



北京市高等教育精品教材立项项目

高等院校信息与通信工程系列教材

计算电磁学的数值方法

吕英华 编著

清华大学出版社



北京市高等教育精品教材立项项目



高等院校信息与通信工程系列教材

计算电磁学的数值方法

吕英华 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面介绍了计算电磁学中的数值方法,着重阐述了计算科学方法的基础以及如何应用数值建模分析,内容包括数学分析、计算数学、泛函分析、计算机结构和算法结构、计算机软件和电磁工程建模等知识,突出了学科交叉和边缘化的特点。

本书是在作者多年教学实践经验的基础上编写的。它可作为通信工程、电子信息工程、电子科学与技术专业高年级学生和电磁场与微波专业研究生的教材,也可供从事应用物理学、生物医学工程、机械结构设计的人员学习参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

计算电磁学的数值方法/吕英华编著. —北京:清华大学出版社,2006.6

(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 7-302-12090-0

I. 计… II. 吕… III. 电磁计算—数值计算—高等学校—教材 IV. TM15

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第130845号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:陈国新

文稿编辑:顾 冰

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:31.25 字数:736千字

版 次:2006年6月第1版 2006年6月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-12090-0/TN·288

印 数:1~3000

定 价:39.80元

高等院校信息与通信工程系列教材编委会

主 编：陈俊亮

副 主 编：李乐民 张乃通 邬江兴

编 委（排名不分先后）：

王 京 韦 岗 朱近康 朱世华

邬江兴 李乐民 李建东 张乃通

张中兆 张思东 严国萍 刘兴钊

陈俊亮 郑宝玉 范平志 孟洛明

袁东风 程时昕 雷维礼 谢希仁

责任编辑：陈国新

出版说明

信息与通信工程学科是信息科学与技术的重要组成部分。改革开放以来,我国在发展通信系统与信息系统方面取得了长足的进步,形成了巨大的产业与市场,如我国的电话网络规模已占世界首位,同时该领域的一些分支学科出现了为国际认可的技术创新,得到了迅猛的发展。为满足国家对高层次人才的迫切需求,当前国内大量高等学校设有信息与通信工程学科的院系或专业,培养大量的本科生与研究生。为适应学科知识不断更新的发展态势,他们迫切需要内容新颖又符合教改要求的教材和教学参考书。此外,大量的科研人员与工程技术人员也迫切需要学习、了解、掌握信息与通信工程学科领域的基础理论与较为系统的前沿专业知识。为了满足这些读者对高质量图书的渴求,清华大学出版社组织国内信息与通信工程国家级重点学科的教学与科研骨干以及本领域的一些知名学者、学术带头人编写了这套高等院校信息与通信工程系列教材。

该套教材以本科电子信息工程、通信工程专业的专业必修课程教材为主,同时包含一些反映学科发展前沿的本科选修课程教材和研究生教学用书。为了保证教材的出版质量,清华大学出版社不仅约请国内一流专家参与了丛书的选题规划,而且每本书在出版前都组织全国重点高校的骨干教师对作者的编写大纲和书稿进行了认真审核。

祝愿《高等院校信息与通信工程系列教材》为我国培养与造就信息与通信工程领域的高素质科技人才,推动信息科学的发展与进步做出贡献。

北京邮电大学

陈俊亮

2004年9月

前 言

现有的教材可以分成“计算方法”和“电磁场数值计算”两大类。“计算方法”教材的内容侧重于计算方法的基本原理与方法,属于大学理科教材,可以用于工科研究生使用。其内容主要是数值计算和数值处理的基本方法,主要的内容和训练仍然是有限差分法的范畴,距离计算电磁学和计算物理学的实际需要差距很大。“电磁场数值计算”结合电磁工程的需要阐述了电磁场数值计算中常用的几种方法,可用于电磁场类专业的研究生使用。其内容主要是关于定量分析各类工程电磁学问题所需要的算法及实施过程。该类教材包括了数值积分法、有限差分法、有限元法、矩量法、边界元法等方法,但是对各种方法的数理基础阐述深度不够,而且仍然是基于数值计算方法的,其内容在结合电磁场理论、计算机科学和计算数学方面显得不足,没有满足应用计算机实现对真实世界的模拟和理解的研究需要,没有提供针对工程设计和实现的新的思维和试验方法,没有反映已经形成的独立的交叉科学——计算科学的精神和内容。因此,电磁专业的读者学习之后只能模仿教科书的方法而不能创新,应用数学或计算机专业的读者由于不很清楚电磁学理论和电磁工程而无法应用书中的方法解决电磁学实际问题。实际上,计算电磁学是20世纪90年代在电磁学、计算数学和计算机科学的基础上产生的新的基于近代计算机平台的交叉科学,创造了对世界的模拟和理解的新的途径,创造了新的思维和试验方法。为了满足计算电磁学乃至计算科学发展和应用的需求,笔者产生了编写本教材的想法,尽管教材内容很不完善、甚至存在某些错误,但是作者期望能在新的思路编写出反映交叉科学特点的教材。

