

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.02.007

# 覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标 RCS 计算与优化

赵雨辰, 刘江凡, 宋忠国, 席晓莉

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 使用等效电磁参数可以提高覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标雷达散射截面(RCS)计算与优化效率,但传统等效电磁参数计算方法精度不足。因此,本文采用了具有色散特性的闭式表达式来提高宽频带内蜂窝吸波结构等效电磁参数的计算精度,将所得到的精度更高的等效电磁参数与高频算法相结合,计算并优化了覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标的 RCS。结果表明:一方面具有色散特性的闭式表达式能够更好地反映蜂窝吸波结构等效电磁参数随频率的变化情况,另一方面采用高精度等效电磁参数结合高频算法的方法在保证效率的同时,进一步提高覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标的 RCS 计算和优化的精度。

**关键词:** 蜂窝吸波结构; 有限大目标; 等效电磁参数; 雷达散射截面

中图分类号: TN973.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)02-0169-04

## RCS calculation and optimization of limited size object coated with honeycomb absorbing structure

ZHAO Yuchen, LIU Jiangfan, SONG Zhongguo, XI Xiaoli

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The usage of effective electromagnetic parameters can greatly accelerate the calculation of radar cross section (RCS) of limited size object coated with honeycomb absorbing structure. However, the traditional predictive methods are still not accurate in the calculation of the effective electromagnetic parameters of honeycomb absorbing structure. Hence, we adopt a dispersive closed-form expression, which is capable of conveying the dispersive characteristics of effective electromagnetic parameters of honeycomb radar absorbing structure. Then, we combine this dispersive expression with high frequency method to calculate and optimize the RCS of limited size target coated with honeycomb absorbing structure. Results show that this calculation method can be used to improve the computation accuracy of the RCS of a limited size target coated with honeycomb absorbing structure without sacrificing the efficiency of calculation and optimization.

**Key words:** honeycomb absorbing structure; limited size object; effective electromagnetic parameters; RCS

蜂窝吸波结构是兼具吸波性能和承载功能的新型轻质多功能吸波结构。在实际工程设计中,通常需要得到覆盖有蜂窝吸波结构的有限大目标对于雷达电磁波的雷达散射截面(RCS),但实际的测试实验,人力、物力成本很高,因而需要更多地借助计算机进行辅助计算与优化<sup>[1]</sup>。但相比于可以用一个蜂窝单元结合周期边界来分析的无限大情况,覆盖

蜂窝吸波结构的有限大目标 RCS 计算的过程中建模以及计算量往往十分巨大。因此,需要在最大程度保证计算精度的条件下,寻求提高 RCS 计算与优化效率的方法。

从复杂目标建模的精度上可以将相关的研究分为精确建模方法和等效建模方法两大类。精确建模方法,比如矩量法、时域有限差分法等,在处理有限

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61501369); 中国博士后科学基金资助项目(2016M592904XB); 西安理工大学科技创新计划资助项目(2014CX008); 西安理工大学博士科研启动基金资助项目(105-211423)

作者简介: 赵雨辰,男,讲师,博士,研究方向为电磁场与微波技术。E-mail: zhaoyuchen@xaut.edu.cn

通讯作者: 席晓莉,女,教授,博导,博士,研究方向为电磁理论与数值计算、无线接收与抗干扰技术。E-mail: xixiaoli@xaut.edu.cn

大蜂窝吸波结构时,往往需要很大的建模和编程工作量,并消耗大量的计算机资源<sup>[2-5]</sup>。等效建模的方法则通过使用等效电磁参数将蜂窝结构简化为均匀的平板结构,从而大大降低了蜂窝吸波结构建模的复杂度。这种方法核心问题是如何更快速准确地计算蜂窝吸波结构的等效电磁参数<sup>[6]</sup>。许多研究都已表明,蜂窝吸波结构的等效模型不仅在单元尺寸远小于入射波波长的长波长条件下是成立的,而且在单元尺寸与入射波波长可比拟的一定范围内也是成立的<sup>[7]</sup>。与长波长条件下相比,蜂窝吸波结构的等效电磁参数表现出了一定的色散特性,因此要使用等效电磁参数计算覆盖蜂窝吸波结构的电大目标 RCS,就必须考虑等效电磁参数的色散特性,否则就会对等效电磁参数和 RCS 的计算精度产生比较大的影响<sup>[8]</sup>。

