

教育部学位管理与研究生教育司  
推荐研究生教学用书

# 计算电磁学

(第二版)

王秉中 邵 维 编著

COMPUTATIONAL  
ELECTROMAGNETICS



科学出版社

教育部学位管理与研究生教育司推荐研究生教学用书

# 计算电磁学

(第二版)

王秉中 邵 维 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书对第一版做了全面的更新和修订,力求反映计算电磁学领域的基本理论方法和部分最新进展。本书从广义计算电磁学的视角来构建知识体系,涉及电磁场工程 CAD 中的三个核心问题:电磁场问题的数值仿真、高效建模和优化设计。全书共 21 章,在介绍计算电磁学的产生背景、现状和发展趋势的基础上,主要内容涵盖静态场的有限差分法、频域有限差分法、时域有限差分法、矩量法、人工神经网络、空间映射方法、遗传算法和拓扑优化算法等。

本书可供在计算电磁学、电磁场理论和微波工程等领域从事研究和开发的教师和科技人员参考,也可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算电磁学 / 王秉中, 邵维编著. —2 版. —北京: 科学出版社, 2018.11  
教育部学位管理与研究生教育司推荐研究生教学用书  
ISBN 978-7-03-059145-6

I. ①计… II. ①王… ②邵… III. ①电磁计算 IV. ①TM15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 242259 号

责任编辑: 潘斯斯 张丽花 霍明亮 / 责任校对: 郭瑞芝  
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2002 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 11 月第 二 版 印张: 34 1/2

2019 年 2 月第六次印刷 字数: 791 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



## 第二版前言

本书的第一版于 2002 年由科学出版社出版,彼时正值高性能计算技术飞速发展的初创之期,初版书籍围绕电磁场工程计算机辅助设计(CAD)中的数值仿真、高效建模以及优化设计进行了深度与系统的总结,为计算电磁学的教学与科研工作提供了理论指导和案例蓝本。该书获评教育部学位管理与研究生教育司推荐研究生教学用书。而今过去已有十多年时间,计算技术的发展已然日新月异,全世界同仁所取得的新成果也极其丰硕,高性能计算技术不但是电磁学问题中最基础的研究方向之一,而且成为最急需的工具之一,堪称从事电磁场和微波工程研究的入门之刃。为了能够更加系统地阐述计算电磁学的理论基础与工程应用,围绕电磁场工程 CAD 中的三个核心问题,本书在广度与深度上均保持与时俱进的特点。作者根据近年来在教学科研工作的心得和读者阅读本书的反馈,在初版书籍的基础之上进行了增删,加强了本书的系统性、时效性以及实用性。

在本书的系统性方面,在数值仿真部分,再版书籍于第一篇中新增了频域有限差分法、无条件稳定的 LOD-FDTD 方法的原理和算例,以及新增第二篇电磁仿真中的矩量法,使得本书的数值仿真部分囊括了时域方法和频域方法两部分,从而在内容上更为全面;在高效建模部分,再版书籍于第三篇新增了基于误差前传算法的极限学习机,补充了人工神经网络的基础理论框架;在优化设计部分,再版书籍于第四篇新增了空间映射优化方法和拓扑优化算法,得到了理论与方法的全面补充。

在本书的时效性方面,再版书籍在电磁场工程 CAD 中的三个核心问题上均体现出了其前沿性。第一篇的有限差分法部分删去原来的标量时域有限差分法和时域有限差分法的三角形网格及平面型广义 Yee 网格章节,充实目前使用最广泛的共形网格新技术;第二篇矩量法部分介绍空域差分-时域矩量法、子全域基函数矩量法和基于压缩感知理论的矩量法等研究前沿内容;在高效建模部分,第三篇新增基于传递函数的神经网络模型应用的章节,其中着重体现传递函数在当前神经网络电磁建模中的作用;在优化设计方面,第四篇新增几种高性能改进型遗传算法,为读者进行算法应用与改进奠定一定的基础。同时,第四篇还介绍近年来较为流行的空间映射优化方法和混合拓扑优化算法。

再版书籍更加强调整实用性,铺排中讲究计算原理与工程案例相结合。在数值仿真部分,新增基于特征基函数的区域分解法、LOD-FDTD 法、空域差分-时域矩量法、子全域基函数矩量法以及基于压缩感知理论矩量法等数值算例;在高效建模部分,新增神经网络在微波滤波器和天线建模中的工程应用;在优化设计部分,对于新增的空间映射优化方法、改进遗传算法和拓扑优化算法,都给出在器件、电路或天线优化设计中的应用示例,体现算法的优越性与实用性。

