

“十二五”重点图书

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

电磁波 时域有限差分方法(第三版)

Finite-Difference Time-Domain
Method for Electromagnetic Waves

葛德彪 闫玉波



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

研究生教学用书
教育部研究生工作办公室推荐

电磁波时域有限差分方法

(第三版)

葛德彪 闫玉波

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书讲述了时域有限差分(FDTD)方法的基本原理。介绍了 FDTD 基本方程、数值稳定性、吸收边界条件与完全匹配层、常用人射波形式及其引进方法、近—远场外推方法、网格剖分技术、色散介质分析方法。讨论了 FDTD 方法在半空间分层介质中的反射、透射、散射和辐射计算中的应用。还介绍了 FDTD 研究的若干进展,包括非均匀网格、周期介质、各向异性介质、磁化等离子体和磁化铁氧体、含有集中元件的 FDTD,以及 ADI-FDTD 等。附录中给出了 FDTD 计算程序和若干算例的近场彩色图。

本书可作为无线电物理、电磁场与微波技术、计算电磁学、电波传播等专业研究生课程的教材或教学参考书,也可供有关学科教师、科技工作者、研究生和高年级大学生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁波时域有限差分方法/葛德彪,闫玉波. —3 版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2011.10

研究生教学用书

ISBN 978-7-5606-2663-5

I. ① 电… II. ① 葛… ② 闫… III. ① 电磁波—时域分析—有限差分法—研究生—教材
IV. O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 168121 号

责任编辑 李惠萍 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)88242885 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2011 年 10 月第 3 版 2011 年 10 月第 5 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 29 彩页 2

字 数 681 千字

印 数 8001~10 000 册

定 价 53.00 元

ISBN 978-7-5606-2663-5/O·0115

XDUP 2955003-5

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

计算电磁学三个主要数值方法——矩量法(MoM)、有限元法(FEM)和时域有限差分(FDTD)方法的应用十分广泛,方法本身的研究和发展也日益深入。FDTD方法在分析复杂目标、复杂介质和复杂环境中电磁波传播散射辐射特性等方面显示出活力,近一二十年来发展十分迅速,在国内外学术刊物、会议和网络上有众多论文和报道。本书目的在于讲述FDTD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,介绍FDTD处理实际有关问题的必要知识。

本书第一版成书于2002年,第二版成书于2005年,这次第三版的编写结合我们近年来的有关科研工作,对第二版进行了修改和补充。

本书第三版保留了第二版的基本结构,在章节安排上作了适当调整:引言和麦克斯韦方程及其FDTD形式以及数值稳定性仍为第一章到第三章;将原来的吸收边界条件分为两章,其中Mur吸收边界条件为第四章,完全匹配层增加部分内容后独立成为第五章;FDTD中常用激励源、近—远场外推和网格剖分技术则分别为第六章到第八章,其中网格剖分技术一章中对共形网格部分作了改写和补充;FDTD计算电磁散射和FDTD计算天线辐射仍在第九章和第十章,分别补充了波导中的散射和喇叭天线辐射等内容;色散介质FDTD由原来的11.4节扩充改写后成为第十一章;第二版中关于平面界面时的电磁波传播改名为FDTD计算半空间传播和散射,作为第十二章,增加了半空间分层介质环境中关于散射的讨论;最后第十三章介绍了FDTD的若干进展,增补了关于磁化等离子体和磁化铁氧体的讨论。书末保留了前两版的附录和彩色图,增加了电偶极子辐射程序。

本书第三版修订中包含了过去几年我们的一些工作。曾经共同研究和讨论问题的青年教师及研究生有魏兵教授(博士)、王建国教授(博士)、张玉强副教授(博士)、杨利霞副教授(博士)、郑奎松副教授(博士)、姜彦南副教授(博士)和田春明博士、王飞博士、胡晓娟博士及白剑硕士、吴盛辉硕士、张劭硕士、张世田硕士、黄明红硕士等。魏兵教授和郑奎松副教授还参与了第三版附录的修订工作,对此我们十分感谢。本书第三版的准备和出版得到西安电子科技大学研究生院和出版社的大力支持,谨此致谢。

