

多层吸波和多层透波材料 阻抗匹配问题研究*

李承祖 田成林

(应用物理系)

摘要 本文使用多目标目标函数^[1]对一种特殊结构的电磁波吸收材料的电磁参数进行了优化计算,给出了5~15GHz频带内的几组吸收率大于20db的设计参数以及这些参数对应的垂直极化波、平行极化波入射角0°、20°、45°、60°情况下的吸收曲线。计算结果表明:只要优选各层参数,即使某些“夹层”不具有吸收性能仍可得到极好的吸波特性;单纯的电吸收或单纯的磁吸收都难以获得高的吸波效能;良好的阻抗匹配并不一定要在阻抗“渐变过程”情况下实现;对于出射波侧是自由空间的透波材料,用不具有吸收性能的材料,良好的匹配只在各层 $\epsilon_r \approx \mu_r$ 情况下得到。

关键词 吸波材料,透波材料,电磁参数,阻抗匹配,优化计算

分类号 TM25

在多层结构电磁波吸收材料的研究中,如何才能实现良好的阻抗匹配,一直是一个引起重视的问题。明显的原因是电磁波只有透入介质内部,介质内的各种吸收机制才能发挥作用,而入射到介质界面上的电磁波能量能否透入到介质内部,有多大比例的能量可以透入内部,完全取决于介质与自由空间交界面上的输入波阻抗与自由空间波阻抗匹配的程度。为了解决这一问题,本文作者曾使用最优化的数学方法对单层和多层结构电磁波吸收材料电磁参数优化设计的数学模型、计算方法以及目标函数的构造等进行过比较仔细地讨论^{[1],[2]}。在本文中,我们就一种特殊结构的电磁波吸收材料电磁参数进行阻抗匹配优化计算。从中总结出了若干关于多层结构电波吸收材料和多层透波材料电匹配的一般性的结论。

1 理论模型

我们计算的对象是一种七层结构的电磁波吸收材料板。其中第一、三、五、七层的厚度已选定为5mm,而第二、四、六层的厚度仅为0.5mm,在文中称为“夹层”。这种结

* 国家自然科学基金资助项目

** 1990年12月12日收稿

构示意地用图 1 描述。我们的目标就是在参数变化一定范围约束下，优选各层材料的电磁性质参数，得到 5~15GHz 频带内尽可能高的吸收率（对吸波材料）或透射率（对透射材料）。

关于这种分层结构电磁波吸收材料电匹配的研究可以分为以下两步进行：

第一步 根据设计要求的带宽、吸收率，对各层材料的电磁参数按阻抗匹配、高吸收率、工程易实现性要求等原则进行优化选择。决定出满足设计要求的电磁性质参数。

第二步 研究如何选择吸收体、基质及特殊的复合方式或结构，改变复合材料的有效电磁参数，以期获得具有优化计算决定出的电磁参数的材料。在本文中我们仅就第一个问题进行充分的讨论。

我们使用复介电常数 ϵ_i 和复磁导率 μ_i 描述各层材料的电磁性质。有

$$\begin{cases} \epsilon_i = \epsilon'_i (1 - i \tan \delta_{\epsilon_i}) \\ \mu_i = \mu'_i (1 - i \tan \delta_{\mu_i}) \end{cases} \quad (1)$$

设电磁波沿 x 方向入射，入射面在 xz 平面内（如图 1 所示）。第 i 层介质中的电磁场满足波动方程：

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \omega^2 \mu_i \epsilon_i \right) \Phi_i = 0 \quad (2)$$

我们首先求 \vec{E} 垂直于入射面的解。设电场沿 y 方向偏振。容易验证， E_{iy} 可表示为

$$E_{iy} = (A_i e^{iK_{iz}z} + B_i e^{-iK_{iz}z}) e^{iK_x x} \quad (3)$$

其中

$$K_{iz}^2 + K_x^2 = K_i^2 = \omega^2 \mu_i \epsilon_i \quad (4)$$

磁场的各分量是

$$\begin{cases} H_{ix} = \frac{K_z}{\omega \mu_i} (A_i e^{iK_{iz}z} + B_i e^{-iK_{iz}z}) e^{iK_x x} \\ H_{iy} = 0 \\ H_{iz} = \frac{K_{iz}}{\omega \mu_i} (A_i e^{iK_{iz}z} - B_i e^{-iK_{iz}z}) e^{iK_x x} \end{cases}$$

