

SRAM 及其二维结构的隐身特性计算分析

李江海 孙 秦 马玉娥

(西北工业大学航空学院, 西安 710072)

文 摘 应用有限元数值计算方法结合吸收边界条件,对结构型吸波材料的隐身特性计算进行了算法分析研究;并据分层组配方案对二维层合板 SRAM 结构(二层和三层结构)的雷达散射截面进行计算,得到最优隐身特性的组配方案;最后对波纹板 SRAM 结构、波纹板斜面与底板夹角变化对雷达散射截面的影响进行了计算分析,得出正趋势的结论。

关键词 结构型吸波材料,雷达截面,有限元,层合板结构,波纹板结构

Analysis of Stealth Performance on SRAM and Its 2D Structures

Li Jianghai Sun Qin Ma Yu'e

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract By using finite element method combined with absorbing boundary conditions, the numerical calculation of stealth properties of structural radar absorption materials (SRAMs) is studied. Based on the layer and combination program, radar cross-section (RCS) of 2D two-and three-layered SRAM structures is calculated to achieve an optimal combination design of stealth properties. Finally, the influence of angle change between ripple and bottom board of rippled SRAM structure on RCS is analyzed and a positive tendency is obtained.

Key words Structural radar absorption material, Radar cross-section, Finite element method, Layered structure, Rippled structure

1 引言

隐身技术作为提高武器系统的生存能力和突防能力的有效手段,受到世界各国的高度重视。而吸波材料(RAM)则是隐身技术中不可或缺的一部分。吸波材料是指能够有效地吸收入射雷达波并使其散射衰减的一类功能材料,它可以降低作战武器系统的雷达散射截面(RCS),从而降低被雷达发现的可能性^[1,2]。

吸波材料按其成型工艺和承载能力,可以分为涂覆型(CRAM)和结构型(SRAM)。CRAM 是将吸波剂与粘结剂混合后涂覆于目标表面而形成吸波涂

层,其优点是工艺简单、使用方便、容易调节等,所有隐身武器系统上都使用了 CRAM;缺点是吸波频带窄、易脱落、涂层厚、密度大。SRAM 通常将吸收剂分散在特种纤维(如玻璃纤维、石英纤维等)增强树脂基中,既能隐身又能承载,可很好地成型各种形状复杂的部件,如机翼、尾翼、进气道等,是当今 RAM 中主要的研究方向之一^[3]。本文应用电磁场有限元数值计算方法,对 SRAM 的雷达散射截面进行计算和分析,并对几种吸波结构进行分析与研究。

2 二维电磁散射问题的有限元数值分析理论

2.1 雷达散射截面定义

收稿日期:2004-09-10

李江海,1978 出生,博士研究生,主要从事飞行器的隐身/结构数值计算综合设计方面的研究工作

定量表征目标散射强弱的物理量称为目标对入射雷达波的有效散射截面积。对二维情况,散射体为无限长柱体,雷达散射截面的定义式为:

$$\sigma = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 2\pi\rho \frac{|E^{sc}|^2}{|E^{inc}|^2} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 2\pi\rho \frac{|H^{sc}|^2}{|H^{inc}|^2} \quad (1)$$

式中: E^{inc} 和 H^{inc} 分别为入射电场强度和磁场强度, E^{sc} 和 H^{sc} 分别为散射电场强度和磁场强度。雷达散射截面通常采用对数形式,如下定义:

$$RCS = 10\lg\sigma \quad (2)$$

2.2 有限元数值算法分析

由(1)式可知,要计算雷达散射截面,需要确定总场或散射场的大小。任何二维场都可分解成 E_z 极化场和 H_z 极化场,因此分别考虑这两个场就足够了。对 E_z 极化情形, E_z 场满足标量亥姆霍兹方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) + k_0^2 \epsilon_r E_z = jk_0 Z_0 J_z \quad (3)$$

同样,对 H_z 极化情形, H_z 场满足标量亥姆霍兹方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) + k_0^2 \mu_r H_z \\ = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon_r} J_y \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon_r} J_x \right) \end{aligned} \quad (4)$$

为了统一考虑,方程(3)、(4)能够写成:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \beta \Phi = f \quad (5)$$

对于 E_z 极化情形,

$$\Phi = E_z, \alpha = \frac{1}{\mu_r}, \beta = -k_0^2 \epsilon_r, f = -jk_0 Z_0 J_z$$