十分欢迎专家和读者对本书提出建议和宝贵意见。

葛德彪

2011年9月

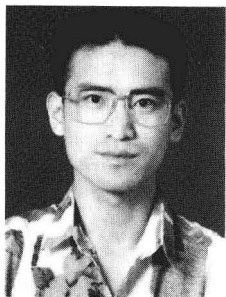
于西安电子科技大学

作者简介



葛德彪 男, 1961年毕业于武汉大学物理系。西安电子科技大学教授, 博士生导师。中国电子学会会士, 电磁科学院会士(Fellow of The Electromagnetics Academy)。1980~1982年为美国宾夕法尼亚大学(University of Pennsylvania)访问学者。1993年及1995年为美国德克萨斯大学达拉斯分校(University of Texas at Dallas)高级访问学者。被评为电子部优秀教师(1985年), 机械电子部有突出贡献专家(1991年), 政府特殊津贴专家(1992年), 陕西省学位委员会、陕西省教育委员会优秀博士生导师(1998年)。

主要研究领域为电磁散射、逆散射及电磁成像, 计算电磁学, 复杂介质中的电磁波传播等。已发表学术刊物及会议论文多篇。出版著作有《电磁逆散射原理》(1987年), 获机械电子部优秀教材一等奖(1992年);《电磁波时域有限差分方法》(2002年), 被教育部推荐为研究生教学用书;《电磁波理论》(2011年)。



闫玉波 男, 1973年2月出生于山东日照。分别于1995年、1998年、2001年在西安电子科技大学取得应用物理专业理学学士、无线电物理专业理学硕士、电磁场与微波技术专业工学博士学位。现就职于中国电子科技集团公司第二十二研究所(中国电波传播研究所)。已发表论文30余篇。曾参与多项国家自然科学基金和国防科技预研基金等课题, 研究兴趣包括计算电磁学、复杂目标电磁散射、天线辐射等。

第二版前言

本书第二版保留了第一版的基本结构，对其内容作了以下修改和补充：校正了第一版个别文字和符号；对第一版一些节次作了改写和补充，例如 2.5、4.3、4.4、4.8、5.4、6.2、6.3、11.3、11.4、11.6 节等；增加了若干节次，如 2.6、4.9、11.9 节等；补充了参考文献；增加了习题，以便将本书用作研究生教材。习题分为两类：一类为复习思考题，安排在第二至六章各章之后；另一类为综合编程习题，放在第十一章之后。有些编程习题还给出程序运行具体算例的结果，以供参考。实际上，读者完全可以根据他们的研究兴趣和具体应用来发展相关程序。

本书出版以来收到一些读者以各种方式，包括电子邮件提出的问题、意见和建议，有些已经反映在本书的第二版中，在此谨向他们表示谢意。此外，还要感谢在第二版的修订中和我们一起工作的同事和研究生，他们是魏兵博士、田春明博士，以及朱湘琴、郑奎松、杨利霞、杨凌霞、胡晓娟等。

本书的形成与我们课题组多年的科研工作密切相关，从本书第一版以来特别感谢国防预研项目和国家自然科学基金项目(60371018)的支持。本书在 2003 年被教育部列为全国研究生推荐教材，对此十分感谢西安电子科技大学研究生院和西安电子科技大学出版社的关心和支持，同时也增加了笔者对第二版修订的责任。

衷心期待和热忱欢迎专家、学者及读者提出宝贵意见。

葛德彪

2005 年 1 月

于西安电子科技大学

第一版前言

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 基本内容均散见于一些早期文献中。本书的目的是使读者清晰理解和掌握 FDTD 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,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 的若干研究进展,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。

本书的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 FDTD 的简单回顾	2
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	6
第二章 麦克斯韦方程及其 FDTD 形式	9
2.1 麦克斯韦方程和 Yee 元胞	9
2.2 直角坐标中 FDTD 三维公式	12
2.3 直角坐标中 FDTD 二维公式	17
2.4 直角坐标中 FDTD 一维公式	21
2.5 介质界面电磁参数的选取	21
2.6 指数差分	26
复习思考题	27
参考文献	27
第三章 数值稳定性	29
3.1 时间离散间隔的稳定性要求	29
3.2 Courant 稳定性条件	30
3.3 数值色散对空间离散间隔的要求	31
3.4 差分近似后的各向异性特性	32
复习思考题	35
参考文献	36
第四章 Mur 吸收边界条件	37
4.1 Engquist-Majda 吸收边界条件	37
4.2 一阶和二阶近似吸收边界	39
4.2.1 一阶近似吸收边界条件	39
4.2.2 二阶近似吸收边界条件	41
4.3 二维和一维 Mur 吸收边界条件的 FDTD 形式	42
4.3.1 二维情形	42
4.3.2 一维情形	45