本书把计算电磁学作为独立的交叉科学。在此方针指导下,书中尽量介绍使用计算数学及近代数学工具,结合计算机科学方法和过程,目标明确地指向电磁学理论及应用的需要。书的结构尽量吸收国内外一些优秀的计算物理学方法和电磁计算方法书籍的写法,以电磁工程应用为目的,加强电磁学原理的近代数学表述和数学物理方法论的内容;按照计算电磁学中的数值方法分类,专题阐述各类工程电磁学问题所需要的算法及实施过程。书中在突出阐述计算电磁学的数值方法的同时,还特别强调和具体阐述了处理电磁学问题由连续的物理空间映射到分立的数值空间时所产生的变化的物理含意和产生的影响;强调计算电磁学的数值方法及实施过程的特点以及每一步骤的物理概念;突出了把近代计算机及计算机网络技术应用到电磁学问题进行数值建模时所需要的知识结构和创新的概念。笔者认为,只有这样才能把计算科学方法与实际的物理问题和实际的工程问题结合起来,才能真正地应用计算机工具探索世界,才能获得新知识。希望本书能满足从事计算电磁学学习和研究的人员的需求,能对从事计算物理学研究工作的读者有一定的参考价值。

计算科学包括计算物理学、计算化学、计算电磁学等,已经成长为独立的交叉科学,显然,作为这门新的交叉科学的应用数学基础应当是计算科学的数值方法。由于计算科学的数值方法对新交叉科学的成熟非常重要,所以,作者力图把本书写成理论与应用并重、兼顾教学与科研开发的需要、兼顾计算电磁学特点与其他科学需要的精品图书。由于作者的水平和精力有限,本书难免会有错误和不足之处,欢迎广大读者批评指正。

吕英华

于北京邮电大学

2006年3月

目 录

第 1 章 电磁工程建模与计算电磁学	1
1.1 电磁工程建模的数值方法	1
1.2 计算电磁学的数值方法比较及电磁工程建模过程	3
第 2 章 并行计算机与并行算法的基本原理	6
2.1 并行计算机的基本结构	6
2.1.1 并行化是数值计算的必然趋势.....	6
2.1.2 并行计算机的系统结构.....	8
2.1.3 并行机系统结构分类	10
2.1.4 计算机程序性能的系统属性	14
2.2 程序逻辑拓扑和计算机数据通信网络拓扑的基本特性.....	16
2.2.1 并行性分析	16
2.2.2 系统互连结构	22
2.3 并行性能描述与度量.....	29
2.3.1 描述及度量并行性能的指标	29
2.3.2 评价并行计算性能的参数	33
2.4 并行计算的可扩展性原理.....	35
2.4.1 并行计算机应用模式	35
2.4.2 并行算法的可扩展性	36
2.4.3 根据性能价格比决定计算机系统的规模	40
2.4.4 并行机软件概述	42
第 3 章 蒙特卡罗法	45
3.1 蒙特卡罗法的基本原理.....	45
3.1.1 蒙特卡罗法的基本过程	46
3.1.2 蒙特卡罗法的基本问题	48
3.1.3 蒙特卡罗法的特点	50
3.1.4 蒙特卡罗法待研究的若干问题	51
3.1.5 随机变量的基本规律	51
3.1.6 大数定律及中心极限定理的一般形式	53

