

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407943

非均匀泡沫多孔吸波材料的电磁参数提取方法

杜远阳^{1,2} 吴杨慧^{1,2} 陈彬² 王晓雨^{1,2} 顾文华^{1,2}

(1. 南京理工大学微电子学院(集成电路学院) 南京 210094; 2. 近程射频感知芯片与微系统教育部实验室 南京 210094)

摘要:针对泡沫吸波材料的电磁参数难以准确测试的问题,基于吸波材料反射率计算理论模型,根据电磁参数与反射率的关系实现了泡沫吸波材料电磁参数(复介电常数)的准确表征。提出了利用弓形法测试系统分别测量不同入射角度下的垂直极化和水平极化反射率,通过牛顿-拉夫逊迭代算法求解反演问题。该方法仅需采用反射率幅度测试结果,可避免相位误差带来的影响。所提出的测试与表征方法仅需一块待测材料,无需对样品进行精密切割,不会破坏泡沫吸波材料的微观结构,有效减少加工误差带来的影响。为验证提出的测试方案和算法,在8~12 GHz频段进行了实验验证,并与经典的波导法-NRW法进行对比。实验结果表明,发泡聚丙烯材料的不同厚度、角度的反射率理论计算值与测试值相吻合,除谐振点外,理论值与实测值的偏差在0.087~0.806 dB之间,符合弓形法测试要求(± 1 dB),验证了该电磁参数提取算法的可行性和有效性。

关键词: 泡沫吸波材料; 反射率; 复介电常数; 电磁参数反演

中图分类号: TN806; TM934.32

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.1025

Electromagnetic parameter extraction method for non-uniform foam porous absorbing materials

Du Yuanyang^{1,2} Wu Yanghui^{1,2} Chen Bin² Wang Xiaoyu^{1,2} Gu Wenhua^{1,2}

(1. School of Microelectronics (School of Integrated Circuits), Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Near-Range RF Sensing ICs & Microsystems (Nanjing University of Science and Technology), Ministry of Education, Nanjing 210094, China)

Abstract: The accurate testing of electromagnetic parameters for foam absorptive materials presents a significant challenge. In this study, we developed an electromagnetic parameter (complex permittivity) characterization method based on the reflectivity calculation theory. By establishing a relationship between the electromagnetic parameters and reflectivity, we achieved precise characterization of the foam absorptive material's electromagnetic properties. We propose a measurement system using the arcuate method, where the reflectivity for both vertical and horizontal polarizations is measured at different incident angles. The inversion problem is solved using the Newton-Raphson iteration algorithm. This approach only requires the amplitude of the reflectivity, thus eliminating the impact of phase errors. The proposed testing and characterization method only needs a single sample without the need for precise cutting, preserving the microstructure of the foam absorptive material and minimizing the influence of processing errors. To validate the proposed testing scheme and algorithm, experiments were conducted in the frequency range of 8 GHz to 12 GHz, and the results were compared with those obtained using the classic waveguide method (NRW). The experimental results demonstrate that the theoretical reflectivity values for expanded polypropylene (EPP) at different thicknesses and angles match well with the measured values. Except for resonance points, the deviation between the theoretical and measured values ranges from 0.087 dB to 0.806 dB, which meets the arcuate method testing requirement (± 1 dB), thereby verifying the feasibility and effectiveness of the proposed electromagnetic parameter extraction algorithm.

Keywords: foam absorbing material; reflectivity; complex permittivity; electromagnetic parameter inversion

0 引言

吸波材料能够将入射电磁波的能量转换为热能或其他形式的能量,从而解决电磁辐射污染或雷达隐身等问题,广泛应用于军事、民用等各个领域^[1-2]。其中,泡沫吸波材料因其质量轻、性能稳定均匀、耐环境性好、电磁参数可调范围大等优点,在电磁吸收领域受到广泛研究^[3-4]。准确的电磁参数测量是实现吸波体精细设计以及优化的前提和基础,因此,准确测定此类材料电磁参数的方法研究非常重要。

材料的电磁参数无法直接测量,一般需要通过建立散射参数、品质因数与电磁参数的关系间接计算得到^[5]。目前常用的测试方法有传输反射法^[6]、谐振法^[7]等。传输反射法主要采用波导或同轴线进行测量,该方法覆盖频率范围宽,测试方法成熟。但该方法根据测试频段的不同,需要将样品切割成小块或圆环,其加工精度直接影响测试结果。泡沫吸波材料由于其材质特殊性,加工难度更大。发泡聚丙烯(expanded polypropylene, EPP)吸波材料,其样品较为柔软,在进行毫米级切割时,样品的尺寸和形状无法达到国家标准规定的公差要求。发泡聚苯乙烯(expanded polystyrene, EPS)吸波材料,是炭黑包覆EPS颗粒制成,EPS颗粒的粒径在2~3 mm左右^[8],而波导法测量需要将样品切割成厚度1.5~10 mm厚度不一的小块,其微观结构已经被破坏。另外,受限于工艺限制,泡沫吸波材料的多孔结构分布不均匀^[9],在切割时会导致不同部位测得的结果不同。上述原因导致泡沫吸波材料的电磁参数测量精度低,无法满足吸波体设计的需求。

在反演算法上,以最经典的NRW(Nicolson-Ross-Weir)法最为常用,该方法具有适用范围广、求解速度快的优点,但由于相位模糊和厚度谐振的影响,该方法存在多值性问题^[10]。群时延方法^[11]、景莘慧虚部补偿法^[12]可以较为简单的解决多值性问题。针对相位测量不准确带来的负面影响,一种仅利用反射率信息反演电磁参数的方法得到了发展。Liu等^[13]利用遗传算法探究了P波段泡沫石墨烯的电磁参数,并分析了该频段下吸波板尺寸与波长的关系,但没有进行实际测试;Mosaviri等^[14-15]通过测量传输系数的幅度,利用机器学习方面对粉末、液体等材料的电磁参数进行探究,但该方法需要大量的训练数据,计算成本高。马东东^[16]通过垂直极化反射率,结合牛顿-拉夫逊迭代算法提取电磁参数,对18~40 GHz频率进行了探究;但该方法需要对两块厚度差异较大的待测材料进行测试,以满足迭代收敛条件,制造成本高。

