

任意形状线、面、体组成导体目标的电磁建模

董 健,柴舜连,毛钧杰

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 本文用积分方程和矩量法分析具有任意线、面、体组成的理想导体目标的电磁散射和辐射特性. 其中统一采用 RWG 基函数对线、面、体导体上的电流进行展开; 对于任意的线-面、面-面连接情况, 根据电流连续性条件, 给出了通用的设置基函数和未知量的方法; 对于辐射问题, 给出了设置激励源与计算输入阻抗的方法. 最后通过分析导体盒上的单极天线和宽带贴片天线验证了本文方法的可行性和有效性.

关键词: 表面积分方程; 矩量法; 基函数; 输入阻抗

中图分类号: TB331.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 09-1656-04

Electromagnetic Modeling of Conductor Object Composed of Arbitrary Shaped Line, Surface and Volume

DONG Jian, CHAI Shur-lian, MAO Jun-jie

(School of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Electromagnetic scattering and radiation characteristic of perfect conductor object composed of arbitrary shaped line, surface and volume is analysed by using integral equation and moment method. The unknown current at line, surface and volume is uniformly represented by RWG basic function. For the arbitrary line-surface, surface-surface junction problem, we give the uniform approach to search basic function and unknown associated with it based on current continuity condition. For the radiation problem, we give the method of setting source and calculating input impedance. The method is validated by the example of analyzing monopole and wide-band patch antenna.

Key words: surface integral equation; moment method; basic function; input impedance

1 引言

边界积分方程 (BIE) 结合矩量法 (MOM) 用以分析理想导体目标的电磁散射和辐射问题在近二十年来取得了很大的发展^[1~3]. 采用这种方法的关键在于针对特定的电磁问题, 首先要选择合适的满足特定边界条件的积分方程, 然后选择满足一定约束的基函数对导体表面的未知电流展开, 再选择特定的权函数与原方程作内积, 从而得到离散后的线性方程组. 求解这一线性方程组, 即可得到导体表面的电流分布, 从而可以计算出待求的电磁参量, 如目标的雷达散射截面 (RCS)、天线的输入阻抗、辐射方向图等.

针对特定问题的边界条件, 从 Maxwell 方程出发, 可以得到很多不同类型的积分方程. 对于导体边界问题, 使用最多的积分方程为电场积分方程 (EFIE), 磁场积分方程 (MFIE) 以及它们的线性组合——混合积分方程 (CFIE). 其中 EFIE 满足导体边界的切向电场条件, MFIE 满足导体边界的切向磁场条件. EFIE 可以用来分析具有开放导体表面和闭合导体表面的

问题, 而 MFIE 和 CFIE 只能用以分析闭合导体问题. 针对线导体问题, 如线天线的辐射特性分析, EFIE 可表示为大家所熟悉的 Pocklington 积分方程和 Hallen 积分方程^[4].

用矩量法求解边界积分方程的一个关键问题是如何选取合适的基函数对分布在目标表面的未知量展开. 基函数可分为两大类: 定义在整个待求区域的全域基函数; 定义在部分待求区域的分域基函数. 其中分域基函数因其理论公式简单、方便计算机求解在过去的二十年中获得的广泛的应用. 如针对线电流分布的脉冲基函数、三角基函数、正弦基函数, 针对面电流分布的 RWG 基函数、屋顶 (Rooftop) 基函数. 这些基函数及其导函数, 都必须满足导体表面电流和电荷分布的边界条件.