3.1.7	4 个常见的中心极限定理	54
3.1.8	几种常见的概率模型和分布	56
3.1.9	蒙特卡罗法简单应用举例	58
3.2	伪随机数	59
3.2.1	简单子样	59
3.2.2	随机数与伪随机数	60
3.2.3	产生伪随机数的几种方法	61
3.2.4	伪随机数的检验	64
3.3	随机变量的抽样	65
3.3.1	直接抽样方法	65
3.3.2	舍选抽样方法	68
3.3.3	复合抽样方法	73
3.3.4	近似抽样方法	77
3.3.5	变换抽样方法	77
3.3.6	若干重要分布的抽样	80
3.4	蒙特卡罗法在确定性问题中的应用	82
3.4.1	用蒙特卡罗法求解线性代数方程	82
3.4.2	矩阵求逆	83
3.4.3	求解线性积分方程	84
3.4.4	蒙特卡罗法用于积分运算	84
3.5	蒙特卡罗法在随机问题中的应用	87
3.5.1	布朗运动	88
3.5.2	随机游动问题	90
3.6	分形的数学基础	91
3.6.1	自相似性和分形	91
3.6.2	分形的数学基础	92
3.6.3	限制性的扩散凝聚分形生长的模拟	96
3.6.4	复杂生物形态的模拟	99
3.7	雷达检测的蒙特卡罗仿真	104
3.7.1	原理	104
3.7.2	蒙特卡罗仿真方法	105
第 4 章	有限差分法	108
4.1	有限差分法基础	108
4.1.1	有限差分法的基本概念	108
4.1.2	欧拉近似	109
4.1.3	梯形法则和龙格-库塔法	110
4.2	二维泊松方程和拉普拉斯方程的有限差分法	116

4.2.1	建立差分格式	117
4.2.2	不同介质分界面上连接条件的离散方法和差分格式	119
4.2.3	其他形式的网格及边界条件	124
4.3	超松弛迭代法以及有限差分法的误差	126
4.3.1	有限差分法求解的一般过程	126
4.3.2	超松弛迭代法	127
4.3.3	有限差分法的收敛性和稳定性	133
4.4	轴对称场的差分格式与蒙特卡罗法应用	134
4.4.1	轴对称场的差分格式	134
4.4.2	蒙特卡罗法应用	134
4.5	抛物型和双曲型偏微分方程的有限差分法	135
4.5.1	抛物型偏微分方程的有限差分法	135
4.5.2	双曲型偏微分方程的有限差分法	140
第 5 章	时域有限差分法	143
5.1	时域有限差分法概述	143
5.1.1	时域有限差分法的特点	143
5.1.2	电磁场旋度方程	145
5.1.3	分裂场形式	146
5.1.4	理想导体的 FDTD 公式	148
5.1.5	损耗媒质的情况	148
5.2	FDTD 基础	149
5.2.1	使用 FDTD 的影响因素	149
5.2.2	Yee 单元网格空间中电磁场的量化关系	150
5.2.3	决定单元的空间尺寸	151
5.2.4	离散化的麦克斯韦方程	152
5.3	数值色散、数值稳定性分析	154
5.3.1	时间本征值	154
5.3.2	空间本征值	156
5.3.3	数值稳定条件	156
5.3.4	数值色散	157
5.4	建立 Yee 单元网格空间	160
5.4.1	入射场求解	160
5.4.2	理想导体的 FDTD 编程	163
5.4.3	损耗媒质的情况	165
5.4.4	建立 Yee 单元模拟空间结构	167
5.4.5	估算所需条件	170
5.5	吸收边界条件	171

