

基于 NURBS 建模技术的迭代 MoM-PO 方法分析 电大尺寸平台天线方向图

陈 铭,王 楠,梁昌洪

(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: 本文采用基于非均匀有理 B 样条(NURBS, Non-Uniform Rational Bezier Spline)曲面建模技术的物理光学方法结合矩量法(Method of Moments-Physical Optics)分析位于电大尺寸平台附近天线的辐射方向图. 文章推导了基于有理贝齐尔曲面的物理光学散射场计算公式. 采用驻相法计算有理贝齐尔曲面上的物理光学感应电流积分. 利用物理光学散射场迭代矩量法区域的电压矩阵. 通过传统平面片建模的物理光学方法的计算结果对比,说明本文方法的有效性和优点.

关键词: 非均匀有理 B 样条; 物理光学; 矩量法; 驻相法

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0392-04

Analysis of Antenna Around Electrically Large NURBS Surface with Iterative MoM-PO Method

CHEN Ming, WANG Nan, LIANG Chang-hong

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

Abstract: The hybrid iterative method of moments and physical-optics method of moments (MoM-PO) is used to analyze radiation pattern of antenna around an electrically large platform modeled with non-uniform rational B-spline (NURBS) surfaces. The formula of scatter field based on NURBS surface is deduced. Stationary phase method (SPM) is applied for the integral of induced current on the rational Bezier surface. Results obtained by this method and by MoM-PO based on triangle facet model agree well while the former is more efficient in execution time.

Key words: non-uniform rational Bezier spline; physical optics; method of moments; stationary phase method

1 引言

电磁计算可以分为建模和计算两个部分,因此电磁计算的准确程度由建模和计算两方面决定. 物理光学方法和矩量法传统上常采用平面片单元建模. 矩量法通常要求片单元的尺寸小于十分之一波长,物理光学方法的要求比较宽松,不过面片单元一般也不能够超过三分之一波长. 在计算目标的电尺寸较大的时候需要采用大量的面片单元,导致计算速度变慢以及对计算内存要求的大幅增加. 几何绕射理论传统上采用板、柱、锥等标准部件建模,其缺点是无法精确模拟自由型曲面模型.

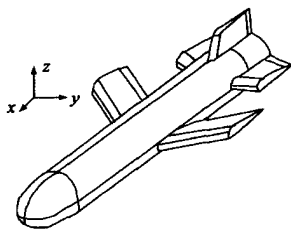


图1 采用 NURBS 曲面建模技术建立的导弹模型

NURBS 曲面建模技术在九十年代初成为工业设计中心几何外形设计的国际标准. 采用 NURBS 曲面建模具有建模精度高、面片数量少的优点. 考虑到该建模技术的在对电大尺寸散射体建模方面的优点,1992 年西班牙学者 J. Perez 首次将该建模技术引入高频电磁计算领域^[1]. 此后,采用基于 NURBS 曲面建模的电磁计算方法在国内外得到的广泛的研究^[2~5]. 在 2005 年之前,主要的研究工作集中于采用基于 NURBS 曲面建模的高频电磁计算方法分析和计算电大尺寸散射体的 RCS.

2005 年,Olga 首先提出采用基于 NURBS 建模技术的物理光学方法分析天线受电大尺寸平台影响后的方向图^[6]. 文章最后指出 MoM 和 PO 混和方法是分析位于电大尺寸平台附近天线辐射方向图的有效方法. 为了实现基于 NURBS 曲面建模技术的 MoM-PO 方法,本文作者研究了平面波源与电偶极子源入射情况下 NURBS 模型散射场的计算方法^[7,8]. 本文在此基础上给出了基于

NURBS 建模的迭代 MoM-PO 方法的基本思路和公式. 通过传统基于平面片建模技术的迭代 MoM-PO 方法比较说明本文方法的有效性, 并且本文方法在计算速度上更有优势.

2 基于 NURBS 曲面的迭代 MoM-PO 方法

NURBS 曲面的基函数的数学定义采用递推形式, 不适用于数值计算. 通常将 NURBS 曲面分解为有理贝齐尔曲面用于数值计算^[1~3]. 有理贝齐尔曲面和 NURBS 曲面类似, 也是一类参数曲面, 其数学定义式为:

$$r(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{i,j} b_{i,j} B_i^m(u) B_j^n(v)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{i,j} B_i^m(u) B_j^n(v)} \quad (1)$$

其中 $b_{i,j}$ 为曲面的控制点, $w_{i,j}$ 为对应于控制点的权值, $B_i^m(u)$ 和 $B_j^n(v)$ 为伯恩斯坦多项式, m 和 n 为曲面的次数, 参数 u 和 v 的取值范围为 $[0, 1]$.