上面各式中对 K_z 未加下标 i 区分的原因是根据边界条件的要求，所有区域中的 K_z 必须有相同的值。由于 H_{ix} 、 H_{iz} 不互相独立，我们下面只取 H_{iz} 分量。应用 E_{iy} 、 H_{iz} 在 $x=x_i$ 交界面两侧连续的条件有

$$A_i e^{iK_{iz}x_i} + B_i e^{-iK_{iz}x_i} = A_{i+1} e^{iK_{(i+1)z}x_i} + B_{i+1} e^{-iK_{(i+1)z}x_i} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{K_{iz}}{\omega \mu_i} (A_i e^{iK_{iz}x_i} - B_i e^{-iK_{iz}x_i}) \\ &= \frac{K_{(i+1)z}}{\omega \mu_{i+1}} (A_{i+1} e^{iK_{(i+1)z}x_i} - B_{i+1} e^{-iK_{(i+1)z}x_i}) \end{aligned} \quad (6)$$

由上两式可解出：

$$A_i e^{iK_{iz}x_i} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{K_{(i+1)z} \mu_i}{K_{iz} \mu_{i+1}} \right) [A_{i+1} e^{iK_{(i+1)z}x_i}$$

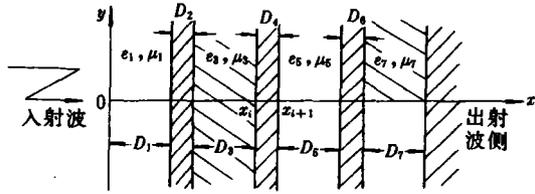


图 1 物理模型

$$+ R_{i,i+1} B_{i+1} e^{-iK_{(i+1)x} x_i}] \quad (7)$$

$$B_i e^{-iK_{ix} x_i} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{K_{(i+1)x} \mu_i}{K_{ix} \mu_{i+1}} \right) [R_{i,i+1} A_{i+1} e^{iK_{(i+1)x} x_i} + B_{i+1} e^{-iK_{(i+1)x} x_i}] \quad (8)$$

$$\text{其中} \quad R_{i,i+1} = \left(1 - \frac{K_{(i+1)x} \mu_i}{K_{ix} \mu_{i+1}} \right) / \left(1 + \frac{K_{(i+1)x} \mu_i}{K_{ix} \mu_{i+1}} \right) \quad (9)$$

是交界面 $x=x_i$ 上的反射系数。(7)和(8)式可合并写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} A_i e^{iK_{ix} x_i} \\ B_i e^{-iK_{ix} x_i} \end{bmatrix} = T_{i,i+1} \begin{bmatrix} A_{i+1} e^{iK_{(i+1)x} x_{i+1}} \\ B_{i+1} e^{-iK_{(i+1)x} x_{i+1}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$T_{i,i+1} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{K_{(i+1)x} \mu_i}{K_{ix} \mu_{i+1}} \right) \begin{bmatrix} e^{-iK_{(i+1)x} d_{i+1}} & R_{i,i+1} e^{-iK_{(i+1)x} d_{i+1}} \\ R_{i,i+1} e^{iK_{(i+1)x} d_{i+1}} & e^{iK_{(i+1)x} d_{i+1}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

这里 $d_{i+1} = x_{i+1} - x_i$ 是第 $i+1$ 层的厚度。上面各式中的 K_{ix} 是第 i 层的波矢的 x 方向分量。即

$$K_{ix} = K_i \cos \theta_i \quad (12)$$

θ_i 是对第 i 层介质的入射角, 它可由已知的对 $x=0$ 面的入射角由关系式

$$\begin{cases} \sin \theta_{i+1} = \frac{K_i \sin \theta_i}{K_{i+1}} \\ \cos \theta_{i+1} = \sqrt{1 - \left(\frac{K_i \sin \theta_i}{K_{i+1}} \right)^2} \end{cases} \quad (13)$$

递推地计算出来。

设入射到 $x=0$ 面上的波振幅为 1, 反射系数为 R , 出射波的透射系数为 T , 应用(10)式有

$$\begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix} = T_{oi} \begin{bmatrix} T \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{其中} \quad T_{oi} = T_{01} T_{12} \cdots T_{7i} \quad (15)$$

于是功率反射系数为:

$$R = \left| \frac{T_{21}}{T_{11}} \right|^2 \quad (16)$$

当 \vec{E} 平行于入射面偏振时, 可设 \vec{H} 沿 y 方向, 由(2)式解出 H_y 分量, 其它的推导与上类似, 差别仅在于(5)~(11)式中 μ_i 用相应的 ε_i 代替。

