

NURBS 曲面的 RCS 预估研究

吴 刚, 奚书喜

(西安电子科技大学 天线与微波技术国家重点实验室 陕西 西安 710071)

摘要:为了提高计算的精度和效率,将 NURBS 参数曲面应用到电大尺寸目标的 RCS 预估中。使用 CAD 软件建立模型,通过对模型 IGES 文件中数据结构分析,并以 IGES 文件为接口,从 CAD 软件模型中提取出 NURBS 曲面信息,然后用 Cox-De Boor 算法把 NURBS 曲面转换为 Bezier 曲面,结合物理光学法和渐进积分展开法精确、高效的求解出任意理想导体目标曲面的 RCS。

关键词:雷达散射截面;非均匀有理 B 样条;IGES;物理光学法;渐进积分展开法

中图分类号:TN955⁺.1

文献标识码:B

文章编号:1004-373X(2006)增刊-349-04

Study on RCS Prediction of NURBS Surface

WU Gang, GONG Shuxi

(National Key Lab of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an, 710071, China)

Abstract: To multiply the accuracy and efficiency of computation, a technique is presented for the RCS prediction of electrically large conducting bodies, modeled by NURBS parametric surfaces. Aided with CAD software, the complex targets can be modeled. The data of NURBS surface which are based on the standard for IGES are extracted from the model, through analyzing the data structure of IGES files. Then the NURBS surfaces are expanded to Bezier patches via Cox-De Boor transform algorithm, and by using physical optics and asymptotic expansion of integrals methods, the RCS of surfaces of arbitrary perfectly conducting targets are obtained accurately and efficiently.

Keywords: RCS; NURBS; IGES; Physical optics method; asymptotic expansion of Integral methods

1 引言

雷达截面(RCS)的计算是伴随着军事目标的检测和识别技术发展起来的,特别是近年来,隐身技术和精确目标识别技术的发展,对复杂电大尺寸目标 RCS 预估精确程度的要求也越来越高,影响 RCS 预估精确度的因素主要有两个:一是对形状复杂的几何模型的描述;二是针对模型的电磁计算方法。

几何模型的描述对 RCS 预估起着至关重要的作用,他不仅影响 RCS 的计算效率,而且直接影响计算精度。参数曲面拟合已经成为目标建模的趋势,非均匀有理 B 样条(NURBS)方法是描述参数曲面的首选工具,其便于模型形状信息传递和数据交换,适合计算机处理,而且用 NURBS 拟合目标模型相对于先前模型采用平面片分解法拟合,他有以下优点:

- (1) 不会产生人为引入的面劈,消除拟合误差,拟合精度高;
- (2) 能用较少的面片来拟合自由曲面和简单的二次曲面,所需的描述曲面的信息量少,计算效率高。

对于复杂电大尺寸目标 RCS 的计算方法,由于低频方法受到了计算机内存和计算效率的限制,我们采用高频方法中计算效率和精度都比较高的物理光学法(PO)对其进行散射机理的分析,近年来主要是直接应用驻相法计算 NURBS 曲面 PO 散射场。

本文主要讨论电大尺寸目标参数曲面建模、模型数据提取以及基于物理光学法计算 RCS 的关键技术。

2 目标参数曲面建模及数据处理

2.1 模型数据的提取

使用 CAD 软件建立目标的参数曲面几何模型,在工程应用中,我们常采用 IGES 格式文件来存储 NURBS 曲面信息。IGES(initial graphics exchange specification) 是一种通用的数据交换标准^[1],标准的 IGES 文件包括固定长 ASCII 码、压缩的 ASCII 及二进制 3 种格式。本文采用固定长 ASCII 码格式的 IGES 文件,其每行为 80 个字符,整个文件分为 5 段,分别为开始段,全局参数段,目录条目段,参数数据段和结束段。在 IGES 文件中,信息的基本单位是实体,而本文所关注的 NURBS 曲面实体的类型号为 128。