对于复杂金属连接问题, 如线-线、线-面、面-面连接问题, 上面列出的基函数不能满足连接处的电流连续边界条件, 因而不适用. 已有很多学者讨论了这一问题: 文献 [5] 讨论了线-面连接问题的积分方程求解, 对于线电流和面电流, 采用了普通的分域基函数, 对于线-面连接处, 其引入了新的满足

边界条件和电流连续性条件的基函数来处理;文献[6]采用全域基函数来处理线-面、面-面连接问题,并讨论了介质分界面问题,但因为其使用了全域基函数,导致其理论公式比较复杂,不方便数值实现。

本文使用细金属带来模拟细金属导线,把线-面连接问题转换为面-面连接问题;并统一用 RWG 基函数来表示面上电流分布,针对任意组成的面-面连接问题,文中给出了统一的选取未知量和基函数的原则和方法,并给出了在多个面连接情况时设置激励源的原则和方法。并且这些方法非常方便数值实现。在文中,如没有特殊说明,均假设金属为理想导体,所有目标均位于自由空间中。

2 理论分析

2.1 电场积分方程与 RWG 基函数

自由空间中导体(PEC)目标的散射和辐射特性,可以通过求解电场积分方程(EFIE)来分析。

$$\text{EFIE: } \forall y, \quad (n \times E^{\text{inc}})(y) = -j \mu_0 \left\{ \begin{array}{l} G(x-y) J(x) ds(x) \\ (\nabla_y G(x-y) \nabla \cdot J(x)) ds(x) \end{array} \right\} \times n(y) + \frac{-j}{0} \left\{ \begin{array}{l} G(x-y) J(x) ds(x) \\ (\nabla_y G(x-y) \nabla \cdot J(x)) ds(x) \end{array} \right\} \times n(y) \quad (1)$$

J 为理想导体目标的表面切向电流, G 为自由空间的格林函数,其定义为:

$$G(r) = \frac{e^{-jk|r|}}{4|r|}, \quad k = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (2)$$

电场积分方程只在一些规则边界条件下才能得到解析解。对于更一般的情况,需要通过矩量法将积分方程离散化,即转换为线性方程组,利用计算机求解。

使用矩量法求解电场积分方程的第一步,就是要对散射体的表面电流用基函数展开:

$$J(r) = \sum_{n=1}^N I_n J_n(r) \quad (3)$$

这里我们选择了定义在三角形面片上的 RWG 函数^[2]做为基函数。这就要求把目标表面作三角形网格剖分, RWG 基函数与三角形网格中的每一连接两三角型的内部边相对应。

2.2 细金属导线的电磁建模

对于电小尺寸的圆金属导线,当导线直径 r 远小于波长时,其电磁特性可用一窄金属条带来等效^[4],导线半径和条带宽度之间的关系为: $a = 0.25s$, 其中: a 为圆导线的半径, s 为金属条带的宽度。这一关系可由单位长度的金属导线和金属条带的电容相等的条件的到。等效后,就可以对条带进行三角形网格剖分,并使用 RWG 基函数描述条带上的电流分布。在条带的横向方向上,只有三角形的一个楞边,可以验证,两个相邻的 RWG 电流基函数,可以产生唯一的沿条带轴向的电流分布 J 。这亦满足了细线理论的假设^[4]。

2.3 任意金属面连接问题的电磁建模

通过使用金属条带等效金属圆导线,把线-面连接问题转换为面-面连接问题。对于多个金属面相连接问题,文献[3]中给出了三个无限薄金属面相连接时 RWG 基函数和未知量

的选取方法。文献[6]给出了任意个金属面连接时全域基函数和未知量的选取方法。这里我们将给出任意数量的金属面相连接时 RWG 基函数和未知量选取方法。

在电磁模拟中,金属面一般可分为两种,开放金属面(无限薄金属板的表面)和闭合金属面(金属体的外表面),分别用 PEC1 和 PEC0 表示。可分为两种情况来考虑多个金属面连接问题,一种情况是连接一个公共边的每一个三角形面元均为 PEC1;另一种情况是连接一个公共边的三角形面元为 PEC1 和 PEC0 的组合。

