

文章编号:1000-6893(2008)03-0670-05

# 翼剖面介质构形的隐身缩比模型数值计算研究

孙秦, 田薇

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

## Numerical Study of Medium Stealth Scale-down Models for Airfoil Shape

Sun Qin, Tian Wei

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

**摘要:** 结构型吸波材料以全角度、多方位的有效性和不改变飞行器原有形状设计的特点,在隐身技术领域占有重要的技术地位,开展全尺度结构的隐身效能与其技术参数影响作用的研究需要较大的测试空间与经费支持,由此限制了试验技术在更大范围内的应用。结合试验技术与参数研究的应用需求,探讨缩比介质体电磁散射规律可提供于大型结构隐身技术的计算与试验应用研究参考。采用复杂介质体的二维电磁散射有限元数值计算方法,对介质体机翼剖面的缩比模型电磁散射规律进行了数值计算研究,发现若介质体阻抗比大于 0.5,则缩比模型的雷达散射截面(RCS)试验结论不能按照导体修正原理还原,必须修正才能作为原构形介质的电磁散射特性,这对于大型结构体小型化隐身技术测试具有实用价值与意义。

**关键词:** 电磁散射; 有限元计算; 介质体机翼剖面; 缩比模型; RCS 修正; 大型结构

**中图分类号:** V218 **文献标识码:** A

**Abstract:** Structured radar absorbing materials play an important role in the stealth technology of military air-vehicles for their omnidirectional effectiveness without the need to change the original aerodynamical shape configuration. But experimental study of stealth efficiency and parametric effects for full scale structures requires considerable financial support and testing space, which limits the application of experimental tests. Therefore, it is of significant value to find the electromagnetic dispersion laws of the scale-down medium and the modification method between scale-down and full scale vehicle configurations. This paper makes a numerical study of the electromagnetic dispersion law of a scale-down model for an airfoil-like complicated medium configuration by means of the 2-D electromagnetic finite element method. The numerical computation leads to the following conclusion: the radar cross section(RCS) test result of electromagnetic dispersion of a scale-down model cannot be directly converted into that of the real-world medium prototype under conductor modification principle if the medium impedance ratio is greater than 0.5, and necessary modification must be done. This conclusion is of practical significance for the stealth test of minifying large-scale medium configuration for military air-vehicles.

**Key words:** electromagnetic dispersion; finite element numerical method; airfoil-like medium configuration; scale-down model; RCS modification; large-scale structure

远程战略轰炸机、大型军用运输机作为威慑、杀伤、运输与快速战略响应等的重型航空武器装备在未来高科技战争中扮演着举足轻重的作用,然而,随着高分辨率、高可靠性先进探测技术的发展和精确制导武器的出现,致使这些重型航空武器面临着严峻威胁。因此,飞机隐身技术作为提高武器装备生存和突防能力、提高总体作战效能的有效技术手段受到世界各军事大国的高度重视。

在目前军事探测系统中,雷达是最主要的探测手段,其发展迅速,分辨率越来越高,已成为空

中、地面和海上装备的重要探测设备。因此,在武器装备体系中雷达目标特征信号控制是各国隐身技术研究的重点。实现目标隐身技术的方法主要是外形隐身技术和材料隐身技术,外形隐身技术不能解决全部空间范围内的隐身问题,同时受气动外形或现役装备等的限制;而隐身吸波材料以其全角度、多方位的有效性和不改变飞行器原有形状设计的特点,在隐身技术领域占有重要的技术地位。

雷达吸波材料(RAM)分为涂敷型(CRAM)与结构型(SRAM),是利用 RAM 吸收衰减入射的电磁波来降低反射体的 RCS。CRAM 是将吸收剂与粘合剂混合后涂覆于目标表面而形成吸波

收稿日期:2007-09-20; 修订日期:2008-02-19  
基金项目:国家自然科学基金(10477018)  
通讯作者:孙秦 E-mail:sunqin@nwpu.edu.cn

涂层,其工艺简单、使用方便、容易调节等优点得到了广泛应用,其缺点是吸波频带窄、易脱落、涂层厚、比重大;SRAM 通常将吸收剂分散在特种纤维(如玻璃纤维、石英纤维等)或增强树脂基中,既能隐身又能承载,可很好的成型各种形状复杂的部件,如机翼、尾翼、进气道等,具有无外形影响、重量轻、易实现“吸、透、散”高效率隐身的技术特点,是当今 RAM 中主要的研究方向<sup>[1-4]</sup>。

