复 合 材 料 学 报　　第24 卷　第1 期　2 月　2007 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 24　No. 1　February　2007

文章编号: 1000-3851(2007)01-0141-05

自由空间法测量复合材料复电磁参数

张　伟, 苏东林*
(北京航空航天大学 电子信息工程学院 RF/EMC 实验室, 北京 100083)

摘　要: 自由空间法可以方便地改变入射电磁波的角度和极化方向, 适用于测量复合材料的电磁参数。对自由空间法测量复合材料电磁参数进行了初步研究, 探讨了测量结果在计算过程中产生的多值问题, 并通过理论分析给出了一些有效的解决方案。用自由空间法测量了4 种聚合物复合材料样品在X 波段(8.2～12.4 GHz) 的复电磁参数, 并用波导测量法进行了验证。研究结果表明自由空间法测量复合材料电磁参数具有较高的精确度。

关键词: 自由空间法; 复合材料; 复电磁参数; 多值问题
中图分类号: TB330.1; TM15　　**文献标识码**: A

Measurement of complex electromagnetic parameters of composite materials by free-space method

ZHANG Wei, SU Donglin*
(RF/EMC Lab, School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The free-space method is a suitable analysis method for measuring electromagnetic parameters of composite materials, due to its easy changeable incident angle and polarization of electromagnetic waves. This method was used to measure complex electromagnetic parameters of polymers and composites. In order to solve the multi-valued problem caused by the calculation process, several effective ways were proposed for the theoretical analysis. The complex permittivity and permeability of four samples of polymer composite materials were measured in the X-band(8.2～12.4 GHz) by using the free-space method. The experimental data are validated with the help of the waveguide technique. The results indicate that the complex electromagnetic parameters of composite materials can be measured exactly by the free-space method.

Keywords: free-space method; composite materials; complex electromagnetic parameters; multi-valued problem

自由空间法[1]是一种非接触和非破坏性的测试方法, 利用天线将电磁波辐射到自由空间, 再利用天线接收并测量材料对所发射电磁波的反射和透射信号, 计算介质材料的电磁参数。与其它测量方法相比, 自由空间法对测试材料样品没有非常严格的形状和工艺要求, 只需厚度均匀且有一定大的测试面积, 以避免边沿绕射。自由空间法还具有很高的灵活性, 可以随意改变入射电磁波的极化方向和入射角度, 非常适宜于测量复合材料的电磁参数。此外, 自由空间法适用范围广, 既可用于高损耗的吸波复合材料电磁参数的测量, 亦可用于天线罩等损耗较低的复合材料电磁参数的测量。该方法的测试带宽非常广, 通常测试频率为5～40 GHz, 甚至更高(可达100 GHz)。

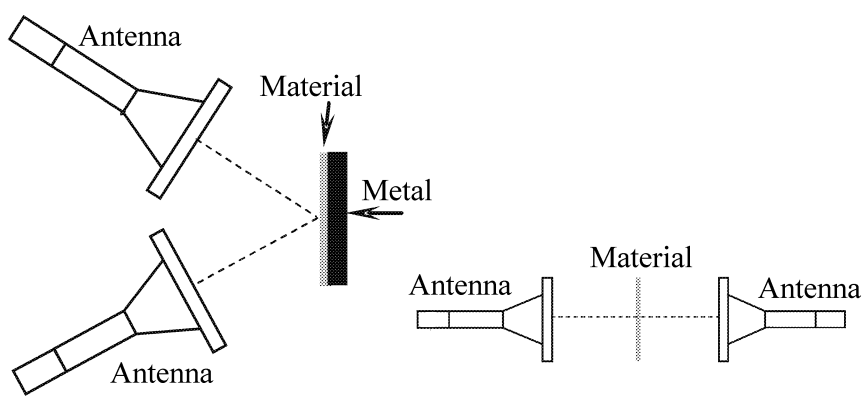
1987 年, 伦敦大学电子工程系的Cullen[2]利用菲涅尔反射定律, 提出了一种有效的反演方法, 为在自由空间测量材料的电磁参数提供了一种有效途径。1989 年Ghoduaonkar[3]用透镜天线作为测量的发射和接收源, 并给出了天线与测试样品的相对尺寸要求。该方案可将入射电磁波聚焦在样品表面一个波长直径范围内, 使投射到样品表面的电磁波范围变小, 基本可以忽略样品的边沿散射。1991 年, Umari[4]提出了一种全新的自由空间双静态校正方法, 有效地减少了发射天线与接收天线之间的