如何选取基函数和未知量,主要取决于金属面连接处的场的边界条件和电流连续性方程。根据场的边界条件,在金属面上,电场的切向分量为零,磁场的切向分量不连续。根据电流连续性方程,对于多个金属面连接的情况,从每一个金属面流入连接处的电流之和应等于零。当 m 个 PEC1 连接于同一公共边时,根据 RWG 基函数的定义,在这一公共边上可定义 m 个 RWG 基函数(位于相邻两 PEC1 之间),对应 m 个未知量,但根据电流连续性方程,从各 PEC1 流入这一公共边的电流之和应为 0,这 m 个基函数中只有 $m-1$ 个是独立的,因而只需要 $m-1$ 个基函数和未知量即可描述这一公共边上的电流分布。当连接同一公共边的既有 PEC1 也有 PEC0 时,根据边界条件,电流只分布于闭合金属体的外表面(PEC0)和 PEC1 上,因而可在两相邻的 PEC1 之间和 PEC1 与 PEC0 之间定义 RWG 基函数,但两相邻的 PEC0 之间因不存在电流分布,不能定义基函数。这两种情况,基函数和未知量的设置原则可概括为:

(1) m 个 PEC1 相连接的情况:

$$\begin{cases} \text{基函数: } m-1 \\ \text{未知量: } m-1 \end{cases}$$

(2) m 个 PEC0 和 PEC1 相连接,其中有 n 个 PEC0 的情况:

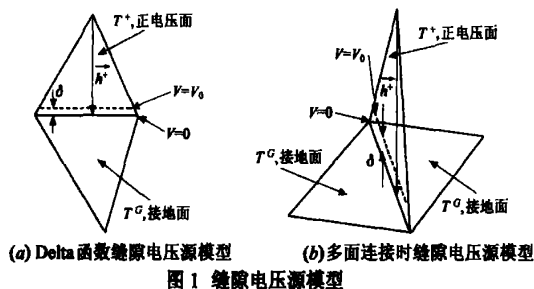
$$\begin{cases} \text{基函数: } m-n/2 \\ \text{未知量: } m-n/2 \end{cases}$$

这样,就可以用 RWG 基函数来描述任意线-面、面-面、面-体等导体结合问题的电流分布,从而可以通过矩量法离散电场积分方程,得到线性方程组。

2.4 激励源的设置

工程实际中,我们通过不同的方式来设置产生场的源。从电磁理论的角度出发,任何外加源可用外加电流源和外加场来表示。在数值模拟中,要想精确的模拟整个计算空间中的场,须要建立精确的目标模型和设置准确的激励模型。这须对目标的馈电结构做精确建模,并准确描述外加场和外加源。然而,实际中,我们通常对某些特定的场量感兴趣,在不失精度的情况下,我们可以采用简化的馈电模型来计算这些场量。对于散射问题,通常采用平面波激励;对于电路和辐射问题,一般采用外加电压或电流源激励。

工程实际中,对于电路和辐射问题,一般采用微带线或同轴探针激励。对于微带线激励,一个很好的电压源模型是 Delta 函数缝隙电压源模型^[3,7],其可以非常方便的与 RWG 基函数相结合,这一模型主要使用于窄金属条带的情况,如线天线,微带线等,见图 1(a)。



当用缝隙电压源激励时,除了在缝隙处,目标表面的外加切向电场处处为 0. 缝隙内的电场可表示为:

$$E = \frac{V_0}{h^+} \quad (4)$$

对应于离散后线性方程组右边的电压向量,只有与馈电边相对应的单元有值,其它均为零,即:

$$V_m = \frac{V_0}{T_m^+ + T_m^-} E \cdot f_m dS = V_0 \frac{T_m^+ + T_m^-}{T_m^+ + T_m^-} h^+ \cdot f_m dS = I_m V_0 \quad (5)$$