本文在原有工作的基础上,以正方形单元的蜂窝吸波结构为例,首先采用具有色散特性的闭式表达式来计算蜂窝吸波结构的等效电磁参数;然后,将等效电磁参数与物理光学法(PO)相结合计算了覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标 RCS,通过与商业软件全波仿真结果进行对比验证了计算方法的合理性;最后,基于该计算方法对覆盖于有限大目标之上的蜂窝吸波结构进行优化设计,得到了期望的 RCS 缩减效果。

## 1 理论

### 1.1 等效电磁参数的闭式表达式

正方形单元的蜂窝吸波结构横截面示意图如图 1 所示。

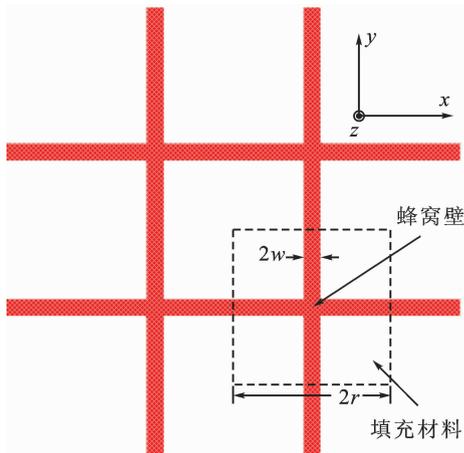


图 1 正方形单元的蜂窝吸波结构示意图

Fig. 1 Honeycomb radar absorbing structure with square unit

蜂窝吸波结构是由蜂窝壁和填充材料组成,虚线框中为正方形的单元结构,单元的边长为  $2r$ ,蜂

窝壁的厚度为  $2w$ ,则蜂窝壁和填充材料的占空比  $v_1$  和  $v_2$  分别为:

$$v_1 = \frac{w}{r} \left( 2 - \frac{w}{r} \right) \quad (1)$$

$$v_2 = 1 - v_1 \quad (2)$$

当频率较低时,根据 Hashin-Shtrikman (HS) 上、下界公式,蜂窝吸波结构的等效介电常数可以表示为:

$$\epsilon_g^{\text{HSU}} = \epsilon_1 \frac{(2 - v_1)\epsilon_2 + v_1\epsilon_1}{v_1\epsilon_2 + (2 - v_1)\epsilon_1} \quad (3)$$

$$\epsilon_g^{\text{HSL}} = \epsilon_2 \frac{(1 + v_1)\epsilon_1 + (1 - v_1)\epsilon_2}{(1 - v_1)\epsilon_1 + (1 + v_1)\epsilon_2} \quad (4)$$

式中,  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  分别为蜂窝壁和填充材料的介电常数,上标 HSU 和 HSL 分别表示 HS 上界和下界,式(3)、(4)分别用于蜂窝壁电磁参数较大和填充材料电磁参数较大的情况<sup>[7]</sup>。

