

无金属基底吸波结构对 TE 波的反射

饶克谨^{*} 赵伯琳

(电子科技大学信息与材料工程学院 成都 610054)

【摘要】 详细分析了 TE 极化波以大角度入射到无金属基底的平面多层吸波结构上时的反射特性, 导出连接层间电磁场的通用矩阵公式, 计算了两层和三层吸波结构的反射系数, 并证明了在何种条件下可以获得低的反射率, 在此基础上提出了一个简易设计方法。对进气道和进气道内吸波导流板的两层和三层材料设计都获得了良好的特性。

关键词 吸波结构; 斜入射; 反射系数; 进气道

中图分类号 TN011

飞行器的进气道是雷达波的强散射源, 进气道内壁的反射是构成散射的主要原因。为了减少进气道的反射对后向 RCS 的贡献, 采用

S 形进气道, 其中放置吸波导流板^[1] 如图

1 所示, 或采用吸波结构进气道, 使入射

波的能量受到衰减。入射线与入射点局

部平面法线的夹角, 即入射角 θ^i 一般都

较大。对于大的 θ^i , TE 极化(垂直极化—

电场垂直于入射面)和 TM 极化(平行极

化—电场平行于入射面)的反射特性是完全不同的。图 2 表示垂直极化和平行极

化的反射率随入射角 θ^i 的变化。 $|R_{\perp}|$

随 θ^i 增大而单调增大; $|R_{\parallel}|$ 随 θ^i 增大时开始减小, 以后又随 θ^i 增大而增大, 且 $|R_{\perp}|$ 总是大于

$|R_{\parallel}|$, 故在大 θ^i 入射下减小反射的问题可归结为减小垂直极化下的反射。当 $\theta^i > 80^\circ$ 时, 即接近于

掠入射时, $|R_{\perp}|$ 和 $|R_{\parallel}|$ 都接近于 1, 吸收材料对减小反射作用很小。无金属基底的吸波结构在

TE 极化、大 θ^i 入射下的材料设计比有金属基底的困难, 我们从分析结构中的电磁场出发导出求解

反射系数的矩阵方程和提出一个简易的设计方法, 并对结构进气道和吸波导流板的材料进行了设计,

获得了良好的结果。

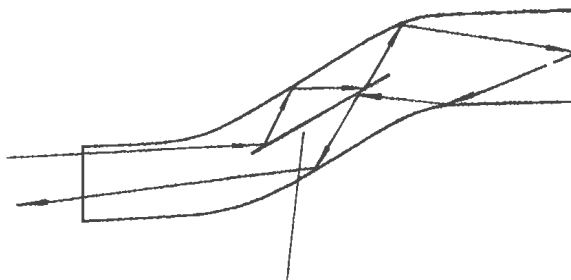


图 1 S 形进气道示意图

1 吸收材料表面和材料中的波矢和电磁场关系

图 3 表示吸收材料表面上和材料中的波矢(射线)。入射波矢 k_0^i ($k_0 = 2\pi f/c$) 可以分解为一个

垂直于表面的波矢分量 $\bar{a} = \bar{z}k_0 \cos \theta^i$ 和一个平行于表面的波矢分量 $\bar{b} = \bar{x}k_0 \sin \theta^i$ 。根据分界面上切

向电磁场连续条件, 材料中的折射线波矢平行于表面的分量也为 \bar{b} 。折射线垂直于表面的波矢有

一个实波矢分量 γ' 和一个虚波矢分量 γ'' , 故垂直于表面的传播因子为 $e^{-j(r' - jr'')z} = e^{-r''z - jr'z}$; γ' 表

示沿 z 轴方向单位长度的相位移; γ'' 表示沿 z 方向的衰减速度。 γ' 与 b 合成的实波矢 k'_1 表示材料中相位变化最快的方向和该方向单位长度的相移, $\gamma' = k'_1 \cos \theta_1$ [2, 3]。