通过对 IGES 文件中图形数据结构的分析,详细解析

了NURBS曲面数据，并实现了基于IGES文件的NURBS曲面数据交换接口，提取出模型数据，接口程序流程图如图1所示。

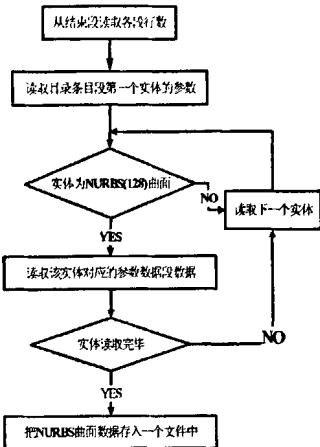


图1 接口数据提取流程图

2.2 NURBS曲面向Bezier曲面的转换

由于Bezier曲面的伯恩斯坦基是多项式基函数，而NURBS曲面的B样条基函数是递推函数，前者相比后者具有更好的数值计算特性和稳定性，适合进行数值计算，因此，我们采用NURBS曲面构造目标的几何模型，然后将得到的NURBS曲面数据通过Cox-De Boor算法^[2]重复插入节点转化为Bezier曲面数据，以待进行以后的物理光学散射场积分。

3 物理光学法计算散射场

采用物理光学法计算目标的后向散射场需要将照明面用一组有理Bezier面来拟合，在物理光学近似条件下，后项散射场的表达式^[3]为：

$$E_r(r) = E_0 \frac{e^{i\pi r}}{j\lambda r} (\hat{K} \cdot I) \quad (1)$$

$$I = \int_s \hat{n}_r(r') \cdot e^{2i\hat{K} \cdot r'} ds' \quad (2)$$

其中 λ 是波长； \hat{K} 是波矢量； $\hat{n}_r(r')$ 是物体表面 r' 处的单位外法矢； ds' 是物体表面受照射的小区域。

对于Bezier曲面，式(2)可化为：

$$I = \int_{u=0}^{u=1} \int_{v=0}^{v=1} r_u(u, v) \times r_v(u, v) e^{2i\hat{K} \cdot r(u, v)} du dv \quad (3)$$

Bezier面可以分为4类：多边形平面、曲边平面、单曲率面和双曲率面。对于平面，直接使用Gordon公式完成计算^[4]，而对于曲面，则使用驻相法进行解析求解^[5]，其中双曲率有理Bezier面上主要是临界散射点对RCS的贡献，而单曲率有理Bezier面上则是连续驻相点形成的驻相线段或驻相边界对RCS的贡献。对于曲面的计算，是本文探讨的重点。

一般来说，用驻相法求解Bezier曲面上的物理光学积分一般分为3步：

- (1) 判断Bezier曲面类型(单曲率面或双曲率面)；
- (2) 驻相点搜索，确定临界点的类型；
- (3) 根据不同的临界点分别进行解析求解。

3.1 单曲率Bezier曲面的散射场

单曲率Bezier曲面的驻相点搜索属于一维搜索，本文用二分法实现。考虑到 v 参数方向是直线，所以仅需完成 $K \cdot r(u, v_0)$ 在 $u \in [0, 1]$ 上的极值点，其中 v_0 为区间 $[0, 1]$ 内任一点，通常我们取 $v_0 = 0.5$ 。当该极值点 u_0 存在时，则积分区域内存在驻相线段 $u = u_0$ 。

对于单曲率Bezier曲面，式(3)可表示成：

$$I = \int_0^1 I_u(v) dv \quad (4)$$

$$I_u(v) = \int_0^1 r_u(u, v) \times r_v(u, v) e^{2i\hat{K} \cdot r(u, v)} du \quad (5)$$

在利用驻相法进行分析时，不仅应对面上的驻相线段进行解析求解，而且还应对Bezier面边界上的驻相线段进行求解。

(1) 内部驻相线段

$u = u_0$ 表示一条驻相线段，这时对 $f(u, v)$ 在 $u = u_0$ 领域里沿 u 向Taylor展开并略去高阶项有：

$$I_u(v) \triangleq [r_u(u, v) \times r_v(u, v)] \\ \cdot e^{2i\hat{K} \cdot r(u, v)} \sqrt{\frac{i\pi}{K \cdot r_u(u, v)}} \quad (6)$$