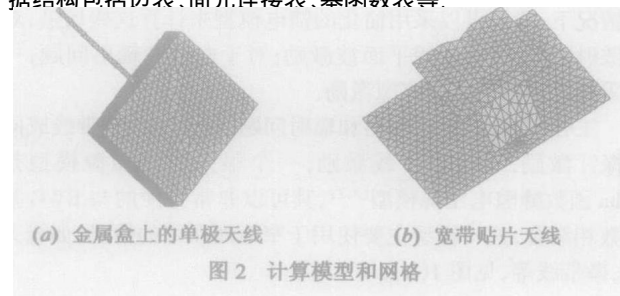
对于同轴馈电结构,我们亦可以使用 Delta 函数缝隙电压源模型. 根据前面的分析,可以用一细金属条带来等效同轴线的芯线,把缝隙电压源放在细金属条带与接地面的交界处,见图 1(b). 这一电压源模型对应了两个基函数,即对应于线性方程组的电压向量中的两个单元. 相应,在计算输入阻抗时,也要考虑两个电流量. 即:

$$Z_A = \frac{V_0}{I_{m1} + I_{m2}} \quad (6)$$

从后面的实例计算结果可以看到,采用这一模型,可以较为准确的计算馈电点处的输入阻抗. 同样,可以把 Delta 函数缝隙电压模型用于多面连接情况,此时,只能有一个连接面为正电压面,其它连接面均为接地面,图 1(b). 其输入阻抗计算方法与同轴激励情况相同.

2.5 数值实现

因为 RWG 基函数时建立在三角形网格的基础之上的,数值模拟的第一步,就是建立目标的计算机模型,并对模型进行三角形剖分. 这可以通过一些完善的 CAD、CAE 软件来实现. 这些软件一般都可以对目标模型进行三角形网格剖分,并可以生成相应的网格数据文件供我们的计算程序使用. 网格数据文件一般包括了网格的节点表,存储了节点编号和坐标;单元表,存储了单元编号和组成单元的节点编号;单元材质表,存储了单元的材质编号. 根据这三个表,通过一定的排序和检索算法,我们可以得到计算所需的所有其它数据结构. 这些数据结构包括边表、面元连接表、基函数表等.



对于多面连接情况,为了方便设置基函数,首先要把连接一个公共边的三角形面元按顺/逆时针方向排序,并标记出面元类型 (PECO、PECI). 对于激励源对应的边,还要设置正电压面元和接地面元,这些可通过在建模和剖分网格时给面元设置不同材质来区分. 图 2 给出了下面算例中的两个模型和网格.

在计算矩阵单元时,会遇到积分的奇异性问题. 对于 E-FIE 积分的奇异项和近似奇异项,可以通过奇异项提取的方法处理^[2,8,9],对于非奇异项积分,可用定义在三角面元上的数值积分方法计算^[9].

3 计算实例与结果分析

为了验证前面给出的计算模型的准确性和计算精度,下面给出了两个计算实例.

第一个算例为金属盒上的单极天线^[10],图 2(a). 其中,导体盒尺寸为 60 × 10 × 50mm,单极天线半径 $r = 0.5$ mm,长度 $l = 50$ mm,等效条带宽度 $s = 4 \times r = 2$ mm. 这一算例中包括了用细金属条带等效细金属导线,多导体面连接 (PECI

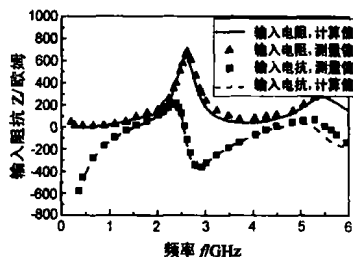


图 3 金属盒上单极天线的输入阻抗

和 PECO),多面连接时源设置等问题. 这里,缝隙电压源设置在金属带与导体盒连接的公共边上. 图 3 给出了用本文模型计算的天线输入阻抗和测量结果的对比情况^[10].

