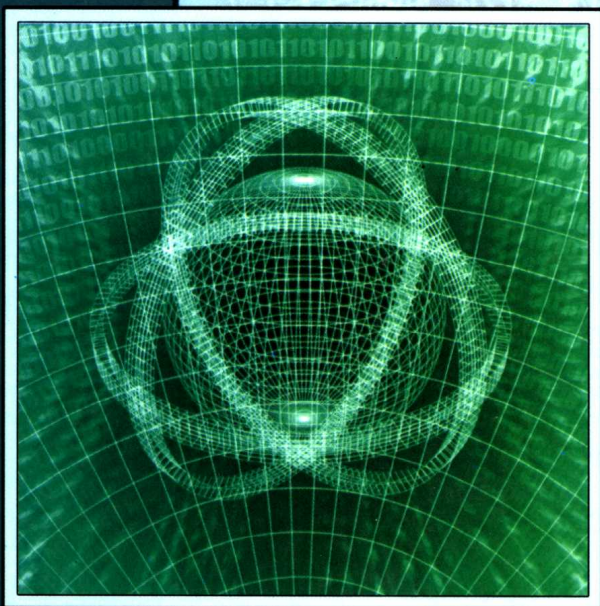




研究生系列教材

电磁波 时域有限差分方法

葛德彪 闫玉波



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

研究生系列教材

电磁波时域有限差分方法

葛德彪 闫玉波

西安电子科技大学出版社

2002

内 容 简 介

本书共 11 章。第一章为引言。第二章至第七章讨论 FDTD 基本原理, 介绍 Yee 元胞及 FDTD 基本方程, 数值稳定性, 吸收边界条件, 常用入射波形式及其引进方法, 近-远场外推方法, 网格剖分技术。第八章至第十章讨论 FDTD 的若干应用, 包括分层介质反射、透射, 散射和辐射计算。第十一章介绍 FDTD 的若干进展, 包括非均匀网格 FDTD, 传递函数在 FDTD 中的应用, 以及周期介质、色散介质、各向异性介质、随机粗糙面和含有集中元件的 FDTD。书末附有近场彩色图和 FDTD 计算程序。

本书为研究生教材, 也可作为相关专业研究人员、高校教师和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁波时域有限差分方法/葛德彪等.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 4

研究生系列教材

ISBN 7-5606-1059-5

I. 电… II. 葛… III. 电磁波—时域分析—差分法—研究生—教材

IV. 0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 094019 号

责任编辑 夏大平

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安兰翔印刷厂

版 次 2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.125 彩插 4

字 数 374 千字

印 数 1~2 000 册

定 价 20.00 元

ISBN 7-5606-1059-5/TN·0195

XDUP 1330001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志, 无标志者不得销售。

研究生系列教材

西安电子科技大学
研究生教材建设基金资助

前 言

时域有限差分(FDTD)方法自 Yee(1966 年)提出以来发展迅速,获得广泛应用。FDTD 方法以 Yee 元胞为空间电磁场离散单元,将麦克斯韦旋度方程转化为差分方程,表述简明,容易理解,结合计算机技术能处理十分复杂的电磁问题;在时间轴上逐步推进地求解,有很好的稳定性和收敛性,因而在工程电磁学各个领域倍受重视。但是,近期文献主要讨论 FDTD 的深入发展和实际应用,有关 FDTD 基本内容均散见在一些早期文献。本书的目的是使读者清晰理解和掌握 FDTD 方法基本内容,在概念和数学表述上构筑通往编程的明确途径,在阅读本书以后能具备用 FDTD 处理所关心实际问题的必要知识。

本书共 11 章。第一章为引言。第二章至第七章讨论 FDTD 基本原理,介绍 Yee 元胞及 FDTD 基本方程,数值稳定性,吸收边界条件,常用入射波形式及其引进方法,近-远场外推方法和网格剖分技术。第八章至第十章讨论 FDTD 的若干应用,包括分层介质反射、透射,散射和辐射计算。第十一章介绍 FDTD 的若干进展,包括非均匀网格 FDTD,传递函数在 FDTD 中的应用,以及周期介质、色散介质、各向异性介质和含有集中元件的 FDTD 等。书中给出一些计算例子。附录中简述了傅立叶变换和离散傅立叶变换,还给出二维 FDTD 计算程序,以便读者更好地理解和应用。书末附有若干 FDTD 算例的近场彩色图,这种电磁场可视化结果清楚地显示了电磁波传播的物理过程。