综上所述,现有研究中泡沫多孔吸波材料在电磁参数测量方面仍面临加工后测量精度低、反演算法受相位

影响导致多解以及测试成本高等一系列问题。基于上述问题,本文提出一种新的电磁参数计算方法,即在测试方法上,采用无损接触测量的弓形法测试系统,以消除加工带来的误差。在算法上,采用反射率仅幅度值信息进行电磁参数的反演,避免相位周期性带来的多解问题。在测试成本方面,仅需对单块待测样品(materials under test, MUT)不同入射角度下的垂直极化和水平极化反射率进行测试,利用微波传输线原理中反射率与电磁参数的关系,将波导法测试得到的不准确的电磁参数作为初值代入,采用牛顿-拉夫逊迭代法进行反演即可求得整个频段的电磁参数。通过制作其他厚度的样品,将电磁参数代入求得理论反射率并与其他厚度样品的实际反射率对比;同时,与传统的波导法-NRW法进行对比,以证实该电磁参数计算方法的可行性和有效性。

1 理论模型与反演算法

1.1 吸波材料反射率计算的理论模型

在利用反射率进行电磁参数反演的过程中,现有研究大多采用单极化反射率反演方法。然而,为了提高反演精度,避免电磁参数反演带来的误差,通常需要借助新型数值算法或采用不同厚度的样品板,这无疑会增加计算复杂度和制造成本。本文创新性地提出了一种结合垂直极化和水平极化反射率信息的电磁参数反演方法,并采用经典的牛顿-拉夫逊数值解法。该方法在保证较高反演精度的同时,显著提高了收敛速度,有效降低了制造成本。

电磁波传输/反射示意图如图1所示,电磁波在传播过程中分别在空气-材料界面和材料-金属界面发生反射,总反射系数由 Γ 表征;而电磁波在吸波材料中的传输过程则由传输系数 T 表征。

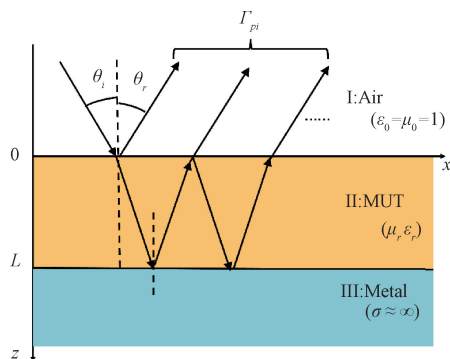


图1 电磁波传输/反射示意图

Fig. 1 The diagram of electromagnetic wave transmission/reflection

基于微波网络和传输线理论^[17],吸波材料反射率与

电磁参数的计算公式如下:

$$\Gamma_{pi} = \left(\frac{\Gamma - T^2}{1 - T^2\Gamma} \right) \left(\frac{\Gamma - T^2}{1 - T^2\Gamma} \right)^* \quad (1)$$

$$\Gamma_{VV} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_r\mu_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon_r\mu_r - \sin^2\theta}} \quad (2)$$

$$\Gamma_{HH} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r - \sin^2\theta} - \varepsilon_r\mu_r\cos\theta}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r - \sin^2\theta} + \varepsilon_r\mu_r\cos\theta} \quad (3)$$

$$T_{VV} = T_{HH} = e^{-\gamma L} \quad (4)$$

$$\gamma = j\beta = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r\mu_r - \sin^2\theta} \quad (5)$$

式中: ε_r 和 μ_r 分别表示相对于真空的复介电常数和复磁导率; Γ 和 T 分别为吸波材料的反射系数和传输系数; VV (vertical-vertical polarization) 和 HH (horizontal-horizontal polarization) 代表收发天线的极化方式, 分别为垂直极化和水平极化; Γ_{pi} 为实际测得的反射率; L 为吸波平板材料的厚度; γ 传播常数; β 为相位系数; ω 为角频率; c 为光速; θ 为电磁波入射方向与法线之间的夹角, 根据弓形法测试系统, θ 可取的范围是 $0^\circ \sim 45^\circ$ 。

1.2 反演迭代算法

当待测样品厚度和入射角度确定时, 反射率仅与电磁参数 (ε_r, μ_r) 相关, 分别对电磁参数的实部和虚部进行求导, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Gamma_{p1}}{\partial \varepsilon'_r} & \frac{\partial \Gamma_{p1}}{\partial \varepsilon''_r} & \frac{\partial \Gamma_{p1}}{\partial \mu'_r} & \frac{\partial \Gamma_{p1}}{\partial \mu''_r} \\ \frac{\partial \Gamma_{p2}}{\partial \varepsilon'_r} & \frac{\partial \Gamma_{p2}}{\partial \varepsilon''_r} & \frac{\partial \Gamma_{p2}}{\partial \mu'_r} & \frac{\partial \Gamma_{p2}}{\partial \mu''_r} \\ \frac{\partial \Gamma_{p3}}{\partial \varepsilon'_r} & \frac{\partial \Gamma_{p3}}{\partial \varepsilon''_r} & \frac{\partial \Gamma_{p3}}{\partial \mu'_r} & \frac{\partial \Gamma_{p3}}{\partial \mu''_r} \\ \frac{\partial \Gamma_{p4}}{\partial \varepsilon'_r} & \frac{\partial \Gamma_{p4}}{\partial \varepsilon''_r} & \frac{\partial \Gamma_{p4}}{\partial \mu'_r} & \frac{\partial \Gamma_{p4}}{\partial \mu''_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_r \\ \Delta \varepsilon''_r \\ \Delta \mu'_r \\ \Delta \mu''_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \Gamma_{p1} \\ \Delta \Gamma_{p2} \\ \Delta \Gamma_{p3} \\ \Delta \Gamma_{p4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)可简写为:

$$\mathbf{J} \Delta \mathbf{X} = \Delta \mathbf{Y} \quad (7)$$

式中: \mathbf{J} 为 4×4 阶雅克比矩阵, 是反射率对电磁参数 (ε_r, μ_r) 的实部、虚部进行求导的偏导矩阵。通过将偏导矩阵与电磁参数的变化量 $\Delta \mathbf{X}$ 相乘, 可以得到相应反射率变化量 $\Delta \mathbf{Y}$ 。 $\Delta \mathbf{X}$ 和 $\Delta \mathbf{Y}$ 可以分别表示为:

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X}^n(\varepsilon_r, \mu_r) - \mathbf{X}^{n-1}(\varepsilon_r, \mu_r) \quad (8)$$

$$\Delta \mathbf{Y} = \Delta \Gamma_{pi} = \Delta \Gamma_{pi}(\mathbf{X}^n) - \Delta \Gamma_{pi}(\mathbf{X}^{n-1}) \quad (9)$$

式中: n 表示迭代次数。该迭代计算方法与 GB/T 35679-2017《固体材料微波频段使用波导装置的电磁参数测量方法》附录 B.3 所指出的四参数迭代算法一致。正如参考标准中所述, 该方法会导致解的不稳定, 故本文将式(9)进行修正:

$$\Delta \mathbf{Y} = \Delta \Gamma_{pi} = \Gamma_{pi}(\mathbf{X}^n) - \Gamma_{pi}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

式中: Γ_{pi} 是第 i 次测试时测得的吸波材料的实测反射率, 在迭代过程中一直保持不变。显而易见, 修正后的迭代计算方法为非线性方程组的牛顿-拉夫逊迭代算法。

图 2 为牛顿-拉夫逊迭代算法流程。其中, x_0 为迭代初值; a 为迭代收敛精度, 通常设置为 0.01; N 为最大迭代次数。当前迭代结果 x_k 满足设定的误差精度要求, 则认为迭代已经收敛。此时输出当前频点下的电磁参数计算结果, 同时该结果将作为下一个频点的迭代初值, 直至完成整个频段的电磁参数计算。

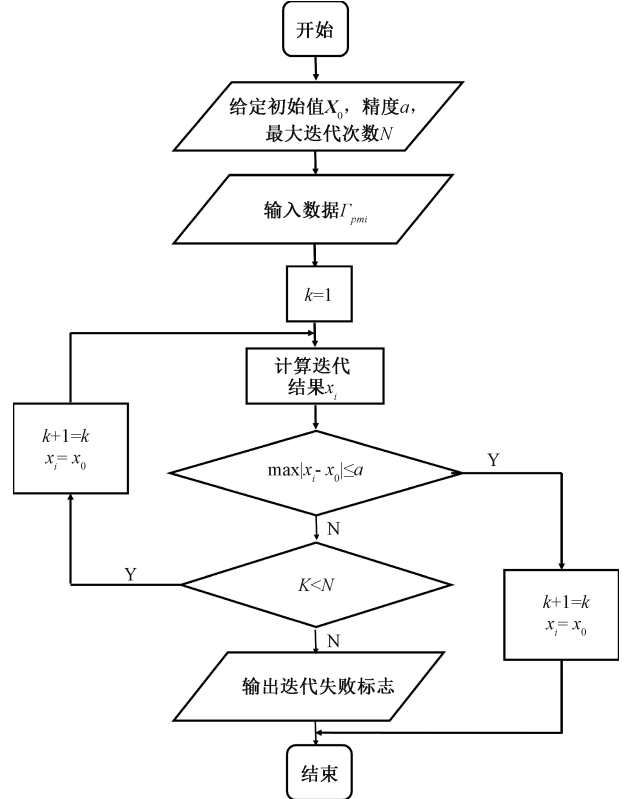


图 2 牛顿-拉夫逊迭代法流程

Fig. 2 The flowchart of Newton-Raphson technique

牛顿-拉夫逊迭代法是一种纯数值解法, 具有收敛速度快、计算效率高等优点, 且无需对参数进行调整和优化。但该方法对初值的选择较为敏感, 需要寻找一个合适的初值, 否则会陷入到局部收敛的情况^[18]。

2 反演算法的仿真验证

根据图 1 在 CST 软件中建立三维仿真模型如图 3 所示。仿真待测材料为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的正方形平板, 平板的背面衬有相同尺寸、厚度为 10 mm 的理想导体。仿真频段设定为 $8 \sim 12 \text{ GHz}$, 边界条件 (Boundary Conditions) 在 X, Y 方向设置为单元格 (Unit Cell), 以模拟无限大背景环境; Z_{\min} 方向为理想电壁 (electric ($E_t =$

0)), Z_{\max} 方向为开放边界 (open (add space))。采用平面波激励方法,其中 TE 模式为垂直极化,TM 模式为水平极化,斜入射角度通过调整边界条件中的 Scan Angles 中的 Theta 来实现。

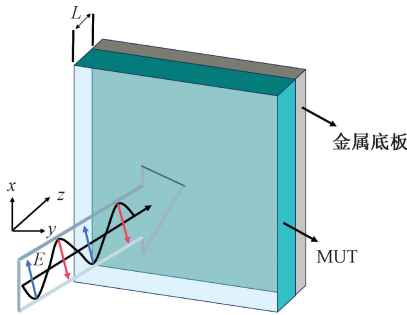


图 3 仿真模型示意图

Fig. 3 The diagram of the simulation model

为了验证仿真设置及所提出反演算法的有效性,选取了 3 种典型的非均质吸波材料 (水泥、陶瓷、泡沫),并将其在 10 GHz 频率下的复介电常数分别赋值于图 3 所示的待测材料模型。随后,分别计算了在 0° 、 15° 、 30° 、 45° 入射角下,垂直极化与水平极化的反射率。由于设置的材料均假定为非磁性材料,其复磁导率为 $\mu'_r = 1, \mu''_r = 0$,故仅需两条反射率曲线,即可求解复介电常数。分别计算了三种材料在垂直极化 0° 与水平极化 45° 反射率条件下提取的复介电常数,如图 4 所示。图 4(a) 为仿真反射率所提取的复介电常数实部,图 4(b) 为仿真反射率所提取的复介电常数虚部。表 1 为仿真设置的复介电常数、提取的复介电常数以及它们之间的偏差。结果表明,所提取的复介电常数与设定值之间的偏差均在设置的迭代误差范围内 ($a = 0.01$),从而证明了所建立的仿真模型和反演算法的准确性,并且验证了在双极化斜入射反射率条件下,通过迭代计算电磁参数的方法的可行性。