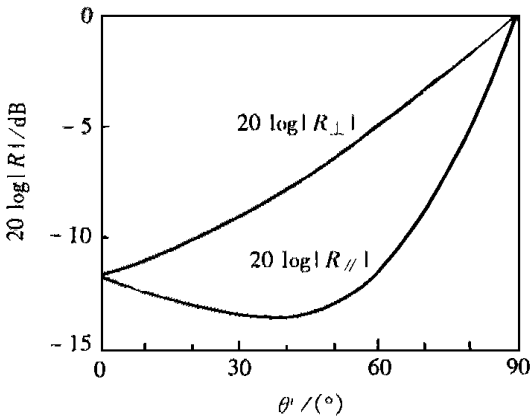


图 2 $|R_{\perp}|$ 和 $|R_{\parallel}|$ 与 θ^i 关系

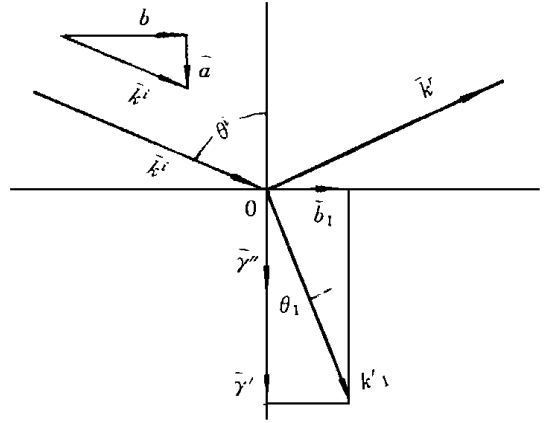


图 3 吸收材料表面及吸收材料中波矢

γ' 和 γ'' 可由材料的 $\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$, $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ 和入射角 θ^i 计算

$$\gamma' = \frac{k_0}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{(\mu'_r \epsilon''_r + \mu''_r \epsilon'_r)^2 + (\mu'_r \epsilon'_r - \mu''_r \epsilon''_r - \sin^2 \theta^i)^2} + (\mu'_r \epsilon'_r - \mu''_r \epsilon''_r - \sin^2 \theta^i) \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$\gamma'' = \frac{k_0}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{(\mu'_r \epsilon''_r + \mu''_r \epsilon'_r)^2 + (\mu'_r \epsilon'_r - \mu''_r \epsilon''_r - \sin^2 \theta^i)^2} - (\mu'_r \epsilon'_r - \mu''_r \epsilon''_r - \sin^2 \theta^i) \right]^{1/2} \quad (2)$$

由于平行表面的波矢对应电磁能量沿表面的流动, 它不代表进入材料或从材料反射入空气的能量, 所以在计算材料表面的反射时, 可以只考虑与表面垂直的波矢, 并采用垂直入射时的计算公式。除了在公式中代入垂直表面的传播因子 $e^{-j\gamma_0 z}$, $e^{-\gamma''_z - j\gamma'_z}$ 外, 所有的电磁场量都应代入平行于表面的分量, 材料的波阻抗、表面阻抗等都由这些电磁场平行分量定出, 故空气波阻抗为

$$\text{垂直极化} \quad Z_{\perp 0} = \frac{E^i}{H^i \cos \theta^i} = \frac{Z_0}{\cos \theta^i} \quad Z_{\perp 0} = \frac{Z_0}{\cos \theta^i} = \frac{1}{\cos \theta^i} \quad (3)$$

$$\text{平行极化} \quad Z_{\parallel 0} = \frac{E^i \cos \theta^i}{H^i} = Z_0 \cos \theta^i \quad Z_{\parallel 0} = \frac{Z_0}{\cos \theta^i} = \cos \theta^i \quad (4)$$

其中 $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$ 是空气的波阻抗(无限大空间, 或传播方向垂直于分界面时), 材料中的波阻抗用相同方法定出 [1]

$$\text{垂直极化} \quad Z_{\perp} = \frac{k_0(\mu'_r - j\mu''_r)}{r' - j\gamma''} \quad (5)$$

$$\text{平行极化} \quad Z_{\parallel} = \frac{\gamma' - j\gamma''}{k_0(\epsilon'_r - j\epsilon''_r)} \quad (6)$$

空气与吸收材料分界面的反射系数为(空气和吸收材料都为半无限大媒质)

$$\text{垂直极化} \quad r_{\perp} = \frac{Z_{\perp} - Z_{\perp 0}}{Z_{\perp} + Z_{\perp 0}} = \frac{Z_{\perp} - 1/\cos \theta^i}{Z_{\perp} + 1/\cos \theta^i} \quad (7)$$

$$\text{平行极化} \quad r_{\parallel} = \frac{Z_{\parallel} - Z_{\parallel 0}}{Z_{\parallel} + Z_{\parallel 0}} = \frac{Z_{\parallel} - \cos \theta^i}{Z_{\parallel} + \cos \theta^i} \quad (8)$$