雷达吸波材料的应用研究无外乎分析预测与试验技术两大类方法。对雷达吸波材料及其结构体的分析预测方法目前主要采用电磁有限元的数值计算技术,可完成复杂构形、复杂介质体的吸、透、散效应计算,但由于单元网格的尺度必须很小(约为入射波长  $\lambda$  的 0.1 倍),因此很难对大型结构体进行分析预测;试验技术作为检验与考核雷达吸波材料及其结构隐身技术的最有力手段在工程上广泛采用,但一方面缺乏定量的预测分析,使得试验工作具有一定的盲目性;另一方面,开展大型结构的隐身效能与其技术参数影响作用的研究需要较大的测试空间与经费支持,由此限制了试验技术在更大范围内的应用。由此,本文基于二维电磁散射的有限元数值计算原理,结合试验技术与参数研究的应用需求,探讨缩比介质体电磁散射规律,从而提供于大型结构隐身技术的计算与试验应用研究参考。

### 1 介质体二维电磁散射计算原理<sup>[5-7]</sup>

电磁散射体的标量波动方程可写成统一微分形式

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha \frac{\partial}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\alpha \frac{\partial \Phi}{\partial y}\right) + \beta \Phi = f \quad (1)$$

对于  $E_x$  极化情形

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

对于  $H_x$  极化情形

$$\Phi = H_x, \quad \alpha = \frac{1}{\epsilon_r}, \quad \beta = -k_0 \mu_r, \\ f = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\epsilon_r} J_y\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\epsilon_r} J_x\right)$$

式中:  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$  和  $\mu_r = \mu/\mu_0$  分别为相对介电常数和相对磁导率,在此假设它们是位置的复标量函数;  $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0/\mu_0}$  为自由空间波数;  $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  为自由空间的特征阻抗;电常数  $\epsilon_0 8.854 \times 10^{-12}$  F/m 和磁常数  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m 分别为自由空

间的介电常数和磁导率;  $J_x, J_y, J_z$  为电流密度矢量的 3 个分量。

相应于式(1)的等价泛函可表示为

$$F(\Phi) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left[ \alpha_x \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \alpha_y \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \beta \Phi^2 \right] d\Omega + \int_{\Gamma_2} \left( \frac{\gamma}{2} \Phi^2 - q\Phi \right) d\Gamma - \iint_{\Omega} f\Phi d\Omega \quad (2)$$

式中:关于  $\Gamma_2$  的积分项为第二类边界  $\Gamma_2$  上的作用泛函;式(2)隐含被积函数  $\Phi$  在  $\Gamma_1$  的边界上满足  $\Phi = \rho$  的第一类边界条件。

对式(2)关于未知函数  $\Phi$  进行离散化插值处理并对其进行驻值计算即为电磁散射问题的数值计算原理。这里取二维介质体的三角形离散化,于是在一个三角单元内的函数  $\Phi$  变成其节点未知函数值的表达式为

$$\Phi^e(x, y) = \sum_{j=1}^3 N_j^e(x, y) \Phi_j^e \quad (3)$$

式中:插值函数  $N_j$  为线性 Lagrange 规范基函数。在边界  $\Gamma_2$  上同样引入线性插值函数,即

$$\Phi^s = \sum_{j=1}^2 N_j^s \Phi_j^s \quad (4)$$

式中:  $N_1^s = 1 - \zeta, N_2^s = \zeta$  即为线段的归一化坐标。将式(3)及式(4)式代入式(2),并实施变分驻值计算,即可得基于线性离散化的二维散射体数值计算方程,即

$$\left[ \frac{\partial F}{\partial \Phi} \right] = \sum_{e=1}^M (\mathbf{K}^e \Phi^e - \mathbf{b}^e) + \sum_{s=1}^{N_s} (\mathbf{K}^s \Phi^s - \mathbf{b}^s) = \mathbf{0} \quad (5)$$