本书的形成与我们课题组多年的科研工作是分不开的,在此我们要感谢先后与我们一道工作的同事和同学,他们是李明之博士、郭利强研究员、石守元博士、王建国博士、李清亮博士、周依林副教授、姚纪欢博士、聂小春博士、葛宁博士,以及周其忠、朱之伟、黄河、郝彬、柴玫几位硕士和研究生郑宏兴、田春明、魏兵、邓威、朱湘琴、郑美艳等。多年工作中还得到印国泰研究员、王金荣教授、江长荫研究员、陈迎潮教授、王长清教授、高本庆教授等的真诚支持、合作与交流讨论,本书出版过程中夏大平同志作了大量细致的编辑工作,在此一并表示感谢。

限于作者学识水平,虽然数易书稿,书中难免仍有不足和疏漏,热忱欢迎专家、学者和读者对本书提出宝贵意见。

本书出版得到西安电子科技大学研究生教材建设基金的支持。

作者

2001 年 9 月

于西安电子科技大学

目 录

第一章 引言	1
1.1 FDTD 的发展及应用	1
1.1.1 对 FDTD 的简单回顾	1
1.1.2 FDTD 的应用	3
1.2 FDTD 基本点及 FDTD 计算区	4
1.3 本书目的和内容	5
参考文献	5
第二章 麦克斯韦方程及其 FDTD 形式	8
2.1 麦克斯韦方程和 Yee 元胞	8
2.2 直角坐标中的 FDTD: 三维情形	10
2.3 直角坐标中的 FDTD: 二维情形	15
2.4 直角坐标中的 FDTD: 一维情形	19
2.5 介质界面电磁参数选取	19
参考文献	24
第三章 数值稳定性	25
3.1 时间离散间隔的稳定性要求	25
3.2 Courant 稳定性条件	26
3.3 数值色散对空间离散间隔的要求	27
3.4 差分近似后的各向异性特性	28
参考文献	31
第四章 吸收边界条件	32
4.1 Engquist-Majda 吸收边界条件	32
4.2 一阶和二阶近似吸收边界	34
4.2.1 一阶近似吸收边界条件	34
4.2.2 二阶近似吸收边界条件	35
4.3 二维 Mur 吸收边界条件的 FDTD 形式	36
4.4 二维角点的处理	39
4.5 三维吸收边界条件及其 FDTD 形式	42
4.6 棱边及角顶点的特殊考虑	46
4.7 Berenger 完全匹配层	49
4.7.1 PML 介质中的波方程	49
4.7.2 平面波在 PML 中的传播特性	50
4.7.3 平面波在 PML/PML 介质分界面的传播	52
4.7.4 介质层设置	55

4.7.5 指数差分	56
4.7.6 点源辐射的检验	58
4.7.7 三维情形 PML 介质中的波方程	59
4.8 各向异性介质完全匹配层	60
4.8.1 平面波入射到单轴介质时的反射和透射波	60
4.8.2 无反射条件	62
4.8.3 PML 中的 FDTD 计算步骤	63
4.8.4 PML 的设置	64
参考文献	64

第五章 FDTD 中常用激励源	66
5.1 几种随时间变化的源	66
5.1.1 时谐场源	66
5.1.2 脉冲源	66
5.2 时谐场振幅和相位的提取	71
5.3 时谐场建立的开关函数	72
5.4 平面波源和线电流源	74
5.4.1 平面波源	74
5.4.2 线电流源	76
5.5 电偶极子源	76
5.6 入射波的加入——总场边界条件	78
5.7 平面波的加入	85
5.7.1 入射波沿 k 方向的逐步推进：二维情形	86
5.7.2 入射波沿 k 方向的逐步推进：三维情形	87
参考文献	89

第六章 近—远场外推	90
6.1 等效原理	90
6.2 时谐场的外推：三维情形	92
6.3 时谐场的外推：二维情形	94
6.4 瞬态场的外推：三维情形	96
6.5 瞬态场的外推：二维情形	98
6.6 瞬态场外推时谐场	100
参考文献	101

第七章 网格剖分技术	102
7.1 亚网格技术：波动方程方法	102
7.1.1 亚网格区的划分	102
7.1.2 波动方程法亚网格原理	103
7.1.3 算例	105
7.2 可跨越介质边界的亚网格技术	107
7.2.1 亚网格的布局	107