在理论上多层结构吸波材料电磁参数的优化设计问题, 就是要在工程上容易实现的参数范围内, 实现合理的阻抗匹配和有效的吸收, 在设计带宽内满足要求的吸收率。这也是一个要达到几种目标的多参数最优化设计问题。用于这种多层材料电参数优化设计的目标函数的构造见文[2]。在本文计算中我们使用的目标函数是

$$F(\vec{x}) = \sum_{k=1}^K W_k e^{A(R_k(\vec{x}) - R_0)} + W \sum_{j=1}^M e^{\beta_j (x_j - x_{j0})} \quad (17)$$

和

$$F(\vec{x}) = \sum_{k=1}^K W_k e^{A(R_k(\vec{x}) - R_0)} + \sum_{m=1}^M \alpha_m d_m \quad (18)$$

其中 \vec{i} 是参数空间中的一个点, 代表一组可能的参数。 K 是在设计带宽内所取计算点的个数, K 取值太大会增加计算量, 本文中取 $K=9$ 。 W_k 是赋给第 K 个计算点的权重, 本文中从低频到高频编序, 赋予第 K 个计算点的权是 $(10-k)$ 。 $R_k(\vec{i})$ 是对第 K 个计算点用参数 \vec{x} 计算出的反射系数。 R_0 在本文中取为 0.01, 可以取作设计要求的反射系数。 (18) 式中的 α_m 为

$$\alpha_m = \sqrt{\mu'_{rm}\epsilon'_{rm}} \left[(1 + \tan^2\delta_{em} + \tan^2\delta_{\mu m} + \tan^2\delta_{em}\tan^2\delta_{\mu m})^{\frac{1}{2}} + \tan\delta_{em}\tan\delta_{\mu m} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

是与第 m 层的复波数虚部 α 有关的量^[7]。 在本文中所有的因子 A 都取为 8。

2 计算结果和讨论

图 2~图 6 给出了我们计算的部分结果。 在每个图中都给出了初始参数对应的反射率频率特性曲线和优化后的参数对应的反射率频率特性曲线, 在图上分别以 (1), (2) 标出。 计算条件以及对参数的约束限制范围已在表 1~表 5 中给出。 其中

X_{MIN} , 每层参数的约束下限 (第 1 行对应奇数层, 第 2 行对应“夹层”)。

X_{MAX} , 每层参数的约束上限 (第 1 行对应奇数层, 第 2 行对应“夹层”)。

$$\text{ETAO} = \begin{cases} 0 & \text{表示出射波侧是良导体材料} \\ 377 & \text{表示出射波侧是自由空间} \end{cases}$$

所有参数值都是按 ϵ_i , $\tan\delta_{\epsilon_i}$, μ_i , $\tan\delta_{\mu_i}$, d_i 顺序列出的。

在图 2 和图 3 中还给出了优选出的参数在垂直极化波情况下 (图 b) 和平行极化波情况下 (图 c) 对应不同入射角时的反射率频率特性曲线。 其中的曲线 (1), (2), (3) 和 (4) 分别对应入射角 0° , 20° , 45° , 60° 情况。

图 2, 图 3 和图 4 是用 (17) 式的目标函数计算的, 而图 5, 图 6 是用 (18) 式的目标函数计算的。

图 2 和图 3 是在相同的计算条件下, 取不同的初始参数值优化计算的结果。 这些结果表明, 好的吸波效能可以在不同参数下得到。 优选出的参数甚至在 60° 角的斜入射情况下, 对垂直极化、水平极化波仍都有基本上小于 -10dB 的反射。 在多层结构吸波材料电匹配优化设计中, 解的不唯一性是由目标函数的非线性、非凸性决定的。 这里解的非唯一性不是一个缺点, 因为这表明我们有多种可能的参数选择, 在这些参数下都可得到满足设计要求的吸波特性。

分析上面两组图形下面给出的优选出的参数, 我们看到, 优选后“夹层”电损耗角正切及磁损耗角正切值都是零, 这表明“夹层”可以不具有任何吸收能力, 只要按匹配原则优选其它参数仍然可以得到高的吸波效能。 优化计算证明“夹层”不具有电磁吸收能力, 对获得高效能吸收不仅是可能的, 而且也是必要的。 这一点对我们考虑吸波材料结构可能有重要意义。

