比, 添加有源器件, 数字化调节阵列排布, 实现动态灵活操纵电磁波, 在无线通信场景中能够有效改善通信环境, 提高通信质量, 同时结构简单, 方便部署, 为6G的发展提供了一种思路^[42]. 在文

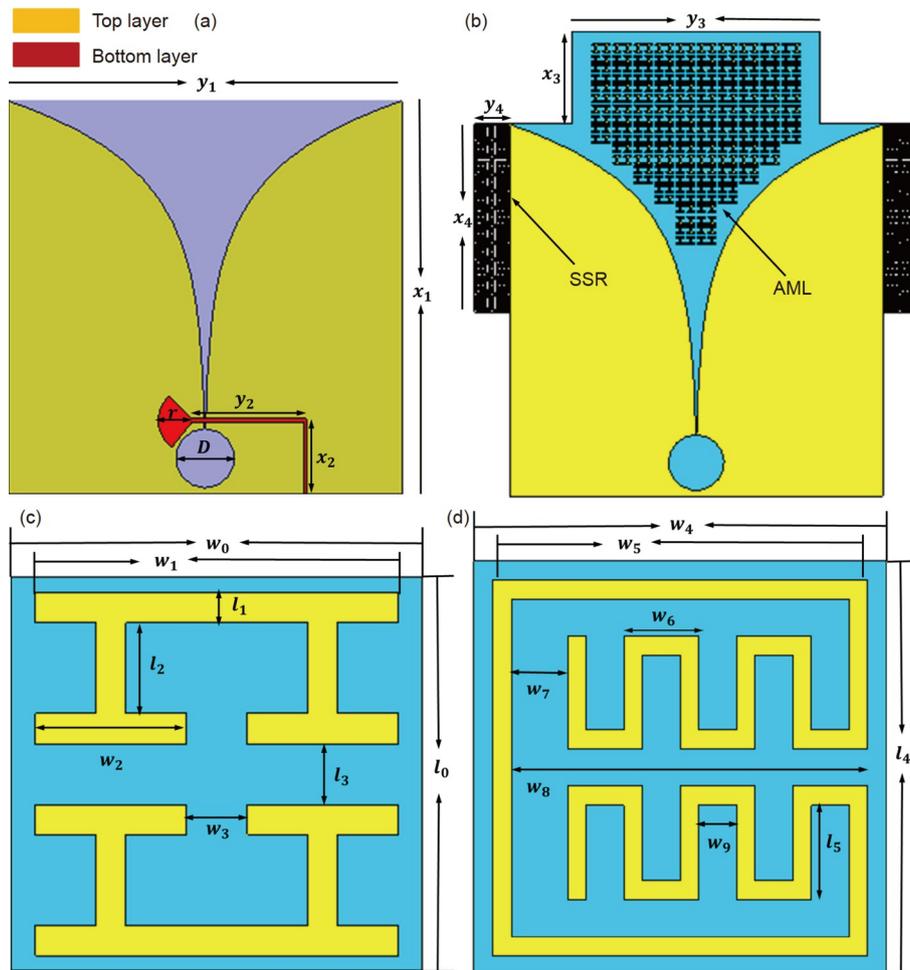


图 2 (网络版彩图)维瓦尔迪天线示意图^[41]. (a) 天线结构示意图, (b) 加载了超透镜和旁瓣抑制器的天线结构示意图, (c) 超透镜单元结构, (d) 旁瓣抑制器单元结构

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of Vivaldi Antenna. (a) Antenna structure, (b) antenna loaded with meta-lens and sidelobe suppressor, (c) meta-lens unit, (d) sidelobe suppressor unit.

献[43]中, Liu等人提出了一种频域和空域可重构超表面, 通过加载PIN二极管, 获得了宽带极化转换和波束扫描. 在文献[44]中, Zhang等人使用变容二极管设计了一种双极化可控的可重构超表面, 实现双极化下的波束赋形. 在文献[45]中, Hu等人提出了一种在相同极化和频率条件下具有双工模式的超表面, 能够为多用户无线通信应用提供无处不在的全空间服务覆盖. 在文献[46]中, She等人提出一种自适应的可重构超表面, 它集成了传感和反馈元件, 根据不同功率的入射电磁波自动切换透射、反射和可调谐吸收等工作状态.