式中:

$$\mathbf{K}_{ij}^e = \iint_{\Omega^e} \left( \alpha_x \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \alpha_y \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + \beta N_i^e N_j^e \right) dx dy \quad (6a)$$

$$\mathbf{b}_i^e = \iint_{\Omega^e} f N_i^e dx dy \quad (6b)$$

$$\mathbf{K}_{ij}^s = \int_0^1 \gamma N_i^s N_j^s d\zeta \quad (6c)$$

$$\mathbf{b}_i^s = \int_0^1 q N_i^s l d\zeta \quad (6d)$$

$$i, j = 1, 2, 3$$

对于二维散射体其求解域是无限的,但有限元方法只适用于有限区域或有界区域。所以,为用有限元方法求解散射场,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<sup>[8-11]</sup>(ABC),如图 1 所示。

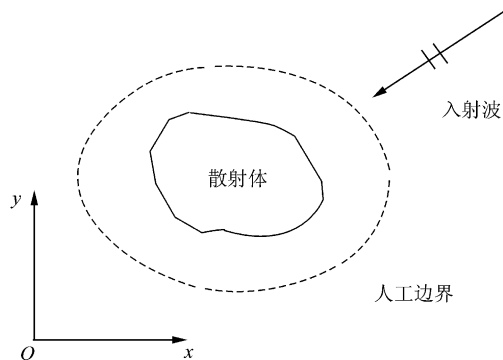


图 1 二维散射问题的人工截断边界

Fig. 1 Artificial cut-off boundary of 2D dispersion

## 2 数值计算单元尺度收敛性检验

为慎重处理不同曲率构形二维体的 RCS 值的有限元计算精度问题,以假设翼型计算为模型,进行了不同单元尺度的数值计算收敛性研究。

由于该翼型的前缘曲率半径相对于弦长来说是非常小的(不到弦长的 0.17%),故在划分网格时对前缘以及由于前缘、后缘引起的吸收边界小曲率半径部位均进行了很细致的网格划分,其余区域的单元尺度则采用  $0.100\lambda \sim 0.500\lambda$  不等分进行划分,吸收边界距离翼型表面  $0.500\lambda$  ( $\lambda$  为入射波长),计算网格模型如图 2 所示。

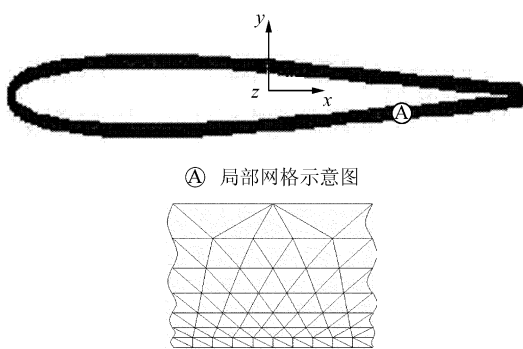


图 2 假设翼型的有限元计算网格

Fig. 2 FEM meshes of airfoil-like model

RCS 的计算定义为正对翼型前缘垂直入射平面波的后向(单站)RCS。根据各网格划分方案得到对应的 RCS 计算曲线如图 3(完整翼型曲线)所示。其中曲线上后 5 个点对应的网格单元尺度分别是  $0.200\lambda$ ,  $0.170\lambda$ ,  $0.130\lambda$ ,  $0.100\lambda$ ,  $0.085\lambda$ 。计算表明  $0.200\lambda$  时,得到的 RCS 数值已开始趋于稳定(本文的后续计算工作一般区域

上均取  $0.100\lambda$  划分单元网格)。另外,此处还考虑了截断翼型模型(完整翼型的前缘到翼型最高处截断)。图 3 中截断翼型曲线给出了在 3 种网格划分下的 RCS 计算值。从曲线可以看出,截断翼型的 RCS 值与完整翼型的 RCS 相差并不大,说明处于翼型最高点右边的部位对完整翼型 RCS 的贡献不大。