(2) 驻相边界段

当驻相线段远离边界，边界点 $(0, v)$ 和 $(1, v)$ 为边界驻相点时， $u = 0$ 与 $u = 1$ 分别表示下边界和上边界，利用分步积分得：

$$I_u(v) \triangleq i \cdot (-1)^u \cdot e^{2i\hat{K} \cdot r(u, v)} \frac{r_u(u, v) \times r_v(u, v)}{2K \cdot r_u(u, v)} \\ u = 0, 1 \quad (7)$$

(3) 耦合效应

当一阶驻相线段靠近驻相边界时，就需要考虑两者间的耦合效应。这时对式(7)的修正式为：

$$I_u(v) \triangleq i \cdot (-1)^u \cdot e^{2i\hat{K} \cdot r(u, v)} \frac{r_u(u, v) \times r_v(u, v)}{\sqrt{|K \cdot r_u(u, v)|}} \\ \text{sgn}(K \cdot r_u(u, v)) \cdot e^{-is} \cdot F_{s, u} \quad (8)$$

其中， $F_s(v_u) = \int_{v_u}^{\infty} e^{is} dt$ ， $s = \text{sgn}(K \cdot r_u(u, v))$ ，
 $v_u = \frac{|K \cdot r_u(u, v)|}{\sqrt{|K \cdot r_u(u, v)|}}$ ， $u = 0, 1$

本文在处理过程中，根据菲涅耳积分 $F_s(v_u)$ 的性质，我们设定当参量 $v_u > 3$ 时，表示一阶驻相线段远离驻相边界，他们之间不产生耦合效应，此时，将 $F_s(v_u) = -e^{is}/(2jsv_u)$ 代入式(8)，式(8)就退回到式(7)，所以就用式(7)来计算驻相边界的贡献；当参量 $v_u \leq 3$ 时，表示一阶驻相线段靠近驻相边界，他们之间产生耦合效应，此时就用式(8)来计算驻相边界的贡献。

另外需要指出的是，当一阶驻相线段与驻相边界重合

时,即一阶驻相线段为 $u=0$ 或 $u=1$,单曲率 Bezier 面上的 PO 积分的渐进贡献可表达为:

$$I_u(v) \triangleq \frac{1}{2} [r_u(u, v) \times r_v(u, v)] \cdot e^{2ik \cdot r(u, v)} \\ \sqrt{\frac{i\pi}{K \cdot r_u(u, v)}} \quad u=0 \text{ 或 } u=1 \quad (9)$$

3.2 双曲率 Bezier 曲面的散射场

双曲率 Bezier 曲面的驻相点搜索属于二维搜索,实际上就是二元函数 $K \cdot r(u, v) = 0$ 在定义域 $u \in [0, 1], v \in [0, 1]$ 内极值点的搜索,因为双曲率 Bezier 面不一定都是规则曲面,所以一般都采用最优化算法^[6]。其中驻相点包括极小值点、极大值点和鞍点,所以为了处理方便,可按 $f(u, v) = (K \cdot r_u(u, v))^2 + (K \cdot r_v(u, v))^2$ 搜索最小值。

当 Bezier 曲面为双曲率曲面时,曲面上存在 3 种临界点,分别是驻相点、边界驻相点和角点。

(1) 驻相点(第一类临界点)

当驻相点只位于曲面内部时,即 $u_0 \in (0, 1), v_0 \in (0, 1)$,此时 (u_0, v_0) 为第一类临界点,满足: $K \cdot r_u(u_0, v_0) = 0, K \cdot r_v(u_0, v_0) = 0$,式(3)中 I 的渐进公式可表示为:

$$I \triangleq \sigma \pi \cdot e^{2ik \cdot r} \frac{r_u \times r_v}{\sqrt{(K \cdot r_u)^2 - (K \cdot r_u)(K \cdot r_v)}} \quad (10)$$

