

基于通用 CAD 几何模型的复杂目标 RCS 计算

李向军, 马秋华, 焦景欣, 曹屹

(机电工程与控制国家级重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 目前复杂目标的建模方法, 一般使用自开发的专用程序分解或是部件分解法, 这些方法改动繁琐、不通用、计算误差大。为此提出了使用通用计算机辅助设计软件(CAD)建立几何模型和网格划分, 最终通过模型转换程序将目标的网格面元数据传递给 RCS 计算程序。重点研究了复杂目标的通用几何建模、电磁建模和模型转换的方法, 以及适合实际工程应用的计算方法。通过仿真和实测数据的比对, 该方法适用任意复杂目标 RCS 计算, 具有较高计算精度和效率。

关键词: 雷达散射截面; 等效边缘电磁流; 多次绕射; 射线追踪

中图分类号: TM153; TJ430 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-1194(2008)06-0046-05

Calculation of Radar Cross Section (RCS) of Complex Targets Based on Common CAD Geometric Model

LI Xiang-jun, MA Qiu-hua, JIAO Jing-xin, CAO Yi

(National Key Laboratory of Electromechanical Engineering and Control, Xian 710065 China)

Abstract: At present, commonly there are two methods of complex targets modeling which are decompounding the complex targets using self-developed special program and decompounding approach. However, both of them are uncommon, also there are large calculating errors and it is very complicate to update model using either of the two methods. Therefore, this paper advances a method which is using computer aided design (CAD) to build geometric model and mesh generation, and then transfer mesh data to radar RCS program using model transformation program. This paper mainly researches on common geometric model of complex targets, electromagnetism modeling, model transformation approach and calculating method which is applicable practical application. The comparison of the simulation data with test data shows that this method can be applied to RCS calculation of any complex target with high precision and efficiency.

Key words: radar cross section (RCS); equivalent edge current (EEC); multiple diffraction; ray tracing

0 引言

随着雷达与无线电引信技术的不断发展, 有关复杂目标电磁特性及其所处环境之间的相互作用的分析和预估, 如何有效地识别复杂目标特征, 提高武器命中率等问题, 已成为现代国防科技的重要研究课题。正因为如此, 国内外有许多电磁学专家都在致力于目标电磁散射特性的理论和实验研究, 并且发展了许多预估复杂目标远区散射特性的实用方法。电磁计算发展到今天, 各种解析、数值和高频近

似算法^[1]已经趋于成熟, 大量的研究表明, 对于大型的复杂目标, 用单一的任一种方法来预估其 RCS 都会受到各种因素的极大限制。因此, 如何有效地综合运用各类电磁算法, 如何采用高效高精度的建模方法, 开发复杂目标的电磁散射特性建模软件, 是目前迫切需要解决的问题。

目前计算目标 RCS 时, 对不同军用目标如导弹、飞机、坦克等, 建模方法一种是使用自开发的专用程序分解, 若目标形状稍有变动, 就必须修改程序代码, 非常繁琐; 一种是部件分解法, 用平面、二次曲

* 收稿日期: 2008-07-15

基金项目: 国防重点预研项目资助(51303020703-2)

作者简介: 李向军(1972—), 男, 陕西西安人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 引信与目标特性研究。

面近似拟合,这会造成计算误差。为此论文提出了使用通用计算机辅助设计软件(CAD)建立几何模型,通过接口转换用于雷达截面(RCS)计算的方法。

1 目标雷达截面计算方法

论文采用适合于计算三维目标 RCS 的一致性物理绕射理论和等效边缘电磁流公式。

其中 POEEC 的一般表达式为^[2-3]:

$$I^{PO} = \frac{2jE_0\hat{t}}{k_0\eta_0\sin^2\beta_i} D_e^{PO} + \frac{2jH_0\hat{t}}{k_0\sin\beta_i} D_m^{PO} \quad (1)$$

$$M^{PO} = \frac{2j\eta_0 H_0\hat{t}}{k_0\sin\beta_i\sin\beta_s} D_m^{PO} \quad (2)$$