4.4 二维角点的处理	46
4.5 三维吸收边界条件及其 FDTD 形式	49
4.6 棱边及角顶点的特殊考虑	53
复习思考题	56
参考文献	57
第五章 完全匹配层	58
5.1 Berenger 完全匹配层	58
5.1.1 二维情形 Berenger 场分量分裂方程	58
5.1.2 平面波在 BPML 介质中的传播特性	59
5.1.3 平面波在 BPML/BPML 介质分界面的传播	61
5.1.4 PML 介质层设置	63
5.1.5 PML 中的指数差分	64
5.1.6 点源辐射的检验	66
5.1.7 三维情形 BPML 介质中的波方程	67
5.2 各向异性介质完全匹配层的基本公式	68
5.2.1 平面波入射到单轴介质时的反射和透射波	68
5.2.2 无反射条件	70
5.2.3 棱边和角顶区	72
5.2.4 截断绝缘介质的 UPML 三维时域方程	74
5.2.5 截断导电介质的 UPML 三维时域方程	76
5.2.6 截断绝缘介质的 UPML 二维时域方程	78
5.2.7 截断导电介质的 UPML 二维时域方程	80
5.2.8 一维 UPML 的时域方程	82
5.3 各向异性介质完全匹配层的 FDTD 实现	83
5.3.1 UPML 时域微分方程特点	83
5.3.2 截断绝缘介质的 UPML 三维 FDTD 公式	85
5.3.3 截断导电介质的 UPML 三维 FDTD 公式	88
5.3.4 截断绝缘介质的 UPML 二维 FDTD 公式	90
5.3.5 截断导电介质的 UPML 二维 FDTD 公式	92
5.3.6 一维 UPML 的 FDTD 公式	94
5.3.7 PML 的设置	96
5.4 坐标伸缩完全匹配层	96
5.4.1 坐标伸缩麦克斯韦方程及平面波	96
5.4.2 分界面的反射系数和无反射条件	98
5.4.3 坐标伸缩因子的复数频率移位形式	99
5.4.4 CPML 的时域步进公式	101
5.4.5 PML 的设置	106
复习思考题	107
参考文献	108

第六章 FDTD 中常用激励源	110
6.1 几种随时间变化的源	110
6.1.1 时谐场源	110
6.1.2 脉冲源	110
6.2 时谐场振幅和相位的提取	115
6.3 时谐场建立的开关函数	116
6.4 面电流源和线电流源	118
6.4.1 面电流源在自由空间的辐射	118
6.4.2 一维 FDTD 中面电流源的加入	119
6.4.3 线电流源在自由空间的辐射	120
6.4.4 二维 FDTD 中线电流源的加入	120
6.5 电偶极子源	121
6.6 总场边界条件	123
6.6.1 入射波加入的等效原理	123
6.6.2 二维总场边界条件	124
6.6.3 三维总场边界条件	127
6.6.4 一维总场边界条件	130
6.7 平面波的加入	131
6.7.1 一维 FDTD 平面波场投影到二维总场边界	131
6.7.2 一维 FDTD 平面波场投影到三维总场边界	133
复习思考题	135
参考文献	137
第七章 近—远场外推	138
7.1 近场外推的等效原理	138
7.2 三维时谐场的外推	140
7.2.1 基本公式	140
7.2.2 封闭面积分计算的平均值方法	142
7.2.3 封闭面积分计算的双界面方法	145
7.3 二维时谐场的外推	146
7.3.1 基本公式	146
7.3.2 回路积分计算的平均值方法	148
7.3.3 回路积分计算的双回路方法	150
7.4 三维瞬态场的外推	151
7.4.1 基本公式	151
7.4.2 FDTD 数据外推远区场的投盒子方法	152
7.5 二维瞬态场的外推	155
7.6 瞬态场外推时谐场	157
复习思考题	157
参考文献	158

