

文章编号:1008-5564(2009)04-0065-04

# 大型飞行器雷达目标特性数值 快速计算与测试技术研究

朱孝政<sup>1</sup>,袁军<sup>2</sup>

(1. 海军驻西安东郊航空设备军事代表室,陕西 西安 710043;  
2. 西安电子科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710071)

**摘要:**为分析大型涂层体隐身目标的 RCS 提出了一种快速单元级矢量有限元/自适应多层快速多极子算法,这种算法可实现大型复杂目标雷达散射截面的快速计算,同时提出了一种基于矢量网络分析仪测量目标雷达散射截面的测量系统方案和方法. 数值与实验结果说明了方法的有效性.

**关键词:**飞行器;雷达目标;测试

**中图分类号:**V271

**文献标识码:**A

## 0 引言

目标雷达散射截面(RCS)是表征目标对照射电磁波散射能力的一个物理量,它是雷达目标特性中最基本最重要的一个参数,可以通过测量和仿真计算(预估)获得.

目前,现实生活中的飞行器大致分为两种,常规飞行器和隐身飞行器. 常规飞行器大多由金属制成,随着隐身技术的不断发展,现实中越来越多的目标都会具有雷达隐身功能,因此研究各种常规飞行器、隐身飞行器的雷达目标特性具有十分重要的现实意义,本文将就飞行器雷达目标特性的分析与测试方法展开讨论.

## 1 飞行器 RCS 快速仿真算法

### 1.1 自适应多层快速多极子算法<sup>[1-4]</sup>.

仿真获得目标 RCS 数据的一项重要预估手段,对于常规目标,多层快速多极子法的混合算法比较有效. 对于复杂涂层体的散射问题,矢量有限元法与多层快速多极子法的混合算法比较有效. 首先介绍这两种算法.

多层快速多极子法的混合算法基于组合电磁场积分方程

$$\alpha \cdot \text{EFIE} + (1 - \alpha) \cdot \text{MFIE} \quad (0.2 \leq \alpha \leq 1) \quad (1)$$

EFIE 为电场积分方程, MFIE 为磁场积分方程, 具体表达式如下:

$$\text{EFIE: } \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = -jk_0 \eta \int_{S_e} \mathbf{J}(\mathbf{r}') \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' - \nabla \times \int_{S_e} \mathbf{M}(\mathbf{r}') \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (2)$$

$$\text{MFIE: } \mathbf{H}^s(\mathbf{r}) = -j \frac{k_0}{\eta} \int_{S_e} \mathbf{M}(\mathbf{r}') \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \nabla \times \int_{S_e} \mathbf{J}(\mathbf{r}') \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (3)$$

收稿日期:2009-05-15

作者简介:朱孝政(1964—),男,陕西礼泉人,海军驻西安东郊航空设备军事代表室高级工程师,硕士. 研究方向:机载设备的质量监督与控制.

$G(r, r')$  和  $\bar{G}(r, r')$  为三维自由空间的格林函数和并矢格林函数.

积分方程(1)离散后所得的线性方程组为

$$\sum_{i=1}^{N_s} P_{ji} e_{si} + \sum_{i \notin C_m}^{N_s} Q_{ji} h_{si} = b_j \quad (4)$$

式中  $N_s$  为表面单元的总数,  $j = 1, 2, \dots, N_s$ . 在采用 RWG 矢量基函数  $f_i$  展开, 伽辽金匹配的情况下, 上式左边两部分的表达式如下:

$$\sum_{i=1}^{N_s} P_{ji} e_{si} = \sum_{i \notin C_m} P_{ji} e_{si} + \int_S d^2 \hat{k} V_{f_{mj}}^p(\hat{k}) \cdot \sum_{m' \notin C_m} T_L(\hat{k} \cdot \hat{r} mm') \sum_{i \notin C_m} V_{sm'i}(\hat{k}) e_{si} \quad (5)$$

$$\sum_{i \notin C_m} Q_{ji} h_{si} = \sum_{i \notin C_m} Q_{ji} h_{si} + \int_S d^2 \hat{k} V_{f_{mj}}^q(\hat{k}) \cdot \sum_{m' \notin C_m} T_L(\hat{k} \cdot \hat{r} mm') \sum_{i \notin C_m} V_{sm'i}(\hat{k}) h_{si} \quad (6)$$