$|Z_{\perp}|$ 和 $|Z_{\parallel}|$ 都小于 1, 由式(7)和式(8)可见, 当 θ^i 较大时, $|r_{\perp}|$ 有较大的值; 而 $|r_{\parallel}|$ 则要小得多。

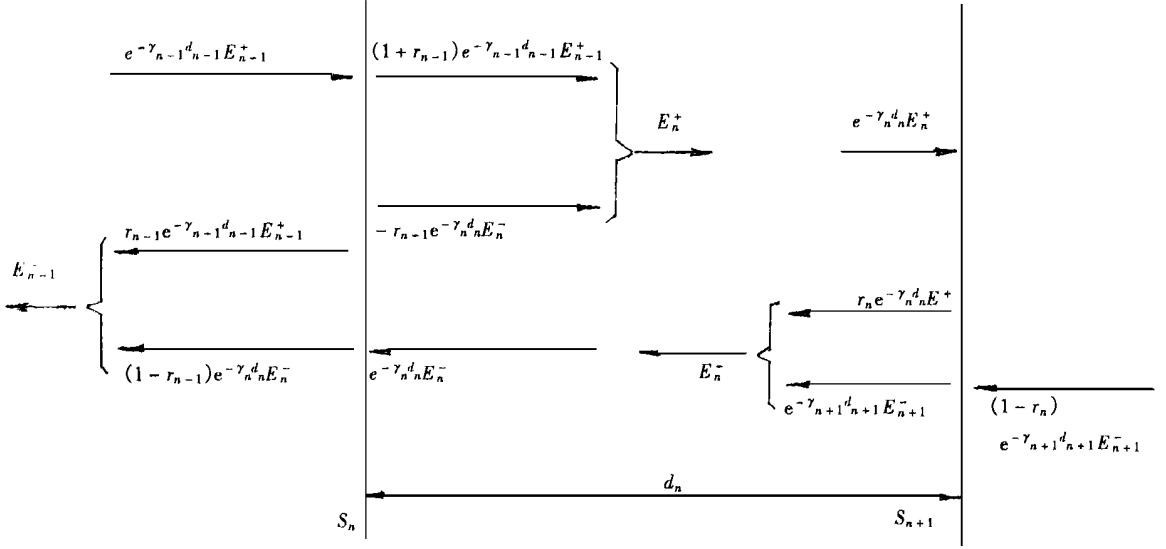
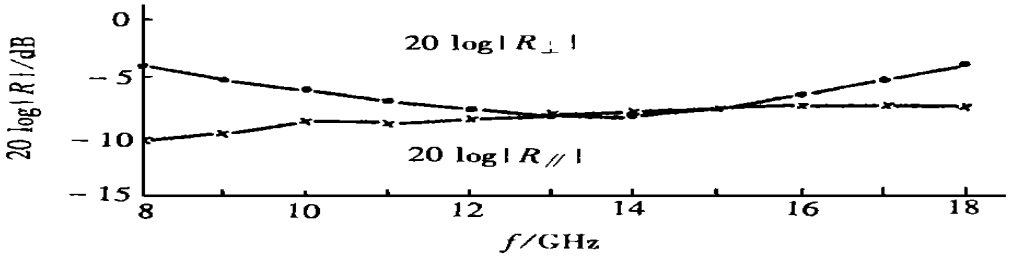


图4 n 层中和表面 S_n 上的电场

对于有 N 层的材料, 其中任一层 n 中的电场如图4所示。因为任何一层中都存在一个正向传播电场和一个反向传播电场, 正向传播电场由层左侧表面定出, 反向传播电场由层右侧表面定出。下面我们用传输矩阵把层间的这些电场联结起来, 导出直接求解反射电场的传输矩阵方程, 而不必求出中间各层的电场。