目前大多数RIS设计仅在x或y极化下工作, 信号在复杂的传播环境中由于多径效应会产生很大衰减, 因此设计可在 $\pm 45^\circ$ 下工作的可重构智能表面在通信方面显得尤为重要. 本课题组Lin等人^[47]提出了一种双频带的可重构超表面. 通过添加变容二极管, 改变偏置电压, 该超表面可以实现多个谐振, 在 $+45^\circ$ 极化下分别在2.4和5.8 GHz产生近 180° 的相位响应差, 能够实现一位数字编码(图3).

在2.4和5.8 GHz频带下, 将红色区域和蓝色区域分别编码为0和1, 当入射波垂直入射可重构超表面时, 可以产生两种对称的反射波, 并且旁瓣较小, 实现了双波束调控. 它可以有效克服无线传输中的信号衰减, 满足未来实际的通信需求.

3 电磁超材料设计方法

目前超材料的设计需要研究人员根据具体设计目标, 采用电磁仿真, 不断迭代和优化电磁超材料模型. 随着超材料的研究逐步深入, 建立精确、高效、智能的设计方法是促进超材料进一步发展的重要条件. 得益于计算机算力的不断提升, 近年来以深度学习为主的人工智能技术在计算机视觉和自然语言处理等领域大放异彩. 目前, 已有研究人员将其引入超材料的设计当中, 并取得了不错的研究成果. 在文献[48]中, Qian等人提出了一种由深度学习驱动的智能斗篷, 无人工干预的情况下, 其对不断变化的入射波和背景展现出强大的自适应能力. 在文献[49]中, Jia等人提出一种基于深度学习的智能光学幻觉方法, 通过调整智能超表面可以快速实现任意光学幻觉需求.

本课题组Huang等人^[50]提出了一种基于深度学习

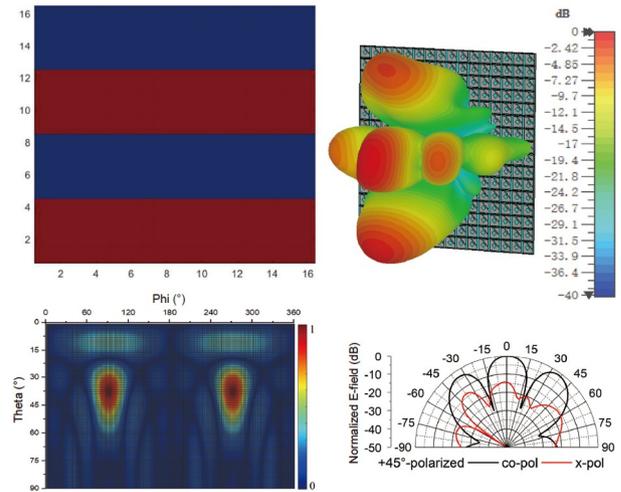


图3 (网络版彩图)相位补偿方案以及对应的远场方向图^[47]
Figure 3 (Color online) Phase compensation schemes and corresponding far-field directional patterns [47].

的电磁参数检索方法. Huang等人首先借助电磁仿真工具得到20000个数据. 然后使用离散余弦变换(Discrete Cosine Transform), 对S参数进行降维处理, 降维后的S参数可以经过离散余弦逆变换还原. 最后将降维后的S参数与相应的电磁参数组合, 形成用于训练深度学习模型的样本数据集. 该方法旨在解决传统NRW(Nicolson Ross Weir)方法中的多值性问题. 模型训练完成后, 通过输入S参数即可输出对应的介电常数和磁导率, 与NRW的计算结果相比, 神经网络的预测值偏离度更低, 效果也更好.

在超材料设计环节中, 根据设计需求, 快速设计出具体超材料结构可以大大缩减整个设计流程. 在文献[51]中, Hou等人提出了一种基于深度学习算法的按需逆向设计方法来设计超材料吸波体. 该方法按照设计需求, 可以有效获得吸波体的几何参数和结构材料参数. 在整个设计过程中, 他们构建了三个神经网络, 分别叫做特征变换器(Feature Transformer)、生成器(Generator)和预测器(Predictor). 将需求的频谱指标输入特征变换器得到对应的频谱参数, 然后将该频谱参数输入生成器得到吸波体的设计参数. 在训练过程中, 预测器将设计参数作为输入, 并生成预测频谱作为输出, 将当前的预测光谱与特征变换器输出的目标吸收谱进行比较, 计算两者之间的误差并作为损失进行反向传播(图4).