当应用 MoM-PO 分析位于电大尺寸平台附件的天线的散射特性时, 通常将天线作为 MoM 区域, 将电大平台作为 PO 区域. 当天线受到激励时, 由天线与平台组成的电磁系统将经历一个短暂的相互作用过程直到达到平衡状态. 迭代 MoM-PO 方法就是通过模拟这个相互作用的过程来求解平衡状态时的天线和平台的电流分布, 进而求解整个系统的散射场^[9]. 迭代 MoM-PO 的具体步骤为:

(1) 假设平台不存在, 以天线的实际激励为激励源, 在天线表面建立电场积分方程:

$$L^{\text{MoM}}(J^{\text{MoM}})_{\text{tan}} = -E_{\text{tan}}^{\text{inc}} \quad (2)$$

式中 J^{MoM} 为矩量法区域电流, L^{MoM} 是将天线电流转化为天线散射场的算子. E^{inc} 表示天线的激励. 将天线电流采用基函数线性叠加表示:

$$J^{\text{MoM}} = [g][I_{\text{MoM}}] = [g_1 \dots g_n] \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

经过内积运算之后算子方程转化为矩阵方程:

$$Z_{\text{MoM}} I_{\text{MoM}} = V \quad (4)$$

求解该矩阵方程即可以得到天线初始电流.

(2) 求得天线的电流分布后, 以天线为源, 采用物理光学方法计算电大平台表面的电流分布. 为了得到平台电流分布, 首先需要计算平台表面的入射磁场. 该磁场由单个矩量法区域的每个单独子域发出的磁场叠加而成, 第 m 个矩量法子域发出的磁场可以由下式计算:

$$H(r_s) = - \int_m \frac{(1 + jkR_{sd})(R_{sd} \times g_m)}{4\pi R_{sd}^3} e^{-jkR_{sd}} ds_m \quad (5)$$

式中 $k = \frac{2\pi f}{C}$, C 表示光速, s_m 为第 m 段矩量法子域. r_d

是矩量法区域中第 m 段子域的位置, r_s 是贝齐尔曲线上的点, $R_{sd} = r_s - r_d$, $R_{sd} = |R_{sd}|$ 是矩量法子域到曲面的距离. 将所有单个矩量法子域发出的磁场相加即可以得到平台表面的总入射磁场.

(3) 由平台表面的入射磁场及物理光学方法得到平台亮区表面的感应电流, 平台表面的电流分布由物理光学近似得到:

$$J^{\text{PO}}(r) = \begin{cases} 2n(r) \times H(r), & \text{亮区} \\ 0, & \text{暗区} \end{cases} \quad (6)$$

对平台亮区表面的电流积分就可以求得平台发出的散射场. 组成平台的单个曲面的散射场可以由下式计算:

$$E = \frac{1}{j\omega\epsilon_0 4\pi} \int \left[\frac{3 - k^2 R_{fs}^2 + j3kR_{fs}}{R_{fs}^5} R_{fs} \times (R_{fs} \times J^{\text{PO}}) + \frac{-1 - jkR_{fs}}{R_{fs}^3} (-2J^{\text{PO}}) \right] e^{-jkR_{fs}} ds' \quad (7)$$

其中 $R_{fs} = r_f - r_s$, r_f 是散射场的观测点, $R_{fs} = |R_{fs}|$ 表示观测点到曲面的距离. 将所有单个曲面的散射场叠加即可求得 PO 区域的总散射场 E^s . 该散射场到达天线之后将作为天线的一个外加激励改变矩量法的电压矩阵. 假设第 k 步时的电压矩阵的第 m 个元素为 V_m^k , 则第 $k+1$ 步时对应的电压矩阵元素 V_m^{k+1} 采用下式计算:

$$V_m^{k+1} = V_m^k + E_m^s, \omega_m \quad (8)$$

式中 E_m^s 为到达第 m 个矩量法子域处的 PO 区域散射电场. 得到新的电压矩阵后, 重新求解矩阵式 (4) 得到天线的电流分布. 然后重复步骤 2、3 直到第 k 步得到的矩阵方程的解与第 $k+1$ 步得到的矩阵方程的解满足以下条件, 则迭代中止:

$$I_{k+1} - I_k / I_k < \epsilon \quad (9)$$

式中, ϵ 是迭代截止阈值.

