金属天线与散射体分析

B·D· 波波维奇　等著

邱景辉　等译

单秋山　审校

哈尔滨工业大学出版社

金属天线与散射体分析

南斯拉夫

B.D. 波波维奇　等著
邱景辉　等译
单秋山　审校

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内 容 简 介

本书全面、详细地阐述了用矩量法对金属天线及散射体进行数值分析的各个主要方面，提出的简捷、统一的处理方法，适于分析电小或电中尺寸等类型广泛的金属天线与散射体。本书还给出了大量的数值计算实例，用以说明本书阐述的方法的普适性及优点。本书可供从事电磁波学科研究、设计与应用的科技人员参考，也可选作大专院校相关专业的教材或教学参考书。

IEE ELECTROMAGNETIC WAVES SERIES 38

Analysis of Metallic Antennas and Scatterers

B.D.Popović and B.M.Kolundžija

Published by: The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom

金属天线与散射体分析

Jinshu Tianxian yu Sansheti Fenxi

B. D. 波波维奇 等著

邱景辉 等译

单秋山 审校

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市工大节能印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 字数 192 千字

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—1 000

ISBN 7-5603-1324-8/TN·42 定价 20.00 元

序

本书是南斯拉夫贝尔格莱德大学的学者们撰写的有关分析金属线状天线、面状天线与散射体的一本专著。

作者根据多年研究，提出了一种较简捷的分析金属天线与散射体的统一方法。这种方法能处理更宽范围的问题，或者说现有的一些方法均可视为作者提出方法的一些特例。这种方法的重要特点可简述如下：

（1）选择电场积分方程作为分析的最佳起点。

（2）以 Galerkin 矩量法作为解积分方程的最佳选择。

（3）提出全域法处理问题，这样可比常用的子域法得到小很多的系统矩阵。

（4）采用通用四边形模型，而不用通常惯用的三角形模型来近似任意表面。它比后者更为有效。特别是表示线状天线的通用线模型可认为是四边形模型的一个特例。这就是说面与线均可用同一工具来处理。

当然本书还有一些其它的特点，在此就不一一罗列了。

我相信本书将对从事研究与分析电小与电中尺寸的金属天线与散射体的工程师与科技工作者有很好的帮助，他们会发现本书提供的方法比现有的一些其它方法会更有效地解决分析中遇到的难题。哈尔滨工业大学单秋山教授等有关人员翻译了这本专著与读者共享，这确是对我国微波与天线学科的一项贡献。

刘永坦

1998 年 5 月

注：刘永坦教授为中国科学院院士、中国工程院院士。

译者前言

1982年出版了南斯拉夫学者波波维奇（Popoviè）教授及其同事的专著“Analysis and Synthsis of Wire Antennas”。国际知名学者J. R. James教授评价该书在线天线分析与综合方面达到了多年研究的顶峰。

我们翻译的这本由英国IEE作为电磁波丛书出版的“Analysis of Metalic Antennas and Scatterers”是他们的另一本专著。本书重点研究对电小与电中尺寸的金属天线与散射体结构的电磁场问题的数值分析方法。这些结构可由形状任意的若干“导线”与“曲面”组成，包括由它们形成的各种类型的连接结。

本书全面、详细地阐述了用矩量法对金属天线及散射体进行数值分析时的各个主要方面。并以作者大量的数值分析经验为基础得出了许多重要的结论。这些结论在结构几何形状模拟、基函数与试探函数的选择以及数值计算技巧等方面都有许多独到之处。在对有关问题进行具体数值分析时，将对读者提供不少值得借鉴的方法。

按照IEE要求，本书全部按原文译出。其中第二、三、六、七、八章由王超龙、潘桂英合译，其余部分由邱景辉、秦月梅、单秋山合译。全书由单秋山审校。

本书是一本偏重于实际应用的专著，适合于电磁波学科的工程技术人员参考，也可作为大专院校相关专业的教材或教学参考书。

由于译者水平有限，不当之处，敬请读者指正。

单秋山

1998.3

前　言

不少论文与若干书籍论述了频域内金属天线与散射体的数值分析方法。对电磁场问题进行数值分析有重要贡献的主要方面可归纳如下：

(1) 若干类型的积分方程已用于对电磁场问题的数值分析。对于某些特殊问题，其中的几种方程更为适用；

(2) 方程的数值求解主要由矩量法给出。三种熟知的矩量法是：点匹配法，伽列金法与最小二乘法，后者只在很少场合得到应用；

(3) 在大多数情况下，往往采用分域基近似。只有少数作者乐于采用全域基方法；

(4) 对金属表面几何形状的近似，大多数作者都采用三角形近似。空间三点可单值的确定三角形的位置坐标，因此，导体表面上的任意点坐标系统都可用于求得导体表面几何形状的三角形近似；

