

任意弯曲线天线分析的复合基函数方法

雷霖，胡俊，潘光胜

(电子科技大学电子工程学院, 四川成都 610054)

摘要：矩量法作为一种精确的数值方法常用于线天线的辐射与散射分析。传统上一般采用分域基函数如分段线形基函数或分段正弦基函数。对于任意弯曲天线，为精确拟合目标几何外形往往需要精细的剖分因而导致过多的未知量数目影响了问题求解的效率。对此，本文应用复合基函数进行求解。这种基函数由原分域基函数加权组成，既保持了几何建模的精度，同时反映了天线表面感应电流的分布规律，大大降低了求解的复杂度。文中数值结果充分说明了该方法的高效性。

关键词：线天线；辐射与散射；矩量法；复合基函数

1 引言

作为天线工程最基本的天线单元形式，线天线的辐射与散射的精确数值分析具有重要意义。常见的用于天线辐射散射分析的积分方程有 Hallen 方程、Pocklington 方程^[1-2]与混合位积分方程（Mixed Potential Integral Equation: MPIE）^[3]。前两种方程多用于直线天线的分析。对于任意弯曲线天线，采用 MPIE 分析则更方便。但是，对于任意弯曲线天线，全域基函数构造比较困难，一般采用分域基函数如分段三角基求解。为满足弯曲线天线几何建模的精度，分域基函数常常需要精细的剖分因而导致待求解的未知量过多，最终影响了原问题求解的效率。对此，本文应用复合基函数(composite basis function)进行求解。这种基函数由原分域基函数加权组成，既保持了弯曲天线几何建模的精度，同时又反映了天线表面感应电流的分布规律，大大降低了求解的复杂度。

2 基于混合位积分方程(MPIE)的复合基函数方法

由细线近似建立任意弯曲理想导电线天线的混合位积分方程为^[3]

$$-j \frac{\eta}{4\pi k} \left\{ k^2 \int I(s') \hat{s}' \cdot \hat{s} K(s, s') ds' + \frac{d}{ds} \int \frac{d}{ds'} I(s') K(s, s') ds' \right\} = -E'(s) \cdot \hat{s} \quad (1)$$

其中 $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$, $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$, R 表示轴上源点指向导体表面场点的距离. $E'(s)$ 为 s 处的入射场, $K(s, s') = \frac{1}{2\pi} \int_s^R \frac{e^{-jkR}}{R} d\Phi'$, s 表示在导线轴上沿 C 从一个参考点到另一个点的弧位移量, \hat{s} 是该点上与 C 相切的单位矢量, 其正向为 s 的增加方向, 如下图 1 所示。

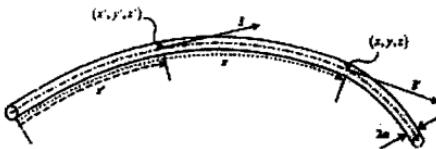


图 1 半径为 a 的任意弯曲线天线

采用分段三角基函数、线匹配法离散积分方程。基、权函数表达分别为

$$\Lambda_n(l)\hat{I}_n = \begin{cases} \frac{l - l_{n-1}}{\Delta_{n-}} \hat{I}_{n-}, & l \in (l_{n-1}, l_n) \\ \frac{l_{n+1} - l}{\Delta_{n+}} \hat{I}_{n+}, & l \in (l_n, l_{n+1}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\Pi_m(l) = \begin{cases} 1, & l \in (l_{m-}, l_{m+}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

将待求电流展开为

$$I(l)\hat{I}(l) \approx \sum I_n \Lambda_n(l)\hat{I}_n(l_n) \quad (4)$$

最终得到代数方程组

$$[V] = [Z][I] \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} Z_{mn} = -j \frac{\eta}{4\pi k} & \left\{ \frac{k^2}{2} \left[(\Delta_{m-}\hat{I}_{m-} \cdot \hat{I}_{n-} + \Delta_{m+}\hat{I}_{m+} \cdot \hat{I}_{n-}) \cdot \int_{s-1}^s \Lambda_n(l') K(R_m) dl' + \right. \right. \\ & \left. \left. (\Delta_{m-}\hat{I}_{m+} \cdot \hat{I}_{n+} + \Delta_{m+}\hat{I}_{m+} \cdot \hat{I}_{n+}) \cdot \int_n^{n+1} \Lambda_n(l') K(R_m) dl' \right] + \right. \\ & \left. \frac{1}{\Delta_{n-}} \int_{s-1}^s K(R_{m+}) dl' - \frac{1}{\Delta_{n+}} \int_s^{n+1} K(R_{m+}) dl' - \frac{1}{\Delta_{n-}} \int_{s-1}^s K(R_{m-}) dl' \right. \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{\Delta_{n+}} \int_{n}^{n+1} K(R_{n+}) dl' \} \quad (6)$$

图 2 表示由五个分段三角基函数构成的一个复合三角基函数。第 q 个复合矢量三角形函数可以写成：

$$\tilde{\Lambda}_q(l) \hat{I}_q(l) = \sum_{i=1}^{N^q} h_i^q \Lambda_i^q(l) \hat{I}_i^q \quad (7)$$