7.2.2 亚网格算法	108
7.2.3 算例	109
7.3 共形网格技术: 二维情况	110
7.3.1 二维曲面共形技术	110
7.3.2 后向加权平均方案	112
7.3.3 算例	112
7.4 共形网格技术: 三维情况	114
7.4.1 曲面共形原理	114
7.4.2 算例	116
7.5 细导线 FDTD 方法	116
7.6 柱坐标中 FDTD	120
7.7 球坐标中 FDTD	123
参考文献	127

第八章 FDTD 计算平面界面时的电磁波传播

8.1 分层各向异性介质的反射和透射	129
8.1.1 FDTD 公式	129
8.1.2 算例	131
8.2 表面阻抗边界条件的时域形式	132
8.2.1 表面阻抗的频域表达式	133
8.2.2 时域表面阻抗的近似表达式	134
8.2.3 时域表面阻抗的准确表达式	136
8.2.4 表面阻抗边界条件在 FDTD 方法中的实现	138
8.3 用时域表面阻抗边界条件计算有耗地面反射	140
8.4 有耗地面反射从二维问题转化为一维问题	143
参考文献	144

第九章 FDTD 计算电磁散射

9.1 散射目标的建模	146
9.1.1 简单物体的建模	146
9.1.2 复杂物体目标建模	147
9.1.3 FDTD 离散网格的确定	149
9.2 内存与时间步估计及计算流程	150
9.2.1 FDTD 计算所需内存的估计	150
9.2.2 计算时间步估计	151
9.2.3 计算流程	151
9.3 二维算例	152
9.3.1 二维时谐场算例	153
9.3.2 二维瞬态场算例	154
9.4 三维算例	157
9.4.1 时谐场情况	157
9.4.2 瞬态情况	160
9.5 三维问题转换为二维计算	162

9.6 平面波斜入射到无限长导体柱的散射	163
参考文献	167
第十章 FDTD 计算天线辐射	168
10.1 轴对称情况柱坐标 FDTD 方法	168
10.1.1 轴对称情形柱坐标下差分方程及稳定性条件	168
10.1.2 吸收边界条件	169
10.1.3 轴线上的边界条件	173
10.1.4 远区场的外推	174
10.2 同轴线内场的计算以及同轴线馈电口径处的耦合	175
10.2.1 同轴线内场的计算以及激励源的加入	175
10.2.2 同轴线口径处的耦合	176
10.3 金属平板上圆柱天线的辐射	179
10.4 金属平板上圆锥天线的辐射	182
10.5 带金属平板反射器的圆柱天线辐射	184
参考文献	186
第十一章 FDTD 的若干进展	187
11.1 非均匀网格 FDTD 方法	187
11.2 散射传递函数的应用	190
11.3 周期结构 FDTD	192
11.3.1 Floquet 定理	192
11.3.2 周期边界条件: 垂直入射情形	193
11.3.3 周期边界条件: 斜入射情形	194
11.3.4 入射波的加入	195
11.4 色散介质 FDTD	196
11.4.1 色散介质中 D 和 E 的微分方程	196
11.4.2 由 D 到 E 的 FDTD 公式	196
11.4.3 色散介质中的吸收边界条件	197
11.5 有集中元件的 FDTD	198
11.5.1 电阻	200
11.5.2 电容	201
11.5.3 电感	201
11.5.4 二极管	202
11.5.5 结型晶体管	202
11.6 各向异性 FDTD	203
11.6.1 无耗电各向异性	204
11.6.2 有耗情况	205
11.7 粗糙面散射的 FDTD	206
11.7.1 FDTD 区	207
11.7.2 高斯窗函数	207
11.8 网络并行 FDTD	208
11.8.1 网络并行计算	208

11.8.2 区域分割并行 FDTD 方法	209
11.8.3 程序实现	211
11.8.4 算例	212
参考文献	213
附录一 傅立叶变换及离散傅立叶变换	216
附录二 二维时谐场 FDTD 程序和算例	217
索引	245

第一章 引言

自 1966 年 Yee 首次提出时域有限差分(FDTD)方法以后,这一方法得到迅速发展及广泛应用。本章简单回顾 FDTD 的发展历史,介绍 FDTD 的基本要点,以及本书的目的和内容安排。