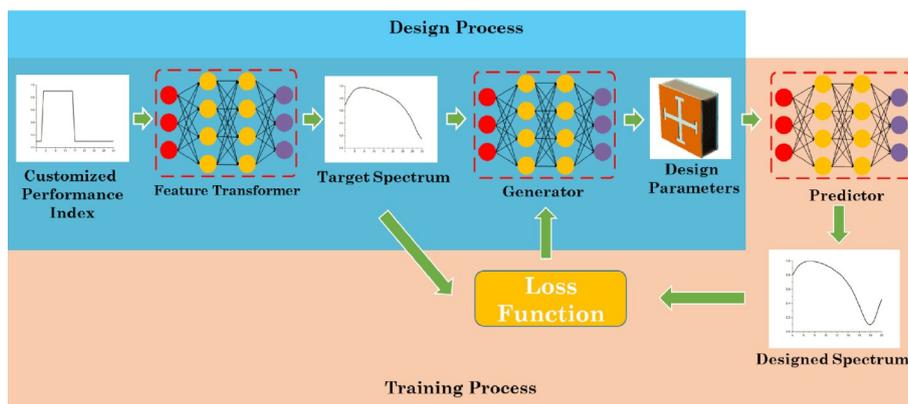


图 4 (网络版彩图)逆向设计方法框架示意图^[51]

Figure 4 (Color online) Inverse design method framework [51].

模型训练完成后, 整个模型的均方误差为 5.57×10^{-3} , 模型具有非常好的收敛性, 模型在测试数据集中可以达到93.5%的准确率, 达到良好的结果.

在超材料优化设计中, 加强模型全局收敛性和提高优化速度有助于显著提升超材料设计的效率以及准确性. 在文献[52]中, Lin等人提出了一种深度学习辅助的进化算法(Deep-learning-assisted Genetic Algorithm)来设计后向散射增强超表面(Metasurface Retro-reflector). 该超表面由四个基本单元构成, 可以用2 bit的编码矩阵表示该超表面阵列. 该方法旨在根据所需方向, 快速得到超反射面, 使得入射波照射阵列后可以朝目标方向增强RCS值. 整个设计流程由三个部分组成: 变分自动编码器(Conditional Variational Auto-encoder)、神经网络预测器(Predicting Neural Network)和遗传算法(Genetic Algorithm)优化模块. 其中变分自动编码器以RCS目标增强的角度为输入, 生成对应的超反射面编码矩阵, 使优化模块可以得到一个良好的初始化种群. 预测器用来替代电磁仿真, 训练完成的预测器可以快速准确地估测出单站RCS值. 在优化迭代中RCS值用于评估每个子代的适应度, 避免重复进行电磁求解, 加快优化速度. 在变分自动编码器和预测器的帮助下, 遗传算法更容易找到全局最优设计方案.

模型训练完成后, 结果如图5所示. 其中图5(a)为设计流程图, 图5(b)为仅使用进化算法和深度学习辅助产生的解空间分布, 图5(c)显示了目标角度在 11° – 22° , 21° – 30° , 29° – 40° , 39° – 51° 条件下的阵列设计结果, 图5(d)展示了仿真和设计的结果对比, 蓝线表示等

尺寸的金属板RCS, 黑线表示模拟结果, 红线表示预测器的预测结果, 黄色区域为目标角度. 从结果上看, 除了第一个RCS增强了9.44 dBsm, 其余均超过了10 dBsm.

目前, 人工智能辅助下的超材料设计, 无论是正向设计还是逆向设计均取得了不错的研究结果. 在未来发展中, 通过将超材料设计问题进行分类, 结合理论仿真或者实验测量数据, 选择合适有效的人工智能模型进行辅助设计, 有望获得最优设计方案的同时提升设计速度.

4 电磁超材料发展趋势分析

电磁超材料在二十多年的发展历程中, 受到学界的广泛关注, 许多专家学者对超材料的未来发展首肯以望. 本文从中国知网已出版的数据库中提取研究信息, 进行非结构化文本处理和分析, 统计和归纳国内电磁超材料发展趋势.

本文基于大数据探索电磁超材料研究的热点信息, 从中国知网已公开发表期刊、硕博毕业论文中, 以微波电磁超材料为研究主题下载了2005–2022年的4949篇论文, 并将其作为研究对象. 训练一个长短期记忆(LSTM)的神经网络模型, 预测未来两年电磁超材料的发展趋势.