其中 Λ_i^q 是第 i 个分段三角基函数。参数 h_i^q 是相应加权系数。参数 N^q 是构成复合基函数 $\tilde{\Lambda}_q$ 的分段三角基函数 Λ_i^q 的个数。与定义复合基函数类似，也可定义复合权函数。

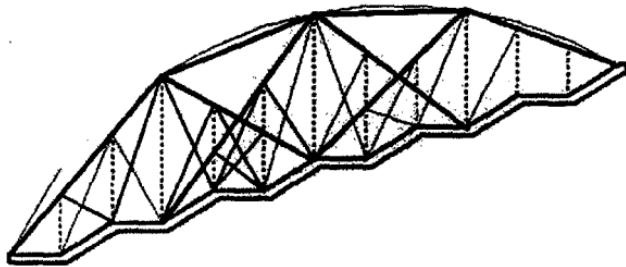


图 2 用复合基函数展开弯曲线天线电流

这样可形成如下 \tilde{N} 阶的新矩阵方程：

$$[\tilde{Z}_{pq}] [\tilde{I}_q] = [\tilde{V}_p] \quad (8)$$

其中，

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_{pq} = & \sum_{k=1}^{N^p} u_k^p \cdot \sum_{i=1}^{N^q} h_i^q \left\{ -j \frac{\eta}{4\pi k} \cdot \left[\frac{k^2}{2} \cdot (\Delta_{k-}^p \hat{I}_{k-}^p \cdot \hat{I}_{i+}^q + \Delta_{k+}^p \hat{I}_{k+}^p \cdot \hat{I}_{i+}^q) \cdot \int \Lambda_i^q(l') K(R_k^p) dl' + \right. \right. \\ & (\Delta_{k-}^p \hat{I}_{k-}^p \cdot \hat{I}_{i+}^q + \Delta_{k+}^p \hat{I}_{k+}^p \cdot \hat{I}_{i+}^q) \cdot \int_l^{l_{i+1}} \Lambda_i^q(l') K(R_k^p) dl' \left. \left. \} \right] + \frac{1}{\Delta_{i-}^q} \int_l^{l_i} K(R_{k+}^p) dl' \right. \\ & \left. - \frac{1}{\Delta_{i+}^q} \int_l^{l_{i+1}} K(R_{k+}^p) dl' - \frac{1}{\Delta_{i-}^q} \int_{l_{i-1}}^l K(R_{k-}^p) dl' + \frac{1}{\Delta_{i+}^q} \int_{l_i}^{l_{i+1}} K(R_{k-}^p) dl' \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\tilde{V}_p = - \sum_{k=1}^{N_p} u_k^p \int E^i(l_k^p) \cdot \hat{I}(l) dl \quad (10)$$

$$\tilde{Z}_{pq} = \sum_{k=1}^{N_p} u_p^k \sum_{l=1}^{N_q} h_l^q Z_{kl}^{pq} \quad (11)$$

3 数值结果与讨论

为证实本文方法有效性, 计算了一圆环天线的电流分布。几何示意图见下图 3。采用传统分段三角基函数计算, 未知量数目为 32, 采用本文方法计算, 未知量数目则仅为四分之一。显然复合基函数技术大大减少了计算机内存需求。本文数值结果与文献[3]结果完全吻合。

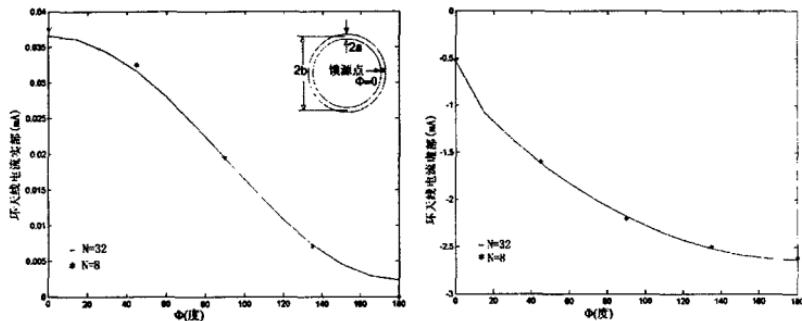


图 3 圆环天线的电流实部和虚部 ($a=0.0027\lambda$, $b=0.0637\lambda$)

当然, 复合基函数的运用是应满足一定的条件的。首先, 实际电流随曲线曲率的变化不是很大。其次, 曲线几何离散和表示电流矢量方向变化的分段数目必须超过描述天线电流变化所需的未知量数目。若天线电流变化很大而复合基函数数目即未知量少就很难正确反映电流的变化, 导致结果精度低。

参考文献

- [1] Roger F. Harrington. 《Field Computation by Moment Methods》, Macmillan Company, 1968
- [2] 李世智. 《电磁辐射与散射中的矩量法》, 电子工业出版社, 1985
- [3] Shawn D.Rogers and Chalmers M.Butler, "An Efficient Curved-wire Integral Equation Solution Technique", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.49, No.1, 2001.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

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，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、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。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>