第八章 网格剖分技术	159
8.1 亚网格技术	159
8.1.1 亚网格区的划分	159
8.1.2 波动方程方法	160
8.1.3 算例	162
8.2 可跨越介质边界的亚网格技术	163
8.2.1 亚网格的布局	163
8.2.2 亚网格算法	164
8.2.3 算例	165
8.3 理想导体表面共形网格技术	167
8.3.1 二维理想导体共形网格	167
8.3.2 三维理想导体的共形网格	170
8.4 介质表面共形网格技术	175
8.4.1 规则 Yee 元胞中介质参数的平均值含义	175
8.4.2 共形网格中介质参数的等效	176
8.4.3 FDTD 递推式的修正	177
8.5 理想导体表面涂层共形网格	180
8.5.1 共形网格回路导体外部的等效介质参数	180
8.5.2 共形网格回路的有效长度和面积	181
8.5.3 算例	182
8.6 介质表面涂层共形网格	184
8.6.1 共形网格电磁场节点处的等效介质参数	185
8.6.2 FDTD 递推式的修正	185
8.6.3 算例	186
8.7 细导线 FDTD	188
8.8 柱坐标中 FDTD	192
8.9 球坐标中 FDTD	195
参考文献	198
第九章 FDTD 计算电磁散射	200
9.1 散射目标的建模	200
9.1.1 简单物体的建模	200
9.1.2 基于型值点数据的复杂物体建模	201
9.1.3 基于三角面片数据的复杂物体建模	202
9.1.4 FDTD 离散网格的确定	205
9.2 内存与时间步估计及计算流程	206
9.2.1 FDTD 计算所需内存的估计	206
9.2.2 计算时间步估计	207
9.2.3 计算流程	207
9.3 二维散射算例	208
9.3.1 二维时谐场算例	209

9.3.2 二维瞬态场算例	210
9.4 三维散射算例	213
9.4.1 三维时谐场算例	213
9.4.2 三维瞬态场算例	216
9.5 三维问题转换为二维计算	218
9.6 平面波斜入射到无限长导体柱的散射	219
9.7 矩形波导中的散射	223
9.7.1 矩形波导中 TE_{10} 入射波加入的激励空间方法	223
9.7.2 矩形波导中的散射	226
9.8 波导中介质参数的反演	228
9.8.1 常规介质参数反演的 NRW 方法	228
9.8.2 双负介质参数反演的修正 NRW 方法	232
9.8.3 介质参数反演算例	234
参考文献	236
第十章 FDTD 计算天线辐射	238
10.1 轴对称情形柱坐标 FDTD	238
10.1.1 轴对称情形柱坐标下差分方程及稳定性条件	238
10.1.2 吸收边界条件	239
10.1.3 轴线上的边界条件	244
10.1.4 远区场的外推	244
10.2 同轴线内场的计算以及同轴线馈电口径处的耦合	245
10.2.1 同轴线内场的计算以及激励源的加入	245
10.2.2 同轴线口径处的耦合	247
10.3 金属平板上圆柱天线的辐射	249
10.4 金属平板上圆锥天线的辐射	252
10.5 带金属平板反射器的圆柱天线辐射	254
10.6 TEM 喇叭天线的辐射	255
参考文献	258
第十一章 色散介质 FDTD	259
11.1 色散介质基本模型	259
11.1.1 色散介质的频域模型	259
11.1.2 介质极化率的时域表示式	262
11.2 色散介质 RC-FDTD	263
11.2.1 色散介质时域本构关系的卷积形式	263
11.2.2 Debye 介质 RC-FDTD	265
11.2.3 Drude 介质和等离子体 RC-FDTD	266
11.2.4 Lorentz 介质 RC-FDTD	266
11.2.5 分段线性循环卷积法	267
11.3 色散介质 Z 变换 FDTD	270

11.3.1 Z 变换	270
11.3.2 Debye 介质 Z - FDTD	273
11.3.3 Drude 介质和等离子体 Z - FDTD	274
11.3.4 Lorentz 介质 Z - FDTD	276
11.4 色散介质 ADE - FDTD	277
11.4.1 Debye 介质 ADE - FDTD	278
11.4.2 Drude 介质 ADE - FDTD	279
11.4.3 Lorentz 介质 ADE - FDTD	280
11.5 色散介质 SO - FDTD	281
11.5.1 介电系数的有理分式函数形式	281
11.5.2 移位算法	283
11.5.3 有理分式中 $M=N=1$ 和 $M=N=2$ 的情形	286
11.6 色散介质 SARC - FDTD	287
11.6.1 介质极化率的时域指数函数形式	287
11.6.2 数字信号处理中的 SARC 算法	288
11.6.3 SARC - FDTD 步进公式	290
11.7 算例	292
11.8 色散介质的吸收边界	295
11.8.1 色散介质的 Mur 吸收边界	295
11.8.2 截断色散介质的 UPML	296
11.8.3 截断色散介质的 CPML	298
参考文献	300