5.5.1	单向波方程与吸收边界条件	171
5.5.2	二维和三维的情况	172
5.5.3	近似吸收边界条件	174
5.5.4	吸收边界条件的验证	175
5.6	PML 吸收边界条件	176
5.6.1	PML 吸收媒质的定义	177
5.6.2	PML 吸收边界条件在 Yee 单元网格空间中的应用	177
5.6.3	三维 PML 吸收边界条件	180
5.6.4	非均匀网格结构的三维 PML 吸收边界条件	181
5.6.5	各向异性的 PML 吸收媒质	182
5.6.6	柱坐标系中 PML 的 FDTD 格式	185
5.6.7	一维 PML 吸收边界条件的实现	189
5.6.8	PML 吸收边界条件的验证方法	191
5.7	近场远场转换	194
5.7.1	概述	194
5.7.2	三维近场远场转换原理	195
5.7.3	三维近场远场转换的离散化处理	196
5.7.4	二维近场远场转换	197
第 6 章	积分方法的数学准备	199
6.1	泛函分析概述	199
6.1.1	泛函分析初步	199
6.1.2	泛函空间及其性质	200
6.1.3	泛函分析的基本定理	202
6.1.4	加权剩余原理	203
6.2	变分原理	205
6.2.1	泛函的变分	206
6.2.2	欧拉方程	208
6.3	约束条件下的变分	213
6.3.1	约束条件下的变分问题	213
6.3.2	线性算子方程化为变分方程	214
6.4	非自伴算子方程、Rayleigh-Ritz 方法	219
6.4.1	非自伴算子的确定性方程	219
6.4.2	Rayleigh-Ritz 方法	220
6.4.3	Ritz 方法的误差	221
第 7 章	基于变分原理的有限元法	222
7.1	有限元法的一般原理	222

7.1.1	普遍意义下的有限元法	222
7.1.2	有限元法过程	223
7.2	二维泊松方程的有限元法	230
7.2.1	求单元特征式	230
7.2.2	建立系统有限元方程	232
7.3	有限元的前处理和后处理技术	234
7.4	单元形函数与等参数单元	235
7.4.1	单元形函数	235
7.4.2	插值多项式的选取	238
7.4.3	自然坐标及相关处理技术	243
7.5	等参数单元	249
7.5.1	参考单元的引入	249
7.5.2	三角形等参数单元的有限元方程	251
7.5.3	平面矩形的参数单元	253
7.5.4	空间六面体单元	255
7.6	非齐次边界条件下的变分问题	256
7.6.1	问题的提出	256
7.6.2	非齐次边界条件下的变分问题的解	256
7.6.3	非齐次边界条件下的泊松方程的泛函方程	258
第 8 章	电磁场中的矩量法	260
8.1	矩量法的基本原理	260
8.1.1	矩量法是一种函数空间中的近似方法	260
8.1.2	矩量法是一种变分法	263
8.1.3	子域基函数	265
8.1.4	截断误差和数值色散	268
8.2	典型的矩量法问题	270
8.2.1	积分方程形式	270
8.2.2	圆柱体散射的积分求解	271
8.2.3	误差分析	273
8.2.4	本征值问题的矩量法	274
8.2.5	伽略金法的收敛性	275
8.3	静电场的矩量法	276
8.3.1	静电场中的算子方程	276
8.3.2	带电平板的电容	277
8.3.3	导体系问题	280
8.4	微带天线的矩量法	281
8.4.1	理论分析	282

8.4.2	矩形微带天线	285
8.4.3	微带天线与传输线的连接	287
8.5	孔缝耦合问题中的矩量法	287
8.5.1	基本电磁学方程	287
8.5.2	基本原理	288
8.5.3	厚金属板上具有共享微波负载的多孔散射的研究	290
8.6	基于线网模型的矩量法	291
8.6.1	简介	291
8.6.2	线网模型的有关问题	293
8.6.3	线网法	297
第9章	基于几何射线法的混合方法	306
9.1	引言	306
9.2	几何射线法基础	306
9.3	射线跟踪法的分类	309
9.3.1	镜像法	309
9.3.2	完全射线跟踪法	309
9.4	完全射线跟踪法的应用	310
9.4.1	二维空间的射线发射和接收	310
9.4.2	三维空间的射线发射和接收	311
9.4.3	射线跟踪过程	311
9.5	射线跟踪法与时域有限差分(FDTD)法的结合	312
9.6	小结	315
第10章	课程设计篇	317
10.1	用有限差分法解三维非线性薛定谔方程	317
10.1.1	三维非线性薛定谔方程	317
10.1.2	解薛定谔方程的源程序	319
10.2	计算电磁学方法在导波分析中的应用	323
10.2.1	蒙特卡罗法	324
10.2.2	有限差分法	324
10.2.3	有限元法	325
10.2.4	用有限元法解亥姆赫兹方程	329
10.2.5	适宜介质波导研究的一些常用的数值计算方法	338
10.2.6	应用几种方法的 MATLAB 源程序	340
10.3	利用矩量法计算对称振子上的电流分布	354
10.3.1	矩量法简介	354
10.3.2	波克林顿方程	354