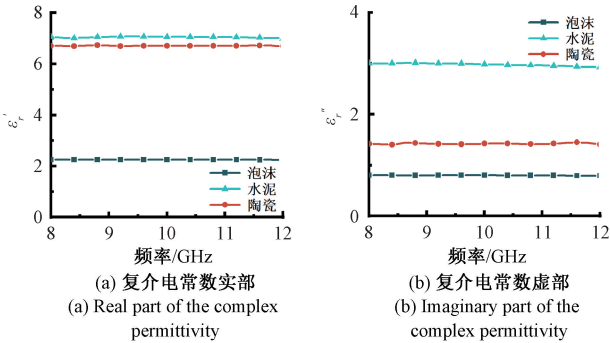


图 4 仿真反射率所提取的电磁参数

Fig. 4 Electromagnetic parameters extracted from the simulation reflectivity

表 1 仿真设置的材料参数及反演偏差
Table 1 Material parameters and inversion deviation of the simulation setup (10 GHz)

材料	仿真设置 $\varepsilon'_r/\varepsilon''_r$	反演求解 $\varepsilon'_r/\varepsilon''_r$	偏差/%
水泥	7.05/3.00	7.06/2.98	0.17/0.63
陶瓷	6.70/1.42	6.70/1.42	0.06/0.12
泡沫	2.25/0.80	2.25/0.80	0.07/0.09

3 测试环境和迭代参数设置

3.1 测试环境

测试环境及样品如图 5 所示。在该方法中,一对标准喇叭天线工作在 $2 \sim 18$ GHz 用作发射和接收天线,并通过低损电缆与矢量网络分析仪 (Ceyear-3672C) 连接。通过将天线旋转 90° 来改变极化方向。测试时,天线在弓形框上成轴对称移动。安置在天线上的高精度倾角仪 (JINGYAN TLL-90s) 保证极化方向和斜入射测试的准确度。弓形架半径为 2.5 m,置物台与弓形架的距离为 2 m,以满足远场测试条件。为了获得准确的反射率数据,整个测试环境处于微波暗室之中,并采用时域选通技术以消除背景噪声带来的影响。

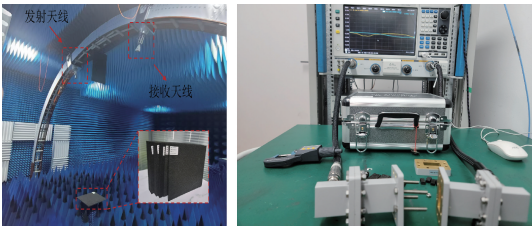


图 5 测试环境和样品

Fig. 5 The diagram of the testing environment and sample

测试样品 EPP 吸波材料,购于扬州斯帕克实业有限公司。为了保证材质的一致性,所有样品均从同一块吸波材料上切割而来。样品的截面积为正方形,边长为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,可用于 $2 \sim 18$ GHz 频率范围内的反射率测试。在样品的每条边取三等分点作为测量点,共计 12 个测量点,利用游标卡尺进行测量,并计算其平均厚度,如表 2 所示。

表 2 待测 EPP 材料厚度信息

Table 2 Thickness information of the test EPP material

样品编号	平均厚度/mm	样品编号	平均厚度/mm
P1	2.843	P4	20.720
P2	4.947	P5	30.585
P3	9.398		

受限于功率放大器的工作频段,本次测试范围为 $8 \sim 12$ GHz 波段,每块样品分别测试了垂直极化与水平极化

时在 4.2°、13.2°、28.2°和 38.2°四个斜入射角度共 8 组反射率的结果,5 块样品共计 40 组反射率信息。

此外,为比较所提出算法与经典的波导法-NRW 法的测试结果,还对 5 mm 厚的 EPP 平板样品进行切割,用于制作波导法测试样品。鉴于波导法易因切割损伤微观结构而引入误差,因此,为减小单一样品结构不均匀性引起的误差,并提高测量数据的可靠性,在 EPP 平板样品的四个角及中心处分别取样,共计有 5 块测试样品,通过对这 5 块样品的复介电常数进行测量,并对结果进行统计平均处理,以减少切割误差对最终测试结果的影响,从而获得更具代表性的复介电常数数据。样品的编号及其平均厚度见表 3 所示。

表 3 待测波导块厚度信息

Table 3 Thickness information of the test waveguide block			
样品编号	平均厚度/mm	样品编号	平均厚度/mm
1#	5.118	4#	4.886
2#	4.811	5#	5.040
3#	5.097		

3.2 迭代参数设置

设置最大迭代次数 $n=1\,000$,收敛精度 $a=0.01$ 。由于 EPP 吸波材料多数为非色散材料,其电磁参数随频率变化不大^[19]。因此,只需要确定起始频点(8 GHz)的初值,并将该频点的最终计算结果作为下一个频点的迭代初值,即可得到整个频段的反演结果。反演频段设置为 8~12 GHz,频率步长设置为 0.1 GHz,采用波导法测试,并以 NRW 法进行反演计算,得到 8 GHz 频点下的迭代初值为 $\varepsilon' = 1.65, \varepsilon'' = 0.60$ 。

4 结果与讨论

4.1 数据提取及验证

采取 P3 样品($L=9.398\text{ mm}$)作为标准样,其余厚度样品作为验证样。采用垂直极化 28.2°入射,水平极化 38.2°入射情况下的测试结果进行计算。参与反演的反射率如图 6(a)所示,所提取的复介电常数如图 6(b)所示。可以看出,复介电常数的曲线随频率连续变化且平稳,没有异常值的出现,符合一般规律。