二层材料: $d_1=3.3$ mm 玻璃纤维; $d_2=2.7$ mm 材料 1; $\theta_i=70^\circ$

图5 两层设计的垂直极化和平行极化反射率的频率特性

参看图5, n 层左侧表面 S_n 上, 由 $(n-1)$ 层中的 $e^{\gamma_{n-1}d_{n-1}}E_{n-1}^+$ 折射入 n 层的电场为 $e^{-\gamma_{n-1}d_{n-1}}E_{n-1}^+ + r_{n-1}e^{-\gamma_{n-1}d_{n-1}}E_{n-1}^+ = (1+r_{n-1})e^{-\gamma_{n-1}d_{n-1}}E_{n-1}^+$, 其中 $\gamma_{n-1} = \gamma_{n-1}'' + j\gamma_{n-1}'$, r_{n-1} 是两层材料间的反射系数

$$r_{n-1} = \frac{Z_{\perp n} - Z_{\perp n-1}}{Z_{\perp n} + Z_{\perp n-1}} \quad (9)$$

此折射电场同 n 层中的反向传播电场在 S_n 上的反射电场 $-r_{n-1}e^{-\gamma_n d_n}E_n^-$ 合成为 n 层中的正向电场

$$E_n^+ = (1+r_{n-1})e^{-\gamma_{n-1}d_{n-1}}E_{n-1}^+ - r_{n-1}e^{-\gamma_n d_n}E_n^- \quad (10)$$

$$E_{n-1}^+ = \frac{e^{\gamma_{n-1}d_{n-1}}}{1+r_{n-1}}E_n^+ + r_{n-1} \frac{e^{\gamma_{n-1}d_{n-1}}e^{-\gamma_n d_n}}{1+r_{n-1}}E_n^- \quad (11)$$

S_n 上的反向传播电场 E_{n-1}^- 为

$$E_{n-1}^- = r_{n-1} e^{-\gamma_{n-1} d_{n-1}} E_{n-1}^+ + (1 - r_{n-1}) e^{-\gamma_n d_n} E_n^- \quad (12)$$

将式(11)代入式(12),得

$$\begin{aligned} E_{n-1}^- &= r_{n-1} \frac{1}{1 + r_{n-1}} E_n^+ + r_{n-1}^2 \frac{e^{-\gamma_n d_n}}{1 + r_{n-1}} E_n^- + (1 - r_{n-1}) e^{-\gamma_n d_n} E_n^- = \\ & r_{n-1} \frac{1}{1 + r_{n-1}} E_n^+ + \frac{e^{-\gamma_n d_n}}{1 + r_{n-1}} E_n^- \end{aligned} \quad (13)$$

式(11)和式(13)把 $(n-1)$ 层中的电场 (E_{n-1}^+, E_{n-1}^-) 和 n 层中的电场 (E_n^+, E_n^-) 联结起来,用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} E_{n-1}^- \\ E_{n-1}^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + r_{n-1}} \begin{bmatrix} e^{-\gamma_n d_n} & r_{n-1} \\ r_{n-1} e^{\gamma_{n-1} d_{n-1}} e^{-\gamma_n d_n} & e^{\gamma_{n-1} d_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_n^- \\ E_n^+ \end{bmatrix} \quad (14)$$

对 N 层材料中的第一个表面 S_1 ,有

$$\begin{bmatrix} E_0^r \\ E_0^i \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + r_0} \begin{bmatrix} e^{-\gamma_1 d_1} & r_0 \\ r_0 e^{-\gamma_1 d_1} & e^{\gamma_0 d_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^- \\ E_1^+ \end{bmatrix}$$

注意 E_0^i 在 S_1 上定义,故 $e^{\gamma_0 d_0} = 1$ 。对于 S_2 ,有

$$\begin{bmatrix} E_1^- \\ E_1^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + r_1} \begin{bmatrix} e^{-\gamma_2 d_2} & r_1 \\ r_1 e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} & e^{\gamma_1 d_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2^- \\ E_2^+ \end{bmatrix}$$

的波

对于最后表面 S_{N+1} ,有

$$\begin{bmatrix} E_N^- \\ E_N^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + r_N} \begin{bmatrix} 0 & r_N \\ 0 & e^{\gamma_N d_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_{N+1}^+ \end{bmatrix}$$

上式方阵中两个零元是因为 E_{N+1}^- 定义在 $(N+1)$ 层的右侧表面上,此表面在无限远处,故 $e^{-\gamma_{N+1} d_{N+1}} = 0$, $E_{N+1}^- = 0$ 。