PTD 绕射系数为^[4]:

$$D_m^{PTD} = \frac{1}{n}\sin\frac{\pi}{n}\left(\frac{1}{X} + \frac{1}{Y}\right) + U_1 \frac{\sin\varphi_s}{X'} + U_2 \frac{\sin(n\pi - \varphi_s)}{Y'} \quad (3)$$

$$D_e^{PTD} = \frac{1}{n}\sin\frac{\pi}{n}\left(\frac{1}{X} - \frac{1}{Y}\right) - U_1 \frac{\sin\varphi_s}{X'} - U_2 \frac{\sin(n\pi - \varphi_s)}{Y'} \quad (3)$$

目标总散射场计算为^[5]:

$$GTDEEC = POEEC + PTDEEC \quad (4)$$

式中,GTDEEC 表示总散射场,POEEC 表示物理光学场,PTDEEC 表示棱边绕射场。

2 多次反射绕射问题

由于复杂目标的形状决定了对散射场有贡献的射线还包括二次以上的反射绕射线,不过经历多次绕射反射的高阶绕射场是很弱的,可以只考虑二次反射。我们这里只将对散射场有贡献的其中几种射线列出^[6],如图 1。分别可由镜向射线法和等效电磁流方法处理^[7]。

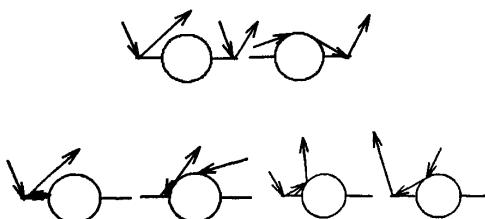


图 1 多次绕射射线分析

3 基于 CAD 的复杂目标三维建模方法

3.1 通用计算机辅助设计软件 CAD

对复杂目标的电磁散射分析需要建立几何模型。几何建模大致有三类方法^[7]:简单几何体组合模型、平面面元模型、参数曲面模型。随着计算机辅助设计与制造技术的发展,非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面被广泛应用于各种复杂物体(如飞机、坦克等)的设计与制造中,但基于 NURBS 曲面的物理光学电磁散射计算过程非常复杂,NURBS 曲面的边缘绕射计算方法尚未解决^[8],因此基于 NURBS 曲面的电磁计算对大型目标、实时计算难以实现。

平面面元模型是用一系列的小面元和棱边来描述复杂目标^[9],只要面元足够小,就能精确地描述复杂目标的外形。目前大多数通用 CAD 软件也都使用三角面元来描述三维实体。同时,平面面元也适用于电磁散射的高、低频算法如:物理光学法(PO),由物理绕射理论(PTD)、增量长度绕射系数法(IDL)、边缘等效电磁流法(EEC)等方法^[10]。本文就运用平面三角面元来建立目标模型。

像坦克、飞机、导弹等大型复杂目标采用手工面元建模是不可能的,而采用通用 CAD 软件进行计算机辅助建模,能使复杂目标的 RCS 面元计算具有实际应用价值。3Dmax、ProE、UG、AutoCAD 等优秀的图形软件都支持目标的三角面元网格拟合。这些软件都提供了强大而方便的建模功能,并且支持多种格式,如 *.wrl 或 *.stl 文件。

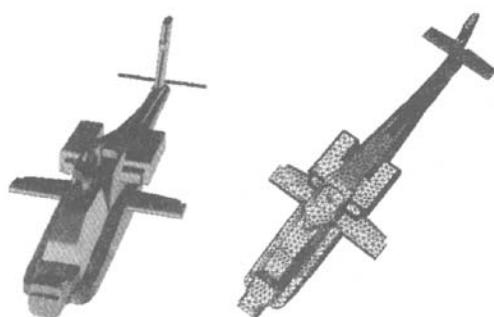


图 2 通用 CAD 软件建模与网格划分图示

对于复杂形体目标,首先使用通用 CAD 软件建

立目标的 CAD 三维模型。完成三维模型后, 使用 3Dmax、ProE 等软件对目标进行网格划分, 最后划分成可以计算的小三角面元, 最终由输出的面元网格信息文件为 *.wrl 或 *.stl。下面是使用 3Dmax 建立的 3D 模型和网格划分结果, 如图 2 所示。