对本书第一版修订之时,作者尤其注重内容的整体分析与逻辑思路,以求使读者既能够了解电磁计算的基本原理并由此理解深层理论框架,又能够于基本原理之上掌握特定应用中的处理过程,最终希望能够激发出读者的创造性思维,在计算电磁学领域取得新的突破。

本书的形成与课题组的多年科研工作密切相关,也离不开读者的大力支持。在此需要感

谢国家自然科学基金项目对我们科研工作的资助，感谢电子科技大学计算电磁学实验室的师生所做的卓有成效的研究工作，感谢各位专家同行的反馈与指正。所有这些帮助，全都汇聚于本书的所有字词篇章。最后，对于本书，作者诚挚地希望能够得到读者更多的意见与建议，以促成计算电磁学研究方向的进一步发展。

王秉中 邵 维

2018年于电子科技大学

# 第一版前言

在国际高技术竞争日益激烈的今天，高性能计算技术已成为体现一个国家经济、科学和国防综合实力的重要标志。在许多情况下，或者是理论模型复杂甚至理论模型尚未建立，或者是实验费用昂贵甚至不能进行实验，计算就成为研究这些问题的主要或唯一手段，成为解决挑战性课题的一条重要途径。

电磁场与微波技术学科也不例外，以电磁场理论为基础，以高性能计算机技术为工具和手段，运用计算数学提供的各种方法，诞生了一个解决复杂电磁场理论和工程问题的重要领域——计算电磁学。

现代电磁系统大多是在非常复杂的环境中工作。复杂电磁系统的分析与综合，电磁场与复杂目标相互作用的分析与计算，对计算电磁学提出了各种新要求、新课题。计算电磁学应走向何方？我们认为，在对复杂系统的电磁特性进行严格的电磁仿真基础上，对复杂系统建立起面向 CAD 的快速准确模型，实现具有一定人工智能的电磁场工程专家系统，是该领域研究和发展的三部曲。

本书是作者多年来从事计算电磁学的教学和科研工作的系统总结，涉及电磁场工程 CAD 中的三个核心问题，即电磁场问题的数值仿真、高效建模和优化设计，并力图反映最新的研究动态。全书共四部分。第一部分概述计算电磁学的产生背景、现状和发展趋势，力图使读者对该领域的全貌从总体上有一个正确的把握。第二部分系统地介绍电磁仿真中的有限差分法，从基本理论、关键技术到应用实例都有深入浅出的讲解，力图使读者在学习了这些基本理论和关键技术并经过一定的上机实践后，能很快地运用这些方法解决一些实际问题。第三部分系统地介绍人工神经网络模型在面向 CAD 的高效电磁建模中的应用，重点介绍多层感知器神经网络模型、基于已有知识的神经网络模型在电磁建模中的应用。第四部分系统地介绍遗传算法的基本原理及其在电磁场工程问题优化设计中的应用。

在此，我要衷心感谢国家自然科学基金、霍英东青年教师基金、国家教育部跨世纪优秀人才培养计划基金多年来对我们研究工作的大力支持，对本书的写作完成起到了重要的推动作用。

王秉中

2001 年于电子科技大学

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                 | 1  |
| 1.1 计算电磁学的产生背景           | 1  |
| 1.1.1 高性能计算技术            | 1  |
| 1.1.2 计算电磁学的重要性          | 2  |
| 1.1.3 计算电磁学的研究特点         | 2  |
| 1.2 电磁场问题求解方法分类          | 4  |
| 1.2.1 解析法                | 4  |
| 1.2.2 数值法                | 5  |
| 1.2.3 半解析数值法             | 6  |
| 1.3 当前计算电磁学中的几种重要方法      | 7  |
| 1.3.1 有限元法               | 7  |
| 1.3.2 时域有限差分法            | 9  |
| 1.3.3 矩量法                | 11 |
| 1.4 电磁场工程专家系统            | 12 |
| 1.4.1 复杂系统的电磁特性仿真        | 12 |
| 1.4.2 面向 CAD 的复杂系统电磁特性建模 | 14 |
| 1.4.3 人工智能专家系统           | 15 |
| 参考文献                     | 15 |