其中:

$$\sigma = \begin{cases} j & \text{若 } (u_0, v_0) \text{ 是 } K \cdot r(u, v) \text{ 上的极小点} \\ -j & \text{若 } (u_0, v_0) \text{ 是 } K \cdot r(u, v) \text{ 上的极大点} \\ 1 & \text{若 } (u_0, v_0) \text{ 是 } K \cdot r(u, v) \text{ 上的鞍点} \end{cases}$$

可以看出第一类临界点对 I 积分的贡献近似为 k^{-1} ,是双曲率曲面散射场的主要贡献,与 GO 近似等同。当曲面上的驻相点不止一个,那么计算 RCS 就必须将他们对 I 的所有贡献全都考虑进来。

(2) 边界驻相点(第二类临界点)

当驻相点 (u_0, v_0) 只位于曲面边界上时,应满足 4 种条件之一:

$$K \cdot r_v(u=0, v_0) = 0; \quad K \cdot r_v(u=1, v_0) = 0 \quad (11)$$

$$K \cdot r_u(u_0, v=0) = 0; \quad K \cdot r_u(u_0, v=1) = 0 \quad (12)$$

边界驻相点的贡献可表示为:

$$I = j(-1)^\alpha e^{2ik \cdot r} \frac{r_u \times r_v}{2K \cdot r_\alpha} \sqrt{\frac{j\pi}{K \cdot r_\beta}} \quad (13)$$

当临界点靠近驻相点时,就必须考虑他们之间的耦合效应,可将式(13)中的 $(2K \cdot r_\alpha)^{-1}$ 替换为:

$$-\frac{j}{2} \sqrt{\frac{1}{|K \cdot r_\alpha|}} \operatorname{sgn}(K \cdot r_\alpha) e^{-j\pi} F_\alpha(v_0)$$

式中:

$$s = \operatorname{sgn}(K \cdot r_\alpha), \quad v_\alpha = \frac{|K \cdot r_\alpha|}{\sqrt{|K \cdot r_\alpha|}}$$

如果式(11)成立, α 是 u , β 是 v ; 如果式(12)成立, α

是 v , β 是 u 。

(3) 角点(第三类临界点)

当驻相点为曲面上不连续的角点时,他们分别为 $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)$,其对积分的贡献为:

$$I = -(-1)^{u+v} e^{2ik \cdot r} \frac{r_u \times r_v}{4(K \cdot r_u)(K \cdot r_v)} \quad (14)$$

当角点离临界点较近时,将会发生耦合效应,此时式(14)中的 $[(K \cdot r_u)(K \cdot r_v)]^{-1}$ 就被替换为:

$$4 \sqrt{\frac{1}{|K \cdot r_\alpha|}} \operatorname{sgn}(K \cdot r_\alpha) \sqrt{\frac{1}{|K \cdot r_\beta|}} \operatorname{sgn}(K \cdot r_\beta) T_\alpha T_\beta,$$

其中, $T_\alpha = jse^{-j\pi} F_\alpha(v_\alpha)$, $s = \operatorname{sgn}(K \cdot r_\alpha)$

4 算例与分析

(1) 柱面 RCS 的计算

给定一柱面如图 2 所示,他是典型的单曲率曲面,柱面沿 z 向的高度是 $h = 14.4$ cm,柱面横截圆弧的半径是 $a = 17.9$ cm,圆心角 $\varphi = 60^\circ$,柱面关于 xoy 面对称放置,来波的频率为 $f = 9.375$ GHz,与 z 轴成 90° 径向入射,由于 $\varphi < 90^\circ$,所以此柱面可以用一张 $n \times m = 1 \times 2$ 次的有理 Bezier 面来表示,入射波以 $\varphi = 0^\circ$ 入射,扫描到 $\varphi = 180^\circ$ 停止。在每个人射方向上求出相应的雷达散射截面并对其用 h^2 进行归一化,就得到了柱面的 RCS 结果,如图 3 所示,图中 PO 法结果是用数值积分方法计算得出的。