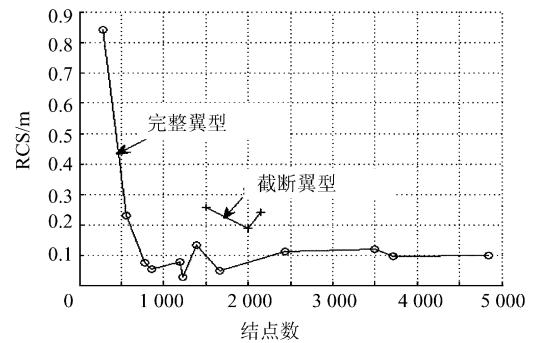


图 3 翼型计算模型的前向 RCS 计算收敛性图

Fig. 3 Diagram of forward RCS numerical convergence versus mesh sizes

## 3 介质体缩比模型的数值计算规律

在三维 RCS 测试理论中对全反射体有如下尺度缩比结论<sup>[12]</sup>:缩比模型的 RCS 测量电磁波频率与原始模型(1:1)的实际频率之间,模型缩小了几倍,测量频率也需相应放大几倍,由此得到的缩比模型的 RCS 值(三维问题的量纲:  $m^2$ )乘上缩小倍率的平方即可近似得到原始模型在实际频率下的 RCS 值。

由此推论,对于二维问题,就是缩比模型在放大相同缩小倍率的入射波频率条件下获得的 RCS 值(单位: m)乘上缩小倍率即可近似得到 1:1 模型在实际频率下的 RCS 值。本文对图 2 模型的不同缩比件进行了二维情况下的导体缩比模型的 RCS 值计算,计算结果如表 1,其中误差列是将计算值乘以缩比倍率后与 1:1 模型计算值的比较误差值。

表 1 导体翼型原始模型与缩比模型的 RCS 计算值

Table 1 RCS numerical results of different scaling-down conductor airfoil models

模型/频率(GHz)	RCS/m	Error/%
1:1/5	0.052 670	
1:2/10	0.025 570	-2.904 900
1:3/15	0.017 560	0.018 986
1:4/20	0.012 981	-1.416 400

对于介质体散射模型,将介质体(损耗介质)可以等效为在外形上强加一个等效阻抗,从而应用阻抗边界条件来进行计算。对于图4中两介质体(介质体1为自由空间)的等效阻抗计算公式表达为<sup>[13-14]</sup>

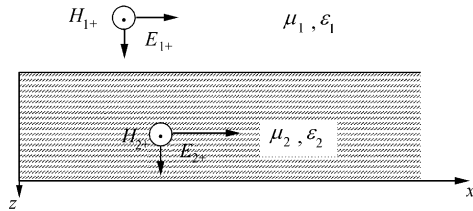


图4 多层介质中的电磁波示意图

Fig. 4 Electromagnetic wave in multiple layered medium

$$z = \eta_1 \frac{\eta_2 + j\eta_1 \tan k_1 d}{\eta_1 + j\eta_1 \tan k_1 d} \quad (7)$$

式中: $d$ 为介质体2的厚度; $k_1$ 为自由空间波数,具体算式见式(1)注释; $\eta_i$  ( $i=1,2$ )为介质体 $i$ 的归一化特征阻抗,算式定义为 $\sqrt{\mu_i/\epsilon_i}$ 。

当介质2为非理想导体,其边界面上的阻抗边界条件可表示为<sup>[15]</sup>

$$E - (n \cdot E)n = \eta Z_0 n \cdot H \quad (8)$$

对于 $E_z$ 极化的二维情形,可具体表示为

$$\frac{\partial E_z}{\partial n} = jk_0 \frac{\mu_1}{\eta_2} E_z \quad (9)$$

两式中的符号含义见式(1)。对于式(9)的边界条件可在式(5)及式(6)置入并进行数值计算。表2中给出了其缩比模型与原始模型在不同阻抗下的RCS数值计算值及其相对误差值。

从表2可以看出,随着阻抗变大,介质体外形缩比模型采用导体外形缩比模型测量原则计算得到的初始模型RCS值与原始模型相比较,其相对误差也越来越大。不过当阻抗值在0.5以下时,相对误差还是可以容许的。

表2 介质体翼型原始模型与缩比模型的RCS计算值  
Table 2 RCS numerical results of different scaling-down medium airfoil models