当频率较高时,蜂窝结构的等效电磁参数与低频时相比表现出了一定的色散特性,因此需要进一步根据频率对等效电磁参数表达式进行修正。这里采用基于强扰动理论的方式<sup>[8]</sup>,并将蜂窝吸波结构看成是由蜂窝壁和填充材料组成的两相复合材料,其中填充材料被视为  $z$  方向长度无限二维填充粒子,蜂窝壁被视为背景材料,则最终得到宽频带内的蜂窝吸波结构等效介电常数表达式为:

$$\epsilon_e = \epsilon_g [1 + g(f)] \quad (5)$$

其中  $\epsilon_g$  根据不同情况由 HS 上下界公式求得,  $f$  表示频率,  $g$  为等效介电常数的色散特性函数,其表达式为:

$$g(f) = A (k_g a)^2 \frac{\epsilon_g^*}{\epsilon_g} \times \left[ v_1 \left| \frac{\epsilon_1 - \epsilon_g}{\epsilon_1 + \epsilon_g} \right|^2 + v_2 \left| \frac{\epsilon_2 - \epsilon_g}{\epsilon_2 + \epsilon_g} \right|^2 \right] \quad (6)$$

其中,  $A$  为待定复系数,星号\*表示取共轭,波数  $k_g = 2\pi f \sqrt{\epsilon_g \mu_g}$ ,填充粒子尺寸  $a = r - w$ 。将  $\epsilon_g$  计算公式中的介电常数符号换成磁导率符号即可得到等效磁导率  $\mu_g$  的计算公式。

### 1.2 算例对比与分析

图 2 对比了使用传输反射法得到的等效电磁参数和 HS 公式,以及式(5)的理论计算结果。蜂窝壁的介电常数和磁导率分别为 4 和 1,填充材料的介电常数和磁导率分别为  $12 - j1$  和  $3 - j1$ ,其中  $j$  为虚数单位。蜂窝单元结构参数  $r = 1 \text{ mm}$ ,  $w = 0.1r$ 。从图中可以看出,由于加入了色散特性函数,式(5)能够在较宽的频带内更准确地计算正方形单元的蜂窝吸波结构的等效电磁参数,待定系数  $A = 0.25 - j0.2$ 。

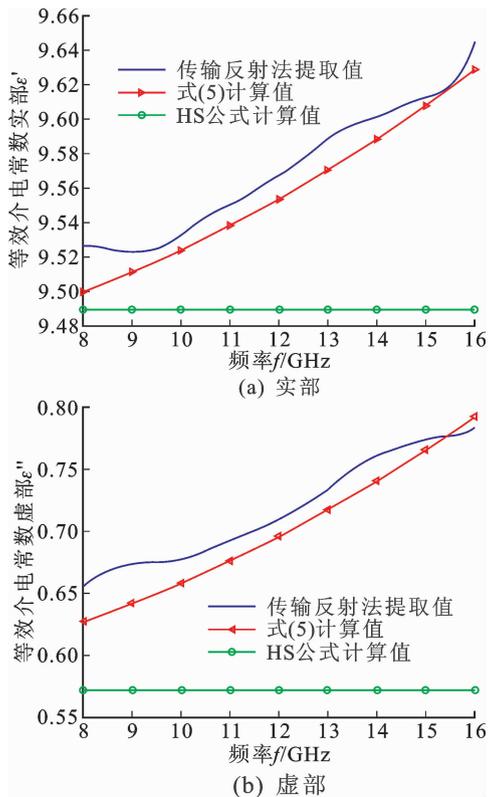


图 2 不同方法得到的等效介电常数的对比  
Fig. 2 Comparisons between extracted and calculated results by different methods

## 2 RCS 的计算与优化

### 2.1 RCS 计算

当实际工程中的有限大目标,比如飞机、舰船等,覆盖有大面积的蜂窝吸波结构时,如果能先使用等效电磁参数将蜂窝结构等效为均匀平板,再结合高频算法,就可以提高覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标 RCS 计算和优化的效率。