3 应用驻相法计算物理光学积分

由上面的分析可以看出, 将迭代 MoM-PO 应用到 NURBS 模型的关键就是求解矩量法子域为源情况下有理贝齐尔曲面的散射场, 如图 2 所示.

为了方便说明, 图 2 偶极子入射到有理 Bezier 曲面上下面以 Pulse 基函数为例进行推导. 由式 (5) ~ (7) 可以得到矩量法子域为源的情况下的贝齐尔曲面的散射场公式:

$$E = \frac{-L_d}{16j\omega\epsilon_0 \pi^2 R_{sd}^3} \int \left[\frac{3 - k^2 R_{fs}^2 + j3kR_{fs}}{R_{fs}^5} R_{fs} \times (R_{fs} \times 2n \right.$$

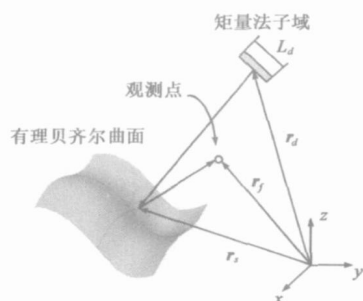


图 2 偶极子入射到有理 Bezier 曲面上

$$\times (R_{sd} \times g_n) + \frac{4(1+jkR_{fs})}{R_{fs}^3} (n \times (R_{sd} \times g_n)) \Big] e^{-jk(R_{fs}+R_{sd})} ds' \quad (10)$$

式中 L_d 为天线的分段长度. 对于有理 Bezier 曲面, 积分面元可以写为:

$$ds' = |r_{su} \times r_{sv}| dudv \quad (11)$$

其中 $r_{su} = \frac{\partial r_s}{\partial u}$, $r_{sv} = \frac{\partial r_s}{\partial v}$. 将积分面元代入, 最后散射场可以表示为

$$E = C \int_0^1 \int_0^1 g(u, v) e^{jk(u, v)} dudv \quad (12)$$

其中 $C = \frac{-L_d}{16j\omega\epsilon\tau^2 R_{sd}^3}$, $f(u, v) = -(R_{sd} + R_{fs})$,

$$n = \frac{r_{su} \times r_{sv}}{|r_{su} \times r_{sv}|},$$

$$g(u, v) = \left\{ \frac{3 - k^2 R_{fs}^2 + j3kR_{fs}}{R_{fs}^5} R_{fs} \times (R_{fs} \times 2n \times (R_{sd} \times I_d)) + \frac{4(1+jkR_{fs})}{R_{fs}^3} (n \times (R_{sd} \times I_d)) \right\} |r_{su} \times r_{sv}|$$

对于式(12)这种形式的积分, 在 $k \gg 1$ 条件下可以采用驻相法计算^[10]. 驻相法的基本思路是: 积分的结果主要来自于积分区域的关键点的贡献. 在驻相法的应用中一共存在三类关键点, 分别计算这三类驻相点对于积分的贡献, 相加后即得到积分的值. 首先给出一些符号的含义:

$$f_p = \frac{\partial f}{\partial p}; f_{pq} = \frac{\partial^2 f}{\partial p \partial q} \quad (p, q = u, v) \quad (13)$$

第一类是曲面内的驻相点, 这一类关键点需要满足的条件为:

$$\begin{aligned} f_u(u_0, v_0) &= 0 \\ f_v(u_0, v_0) &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

这一类驻相点对于积分的贡献可以由下式计算

$$I_{in} = g(u_0, v_0) e^{jk(u_0, v_0)} \frac{2\pi\sigma}{k \sqrt{|\sigma_1 \sigma_2|}} \quad (15)$$

其中 σ_1 和 σ_2 是矩阵 $T = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma \\ \gamma & \beta \end{bmatrix}$ 的特征值, 矩阵元素中 $\alpha = f_{uu}$, $\beta = f_{vv}$, $\gamma = f_{uv}$. σ 由下式定义:

$$\sigma = \begin{cases} j, & \sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0 \\ -j, & \sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0 \\ 1, & \sigma_1 \sigma_2 < 0 \end{cases} \quad (16)$$