将上面 $1 \rightarrow (N+1)$ 个矩阵方程联结起来,得到

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_0^r \\ E_0^i \end{bmatrix} &= \frac{1}{(1 + r_0)(1 + r_1) + \dots + (1 + r_N)} \begin{bmatrix} e^{-\gamma_1 d_1} & r_0 \\ r_0 e^{-\gamma_1 d_1} & 1 \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} e^{-\gamma_2 d_2} & r_1 \\ r_1 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} & e^{\gamma_1 d_1} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} 0 & r_N \\ 0 & e^{\gamma_N d_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_{N+1}^+ \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

令 $E_0^i = 1$,记为

$$\begin{bmatrix} E_0^r \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{en}} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} 0 & b \\ 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_{N+1}^+ \end{bmatrix} \quad \text{Ya} \quad (16)$$

于是得到

$$E_{N+1}^+ = \frac{D}{d} \quad (17)$$

$$E_0^r = \frac{b}{d} \text{ 即 } R_{\perp} = \frac{b}{d} \quad (18)$$

2 两层和三层材料的设计方法

2.1 两层材料

例如用两层纤维层板材料制作进气道,内壁(材料1)用玻璃纤维树脂层板,其 ϵ_r' 略大于3, $\epsilon_r'' \approx 0$; 外壁(材料2)用吸波纤维层板,为了获得较好的宽带特性,应采用磁损耗吸收剂。

利用式(15)可写出矩阵方程

$$\begin{bmatrix} E_0^r \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{(1+r_0)(1+r_1)(1+r_2)} \begin{bmatrix} e^{-\gamma_1 d_1} & r_0 \\ r_0 e^{-\gamma_1 d_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\gamma_2 d_2} & r_1 \\ r_1 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} & e^{\gamma_1 d_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & r_2 \\ 0 & e^{\gamma_2 d_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_3^+ \end{bmatrix} =$$

$$\frac{1}{(1+r_0)(1+r_1)(1+r_2)} \begin{bmatrix} 0 & r_2 e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} + r_0 r_1 r_2 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} + r_1 e^{-\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} + r_0 e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} \\ 0 & r_2 r_0 e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} + r_1 r_2 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} + r_0 r_1 e^{-\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} + e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_3^+ \end{bmatrix}$$

于是得到

$$R_{\perp} = \frac{r_2 e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} + r_0 r_1 r_2 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} + r_1 e^{-\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} + r_0 e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2}}{r_2 r_0 e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} + r_1 r_2 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} + r_0 r_1 e^{-\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} + e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2}} \quad (19)$$

R_{\perp} 的表示式中分子和分母都是4项复数之和。分析时首先找出分子和分母中模最大的项,它们对 $|R_{\perp}|$ 的作用最大。不难看出,分子分母中最后一项由于是模大于1的因子 $e^{\gamma_1 d_1}$ 和 $e^{\gamma_2 d_2}$ 的乘积,所以它们的模最大。其次由

$$r_0 = \frac{Z_1 - 1/\cos\theta^i}{Z_1 + 1/\cos\theta^i} \quad (20)$$

$$r_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (21)$$

$$r_2 = \frac{1/\cos\theta^i - Z_2}{1/\cos\theta^i + Z_2} \quad (22)$$

可知,当 θ 较大时, $|r_0|$ 和 $|r_2|$ 都较大,而 $|r_1|$ 却小得多,故分子分母中模次大的项为分子的第一项和分母的第一项。

再由式(20)~(22)可知, r_0 的实部为负, r_2 的实部为正,它们的实部都远大于它们的虚部。另一方面,对于实际的两层材料 $e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2}$ 的幅角是在第二象限,或者在第三象限。于是可以看出,分子中的第一项和最后一项实部是相减的,分母中第一项和最后一项实部也是相减的。所以为了减小 $|R_{\perp}|$ 应使分子中第一项尽可能地大一些,以便使它与最后一项相消后得到较小的模值。这样,可总结出选择两层材料的方法为:

1) $|e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2}|$ 应有较大的值,这意味着第二层材料应有足够大的损耗,使 γ_2'' 较大;

2) $|r_0|$ 应尽可能地小,即表面层应使用 ϵ_r' 很小的无损(透明)材料;

