

# 金属平板基底涂覆介质层线形裂纹的 RCS 特性

许占显, 孔立堵

(空军第一航空学院, 河南 信阳 464000)

**摘要:** 采用基于有限元法(FEM)的 Ansoft HFSS 软件, 计算、分析了金属平板基底吸波介质层出现线形裂纹时的高频电磁特性。厚度为 2 mm, 直径为 100 mm 的理想导体圆盘; 表面涂层为 2 mm 厚的介质, 其介电系数  $\epsilon_r = 12.53$ , 电损耗为 0.023, 导磁率  $\mu_r = 1.83$ , 磁损耗为 0.6。裂纹缺陷长 30 mm、宽 0.2 mm、深 2 mm。分无裂纹缺陷和线形裂纹在涂层介质中部 2 种情况, 计算与分析得出结论, 线形裂纹缺陷对舰船、飞行器隐身性能的影响并不明显, 也没有一定的规律, 但对观测方向的敏感性较强。

**关键词:** 隐身; 线形裂纹; 雷达散射截面

**中图分类号:** TN011; TM25; TM15; TB34; TM27      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-7649(2010)03-0086-03      **DOI:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2010.03.019

## Characteristic of RCS about coating medium with line crack base on a metal plate

XU Zhan-xian, KONG Li-du

(First Aviation Institute of the Air Force, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** High electromagnetic characteristics of the coating absorbing wave medium with line crack base on a metal plate are calculated and analysed using ansoft HFSS which is on finity element method in this paper. The perfect conductor plate with coating medium thickness 2 mm and diameter 100 mm, which relative permittivity  $\epsilon_r = 12.53$ , relative permeability  $\mu_r = 1.83$ , dielectric loss tangent 0.023, and magnetic loss tangent 0.6. Line crack is with 30 mm length, 0.2 mm width and 2 mm depth. The conclusions are got with two kinds crack inside coating middle part or no crack that infection is not obviously for warship or aircraft stealth performance, and no decided rule, but sensitivity for direction.

**Key words:** stealth; line crack; radar scatter cross section

## 0 引言

隐身性能是现代军舰和第四代战斗机必须具有的性能之一。为了实现隐身性能, 除了军舰和飞机外形设计、结构设计与总体布局等一系列降低可探测性的措施外, 还使用吸波涂层, 采用吸波材料是雷达隐身技术的一项重要措施<sup>[1]</sup>。军舰舰体、飞机表面隐身材料涂层的表面完好程度要求比一般防护涂层高, 其厚度达 2 mm 左右, 韧性较差容易导致裂纹掉块, 阳光照射下会起气泡, 雨水能进一步加重影响造成裂纹掉块。例如, B-2A 飞机的整个机体都喷涂有特制的吸波涂料, 这在很大程度上降低了敌方探测雷达

的回波; 2002 年 8 月, 美国空军发现部分 B-2A 飞机尾部的蒙皮由于受到高温高压的侵蚀, 隐身涂层出现了大量头发丝粗细的裂纹, 裂纹约长 25~50 mm, 看起来像一排排的纽扣锁眼。文献[2-3]指出, 飞机蒙皮表面的电磁缺陷(如缝隙、螺钉、铆钉等)将对目标的后向雷达散射截面(RCS)产生很大的影响, 在进行低 RCS 飞行器设计和进行 RCS 减缩时, 这是一个不能忽视的因素; 并且, 用雷达吸波材料对飞行器表面电磁缺陷进行修复时, 材料的涂敷厚度和宽度取决于电磁缺陷的严重程度。所以, 隐身涂层出现裂纹不会严重危及飞行安全, 但裂纹的发展将导致涂层脱落, 从而影响军舰、飞机的隐身性能, 这是真正问题所