## 第一篇 电磁仿真中的有限差分法

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第 2 章 有限差分法           | 21 |
| 2.1 差分运算的基本概念         | 21 |
| 2.2 边值问题(静态场)的差分计算    | 24 |
| 2.2.1 二维泊松方程差分格式的建立   | 24 |
| 2.2.2 介质分界面上边界条件的离散方法 | 26 |
| 2.2.3 边界条件的处理         | 28 |
| 2.2.4 差分方程组的特性和求解     | 30 |
| 2.2.5 数值算例            | 33 |
| 2.3 特征值问题(时谐场)的差分计算   | 42 |
| 2.3.1 纵向场分量的亥姆霍兹方程    | 42 |
| 2.3.2 数值算例            | 44 |
| 参考文献                  | 50 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第 3 章 频域有限差分法                  | 51  |
| 3.1 FDFD 基本原理                  | 51  |
| 3.1.1 Yee 的差分算法和 FDFD 差分格式     | 51  |
| 3.1.2 介质交界面上的差分方程              | 53  |
| 3.1.3 数值色散                     | 54  |
| 3.2 吸收边界条件                     | 56  |
| 3.2.1 频域单向波方程和 Mur 吸收边界条件      | 57  |
| 3.2.2 边界积分方程截断边界               | 59  |
| 3.2.3 基于解析模式匹配法的截断边界条件         | 64  |
| 3.3 总场/散射场体系和近远场变换             | 67  |
| 3.3.1 总场/散射场中的激励源引入            | 67  |
| 3.3.2 近区场到远区场的变换               | 68  |
| 3.4 数值算例                       | 71  |
| 3.4.1 特征值问题的求解                 | 71  |
| 3.4.2 散射问题的求解                  | 79  |
| 参考文献                           | 83  |
| 第 4 章 时域有限差分法 I ——差分格式及解的稳定性   | 84  |
| 4.1 FDTD 基本原理                  | 84  |
| 4.1.1 Yee 的差分算法                | 84  |
| 4.1.2 环路积分解释                   | 88  |
| 4.2 解的稳定性条件                    | 90  |
| 4.3 非均匀网格                      | 92  |
| 4.3.1 渐变非均匀网格                  | 93  |
| 4.3.2 局部细网格                    | 95  |
| 4.4 共形网格                       | 98  |
| 4.4.1 细槽缝问题                    | 98  |
| 4.4.2 弯曲理想导体表面的 Dey-Mitra 共形技术 | 99  |
| 4.4.3 弯曲理想导体表面的 Yu-Mitra 共形技术  | 100 |
| 4.4.4 弯曲介质表面的共形技术              | 101 |
| 4.5 半解析数值模型                    | 102 |
| 4.5.1 细导线问题                    | 102 |
| 4.5.2 增强细槽缝公式                  | 103 |
| 4.5.3 小孔耦合问题                   | 105 |
| 4.5.4 薄层介质问题                   | 107 |
| 4.6 良导体中的差分格式                  | 110 |
| 参考文献                           | 112 |
| 第 5 章 时域有限差分法 II ——吸收边界条件      | 113 |
| 5.1 Bayliss-Turkel 吸收边界条件      | 113 |
| 5.1.1 球坐标系                     | 113 |
| 5.1.2 圆柱坐标系                    | 115 |