计算结果还表明, 好的匹配可以在多种情况下得到, 过去人们讨论很多的所谓“阻抗渐变过渡”的方法, 只是实现良好匹配的一种可能方法。

图 4 中给出了单纯介电损耗和单纯磁损耗材料参数优化计算的结果。 其中 a 图是介

表 1

ETA0=0					
XMIN	1.00	0.00	0.50	0.00	5.00
	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50
XMAX	20.00	0.40	2.60	1.20	5.00
	20.00	0.40	2.60	1.20	0.50
初始参数值					
l=1	2.10	0.10	1.10	0.20	5.00
l=2	2.10	0.10	1.10	0.20	0.50
l=3	2.10	0.10	1.10	0.20	5.00
l=4	2.10	0.10	1.10	0.20	0.50
l=5	2.10	0.10	1.10	0.20	5.00
l=6	2.10	0.10	1.10	0.20	0.50
l=7	2.10	0.10	1.10	0.20	5.00
优化参数值					
l=1	1.21	0.00	0.61	0.86	5.00
l=2	1.09	0.00	0.50	0.00	0.50
l=3	1.62	0.40	0.50	0.00	5.00
l=4	1.02	0.00	0.50	0.00	0.50
l=5	1.17	0.40	0.84	0.35	5.00
l=6	1.05	0.00	0.50	0.00	0.50
l=7	1.07	0.40	0.92	0.39	5.00

表 2

ETA0=0					
XMIN	1.00	0.00	0.50	0.00	5.00
	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50
XMAX	20.00	0.40	2.60	1.20	5.00
	20.00	0.40	2.60	1.20	0.50
初始参数值					
l=1	7.00	0.13	1.40	0.60	5.00
l=2	7.00	0.13	1.40	0.60	0.50
l=3	5.00	0.12	1.30	0.40	5.00
l=4	5.00	0.12	2.60	0.40	0.50
l=5	3.00	0.11	1.20	0.20	5.00
l=6	3.00	0.11	1.20	0.20	0.50
l=7	1.00	0.10	1.10	0.10	5.00
优化参数值					
l=1	5.77	0.40	0.50	0.76	5.00
l=2	5.46	0.00	0.50	0.00	0.50
l=3	3.36	0.40	1.11	0.14	5.00
l=4	3.44	0.00	0.50	0.00	0.50
l=5	1.33	0.40	0.80	0.25	5.00
l=6	1.45	0.00	0.50	0.00	0.50
l=7	1.00	0.00	0.91	0.15	5.00

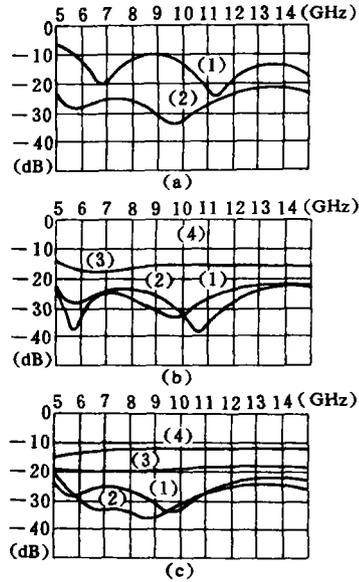


图 2

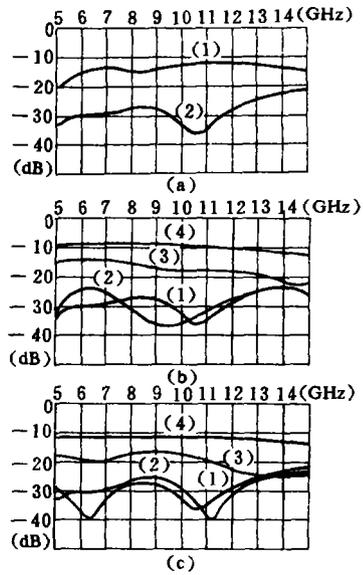


图 3

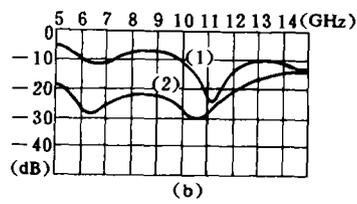
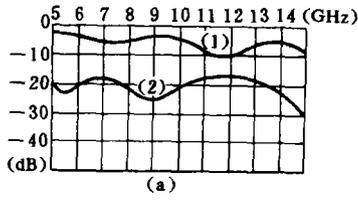