为了利用 NRW 法求解被切割后的波导块的电磁参数,采用了波导法对样品的 S 参数进行了测试。测试系统由矢量网络分析仪(Ceyear-3672C)、矩形波导、同轴-波导转换线缆和法兰配件等组成,测量环境如图 5 所示。样品被固定安装在矩形波导的法兰之间,以保证样品尺寸与波导截面相匹配,防止高次模的激励引入误差。为了提高测量的准确性,测试开始前,对矢量网络分析仪进行严格的 SOLT(short-open-load-through)校准,消除系统

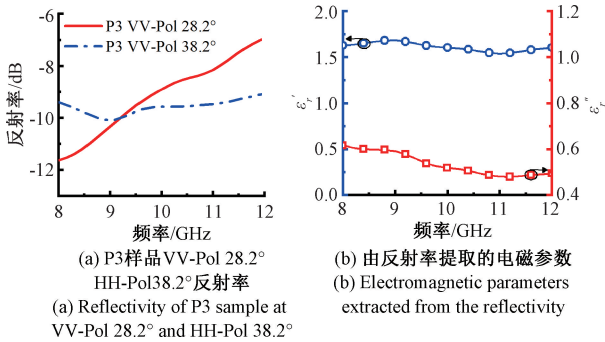


图 6 实验测得的反射率与所提取的电磁参数
Fig. 6 Experimentally measured reflectivity and extracted electromagnetic parameters

本身的误差。测量过程中,矢量网络分析仪在 8~12 GHz 频段内进行频扫,自动获取 S_{11} 和 S_{21} 的幅度与相位数据。测试完成后,测试结果经过时域门滤波处理,以抑制多径干扰与噪声的影响,从而提高反射与传输特性曲线的精度。利用 NRW 法对所测得的 S 参数求解,求得的复介电常数及其平均复介电常数如图 7 所示。其中,图 7(a)为波导法-NRW 法所提取的复介电常数实部,图 7(b)为波导法-NRW 法所提取的复介电常数虚部。

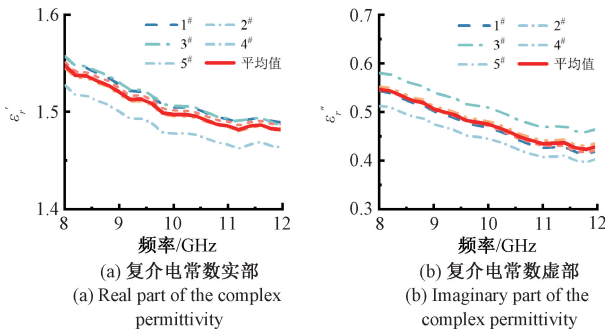


图 7 波导法-NRW 法所提取的复介电常数
Fig. 7 Waveguide method - NRW method for extracting complex permittivity

为了验证所提取的复介电常数的正确性,将本文所提出的迭代法提取的复介电常数代入式(1)~(5)中,分别计算在不同厚度和不同入射角度条件下样品的垂直极化与水平极化理论反射率,并将其与实际测试所得的反射率进行对比分析。同时,为了进一步验证所提出算法在非均匀吸波材料电磁参数提取中的优越性,将波导法-NRW 法提取出的复介电常数,基于相同的计算方法得到理论反射率,并将其与实测反射率及本算法所计算的理论反射率进行对比。通过多组数据的对比分析,对所提出算法在复介电常数提取精度方面做出评估。

图 8 为 P1、P3、P5 三块样品在 8~12 GHz 频段内的实测反射率与迭代法及波导法-NRW 法计算值的对比

分析。

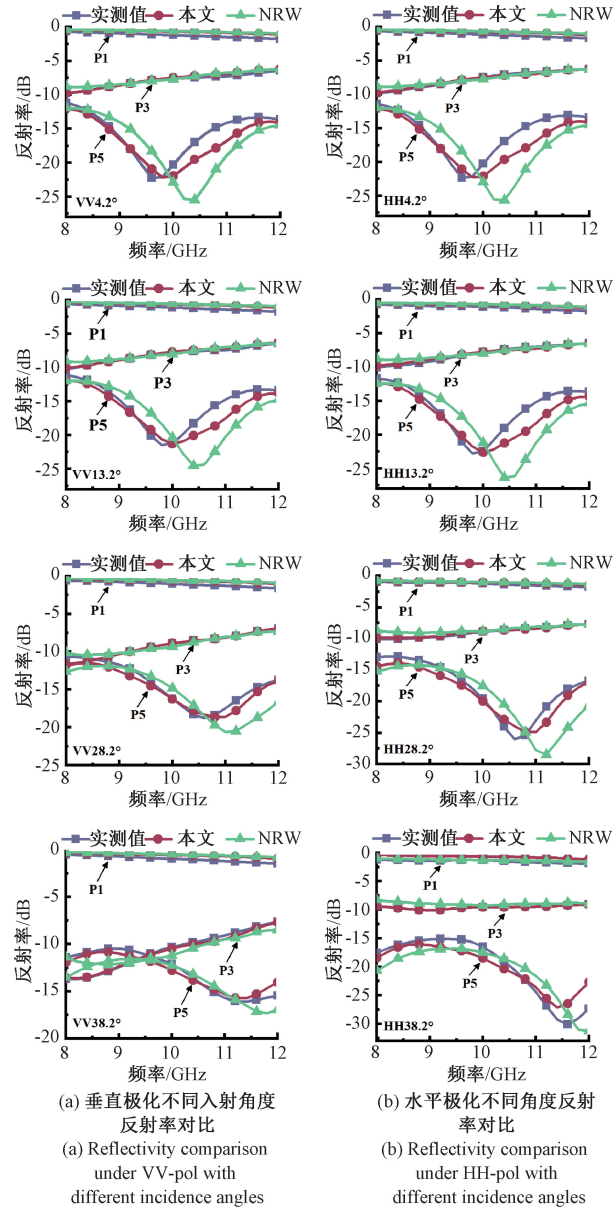


图 8 P1、P3、P5 样品理论反射率与实际反射率对比
Fig. 8 Comparison between measured and theoretical reflectivity of P1, P3, and P5 samples