|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 5.2 Engquist-Majda 吸收边界条件    | 116        |
| 5.2.1 单向波方程和 Mur 差分格式        | 116        |
| 5.2.2 Trefethen-Halpern 近似展开 | 121        |
| 5.2.3 Higdon 算子              | 122        |
| 5.3 廖氏吸收边界条件                 | 123        |
| 5.4 Berenger 完全匹配层           | 126        |
| 5.4.1 PML 媒质的定义              | 126        |
| 5.4.2 PML 媒质中平面波的传播          | 127        |
| 5.4.3 PML-PML 媒质分界面处波的传播     | 129        |
| 5.4.4 用于 FDTD 的 PML          | 131        |
| 5.4.5 三维情况下的 PML             | 135        |
| 5.4.6 PML 的参数选择              | 138        |
| 5.4.7 减小反射误差的措施              | 139        |
| 5.5 Gedney 完全匹配层             | 142        |
| 5.5.1 完全匹配单轴媒质               | 142        |
| 5.5.2 FDTD 差分格式              | 146        |
| 5.5.3 交角区域的差分格式              | 151        |
| 5.5.4 PML 的参数选取              | 152        |
| 参考文献                         | 153        |
| <b>第 6 章 时域有限差分法 III——应用</b> | <b>154</b> |
| 6.1 激励源技术                    | 154        |
| 6.1.1 强迫激励源                  | 154        |
| 6.1.2 总场/散射场体系               | 157        |
| 6.2 集总参数电路元件的模拟              | 160        |
| 6.2.1 扩展 FDTD 方程             | 160        |
| 6.2.2 集总参数电路元件举例             | 161        |
| 6.3 数字信号处理技术                 | 164        |
| 6.3.1 极点展开模型与 Prony 算法       | 164        |
| 6.3.2 线性及非线性信号预测器模型          | 165        |
| 6.3.3 系统识别方法及数字滤波器模型         | 167        |
| 6.4 应用举例                     | 169        |
| 6.4.1 均匀三线互连系统               | 169        |
| 6.4.2 同轴线馈电天线                | 171        |
| 6.4.3 多体问题                   | 173        |
| 6.4.4 同轴-波导转换器               | 175        |
| 6.4.5 波导元件的高效分析              | 177        |
| 6.4.6 传输线问题的降维处理             | 179        |
| 参考文献                         | 185        |
| <b>第 7 章 无条件稳定的 FDTD 方法</b>  | <b>186</b> |
| 7.1 ADI-FDTD 法               | 186        |

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
| 7.1.1 | ADI-FDTD 差分格式                   | 187 |
| 7.1.2 | ADI-FDTD 解的稳定性                  | 192 |
| 7.1.3 | ADI-FDTD 的吸收边界条件                | 197 |
| 7.1.4 | 应用举例                            | 206 |
| 7.2   | LOD-FDTD 方法                     | 216 |
| 7.2.1 | 二维 LOD-FDTD 差分格式                | 216 |
| 7.2.2 | 二维 LOD-FDTD 解的稳定性               | 219 |
| 7.2.3 | Berenger 的 PML 媒质中的 LOD-FDTD 格式 | 221 |
| 7.2.4 | LOD-FDTD 中的共形网格技术               | 223 |
| 7.2.5 | 高阶 LOD-FDTD 方法                  | 224 |
| 7.2.6 | 应用举例                            | 228 |
| 7.3   | Newmark-Beta-FDTD 方法            | 231 |
| 7.3.1 | Newmark-Beta-FDTD 差分格式          | 231 |
| 7.3.2 | Newmark-Beta-FDTD 解的稳定性         | 235 |
| 7.3.3 | Newmark-Beta-FDTD 的数值色散分析       | 237 |
| 7.3.4 | 应用举例                            | 238 |
|       | 参考文献                            | 240 |

## 第二篇 电磁仿真中的矩量法

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 第 8 章 | 矩量法基本原理                           | 245 |
| 8.1   | 矩量法原理                             | 245 |
| 8.1.1 | 矩量法基本概念                           | 245 |
| 8.1.2 | 矩量法中的权函数                          | 246 |
| 8.1.3 | 矩量法中的基函数                          | 246 |
| 8.2   | 静电场中的矩量法                          | 248 |
| 8.2.1 | 一维平行板电容器                          | 248 |
| 8.2.2 | 一维带电细导线                           | 249 |
| 8.2.3 | 二维带电导体平板                          | 250 |
|       | 参考文献                              | 251 |
| 第 9 章 | 空域差分-时域矩量法                        | 252 |
| 9.1   | SDFD-TDM 法                        | 252 |
| 9.1.1 | SDFD-TDM 法的基本原理                   | 252 |
| 9.1.2 | 基于分域三角基函数和 Galerkin 法的 SDFD-TDM 法 | 255 |
| 9.2   | Laguerre-FDTD 法                   | 261 |
| 9.2.1 | Laguerre-FDTD 法公式体系               | 261 |
| 9.2.2 | Laguerre-FDTD 法二阶 Mur 吸收边界条件      | 266 |
| 9.2.3 | 实数域的 Laguerre-FDTD 法二维全波压缩格式      | 267 |
| 9.2.4 | 非正交坐标系的 Laguerre-FDTD 法           | 270 |

