

文章编号: 1002-0640(2008)12-0095-03

## 含腔体导弹雷达截面高频计算建模

叶波峰, 李 侠, 戴海树, 胡国庭

(中国人民解放军 95112 部队, 广东 佛山 528226)

**摘 要:** 在建立了简化含腔体导弹外形模型的基础上, 运用曲面像素法、数值积分法、等效电磁流法等多种高频 RCS 分析方法, 采用目标部件分解法计算导弹各散射源的 RCS, 根据目标各部分散射场间的相对相位关系, 计算出导弹整体 RCS, 这种理论建模方法简单, 物理概念清晰, 计算量不大, 其计算精度虽不如数值计算法、矩量法、时域差分法等精确算法, 但结果可为工程设计和导弹探测技术研究提供部分理论依据。

**关键词:** 腔体, 导弹, RCS, 高频建模

**中图分类号:** TJ7

**文献标识码:** A

## Modeling on High Frequency Calculation of the Cavity Missile's RCS

YE Bo-feng, LI Xia, DAI Hai-shu, HU Guo-ting

(Unit 95112 of PLA, Foshan 528226, China)

**Abstract:** Based on the simplified mode of the cavity missile, according to the analytic process the RCS of each scattering source were calculated by surface pixels method, the numerical integration and method of equivalent current. The final RCS of the whole missile was calculated by the relative phase relation of each part scattering field. The modeling and calculation method is simple and the physical concept is concrete. Although the calculation accuracy is not as good as the calculation accuracy of the numerical calculation, moment method and the time domain difference method. The result can be used as the theoretic reference of the engineering design and the missile detection technology.

**Key words:** cavity body, missile, RCS, high frequency modeling

### 引 言

确定一个目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, 缩写 RCS), 通常有两类方法: 一是通过实际测量获得目标的 RCS; 二是由电磁散射数值计算获得。尽管实际测量的结果较为精确, 但由于目标 RCS 测试受到环境、电波极化方式、目标姿态等因素的影响, 测量成本高、周期长、误差难以控制。利用目标的几何特性建模进行 RCS 数值分析的方法相对来说变得方便、高效。

当照射源为常规雷达时, 根据目标的高频散射特性, 在高频区, 散射变成局部效应, 各散射单元间

的相互作用明显降低, 各部分独立散射能量, 其感应场只取决于入射波, 而与其他部分散射能量无关。根据高频区的散射特点, 可将目标分解为若干相互独立的散射源, 分别应用高频 RCS 分析法即可保证较高的计算效率和分析精度。不同的高频分析方法都是突出某一个散射机理同时又忽略其他散射因素, 因此在进行导弹 RCS 分析时的基本思路为: 根据目标各种散射机理及相应散射源几何特征, 分别采用相应的高频方法计算散射场, 并适当应用数值方法和工程修正方法叠加各散射源的散射场后得到总散射场, 计算出导弹整体 RCS。

### 1 导弹结构分析

真实导弹的外形曲线不一定能满足常规函数, 而且弹体上存在棱角、倒角等机构, 这会给 RCS 计算增加很大复杂性。为简化数学模型, 保证仿真有效

收稿日期: 2007-11-10

修回日期: 2007-12-07

作者简介: 叶波峰(1972- ), 男, 湖北洪湖人, 硕士, 主要从事雷达装备作战运用研究。

性,在建立弹体模型时采取必要的简化,对图 1 所示几何结构的导弹模型,高频散射主要来源于 3 个方面<sup>[1,2]</sup>,即①镜面反射(如弹头、弹体、弹翼);②表面不连续性的散射(如边缘);③凹形区域的散射(如进气道)。

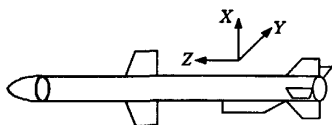


图 1 导弹简化模型

## 2 RCS 计算建模

### 2.1 表面 RCS 计算

导弹表面的截面散射分析,用“曲面像素法<sup>[3]</sup>”计算比较合适。它基本上克服了复杂曲面体目标用多面体近似拟合所造成的误差问题,同时具有部件遮挡严格消隐、不受网格划分稀密限制等特点,计算简便。

由麦克斯韦方程组及矢量格林定律可推导出电磁场积分方程:

$$\begin{cases} E^s = \int_S [j\omega\mu(\hat{n} \times H)\psi + (\hat{n} \times E) \nabla\psi + (\hat{n} \cdot E) \nabla\psi] dS \\ H^s = - \int_S [j\omega\mu(\hat{n} \times E)\psi + (\hat{n} \times H) \times \nabla\psi - (\hat{n} \cdot H) \nabla\psi] dS \end{cases} \quad (1)$$

式(1)就是 Stratton-Chu 公式。式中,  $E, H$  分别为总电场和总磁场(包括入射场和散射场),  $\hat{n}$  为表面元  $ds$  的单位外法矢量,  $S$  为散射体表面,  $\psi = \exp(jkR)/4\pi R$  为自由空间的格林函数,  $R$  是从源点到观察点的距离。