以上两式中, 右边第一部分表示近区耦合作用, 第二部分表示远区耦合作用, 公式中:

$$T_L = \sum_{l=0}^L j^l (2l+1) h_l^{(1)} (kr_m) P_1(\hat{k} \cdot \hat{r} mm') \quad (7)$$

$$V_{f_{mj}}^p(\hat{k}) = \frac{-k_0^2}{16\pi^2} \int_S (\alpha \eta f_j(r) \cdot (\hat{I} - \hat{k}\hat{k}) + (1-\alpha)f_j(r) \times \hat{k}) e^{-j\hat{k} \cdot \hat{r} mm} ds \quad (8)$$

$$V_{f_{mj}}^q(\hat{k}) = \frac{-k_0^2}{16\pi^2} \int_S \left( \frac{1-\alpha}{\eta} f_j(r) \cdot (\hat{I} - \hat{k}\hat{k}) - \alpha f_j(r) \times \hat{k} \right) e^{-j\hat{k} \cdot \hat{r} mm} ds \quad (9)$$

$$V_{sm'i}(\hat{k}) = \int_S f_i(r') e^{-j\hat{k} \cdot \hat{r} mm'} ds \quad (10)$$

$V_{sm'i}$ 、 $T_L$ 、 $V_{f_{mj}}$  分别为聚合、转移及配置因子. 对 MLFMA 算法来讲, 比较耗费机时的运算过程有: 积分的计算、转移过程的计算和转移因子的计算. 本文对传统算法进行以下几个方面改进.

对于配置因子  $V_{f_{mj}}$  表达式中的权函数用高斯积分节点上的点源函数展开, 这样配置因子  $V_{f_{mj}}$  表达式中的积分可以得到大大简化. 对近场阻抗表达式中的基函数和权函数分别用高斯积分节点上的点源函数展开, 则其积分也可以得到大大简化. 将聚合因子中的基函数用位于多层快速多极子均匀分组网格中心的一组点源函数展开, 通过这一展开, 除了使积分过程可以得到如前面所述的简化外, 这一操作实际上是将基函数映射到其周围的网格中心, 使原有的空网格和非空网格都用点源函数进行了填充. 因为转移因子具有平移不变性, 这样在多层快速多极子算法中, 多极聚合和多极配置后的多极转移过程的计算式是一离散圆卷积表达式, 可以用快速傅里叶变换计算. 对于转移因子, 在采用射线传播近似和远场近似的基础上, 只计算八分之一球面上的角谱分量, 其他分量由对称关系得到, 其计算量和存储量可以降到传统方法的八分之一左右.

## 1.2 单元级矢量有限元法/自适应多层快速多极子算法<sup>[5-6]</sup>

实际情况中待分析的复杂涂层体有很多属于电大尺寸的散射体, 其求解运算量往往超出传统方法的运算能力, 本文介绍一种单元级矢量有限元法/自适应多层快速多极子算法(ELVFEM/AMLFMA), 这种算法的有限元部分可在单元级上完成有限元矩阵与矢量相乘的所有运算, 无须生成有限元总体系数矩阵. 积分方程的计算可采用自适应多层快速多极子算法完成.

对三维涂层复杂散射体, 在良导体表面与涂层外表面之间的有效区域  $V$  中, 电场满足:

$$F(E) = \frac{1}{2} \int_V \left[ \frac{1}{\mu} (\nabla \times E) \cdot (\nabla \times E) - k_0^2 \epsilon E \cdot E \right] dV + jk_0 \int_S (E \times H) \cdot \hat{n} ds \quad (11)$$

采用四面体矢量边缘元和三角形矢量边缘元对式(1)和式(11)进行离散, 得到如式(12)所示的矩阵方程.  $\{E_i\}$  是区域  $V$  内的未知离散电场参量,  $\{E_s\}$  和  $\{H_s\}$  分别是边界面上的未知离散电场和磁场参量. 矩阵  $[K_{II}]$ 、 $[K_{IS}]$ 、 $[K_{SI}]$ 、 $[K_{SS}]$ 、 $[B]$  都是稀疏矩阵, 而且  $[K_{II}]$ 、 $[K_{SS}]$  是对称的,  $[B]$  是反对称的, 且  $[K_{IS}] = [K_{SI}]^T$  ( $T$  表示转置).  $[P]$ 、 $[Q]$  分别是边界积分方程离散后与  $\{E_s\}$  和  $\{H_s\}$  相对应的系数矩阵.