1.1 FDTD 的发展及应用

自 1873 年麦克斯韦(Maxwell)建立电磁场基本方程以来,电磁波理论和应用的发展已经有一百多年的历史。目前,电磁波的研究已深入到各个领域,应用十分广泛,例如无线电波传播、光纤通信和移动通信、雷达技术、微波、天线、电磁成像、地下电磁探测、电磁兼容,等等。电磁波在实际环境中的传播过程十分复杂,例如各种复杂目标的散射,复杂结构天线的辐射,在波导和微带结构中的传播,实际通信中城市环境、复杂地形及海面对电磁波传播的影响,等等。具体实际地研究电磁波的特性有着十分重要的意义。实验和理论分析计算是相辅相成的重要手段。分析计算途径需要结合实际环境电磁参数求解麦克斯韦方程边值问题,通常只有一些经典问题有解析解。应当说,解析解具有重要指导性意义。然而,由于实际环境的复杂性,往往需要通过数值解得到具体环境下的电磁波特性。随着计算机技术的发展,已经提出求解麦克斯韦方程的许多有意义的数值解方法,例如矩量法(MoM)、有限元法(FEM)、边界元法(BEM)以及时域有限差分(FDTD)方法等等。并且,随着电磁波应用的广泛和计算机技术的发展,各种方法的研究也更加深入。

1966 年 K. S. Yee^[1]首次提出了一种电磁场数值计算的新方法——时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法。对电磁场 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 分量在空间和时间上采取交替抽样的离散方式,每一个 $\mathbf{E}$ (或 $\mathbf{H}$)场分量周围有四个 $\mathbf{H}$ (或 $\mathbf{E}$)场分量环绕,应用这种离散方式将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程,并在时间轴上逐步推进地求解空间电磁场。Yee 提出的这种抽样方式后来被称为 Yee 元胞。FDTD 方法是求解麦克斯韦微分方程的直接时域方法。在计算中将空间某一样本点的电场(或磁场)与周围格点的磁场(或电场)直接相关联,且介质参数已赋值给空间每一个元胞,因此这一方法可以处理复杂形状目标和非均匀介质物体的电磁散射、辐射等问题。同时,FDTD 的随时间推进可以方便地给出电磁场的时间演化过程,在计算机上以伪彩色方式显示;这种电磁场可视化结果清楚地显示了物理过程,便于分析和设计。

1.1.1 对 FDTD 的简单回顾

FDTD 方法是求解 Maxwell 微分方程的直接时域方法,经过三十多年的发展已成为一种成熟的数值方法,应用范围也越来越广。近十几年来,每年发表的论文几乎按指数增

长^[2]。下面简单回顾 FDTD 的发展:

——Yee(1966 年)^[1]首先提出麦克斯韦方程的差分离散方式,并用来处理电磁脉冲的传播和反射问题。

——Taylor 等(1969 年)^[3]用 FDTD 分析非均匀介质体的电磁散射,提出用吸收边界来吸收外向行波,吸收边界采用的是简单插值方法。

——Merewether(1971 年)^[4]用 FDTD 计算旋转体上由入射脉冲所引起的感生电流,采用了辐射边界条件。

——Taflove 等(1975 年)^[5]用 FDTD 计算非均匀介质在正弦波入射时的时谐场(稳态)电磁散射,讨论了时谐场情况的近-远场外推,以及数值稳定性条件。

——Holland(1977 年)^[6]和 Kunz(1978 年)^[7]用 FDTD 计算 F117 飞机这种复杂目标的电磁脉冲散射。

——Mur(1981 年)^[8]提出在计算区域截断边界处的一阶和二阶吸收边界条件及其在 FDTD 的离散形式。这是 FDTD 的一种十分有效的吸收边界条件,获得广泛应用。

——Umashankar 和 Taflove(1982 年)^[9]用 FDTD 计算目标雷达散射截面(RCS),提出将 FDTD 区划分成总场区和散射场区,并提出连接边界条件,是散射计算中入射波设置的一种简便有效方法。

——Umashankar 和 Taflove 等(1987, 1988 年)^[10, 11]用 FDTD 分析了自由空间及腔体中导线上的感应电流,讨论了 FDTD 中细导线的处理方法。

——Choi 和 Hoefer(1986 年)^[12]用 FDTD 分析了波导腔体的谐振问题,计算其谐振频率。

——Kasher 和 Yee(1987 年)^[13]提出亚网格技术,Mei 等(1984 年)^[14]提出共形网格技术。

——Zhang 和 Mei(1988 年)^[15], Liang 等(1989 年)^[16], Gwarek(1988 年)^[17], Sheen 和 Kong 等(1990 年)^[18]用 FDTD 分析计算了波导、同轴线、微带天线及微带不连续性问题,得到相应的阻抗、传播常数及 S 参数。