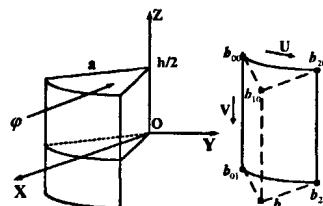


图 2 柱面及其 NURBS 模型

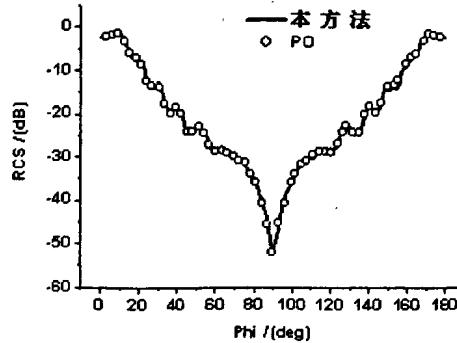


图 3 柱面 RCS 计算结果($\theta = 90^\circ$)

(2) 球面的 RCS 计算

给定球面如图 4(a)所示,为一张 $m \times n = 2 \times 2$ 次的有理双曲率 Bezier 面,该球面在 θ 向和 φ 向的张角均为 90° ,球面半径 $a = 2$ m,入射波频率 $f = 3$ GHz,当该球面均为

照明区时,该球面控制网格如图4(b),平面波沿 $\varphi=45^\circ$ 入射,得到球面RCS结果如图5所示,图中PO法结果是用数值积分方法计算得出的。

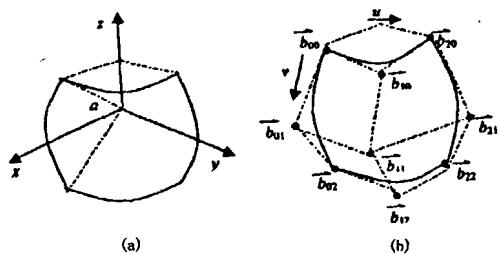
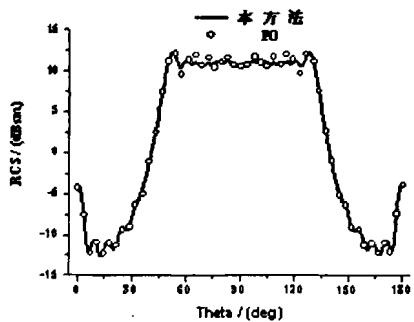


图4 球面及其NURBS模型

图5 球面RCS计算结果($\varphi=45^\circ$)

5 结论

本文介绍了一种针对任意理想导体目标的RCS预估

(上接第345页)

- [8] J. G. Ma, Z. Chen. Application of the Method of Lines to the Laplace Equation [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1997, 14(6): 330-333.
- [9] S. Xiao, R. Vahldieck, J. Hesselbarth. Analysis of Cylindrical Transmission Lines with the Method of Lines [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1996, 44(7): 993-999.
- [10] Jian-Guo Ma, I. Wolff. The Method of Angular Lines to Solve Cylindrical Electromagnetic Boundary-value Problems [J]. *Int. J. Microwave and Millimeter-Wave Computer Aided Engineering*, 1995, 5(1): 26-30.
- [11] R. B. Keam. Plane Wave Excitation of an Infinite Dielectric rod. *IEEE Microwave and Guided wave Letters*, 1994, 4(10): 326-328.
- [12] Ying Xiao, Yilong Lu, Jianguo Ma. The Efficient Solution of Arbitrary 2-D Cylinders Scattering Problems by the Cylindrical Method of lines. *Microwave Conference, Asia-Pacific*, 2000: 337-340.
- [13] Matlab, venison 6.5 release 13, June 18, 2002.

Author Introduction

Fan Zhenfeng was born in 1980. He received the B. S. degree in physics from Xinyang Teachers' College in 2002. Now is currently working toward the M. S. degree in electronic engineering at University of Electronic Science and Technology of China His current interests are in the computational electromagnetic, scattering.

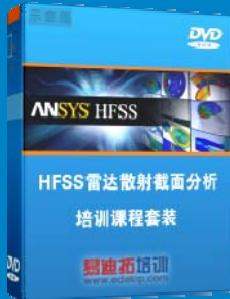
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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/>