第二类关键点是曲面边界上的关键点, 对应于每一条边界上的关键点需要满足的条件分别为:

$$f_v(0, v_0) = 0; f_v(1, v_0) = 0; f_u(u_0, 0) = 0; f_u(u_0, 1) = 0 \quad (17)$$

曲面边界上的关键点对于积分的贡献可以由下式计算:

$$I_{bo} = (-1)^\alpha \frac{j g(u_0, v_0)}{k f_u(u_0, v_0) \sqrt{k f_v(u_0, v_0)}} e^{jk(u_0, v_0)} \quad (18)$$

若边界驻相点位于边界 $u=0$ 和 $u=1$ 上时, 有 $\alpha=u$, $\beta=v$. 若边界驻相点位于边界 $v=0$ 和 $v=1$ 上时, 有 $\alpha=u$, $\beta=v$.

第三类驻相点是曲面的角点, 角点对于积分的贡献为:

$$I_{co} = -(-1)^{u_0+v_0} \frac{g(u_0, v_0)}{k^2 f_u(u_0, v_0) f_v(u_0, v_0)} e^{jk(u_0, v_0)} \quad (19)$$

将所有关键点对积分的贡献相加就可以求得积分的结果. 由以上的分析可以看出, 计算积分的关键是寻找驻相点. 驻相点只和被积函数的相位项相关. 由式(12)可以看出本文公式中被积函数的相位项与源和观察点的位置相关. 在迭代电压矩阵时, 源与观测点的位置均为矩量法子域. 因此, 当天线的位置和分段确定之后, 只需要求解一次驻相点. 由于天线的位置在每次迭代时并不改变, 所以以后每次迭代时就可以采用同样的驻相点进行计算, 而不必重复求解驻相点, 这样可以大大提高计算的速度.

4 计算结果与分析

算例 1 为球面的在第一象限的一部分, 球面半径为 0.2m, 如图 3 所示. 天线长度为 $\lambda/2$, 距离球面 0.1m, 工作频率为 3GHz. 天线被分为 19 段. 为了说明本文方法的正确性, 另外分别采用三角形平面片建模的迭代 MoM-PO 方法和 MoM 方法进行了计算, 迭代 5 步的计算结果在图 4 中给出, 三种方法的计算结果吻合良好.

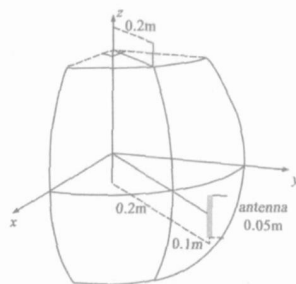


图 3 算例 1 球面模型

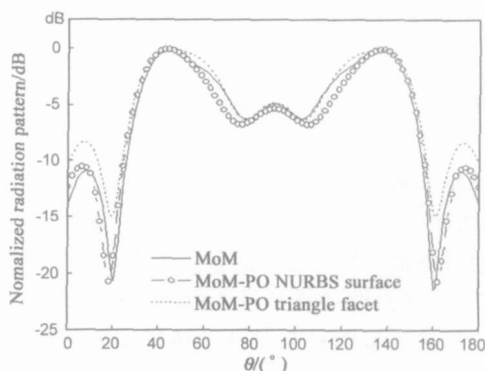


图 4 算例 1 $\phi=45^\circ$ 切面的方向图

算例 2 中平台由四个有理贝齐尔曲面构成, 每个曲面均为 2×2 阶, 如图 5 所示. 天线的工作频率为 300MHz, 天线长度为 $\lambda/2$, 放置于 z 方向距离平台上表面

2.1 个波长处. 天线被分为 19 个矩量法子域进行计算. 经过五次迭代后得到的 XOZ 面的方向图如图 6 所示. 在算例 2 中, 分别采用基于平面片模型和 NURBS 模型的迭代 MoM-PO

方法进行了计算. 我们对比了每一步迭代电压矩阵的时间. 采用三角形平面片的迭代 MoM-PO 方法时, 平台被剖分为 9472 个三角形平面片, 每一步迭代的时间是 20.57 秒. 而采用基于 NURBS 建模的迭代 MoM-PO 方法时每一步迭代的时间是 2.12 秒, 本文方法在计算时间方面具有明显的优势.