——Maloney 等(1990 年)^[19]用圆柱坐标下 FDTD 分析了柱状和锥状天线位于理想导体平面上的辐射,得到宽带天线的输入阻抗及瞬态辐射场的直观可视化显示。

——Sullivan(1990 年)^[20]用 FDTD 计算 60~70 MHz 电磁波照射下透入到人体内部的电磁场,研究了生物电磁学问题。

——Britt(1989 年)^[21]首次给出时域远场结果,但论文未给出外推具体方法;Yee 等(1991 年)^[22]和 Luebbers 等(1991 年)^[23]提出了三维 FDTD 时域近-远场外推方法;随后 Luebbers 等(1992 年)^[24]提出二维 FDTD 时域近-远场外推方法。

——Larson(1989 年)^[25], Perlik 和 Taflove 等(1989 年)^[26]提出研究适用于 FDTD 的专用计算机,以便用于计算电磁波与电大尺寸物体的相互作用。

——Luebbers 和 Hunsberger 等(1990 年)^[27]研究了色散介质在 FDTD 中的处理方法。

——Maloney 和 Smith(1992 年)^[28]提出将阻抗边界条件应用于 FDTD。

——Sui 等(1992 年)^[29]提出用二维 FDTD 计算有集中参数元件的数字和微波电路模型,包括电阻、电容、电感、二极管、晶体管等元件。

——Berenger(1994, 1996 年)^[30~32]提出将麦克斯韦方程扩展为场分量分裂形式,并

构成完全匹配层(PML),这是一种全新的吸收边界;Sacks 等(1995 年)^[33]和 Gedney (1996 年)^[34]提出各向异性介质的 PML,其支配方程是各向异性介质麦克斯韦方程;在 FDTD 计算中这两种 PML 作为吸收边界已得到广泛应用。

——Prather 和 Shi(1999 年)^[35]分析轴对称衍射透镜,给出波长为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 平面波和高斯波入射时,直径 $102.47\text{ }\mu\text{m}$ 衍射透镜的光波传播特性。

1.1.2 FDTD 的应用

FDTD 在电磁研究的多个领域获得广泛应用,其中有:

——辐射天线的分析,例如柱状和锥状天线,接地导体附近的天线,喇叭天线,微带天线,手机天线,缝隙天线,螺旋天线以及天线阵列等。

——微波器件和导行波结构的研究,例如波导,介质波导,微带传输,波导中的孔缝耦合,铁氧体器件,加载谐振腔等。

——散射和雷达截面计算,例如导体、介质物体和具有复杂结构及形状物体(导弹,飞机)的雷达截面(RCS),导弹导引头的电磁波透入分布,人体对电磁波的吸收,地下物体散射等。

——周期结构分析,例如频率选择表面、光栅传输特性、周期阵列天线,以及随机粗糙表面等。

——电子封装,电磁兼容分析,例如多线传输及高密度封装时的数字信号传输,分析环境和结构对元器件和系统电磁参数及性能的影响。

——核电磁脉冲的传播和散射,在地面的反射及对电缆传输线的干扰。

——微光学元器件中光的传播和衍射特性。

在公开刊物上提及的若干 FDTD 程序有:

——FDTDA (1993 年):在文献[36]附录中给出的三维散射通用程序,源程序用 FORTRAN 语言编写。

——XFDTD (1996 年)^[37]:具有多种功能,包含有瞬态近-远场外推,亚网格技术,介质可以有耗介质、磁化铁氧体;可用以分析生物体对电磁波吸收特性(SAR),螺旋及微带天线,天线阻抗的频率特性,移动电话场强分布,细导线及复杂物体电磁散射和 RCS 计算。

——EMA3D (1997 年)^[38]:分析核电磁脉冲(NEMP)及雷电耦合,高功率微波,宽带 RCS,天线,屏蔽特性,印刷电路板的电磁兼容;软件具有多种边界条件,亚网格剖分,适用于有耗介质,平面波源及电压电流源。

——AutoMESH(1999 年)^[39]:可以自动产生三维非均匀正交网格以描写复杂结构物体,并给出二维分层显示;应用 Visual BASIC 语言,结合 FDTD 可以计算微带滤波器,微带天线传输及辐射特性等。