收稿日期: 2006-02-03; 收修改稿日期: 2006-04-27
通讯作者: 苏东林, 博士, 教授, 从事电磁兼容和射频电路方面的研究　E-mail: sdl@buaa.edu.cn

多重反射，并引入修正因子修正测量的复反射系数，减小了入射波在样品表面的散焦影响，使在自由空间对材料电磁参数的测量易于实现。同年 Al-Qadi[5] 研究了干燥和潮湿的混凝土的电磁特性。1996 年和1998 年 Muhamez[6,7] 等就电磁波入射角度对电磁参数测量的影响进行了研究。2002 年 Tamyis[8] 等借鉴传输线中的匹配原理，利用终端开路短路法实现了测量反射系数的两种状态，使计算过程十分简单，具有很好的实用价值。

用自由空间法测量电磁参数，电磁波是辐射到自由空间中的，即使采用聚焦天线，也难免产生多余的反射而导致结果误差。通常用 TRL 校正和时域门对测量系统和测量值进行修正，可以有效减小误差，但相比波导法误差还是略大。实验证明，在频率为94 GHz 时，耐热有机玻璃和特弗隆的复介电常数与复导磁率的实部随机不确定度约为5%，损耗角正切的不确定度约为 10%；在频率为 10GHz 时，损耗角正切的误差也很难控制在2%之内。

在实际测量中，自由空间法按具体测量方式不同又可以分为单反射测量和传输反射测量。单反射法(如图1(a) 所示) 是在两次不同状态(包括角度、厚度与状态) 下测出材料对电磁波的反射系数，然后利用两次数据计算出电磁参数。传输反射法(如图1(b) 所示) 是利用收发分置的测试系统分别测出系统的反射和透射系数，再计算电磁参数。所采用的测量方式可视具体情况而定。



(a) Single reflection　　(b) Reflection and transmission

图1　自由空间法的测量原理

Fig.1　Measuring theory of free-space method

1　测量理论

复电磁参数一般表达式如下:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \qquad \mu = \mu' - j\mu'' \tag{1}$$

根据双端口与单端口所需测量数据的差别，所用的具体计算公式亦不同，但均基于迈克斯韦方程和菲涅尔反射定律。

双端口测量大多采用传输/反射法，即测量同一入射角度下分别测量系统的反射系数 S_{11} 和透射系数 S_{21}。当电磁波入射到表面积无限大的材料上时，忽略边缘散射，则 S_{11} 与 S_{21} 满足

$$S_{11} = \frac{R(1-P^2)}{1-R^2P^2},\quad S_{21} = \frac{P(1-R^2)}{1-R^2P^2} \tag{2}$$

其中: R 为空气入射到无限厚的复合材料界面的反射系数; P 为电磁波穿过复合材料样品的传递因数。R 与 P 可由下面两式给出:

在垂直极化下

$$\text{垂直极化}\quad R = \frac{\mu\cos\theta - \sqrt{\mu\varepsilon - \sin^2\theta}}{\mu\cos\theta + \sqrt{\mu\varepsilon - \sin^2\theta}}$$

$$\text{平行极化}\quad R = \frac{\mu\varepsilon - \sin^2\theta - \varepsilon\cos\theta}{\mu\varepsilon - \sin^2\theta + \varepsilon\cos\theta} \tag{3}$$

在平行极化下

$$P = \exp\left(-j\frac{2\pi d}{\lambda}\sqrt{\mu\varepsilon - \sin^2\theta}\right) = |P|\exp(j\varphi_P) \tag{4}$$