根据物理光学方法使用高频条件、远场近似及切平面近似假设,可将 Stratton-Chu 公式简化为:

$$\begin{cases} E^s(P) = \frac{j\omega\mu e^{jk_0 R}}{2\pi R} \int_{S_1} [(\hat{n} \times H^i) - \hat{s} \times (\hat{n} \times H^i) \hat{s}] e^{-jk_0 \hat{s} \cdot r'} ds' \\ H^s(P) = \frac{-jk_0 e^{-jk_0 R}}{2\pi R} \int_{S_1} (\hat{n} \times H^i) \times \hat{s} e^{-jk_0 \hat{s} \cdot r'} ds' \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $k_0$  是入射波波数,  $H^i$  是入射磁场强度。

根据雷达截面散射的定义  $\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H^s|^2}{|H^i|^2}$ , 对于像素法可推导<sup>[4]</sup>得:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{像素}} \text{sinc}(K_0 \frac{l}{\cos\theta} \sin\theta) e^{2jk_0 z} \right|^2 \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为雷达波波长,  $l$  为像素点对应的实际边长。

可见,只要知道目标消隐法矢结果,就可以利用上式计算像素面元的 RCS 值  $\sigma_1$ 。

### 2.2 进气道 RCS 计算

导弹涡喷发动机进气道(尾喷管)在正面方向可产生很大的 RCS 贡献,可以用具有加载终端的开口波导腔来模拟,利用几何光学(GO)射线法结合口径(AI)积分法<sup>[2]</sup>来分析。

为简化分析,假定进气道内壁和终端表面为理想导体,在开口处具有尖锐的边缘,外壁散射忽略不计,则整个进气道的电磁散射可以表示为

$$E^s = E^r + E^d \quad (4)$$

式中,  $E^r$  表示从开口处散射回入射方向的反射场;  $E^d$  表示开口边缘的绕射场,利用等效电磁流法(MEC)即可得:

$$E^d = \frac{jkZ_0 \exp(-jkr)}{4\pi r} \int_C \hat{r} \times \hat{r} \times I_c(t') \hat{t}' + Y_0 \hat{r} \times M_c(t') \hat{t}' \exp(jk\hat{r} \cdot r') dt' \quad (5)$$

式中,积分路径  $C$  为口径边缘曲线,  $t'$  为其上切向单位矢量;  $r$  和  $r'$  表示从坐标原点分别到远区观察点和边缘等效电磁流源点的位置矢量;  $Z_0$  和  $Y_0$  分别为自由空间的波阻抗和波导纳。

根据口径面上的离散场分布进行等效惠更斯源的辐射积分,能获得空腔远区散射场的连续分布,即

$$E^r = \frac{jkZ_0 \exp(-jkr)}{4\pi r} \sum_{p=1}^P \left\{ \iint_{\Delta S_p} [\hat{r} \times \hat{r} \times dI_p(r') + Y_0 \hat{r} \times dM_p(r')] \exp(jk\hat{r} \cdot r') ds' \right\} \quad (6)$$

式中,  $\Delta S_p$  为第  $p$  条射线管返回口径时的横截面在口径上的投影面积;等效惠更斯源的电流矩  $dI_p$  和磁流矩  $dM_p$  可有返回射线管在口径面上的场给出:

$$\begin{cases} dI_p(r') = [-\hat{n} \times H_p(r')] \Delta S_p \\ dM_p(r') = [-E_p(r') \times \hat{n}] \Delta S_p \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\hat{n}$  为口径面上向内的单位法向矢量。

将式(5)和式(6)代入式(4)便可求得开口腔的总散射场,并进而求得 RCS 值  $\sigma_2$ 。

### 2.3 边缘绕射 RCS 计算

导弹的尾部往往有圆形边缘,有些导弹的中部也存在一阶导数不连续或者介质不连续的边缘,对这样圆形的边缘 Stratton-Chu 积分无法给出函数解,因此必须采用数值积分方法。

将圆形曲边缘离散化为  $N$  个直边缘段,设  $l_v$  为第  $v$  个边缘段长度,  $e_i, e_s, e_n, e_H$  分别为入射方向、散射方向、目标表面外法向和入射磁场方向的单位矢量,  $\theta_v = \arccos(e_n \cdot e_i)$ , 有<sup>[5]</sup>:

$$\sqrt{\sigma_3} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{v=1}^N \left\{ \frac{l_v}{\sin\theta_v} [(e_i \cdot e_n) f_{e_i} \times (e_i \times e_n) - \right.$$

$$(e_{H_i} \cdot e_m) g e_i \times e_n] \cdot e_r \cdot e^{-j2kr_0 \cdot e_i} \frac{\sin(kl_0 \cdot e_i)}{kl_0 \cdot e_i} \quad (8)$$