——A Conformal FDTD Software Package (2000 年)^[40]:用来模拟射频天线,微带电路元件;应用非均匀及共形网格,PML 吸收边界,近-远场变换,可处理曲面和有边缘物体;使用 Visual BASIC 和 C++ 语言。

1.2 FDTD 基本点及 FDTD 计算区

随着 FDTD 的广泛研究和应用, FDTD 方法本身也在不断完善和发展, 现结合本书内容将其基本点简述如下:

——Yee 元胞。最初由 Yee 提出。他提出 E 、 H 场分量取样节点在空间和时间上采取交替排布, 每一个 E (或 H) 场分量周围有四个 H (或 E) 场分量环绕, 应用这种离散方式将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程, 并在时间轴上逐步推进地求解空间电磁场。由电磁问题的初始值及边界条件就可以逐步推进地求得以后各时刻空间电磁场分布。

——FDTD 区的划分。对于散射问题, 通常在 FDTD 计算区域中引入总场边界(即连接边界), 如图 1-2-1 所示。FDTD 计算区域划分为总场区和散射场区。这样做的好处是: ① 应用惠更斯(Huygens)原理, 可以在连接边界处设置入射波, 使入射波的加入变得简单易行; ② 可以在截断边界(即吸收边界)处设置吸收边界条件, 利用有限计算区域就能够模拟开域的电磁散射过程; ③ 根据等效原理, 应用数据存储边界(即输出边界)处的近区场便可以实现远场的外推计算。对于辐射问题, 激励源直接加到辐射天线上, 整个 FDTD 计算区域为辐射场, 如图 1-2-2 所示, 不再区分总场区和散射场区。

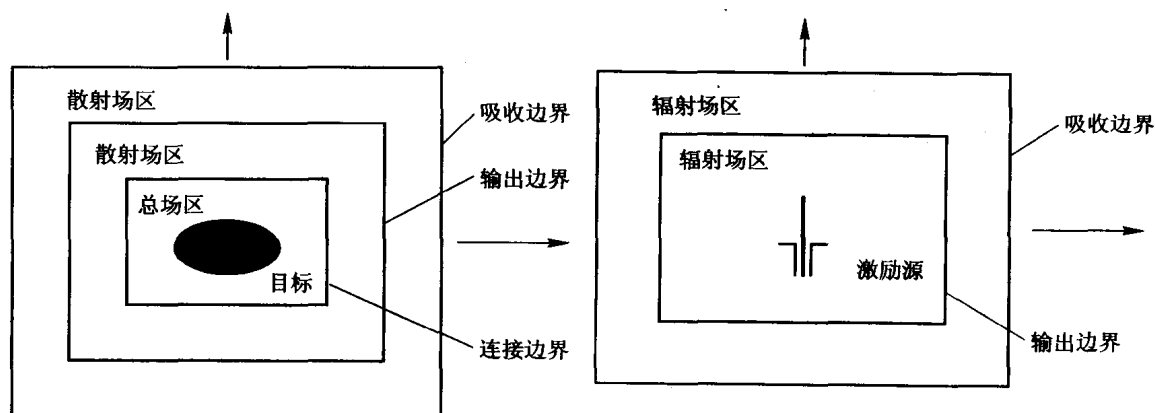


图 1-2-1 散射计算时 FDTD 区域的划分

图 1-2-2 辐射计算时 FDTD 区域的划分

——吸收边界条件。为了在有限计算区域模拟无界空间中的电磁问题, 必须在计算区域的截断边界上设置吸收边界条件。吸收边界从开始简单的插值边界, 已经发展了多种吸收边界条件。目前比较广泛采用的有 Mur 吸收边界, 以及近几年发展的完全匹配层(PML)吸收边界。

——近-远场变换。FDTD 的模拟只能限于有限空间, 为了获得计算域以外的散射或辐射场, 必须借助等效原理应用计算区域内的近场数据实现计算区域以外远场的外推。对于时谐场和瞬态场分别采用不同的外推方法。