其中: θ为电磁波的入射角度; λ 为入射电磁波在真空中的波长。

根据式(2) 和式(3)，可以得出

$$R = K \pm \sqrt{K^2 - 1},\quad P = \frac{S_{11} + S_{21} - R}{1 - R(S_{11} + S_{21})} \tag{5}$$

其中，$K = \dfrac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}$。

再根据式(3) 或式(4)，便可解得复电磁参数 ε、μ。以垂直极化为例可求出

$$\varepsilon = \frac{Q^2 + \sin^2\theta}{\mu},\quad \mu = \frac{(1+R)Q}{(1-R)\cos\theta} \tag{6}$$

其中

$$Q = \frac{\lambda(2n\pi - \varphi_P)}{2\pi d} + j\frac{\lambda}{2\pi d}\ln\frac{1}{|P|} \tag{7}$$

$$(n = 0, \pm1, \pm2, \cdots)$$

单端口所用的多状态测试理论，其推导过程类似，也用到了 R 和 P，只是式(2) 中的系统透射系数 S_{21} 用贴完铝箔后的系统反射系数 S'_{11} 替代，见下式:

$$S_{11} = \frac{R(1-P^2)}{1-R^2P^2},\quad S'_{11} = \frac{R - P^2}{1 - RP^2} \tag{8}$$

解方程组(8)，得

$$R = \frac{L - 1 \pm \sqrt{(L-1)^2 - 4}}{2},\quad P = \pm\sqrt{\frac{R - S'_{11}}{1 - RS'_{11}}} \tag{9}$$

其中, $L = (1 + S_{11}' + S_{11}S_{11}')/S_{11}$

此外对于低损耗的非磁性复合材料, ε''相对于ε'可以忽略, 并且 $\mu = 1$。此时所求的复电磁参数只有 $\varepsilon' = \varepsilon$, 所以只需测量一次反射系数 S_{11} 或透射系数 S_{21}, 就可求出 ε。以测量反射系数 S_{11} 为例, 根据式(3) 有

垂直极化 $$\varepsilon = \frac{(1-R)^2\cos^2\theta}{(1+R)^2} + \sin^2\theta$$

平行极化 $$\varepsilon = \frac{(1-R)^2 + (1-R)^4 - (1+R)^2(1-R)^2\sin^2 2\theta}{2(1+R)^2\cos^2\theta} \tag{10}$$

上式中的 R 可以由式(2) 中的 S_{11} 导出。这里设 $S_{11} = |S_{11}|\exp(j\ _{11})$, 则

$$R = (T \pm \sqrt{T^2 - 4})/2 \tag{11}$$

其中, $T = 2\cos\ _{11}/|S_{11}|$。

式(5)、式(9) 和式(11) 中关于 R 算式中的"±", 取其中$|R| < 1$ 者。另外, 由式(4) 不难看出, P 的实部随频率增加而减小, 因此式(9) 中关于 P 算式中的"±"即可根据该特征确定。

2　多值问题

由式(6) 可以看出, 利用式(7) 所得到的复合材料电磁参数不是唯一的, 而存在多组解值满足测量结果, 这就是反演中的多值问题。多值问题产生的实质是对三角函数的计算, 因此不能通过单纯的计算解决。

令电磁波为垂直入射, 式(4) 中, $-\pi < \ _P \le \pi$, 则式(7) 中的 n 为

$$n = [d/\lambda] \tag{12}$$

其中: λ为材料内部的电磁波波长; "[ ]"为高斯函数。可见, n 的取值取决于复合材料样品的厚度 d。多数情况下采用的方法是选取 d 非常小的样品, 使 $d < \lambda$, 则 $n = 0$。该方法比较可靠, 但即使如此, 仍然很难做到绝对的准确。

对于一般的准各向同性复合材料, 可以采取多角度入射的方法解决多值问题。设电磁波两次入射材料的角度分别为 θ 和 θ'($\theta \neq \theta'$), 利用式(5) 求出所对应的 R_1 和 R_2, 则复电磁参数便可由式(3) 给出, 以垂直极化为例(见下式(13))。由式(13) 得到的相对复电磁参数是唯一的, 但在改变入射角时也会损失一些测量精度。不过对于最终的测量结果来说, 这些精度损失还是比较小的。