对于 H_z 极化情形,

$$\Phi = H_z, \alpha = \frac{1}{\epsilon_r}, \beta = -k_0^2 \mu_r,$$

$$f = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon_r} J_y \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon_r} J_x \right)$$

(5)式是一个二阶偏微分方程。对偏微分方程的求解,工程上成熟的算法是基于泛函变分的有限元法。有限元法将整个解区域离散成微小单元,在单元的基础上离散偏微分方程,化为有限元矩阵方程的求解。等价于方程(5)的泛函^[4]可表示为:

元法。有限元法将整个解区域离散成微小单元,在单元的基础上离散偏微分方程,化为有限元矩阵方程的求解。等价于方程(5)的泛函^[4]可表示为:

$$\begin{aligned} F(\Phi) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left[\alpha_x \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \alpha_y \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \beta \Phi^2 \right] d\Omega \\ - \iint_{\Omega} f \Phi d\Omega \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式的含义是求泛函 $F(\Phi)$ 式的驻点,理论变分的结果可获得等价的微分方程(5)式。

然而对于二维散射体(如图1),其解域是无限的,但有限元法只适用于有限区域或有界区域,所以,为了用有限元法求解散射场,在此必须引入人工边界来截断散射体外的无限区域。而且,为了求得该问题的唯一解,还要在人工边界处引入边界条件。目前应用比较多的截断边界条件是吸收边界条件(ABC)^[5]。吸收边界条件产生的是边界场之间的局部关系,即只将边界上一个结点的场与邻近结点的场联系起来,因此,得到了高度稀疏带状的有限元方程组,保留了十分重要的有限元法的优点。经研究^[4],该边界距离散射目标体外边缘 0.15λ 就可满足计算精度,有限元的网格结点划分原则是每个波长取 $16 \sim 20$ 个结点。

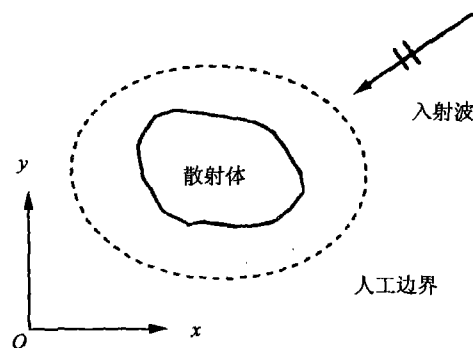


图1 二维散射问题的几何示意图
Fig. 1 Geometry of 2D scattering problem

本文使用有限元法和吸收边界条件相结合来对二维散射体的隐身特性进行计算分析,使用 Ansys 软件进行有限元计算网格的划分,并在 Matlab 环境下编制了 RCS 的整套计算程序。作者在文献[6]中进行了该程序的实例计算,并和文献[4]上给出的矩量法结果进行了比较,具有同等数值精度。

3 SRAM 的结构形式分析

SRAM 虽然有很好的吸波性能,但单靠一种或一层结构吸波材料,并不能达到完全隐身的效果,所以应设计多层结构的吸波材料。洛克希德跨国公司研制的一种复杂的蜂窝结构就由七层组成。目前 SRAM 研究应用较多的结构形式是层合板型结构和夹芯型结构,后者包括蜂窝、波纹板和角锥三种夹芯结构。但是由于本文受实验条件的限制,尚不具备对某种结构形式进行具体的研制。因此,作者根据前人对结构形式设计的定性描述,就层合板的多层组配方案和夹芯结构中波纹板结构的板倾斜角度对 SRAM 结构进行了分析和实例性能计算。

3.1 层合板的分层组配

由于单层吸波材料难以满足宽频带吸波性能的设计,故在工程应用中往往采用多层板型结构形式,以取得更好的设计效果和设计余地。对于 n 层吸波材料组成的多层板型结构,每一层都有其独立的电磁参量,利用计算机在材料参数的 $n!$ 种组配方案中搜索最优组配方案的方法和步骤,就是多层板型的分层组配理论。多层介质板吸波结构的介质层前后排列顺序不同,则吸波性能也会不同。下面考虑了双层和三层两种情形下的层合板结构设计例子。