3.2 格式转换

论文用 C++ 语言开发了网格信息读取模块,

并将其转换为电磁计算程序所需 *.mod 格式文件。

格式为 *.mod 的文件是自定义的用于电磁计算程序的文件格式, 通过模型转换程序就将复杂目标的网格面元数据传递给了 RCS 计算程序。 *.mod 文件可直接由电磁计算软件读入和进行动态显示, 可为下一步的电磁计算软件开发预留接口。 *.mod 文件格式如表 1 所示。

表 1 mod 文件格式

文件标示符	文件标示符	文件面元总数 m	组成面元点总数 n	终止符(任意)
面元序号 1	组成面元 1 点序号	组成面元 1 点序号	组成面元 1 点序号	
:	:	:	:	
面元序号 m	组成面元 m 点序号	组成面元 m 点序号	组成面元 m 点序号	
点序号 1	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	
:	:	:	:	
点序号 n	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	

注: 在数据文件中组成面元的点, 其坐标唯一, 即不应出现坐标相同而点序号不同的情况。

4 目标的遮挡处理

复杂目标经过拆解、几何模化后, 部件中不是所有部分均可见, 有的部件可能会被其他部件遮挡住。为了解决复杂目标自身遮挡问题, 我们依据射线传播理论, 设计了精确的遮挡函数关系。对于复杂模型来说, 剖分的三角面元大小会不一样, 这就增加了遮挡计算的难度, 如果采用简单的消隐方法判断会给处理时间和消隐精度带来不良影响。鉴于以上原因, 对于复杂目标的消隐分以下几步进行处理。

1) 建立遮挡计算缓冲区^[11]。首先在进行目标遮挡计算前应选定入射波(光)的方向, 将入射波进行坐标变换以满足消隐要求。接着建立缓冲区, 对于缓冲区中的每个面元数值设置初始值, 初始值都是指定具有最小深度(即可能的可见面)的值。最后从文件中读出所有面元和坐标点, 按照一定的排列顺序, 将数据保存于预留的缓冲区中。

2) 处理满足自遮挡条件面元^[12]。对满足自遮挡条件面元进行处理。在自遮挡条件下, 由于三角面元的可见面背对入射光线, 所以这些面元是全部不显示的。按照入射波入射矢量和面元法线来消除一部分不可见面元。

3) 射线跟踪。论文基于三角面元模型采用了一种简化的射线追踪方法: 从每一个可见三角面元的各顶点开始进行射线追踪, 在追踪过程中采用包围盒技术予以加速, 这样整个求解速度大大加快。特

别的在求解低于三次的反射时, 能有效地找到可见面。

4) 判断面元深度进行遮挡处理。这里我们采用了判断坐标点是否被遮挡的方法来进行消隐处理。选定一个面元, 设入射波矢量为该点法向量, 得到空间直线方程。判断直线和面元的位置关系, 如果直线穿过面元则进行空间深度判断。如果面元的深度小于坐标点则判定该坐标点被遮挡, 然后遍历坐标点剔除面元三点坐标均为不可见点的面元。这样的遍历次数为 $2 \times N \times (N - 1)$ 次。

这样做的原因如下: 传统方法是判断了两个面元重心和入射波的关系问题, 对于这种方法, 首先要建立投影面网格, 将面元投影然后对每个网格进行判断, 增加了计算时间, 同时在对模型的划分中, 如果模型划分过粗在进行投影过程中会产生有多个互不遮挡的三角形投影到同一网格中, 使得原本可见的三角片被误判为不可见。于是就会在生成的画面上产生“黑洞”。但模型划分过细使得三角形面元相对网格大很多, 使两个原本互相遮挡的三角片其重心可能投影到两个不同的网格中, 从而产生重叠问题。而本文的方法首先判断点和面元的关系, 将可见坐标点提取出来, 然后再由这些坐标点进行判断, 绕过了传统的网格处理方法, 转化到由点来对面的遮挡进行判断。判断面元坐标点中有两点坐标可见即该面可见, 获得了比较满意的效果。

5 复杂目标 RCS 计算

在 C++Builder 6 环境下开发的 RCS 计算软件,其界面如图 3 所示。最顶端的菜单栏由文件、编辑、视图、计算和帮助五部分组成。其下方是计算参数的设置模块、视图变换模块以及坐标轴的显示模块。界面右面是显示目标模型窗口,其下方为计算结果的数值显示窗口和图表显示窗口。本软件主要的功能有:目标模型(*.mod 格式)的显示及处理、目标 RCS 的计算、计算程序验模。