物理绕射理论(PTD)的绕射系数用下式计算可得:

$$f = \begin{cases} (X-Y)+Y_1 & 0 \leq \Psi_i \leq \alpha - \pi \\ (X-Y)+Y_1+Y_2 & \alpha - \pi \leq \Psi_i \leq \pi \\ (X-Y)+Y_2 & \pi \leq \Psi_i \leq \alpha \end{cases}$$

$$g = \begin{cases} (X+Y)-Y_1 & 0 \leq \Psi_i \leq \alpha - \pi \\ (X+Y)-Y_1-Y_2 & \alpha - \pi \leq \Psi_i \leq \pi \\ (X+Y)-Y_2 & \pi \leq \Psi_i \leq \alpha \end{cases}$$

$$Y_1 = -\frac{1}{2} \tan \Psi_i \quad Y_2 = -\frac{1}{2} \tan(\alpha - \Psi_i)$$

对于前后沿边缘绕射,可使用等效电磁流法(MEC)求解。

由远场电磁积分公式可得边缘的后向绕射场为:

$$E_d = -jk\psi_0 \int_l [Z_0 I_e \times (e_i \times e_t) + I_m e_i \times e_t] \frac{1}{\sin^2 \beta} \exp(-jkr \cdot e_i) dz \quad (9)$$

式中  $\psi_0$  为远场格林函数,  $Z_0$  为自由空间波阻抗,  $I_e$  为边缘的等效电流,  $I_m$  为等效磁流,  $e_t$  为边缘的单位切线矢量。

取一个局部坐标  $r = r'_0 + ze_i$ , 则有

$$E_d = \frac{2\psi_0 l}{\sin^2 \beta} [(E_{i0} \cdot e_i) f e_i \times (e_i \times e_t) - Z_0 (H_{i0} \cdot e_i) g e_i \times e_t] \exp(-j2kr_0 \cdot e_i) \frac{\sin(kl \cdot e_i)}{kl \cdot e_i} \quad (10)$$

将上式代入 RCS 定义式可得:

$$\sqrt{\sigma_4} = \frac{1}{\sqrt{\pi \sin^2 \beta}} [(e_i \cdot e_i) f e_i \times (e_i \times e_t) - (e_{H_i} \cdot e_i) g e_i \times e_t] \cdot e_r \cdot \exp(-j2kr_0 \cdot e_i) \frac{\sin(kl \cdot e_i)}{kl \cdot e_i} \quad (11)$$

## 2.4 导弹整体 RCS 计算

为正确地表示各散射中心之间的干涉作用,导弹整体 RCS 可由相对相位求和法<sup>[2]</sup>给出相关叠加结果:

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^4 \sqrt{\sigma_n} \exp(j2kR_n) \right|^2 \quad (12)$$

式中,  $\sqrt{\sigma_n}$  表示散射中心的复数散射场,  $2R_n$  是从雷达到该散射中心的双程距离。

## 3 仿真计算

文献[6]运用计算和实验的方法得出了某导弹在两种极化方式下的 RCS 随方位角变化的曲线。为

了与文献[6]的结果进行比较,这里取相同参数来检验模型。假设导弹的长度为 99cm,弹体直径为 12.7cm,翼展为 63.5cm,雷达入射波长为  $\lambda = 2.5$ cm,则垂直极化时导弹水平面(俯仰角为  $0^\circ$ 、横滚角为  $0^\circ$ )的 RCS 曲线如图 2。通过比较,与文献[6]结果(图 3)十分相似,说明该计算模型是合理的。虽然这种高频计算方法是一种近似方法,精度不如矩量法、时域差分法等精确算法,但其计算对象的尺寸不受限制,且精度能满足一般分析的要求。

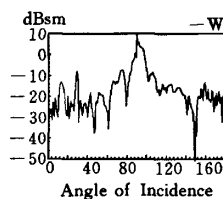


图 2 本文结果

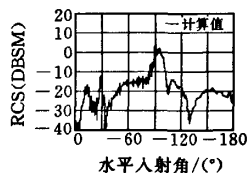


图 3 文献[6]结果

## 4 结论

求解雷达散射截面积可以通过求解经典电磁波理论进行计算,即从电磁波的波动方程出发,根据目标散射体的边值条件,求得散射场的严格级数解,而这种方法只适用于外表简单的目标。人们通过大量的实验和理论分析发现,在高频区目标的总散射场可以分解为某些局部位置上的散射场的合成,这可大大简化理论公式的计算。本文就是利用此思路,采用分解部件,计算各部分 RCS,应用相对相位求和法计算导弹整体 RCS 的方法,其计算方法可满足工程分析需要。

## 参考文献:

- [1] 赵卫华,邓发升,甄蜀春. 飞弹导弹雷达截面预估[J]. 雷达与对抗, 2001, 20(4): 1-4.
- [2] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [3] 昂海松,舒永泽,周建江,等. 复杂目标 RCS 计算的新方法——曲面像素法[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(10): 962-969.
- [4] Rius J M, Ferrando M, Jofre L. High-frequency RCS of Complex Radar Targets in Real Time[J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 1993, 41(9): 1308-1319.
- [5] 张云飞,武哲,陆柱慧. 导弹的 RCS 研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(3): 325-328.
- [6] Youssef N N. RCS of Complex Target [J]. Proceeding of the IEEE, 1989, 77(5): 722-734.

## 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/>