4.1 方法

本次实验分成三个部分, 首先是数据预处理部分. 将选定的参考文献按照年份进行排序, 提取中间的关

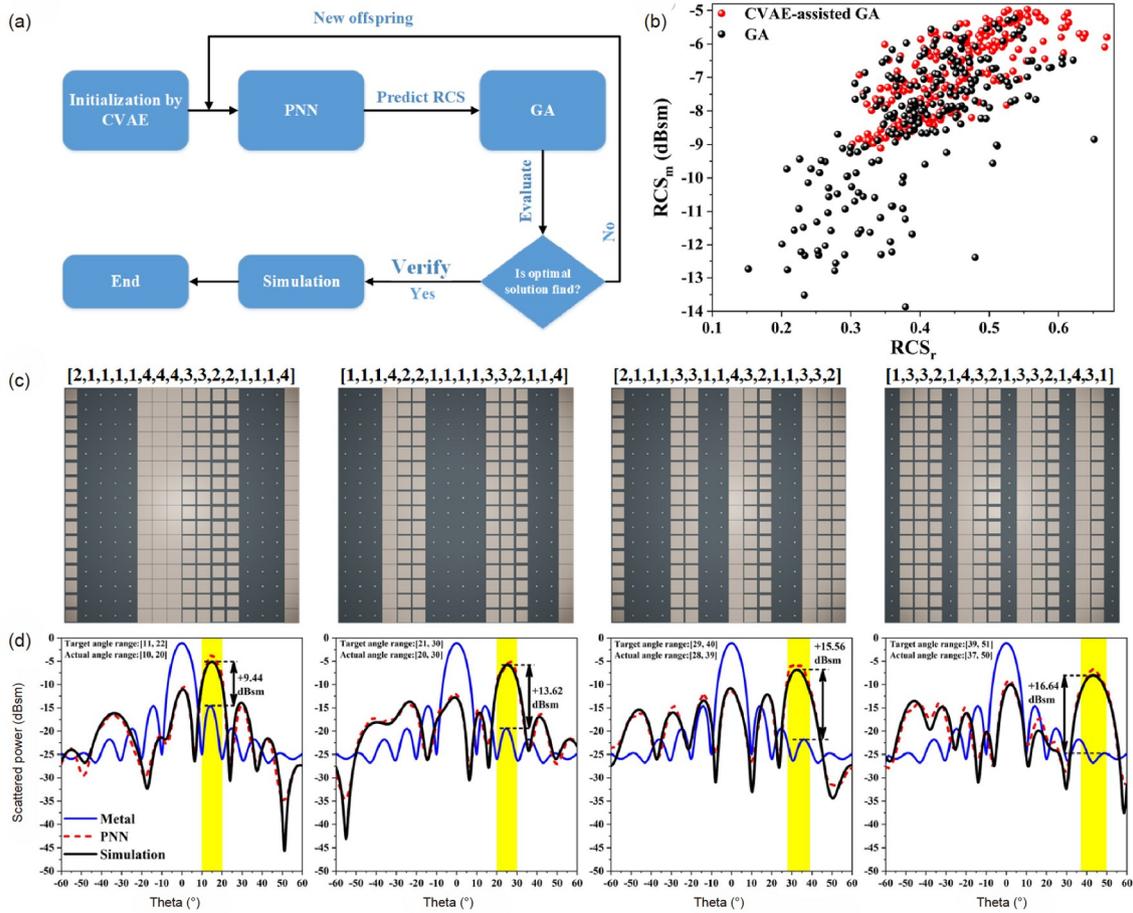


图 5 (网络版彩图) (a) 整个算法设计流程图; (b) 解空间分布; (c) 多个目标角度条件下的最优阵列; (d) 仿真和设计的结果对比 [52]

Figure 5 (Color online) (a) The entire algorithm design flowchart, (b) solution space distribution, (c) optimal array under multiple target angle conditions, (d) comparison of simulation and design results [52].

关键词信息作为研究对象. 然后将同义词进行合并, 例如本研究只关注电磁超材料, 并不关注声学超材料、力学超材料、热学超材料等其他领域, 因此“超材料”“超表面”“电磁超材料”应该是同义词, “吸波超材料”“吸波体”“超材料吸波体”等也应该是同义词, 以此类推.

第二部分是模型训练部分, 本次研究使用长短期记忆网络模型(Long Short Term Memory). 对于时序数据, 一般选择循环神经网络(Rerrent Neural Network)进行处理, 与一般前馈型神经网络输入固定流向输出不同, 其神经元允许后向连接, 并且同一层级的神经元之间可以进行连接, 即 t 时刻神经元的数值不仅与当前输入值有关, 还与上一时刻该神经元数值有关. LSTM作为一种改进型的RNN网络, 包含输入门、输

出门以及遗忘门三种结构, 通过门控状态对记忆信息进行筛选, 避免了RNN记忆信息不受时间限制的问题. 其结构如图6所示, 由6个中间层构成, 每个中间层的维度是25.