3) $|r_2|$ 应有较大的值,即第二层材料 $\epsilon_r', \epsilon_r''$ 应大一些。

4) 厚度应按 $\gamma_1 d_1 + \gamma_1 d_2 = \pi$,即使总厚度的电长度为 $\lambda/2$,对于宽频带设计,则应使中心频率下总厚度的电长度为 $\lambda/2$ 。

2.2 三层材料

两层材料可以获得较好的反射特性,但第2层为加入了较多吸收剂的吸收层,其力学性能受到影响。常用的三层材料中间层是吸收层,例如浸渍吸收剂树脂的蜂窝结构,第1和第3层是无损耗的纤维树脂蒙皮,它们起着保护中间蜂窝层的作用。

采用传输矩阵方法分析时,传输矩阵方法为

$$\begin{pmatrix} E_0^r \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{(1+r_0)(1+r_1)(1+r_2)(1+r_3)} \begin{bmatrix} e^{-\gamma_1 d_1} & r_0 \\ r_0 e^{-\gamma_1 d_1} & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} e^{-\gamma_2 d_2} & r_1 \\ r_1 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} & e^{\gamma_1 d_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\gamma_3 d_3} & r_2 \\ r_2 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} e^{-\gamma_3 d_3} & e^{\gamma_2 d_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & r_3 \\ 0 & e^{\gamma_3 d_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_4^+ \end{bmatrix} =$$

$$), \quad \frac{1}{D} \begin{bmatrix} 0 & b \\ 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_4^+ \end{bmatrix} \quad (23)$$

得到

$$R_{\perp} = \frac{b}{d} \quad (24)$$

其中

$$\begin{aligned} b = & r_3 e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} e^{-\gamma_3 d_3} + r_2 e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3} + r_1 r_2 r_3 e^{-\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3} + \\ & r_1 e^{-\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3} + r_0 r_1 r_3 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} e^{-\gamma_3 d_3} + r_0 r_1 r_2 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3} + \\ & r_0 r_2 r_3 e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{-\gamma_3 d_3} + r_0 e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3} \\ d = & r_0 r_3 e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} e^{-\gamma_3 d_3} + r_0 r_2 e^{-\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3} + r_0 r_1 r_2 r_3 e^{-\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{-\gamma_3 d_3} + \\ & r_0 r_1 e^{-\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3} + r_1 r_3 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} e^{-\gamma_3 d_3} + r_1 r_2 e^{\gamma_1 d_1} e^{-\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3} + \\ & r_2 r_3 e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{-\gamma_3 d_3} + e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3} \end{aligned} \quad (26)$$

式(25)和式(26)都各由 8 项复数之和组成,容易判断出影响 $|R_{\perp}|$ 最大的是它们的第 8 项。其次考虑到 r_0 、 r_3 都有较大的模, r_1 、 r_2 的模要小得多,式(25)和式(26)中次大的项应是它们的第 1 项,也

与 2.1 节中两层材料中的情形相似,其第 1 项同第 8 项的实部都是反号的,故为了减小 $|R_{\perp}|$,应使:

- 1) $|e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{\gamma_3 d_3}|$ 有较大的值,即第二层有较大的损耗;
 - 2) $|r_0|$ 尽可能地小,即表面层应使用 ϵ'_r 很小的透明材料;
 - 3) $|r_2|$ 有较大值,即第二层的 ϵ_{2r}' 、 ϵ_{2r}'' 应大一些;
 - 4) 在中心频率, $\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \gamma_3 d_3 = \pi$,即使总厚度的电长度为 $\lambda/2$ 。

