

基于 HFSS 对目标 RCS 的仿真研究

韩红斌 刘少强

(91336 部队 秦皇岛 066326)

摘要: 雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 是末制导雷达半实物仿真试验中的重要参数, 而敌方目标的 RCS 数据难以通过外场测量手段获取。利用电磁仿真软件仿真计算成为获取雷达目标电磁散射特性的有效途径。利用 HFSS 仿真计算了金属球的 RCS, 仿真结果与理论值很好的匹配, 得到 HFSS 仿真计算目标 RCS 具有很好的精度。HFSS 仿真计算 5 m^2 标准体的 RCS 与暗室实测的结果仅差 0.68 dB, 进一步验证了 HFSS 仿真计算目标 RCS 的可靠性和有效性, 研究成果可为精确仿真雷达回波提供依据。

关键词: HFSS; RCS; 几何建模; 仿真计算

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Research on the simulation of the target RCS based on HFSS

Han Hongbin Liu Shaoqiang

(91336 PLA, Qinhuangdao 066326, China)

Abstract: RCS are important parameters of the terminal guidance radar semi-entity simulation test, and it is hard to get the enemy target's RCS data by field measurements. Using the electromagnetic simulation software simulation has become an effective way to obtain radar target electromagnetic scattering characteristics. In this paper, calculate the RCS of metal ball by HFSS, the simulation results with the theoretical value matches well, HFSS simulation target RCS have good precision. The difference is only 0.68 dB that the 5 m^2 standard body RCS by HFSS simulation compared with a darkroom measured to further verification the reliability and the effectiveness of HFSS simulation of the target RCS, research results can provide the basis for accurate simulation radar echo.

Keywords: HFSS; RCS; geometry modeling; simulation calculation

1 引言

空间目标的雷达特征信号是雷达识别空间目标的最重要特征^[1]。目标雷达散射截面 (RCS) 是雷达目标特性中最基本最重要的一个参数。获取目标的 RCS, 不仅可以取得对目标基本散射现象的了解, 而且可以建立目标特性数据库^[2]。目标 RCS 的获取通常有 3 种方法: 外场实测、紧缩场测量和建模仿真^[3-5]。

对大型或超大型目标进行 RCS 测量所需要的场地太大, 需要数百公里甚至数千公里, 且平台复杂。由于范围太大, 容易受杂波的影响, 即使有满足需求的测试场地, 测量误差也必须考虑, 测量精度无法保证。而缩比测量时雷达的工作频率需按相应的比例进行增高, 若要对超大型目

标进行缩比测量, 则需要很高频率的测量雷达。由于场地要求和成本高, 特别是获取非合作目标特性的难度大^[6], 通过对目标进行建模并用电磁仿真软件对其 RCS 进行仿真计算是一种经济、有效的手段。

利用 HFSS 仿真计算了金属球的 RCS, 通过与理论结果对比验证了 HFSS 仿真计算目标 RCS 具有很好的精度。仿真计算了 5 m^2 标准体的 RCS, 并与暗室实测的结果进行对比, 进一步验证了 HFSS 仿真计算目标 RCS 的可靠性和有效性。对于大型目标, 可以用 HFSS 中的物理光学法对其 RCS 进行预估^[7]。

2 基本原理

HFSS 电磁仿真软件仿真计算目标 RCS 时, 首先对目

收稿日期: 2014-11

标进行几何建模,并对目标的材料属性和激励条件进行设置,然后对目标的几何模型进行网格剖分,并利用相应的电磁计算方法对目标的 RCS 进行近似求解。具体过程如图 1 所示。

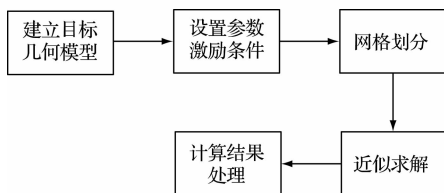


图 1 HFSS 建模计算

2.1 几何建模

几何建模是 HFSS 电磁仿真软件进行仿真设计的第一步,是电磁建模的基础,要求能精确的模拟目标的外形。HFSS 提供了多种基本模型,包括线、面、体等模型,各种复杂的物体模型都可以通过对这些基本模型进行几何变换操作和布尔操作而生成。创建一个物体的三维几何模型的具体步骤如图 2 所示。