用时域图像观察加金属板的复合材料样品对电磁波的反射时, 可以很明显地看出, 在时域中材料样品的前表面和后表面对电磁波的2 次反射。对于厚度较大的材料样品则更加明显。2 个脉冲的间隔时间 τ是电磁波在复合材料样品中往返一次所需的时间。所以可以根据 τ算出相移常数 β, 进而确定测量复合材料样品的复电磁参数。

根据式(7), 可知复合材料内电磁波的相移常数 β为

$$\beta = (2n\pi - \ _P)/d \tag{14}$$

这里为方便计算, 令电磁波为垂直入射, 便可以得到 n 与 τ的关系:

$$n = (\omega\tau + 2\ _P)/4\pi \tag{15}$$

具体到实际情况, n 应取距计算值最近的整数。

图2 为厚度4.02 mm, 相对复电磁参数 $\varepsilon = 4.4 - j0.1$, $\mu = 1$ 的玻璃纤维增强复合材料样品对电磁波的反射时域图。可以明显看出最前面的2 个脉冲即为前后表面对电磁波的反射脉冲。其中 τ为61.02 ps, 在频率为20 GHz 时, 相应的式(4) 中的 $_P$ 为157.56°。根据式(15), n 为1.05, 则 n 最终取值为1。虽然该方法具有一定的普遍性, 但主要

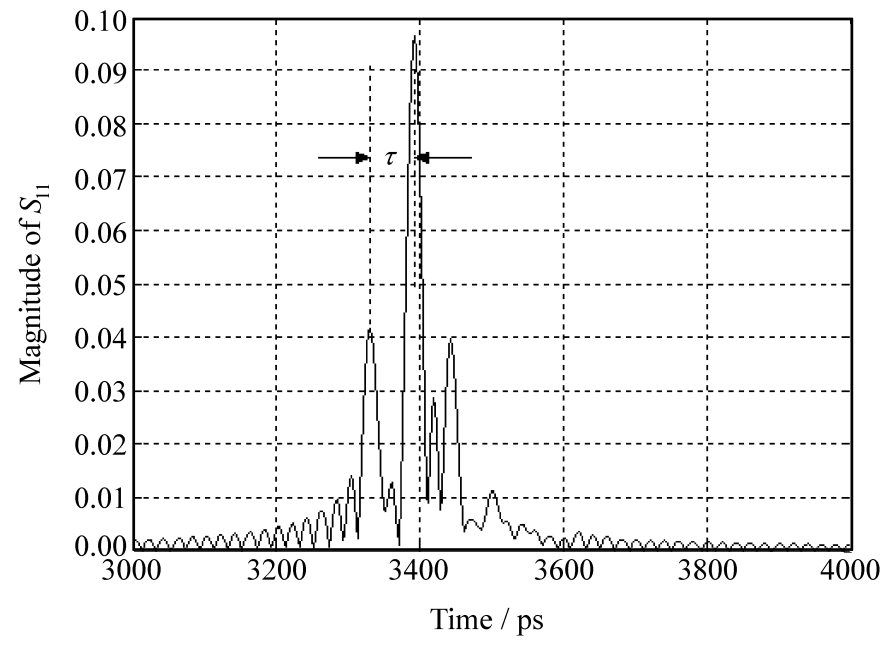


图2　材料前后表面的两次反射

Fig.2　Two reflections in time domain

$$\varepsilon = \frac{(1+R_1)^2(1-R_2)^2\sin^2\theta\cos^2\theta - (1+R_2)^2(1-R_1)^2\sin^2\theta\cos^2\theta}{(1+R_1)(1+R_2)\sin^2\theta - \sin^2\theta\ (1+R_1)^2(1-R_2)^2\cos^2\theta - (1+R_2)^2(1-R_1)^2\cos^2\theta}$$

$$\mu = \frac{(1+R_1)(1+R_2)\sin^2\theta - \sin^2\theta}{(1+R_1)^2(1-R_2)^2\cos^2\theta - (1+R_2)^2(1-R_1)^2\cos^2\theta} \tag{13}$$