第十二章 FDTD 计算半空间传播和散射	302
12.1 分层各向异性介质的反射和透射	302
12.1.1 FDTD 公式	302
12.1.2 算例	304
12.2 表面阻抗边界条件的时域形式	305
12.2.1 表面阻抗的频域表达式	306
12.2.2 时域表面阻抗的近似表达式	307
12.2.3 时域表面阻抗的准确表达式	309
12.2.4 表面阻抗边界条件在 FDTD 方法中的实现	311
12.3 用时域表面阻抗边界条件计算有耗地面反射	313
12.4 有耗地面反射从二维问题转化为一维问题	316
12.5 半空间 FDTD	317
12.5.1 半空间散射的照射波和三波法	317
12.5.2 入射反射和透射波加入的一维 FDTD 方法	321
12.5.3 算例	322
12.6 分层半空间中平面波传播的时域方程	324
12.6.1 问题的提出	324
12.6.2 垂直入射波的一维时域方程	325

12.6.3 斜入射 TM 波的准一维时域方程	326
12.6.4 斜入射 TE 波的准一维时域方程	328
12.6.5 斜入射准一维波方程 FDTD 的稳定性条件	329
12.6.6 算例	330
12.7 分层半空间 FDTD	333
12.7.1 准一维波方程方法用于二维总场边界	333
12.7.2 准一维波方程方法用于三维总场边界	338
12.7.3 分层半空间散射的二维算例	340
12.7.4 分层半空间散射的三维算例	343
参考文献	344

第十三章 FDTD 的若干进展 346

13.1 非均匀网格 FDTD	346
13.2 散射传递函数的应用	349
13.3 周期结构 FDTD	351
13.3.1 Floquet 定理	351
13.3.2 垂直入射情形的周期边界条件	352
13.3.3 斜入射情形的周期边界条件	353
13.3.4 入射波的加入	354
13.3.5 介质光栅 Floquet 模的分析	355
13.4 有集中元件的 FDTD	358
13.4.1 电阻	359
13.4.2 电容	360
13.4.3 电感	361
13.4.4 二极管	362
13.4.5 结型晶体管	362
13.5 各向异性介质 FDTD	364
13.5.1 无耗电各向异性介质	364
13.5.2 有耗电各向异性介质	365
13.6 粗糙面散射的 FDTD	368
13.6.1 FDTD 区	368
13.6.2 高斯窗函数	369
13.7 网络并行 FDTD	370
13.7.1 网络并行计算	370
13.7.2 区域分割并行 FDTD 方法	371
13.7.3 程序实现	373
13.7.4 算例	375
13.8 ADI-FDTD	376
13.8.1 二维 TM 波的 ADI-FDTD 公式	377
13.8.2 二维 UPML 的 ADI-FDTD 公式	381
13.8.3 在二维 ADI-FDTD 中加入线电流源	385

13.9 磁化等离子体 FDTD	388
13.9.1 磁化等离子体介电系数张量	388
13.9.2 磁化等离子体的 SO-FDTD 迭代公式	390
13.9.3 磁化等离子体的时域本构关系	391
13.10 磁化铁氧体 FDTD	393
13.10.1 磁化铁氧体磁导系数张量	393
13.10.2 磁化铁氧体的 SO-FDTD 迭代公式	395
13.10.3 磁化铁氧体的时域本构关系	396
参考文献	398
 综合编程习题	 402
附录一 傅立叶变换及离散傅立叶变换	406
附录二 二维时谐场 FDTD 程序和算例	407
附录三 三维瞬态场电偶极子辐射 FDTD 程序和算例	432
索引	447
附图 辐射和散射近场彩色图	

第一章 引言

自 1966 年 Yee 首次提出时域有限差分(FDTD)方法以来,这一方法得到迅速发展及广泛应用。本章简要回顾 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的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,解析解具有重要的指导性意义。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 E 、 H 分量在空间和时间上采取交替抽样的离散方式,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。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 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 40 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。20 世纪 80 年代以来, 每年发表的论文几乎按指数增长^[2]。下面简要回顾 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的方法。

——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]用圆柱坐标系下的 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, 但论文未给出外推的具体方法; 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