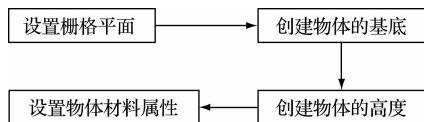


图 2 创建三维物体模型步骤

若模型太复杂无法用基本模型进行组建时,可以采用 MATLAB 与脚本语言相结合对物体模型进行建模,此时也可以用优化算法对模型进行一定的优化。

2.2 网格剖分

在对目标进行离散化时, HFSS 电磁仿真软件首先对目标的表面进行近似设置生成初始网格,如果要对目标进行比较精确的剖分,可以选择基于波长的网格剖分,此时 HFSS 电磁仿真软件将以与材料相关的波长为基础对初始网格进行细化。然后 HFSS 电磁仿真软件根据设置的误差标准,采用自适应网格剖分技术,自动生成精确、有效的网格,完成对目标的离散化。

自适应网格剖分的原理是:在目标内部搜索误差最大的区域,根据设置的百分比对该区域进行网格细化。细化完成后重新计算并搜索误差最大的区域,然后判断该区域的误差是否满足收敛条件。如果满足,则不再细化,网格剖分完成;如果不满足,则将继续对网格进行细化,直到满足收敛条件或达到设置的最大迭代次数为止。

2.3 目标特征信号建模

RCS 一般用符号 σ 表示,表达式为^[8-9]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

式中: R 为接收天线和目标的距离; E_s 为入射波场强; E_i 为接收点的散射波场强。RCS 可以直观地理解为接收机处的散射功率密度与目标处的入射功率密度之比。

σ 的单位是 m^2 , 目标物体 RCS 的变化具有很大的动态范围,所以常也以对数形式表示,相当于 1 m^2 的分贝数^[10](记为 dBsm):

$$\sigma_{\text{dBsm}} = 10 \lg \sigma \quad (2)$$

面元的 RCS 的平方根公式为:

$$\sqrt{\sigma_{po}} = -\frac{\hat{n} \cdot (\hat{e} \times \hat{h}_i)}{\sqrt{\pi} T} \exp(jkr_0 W) \sum_{m=1}^M (\hat{p} \cdot a_m) \cdot \exp(jkr_m \cdot W) \frac{\sin(ka_m \cdot W/2)}{ka_m \cdot W/2} \quad (3)$$

式中: r_0 是面元局部坐标系原点在坐标系中的位置矢量; a_m 是面元第 m 个边缘的长度和方向矢量; r_m 是第 m 个边缘中点的位置矢量; $W = \hat{i} - \hat{s}$, $\hat{i}$ 为入射方向单位矢量, $\hat{s}$ 为散射方向单位矢量; T 是 W 在面元上的投影长度; $\hat{p} = \hat{n} \times W / |\hat{n} \times W|$ 是面元上垂直于 W 的单位矢量; M 是平板边缘的数目,取 3 时即为三角形面元。

劈的 RCS 平方根公式为:

$$\sqrt{\sigma_{gd}} = \frac{L}{\sqrt{\pi}} \frac{(e_t)(e_t)f + (h_t)(h_t)g}{\sin^2 \beta} \frac{\sin(kL \cos \beta)}{kL \cos \beta} e^{jkW_r} \quad (4)$$

式中: e, h 分别是电场、磁场的极化单位矢量,下标 i 和 s 表示入射场、散射场, r_c 是尖劈边缘到全局坐标系原点的长度, $\beta = \arccos(i \cdot t)$, f 和 g 是物理绕射系数。

假定在计算复杂目标的 RCS 时,该目标被分为 M 块面元和 N 个尖劈,则该复杂目标的 RCS 平方根为:

$$\sqrt{\sigma} = \sum_{m=0}^M (\sqrt{\sigma_{po}})_m + \sum_{n=0}^N (\sqrt{\sigma_{gd}})_n \quad (5)$$

3 金属球单站 RCS 仿真

图 3 为半径 10 cm 的理想导体金属球的扫频单站 RCS 的仿真计算结果,扫频范围为 0.04~2.54 GHz,网格剖分选择的频点为 2.54 GHz。激励为平面波激励,入射方向为 Z 轴正方向,电场方向为 X 轴正方向。为便于结果的比较分析,对球体单站 RCS 计算结果用几何截面积 πa^2 进行了归一化,计算结果如图 3 所示,通过与经典理论的计算结果,如图 4 所示,相比较, HFSS 对目标的 RCS 计算具有良好的精度。

