

纤维布层板吸波材料的等效电磁参数^{*①}

杨华军^{**} 饶克谨 赵伯琳

(电子科技大学应用物理系, 信息与材料工程学院 成都 610054)

【摘要】 提出了一种预测广泛应用于制造隐身飞行器的吸波纤维布层板等效介电常数和磁导率的方法。纤维布层板等效电磁参数是设计中重要的数据。考虑到结构的各向异性, 利用强扰动理论推导出了求解电磁参数的复数型积分方程组, 用 Fortran 5.1 设计了系统软件进行迭代法搜索求解。并列出了预测等效电磁参数的实例。

关键词 纤维布层板; 等效电磁参数; 吸波材料; 强扰动理论
中图分类号 TN011

纤维层板在工作频率下的电磁参数是进行部件电性能设计的重要资料。目前还没有关于其等效电磁参数的计算方法, 因而不能在生产中根据配方预估这些参数, 或根据需要的电磁参数制定配方。文献[1]试图对纤维布层板的等效电磁参数导出一简单的计算公式, 在假设纤维丝为无限长时, 把横向去极化因子都取作 $1/2$, 即如图 1 中, 经线在 y 和 z 及纬线于 x 和 z 方向的去极化因子都取作 $1/2$, 但这只适用于纤维处于各向同性介质的情形。实际上, 纤维层板明显是各向异性介质, 故文献[1]的方法不能用来系统地分析纤维层板的等效电磁参数。

1 纤维布的极化张量增量元

1.1 经线和纬线编织结构

实际的纤维布是由密度均匀的扁截面的经线和纬线编织而成, 图 2 是其编织结构, 经线和纬线又是多根具有椭圆形截面的平行纤维丝的集合, 其长短半轴之比大于 10, 对应纤维丝平行、垂直于波导中的电场, 测出的介电常数分别用 ϵ_{11} 、 ϵ_{12} 表示, 图 3 是纤维布经、纬线段元的三维结构图。

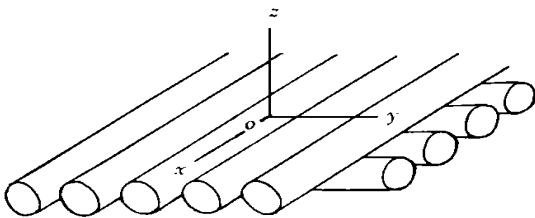


图 1 纤维布层板结构

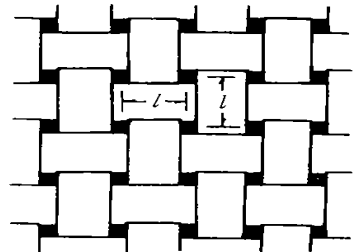


图 2 纤维布经、纬交织结构

1.2 强扰动理论分析

利用强扰动理论, 考虑结构的各向异性, 对实际的纤维布作一些简化, 设纤维层板的等效介电

① 1998 年 1 月 12 日收稿, 1998 年 5 月 15 日修改定稿

* 国防科工委预研基金资助项目

** 男 32 岁 硕士 讲师

常数具有式(1)的张量,由图 1 可见 $\epsilon_{gx} = \epsilon_{gy}$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{gz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

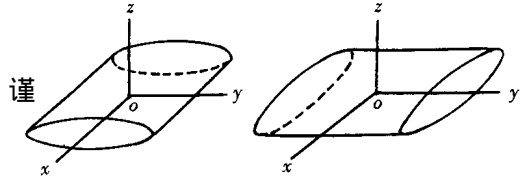


图 3 纤维布经、纬线段元

所有单元物质的颗粒对此等效介电常数扰动的平均效应为零,即

$$\left\langle \sum_{i=1}^N r_i \xi_i \right\rangle = 0 \quad (2)$$

式中 ξ_i 代表第 i 个单元物质的极化强度的增量,是一个对角线张量,其值为

$$\xi_i = k_0^2(\bar{\epsilon}_i - \bar{\epsilon}_g)[I + S_i k_0^2(\bar{\epsilon}_i - \bar{\epsilon}_g)]^{-1} \quad (3)$$

式中 $\bar{\epsilon}_i$ 为单元物质的介电常数张量, $\bar{\epsilon}_i$ 和 $\bar{\epsilon}_g$ 都取相对值, k_0 为自由空间的波数; V_i 为 i 单元物质的占空比; I 为单元张量; S_i 为并矢格林函数的奇异项系数^[2]

波
$$S = -\frac{1}{4\pi k_0^2(\epsilon_{gx}\epsilon_{gy}\epsilon_{gz})^{1/2}} \int_{\partial V} \nabla \left[\frac{1}{r_\epsilon} \right] \vec{n} dS \quad (4)$$