为了使模型更容易收敛, 现对预处理完成的关键词进行词频分析, 统计每个年份下各个关键词的出现

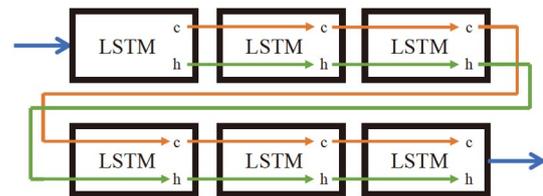


图 6 (网络版彩图) LSTM架构示意图

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of LSTM architecture.

频次. 其出现的词频按下式(1)进行计算:

$$f_i = \frac{n_i}{N} \times 100\%, \quad (1)$$

其中 i 表示第 i 个关键词, f 表示词频, n 表示出现的次数, N 表示关键词总数. 同时为了使得模型训练更具有鲁棒性, 将数据按照时间顺序进行滑动输入, 增强输入数据.

4.2 结果

热力图图7表示提取的主要关键词在2006–2024年的发展形势, 其中2023年和2024年为模型预测数据, 其余是知网提取数据, 考虑到不同关键词出现的频次差异, 现将每个关键词单独进行归一化, 同时按照关键词所属类别将其分为四个大类.

(1) 基于超材料的电磁调控理论研究方向

超材料具备对电磁波的内禀特性如频率、相位、极化和传输特征进行有效调控的能力. 基于大数据搜索, 以极化特性为例, 研究者持续关注电磁波“手性”“极化转换”“圆极化”等主题, 在相位调控理论方

面, “几何相位”“梯度相位”“相位可重构”等关键词也在持续增长. 近年来, 许多凝聚态物理理论中如“狄拉克半金属”“Fano共振”“电磁诱导透明”等新颖概念也被引入电磁超材料领域, 引发了研究者的广泛关注. 在传输特性调控方面, “异常反射”“非对称传输”“透射”等也在不同程度上受到研究者的关注.

(2) 超材料设计方法学研究方向

目前人工电磁超材料的设计越来越趋向于高集成度和高复杂度, 对超材料设计理论与仿真建模方法的研究也是业界关注的热点之一. 从大数据挖掘的结果可以看出, 在本研究方向上, 对超材料电磁特征的仿真方法主要使用的是“时域有限差分法”和“有限元法”, 然而对这两类算法的研究目前已不是关注热点. 在材料设计理论方面, “阻抗匹配”理论与“等效电路”理论仍然是微波领域赖以支撑的基础理论, 而近年来的热点更趋向于将“深度学习”“优化理论”应用于超材料单元、阵列的设计中. 从数据挖掘的统计结果可知, “拓扑优化”与“遗传算法”等方法正获得越来越多的研究关注.