3.1.1 双层层合板型

结构截面尺寸:长 5 mm,每一层厚度均为 0.5 mm。各层 SRAM 的电磁参量组合如表 1 所示,各组合对应的 RCS 曲线如图 2 所示。

表 1 双层 SRAM 层合板结构不同组配方案的电磁参量

Tab.1 Electromagnetic parameters of different combinations of two-layered SRAM structure

层号	组合 1(曲线①)					组合 2(曲线②)				
	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	d/mm	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	d/mm
1	34.5	0.99	3.2	0.082	0.5	2	0.053	2.1	0.93	0.5
2	2	0.053	2.1	0.93	0.5	34.5	0.99	3.2	0.082	0.5

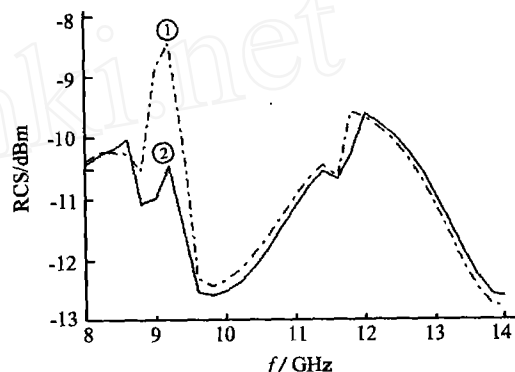


图 2 双层 SRAM 层合板结构不同组配的 RCS 曲线

Fig.2 RCS curves of different combinations of two-layered SRAM structure
曲线①、②分别对应于表 1 中组合 1 和组 2。

从图 2 可以看出,组合 2 在频段 8 GHz ~ 14 GHz 上其 RCS 值比组合 1 要好得多。

3.1.2 三层层合板型

结构截面尺寸:长 5 mm,层厚均为 0.4 mm。各层 SRAM 材料的电磁参量组合如表 2 所示,各组合对应的 RCS 曲线如图 3 所示。

表 2 三层 SRAM 层合板结构不同组配方案的电磁参量

Tab.2 Electromagnetic parameters of different combinations of three-layered SRAM structure

层号	组合(a) (曲线①)					组合(b) (曲线②)				
	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	d/mm	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	d/mm
1	2.11	0.99	3.52	0.056	0.4	16.72	0.892	4.55	1.085	0.4
2	16.72	0.892	4.55	1.085	0.4	2.11	0.99	3.52	0.056	0.4
3	35.3	11.254	1.32	0.968	0.4	35.3	11.254	1.32	0.968	0.4
层号	组合(c) (曲线③)					组合(d) (曲线④)				
	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	d/mm	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	d/mm
1	35.3	11.254	1.32	0.968	0.4	2.11	0.99	3.52	0.056	0.4
2	2.11	0.99	3.52	0.056	0.4	35.3	11.254	1.32	0.968	0.4
3	16.72	0.892	4.55	1.085	0.4	16.72	0.892	4.55	1.085	0.4
层号	组合(e) (曲线⑤)					组合(f) (曲线⑥)				
	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	d/mm	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	d/mm
1	16.72	0.892	4.55	1.085	0.4	35.3	11.254	1.32	0.968	0.4
2	35.3	11.254	1.32	0.968	0.4	16.72	0.892	4.55	1.085	0.4
3	2.11	0.99	3.52	0.056	0.4	2.11	0.99	3.52	0.056	0.4

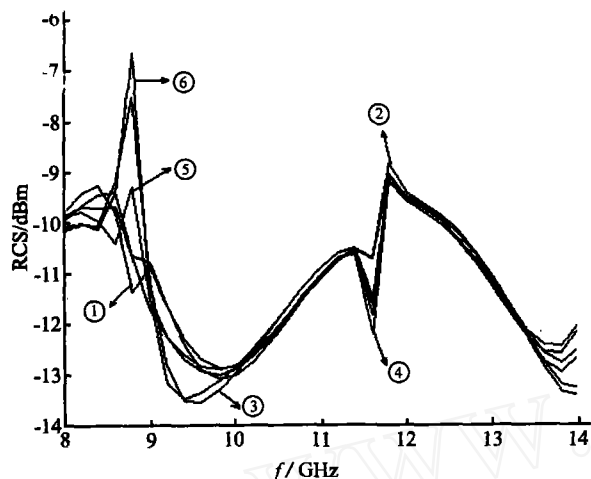


图3 三层SRAM层合板结构不同组配的RCS曲线

Fig. 3 RCS curves of different combinations of three-layered SRAM structure

曲线①~⑥分别对应于表2中组合(a)~(f)。

从多频率优化的角度看(图3),相对于组合(c)和(f),其它组合要优于这二者。然则比较组合(a)、(b)、(d)和(e)又可以看见,组合(d)和(e)相对来说要优于组合(a)和(b)。这样对于同样的设计目标或者说对于现成的材料限制,可以有多种最优的组合来实现设计。