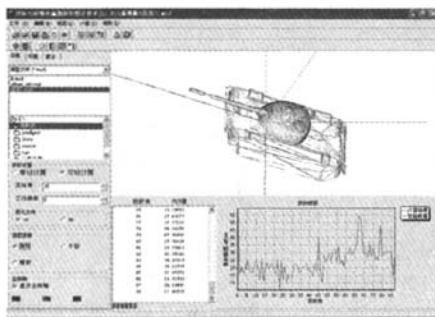


图 3 目标模型 RCS 计算及显示

5.1 计算模块

在界面左下方的参数设置栏里设置好计算参数,点击工具栏计算按钮即可计算目标模型的 RCS。计算结束,计算结果将在界面下方的数值显示窗口和图表显示窗口里显示出来。计算结果可以点击保存数据文件按钮、打印计算结果和保存计算结果图表来保存计算结果。

5.2 计算程序验模

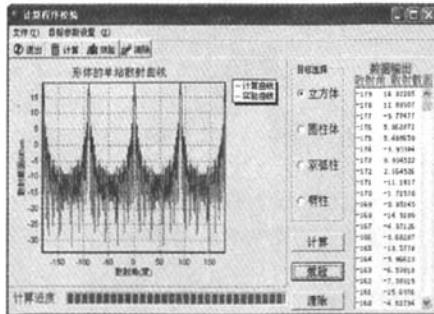


图 4 程序计算校验模块

点击启动计算程序校验模块按钮可以打开程序校验模块,该模块下可以将计算结果与实测数据进行比对。如图 4 所示。软件对几种标准体(立方体、柱体等)的计算值与实测数据进行比对,结果吻合良好。该校验程序将进一步加入复杂军用目标的实测数据,建立外场实测数据库,实时调用与查询实测数据,与理论计算结果作对比。

6 计算结果

论文用上述方法计算了方板的单站雷达散射截面,方板边长 a 为 6 个波长,平面波的人射方位角为 $\varphi_1 = 45^\circ$,俯仰角 $\theta_1 = 45^\circ$,并与经典计算方法作对比,计算结果非常吻合,如图 5 所示。本文用上述方法计算了圆柱的单站 RCS,圆柱直径 80 mm,长 250 mm,频率 9.35 GHz,并与经典计算方法作对比,计算结果非常吻合,如图 6 所示。

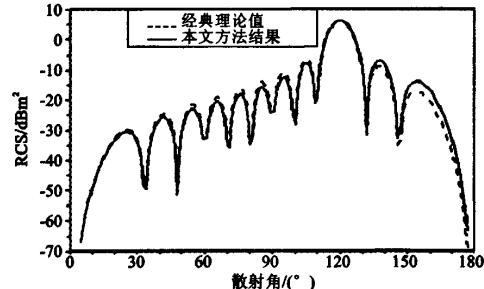


图 5 方板计算结果与理论值对比

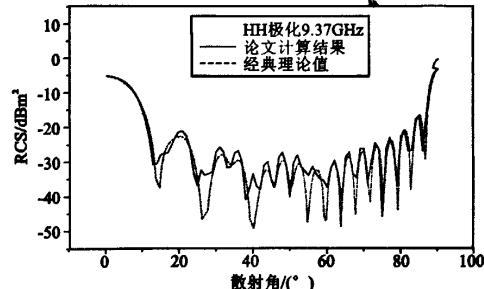


图 6 圆柱计算结果与理论值对比

论文还对巡航导弹、武装直升机两种目标进行了单站 RCS 计算,工作频率 3 GHz(波长 10 cm),计算姿态为方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$,即计算水平方向一圈变化的单站 RCS 值。计算过程如图 7 所示。