* 国
$$r_\epsilon = (\vec{r} \cdot \overline{\overline{\epsilon}}^{-1} \vec{r})^{1/2} = \left[\frac{x^2}{\epsilon_{gx}} + \frac{y^2}{\epsilon_{gy}} + \frac{z^2}{\epsilon_{gz}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中 ∂V 为挖去的小体积的表面; \vec{n} 为表面外法向单位矢。

1.3 经线的极化张量增量元

如图 3a 所示,注意到积分面积为椭圆柱的端面 $ds = dydz$,且 $\epsilon_{gx} = \epsilon_{gz}$ 用 X 从左和右点乘以式(4)可得

$$S_{flxx} = \frac{l\epsilon_{gx}}{4\pi k_0^2 \sqrt{gx}} \int_{-b}^b dz \int_{-a}^a \frac{\sqrt{1-z^2/b^2}}{\sqrt{1-z^2/b^2}} \frac{dy}{\left[\epsilon_{gz} \frac{l^2}{4} + \epsilon_{gzy}^2 + \epsilon_{gxz}^2 \right]^{3/2}} \quad (6)$$

同理可推得 S_{f1yy} 和 S_{f1zz} 的二重定积分表达式。

于是可得到经线的极化张量增量元为

$$\begin{aligned} \xi_{f1xx} &= k_0^2(\epsilon_{f1} - \epsilon_{gx})[1 + S_{f1xx}k_0^2(\epsilon_{f1} - \epsilon_{gx})]^{-1} \\ \xi_{f1yy} &= k_0^2(\epsilon_{f2} - \epsilon_{gx})[1 + S_{f1yy}k_0^2(\epsilon_{f2} - \epsilon_{gx})]^{-1} \\ \xi_{f1zz} &= k_0^2(\epsilon_{f1} - \epsilon_{gz})[1 + S_{f1zz}k_0^2(\epsilon_{f1} - \epsilon_{gz})]^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

1.4 纬线的极化张量增量元

用与经线相似的方法可以得出纬线段的极化张量增量的三个对角线元,经推导可知

$$S_{f2xx} = S_{f1yy}, S_{f2yy} = S_{f1xx}, S_{f2xx} = S_{f1xx} \quad (8)$$

$$\xi_{f2xx} = \xi_{f1yy}, \xi_{f2yy} = \xi_{f1xx}, \xi_{f2xx} = \xi_{f1xx} \quad (9)$$

2 吸收剂与粘合剂混合物的极化张量增量元

吸收剂与粘合剂的混合物作为一种单元物质,其介电常数可据配方计算得出^[3],用 $\bar{\epsilon}_3 = \epsilon'_3 - j\epsilon''_3$ 表示。混合物的体积稍小于纤维布体积,形成覆盖于布上的薄片层,仅略有 1/10 的混合物进入纤维间的孔穴中,故可近似地将混合物看作平板,且因厚度远小于平板线度,进一步可将它看作无限大平板。很明显, $S_{3xx} = S_{3yy} = 0$, S_{3zz} 由张量 $\bar{\epsilon}_g \bar{\epsilon}_3$ 的迹^[4] 得出

$$S_{3zz} = -\frac{1}{k_0^2 \epsilon_{gx}} \quad (10)$$

则混合物的极化张量增量元为

$$\xi_{3xx} = \xi_{3yy} = k_0^2 (\bar{\epsilon}_3 - \epsilon_{gx}) \quad (11)$$

$$\xi_{3xx} = k_0^2 (\bar{\epsilon}_3 - \epsilon_{gx}) [1 + S_{3xx} k_0^2 (\bar{\epsilon}_3 - \epsilon_{gz})]^{-1} \quad (12)$$

3 等效介电常数积分方程组

将各极化张量增量元代入强扰动理论方程,并考虑到 x, y 方向的对称特性,可得

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} V_f (\epsilon_{f1} - \epsilon_{gx}) [1 + S_{f1xx} k_0^2 (\epsilon_{f1} - \epsilon_{gx})]^{-1} + \\ & \frac{1}{2} V_f (\epsilon_{f2} - \epsilon_{gx}) [1 + S_{f2xx} k_0^2 (\epsilon_{f2} - \epsilon_{gx})]^{-1} + V_3 (\bar{\epsilon}_3 - \epsilon_{gx}) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} V_f (\epsilon_{f2} - \epsilon_{gx}) [1 + S_{f1zx} k_0^2 (\epsilon_{f2} - \epsilon_{gx})]^{-1} + \\ & \frac{1}{2} V_f (\epsilon_{f2} - \epsilon_{gz}) [1 + S_{f2zx} k_0^2 (\epsilon_{f2} - \epsilon_{gz})]^{-1} + \\ & V_3 (\bar{\epsilon}_3 - \epsilon_{gx}) [1 + S_{f3zx} k_0^2 (\bar{\epsilon}_3 - \epsilon_{gx})]^{-1} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