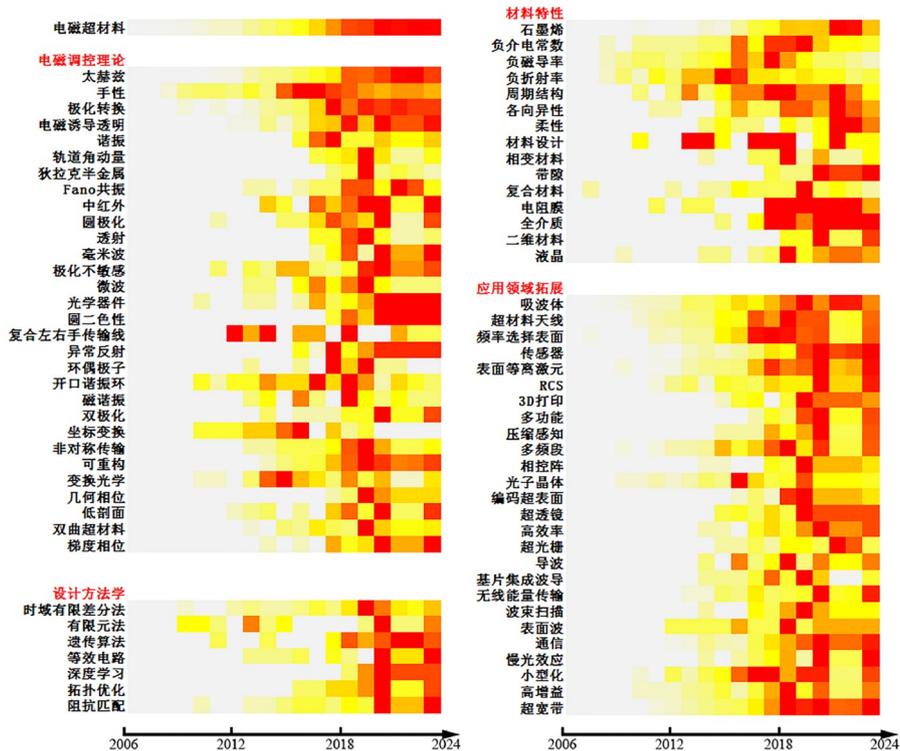


图7 (网络版彩图) 2006–2024年超材料发展趋势示意图

Figure 7 (Color online) Schematic diagram of metamaterial development trend from 2006 to 2024.

(3) 新材料与超材料的融合设计

超材料的材料特性直接决定了其电磁波操控能力, 人们在设计中除了使用金属材料外, 也开始将大量的新型功能材料与经典的超材料结构单元融合, 实现对超材料电磁波调控能力的进一步提升. 研究热点不再局限于传统的“负介电常数”“负磁导率”等超材料自身的材料特性, 而更加关注“液晶”“全介质”“二维材料”“电阻膜”“柔性”材料等物理材料在电磁超材料中的应用. 这些新功能材料的应用为电磁超材料迈向薄、轻、宽、强提供了许多有趣的解决方案.

(4) 超材料应用领域拓展研究

从应用领域来看, 电磁超材料的应用逐渐向“多频段”“多功能”的方向发展. 近十余年来, “吸波体”“频率选择表面”“超材料传感器”等持续受到学界的热切关注. 随着“表面波”调控、“天线”辐射等方面的应用需求持续增长, 越来越多业界研究人员开始关注超材料在“波束扫描”“超光栅设计”“导波”设计方面的应用, 以“基片集成波导”“3D打印”为代表的新型应用制

备工艺与超材料的结合也开始崭露头角.

本文仅仅对关键词进行了研究, 预测结果不一定完全符合发展趋势. 在未来工作中, 不仅需要建立更加合理的关键词筛选模型, 同时结合从文章的摘要中提取的有效名词, 增强模型整体预测效果.

5 结论和展望

近年来, 电磁超材料研究成果层出不穷, 发展态势良好, 应用前景十分广阔. 本文首先介绍了电磁超材料在宽带吸波体、传感器、天线以及可重构超表面等方面的应用, 总结了其研究方法和应用进展, 在电磁超材料方面还有许多技术需要研究人员持续跟踪、密切关注. 随着研究人员对电磁超材料研究的不断深入, 引入了新的相关理论和应用, 丰富了超材料的设计思路, 使得其功能实现更加高效化、精准化、丰富化. 同时为电磁波调控技术提供了新的理论基础, 对推动电磁学、光学领域的发展起到了十分重要的作用.

参考文献

- 1 Chen T, Tang W, Mu J, et al. Microwave metamaterials. *Annalen Der Phys*, 2019, 531: 1800445
- 2 Ghosh S, Srivastava K V. An angularly stable dual-band FSS with closely spaced resonances using miniaturized unit cell. *IEEE Microwave Wireless Comp Lett*, 2017, 27: 218–220
- 3 Sheng X, Fan J, Liu N, et al. A miniaturized dual-band FSS with controllable frequency resonances. *IEEE Microwave Wireless Comp Lett*, 2017, 27: 915–917
- 4 Zhang C, Yin S, Long C, et al. Hybrid metamaterial absorber for ultra-low and dual-broadband absorption. *Opt Express*, 2021, 29: 14078
- 5 Yao X, Huang Y, Li G, et al. Design of an ultra-broadband microwave metamaterial absorber based on multilayer structures. *Int J RF Microwave Computer-Aided Eng*, 2022, 32: e23222
- 6 Zhou L, Shen Z. Hybrid frequency-selective rasorber with low-frequency diffusion and high-frequency absorption. *IEEE Trans Anten Propag*, 2021, 69: 1469–1476
- 7 Zhao Z, Sun H. In-band metamaterial cloak based on the interplay of absorption and transmission. *Opto-Electron Eng*, 2017, 44: 92–96
- 8 Zhou R, Lin H, Liu Y, et al. Topological edge states of kekulé-type photonic crystals induced by a synchronized rotation of unit cells. *Phys Rev A*, 2021, 104: L031502
- 9 Cui T, Qi M, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light Sci Appl*, 2014, 3: e218
- 10 Yin J, Wan X, Zhang Q, et al. Ultra wideband polarization-selective conversions of electromagnetic waves by metasurface under large-range incident angles. *Sci Rep*, 2015, 5: 12476
- 11 Zhang C, Long C, Yin S, et al. Graphene-based anisotropic polarization Meta-filter. *Mater Design*, 2021, 206: 109768
- 12 Xu H, Wang G, Qi M. A miniaturized triple-band metamaterial antenna with radiation pattern selectivity and polarization diversity. *Prog Electromagn Res*, 2013, 137: 275–292
- 13 Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 279–282
- 14 Shen X, Yang Y, Zang Y, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 207402