3.2 波纹板夹芯结构

波纹板夹芯结构如图4所示,波纹板用SRAM制作。在此探讨了波纹板斜面与底板夹角变化引起板结构RCS的改变。波纹板结构的电磁参数如表3所示。

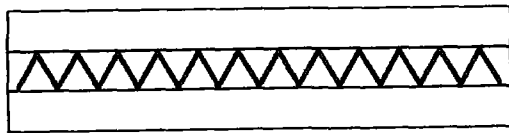


图4 波纹板SRAM结构截面示意图

Fig. 4 Section of rippled SRAM structure

表3 波纹板SRAM结构的电磁参量

Tab. 3 Electromagnetic parameters of ripped SRAM structure

层号	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	d/mm
1	16.4	0.99	2	0.99	0.4
2	57.0	0.99	2.60	0.95	0.4
3	32.2	0.99	3.25	0.93	0.4

在表3中,第1,3层分别是对应波纹板顶板和底板SRAM的电磁参数,第2层是波纹板SRAM的电磁参数。设波纹板斜面与底板的夹角为 θ ,在图5中给出了三个不同角度下波纹板SRAM结构的RCS曲线。

宇航材料工艺 2004年 第6期

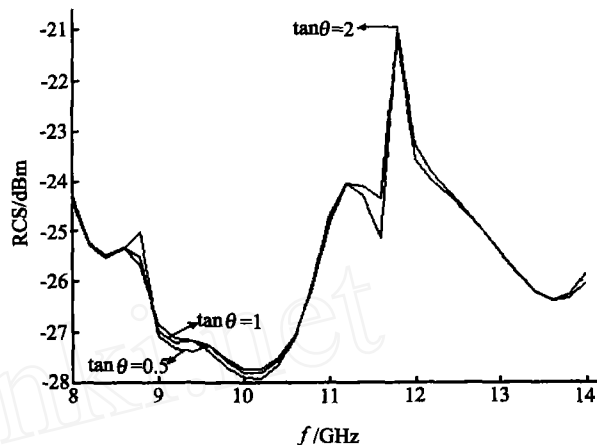


图5 波纹板结构在不同 θ 时的RCS值

Fig. 5 RCS values of different θ of rippled SRAM structure

从图5可以看出, θ 角大的,在整体频段上RCS值要好,这是由于随着 θ 角的变大,波纹板的数量会相对增加,反射的次数就会增多,对电磁波的损耗就会更多。不过,结构角度的增大实际上还与相应的制造工艺相关(比如结构强度、刚度上的考虑),并不是说能够越大越好,应该说来还需要进行更进一步的研究探讨。

4 结论

(1)对于层合板SRAM结构,在SRAM电磁参量不变的情况下,根据分层组配原理对多层板进行分层组合,能够得到一个最优的电磁参量组合或者多组满足设计要求的电磁组合。

(2)在波纹板夹芯SRAM结构中,随着波纹板斜面与底板的夹角增大,其隐身性能将得到一定的改善。

参考文献

- 1 张卫东,冯小云,孟秀兰. 国外隐身材料研究进展. 宇航材料工艺,2000;30(3): 1~4
- 2 郭春艳. 结构隐身复合材料技术. 航空制造技术, 1998;17(3): 28~30
- 3 赵东林,周万诚. 结构吸波材料及其结构型式设计. 兵器材料科学与工程,1997;20(6): 53~57
- 4 金建铭著. 电磁场有限元方法. 西安:西安电子科技大学出版社,1998;51~53
- 5 A. F. Peterson. Absorbing boundary conditions for the vector wave equation. Microwave Opt. Tech. Lett., 1988;(1): 62~64
- 6 李江海. SRAM材料及其结构的隐身特性计算与优化设计. 西安:西北工业大学硕士论文,2003

(编辑 任涛)