|               |                              |            |
|---------------|------------------------------|------------|
| 9.2.5         | 色散介质中的 ADE-Laguerre-FDTD 法   | 275        |
| 9.2.6         | Laguerre-FDTD 法的色散分析和关键参数选取  | 278        |
| 9.2.7         | 区域分解 Laguerre-FDTD 法及在散射中的应用 | 281        |
| 9.2.8         | 基于节点变量的区域分解 Laguerre-FDTD 方法 | 286        |
|               | 参考文献                         | 289        |
| <b>第 10 章</b> | <b>积分方程</b>                  | <b>291</b> |
| 10.1          | 积分方程和格林函数                    | 291        |
| 10.1.1        | 积分方程的推导                      | 291        |
| 10.1.2        | 三维格林函数                       | 292        |
| 10.1.3        | 二维格林函数                       | 293        |
| 10.2          | 磁矢量位和远场近似                    | 294        |
| 10.2.1        | 磁矢量位                         | 294        |
| 10.2.2        | 远场表达式                        | 295        |
| 10.3          | 表面积分方程                       | 297        |
| 10.3.1        | 理想导体散射场的等效原理                 | 297        |
| 10.3.2        | 理想导体的表面积分方程                  | 297        |
| 10.4          | 细导线的线积分方程                    | 300        |
| 10.4.1        | 细线近似                         | 300        |
| 10.4.2        | 细线天线的激励源                     | 301        |
|               | 参考文献                         | 302        |
| <b>第 11 章</b> | <b>矩量法应用</b>                 | <b>303</b> |
| 11.1          | 一维线天线的辐射                     | 303        |
| 11.1.1        | Hallen 积分方程的求解               | 303        |
| 11.1.2        | Pocklington 方程的求解            | 305        |
| 11.2          | 二维金属目标的散射                    | 307        |
| 11.2.1        | 二维金属薄条带的散射                   | 307        |
| 11.2.2        | 二维金属柱体的散射                    | 310        |
| 11.3          | 三维金属目标的散射                    | 312        |
|               | 参考文献                         | 314        |
| <b>第 12 章</b> | <b>子全域基函数法</b>               | <b>315</b> |
| 12.1          | 子全域基函数法原理                    | 315        |
| 12.1.1        | 一维周期结构的子全域基函数法               | 315        |
| 12.1.2        | 二维周期结构的子全域基函数法               | 317        |
| 12.2          | 子全域基函数法中阻抗矩阵的快速填充计算          | 319        |
| 12.2.1        | 阻抗矩阵元素计算技术                   | 319        |
| 12.2.2        | 一维周期结构中阻抗矩阵的快速填充计算           | 320        |
| 12.2.3        | 二维周期结构中阻抗矩阵的快速填充计算           | 321        |
| 12.3          | 子全域基函数法的应用                   | 323        |
| 12.3.1        | 混合有限周期结构                     | 323        |
| 12.3.2        | 金属天线阵列分析                     | 324        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 参考文献                       | 325        |
| <b>第 13 章 基于压缩感知理论的矩量法</b> | <b>326</b> |
| 13.1 压缩感知理论                | 327        |
| 13.2 基于压缩感知理论的矩量法原理        | 328        |
| 13.2.1 权函数冗余性与解的稀疏性        | 328        |
| 13.2.2 数学描述                | 329        |
| 13.2.3 物理解释                | 330        |
| 13.2.4 计算复杂度分析             | 331        |
| 13.3 数值算例                  | 331        |
| 13.3.1 带电细导线的电荷密度分布        | 331        |
| 13.3.2 带电导体平板的电荷密度分布       | 333        |
| 13.3.3 Hallen 积分方程求解双臂振子天线 | 335        |
| 13.3.4 二维金属圆柱散射            | 335        |
| 13.4 压缩感知矩量法方程的快速构造和求解     | 336        |
| 13.4.1 阻抗矩阵快速填充的基本思想       | 336        |
| 13.4.2 阻抗矩阵快速填充方法的数学描述     | 337        |
| 13.4.3 压缩感知矩量法方程的快速求解      | 338        |
| 13.4.4 计算复杂度分析             | 339        |
| 13.4.5 计算实例                | 340        |
| 参考文献                       | 344        |