- 15 Wu Y, Lin H, Xiong J, et al. A broadband metamaterial absorber design using characteristic modes analysis. *J Appl Phys*, 2021, 129: 134902
- 16 Fei D, Cui Y, Ge X, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber. *Appl Phys Lett*, 2011, 100: 103506
- 17 Li L, Lv Z. Ultra-wideband polarization-insensitive and wide-angle thin absorber based on resistive metasurfaces with three resonant modes. *J Appl Phys*, 2017, 122: 055104
- 18 Yao Z, Xiao S, Jiang Z, et al. On the design of ultrawideband circuit analog absorber based on Quasi-single-layer FSS. *IEEE Anten Wireless Propag Lett*, 2020, 19: 591–595
- 19 Mei L, Xiao S Q, Bai Y Y, et al. An ultrathin and broadband radar absorber using resistive FSS. *IEEE Anten Wireless Propag Lett*, 2012, 11: 748–751
- 20 Zhou Q, Yin X, Ye F, et al. Optically transparent and flexible broadband microwave metamaterial absorber with sandwich structure. *Appl Phys A*, 2019, 125: 131
- 21 Sheokand H, Ghosh S, Singh G, et al. Transparent broadband metamaterial absorber based on resistive films. *J Geophys Res Biogeosci*, 2017, 122: 105105
- 22 Deng G, Lv K, Sun H, et al. Wideband absorber based on conductive ink frequency selective surface with polarization insensitivity and wide-incident-angle stability. *NanoMater Nanotechnol*, 2020, 10: 184798042093571
- 23 Lu Y, Chi B, Liu D, et al. Wideband metamaterial absorbers based on conductive plastic with additive manufacturing technology. *ACS Omega*, 2018, 3: 11144–11150
- 24 Zhao J, Shu W, Cheng W, et al. Broadband microwave absorption utilizing water-based metamaterial structures. *Opt Express*, 2018, 26: 8522
- 25 Li S, Shen Z, Yang H, et al. Ultra-wideband transmissive water-based metamaterial absorber with wide angle incidence and polarization insensitivity. *Plasmonics*, 2021, 16: 1269–1275
- 26 Lin H, Wu Y, Xiong J, et al. Dual-polarized bidirectional three-dimensional metamaterial absorber with transmission windows. *Opt Express*, 2021, 29: 40770
- 27 Pors A, Moreno E, Martin-Moreno L, et al. Localized spoof plasmons arise while texturing closed surfaces. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 223905
- 28 Zhang X, Cui T. Deep-subwavelength and high- Q trapped mode induced by symmetry-broken in toroidal plasmonic resonator. *IEEE Trans Anten Propag*, 2021, 69: 2122–2129
- 29 Zhou Y, Dai L, Li Q, et al. Two-way Fano resonance switch in plasmonic metamaterials. *Front Phys*, 2020, 8: 843
- 30 Jing C, Jin Y, Yan Z, et al. Gain-assisted ultra-high- Q spoof plasmonic resonator for the sensing of polar liquids. *Opt Express*, 2018, 26: 25460
- 31 Wu J, Li Y, Ding F, et al. High-order localized spoof surface plasmons resonator for high sensitivity sensing. *IEEE Sensors J*, 2022, 22: 12861
- 32 Ning R, Xiao Z Q, Chen Z, et al. Tri-control large angle electromagnetically induced reflection in metamaterials with graphene and vanadium dioxide. *AIP Adv*, 2020, 10: 085323
- 33 Ding C, Zhang Y, Yao J, et al. Reflection-type electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials. *Chin Phys B*, 2014, 23: 124203
- 34 Jiang J, Zhang Q, Ma Q, et al. Dynamically tunable electromagnetically induced reflection in terahertz complementary graphene metamaterials. *Opt Mater Express*, 2015, 5: 1962
- 35 Shen S, Liu Y, Liu W, et al. Tunable electromagnetically induced reflection with a high Q factor in complementary Dirac semimetal metamaterials. *Mater Res Express*, 2018, 5: 125804
- 36 Lin X, Peng J, Chen Z, et al. A group-delay-based sensor using active EIT-like effect with double sensing applications. *IEEE Sensors J*, 2018, 18: 9251–9256
- 37 Shen Z, Yang D, Xia Y, et al. Metamaterial-inspired 2D cavity grating with electromagnetically induced reflection as a glucose sensor. *Phys Scr*, 2021, 96: 025502
- 38 Huang Y, Luo J, Pu M, et al. Catenary electromagnetics for ultra-broadband lightweight absorbers and large-scale flat antennas. *Adv Sci*, 2019, 6: 1801691
- 39 Kundu S, Chatterjee A, Jana S K, et al. A compact umbrella shaped UWB antenna with gain augmentation using frequency selective surface. *Radioeng*, 2018, 27: 448–454
- 40 Erfani E, Niroo-jazi M, Tatu S. A high-gain broadband gradient refractive index metasurface lens antenna. *IEEE Trans Anten Propag*, 2016, 64: 1968–1973
- 41 Cheng H, Yang H, Li Y, et al. A compact vivaldi antenna with artificial material lens and sidelobe suppressor for GPR applications. *IEEE Access*,