3 设计实例

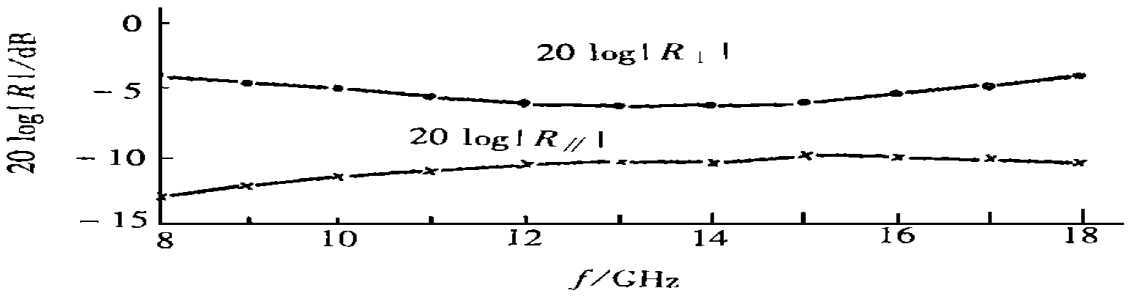
对全介质进气道进行两层材料设计;对吸波导流板进行了一种设计,即三层设计,设计中分别应用了上述两层和三层设计原则。表面层都采用 $\epsilon'_r = 3.48$, $\epsilon''_r \approx 0$ 的环氧玻璃纤维层板;第二层采用高损耗的材料,且为了满足 8 GHz~18 GHz 宽带要求,采用含金属磁粉吸收剂的材料,其 μ'_r 、 μ''_r 、 ϵ'_r 都具有随频率下降的特性。按垂直极化 $\theta^i = 70^\circ$,优化两层材料参数及厚度。设计用两种材料的电磁参数列于表 1 和表 2 中。1) 介质进气道两层材料设计,总厚度 6 mm,设计得到的反射率特性如图 5 所示。2) 吸波导流板设计,它是对断面中心线对称的近似平板结构,总厚为 30 mm,用环氧玻璃纤维制作的蒙皮包裹中部的浸渍吸收剂的蜂窝结构。设计得到的反射率频率特性如图 6 所示。

表 1 材料 1 的电磁参数

f/GHz	8	10	12	14	16	18
μ_r	1.44-j0.50	1.21-j0.45	1.23-j0.44	1.10-j0.45	0.95-j0.43	0.85-j0.40
$\bar{\epsilon}_r$	16.04-j6.77	15.20-j7.43	13.35-j8.29	13.50-j8.80	13.50-j8.90	13.50-j9.00

表 2 材料 2 的电磁参数

f/GHz	8	10	12	14	16	18
μ_r	1.45-j0.33	1.21-j0.28	1.15-j0.20	1.10-j0.15	0.95-j0.12	0.90-j0.10
$\bar{\epsilon}_r$	9.00-j4.00	8.80-j3.50	8.60-j3.00	8.30-j2.40	7.80-j1.84	7.40-j1.82



三层材料: $d_1=3.3\text{ mm}$, $d_3=3.3\text{ mm}$ 玻璃纤维; $d_2=23.4\text{ mm}$ 材料 2; $\theta^i=70^\circ$

图 6 吸波导流板的垂直极化和平行极化的反射率的频率特性

4 结 论

在对无金属基底吸波材料反射特性较详细分析的基础上提出的简单易行的设计方法,对两种应用实例设计结果表明本方法对于大角度入射下减小反射率的宽带设计是有效的。在 $\theta^i=70^\circ$ 下, 8 GHz ~ 18 GHz 范围内反射率都达到小于 -4 dB 的好结果;使用的材料参数都是现有的吸收剂容易实现的。本研究成果可直接应用于介质进气道、吸波导流板和结构材料的研制中。

参 考 文 献

- 1 Richardson D, Warplanes Stealth, Book Salamander. 现代隐身飞机. 北京:科学出版社, 1991
- 2 陈惠清, 刘鹏程, 李天成. 电磁波理论—无坐标方法. 北京:电子工业出版社, 1988
- 3 赵伯琳, 高正平, 饶克谨. 电磁波斜入射到分层有耗媒质上的反射和传输系数. 电子科技大学学报, 1993, 22(5): 483 ~ 489
- 4 Penini Jose, Cohen Lawrence S. Design of broad-band radar-absorbing materials for large angles of incidence. IEEE Trans AP, 1993, 35(3): 223 ~ 230

Reflection of TE-polarized Plane Wave Incidented on Multilayer Structural Absorber Without Metal Base and Design Methods

Rao Kejin Zhao Bolin

(Institute of Materials and Information Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, the reflection characteristics of a plane wave of TE-polarization incidented with large incident angle on the surface of a multilayer structural absorber without metal base is investigated in detail. A generalized matrix formula is derived to connect the EM fields in adjacent layers. The reflection coefficients of two and three layer absorbers are evaluated. The conditions under which the low reflectances may be achieved are investigated. Based on these analysis, an easy handled design method is presented. Design examples of two and three layer structural absorbers for inlet and absorbing-guide plate in inlet all give good performances.

Key words structural absorber; oblique incidence; reflection coefficient; intet

编辑 徐培红