收稿日期: 2009-10-17; 修回日期: 2009-11-03

作者简介: 许占显(1964-), 男, 博士, 教授, 从事无损检测与电磁隐身研究。

在,在新一代军舰、飞机的维修方面应该给予足够的重视。

### 1 雷达散射截面

雷达探测目标的能力是由目标在雷达波照射下,在雷达接收天线方向上产生的电磁散射信号强度即雷达散射截面积决定的。所以,降低目标的 RCS 值是反雷达探测隐身技术的主要途径。目前已广泛运用的技术有:一是隐身外形技术,就是改进目标的外形设计,即利用计算机辅助设计等现代设计手段,在一定约束条件下对装备及其外形进行优化设计,在保持一定性能的前提下,使其被探测的雷达截面积最小。二是隐身材料技术,主要是指采用能吸收或透过雷达波的介质或复合介质,达到预期隐身的目的。

雷达散射截面<sup>[4]</sup>为:

$$\sigma = 4\pi \frac{P_r / 4\pi}{P_i / 4\pi L^2}, \quad (1)$$

$$\sigma = 4\pi L^2 \frac{P_r}{P_i}. \quad (2)$$

式中: $L$  为入射距离; $P_i$  为目标所在处入射波功率; $P_r$  为背向散射功率。

假定入射波为平面波,且目标为点散射体,则:

$$\sigma = 4\pi \lim_{L \rightarrow \infty} L^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} = 4\pi \lim_{L \rightarrow \infty} L^2 \frac{|H^s|^2}{|H^i|^2}, \text{ m}^2 \quad (3)$$

对数形式:

$$\sigma_{\text{dBsm}} = 10 \lg \sigma, \text{ dBsm}. \quad (4)$$

式中: $L$  为入射距离; $E^i, E^s$  分别为入射电场强度和目标散射波在雷达处的电场强度; $H^i, H^s$  分别为入射磁场强度和目标散射波在雷达处的磁场强度。

探测物体的 RCS 与其外形、材料、缺陷、雷达波入射角等因素有关,从电磁场理论角度看,对电磁波隐身问题的研究其实是复杂目标的电磁散射理论问题<sup>[4]</sup>。

### 2 金属平板基底吸波介质层的 RCS 电磁计算模型

雷达散射截面电磁模型为厚度 2 mm、直径 100 mm 的理想导体圆盘。表面涂层为 2 mm 厚的介质,介电系数  $\epsilon_r = 12.53$ , 电损耗为 0.023, 导磁率  $\mu_r = 1.83$ , 磁损耗为 0.6。裂纹缺陷为长 30 mm、宽 0.2 mm、深 2 mm。采用辐射边界条件,沿 Z 轴负方向平面波照射,入射波 1 个单位场强。如图 1 所示。

### 3 计算与分析

本文计算采用基于有限元法(FEM)的 Ansoft HFSS 软件。该软件广泛应用于射频、无线通信、封装与光电子设计,是商业界公认的三维电磁场标准仿真软件包。它充分利用如自动匹配网格产生及加密、切线向矢量有限元、ALPS(Adaptive Lanczos Pade Sweep)和模式-节点转换(Mode-node)等先进技术,提供简洁直观的用户设计界面、精确自适应的场求解器,并拥有空前电性能分析能力的功能强大的后处理器,能计算任意形状三维无源结构的 S 参数和全波电磁场。

本文分无裂纹缺陷和线形裂纹在涂层介质中部 2 种情况,分别计算与分析。解算频率选为 5 GHz,自适应网格步数为 10,每步收敛标准为 0.01。在 45 ~ 65 GHz 带宽内离散扫频。垂直入射角  $\theta = 0$ (与 Z 轴夹角),且  $\Phi = 0$ (与 y 轴夹角)时,2 种情形下,双站电磁雷达散射截面随频率的变化如图 2 所示。

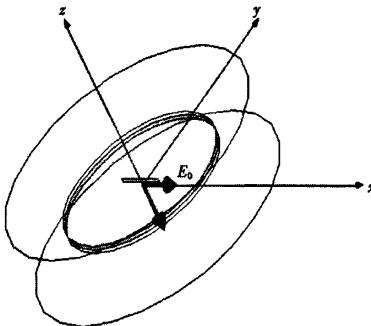


图 1 RCS 电磁计算模型

Fig. 1 RCS electromagnetic calculation model

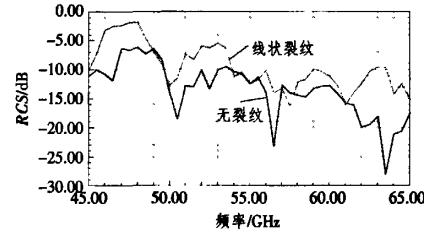


图 2 线形裂纹的雷达散射截面随频率的变化

Fig. 2 Linear crack RCS with frequency

由计算得知,线形裂纹对涂覆吸波材料的性能有所影响,并且涂层出现裂纹时,不同的频段影响的趋势也不相同。在 49 GHz 和 57.5 GHz 附近,线形裂纹的出现使得材料的吸波特性有所变好;而对于其他频