1.3 本书目的和内容

本书着重讲述 FDTD 方法的基本原理,使读者清晰地理解和掌握该方法的基本内容,在概念和数学表述上构筑通往编程的明确途径。经过 30 多年的发展, FDTD 已经有十分广阔的应用,关于这方面的工作每年都有大量文献发表,读者可以参阅评论文章[2, 41]和专门书籍[36, 42~46]。在基本原理的基础上本书主要介绍 FDTD 在电磁散射和辐射方面的应用。实际上, FDTD 的应用领域发展广泛而迅速,因此,更多更新的应用需要读者阅读相关文献。

当前在天线和电波传播、微波理论和技术、电磁兼容、生物医学工程、光学技术等领域的刊物和会议文集中有大量关于 FDTD 的文献。但是,近期文献主要讨论 FDTD 的深入发展和实际应用,有关 FDTD 的基本内容均散见于一些早期文献。给读者一个比较完整、详细的 FDTD 基本内容的叙述,在阅读本书以后能具备用 FDTD 处理所关心实际问题的必要知识也是本书的目的。

本书第二章至第七章讨论 FDTD 的基本原理,介绍基本网格单元——Yee 元胞,从稳定性出发讨论元胞尺寸和离散时间步的选择准则,有限 FDTD 区域截断边界处的吸收边界条件,在 FDTD 区域中引入射波的方法,从近场数据外推远场的方法,以及改善计算精度的亚网格和共形网格处理方法。第八章至第十章讨论 FDTD 的若干应用,包括处理分层介质反射透射,二维和三维散射计算,以及辐射中的若干天线特性分析。最后一章介绍 FDTD 的若干研究进展。

本书采用国际单位制,长度单位为米(m),时间单位为秒(s)。在分析中用到时谐场复数表示法时,时谐因子用 $\exp(j\omega t)$ 。

参 考 文 献

- [1] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, May 1966, AP-14(3): 302~307
- [2] Shlager K L and Schneider J B. A selective survey of the finite-difference time-domain literature. *IEEE Antennas Propagat. Magazine*, Aug. 1995, 37(4): 39~57
- [3] Taylor C D, Lam D H and Shumpert T H. EM pulse scattering in time varying inhomogeneous media. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Sept. 1969, AP-17(5): 585~589
- [4] Merewether D E. Transient currents induced on a metallic body of revolution by an EM pulse. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, May 1971, EMC-13(1): 41~44
- [5] Taflov A and Brodwin M E. Numerical solution of steady-state EM scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Aug. 1975, MTT-23: 623~630
- [6] Holland R. THREDE: A free-field EMP coupling and scattering code. *IEEE Trans. Nuclear Science*, Dec. 1977, NS-24(6): 2416~2421
- [7] Kunz K S and Lee K M. A 3-D finite difference solution of the external response of an aircraft to a complex transient EM environment: I-The method and its implementation. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, May 1978, EMC-20(2): 328~333

- [8] Mur G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Nov. 1981, EMC - 23(4): 377~382
- [9] Umashankar K R and Taflove A. A novel method of analyzing electromagnetic scattering of complex objects. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Nov. 1982, EMC - 24(4): 397~405
- [10] Umashankar K R, Taflove A and Beker B. Calculation and experimental validation of induced currents on coupled waves in an arbitrary shaped cavity. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Nov. 1987, AP - 35(11): 1248~1257
- [11] Taflove A, Umashankar K R, Beker B, Harfoush F and Yee K S. Detailed FDTD analysis of EM fields penetrating narrow slots and lapped joints in thick conducting screens. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Feb. 1988, AP - 36(2): 247~257
- [12] Choi D H and Hoefer W J R. The finite difference time domain method and its application to eigenvalue problem. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Dec. 1986, MTT - 34(12): 1464~1470
- [13] Kasher J C and Yee K S. A numerical example of a two dimensional scattering problem using a subgrid. *Applied Computational Electromagnetic Society Journal and Newsletter*, 1987, 2(2): 75~102
- [14] Mei K K, Cangellaris A C and Angelakos D J. Conformal time domain finite difference method. *Radio Science*, 1984, 19(5): 1145~1147
- [15] Zhang X and Mei K K. TD-FD approach to the calculation of the frequency dependent characteristics of microstrip discontinuities. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Dec. 1988, MTT - 36(12): 1775~1787
- [16] Liang G C, Lin Y W and Mei K K. Full wave analysis of coplanar waveguide and slotline using the TDFD method. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Dec. 1989, MTT - 37(12): 1949~1957
- [17] Gwarek W K. Analysis of arbitrarily shaped 2-D microwave circuit by FDTD method. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Apr. 1988, MTT - 36(4): 738~744
- [18] Sheen D M, Ali S M, Abouzahra M D and Kong J A. Application of the 3-D FDTD method to the analysis of planar microstrip circuit. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, July 1990, MTT - 38(7): 849~857
- [19] Maloney J G, Smith G S and Scott R. Accurate computation of the radiation from simple antennas using the FDTD method. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, July 1990, AP - 38(7): 1059~1068
- [20] Sullivan D. 3-D computer simulation in deep regional hyperthermia using the FDTD method. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Feb. 1990, MTT - 38(2): 204~211
- [21] Britt C L. Solution of EM scattering problems using time domain techniques. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Sept. 1989, AP - 37(9): 1181~1192
- [22] Yee K S, Ingham D and Shlager K. Time-domain extrapolation to the far field based on FDTD calculations. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Mar. 1991, AP - 39(3): 410~413
- [23] Luebbers R J, Kunz K S, Schneider M and Hunsberger F. A finite difference time domain near zone to far zone transformation. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, April 1991, AP - 39(4): 429~433
- [24] Luebbers R J, Ryan D and Beggs J. A two-dimensional time-domain near-zone to far-zone transformation. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, July 1992, AP - 40(7): 848~851
- [25] Larson R W. Special purpose computers for the time-domain advance of Maxwell equations. *IEEE Trans. Magnetics*, July 1989, MAG - 25(4): 2913~2915