阻抗/ $\Omega$	1.000 01		0.447 21	
模型/频率 (GHz)	RCS/m	Error/%	RCS/m	Error/%
1 : 1/5	0.041 755		0.047 665	
1 : 2/10	0.018 918	-9.385 7	0.022 691	-4.789 7
1 : 3/15	0.014 585	4.789 8	0.016 206	1.999 4
1 : 4/20	0.011 258	7.848 2	0.012 201	2.389 6
阻抗/ $\Omega$	0.316 23		0.223 61	
模型/频率 (GHz)	RCS/m	Error/%	RCS/m	Error/%
1 : 1/5	0.049 173		0.050 214	
1 : 2/10	0.023 577	-4.105 9	0.024 168	-3.74
1 : 3/15	0.016 618	1.384 9	0.016 9	0.967 86
1 : 4/20	0.012 44	1.193 7	0.012 603	0.394 31

## 4 结 论

基于二维电磁散射的有限元数值计算原理,在验证了计算单元尺度收敛性的工作基础上,首先对导体缩比模型的散射规律进行了数值计算验证,表明了计算结果的相对正确性。为探讨介质体(隐身结构)缩比模型的电磁散射规律,采用同样算法过程进行了数值计算研究,计算结论表明:如果介质体的等效阻抗小于一定值,应用缩比模型的RCS值测量与放大的原则是有效的;但如果阻抗值较大时,有必要进行一定的修正。本文工作结论对大型飞机结构体小型化隐身技术测试具有实用参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 张卫东,冯小云,孟秀兰. 国外隐身材料研究进展[J]. 宇航材料工艺,2000(3):1-4.  
Zhang Weidong, Feng Xiaoyun, Meng Xiulan. The advance of foreign stealth materials[J]. Aerospace Materials and Technology, 2000(3): 1-4. (in Chinese)
- [2] 李江海,孙秦. 结构型吸波材料及其结构型式设计研究进展[J]. 机械科学与技术,2003,22(S2):188-190.  
Li Jianghai, Sun Qin. The development of structured wave absorbing materials and configuration design[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(S2): 188-190. (in Chinese)
- [3] 郑天亮,张璋,王轩,等. 聚苯胺中空微球的改性及电磁特性[J]. 航空学报,2007,28(6):1532-1535.  
Zheng Tianliang, Zhang Zhang, Wang Xuan, et al. Modifying of PANI hollow microspheres and electromagnetic property[J]. Acta Aeronautica et Astronautica sinica, 2007, 28(6): 1532-1535. (in Chinese)
- [4] Johansson M, Holloway C L, Kuester E F. Effective electromagnetic properties of honeycomb composites, and hollow-pyramidal and alternation-wedge absorbers[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2005, 53(2): 728-735.
- [5] Graglia R D, Wilton D R, Peterson A F. Higher order interpolatory vector bases for computational electromagnetics[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1997, 45(3): 329-342.
- [6] Ilić M M, Notaroš B M. Higher order hierarchical curved hexahedra vector finite elements for electromagnetic modeling[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003, 51(3): 1026-1033.
- [7] Hadjali M, Besbes M, Bouillault F. Modeling of magneto-mechanical phenomena by using shell elements[J]. IEEE Trans Magn, 2004, 40(2): 569-572.
- [8] Stupfel B, Mittra R. Numerical absorbing boundary conditions for the scalar and vector wave equations [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1996, 44(7): 1015-1022.
- [9] Omar M R. Stability of absorbing boundary conditions[J].

- IEEE Trans Antennas Propagat, 1999, 47(4):593-599.
- [10] Chatterjee A, Volakis J L. Conformal absorbing boundary conditions for 3-D problems; derivations and applications [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1995, 43(8): 860-866.
- [11] Peterson A F. Absorbing boundary conditions for the vector wave equation[J]. Microwave Opt Tech Lett, 1988, 1: 62-64.
- [12] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
- Ruan Yingzheng. Radar cross-section and stealth technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [13] Jin J M. The finite element method in electromagnetics [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2002.
- [14] Holloway C L, Kuester E F. Impedance-type boundary conditions for a periodic interface between a dielectric and highly conducting medium [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2000, 48(10): 1660-1672.
- [15] 陈国瑞. 工程电磁场与电磁波[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1998.
- Chen Guorui. Engineering electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998. (in Chinese)

**作者简介:**

孙秦(1956—) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:飞行器结构设计及复合材料设计。

Tel:039-88492850

E-mail:sunqin@nwpu.edu.cn

(责任编辑:李铁柏)