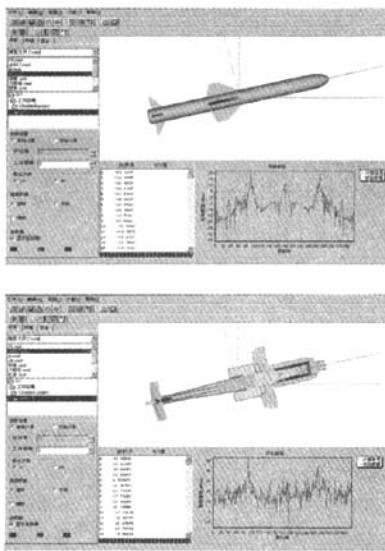


图 7 程序计算过程

7 结论

论文使用通用 CAD 软件对目标进行 3D 建模，使目标 RCS 计算不再受目标外形制约。任何目标只要用通用 CAD 软件，按照加工图纸绘制成 3D 模型，即可使用论文的方法计算该目标 RCS。论文对 CAD 模型主要运用物理绕射理论、等效边缘电磁流 (EEC) 法来计算电磁散射场，同时考虑了复杂目标的多次绕射与遮挡问题。最后论文给出了适合实际工程应用的计算方法和计算程序，并计算了方板、柱体、巡航导弹和武装直升机的 RCS，计算结果与理论值进行了对比。研究表明，该方法具有较好的实

用性、通用性。

参 考 文 献：

- [1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [2] Chatzigeorgiadis, Filippos. Development of Code for a Physical Optics Radar Cross Section Prediction and Analysis Application, ADA427120 [R]. US: ASTIA Documents, 2004.
- [3] 吴振森, 张民. 一致性绕射理论的等效边缘电磁流在多边形板双站散射中的应用 [J]. 电波科学学报, 1998, 13(2): 139-143.
- [4] Yaghjian, Arthur D. Research in Electromagnetic Scattering and Phase Space Methods in Radiation Propagation, ADA429585[R]. US: ASTIA Documents, 2004.
- [5] 李向军, 李静. 复杂目标近区 RCS 的一种计算方法 [J]. 制导与引信, 2005, (3): 47-51.
- [6] 汪茂光. 几何绕射理论(第二版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [7] 刁鸣, 张一飞, 缪善林. 一种新型单站无源定位算法研究 [J]. 探测与控制学报, 2007, 29(S0): 9-11.
- [8] 胡毕富, 席平. 飞行器 RCS 计算中曲面剖分技术研究与实现 [J]. 工程图学学报, 2005, 3: 124-128.
- [9] 王军, 聂在平, 胡俊, 等. 复杂目标电磁散射特性分析中的几何建模 [J]. 电波科学学报, 2003, (1): 70-74.
- [10] 苗英, 万国宾, 张立鹏. 复杂电磁散射目标的计算机建模 [J]. 计算机工程与设计, 2006, (1): 70-72.
- [11] 董健, 柴舜连, 毛钧杰. 任意形状、面、体组成体目标的电磁建模 [J]. 电子学报, 2005, (9): 1 656-1 659.
- [12] 张国华, 袁乃昌, 庄钊文. 基于面元法的航母雷达散射截面计算 [J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(5): 79-83.

欢迎订阅 2009 年《探测与控制学报》

《探测与控制学报》是由中国兵工学会、西安机电信息研究所、机电工程与控制国家重点实验室联合主办的一个国内武器工业类中文核心期刊。本刊 1979 年创刊以来，共出版发行了 100 多期，不仅在国内产生了较大的影响，而且在国外也有一定的影响，已经成为国内引信及相关探测与控制领域内不可缺少的一块学术园地。为了推动引信技术及其相关探测与控制技术的发展，进一步扩大我刊学术交流的范围，加快论文发表周期，从 2005 年开始，由季刊变更为双月刊出版发行。

本刊是综合性的学术技术刊物，旨在为引信及相关探测与控制技术领域内的科研、生产和教学服务，开展学术交流。重点刊载的技术范畴是：机、电接触探测；无线电、红外、激光和磁近程探测；信号处理、超小型电源、安全与解除保险装置、测试仿真等。

《探测与控制学报》双月刊(共 6 期)，每期 80 页，订刊费全年 60 元。刊号：ISSN 1008-1194 CN 61-1316/TJ，欢迎各单位及广大读者订阅。

通信处：西安市 121 信箱学报编辑部 邮编：710065 电话：029-88156204 联系人：庞彦波

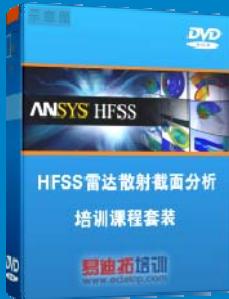
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(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/>