图 4

表 3-1

ETAO=0					
XMIN	1.00	0.00	0.50	0.00	5.00
	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50
XMAX	20.00	0.60	2.60	0.00	5.00
	20.00	0.60	2.60	0.00	0.50
初始参数值					
I=1	2.10	0.10	1.10	0.00	5.00
I=2	2.10	0.10	1.10	0.00	0.50
I=3	2.10	0.10	1.10	0.00	5.00
I=4	2.10	0.10	1.10	0.00	0.50
I=5	2.10	0.10	1.10	0.00	5.00
I=6	2.10	0.10	1.10	0.00	0.50
I=7	2.10	0.10	1.10	0.00	5.00
优化参数值					
I=1	1.79	0.60	0.53	0.00	5.00
I=2	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50
I=3	2.10	0.60	0.50	0.00	5.00
I=4	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50
I=5	1.81	0.60	1.88	0.00	5.00
I=6	1.00	0.00	0.56	0.00	0.50
I=7	1.10	0.28	1.08	0.00	5.00

表 3-2

ETAO=0					
XMIN	1.00	0.00	0.50	0.00	5.00
	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50
XMAX	20.00	0.00	2.60	1.20	5.00
	20.00	0.00	2.60	1.20	0.50
初始参数值					
I=1	2.10	0.00	1.10	0.20	5.00
I=2	2.10	0.00	1.10	0.20	0.50
I=3	2.10	0.00	1.10	0.20	5.00
I=4	2.10	0.00	1.10	0.20	0.50
I=5	2.10	0.00	1.10	0.20	5.00
I=6	2.10	0.00	1.10	0.20	0.50
I=7	2.10	0.00	1.10	0.20	5.00
优化参数值					
I=1	1.73	0.00	0.73	1.20	5.00
I=2	1.28	0.00	0.50	0.00	0.50
I=3	1.80	0.00	0.50	0.26	5.00
I=4	1.25	0.00	0.50	0.00	0.50
I=5	1.58	0.00	1.09	0.84	5.00
I=6	1.17	0.00	0.50	0.00	0.50
I=7	1.00	0.00	1.22	0.28	5.00

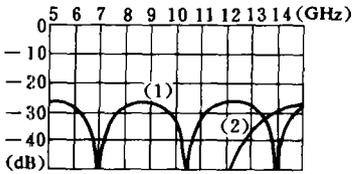


图 5

表 4

ETAO=337					
XMIN	1.00	0.00	0.50	0.00	5.00
	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50
XMAX	20.00	0.00	2.60	0.00	5.00
	20.00	0.00	2.60	0.00	0.50
初始参数值					
I=1	2.10	0.00	1.90	0.00	5.00
I=2	2.10	0.00	1.90	0.00	0.50
I=3	2.10	0.00	1.90	0.00	5.00
I=4	2.10	0.00	1.90	0.00	0.50
I=5	2.10	0.00	1.90	0.00	5.00
I=6	2.10	0.00	1.90	0.00	0.50
I=7	2.10	0.00	1.90	0.00	5.00
优化参数值					
I=1	2.00	0.00	1.96	0.00	5.00
I=2	2.09	0.00	1.91	0.00	0.50
I=3	2.03	0.00	1.93	0.00	5.00
I=4	2.15	0.00	1.84	0.00	0.50
I=5	2.03	0.00	1.93	0.00	5.00
I=6	2.09	0.00	1.91	0.00	0.50
I=7	2.00	0.00	1.96	0.00	5.00

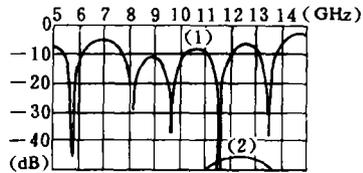


图 6

表 5

ETAO=377					
XMIN	1.00	0.00	0.50	0.00	5.00
	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50
XMAX	20.00	0.00	2.60	0.00	5.00
	20.00	0.00	2.60	0.00	0.50
初始参数值					
I=1	6.10	0.00	2.20	0.00	5.00
I=2	2.10	0.00	1.90	0.00	0.50
I=3	6.10	0.00	2.20	0.00	5.00
I=4	2.10	0.00	1.90	0.00	0.50
I=5	6.10	0.00	2.20	0.00	5.00
I=6	2.10	0.00	1.90	0.00	0.50
I=7	6.10	0.00	2.20	0.00	5.00
优化参数值					
I=1	2.59	0.00	2.60	0.00	5.00
I=2	2.58	0.00	2.60	0.00	0.50
I=3	2.58	0.00	2.60	0.00	5.00
I=4	2.55	0.00	2.60	0.00	0.50
I=5	2.58	0.00	2.60	0.00	5.00
I=6	2.58	0.00	2.60	0.00	0.50
I=7	2.59	0.00	2.60	0.00	5.00