还是针对低损耗或大厚度的低色散复合材料。

对于非色散和非磁性的复合材料，利用其本身的特点也可以解决多值问题。非色散复合材料的电磁参数对频率呈惰性，基本不随频率改变。设在频率为 ω 与 ω（这里要求 $\omega \approx \omega$）时，求得 P 的相位分别为 $_{P1}$ 与 $_{P2}$。根据式(8)，有如下关系：

$$\frac{2n\pi - \ _{P1}}{2n\pi - \ _{P2}} = \frac{\omega}{\omega} \qquad (16)$$

则可以解出

$$n = \frac{\omega \ _{P2} - \omega \ _{P1}}{2\pi(\omega - \omega)} \qquad (17)$$

这样，Q 即被唯一确定，从而使多值得到解决。而非磁性复合材料 $\mu = 1$，由式(7)亦可唯一确定出 n，也可唯一确定出电磁参数。

3　实验结果

根据上述理论和实验方法，实际测量了聚四氟乙烯材料、有机玻璃材料、芳纶增强复合材料与玻璃纤维增强复合材料四种聚合物复合材料样品的相对复电磁参数，并从同一样品中截取小样品再用波导法测量，以验证实验结果的精确度。

本实验中使用的矢量网络分析仪为惠普公司的 HP8719ES。为了保证结果准确和实验的一般性，本实验中采用双端口垂直入射的传输反射法进行测量，并按磁性材料对测量数据进行处理，每隔0.5 GHz 为一个采样点，每个测试材料共计算8 个频点的电磁参数。表中亦给出了用波导法测量出的相应频点复电磁参数，加以对比。由于所测量材料均为低损耗材料，因此这里只列出相对复介电常数和磁导率的实部。实验用样品材料的种类及规格见表1。具体的测量结果如表2～表5 所示。

表1　测试材料样品规格

Table 1　Standard of samples

Style	Standard (length × width × thickness) / mm
Teflon	180 × 180 × 4.24
Organic glass	176 × 180 × 4.26
Aramid fiber reinforced resin matrix composite	180 × 180 × 3.70
Glass fiber reinforced resin matrix composite	180 × 180 × 4.02

表2　聚四氟乙烯材料的电磁参数

Table 2　Electromagnetic parameter of Teflon

Frequency/ GHz	Free-space method		Waveguide method	
	ε'	μ'	ε'	μ'
8.5	2.0547	1.0246	2.0295	1.0153
9.0	2.0945	1.0087	2.0399	0.9995
9.5	2.0410	1.0133	2.0344	0.9962
10.0	2.0367	1.0262	2.0304	1.0104
10.5	2.0698	1.0266	2.0314	1.0052
11.0	2.0784	1.0046	2.0295	0.9996
11.5	2.0264	0.9752	2.0291	1.0036
12.0	1.9955	0.9860	2.0290	1.0020

表3　有机玻璃的电磁参数

Table 3　Electromagnetic parameter of organic glass

Frequency/ GHz	Free-space method		Waveguide method	
	ε'	μ'	ε'	μ'
8.5	2.6033	1.0472	2.6029	0.9992
9.0	2.5446	0.9983	2.6005	0.9904
9.5	2.5514	0.9853	2.5875	0.9908
10.0	2.5499	0.9948	2.5880	1.0041
10.5	2.5373	1.0105	2.5808	1.0016
11.0	2.5380	1.0191	2.5732	1.0019
11.5	2.5715	1.0102	2.5691	1.0054
12.0	2.6115	0.9874	2.5600	1.0083

表4　芳纶纤维增强复合材料的电磁参数

Table 4　Electromagnetic parameter of aramid fiber reinforced resin matrix composite

Frequency/ GHz	Free-space method		Waveguide method	
	ε'	μ'	ε'	μ'
8.5	3.6589	1.0599	3.8403	1.0179
9.0	3.6833	1.0577	3.8596	1.0042
9.5	3.6588	1.0045	3.8445	1.0018
10.0	3.6215	0.9866	3.8303	0.9992
10.5	3.6016	1.0057	3.8505	1.0030
11.0	3.6044	1.0341	3.8237	1.0047
11.5	3.6883	1.0429	3.8151	0.9991
12.0	3.6151	1.0380	3.8185	1.0026