带范围内,使得材料的吸波特性变差,频带宽不足1.5 GHz,约占总带宽的7.5%。在63.5 GHz附近对吸波特性影响最大,RCS差别约为18 dB。在63.5 GHz时,其雷达散射截面随 $\theta$ 的变化如图3所示,并且观测方向性敏感,角度范围小。

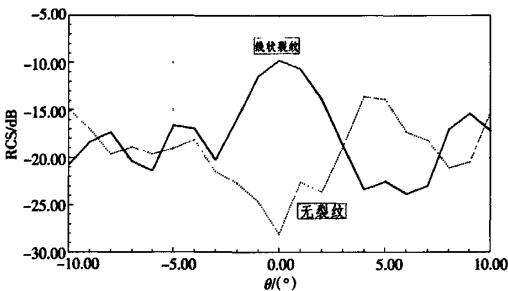


图3 线形裂纹的雷达散射截面随 $\theta$ 的变化

Fig. 3 Linear crack RCS changes with  $\theta$

#### 4 结语

隐身材料在新一代军舰、飞行器上的使用将给维

修带来新的课题。由本文模拟RCS计算、仿真说明:线形裂纹缺陷对军舰、飞行器隐身性能的影响并不明显,也没有确定的规律,并且对观测方向的敏感性较强。因此,要实现和保持良好的军舰、飞行器隐身性能,更要综合考虑裂纹的产生、隐身涂层电磁参数的变化和涂层的脱落等问题<sup>[5]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] Cummer S A, Popa B I, et al. Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures [J]. Physical Review E, 2006, 74(3):036621-1-5.
- [2] 桑建华,周海. 飞行器表面电磁缺陷及雷达吸波材料应用[J]. 航空材料学报,2003,23(2):51-55.
- [3] 杨河林,温定娥,王海婴. 导体平板上铆钉的电磁散射分析[J]. 微波学报,2005,21(5):14-17.
- [4] 克拉特 E F. 雷达散射截面——预估、测量和减缩[M]. 阮颖铮,陈海,译. 北京:电子工业出版社,1988.
- [5] 许占显,贾宝富,林为干. 铁氧体衬底-手征性材料隐身波特性研究[J]. 材料导报,2007,21(1):129-132.
- [6] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京:中国民主出版社,1990.
- [7] JOHNSON A P. High speed linear induction motor efficiency optimization [D]. Massachusetts: Department of Ocean Engineering and Department of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, 2005.
- [8] SWETT D W, BLANCHE IV J G. Flywheel charging module for energy storage used in electromagnetic aircraft launch system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1):525-528.
- [9] 罗宏浩,吴峻,常文森. 新型电磁弹射器的动态性能仿真[J]. 系统仿真学报,2006,18(8):2285-2288.
- [10] ONG T S, YOUNG R C, CHEN C H, et al. Design and simulation of a permanent-magnet electromagnetic aircraft launcher [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(2):566-575.
- [11] 赵宏涛,吴峻. 利用超级电容供电的电磁弹射器研究[J]. 微特电机,2009,37(2):1-3.
- [12] POKRYVAILO A, KANTER M, et al. Design and testing of a 5 MW battery-based inductive power supply [J]. IEEE Transactions on Plasma science, 1998, 26 (5): 1444-1453.

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

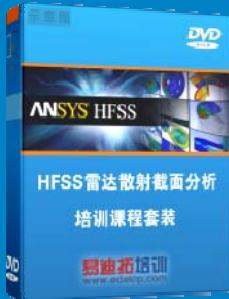
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

---

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

---

### ● 更多培训课程：

#### ● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

#### ● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

#### ● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>