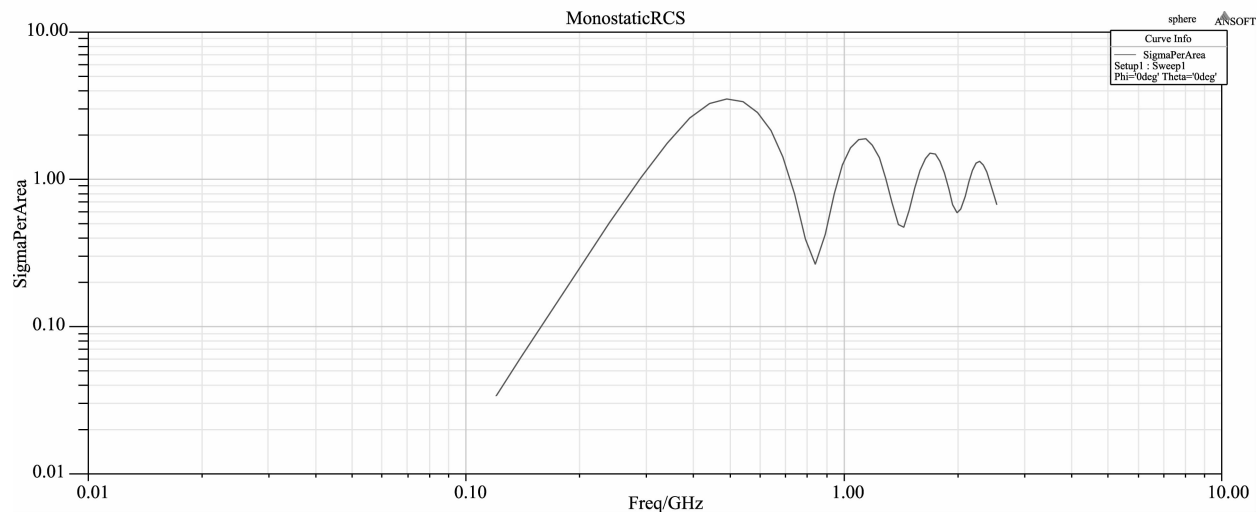


图3 扫频单站 RCS 归一化计算结果

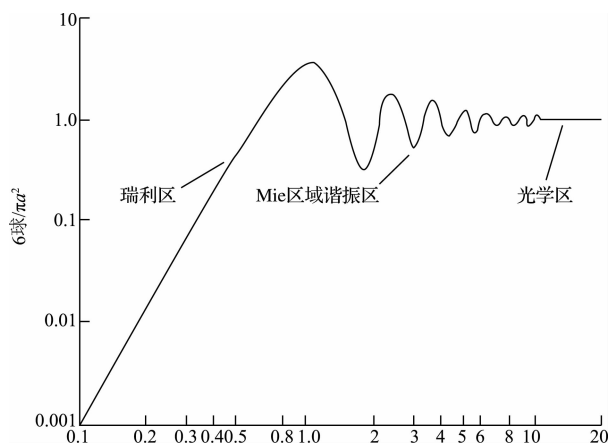


图4 经典理论的归一化分析结果

图5为该金属球在5 GHz频点的入射波照射下空间全方位的单站 RCS 计算结果,电场方向为 phi 正方向。金属球的 RCS 的理论计算公式为 $\sigma = \pi a^2$,经计算此金属球的 RCS 理论值为 -15.028 5 dBsm,由 HFSS 仿真计算的此金属球的 RCS 的平均值为 -15.105 4 dBsm,仿真计算结果平均值与理论计算结果差 0.076 9 dBsm。

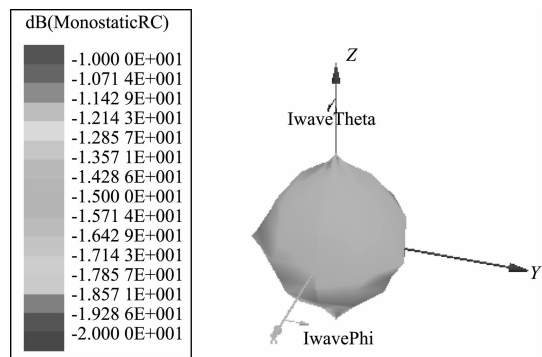


图5 全空间单站 RCS 的计算结果

4 标准体 RCS 仿真与实测数据对比

图6为5 m²标准体的三维几何实体模型,该模型边

长为448 mm,倒角边长为53.5 mm,金属板厚度为1 mm,网格剖分选择的频点为9.41 GHz。

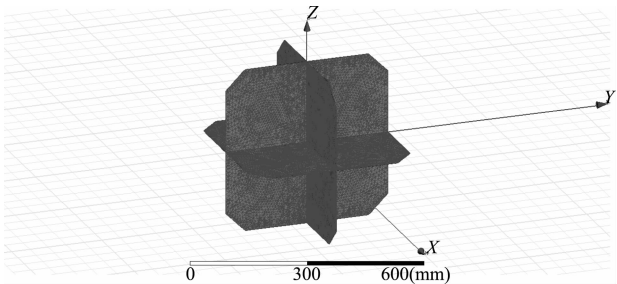


图6 标准体三维几何实体模型

图7为该标准体在9.41 GHz频点的入射波照射下,不同方位(theta=90°,phi=0°—360°,间隔为1°)的单站 RCS 计算结果,电场方向为 phi 正方向。