$$\begin{bmatrix} K_{II} & K_{IS} & 0 \\ K_{SI} & K_{SS} & B \\ 0 & P & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i \\ E_s \\ H_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} \quad (12)$$

单元级矢量有限元法的计算思想是将一个总体矩阵向量积计算转化到一组单个矩阵向量积的运算,

无须生成总体系数矩阵. 算法中总体系数矩阵向量积的计算过程可由以下式表示

$$\begin{aligned}\{b\} &= [K]\{x\} = (\sum_i [K_i])\{x\} = \sum_i ([K_i][x]) = \sum_i ([K_i][x_i]) = \sum_i \{b_i\} \\ \{b\} &= \{0, 0, b\}^T, \{x\} = \{E_I, E_S, H_S\}^T\end{aligned}\quad (13)$$

式(13)中 $\{x_i\}$ 是与 $[K_i]$ 相应的向量, $\{x_i\}$ 中的非零元素就是有限元未知向量 $\{x\}$ 中的元素.

## 2 飞行器 RCS 测试技术

一个 RCS 测试系统, 大致由 4 个部分组成<sup>[7-8]</sup>. 如图 1 所示.

### 2.1 矢量网络分析仪

矢量网络分析仪不仅作为信号的收发设备, 而且还作为测量设备, 测量网络的  $S$  参数. 它既可发射宽带步进扫频脉冲信号, 也可发射单载波连续信号(简称点频信号). 若要测量目标 RCS 的值, 则让矢量网络分析仪的一个通道发射信号, 经功率放大器进一步放大后, 通过馈线送往发射天线发射出去, 它的另一个通道接收目标回波信号. 通过它的测量功能就可直接得到待测网络的  $S_{21}$  参数.

### 2.2 收发天线

采用一对宽带喇叭天线通过馈线与矢量网络分析仪相连, 置于暗室一端的支架上, 距转台 15 m 满足远场要求. 为了满足单站 RCS 的要求, 收发天线距离为 40 cm 靠得很近, 且严格极化匹配. 为了避免相互影响, 中间用吸波材料隔开.

### 2.3 转台及支架

转台安装在静区下的地面上, 放置待测物体的泡沫支架置于其上, 这样测量时受到的杂波干扰最小且满足远场测量条件.

### 2.4 转台控制柜

它是为转台专门研制的一种精密控制装置, 既可以控制转台, 又可以与计算机连接进行自动控制, 通常以自动控制为主, 以保证测量精度的要求. 测量散射体的具体步骤如下:

- (1)事先制作飞行器缩尺比模型;
- (2)校准矢量网络分析仪;
- (3)调节对消器中的移相器和衰减器, 使网络分析仪的  $S_{21}$  最小;
- (4)架设标准球, 将收发天线置于垂直(水平)极化状态;
- (5)调整转台到起始位置, 设置转台扫描参数, 每隔一定转角, 矢量网络分析仪采集一次标准球的回波数据  $S_{21a}$  并保存;
- (6)取下标准球, 放置待测飞行器缩尺比模型, 在不改变其它测量参数的情况下, 测得目标的散射参数为  $S_{21b}$ ;
- (7)再将收发天线置于水平(垂直)极化状态, 重复(2) ~ (5);
- (8)数据处理. 由于在微波暗室内, 背景杂波干扰及矢量网络分析仪等硬件设备的噪声, 测量精度不够理想, 必须通过滤噪处理.

## 3 实测与数值实验结果

图 2 为国产某大型特种飞行器模型的单站 RCS 本文方法(AMLFMA)计算值和测试值对比图, 该模型为 1 : 20 缩比模型, 该模型长 1.9 m, 翼展 2 m, 计算频率 20 GHz, 未知量个数为 123 768 个, 仿真时间 101 601 s, 水平极化, 水平扫描, 方位角零度对应飞行器头部方向. 图 3 所示为国外某型隐身轰炸机模型的单站 RCS 本文方法(ELVFEM/AMLFMA)计算值和测试值对比图, 该模型为 1 : 13 缩比模型, 长约 1.291 m, 宽约 1.016 m, 机身高约 0.112 m. 计算频率为 9.375 GHz, 水平极化, 水平扫描, 方位角零度对应飞机模型头部方向, 飞机模型未知数个数为 48 346 个, 仿真时间 79 519 s. 可以发现这两个算例本文方法的计算结果与测试结果吻合良好.