10.3.3	广义阻抗 Z_{ij}	356
10.3.4	计算电流分布	357
10.3.5	对称振子电流分布	357
10.3.6	误差分析	358
10.3.7	计算对称振子上电流分布的源程序	358
10.4	有限元法和蒙特卡罗法实践	361
10.4.1	应用有限元法求解静电场	361
10.4.2	应用蒙特卡罗法计算多重积分	362
10.4.3	应用蒙特卡罗法的源程序	366
10.5	FDTD 法模拟 TM 波的传播	374
10.5.1	问题提出	374
10.5.2	问题分析	374
10.5.3	程序流程图及说明	377
10.5.4	模拟 TM 波传播的 MATLAB 源程序	378
10.6	用蒙特卡罗法进行分形图形的计算机模拟	384
10.6.1	概述	384
10.6.2	生物分形与人工生命	385
10.7	时域有限差分法解介质球散射场	386
10.7.1	理论基础概述	386
10.7.2	编程参数确定	388
10.7.3	问题描述	389
10.7.4	编程设计	389
10.7.5	建模与条件设置	392
10.7.6	求解介质球散射场的源程序	394
10.8	三维有限差分法对线馈矩形微带天线的分析	422
10.8.1	用三维有限差分法分析线馈矩形微带天线	422
10.8.2	用时域有限差分法分析线馈矩形微带天线	424
10.8.3	分析线馈矩形微带天线的源程序	426
10.9	利用有限差分法分析光纤光栅特性	447
10.9.1	光纤光栅耦合模方程的数值模型的研究	447
10.9.2	有限差分法求解方程	448
10.9.3	龙格-库塔方法求解	450
10.9.4	数值计算结果分析	451
10.9.5	结论	452
10.10	光孤子在光纤中的传输	452
10.10.1	传输方程(NLS)	452
10.10.2	参数 $Z=0$ 处的人射脉冲	453
10.10.3	源程序和数值解分析	454

10.10.4	结论	455
10.11	蒙特卡罗法的计算机仿真试验	456
10.11.1	用计算机的蒙特卡罗方法求定积分程序	456
10.11.2	雷达检测的蒙特卡罗仿真	458
10.11.3	邮电所随机服务系统模拟	459
10.12	时域有限差分法模拟二维光子晶体波导特性	463
10.12.1	问题的提出与分析	463
10.12.2	MATLAB 源程序	468
参考文献		476

第 1 章 电磁工程建模与计算电磁学

1.1 电磁工程建模的数值方法

计算电磁学在电磁工程中有重要的应用,是进行计算机模拟的主要工具。电磁工程问题的研究和设计要以麦克斯韦方程为基础,此外还要使用一些基本的定理,例如互易定理、等效定理、惟一感应定理、线性、对称性等。以电磁兼容问题为例,通常都要包括三方面的问题:输入电磁场的作用;被影响设备的敏感性;描述由电磁干扰电源到被干扰设备的传播和耦合函数。在实际的电磁兼容工程中,首先要分析干扰源的特性以及如何产生电磁场,分析产生的干扰电磁波是如何产生电磁耦合作用并影响敏感设备的。在解决电磁兼容工程问题时,主要困难不在电磁学的物理原理方面,而在于如何正确的应用这些原理建立满足实际问题需要的复杂的边界条件、介质和干扰源分布的符合工程实际的电磁工程模型。

电磁作用机制可以采用理论分析和数值分析两种方法进行研究,对于电磁工程问题一般都需要将理论分析和数值分析的方法结合起来。在采用数值分析方法时,最常采用的方法有 5 类。