式(13)和式(14)为未知量 ϵ_{gx} 和 ϵ_{gz} 的联立复数型积分方程组,其中 $V_1 = V_2$, V_1 为经线的占空比; V_2 为纬线的占空比; V_f 为纤维布的占空比; V_3 为吸收剂与粘合剂混合物的占空比,并且,有 $V_1 + V_2 + V_3 = 1$ 。

4 等效磁导率的积分方程组

若采用磁性吸收剂,混合物的磁导率 $\mu_3 = \mu_3' - j\mu_3''$,同理即可得到类似于式(13)、(14)的关于未知量 μ_{gx} 和 μ_{gz} 的联立积分方程组。

5 程序设计及实例分析

5.1 程序设计

鉴于非线性复数型积分方程组求解的困难,本程序设计选用 Fortran 5.1,首先将诸复变积分分解为实部和虚部,再分别将非线性复数型积分方程组转化为实型非线性积分方程组,其中积分采用变步长的辛普森二重积分法,在成立的区域利用迭代法对方程组进行搜索求解。

5.2 实例分析

5.2.1 初始参数值、模拟计算结果与实验数据比较

积分面积椭圆柱参数如表 1 所示,混合物参数 $\bar{\epsilon}_3$ 如表 2 所示。体积比: V_f (纤维布) 22.985%; V_3 (树脂吸收剂混合剂) 77.015%。

表 1 纤维布参数/mm

a	b	1	$\epsilon_{f1} = \epsilon_{f2}$	μ_r
0.215	0.016 3	0.53	(4.34, 0.08)	(1, 0)

5.2.2 误差分析

从表1, 2可见, 其等效电磁参数误差产生的原因一方面是数学—物理模型的简化及辛普森法求解二重积分的精度所限; 另一方面则是由实验误差所致。

根据本文提出的模型建立了系统化软件, 能对纤维布层板的等效电磁参数进行预测。随着实验误差的逐步降低, 以及模型结构的进一步完善, 可望本方法和系统软件能对实际配方及电性能设计提供有意义的参考。

表2 介质常数的模拟计算结果与实验数据比较

f/GHz	$\tilde{\epsilon}_3$	$\epsilon_{gx}(\text{理})$	$\epsilon_{gz}(\text{理})$	$\epsilon_{gz}(\text{实})$	ϵ_{gx} 实部相对误差
8.2	(5.039, 0.168)	(4.98, -0.150)	(4.99, -0.150)	(5.29, -0.04)	6.6%
9.0	(5.107, 0.112)	(4.99, -0.101)	(4.99, -0.110)	(5.45, 0.06)	8.4%
10.0	(5.121, 0.147)	(5.11, -0.132)	(5.11, -0.135)	(5.45, -0.05)	6.2%
11.0	(5.099, 0.116)	(4.99, -0.105)	(4.99, -0.110)	(5.49, -0.40)	9.1%
12.0	(5.132, 0.096)	(5.11, -0.092)	(5.12, -0.093)	(5.49, -0.06)	6.9%

参 考 文 献

- 1 贾宝富, 刘述章, 林为干. 结构型吸波材料电磁特性预测. 航空学报, 1990, 11(9):480~486
- 2 Sang L T, Kong J A. Scattering of electromagnetic waves from random media with strong permittivity fluctuation. Radio Science, 1981, 16(3):303~320
- 3 Stogryn A. Strong fluctuation theory for moist granular media. IEEE Trans on Geo-science and Remote sensing, 1985, GE-23(6):78~83
- 4 Stogryn A. A note on the singular part of the dyadic Green's function in strong fluctuation theory. Radio Science, 1983, 18(6):1283~1286

Equivalent EM Parameters of Fiber Cloth Sheet Absorbing Material

Yang Huajun Rao Kejin Zhao Bolin

(Dept. Allied Physics, Information materials Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A method for pre-estimating the equivalent electromagnetic parameters of absorbing fiber cloth sheet which has been widely used in fabricating stealth vehicles is presented. The equivalent EM parameters(i.e., permittivity and permeability)are the most important data in design. With the anisotropic property structure of the mixed media, based on the strong fluctuation theory, a set of complex integral equations for EM parameters are formulated. With Fortran 5.1, a system software is set up to search out these unknown parameters by iterative way. Some pre-estimating EM parameters examples are listed.

Key words fiber cloth sheet; equivalent EM parameters; absorbing material; strong fluctuation theory

编辑 黄辛