### 第三篇 电磁建模中的人工神经网络

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>第 14 章 人工神经网络模型</b>     | <b>349</b> |
| 14.1 生物神经元                 | 349        |
| 14.2 人工神经元模型               | 350        |
| 14.2.1 单端口输入神经元            | 350        |
| 14.2.2 活化函数                | 350        |
| 14.2.3 多端口输入神经元            | 353        |
| 14.3 多层感知器神经网络             | 353        |
| 14.3.1 单层前传网络              | 353        |
| 14.3.2 多层前传网络              | 354        |
| 14.4 多层感知器的映射能力            | 355        |
| 14.5 多样本输入并行处理             | 356        |
| 参考文献                       | 357        |
| <b>第 15 章 用回传算法训练多层感知器</b> | <b>358</b> |
| 15.1 神经网络的学习能力             | 358        |
| 15.1.1 受控学习方式              | 358        |
| 15.1.2 误差校正算法              | 359        |

|               |                        |            |
|---------------|------------------------|------------|
| 15.2          | 误差回传算法                 | 360        |
| 15.2.1        | delta 法则               | 360        |
| 15.2.2        | 训练模式                   | 366        |
| 15.2.3        | 回传算法的改进                | 368        |
| 15.3          | 误差前传算法                 | 374        |
| 15.3.1        | 具有隐含层节点随机分配的单层前馈型神经网络  | 374        |
| 15.3.2        | 前馈型神经网络最小范数的最小二乘解      | 376        |
| 15.3.3        | 前传算法的改进                | 377        |
| 15.4          | 将受控学习看作函数最优化问题         | 379        |
| 15.4.1        | 共轭梯度法                  | 379        |
| 15.4.2        | 牛顿法                    | 380        |
| 15.4.3        | Levenberg-Marquardt 近似 | 381        |
| 15.5          | 网络推广                   | 382        |
| 15.5.1        | 训练集合大小的确定              | 382        |
| 15.5.2        | 网络结构的优化                | 383        |
|               | 参考文献                   | 384        |
| <b>第 16 章</b> | <b>神经网络建模的试验设计</b>     | <b>385</b> |
| 16.1          | 正交试验设计                 | 386        |
| 16.1.1        | 全组合正交试验设计              | 386        |
| 16.1.2        | 方螺旋电感的神经网络模型           | 386        |
| 16.1.3        | 微带协同馈电系统的神经网络模型        | 389        |
| 16.1.4        | 带状线间隙不连续性的神经网络模型       | 390        |
| 16.1.5        | 部分组合正交试验设计             | 393        |
| 16.2          | 中心组合试验设计               | 397        |
| 16.2.1        | 中心组合试验设计               | 397        |
| 16.2.2        | 单层间互连结构的神经网络模型         | 398        |
| 16.2.3        | 带状线双层间互连结构的神经网络模型      | 401        |
| 16.2.4        | 同轴-波导转换器的神经网络模型        | 405        |
| 16.3          | 随机组合试验设计               | 407        |
| 16.3.1        | 高速互连结构的神经网络模型          | 407        |
| 16.3.2        | 数值算例                   | 408        |
|               | 参考文献                   | 411        |
| <b>第 17 章</b> | <b>知识人工神经网络模型</b>      | <b>412</b> |
| 17.1          | 外挂式知识人工神经网络模型          | 412        |
| 17.1.1        | 差值模型和 PKI 模型           | 412        |
| 17.1.2        | 输入参数空间映射模型             | 414        |
| 17.1.3        | 主要元素项分析                | 415        |
| 17.1.4        | 稳健的知识人工神经网络模型          | 417        |
| 17.2          | 嵌入式知识人工神经网络模型          | 419        |
| 17.2.1        | 知识人工神经元                | 419        |



|               |                          |            |
|---------------|--------------------------|------------|
| 17.2.2        | 知识人工神经元三层感知器             | 420        |
| 17.2.3        | 应用实例                     | 421        |
| 参考文献          |                          | 425        |
| <b>第 18 章</b> | <b>基于传递函数的神经网络模型应用</b>   | <b>427</b> |
| 18.1          | 传递函数                     | 427        |
| 18.2          | ELM 的微波滤波器建模             | 428        |
| 18.3          | 基于数据挖掘技术的超宽带天线建模         | 433        |
| 18.3.1        | 数据挖掘技术                   | 433        |
| 18.3.2        | 单阻带超宽带天线的神经网络建模          | 435        |
| 18.4          | 多性能参数的天线建模               | 437        |
| 18.4.1        | 多输出参数的人工神经网络建模           | 437        |
| 18.4.2        | Fabry-Perot 谐振天线的多性能参数建模 | 439        |
| 参考文献          |                          | 443        |