电损耗情况,而 b 图是磁损耗情况。图上的曲线(1)和(2)仍然是分别对应初始参数和优选参数反射率频率特性曲线。每个图形的计算条件都在图下给出。将图 4 的这两个图形都和图 2 比较,我们看出,它们的初始参数相同,但优选出的电吸收曲线和磁吸收曲线都明显的劣于图 2 中的结果,特别是在图 4 的 a 中,我们已把约束介电损耗角正切值的上限从图 2 中的 0.4 提高到 0.6,这表明单纯的电吸收材料或单纯的磁吸收材料都难以实现良好匹配,得到宽带高吸收性能。

图 5 和图 6 是针对出射波侧是自由空间或完全透波媒质情况,并假设材料不具有任何吸波性质(计算中限制介电损耗角及磁损耗角正切最大值为零值)优化计算的结果。这两个图形下面说明的各项含义与图 2 到图 4 中的相同。这两个图形中的结果表明,不具有任何吸收性质的材料,在阻抗匹配情况下可以变成“完全透波”材料,此时在入射波侧仅有极低的反射系数。阻抗匹配条件仅在各层材料都要有 $\epsilon_r \approx \mu_r$ 值情况下得到。这表明一个多层透波材料的每一层都必须是透波材料。

分析 $\text{ETAO}=377$ (出射波侧是自由空间情况)和 $\text{ETAO}=0$ (出射波侧是良导体材料)两种情况下的计算,我们看出上述模型优化计算结果不代表介质的吸波性能,而只是实现阻抗良好匹配的条件。实现阻抗匹配并不以材料具有良好的吸波能力为前提,但当材料具有吸波能力时,上述模型描述了匹配和吸收的综合效果。

3 结 论

1. 在出射波侧是金属材料情况下,使入射波侧反射率最小,意味着材料与自由空间阻抗匹配和有效吸收。在出射波侧是自由空间情况下,入射波侧反射率最小化可以通过阻抗匹配达到,材料具有吸波能力不是必要条件。多层非吸收材料良好阻抗匹配只有在 $\epsilon_r \approx \mu_r$ 情况下得到。

2. 多层结构吸波材料的某些“夹层”(厚度较小的隔开的层),即使不具有吸波能力,只要优选其它参数,仍可得到良好的匹配和极低的反射。

3. 单纯介电吸收、单纯磁吸收都难以得到宽带高吸收性能,具有电磁两种吸收能力的材料容易实现阻抗匹配,获得高性能吸收。

4. 多层结构吸波材料的阻抗匹配问题可以应用最优化计算根本解决。使用最优化计算方法可以给出多组可能的参数值供选择。阻抗沿传播方向“渐变过渡”只是实现阻抗匹配的一种可能方法。

陈健华教授、赵凤章付教授曾参预该文的讨论,并给以大力支持和帮助,作者对他们深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 李承祖等. 单层和多层结构电磁波吸收材料电磁参数的优化设计. 宇航材料工艺, 1989(4~5)
[2] 李承祖等. 电磁波吸收材料电磁参数优化设计中目标函数的构造. 宇航材料工艺, 1989, (4~5)

A Study on the Impedance Matching of Multi-layer Absorption Materials and Multi-layer Transmission Materials

Li Chengzu Tian Chenglin
(Department of Applied Physics)

Abstract

An example, the optimization of electromagnetic parameters for a special-structured electromagnetic wave absorber are computed by using multi-objective functions. Some parameters with absorptivities $> 20\text{db}$ with in $5\sim 15\text{GHz}$ and the absorption curves of perpendicular and parallel polarization at incident angle 0° , 20° , 45° and 60° corresponding to these parameters are given. It is proved that good absorption characteristics can be obtained even if some inserted layers' do not absorb, provided that the parameters for all layers are optimized. It is difficult to obtain high absorptivity by purely using electronic or magnetic absorber. "Gradual impedance transition" is not the only method to get good electronic matching. For a transmission material with emergent side being "free space", a good impedance matching can be obtained only at $\epsilon_r \approx \mu_r$ when using materials do not possess absorbcency.

Key words impedance matching, absorbtion material, transmission material, electromnagnetic parameters, optimization