(5) 对于金属导线，几乎全部采用分段圆柱近似；

(6) 对于金属表面与导线两种情况的任一种，电流分布近似表示式可从最简单的分域基的脉冲函数变到全域基或大部分全域基的由多项式与三角函数构成的组合函数。此外还可看到，在大部分情况下，从一个面元到另一个面元或从一个线元到另一个线元过渡时，电流是连续的；

(7) 对于线元与面元连接处（结）的处理方法这一难题，不管结上有无激励，已在相当程度上得到解决，尽管目前能解决的结问题限定在一定范围之内。

本书讲述对金属天线与散射体的简单但却是普适的数值分析方法。本书作者相信：本书提出的方法和所能处理的问题的范围很宽，几乎所有问题都可看作本书所述方法在某种特殊情况下的推广。

简要地说，本书提出的方法以如下主要步骤为基础：

(1) 基于现有知识及大量数值计算经验，采用电场积分方程作为最佳分析起点。仅在分析闭合物体时才采用混合积分方程作为最佳分析起点。

(2) 基于大量数值分析经验及与其它两种矩量法比较，采用伽列金法作为数值求解积分方程的最佳方法。

(3) 因为全域基方法可用低阶的系统矩阵求解，因此，本书采用全域基（或大部全域基）而不采用分域基。本书作者已为全域基方法呼吁了20多年。

(4) 采用广义四边形及其特殊情况——对线性表面作为物体的几何形状的近似。这些面元能更有效地模拟任何表面，而且所用面元的数量与三角形模拟时相近。

(5) 引入对非圆柱几何形状的独特处理方法，它们总是和各种圆柱导线段相联系，例如各种形状的导线终端与导线半径的变化。这种独特处理方法是引入广义导线与作为其特例的各种截锥（带有锥形或平面的圆环或盘）代替圆柱导线分段。此外，广义导线可看作广义四边形的特殊情况。于是，平板与导线实质上可用同一方法予以模拟。

(6) 电流的全域基近似在与有电流的面元的同一坐标系中表示。引入一个把任意一组基函数变换成在所有连接处能自动满足电流连续性条件的一组新基函数的方法，这种方法有助于减少未知量的个数，采用多项式展开作为主要展开。多项式展开已被本书作者和作者所在的大学采用多年，并且发现这是最简单又最灵活的作法。

(7) 最后，提出一种处理导线－平面结问题的方法，该方法无须增加任何形式的面元或电流展开（所谓的附着模），而以前的所有方法须要增加这些附着模。

从本书中还会看到几种简单有用的新方法。其中一项很有用的方法或许是能把位于导线－平面结平面上的激励近似地变换为对导线激励的理论。这一方法在相当程度上简化了对有激励源的

导线－平面结问题的分析。然而，出现在求解过程中的非常经济又非常精确的数值积分方法，可能还有多方面的用处。

作者希望有兴趣研究电小或电中尺寸的金属天线与散射体的工程师、科技工作者与研究生们能在本书中看到非常有用的方法，这个方法能克服其他一些实用方法所遇到的许多困难。

本书脱稿得益于数十年来在贝尔格莱德大学电气工程系与许多同事的讨论。尽管没有列出他们的名字，但书中讲述的部分概念是由他们提出的。在这方面，作者谨向 M. B. 德拉柯维奇教授与 A. R. 德约德捷维奇教授表示谢意。

书中的大部分基本概念与一部分实例于近年来已在英国电气工程师学会汇刊的 H 部分（Proceeding of the IEE，PartH）发表。作者对允许引用这些资料表示谢意。

B. D. P
B. M. K
贝尔格莱德
1994.5

目　　录

第一章 概 论

1.1 基本概念及定义

本书目的在于介绍用于分析“电小”与“电中”尺寸金属物体电磁场问题的比较通用的计算方法。在分析中，假设物体置于无耗介质中，且被任意单频电磁波“照射”。“电小”物体这一术语是指物体的最大尺寸远小于电磁波在自由空间的波长的物体，而“电中尺寸物体”是指物体的最大尺寸不超过若干波长的物体。本书介绍的方法不适于分析“电大尺寸”的物体，即最大尺寸大于若干波长的物体。但这种限制不是由于方法本身，而是由于数字计算机的速度与存贮能力的限制。

分析的主要目的是确定物体表面上的电流分布。一旦得到精度足够的电流分布，所有其它感兴趣的量，诸如散射场（辐射场）、近场、激励系统的源阻抗等参量就可以比较容易地求出。