## 第四篇 电磁设计中的优化方法

|               |                            |            |
|---------------|----------------------------|------------|
| <b>第 19 章</b> | <b>空间映射优化方法</b>            | <b>447</b> |
| 19.1          | 空间映射优化基本思想                 | 447        |
| 19.2          | 初始空间映射优化方法及应用              | 449        |
| 19.2.1        | 初始空间映射算法                   | 450        |
| 19.2.2        | 初始空间映射算法优化 LTCC 等效集总参数(电容) | 451        |
| 19.3          | 渐进空间映射优化方法及应用              | 456        |
| 19.3.1        | 渐进空间映射算法                   | 456        |
| 19.3.2        | 渐进空间映射方法优化 LTCC 中的过孔过渡结构   | 459        |
| 19.3.3        | 基于知识的渐进空间映射方法优化 LTCC 滤波器   | 462        |
| 参考文献          |                            | 464        |
| <b>第 20 章</b> | <b>遗传算法</b>                | <b>466</b> |
| 20.1          | 基本的遗传算法                    | 467        |
| 20.1.1        | 基本遗传算法的描述                  | 467        |
| 20.1.2        | 应用遗传算法的准备工作                | 470        |
| 20.1.3        | 遗传操作                       | 475        |
| 20.2          | 遗传算法的特点及数学机理               | 479        |
| 20.2.1        | 遗传算法的特点                    | 479        |
| 20.2.2        | 遗传算法的数学机理                  | 481        |
| 20.3          | 遗传算法在电磁优化中的应用              | 484        |
| 20.3.1        | 天线及天线阵的优化设计                | 484        |
| 20.3.2        | 平面型带状结构的优化设计               | 491        |
| 20.4          | 改进的遗传算法及其应用                | 495        |
| 20.4.1        | 自适应量子遗传算法                  | 495        |

---

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 20.4.2 自适应多目标遗传算法 .....    | 499        |
| 20.4.3 跳变基因多目标遗传算法 .....   | 508        |
| 参考文献 .....                 | 514        |
| <b>第 21 章 拓扑优化算法 .....</b> | <b>516</b> |
| 21.1 混合拓扑优化算法 .....        | 517        |
| 21.1.1 敏感度分析 .....         | 517        |
| 21.1.2 混合拓扑优化方法 .....      | 520        |
| 21.2 天线的拓扑优化 .....         | 524        |
| 21.2.1 窄带定向微带天线 .....      | 524        |
| 21.2.2 可重构像素微带天线 .....     | 527        |
| 21.2.3 离散旋转对称天线 .....      | 530        |
| 参考文献 .....                 | 533        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 计算电磁学的产生背景

### 1.1.1 高性能计算技术

现代科学研究的基本模式是“科学实验、理论分析、高性能计算”三位一体。在国际高技术竞争日益激烈的今天，高性能计算技术已经成为体现一个国家经济、科学和国防实力的重要标志，成为解决挑战性课题的一个根本途径。因此，在全球范围展开的高性能计算技术的竞争又呈白热化态势。

硬件和软件是高性能计算技术的两个组成部分。

从硬件方面来看，以计算技术开发领先的美国为例，为了保持其在世界上的领先地位，它早在 1993 年就由国会通过了高性能计算与通信(High Performance Computing and Communications, HPCC)计划。而后，美国国家科学基金会、能源部、国防部、教育部、卫生部、国家航空航天局、国家安全局、国家环境保护局、国家海洋和大气管理局陆续参与了这一计划。更快的运算速度、更大容量的内存是高性能计算机努力追求的目标。随着单处理机的速度越来越趋近物理极限，高性能计算机必须走大规模并行处理之路，大规模并行处理的突破口是并行计算机模型。此外，基于一些新材料、新工艺的新型计算机，如光互连技术、超导体计算机、量子计算机和分子计算机等的研究也在持续升温。

从软件方面来看，算法是软件的核心，是计算机的灵魂。对一个给定的计算机系统而言，其解决问题的能力和工作效率是由算法来决定的。目前计算机所做的信息处理大致分为一般问题和难解问题。对于一般问题，人们可以找到有效算法使计算机可以在能够容忍的时间和空间内解决这些问题。而对于难解问题，人们很难找到快速有效的算法。当被处理问题规模增大时，计算机的计算量有可能成百倍、成千倍呈指数型地增长，最终在时间和空间上超出计算机的实际计算能力。几十年来，计算机理论学者和算法专家一直在致力于寻找对一般问题的实时高性能算法和对大规模难解问题的快速算法。

