计算机技术在电磁学中的应用

[美] R·米特拉 编著

金元松 译

人民邮电出版社

计算机技术在电磁学中的应用

【美】R·米特拉　编著
金　元　松　　译
沙　　　踪　　校

人 民 邮 电 出 版 社

Computer Techniques
for Electromagnetics
Edited by R. Mittra
Pergamon Press Ltd 1973

内 容 提 要

本书是根据作者在美国伊利诺伊斯大学开设的“计算机技术在电磁学中的应用”课程的讲稿整理而成，对国外在应用计算机技术于电磁学方面取得的成果有较全面的介绍。全书分七章，分别介绍线天线问题数字解法，电磁散射问题的数字解法，三维域中边界值问题的积分方程解法，波导和波导阵的变分法和迭代法以及逆散射和遥感问题等。每章大都附有应用实例或习题。

本书可供从事电磁理论领域工作的科技工作者、高等学校有关专业的师生、研究生阅读参考。

计算机技术在电磁学中的应用

〔美〕R·米特拉　编著
金　元　松　　译
沙　　踪　　校

●

人 民 邮 电 出 版 社 出 版
北京东长安街27号
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各 地 新 华 书 店 经 售

●

开本：850×1168 1/32　1983年8月 第 一 版
印张：15 16/32 页数：248　1983年8月河北第一次印刷
字数：410 千字　印数：1—7,200 册

统一书号：15045·总2708—无6230

定价：2.40 元

译 者 序

计算机技术在电磁学中的应用作为一门新近发展起来的学科，近年来在国外得到了较大的发展。特别是自从1968年哈林登发表“计算电磁场的矩量法”一文以来，在电磁场的数字计算方法方面，取得了更为显著的发展。

这本书对国外计算机技术在电磁学中的应用方面取得的成果作了比较全面的论述。本书第一章详细介绍了本书各章的内容摘要。

阅读本书，要具备一定的无线电专业数学和电磁理论基础知识。为了对矩量法的实质有比较清楚的了解，读者最好还要掌握线性空间的有关知识。

本书可作为从事电磁理论、电磁波散射及电磁波辐射领域工作的科技工作者、高等学校教师、研究生以及高等学校有关专业的高年级学生的参考书。

在翻译本书的过程中，译者得到了西北电讯工程学院王一平教授和中国电波传播研究所黄宏雄工程师的许多帮助，谨向他们表示衷心的谢意。

由于译者的水平有限，译文中一定有不少错误，恳切希望广大读者批评指正。

译 者

前　　言

计算机技术在电磁学中的应用是一门比较新的且迅速发展着的领域。但是直到现在，关于这个课题的大部分文献都只是在技术杂志或报告中出现，其中有些又不易到手。所以需要有一本关于用计算机技术解应用电磁学中广泛类型实际问题（例如，天线上电流分布的计算；导体或绝缘体雷达散射（截面）的计算；波导和（波导）阵中突变效应的计算；波前及口面场的数字重建；等等）的综合性教科书，希望本书能满足这一要求。

本书手稿是将一九七〇年十月在伊利诺伊斯大学开设的关于这一题目的讨论班上用的教本整理而成。当时要求本课程的每个讲演人都提供其讲课笔记。以后将这些笔记编辑汇集成现在这本书的形式。一九七一年，在丹麦技术大学和丹麦工程协会主持下，把这一课程在哥本哈根重讲了一次，内容上稍微作了一点改动。讲稿两次都受到好评。这对作者们完成修改，校对，编辑稿件的巨大任务是很大的鼓舞。

在准备原稿的过程中，得到了许多个人和组织的鼓励和精神上的支持。由于这些个人和组织为数过多，故不能在此一一列举。但是，作者们愿意利用这个机会感谢同事们给予的慷慨的帮助和建议，这些帮助和建议为改进本书作出了贡献。

原稿在出版前由伦敦大学教授阿力克斯·库林（*Alex Cullen*）作过出色的审阅。他对原稿的评语和批评意见受到欢迎，并对统一本书的叙述和改进本书的内容给了帮助。

本书的最后一次编辑工作是编者（*R．M*）因度假在丹麦林比市丹麦技术大学期间完成的。编者特别感谢在一九七一——一九七二年的半年间，电磁理论研究室主任 *H.L.*克奴生（*H.L.*

Knudsen）教授给予的方便与支持。当然，大部分编辑工作和第六、七章的写作是在伊利诺伊斯大学进行的。编者以愉快的心情，对电学工程系在一九七〇——一九七二年间所给予的支持表示感谢。

伊利诺伊斯州乌尔巴纳
伊利诺伊斯大学
R.米特拉

目　　录

第一章 内容概要

R·米特拉

传统上，与电磁辐射及散射现象有关的边界值问题的解法是建立在解析法的基础之上的，这种方法力图得到能用已知函数表示的闭合形式的解的表达式。由于只能对有限类型的问题能够得到这种解，所以人们常常致力于所谓的第二最好的方法，即求出数字计算量最少的近似解，典型的是级数形式。但是，高速计算机的出现，给电磁学的研究开辟了新的前景，使解决从前被认为是完全超出解析方法范围的多种多样的问题成为可能。