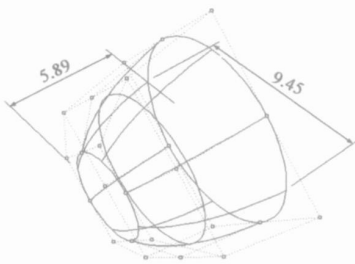


图 5 算例 2 平台模型

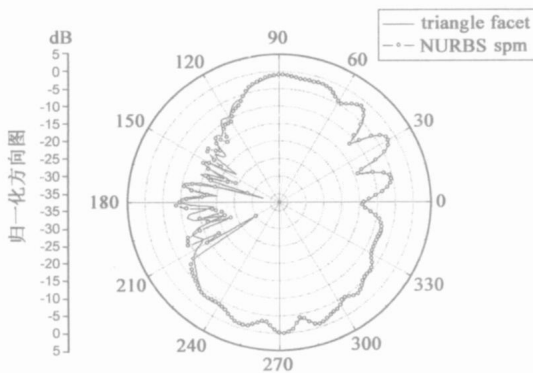


图 6 算例 2 XOZ 面方向图

5 小结

本文采用 MoM-PO 结合 NURBS 建模技术分析天线受电大尺寸平台影响的散射特性. 文章推导了基于有理贝齐尔曲面的物理光学散射场公式, 采用驻相法计算了有理贝齐尔曲面上的物理光学电流积分. 通过与矩量法以及基于平面片建模的迭代 MoM-PO 方法的对比说明本文方法的有效性并说明采用本文方法在计算速度方面更有优势.

参考文献:

- [1] J Perez, M F Catedra. RCS of electrically large targets modeled with NURBS surfaces [J]. Electronics Letters, 1992, 28 (12): 1119 - 1121.
- [2] J Perez, M F Catedra. Application of physical optics to the RCS computation of bodies modeled with NURBS surfaces [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1994, 42 (10): 1404 - 1411.
- [3] M Domingo, F Rivas, J Perez, Torres R P, Catedra M F. Computation of the RCS of complex bodies modeled using NURBS surfaces [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37 (6): 36 - 47.
- [4] J Perez, Juan A Saiz, Olga M Conde. Analysis of antennas on board arbitrary structures modeled by NURBS surfaces [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1997, 45 (6): 1045 - 1053.
- [5] Jin-Lin Hu, Shi-Ming Lin, Wen-Bing Wang. Computation of PO integral on NURBS surface and its application to RCS calculation [J]. Electronics Letters, 1997, 33 (3): 239 - 240.
- [6] Olga M Conde, J Perez, M F Catedra. Stationary phase method application for the analysis of radiation of complex 3-D conducting structures [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2001, 49 (5): 724 - 730.
- [7] Ming Chen, Yu Zhang, Chang-Hong Liang. Calculation of the field distribution near electrically large NURBS surfaces with physical-optics method [J]. J of Electromagn Waves and Appl, 2005, 19 (11): 511 - 1524.
- [8] Ming Chen, Yu Zhang, Chang-Hong Liang. Calculation of field distribution near electrically large NURBS surface illuminated with a dipole [A]. Asia-Pacific Microwave Conference [C]. USA: The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc, 2005. 2775 - 2777.
- [9] U Jakobous, F M Landstorfer. Improved PO-MM hybrid formulation for scattering from three dimensional perfectly conducting bodies of arbitrary shape [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1995, 43 (2): 162 - 169.
- [10] V A Borovikov. Uniform Stationary Phase Method [M]. United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 1994.

作者简介:



陈 铭 男, 1980 年 2 月出生于浙江省杭州市, 现为西安电子科技大学电子工程学院天线与微波技术国家重点实验室博士研究生. 目前从事计算电磁学方面的研究工作.
E-mail: chenming@mail.xidian.edu.cn



王 楠 男, 1981 年出生于辽宁省凌源市, 现为西安电子科技大学电子工程学院天线与微波技术国家重点实验室博士研究生. 目前从事计算电磁学方面的研究工作.
E-mail: wangnan@mail.xidian.edu.cn

梁昌洪 男, 1943 出生于上海, 教授, 博士生导师, 曾任西安电子科技大学校长、中国电子学会会士、IEEE Senior member. 研究方向包括计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面.