对于 P1 样品, 由于反射率较大 (RL 值均大于 -3 dB), 理论值与实测值几乎贴合在一起, 在图中很难观察。而 P3 样品作为该频段下的标样, 迭代法提取的复介电常数所正演的反射率与实测反射率几乎完全重合, 在图 8 中已很难观察到两种线型的区别, 也从侧面证明了反演提取复介电常数及正演反射率过程的正确性。

对于 P5 样品, 迭代法提取的复介电常数所正演的理论反射率在谐振频点处与实测值几乎完全重合, 仅在越过谐振点后存在一定的幅值差异。但仍然可以证明本文

提出的方法所提取的复介电常数能够准确预测材料的谐振频点及其主要反射特性。相比之下, 波导法-NRW 法对谐振频点的预测存在较大偏差, 谐振点的频率偏差接近 1 GHz, 这种误差对于谐振型吸波材料的设计和预测而言具有一定影响, 可能导致材料性能难以满足设计需求。

同理, 图 9 为 P2、P4 样品在 $8 \sim 12$ GHz 频段内, 迭代法与波导法-NRW 法计算的理论反射率与实测反射率的对比分析。从图 9 中可以看出, 对于 P4 样品, 本文提出的迭代法所提取的复介电常数正演出的理论反射率无论是在谐振频点位置还是谐振幅值上, 均与实测值高度吻

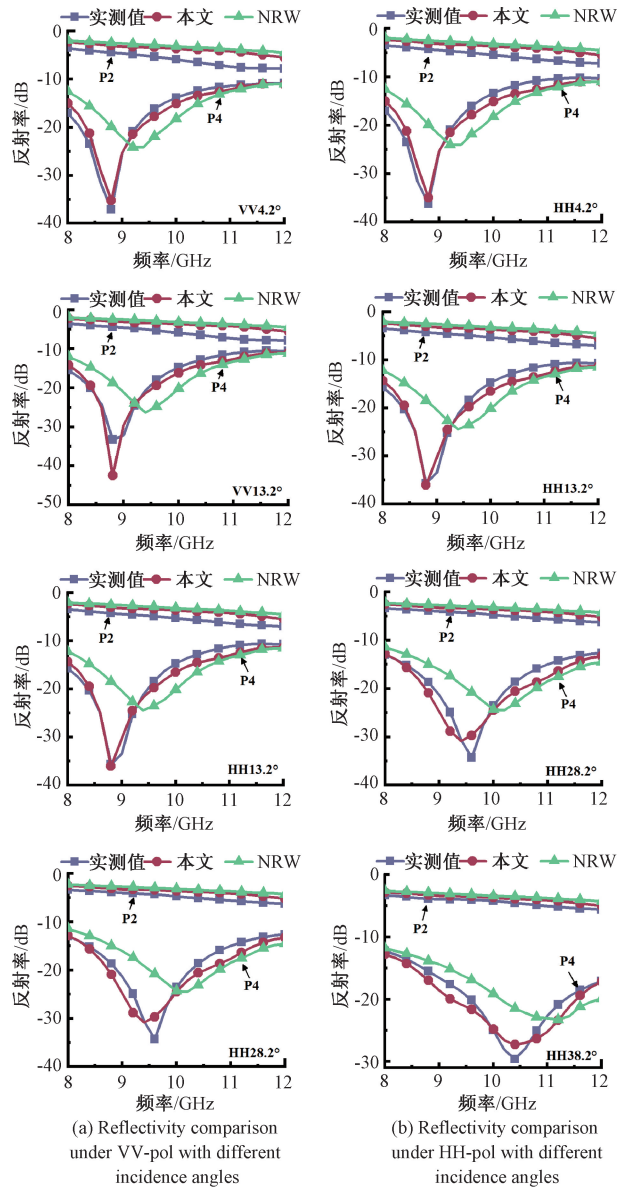


图 9 P2、P4 样品理论反射率与实际反射率对比
Fig. 9 Comparison between measured and theoretical reflectivity of P2 and P4 samples

合,表现出几乎完美的匹配。而相比之下,波导法-NRW 法在谐振频点的预测上存在明显偏差,频点差值接近 1 GHz,同时在谐振幅值的预测上也表现出较大的误差,未能有效反映样品的实际特性。

为了精确的对比数值差异,本文计算了部分频点 P1、P3、P5 样品的 28.2°HH-Pol 反射率差值,如表 4 所示,除了谐振点外其余各频点的绝对值偏差均小于 1 dB,而弓形法测试系统的测量误差在±1 dB。结合图 8 和 9 的对比结果可知,本文方法在宽频范围内均能有效抑制因材料加工和相位模糊带来的误差,为实际工程中吸波体设计与优化提供了可靠的数据基础。

表 4 28.2°HH-Pol 部分频点的理论
反射率与实测反射率对比

Table 4 Comparison between the measured reflectivity and the calculated reflectivity at specific frequency points at 28. 2°HH-Pol (dB)						
		8 GHz	9 GHz	10 GHz	11 GHz	12 GHz
P1	实测值	-0.765	-0.913	-1.027	-1.185	-1.394
	理论值	-0.959	-1.079	-1.217	-1.272	-1.727
	偏差	0.194	0.166	0.190	0.087	0.333
P3	实测值	-10.038	-9.780	-8.902	-8.288	-7.791
	理论值	-9.840	-9.717	-8.804	-8.389	-7.772
	偏差	0.198	0.063	0.098	0.101	0.019
P4	实测值	-12.997	-21.277	-23.531	-14.972	-12.835
	理论值	-12.878	-24.759	-24.519	-17.613	-13.641
	偏差	0.119	3.482	0.988	2.641	0.806