为了说明这一等效计算思路的合理性,设正方形单元的蜂窝吸波结构厚度为 1.87 mm,单元周期为 2 mm,骨架材料宽度为 0.2 mm,骨架材料的相对介电常数和相对磁导率分别为  $4.4 - j0.088$  和 1,芯体材料的相对介电常数和相对磁导率分别为  $10 - j1.2$  和  $1.1 - j0.3$ 。采用尺寸为  $42 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$  的金属平板来模拟有限大尺寸目标,在 14 GHz 频率处计算其覆盖蜂窝吸波结构前后的 RCS 变化。入射波的极化方向设置为与金属平板的边平行的方向,入射角为  $\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ,分别采用 Feko 软件中的矩量法求解器,以及式(5)结合 Gordon 积分加速的 PO 法计算覆盖蜂窝吸波结构前后的 RCS,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,覆盖蜂窝吸波结构可以减小

金属平板的 RCS,并且采用全波分析的方法和采用等效方法的计算所得到结果比较吻合,说明了采用等效方法的合理性。但由于算例中金属平板并不是严格意义上的电大目标,所以使用高频方法会带来一定的误差,特别是在  $\theta$  较大时误差则更为明显。同时,相比于全波分析的方法,等效电磁参数结合高频算法的计算思路在理论建模、编程工作量以及计算时间和资源消耗等方面都具有一定的优势,从而能够为进一步的优化设计提供一种较为简单有效的 RCS 计算方法。

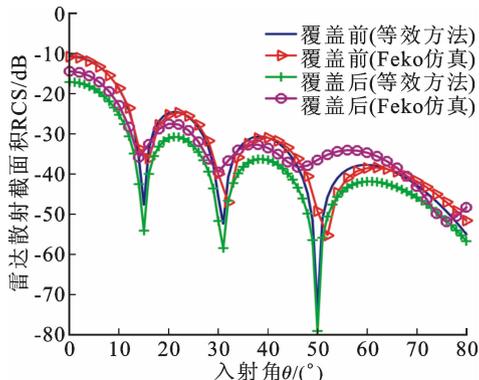


图 3 等效方法和仿真结果的对比  
Fig. 3 Comparison between equivalent method and simulation

### 2.2 RCS 优化

在分析了等效电磁参数结合高频算法的合理性之后,这里采用该方法对覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标 RCS 进行优化。入射波频率为 3 GHz,波长  $\lambda = 100 \text{ mm}$ ,正方形金属板的边长为  $5\lambda$ ,期望通过覆盖如图 4 所示的多层蜂窝吸波结构来降低金属板的后向 RCS。该多层蜂窝吸波结构是由上蒙皮、下蒙皮和三层蜂窝芯组成的,其中区域①和⑦为上下蒙皮,区域②、④和⑥为蜂窝夹芯层,区域③和⑤为过渡层。

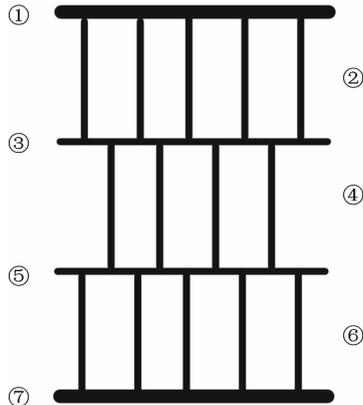


图 4 多层蜂窝吸波结构示意图  
Fig. 4 Multi-layer honeycomb radar absorbing structure

蜂窝壁、蒙皮及过渡层材料介电常数设为  $5 - j0.3$ , 两侧蒙皮及过渡层的厚度均设为  $0.05 \text{ mm}$ , 骨架材料的宽度为  $0.2 \text{ mm}$ , 蜂窝单元尺寸为  $2 \text{ mm}$ , 对蜂窝孔的高度和其中填充的材料进行优化, 并且优化时仅仅针对  $\theta = 0^\circ$  的垂直入射情况进行迭代。

优化参数范围设为: 蜂孔高度  $d \in [0.05, 5]$ , 单位为  $\text{mm}$ , 相对介电常数实部  $\epsilon' \in [1, 15]$ , 损耗正切  $\tan\delta \in [0.01, 2]$ 。