1. 积分方程法

当关心的物理量是一些“作用量”(如电压、电流、电荷、电感、电容和电磁能)时,通常涉及电磁场强度的积分,要采用积分方程法。电磁场的积分方法需要求解格林函数(Green's function),格林函数解与问题的类型密切相关。电磁工程问题的电磁拓扑逻辑比较复杂,得到适合的格林函数并非易事,总需要较多的理论分析并且要结合计算电磁学方法进行。采用积分方程方法时,处理干扰源和边界条件总是成为数值分析和建模的关键步骤,分析的目标是得到满足问题需要的积分算子,而格林函数通常成为积分核的一部分。

2. 微分方程法

当问题归结为电磁场强度时,就可以由麦克斯韦方程出发得到相应的差分方程,其理论分析过程通常比积分方法概念简单些,但数值处理的实现要比积分方程难得多。主要原因有以下几点:

- 微分算子是局域算子,而积分算子是全局性算子。
- 微分算子能灵活处理介质的不均匀、非线性、时变的情形。

• 积分方程法隐含着格林函数选定后的辐射条件和其他条件。
两者的比较可以用表 1.1 进行说明。

表 1.1 数值分析中的积分方法与微分方法比较

数值处理内容	微分形式	积分形式
场传播方程	麦克斯韦方程组的旋度方程	格林函数
无穷远处边界处理(辐射条件)	采用局域或全局的“后项”处理,近似计算向外的传播	对格林函数进行处理
电磁场对物体的作用	用场在网格上的值得到台阶、片、线或其他边界近似方法	用物体边界路径上的场的数值求解,需要曲线、面积分
取样要求:		
空间样点数(ΔL 为空间步长)	$N_x \propto \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^D$	$N_x \propto \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^{D-1}$
时间步数(δt 为时间步长)	$N_t \propto \left(\frac{L}{\Delta L}\right) \approx \frac{CT}{\delta t}$	$N_t \propto \left(\frac{L}{\Delta L}\right) \approx \frac{CT}{\delta t}$
激励源抽样点数	$N_{r,s} \propto \left(\frac{L}{\Delta L}\right)$ L 和 D 为问题尺度和维数	$N_{r,s} \propto \left(\frac{L}{\Delta L}\right)$ T 为观测时间
求得最高阶项 $\left(\frac{L}{\Delta L}\right)$ 需要的运行时间 (其中 T_w 为频域时间, T_r 为时域显式格式时间, T'_r 为时域隐式格式时间)	$T_w \propto N_x^{2(D-1)/D+1} = \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^{3D-2}$ $T_r \propto N_x N_t N_{r,s} = \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^{D-1+r}$ $T'_r \propto \begin{cases} N_x^{2(D-1)/D+1} = \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^{3D-2} & (\text{当 } D=2, 3 \text{ 时}) \\ N_x N_t N_{r,s} = \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^{2+r} & (\text{当 } D=1 \text{ 时}) \end{cases}$ $0 \leq r \leq 1$	$T_w \propto N_x^3 = \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^{3(D-1)}$ $T_r \propto N_x^2 N_t N_{r,s} = \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^{2D-1+r}$ $0 \leq r \leq 1$ $T'_r \propto N_x^3 = \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^{3D-1}$

在进行电磁工程问题的数值建模时,首先就要根据问题的性质选择理论分析到数值分析的转折点。一般地说应该尽量采用理论研究直到无法进行为止,而在转向数值分析时就涉及由真实的连续的物理空间向计算机上虚拟的离散的空间映射。人们习惯地认为在映射时相关的物理定律可以无条件使用,而在实际上,连续的物理空间上的物理规律只有在满足一定条件时才能在计算机上虚拟的离散的空间上成立。积分方法与微分方法相比,在连续物理空间向计算机上的离散空间映射时的物理规律的“保真特性”方面有一定的优势。

通常,解决一个电磁学或电磁工程问题时,首先要对研究的问题进行原理或理论性的理解。为了做到对客观事实的正确理解,必须要在电磁理论的角度全面把握的同时对理论模型有全面系统的理解,如关于天线、传输线、空腔和孔缝的基本理论和样板模型。在理论性的杂志上(如 *IEEE Trans.* 等)可以找到实际问题所需要的样板研究(benchmark)。然后,要站在函数空间的高度把数值模拟作为一种空间映射,在各种数值模拟量的数学和物理含义的基础上把握映射时出现的数学和物理变化。其次,要在理论