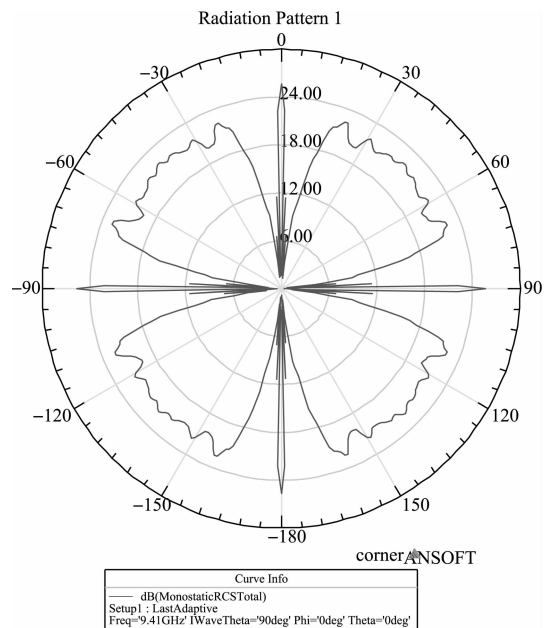
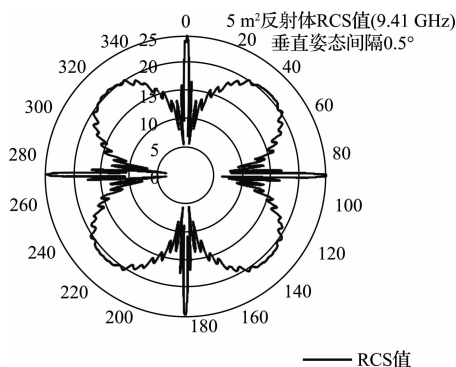


图7 标准体单站 RCS 仿真结果

RCS 具有很好的精度。HFSS 仿真计算 5m^2 标准体的 RCS 与暗室实测的结果仅差 0.68 dB , 进一步验证了 HFSS 仿真计算目标 RCS 的可靠性和有效性。若将计算机组网并行计算技术引入仿真计算, 并结合多种计算方法, 还可以更快更精确的超大型复杂目标(例如飞机、舰船等)的电磁散射特性。



参考文献

- [1] 计科峰,王世晔.空间目标宽带雷达特征信号仿真建模[J].现代雷达,2007,29(3):32-36.
- [2] 刘密歌,张麟兮,李南京.基于矢量网络分析仪的 RCS 测量系统及应用[J].电子测量与仪器学报,2007,21(1):82-85.
- [3] 贾建科.标准目标电磁散射特性研究[J].国外电子测量技术,2011,30(2):17-19.
- [4] 王俊鸣,张智军.雷达目标电磁散射特性的仿真研究[J].航天控制,2007,25(5):74-78.
- [5] 李南京,党娇娇,胡楚锋.标准球定位获取复杂目标散射点位置信息技术[J].国外电子测量技术,2014,33(9):31-33.
- [6] 庄亚强,张晨新,张小宽,等.典型隐身飞机动态 RCS 仿真及统计分析[J].微波学报,2014,30(5):17-21.
- [7] 陈博韬,雷振亚,谢拥军.HFSS/PO 混合分析飞行器放电对雷达目标特性的影响[J].系统工程与电子技术,2010,9(32):1880-1883.
- [8] 张万军,牛敏杰,吴晓颖.基于 HFSS 的装甲步战车电磁散射特性研究[J].计算机仿真,2014,31(3):34-37.
- [9] 林新越,洪峻,明峰.高分辨率 SAR 参考点目标频带调制效应的校正方法[J].国外电子测量技术,2010,29(4):32-36.
- [10] 周星里,谢亚楠,杨正得.对任意形状雨滴电磁散射特性的研究[J].电子测量技术,2010,33(4):49-51.

作者简介

E-mail: hanhongbin1986@163.com