2020, 8: 64056–64063

- 42 Tang W, Dai J, Chen M, et al. Design and implementation of MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface. In: Proceedings of the 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020
- 43 Liu G, Li L, Han J, et al. Frequency-domain and Spatial-domain reconfigurable metasurface. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 23554
- 44 Zhang X G, Yu Q, Jiang W X, et al. Programmable metasurfaces: Polarization-controlled dual-programmable metasurfaces. *Adv Sci*, 2020, 7: 2070058
- 45 Hu Q, Zhao J, Chen K, et al. An intelligent programmable omni-metasurface. *Laser Photon Rev*, 2022, 16: 2100718
- 46 She Y, Ji C, Huang C, et al. Intelligent reconfigurable metasurface for self-adaptively electromagnetic functionality switching. *Photon Res*, 2022, 10: 769–776
- 47 Lin H, Yu W, Tang R, et al. A dual-band reconfigurable intelligent metasurface with beam steering. *J Phys D-Appl Phys*, 2022, 55: 245002
- 48 Qian C, Zheng B, Shen Y, et al. Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention. *Nat Photon*, 2020, 14: 383–390
- 49 Jia Y, Qian C, Fan Z, et al. *In situ* customized illusion enabled by global metasurface reconstruction. *Adv Funct Mater*, 2022, 32: 2109331
- 50 Huang S, Cao Z, Yang H, et al. An electromagnetic parameter retrieval method based on deep learning. *J Appl Phys*, 2020, 127: 224902
- 51 Hou J, Lin H, Xu W, et al. Customized inverse design of metamaterial absorber based on target-driven deep learning method. *IEEE Access*, 2020, 8: 211849
- 52 Lin H, Hou J, Wang Y, et al. Machine-learning-assisted inverse design of scattering enhanced metasurface. *Opt Express*, 2022, 30: 3076–3088

Research progress on design and application of microwave electromagnetic metamaterial

TIAN YuZe, JIN Jing^{*}, YANG HeLin, FAN LvRong, HOU JunJie & LIN Hai^{*}

College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

Electromagnetic metamaterials have attracted extensive attention from academia and industry in the past two decades and have been widely utilized in military and civil applications. Electromagnetic metamaterials can overcome the limitations of traditional electromagnetic devices because of their extraordinary electromagnetic properties that natural media do not possess. Electromagnetic metamaterial have an excellent ability to manipulate electromagnetic waves in different spectra, which has resulted in the evolution of various electromagnetic functional devices. With the increasing demand for applications, the structures of electromagnetic metamaterials are becoming increasingly complex, and their functions are diversified. The fusion applications of new materials and new processes in metamaterial continue to emerge. The research on the design methodology of metamaterial driven by artificial intelligence and optimization theory is burgeoning. In this study, the development and application of electromagnetic metamaterial in the microwave field are briefly summarized based on the research findings and industry development in recent years. A total of 4949 electromagnetic metamaterial papers are included in the CNKI database as the corpus, and the LSTM model is introduced to statistically summarize the current development trend of electromagnetic metamaterial from the perspective of big data, providing valuable guidance for researchers engaged in this field.

electromagnetic metamaterials, absorber, sensor, metamaterial antenna, reconfigurable metasurface

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci, 73.20.Mf, 84.40.Ba, 07.05.Mh

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0172](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0172)