在已有的许多叙述电磁辐射和散射问题的方法中，积分方程法是最适合于计算机解法的。作为历史叙述，在这里提一下，麦克斯韦尔本人（1879）曾试图用一种所谓子面积法的近似方法求有关积分方程的数字解，以解决矩形平板电容的计算问题。

不用说，许多数学分析家已经致力于积分方程方法这一总的题目上。读者可参阅罗维特（*Lovitt*, 1950）、柯罗格(*Kellog*,1953)、莫尔斯和费斯巴兹（*Morse and Feshbach*, 1953）、米哈林（*Mikhlin*, 1957）、特里柯米（*Tricomi*, 1957）、斯米希思（*Smithies*, 1958）的优秀著作和一些论述积分方程的最新著作。对积分方程数字解的讨论见于希尔德布郎和克洛特（*Hildebrand and Crout*, 1941）、克洛特(1946)、杨（1954）、冈特罗维奇和克雷洛夫（*Kantorovich and Krylov*, 1964）、诺布尔（*Noble*, 1966）的著作以及沃尔瑟和德琼（*Walther and Dejon*, 1960）的著作中，在该著作中给出了有关积分方程数字解方面的极好的文献目录。上面列出的名单相当粗略，因为本文并不打算给出有关积分方程方面的参考书目一览表。尽管如此，如果不提及哈林登(*Harrington*, 1968),

那么就未免过于疏忽的了，因为他是第一个发表有关用矩量法(*Moment method*)求解电磁理论中出现的积分方程的著作的人。这一著作现已成为经典著作。

本书中提到的辐射和散射问题的计算机解的大部分讨论是以积分方程的表达法为基础的。这包括第二章的线天线，第三章和第四章的散射、第五章的波导管突变性以及第七章中的逆散射部分。对于第六章中讨论的方法，直接用模匹配法是方便的，这是一种不同于积分方程法的表达方法。最后，在第七章中讨论的有些反演问题是不宜用积分方程法的，而需要用专门的方法来处理。尽管如此，本书中讨论的大部分问题的叙述都是建立在积分方程法的基础之上。

作为例子，考虑一下由一特定源激励的天线电流分布的确定问题。这种问题可以很容易地用非齐次积分方程表达出来。直到计算机出现以前，这种表达常常只是学术性的，但是现在，先将积分方程转换成矩阵方积，再用计算机就可以把它解出来。天线上电流分布，输入阻抗以及辐射方向图等，均可以由积分方程数字解法计算出来。与此相反，在计算机问世之前，解同样问题的技术主要是依赖于变分法、扰动法、渐近法以及其它一些近似法等等。尽管这些方法对于简单的直线天线问题常常能够给出很好的近似解，但是，当用于弯曲天线，装在其它结构附近的天线，或者处理天线阵结构时，很少能给出具有所期望的准确度的结果。相反，计算机技术在原则上能够以任意准确度解决上述所有问题。

现在让我们来谈散射问题。上述有关天线问题的一般叙述同样适用于本书中所谈到的散射问题，但有一个重要的例外。即使是使用现代的大型计算机，也不可能处理大大超出200×200阶的矩阵。这就反过来限制了可以在计算机上解的用照射场波长表示的散射体的大小。对电气上大的散射体散射的通用的求解方法是基于渐近技术的，诸如射线光学法或物理光学法。但是，据报导，近来在用计算机对某一种类型的大散射体的积分方程求解方面有了一些进展

（请看米特拉和李的论文，1972），尽管在这方面尚待作许多的工作。

有许多可供数字分析家使用的把积分方程化成供计算机处理用的矩阵方程的方法。其中的多数可以归类为所谓的“矩量法”。正如在第二、四、五章中所述的那样，这一方法又有许多在数字细节上不同的变形。

一个积分方程可以用符号形式写成

$$L f = g$$

其中L是积分算子，g是已知函数，而f是未知函数。如果用一组基函数ϕ_n展开未知函数，那么上述积分方程可以转换成一个矩阵方程，即

$$f = \sum_{n=1}^{N} C_n \phi_n$$

式中C_n是未知的展开式系数。在解的矩量法中，矩阵方程具有下面的一般形式

$$\sum_{m=1}^{N} C_m \langle \chi_m,\ L\phi_n \rangle = \langle g,\ \chi_m \rangle$$

式中$\langle\,\rangle$是指适当定义的标积，而χ_m是所谓的试验函数。在第二、四、五章中举出了对函数ϕ_n及χ_m的各种选择的例子。只要比较一下予运算的复杂程度及由基函数组的不同选择而得到的最后矩阵的数字大小及性质，就可以从数字角度判定ϕ_n及χ_m的各种不同选择的优缺点。