科学和工程计算的高速进步，是 20 世纪后半叶最重要的科技进步。随着计算机和计算方法的飞速发展，高性能科学和工程计算取得了日新月异的进步，几乎所有学科都走向定量化和精确化，从而产生了一系列的计算性学科分支，如计算物理、计算化学、计算生物学、计算地质学、计算气象学和计算材料科学等，而计算数学则是它们的联系纽带和共性基础。这就使得计算数学这个古老的数学科目成为现代数学中一个生机盎然的分支，并发展成为一门新的学科——科学与工程计算。

利用高性能计算机，可以对新研究的对象进行数值模拟和动态显示，获得由实验很难得到甚至根本得不到的科学结果。在许多情况下，或者是理论模型复杂甚至理论模型尚未建立，或者是实验费用昂贵甚至不能进行实验，计算就成为解决这些问题的唯一或主要手段。高性能计算技术极大地提高了高科技研究的能力，加速了把科学技术转化为生产力的过程，深刻

地影响着人类认识世界和改造世界的方法与途径，正推动着当代科学向更纵深的方向发展。

高性能计算是我国在世界科技领域占有一席之地之学科方向之一。在计算机硬件远落后于发达国家的不利条件下，我们充分发挥自己的智力优势，在核武器研制、火箭卫星发射、石油勘探、大地测量、水坝建筑、气象预报、生态环境监测等领域都取得了举世瞩目的成绩。

### 1.1.2 计算电磁学的重要性

与高性能计算技术发展同步，在电磁场与微波技术学科，以电磁场理论为基础，以高性能计算技术为工具和手段，运用计算数学提供的各种方法，诞生了一门解决复杂电磁场理论和工程问题的应用科学——计算电磁学(computational electromagnetics, CEM)，它是一门新兴的边缘科学。

电磁场理论的早期发展是和无线电通信、雷达的发展分不开的，它主要应用在军事领域。现在，电磁场理论的应用已经遍及地学、生命科学和医学、材料科学和信息科学等几乎所有的技术科学领域。计算电磁学的研究内容涉及面很广，它渗透到电磁学的各个领域，与电磁场理论、电磁场工程互相联系、互相依赖，相辅相成。计算电磁学对电磁场工程而言，是要解决实际电磁场工程中越来越复杂的电磁场问题的建模与仿真、优化与设计等问题；而电磁场工程也为之提供实验结果，以验证其计算结果的正确性。对电磁场理论而言，计算电磁学研究可以为电磁场理论研究提供进行复杂的数值及解析运算的方法、手段和计算结果；而电磁场理论的研究也为计算电磁学研究提供了电磁规律、数学方程，进而验证计算电磁学研究所计算的结果。

计算电磁学对电磁场理论发展的影响绝不仅仅是提供一个计算工具的问题，而是使整个电磁场理论的发展发生了革命性的变革。毫不夸张地说，近二三十年来，电磁场理论本身的发展，无一不是与计算电磁学的发展相联系的。目前，计算电磁学已成为对复杂体系的电磁规律、电磁性质进行研究的重要手段，为电磁场理论研究开辟了新的途径，对电磁场工程的发展起了极大的推动作用。

### 1.1.3 计算电磁学的研究特点

计算电磁学研究的第一步是对电磁问题进行分析，抓住主要因素，忽略各种次要因素，建立起相应的电磁、数学模型。在这一点上与电磁场理论的做法极为相似。在电磁、数学模型确定之后，就是要选择算法并使之在计算机上实现。

首先来讨论算法。对确定的数学模型，可以采用数值或非数值计算来求解。这项工作也是计算数学讨论的主要内容，也是计算电磁学的基础。由于现代程序存储是通用数字电子计算机的内在特点，它实质上只能做比加法略微多一些的运算和操作。而从实际问题建立起的复杂数学模型往往是以微分或积分方程等形式表示出来的。表面上，计算机所提供的处理能力与所要求解的问题的差距是相当大的。沟通这一鸿沟的就是算法。算法可以简单地认为是在解决具体问题时，计算机所能执行的步骤。算法将一个复杂问题化为简单问题，简单问题再化为基本问题，基本问题再化为计算机能够执行的运算。算法选取的好坏是影响到能否计算出结果、精度高低或计算量大小的关键。以快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)