4.2 稳定性验证

P3 样品在不同入射角度下提取的复介电常数如图 10 所示。可以看出,在两个极化入射角度的差值较小时,反演误差较大,这个现象在 VV-Pol4.2°、HH-Pol13.2° 情况下尤其明显,甚至在 7.8 GHz 处出现了不收敛的情况。由式(2)、(3)可知,当 θ_{VV} 与 θ_{HH} 同时为零时,垂直极化与水平极化的反射率是相等的。在入射角度差值较小时,反射率的幅度大小也几乎相等,牛顿-拉夫逊迭代法很难进行求解,因此会陷入到不收敛的情况。因此,两个自由空间测量之间的入射角差异越大,电磁特性提取就越可行,因为这两个很大程度上分离的入射角处测量的反射率有很大差异,其迭代方程的雅克比矩阵条件数越小,这与文献[20]的描述是一致的。

根据式(2)、(3)可知,水平极化反射系数的 Γ_{HH} 计算中,电磁参数 ϵ_r 、 μ_r 分别与线性项($\epsilon_r\mu_r\cos\theta_i$)和平方根项($\sqrt{\epsilon_r\mu_r-\sin^2\theta_i}$)共同作用;而垂直极化的反射系数,其电磁参数 ϵ_r 、 μ_r 仅与平方根项($\sqrt{\epsilon_r\mu_r-\sin^2\theta_i}$)有关。因此水平极化反射率相较垂直极化反射率,在角度变化上的响应更加显著。4.1 节的讨论也应证了这一现象,水平极化反射率其谐振频点和振幅随入射角度的增大,变

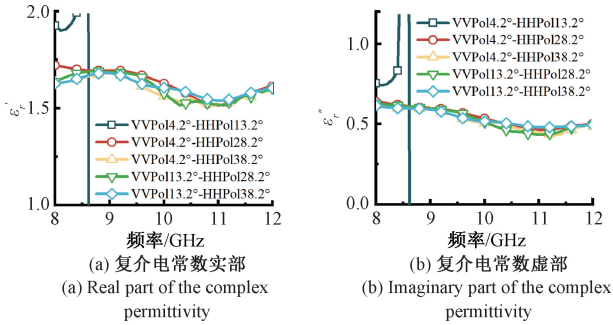


图 10 不同入射角度下 P3 样品提取的复介电常数
Fig. 10 The complex permittivity of sample P3
at different incident angles

化非常显著。因此,在实际反演过程中,应选择增大水平极化反射率的入射角度,有助于降低垂直极化与水平极化反射率之间的相关性,从而避免迭代算法收敛至错误的解空间。

固定入射角度为 VV-Pol4.2°,HH-Pol38.2°,以观察厚度对提取电磁参数的影响。P3、P4、P5 样品所提取出的复介电常数如图 11 所示,可以看出复介电常数实部几乎稳定在同一区间,虚部差异略大,但仍然处于可以接受的范围之内。这种现象的原因可能是由于 EPP 材料的不均匀性造成的,即不同厚度的样品其内部孔洞结构、掺杂的吸波剂分布情况会有不同。

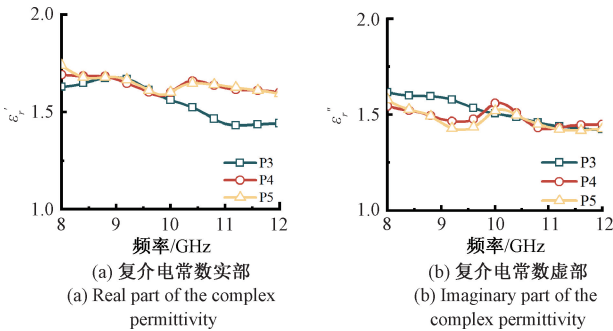


图 11 相同入射角度下不同厚度样品提取的复介电常数
Fig. 11 The complex permittivity of samples with
different thicknesses at the same incident angle

P1、P2 样品由于未能反演出正确的电磁参数,故未在图中标出。可能的原因主要有如下 3 点:首先,P1、P2 样品较薄,吸波性能较差,整体反射率在-1 dB 左右,而弓形法的测试误差在±1 dB^[21],其反射率测试结果误差很大;其次,较薄的样品在加工时,其微观尺寸已经被破坏,理论计算值与实测值也会有较大差异;最后,较薄样品的机械加工带来的误差也更大,其表面平整度和尺寸公差不能满足测试要求。而更厚的样品则需要半径更大的弓形架才能满足远场条件。

此外,由式(4)、(5)可知,当厚度 L 趋近于 0 时,传输系数 T 趋近于 1,反射率 $\Gamma_p \approx -1$,此时电磁波几乎完全反射;当厚度 L 过大时,传输系数 T 趋近于 1,反射率 $\Gamma_p \approx \Gamma_{VV,HH}^2$,此时,反射率主要由材料的表面反射特性决定,不能反映非均匀吸波材料的内部结构。并且,过厚的材料需要半径更大的弓形架,否则无法满足远场条件。因此,由实际验证经验表明,针对 EPP 材料,采用 10 ~ 30 mm 厚的样品进行反演计算更为精确。

5 结 论

本文针对非均匀泡沫吸波材料电磁参数测试中存在的加工误差大、相位多解性及成本高等问题,提出了一种基于双极化反射率信息的无损反演方法。利用弓形法多角度反射率测试与牛顿-拉夫逊迭代算法,通过垂直极化与水平极化反射率幅度的联合约束,构建非线性方程组并求解复介电常数,避免了经典 NRW 算法计算电磁参数带来的相位模糊引起的多值问题。采用了无损接触测量的方法,避免了吸波材料形状尺寸的特殊加工要求,不会破坏非均匀吸波材料的原有结构。另外,该方法仅需测量一块吸波材料,适用范围广,成本低。理论值与实测值的比对结果证明该提取算法是可行的。

今后的工作主要是将该方法推广到其他类型的非均匀吸波材料或超表面等特殊结构材料的电磁参数提取上。同时,受限于测试成本,本文只对 8 ~ 12 GHz 的频段进行讨论,但弓形法测试范围为 2 ~ 40 GHz,因此,该方法在宽频带测试上也有一定的应用空间。

参考文献

[1] KAUSAR A. Polyurethane composite foams in high-performance applications: A review [J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2018, 57(4): 346-369.