矩阵方程一般在计算机里是用反演或消去法来求解，有时则用迭代法。这些方法的相对优缺点可以从本书的讨论中，主要是在第四、五章中看出。众所周知，对矩阵反演或消去法计算，在计算机上有现成的标准程序可资利用。

虽然在第二、四、五章中，存在上面所述的连贯性，但由于它们所考虑的问题的类型很不相同，从而它们所采用的具体的数字方法也有很大的区别。线天线或线状散射问题，允许我们只与比较简

单的一般表面电流积分方程的一维变型打交道。但是应当指出，常规的磁场积分方程（*MFIE*）虽然非常适用于（而且事实上最适于）立体表面散射体，但不适合于电气上细的天线或散射体，例如各种形状的线。因此，对这种几何形状的物体，人们就用另一种形式的积分方程，即电场积分方程（*EFIE*）。在采用积分方程的类型上存在的上述差异是区别细的和立体表面结构处理方法的重要特点。在这两种情况下，在用以展开天线（或散射体）的未知电流分布的基函数组ϕ_n的类型上也存在差别。这是因为对一维情形而言，常常可以用解析方法解出某些于使用较简单的，例如，脉冲函数组更为精细的基函数组时产生的积分。使用更精细的基函数组能大大提高计算效率，事实促使人们这样做。这是因为使用这些函数组就能更好地以和的形式描述与未知电流方程有关的积分，因而就能用同样数目的表示电流的未知函数得到更精确的结果。这将在第四章中作较详细的讨论。

对在第五章中谈到的波导型问题，基函数的自然选择常常是相应波导的模态场，因为这时，将积分方程化成矩阵方程时所要作的积分可以以闭合形式积出。这一特性常常成为在将积分方程转换成矩阵方程时选择基函数组的重要考虑之点。当对引出矩阵元素的标积需要进行数字积分时，从总计算时间来看，常常更为有效的是，不选择这样的基函数组和试验函数组，而选用更简单的函数，例如脉冲函数和δ函数。用这些函数时，积分有可能算出为闭合形式。虽然在后一种选择中，要达到同样的准确度，几乎总是要求解比较大的矩阵方程。

现在让我们简单地谈谈在第三章中导出矩阵方程时采用的方法。它是基于所谓广义边界条件或解析开拓方法的，而且在把积分方程转换成矩阵方程的方法上与在第二、四、五章中所采用的方法完全不同。这种根本不同的方法产生的矩阵元素的表达式，自然在性质上也与其它方法所产生的不同。在数字上产生这种矩阵元素并解相应的矩阵方程所需的专门技术是在第三章作了讨论。事实上，

和雷莱假设法（*Rayleigh*，1945）等效（见*Burrows*著作，1969）的广义边界条件法的许多应用，最近出现在有关解栅格体、立体散射问题以及平滑波导问题的文献中。因此，本书以第三章讲这个解决散射问题的另外一种方法。

第六章讨论或许可以称作为混合法的一些有效的数字计算方法。在这章讨论的方法要求在题目进入计算机之前，对它先进行解析予运算。因此，计算的效率和准确度是以要求有一定熟练的数学基础知识进行分析工作做为代价而获得的。这些方法不能用于任意形状的问题中。这是分析性计算机技术的共同特点。但是，一旦这些方法能够应用，那么通常就能以少量的计算时间给出精确而可靠的数字结果。有趣的是，与西方研究人员不同，苏联科学家们对电磁边界值问题大量采用准解析方法，从而导出要求计算机工作量最少的表达式。这或许是早年苏俄高速计算机的发展落后的事实所引起的。当然，同时发展准解析数字技术有其不少可取之处，因为如本章开头所述，即使是大型计算机也有其局限性，而且除非是在普通的情况，一味凭着“蛮劲”使用计算机是不经济的或不实际的。

最后，正如开头提到的，在第七章中论述的许多逆散射问题，要求用完全不同于积分方程方法的叙述方法与求解方法。在电磁领域的工作者，只是在最近才开始注意了逆散射问题的计算机技术。这或许是由于受到遥感领域的兴趣和波前重建技术的发展（在这方面，解析技术的应用范围是非常有限的）的新的冲击的缘故。这就促进了一种专门方法的发展，例如，处理被噪声“混浊”的测量数据，从中提取有关被探测的媒质或散射体的某些相应的信息的技术。有关这样的问题的数字考虑方法就其性质而言，与第二章到第六章中研究的散射问题的考虑方法明显不同。逆散射问题是未来研究的一个重要领域，对遥感的数字领域感兴趣的分析家，正对这个问题予以越来越大的注意。

我们在上面，试图扼要地说明电磁学的计算机领域。我们希望，这个简单的介绍尽管相当粗略，但仍能在读者的心目中引起足