分析的第一步是说明结构的几何形状。任何金属结构都可看作由适当相互连接的平板或弯板所组成。半径电小的金属导线的这种表示方法也是可能的，但很明显，这是很不实际的。因此，细导线无须分解成更简单的分结构。除非用一系列直导线段近似表示弯曲导线以及用各种类型的金属盖，即板状或锥状的环近似表示导线的终端及导线半径的突变部分时，才对结构进行细分。

实际上，对任意曲线形状的金属结构，既可用精确方法表示也可用近似方法表示。为了精确的表示结构，须引入形状任意的曲面板。下一章将详细说明具体的实现方法。然而，金属结构几何形状的这种精确表示方法在理论上是很复杂的，在实际中也无多大必要。除非那些性质非常依赖于其几何形状的结构，即某些谐振结构，为了对系统进行有适宜精度的分析时，才用平板或弯

板的适当系统去近似结构的精确形状。这种实际几何结构的精确或近似表示简称为结构的几何形状模拟。

在一般情况下，同样的理论也适于有可变截面的任意弯曲导线。除了某些谐振导线，对于它们可用一系列圆柱段来近似。在系统分析中，这样做并不引入明显的系统误差。

完成了对系统的几何形状模拟之后，结构分析的下一步是对给定的入射（外施）场分布确定近似结构的电流分布。除了某些电小结构之外，不能得到精确的电流分布。代替电流精确求解的是寻求电流分布的近似解。这种解通常是系数待定的已知函数系列，常称这些已知函数为“展开函数”或“基函数”。

电流分布的近似情况在某种程序上与采用的结构的几何形状模拟有关。如果模拟是用电小贴片（通常是薄片）表示，则可假定在这个贴片的各处，电流密度矢量为常数，或者至少是坐标的缓变函数（即线性函数)。此电流分布近似称为“分域近似”，相应的基函数称为“分域基函数”。

对于另一种场合，当结构表面用电中尺寸的表面单元进行几何模拟时，则有两种可能的基本研究方法。在第一种方法中，对于电流分布近似，可把表面单元再划分为足够小的子单元（不改变原表面单元的形状）以使所有这些子单元上的分域近似是合理的。另一种方法是在整个表面单元上确定电流的近似分布，这称为“全域基电流近似”。相应的基函数称为“全域基函数”。对于电流近似，如果把这种表面单元再分为数目不多的较大的子单元，这种电流近似称为“大部分全域基近似”，相应的基函数则称为“大部分全域基函数”。

在概念与计算两方面，分域基电流近似比全域基与大部分全域基近似要简单些。然而，对于电中尺寸结构，由于待定未知数的数量太多，分域基近似将产生各种数值计算上的问题。而全域基与大部分全域基在概念上与计算上往往比分域基复杂，但在计算上能对许多较大的结构进行分析。分域基还有另外一个缺点，即由于分域基电流展开式及导数的不连续性而使近场精确计算变

得十分困难。作为这方面问题讨论的最后一点，我们还应提及：表面单元总能选得如此之小，以致全域基近似与大部分全域基近似实际上已变成分域基近似了。

系统分析的最后目标是在采用了结构几何形状模拟及基函数情况下，确定表面的电流分布。通过对问题建立的数量任意的积分方程或微积分方程的数值解能够求出电流分布。对于这种求解方法的数学基础——矩量法，人们已熟知了很长时间[1,2]。尽管过去也确实用矩量法求解过许多个别问题，然而，并未实现应用同一原理求解以积分方程或微积分方程（实际上是借助于称作线性算子方程进行数值求解的）用公式形式描述的所有电磁场问题。例如，早在 50 年代，已用基本的矩量法分析过线状天线[3,4]。

哈林顿（Harrington）最早系统地研究了用矩量法求解电磁场问题[5,6]。自 1968 年出版了他的专著[6]以来，大量电磁场问题的数值求解是以矩量法为基础进行的。令人惊喜的是他投到 IEEE Transactions 的初稿竟遭拒绝，原因是评审人不相信这种问题能用矩量法求解。一篇内容更丰富的论文也被 IEEE Trans on AP 拖延了过长的时间。但是不久 IEEE Proceedings 表示乐于发表这篇论文[5]。这样才发表了这篇重要论文，它很快就成为电磁场问题数值解方面最通用或许也是被引用最多的论文。

1.2 矩量法述评

尽管矩量法早已被人们所熟悉，但为了本书叙述上的系统性，用一个简例说明矩量法的基本概念还是值得的。按这种方式，我们以后还将说明本书后边几章使用的不同表示式的含意。

先考虑置于真空中的孤立带电导体这样一个静电问题，如图 1-1 所示，假设导体的电位为 V_0，我们的任务是确定该导体表面上的电荷分布。

因为导电体内部的电场为零，按照等效原理，可移去该导电体并考虑真空中的实际电荷分布。前述导体的面电荷密度 $\sigma = f$，（这