[2] 刘晓明,华宇晨,傅远翔,等. 雷达吸波材料研究进展[J]. *中国材料进展*, 2023, 42(9): 685-698.

LIU X M, HUA Y CH, FU Y X, et al. Research progress of radar absorbing materials [J]. *Materials China*, 2023, 42(9): 685-698.

[3] WANG S, HUANG Y F, CHAG E, et al. Evaluation and modeling of electrical conductivity in conductive polymer nanocomposite foams with multiwalled carbon nanotube networks [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, DOI: 10.1016/j.cej.2020.128382.

[4] ZHAO J, WANG G, WANG C, et al. Ultra-lightweight, super thermal-insulation and strong PP/CNT microcellular foams [J]. *Composites Science and Technology*, 2020, DOI: 10.1016/j.compscitech.

2020.108084.

[5] 杨闯. 微波和 THz 波段复介电常数与复磁导率测量的关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.

YANG CH. Research on key technologies for measuring complex dielectric constants and complex magnetic permeability in microwave and THz bands[D]. Tianjin: Tianjin Univer-sity, 2023.

[6] 杨志良,江禹,李元浩,等. 基于波导传输线的电磁参数测试校准方法[J]. *电子测量技术*, 2024, 45(4): 179-184.

YANG ZH L, JIANG Y, LI Y H, et al. Measurement and calibration method of electromagnetic parameters based on waveguide transmission Line [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 45(4): 179-184.

[7] 刘傲,陈佳慧,任英杰,等. 基于谐振环法板材介电常数高精度测试研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022(11): 42-49.

LIU AO, CHEN J H, REN Y J, et al. Research on high-precision measurement of substrate dielectric constant based on resonant ring method[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022(11): 42-49.

[8] 杨元意,石显芸,丁仕豪,等. EPS-石墨烯-水泥基复合吸波材料的制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2024, 42: 1-16.

YANG Y Y, SHI X Y, DING SH H, et al. Preparation and electromagnetic absorbing performance of EPS-graphene-cement-based composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024(42): 1-16.

[9] FAN D, TAN R, WEI B, et al. Broadband microwave absorption performance and theoretical dielectric properties model of hollow porous carbon spheres/expanded polypropylene composite foams [J]. *Polymer*, 2021, DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124262.

[10] ANGIULLI G, VERSACI M, CALCAGNO S, et al. Analytic continuation, phase unwrapping, and retrieval of the refractive index of metamaterials from S-parameters [J]. *Sensors*, 2024, DOI: 10.3390/s24030912.

[11] 黄斯琦. 基于深度学习的电磁参数反演方法研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2021.

HUANG S Q. An electromagnetic parameter retrieval method based on deep learning [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2021.

[12] 翟超宇,刘善军,郭嘉兴. 基于微波干涉理论的岩石介电常数测试方法[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(15): 1-5.

ZHAO CH Y, LIU SH J, GUO J X. Rock dielectric constant test method based on microwave interference

- theory [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(15): 1-5.
- [13] LIU W J, XIONG J J, CHEN L J. Inversion of P-band electromagnetic parameters based on a genetic algorithm and method of moments [J]. *IEEE Access*, 2022(10): 52094-52101.
- [14] MOSAVIRIK T, HASHEMI M, SOLEIMANI M, et al. Microwave permittivity characterization using power measurements and machine learning [C]. 2021 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP). IEEE, 2021: 618-620.
- [15] MOSAVIRIK T, NAYYERI V, HASHEMI M, et al. Direct permittivity reconstruction from power measurements using a machine learning aided method[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, DOI: 10.1109/tmtt.2023.3267390.
- [16] 马东东. 介质/吸波材料电磁特性参数测量与小型化双工器研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
MA D D. Measurement of electromagnetic characteristic parameters of dielectric/absorbing materials and research on miniaturized duplexers [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.
- [17] 何招领. 基于近远场测试的微波毫米波材料反射率表征技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
HE ZH L. Research on the characterization technology of microwave millimeter wave material reflectivity based on near-field and far-field testing [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [18] 雍龙泉. 非线性方程牛顿迭代法研究进展[J]. *数学的实践与认识*, 2021, 51(15): 240-249.
YONG L Q. Advances in Newton's iterative methods for nonlinear equation [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2021, 51(15): 240-249.
- [19] 刘列, 张颖, 盛佳琪, 等. 新型微波暗室用耐功率吸波材料的回顾与展望[J]. *安全与电磁兼容*, 2024(4): 19-31.
- LIU L, ZHANG Y, SHENG J Q, et al. Review and perspective of novel high-power wave absorber of microwave chambers [J]. *Safety and EMC*, 2024(4): 19-31.
- [20] HASAR U C, OZTURK G, BUTE M, et al. Method for electromagnetic property extraction of sublayers in metal-backed inhomogeneous metamaterials[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 151705-151718.
- [21] 李智. 微波反射率弓形法测试技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
LI ZH. Research on the measurement technology of microwave reflectance bow method [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.

作者简介



杜远阳, 2021 年于江苏师范大学获得学士学位, 现为南京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为微波技术、电磁防护。

E-mail: duyuan yang@njst.edu.cn

Du Yuanyang received his B. Sc. degree from Jiangsu Normal University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include Microwave technology and electromagnetic protection.



吴杨慧(通信作者), 分别在 2012 年和 2022 年于南京理工大学取得学士学位和博士学位, 现为南京理工大学博士后, 主要从事微波射频器件, 柔性超表面等方面的研究工作。

E-mail: YHWu@njst.edu.cn

Wu Yanghui (Corresponding author) was born in 1994, received B. Sc. and Ph. D. degrees from Nanjing University of Science and Technology in 2012 and 2022 respectively. Now she is a post-doctoral at Nanjing University of Science and Technology. Her main research interests include microwave and radio frequency devices, flexible metasurfaces, and other related fields.