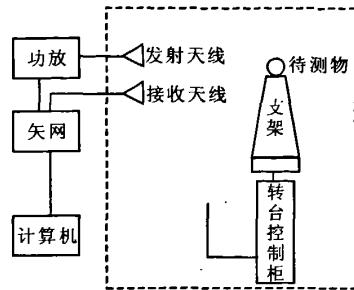


图 1 RCS 测量系统组成框图

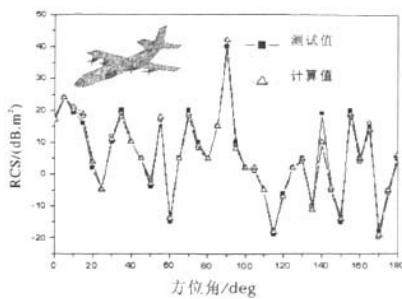


图2 国外某大型飞行器 RCS 计算值与测试值

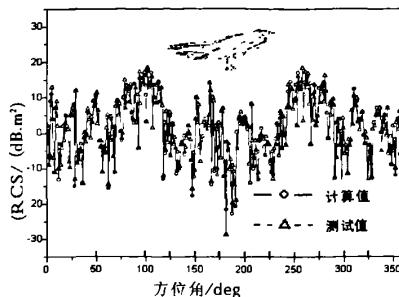


图3 国外某大型隐身飞行器 RCS 计算值与测试值

## 4 结束语

本文介绍的两种仿真算法本质上是均属于快速算法,可以用于电大尺寸常规目标和涂层隐身目标 RCS 的快速预估. 微波暗室内 RCS 的测量研究是目前我国目标雷达散射特性研究的有效手段, 本文介绍了基于矢量网络分析仪的 RCS 测量系统, 该系统简单可靠, 可实现点频及宽带 RCS 的测试.

### [参 考 文 献]

- [1] 袁军, 邱扬, 刘其中, 等. 自适应多层快速多极子算法及其并行算法[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 455-459.
- [2] SONG J M, CHEW W C. Multilevel fast multipole algorithm for solving combinedfield integral equations of electromagnetic scattering[J]. Microwave Opt Tech Lett, 1995, 10(1): 14-19.
- [3] WAGNER R L, CHEW W C. A ray propagation fast multipole algorithm[J]. Microwave Opt Tech Lett, 1994, 7(10): 435-438.
- [4] CHEW W C, CUI T J, SONG J M. A FAFFA-MLFMA. Algorithm for electromagnetic scattering[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, 2002, 50(11): 1641-1649.
- [5] SHENG X Q, YUNG E K N. On the computing algorithms of the hybrid FEM/MLFMA[J]. Microwave Opt Tech. Lett, 2002, 33(4): 265-268.
- [6] 袁军, 刘其中, 郭景丽. 一种基于矢量有限元与多层快速多极子技术的电磁散射快速并行算法[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 520-526.
- [7] 阮颖铮. 雷达散射截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [8] [美] E · F · 可拉特. 雷达散射截面预测·测量·减缩[M]. 阮颖铮, 等译. 北京: 电子工业出版社, 1988.

[责任编辑 马云彤]

## On the Fast Numerical Simulation and Experiment Methods of the RCS of Large Aircrafts

ZHU Xiao-zheng<sup>1</sup>, YUAN Jun<sup>2</sup>

(1. Delegate Office of Naval Air Force in Xi'an, Xi'an 710043, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A fast algorithm via element level vector finite element method (ELVFEM) and adaptive multilevel fast multipole algorithm (AMLFMA) is introduced for the RCS analysis of electrically large coated scatterers. A system and method for RCS measurement in microwave anechoic chamber is presented. The numerical and experiment results show the effectiveness of the presented method.

**Key words:** large aircraft; RCS; measurement

## 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/>