表5　玻璃纤维增强复合材料电磁参数的对照表

Table 5　Electromagnetic parameter of glass fiber reinforced resin matrix composite

Frequency/GHz	Free-space method		Waveguide method	
	ε'	μ'	ε'	μ'
8.5	4.6268	1.0652	4.4421	1.0148
9.0	4.6870	1.0516	4.4630	0.9993
9.5	4.6283	1.0501	4.4207	1.0043
10.0	4.6004	1.0484	4.4026	1.0026
10.5	4.6213	1.0452	4.4232	1.0023
11.0	4.6810	1.0431	4.3991	1.0058
11.5	4.6209	1.0447	4.4000	1.0037
12.0	4.6118	1.0488	4.4069	1.0054

由于测试的复合材料均为低损耗非磁性材料, 这里只比较相对复电容率和复磁导率的实部。其与波导法测量值具体误差见表6。

表6　自由空间法测量与波导法的误差

Table 6　Error of free-space method compared with waveguide method

Style	Error of free-space method compared with waveguide method / %	
	Real part of permittivity	Real part of permeability
Teflon	1.33	1.00
Organic glass	1.27	0.98
Aramid fiber reinforced resin matrix composite	5.05	3.53
Glass fiber reinforced resin matrix composite	4.87	4.32

可以看出, 用自由空间法测量出的复合材料相对复电容率和复磁导率的实部与用波导法的测量值相比, 有机玻璃的平均误差最小为1.27%和0.98%; 而玻璃纤维增强复合材料的平均误差最大为4.87%和4.32%。从中亦可看出, 改变厚度对纤维增强复合材料的电磁特性有一定的影响。

综合来看, 测量的4种材料电磁参数与波导法测量结果之间的差距基本能稳定地保持在5%以内, 这说明自由空间法测量复合材料电磁参数有比较好的准确度, 可以满足一般复合材料电磁参数的测量。

4　结　论

本文作者系统地说明了自由空间法测量复合材料电磁参数的理论依据和实验方法, 并就测量中遇到的多值问题加以研究, 进而提出了一些有效的解决方案。最后按照实验方法测量了4种聚合物复合材料样品。测量结果表明自由空间具有较高的精确度, 可以满足一般测试的要求。

致　谢: 北京航空航天大学材料学院提供了实验中所需的测试材料。航天二院207所为实验的小样品做了波导法测量。

参考文献:

[1] 曹　江. 介质材料电磁参数测量综述[J]. 宇航计测技术, 1994, 13(3): 30-34.

[2] Cullen A L. A new free-wave method for ferrites measurement at millimeter wavelength [J]. Ratio Science, 1987, 22(7): 1168-1170.

[3] Ghoduaonkar D K, Varadan V V, Varadan V K, et al. Free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 1989, 37(2): 789-793.

[4] Umari M H, Ghoduaonkar D K, Varadan V V, et al. A free-space bistatic calibration technique for the measurement of parallel and perpendicular reflection coefficient of planar sample [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 1991, 40(1): 19-24.

[5] Al-Qadi I L, Ghoduaonkar D K, Varadan V K, et al. Effect of moisture on asphaltic concrete at microwave frequencies [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29(5): 710-717.

[6] Muñoz J, Rojo M, Parrefio A, et al. Normal and oblique incidence free-wave technique for automatic measurement of permittivity and permissibility at microwave frequencies [J]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology, 1996, 2(2): 957-962.

[7] Muñoz J, Rojo M, Parreno A, et al. Automatic measurement of permittivity and permeability at microwave frequencies using normal and oblique free-wave incidence with focused beam [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(4): 886-892.

[8] Tamyis N, Ramli A, Ghoduaonkar D K. Free space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic material using open circuit and short circuit method at microwave frequencies [C]// 2002 Student Conference on Research of Development Proceeding. [S.1]: [s.n], 2002: 394-398.