优化所得②号蜂窝的高度为  $4.35 \text{ mm}$ , 填充材料介电常数为  $2.78 - j1.07$ , ④号蜂窝的高度为  $3.9 \text{ mm}$ , 填充材料介电常数为  $11.23 - j7.88$ , ⑥号蜂窝的高度为  $3.05 \text{ mm}$ , 填充材料介电常数为  $10.2 - j5.79$ , 覆盖蜂窝吸波结构前后金属平板的 RCS 如图 5 所示。

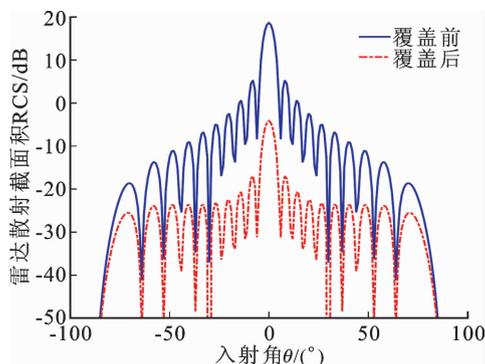


图5 RCS优化结果

Fig. 5 RCS optimization results

从图 5 可以看出, 金属平板的 RCS 整体有所下降, 在垂直入射方向, 即  $\theta = 0^\circ$  的方向上, RCS 缩减效果明显。随着入射角的增大, 对 RCS 缩减的效果逐渐减小, 但由于金属平板的 RCS 也随入射角度的增大而减小, 所以总体上在所计算的入射角范围内, 覆盖蜂窝吸波结构均可以得到良好的 RCS 缩减效果。

### 3 结论

本文采用包含色散特性的闭式表达式计算了正方形单元蜂窝吸波结构的等效电磁参数, 进而将蜂窝吸波结构等效为均匀的平板结构, 再结合高频算法计算并优化了覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标 RCS。与全波分析的方法相比, 采用等效电磁参数结合高频算法的计算思路, 可以在确保一定 RCS 计算精度的情况下降低建模的复杂度和计算的资源消耗, 从而进一步提高覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标 RCS 优化效率。

### 参考文献:

- [1] ZHOU P H, HUANG L R, XIE J L, et al. Prediction of microwave absorption behavior of grading honeycomb composites based on effective permittivity formulas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(8): 3496-3501.
- [2] 聂在平, 胡俊, 阙肖峰, 等. 面向工程应用能力提升的电磁散射高效数值分析: 进展与挑战[J]. 电波科学学报, 2014, 29(1): 1-11.  
NIE Zaiping, HU Jun, QUE Xiaofeng, et al. Application capability promotion oriented efficient numerical analysis of EM scattering: progresses and challenges [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(1): 1-11.
- [3] TRINH-XUAN D, BRADLEY P, BRENNAN C. Fast fourier transform based iterative method for electromagnetic scattering from 1D flat surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(11): 5464-5467.
- [4] WANG X, GONG S X, MA J, et al. Efficient analysis of antennas mounted on large-scale complex platforms using hybrid AIM-PO technique [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(3): 1517-1523.
- [5] MA J, GONG S X, WANG X, et al. Efficient wide-band analysis of antennas around a conducting platform using MoM-PO hybrid method and asymptotic waveform evaluation technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(12): 6048-6052.
- [6] QUIEVY N, BOLLEN P, THOMASSIN J M, et al. Electromagnetic absorption properties of carbon nanotube nanocomposite foam filling honeycomb waveguide structures [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic and Compatibility, 2012, 54(1): 43-51.
- [7] JOHANSSON M, HOLLOWAY C L, KUESTER E F. Effective electromagnetic properties of honeycomb composites, and hollow-pyramidal and alternating-wedge absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(2): 728-736.
- [8] 赵雨辰, 万国宾. 基于强扰动理论的蜂窝结构等效电磁模型研究[J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 321-326.  
ZHAO Yuchen, WAN Guobin. Equivalent electromagnetic model for honeycomb structure based on strong fluctuation theory[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(2): 321-326.