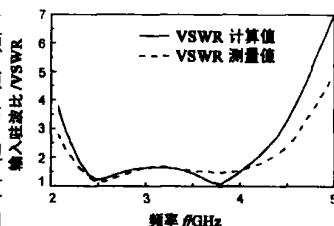


图 4 宽带贴片天线输入端驻波比 (VSWR)

第二个算例为一宽带贴片天线,图 2(b). 其结构和具体尺寸可参见文献 [11]. 这一模型中包含了多个 PECI 的连接情况,并考虑了有限接地面的影响. 图 4 为用本文模型计算该天线输入端的驻波比 (VSWR) 和文献 [11] 测量值的对比结果. 图 5 为用本文模型计算的该天线的 H 面辐射方向图,可以看到,本文方法可以较为准确的模拟有限接地面辐射方向图的影响.

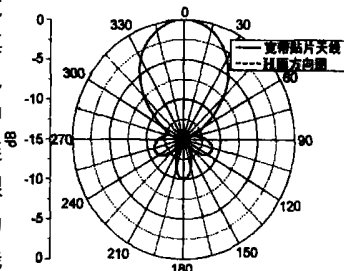


图 5 宽带贴片天线 H 面方向图

4 结论

本文统一采用 RWG 基函数分析任意线-面-体组成导体目标的散射和辐射问题,讨论了任意金属面连接情况下基函

数的设置方法激励源的设置方法. 本文方法用着很好的通用性,对一些工程实际问题的模拟计算结果验证了本文方法的准确性. 另外,本文方法还可以和快速算法相结合来分析电大尺寸复杂目标的散射和辐射特性.

参考文献:

- [1] Harrington R F. Field Computation by Method of Moment [M]. New York :John Wiley & Sons ,1992.
- [2] Rao S M ,Wilton D R ,Gissson A W. Electromagnetic scattering by surface of arbitrary shape [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1982,30(5) :409 - 418.
- [3] Makarov S. Mom antenna simulations with matlab :RWG basic functions [J]. IEEE Antenna & Propagation Mag,2001,43(10) :100 - 107.
- [4] Balanis C A. Antenna Theory ,Analysis and Design ,Second Edition [M]. New York :John Wiley & Sons ,1997.
- [5] Hwu S U ,Wilton D R. Electromagnetic scattering and radiation by arbitrary configurations of conducting bodies and wires [R]. Houston :Applied Electromagnetics Laboratory ,University of Houston ,1989.
- [6] Kolundzija B M. Electromagnetic modeling of composite metallic and dielectric structures[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Tec ,1999,47(7) :1021 - 1032.
- [7] Davidovitz M ,Lo Y T. Rigorous analysis of a circular patch antenna excited by a microstrip transmission line [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation ,1989,37(8) :949 - 958.
- [8] Wilton D R ,Rao S M ,Gissson A W. Potential integrals for uniform and linear source distributions on polygonal and polyhedral domains[J]. IEEE Trans Antennas and Propagation ,1984,32(3) :276 - 281.
- [9] Graglia R D. On the numerical integration of the linear shape functions times the 3-D Green 's function or its gradient on a plane triangle[J]. IEEE Trans Antennas and Propagation ,1993,41(10) :1448 - 1455.
- [10] Chen L ,Uno T ,Adachi S. FDID method analysis of a monopole antenna mounted on a conducting rectangular box[A]. Taflove A. IEEE Antenna & Propagation Society International Symposium[C]. New York :IEEE Press ,1992. 1670 - 1673.
- [11] Herscovici N. A wide-band single-layer patch antenna[J]. IEEE Trans Antenna and Propagation ,2004,40(4) :471 - 474.

作者简介:



董 健 男,1978年5月出生于河北乐亭,现为国防科学技术大学电磁场与微波技术专业博士研究生,主要研究方向包括计算电磁学,电磁场中的积分方程法,快速算法,并行计算等.

柴舜连 男,1969年11月生于湖北黄冈,博士,国防科技大学副教授,主要从事微波、毫米波技术、微带天线与计算电磁学的教学与科研工作.

毛钧杰 男,1943年6月生于湖南长沙,国防科技大学教授,博士生导师,电子学会高级会员,政府特殊津贴享受者,主要从事电磁场与微波技术、毫米波与天线技术等方面的教学与科研工作.