- [26] Perlik A T, Opsahl T and Taflove A. Predicting scattering of EM fields using FDTD on a connection machine. *IEEE Trans. Magnetics*, July 1989, MAG - 25(4): 2910~2912
- [27] Luebbers R J, Hunsberger F, Kunz K S, Standler R B and Schneider M. A frequency dependent finite difference time domain formulation for dispersive materials. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, March 1990, EMC - 32(3): 222~227
- [28] Maloney J G and Smith G S. The use of surface impedance concepts in the finite difference time domain method. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Jan. 1992, AP - 42(1): 38~48
- [29] Sui W, Cristensen D A and Durney C H. Extending the two dimensional FDTD method to hybrid electromagnetic systems with active and passive lumped elements. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, April 1992, MTT - 40(4): 724~730
- [30] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comput. Phys.*, Oct. 1994, 114(2): 185~200
- [31] Berenger J P. Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comput. Phys.*, Sept. 1996, 127(2): 363~379
- [32] Berenger J P. Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problem. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Jan. 1996, AP - 44(1): 110~117
- [33] Sacks Z S, Kingsland D M, Lee D M and Lee J F. A perfectly matched anisotropic absorber for use as an absorbing boundary condition. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Dec. 1995, AP - 43(12), 1460~1463
- [34] Gedney S D. An anisotropic perfectly matched layer absorbing media for the truncation of FDTD lattices. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Dec. 1996, AP - 44(12): 1630~1639
- [35] Prather D W and Shi S Y. Formulation and application of the finite difference time domain method for the analysis of axially symmetric diffractive optical elements. *J. Opt. Soc. Am. A*, May 1999, 16(5): 1131~1142
- [36] Kunz K S and Luebbers R J. *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993
- [37] XFDTD 软件广告. *IEEE Antennas Propagat. Magazine*, Dec. 1996, 38(6): 115
- [38] EMA3D 软件广告. *IEEE Antennas Propagat. Magazine*, June 1997, 39(3): 71
- [39] Yang M W and Chen Y C. AutoMesh: An automatically adjustable nonuniform orthogonal FDTD mesh generator. *IEEE Antennas Propagat. Magazine*, April 1999, 41(2): 13~19
- [40] Yu W and Mittra R. A conformal FDTD software package modeling antennas and microstrip circuit components. *IEEE Antennas Propagat. Magazine*, Oct. 2000, 42(5): 28~39
- [41] Taflove A. Review of the formulation and applications of the finite-difference time-domain method for numerical modeling of electromagnetic wave interactions with arbitrary structures. *Wave Motion*, 1998, 10: 547~582
- [42] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分方法. 北京: 北京大学出版社, 1994
- [43] 高本庆. 时域有限差分法. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [44] Taflove A. *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method*. Norwood, MA: Artech House, 1995
- [45] Taflove A (Ed.). *Advances in Computational Electromagnetics: The FDTD Method*. Norwood, MA: Artech House, 1998
- [46] Sullivan D M. *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*. New York: IEEE Press, 2000