



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 7

瞬变电磁场 ——理论和计算

王长清 祝西里 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

瞬变电磁场：理论和计算/王长清,祝西里编著. —北京：北京大学出版社，
2011.4

(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-15920-0

I. ①瞬… II. ①王…②祝… III. ①暂态特性—电磁场—研究 IV. ①0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 173718 号

书 名：瞬变电磁场——理论和计算

著作责任者：王长清 祝西里 编著

责任编辑：王剑飞

标准书号：ISBN 978-7-301-15920-0/TN·0053

出版发行：北京大学出版社

地 址：北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址：<http://www.pup.cn> 电子信箱：zpup@pup.pku.edu.cn

电 话：邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014

出版部 62754962

印 刷 者：北京中科印刷有限公司

经 销 者：新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 22.5 印张 420 千字

2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

定 价：56.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:(010)62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

《中外物理学精品书系》 编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王 牧	王鼎盛	石 兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱 星
向 涛	刘 川*	许宁生	许京军	张 酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭 卫*
资 剑	龚旗煌	崔 田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了《中外物理学精品书系》,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,《中外物理学精品书系》力图完整呈现近现代世界和中国物理科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

《中外物理学精品书系》另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究

的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,《中外物理学精品书系》还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子亲身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套《中外物理学精品书系》的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

《中外物理学精品书系》编委会 主任
中国科学院院士,北京大学教授
王恩哥

2010年5月于燕园

内 容 简 介

本书系统、深入地阐述了瞬变电磁场的理论和相关的时域计算方法。全书约 42 万字,共 10 章。第一章简要地介绍了时域电磁场的基础理论。第二、三章着重讨论了非色散和色散媒质中瞬变电磁场的分析方法和传播规律,其中较详细地介绍了有关问题的索末菲理论和布里渊理论。第四章比较深入地讨论了传输和辐射系统中瞬变电磁场的分析方法。瞬变电磁场的数值计算问题是本书讨论的另一个重点。第五章首先讨论了频域数值解到时域的变换问题,其中包括频域方法的基本原理。第六至十章分别讨论了瞬变电磁场计算的各种直接时域方法,包括时域积分方程法、时域有限差分法、时域多分辨分析法、时域有限元法和时域有限体积法,这些内容反映了所述方法的最新发展。

本书可作为理工科院校中攻读硕士和博士学位的研究生学习电磁场理论和计算电磁学的教材或参考书,也可供从事应用数学、应用物理、电磁场工程以及相关领域研究的科技工作者参考。

前 言

时域电磁学是当今电磁学领域非常活跃并正在蓬勃发展中的一个前沿分支,它的主要研究对象是瞬变或非时谐电磁场的辐射、传输和散射等问题的分析和计算方法及其特点和规律.由于科技发展历史的原因,传统的电磁场理论重点放在对时谐稳态电磁场的研究,其成果主要适用于单一频率或窄带电磁信号,其分析方法是隐去时间变量的频域方法,相比之下可称之为频域电磁学.

时域电磁学的兴起主要源于对核爆炸所产生的电磁脉冲对电子系统巨大破坏力的关注和电磁脉冲应用前景的吸引.随着信息技术的发展,在通信和计算机等电子系统中超短脉冲或超宽带信号的应用越来越广泛.为了开发设计高品质的宽带电磁系统,需要对系统的宽带特性有尽可能精细和准确的分析,甚至需要深入地了解其中所发生的瞬变过程.为了满足这些需要,发展能对瞬变电磁场问题进行精确、高效分析和计算的方法成为迫切的需求.

时域电磁场问题的研究在早期的工作中主要发展的是解析方法,由于在时域求解麦克斯韦方程比在频域求解增加了一个时间变量,大大增加了求解的难度,通常还是采用积分变换的方法,这使得解析法只能解决少数相对简单的问题.随着电子计算机的诞生和发展,研究重点转向了数值计算方法.20世纪80年代以来电磁场计算的直接时域方法越来越受到重视,并得到了迅速的发展.另一方面,时域电磁学的影响也越来越广泛,已经在通信、雷达、计算机网络、电子工程、地物探测、电磁兼容和生物电磁学等领域发挥着重要作用.

基于以上原因,深感时域电磁学已是电磁场理论和计算电磁学教学中不可缺少的内容,于是萌生了写一本系统阐述瞬变电磁场理论分析和数值计算方法的书籍的想法,希望它能成为研究生相关课程的教材或参考书,并能弥补国内外已出版的相关书籍的不足.

本书内容包括瞬变电磁场的理论分析和数值计算方法两个方面.虽然解析分析只能解决比较简单的问题,但掌握处理瞬态电磁场问题的解析方法和它所揭示的一般规律,对于一个高素质的电磁理论研究人员还是非常必要的.本书首先概述了时域电磁场理论的基础知识,然后系统地讨论了在非色散和色散媒质中瞬变电磁场的辐射和传播问题的分析方法和规律.对非色散媒质问题着重介绍了卡尼亚-德·霍普方法,得到了不同条件下的时域格林函数和偶极源的辐射特性.对色散媒质问题则详细地介绍了索末菲理论和布里渊理论,深刻揭示了瞬变电磁场在色散媒质中的传播规律.以上是前三章的主要内容,本书的第四章则

专门讨论传输和辐射系统中的瞬变电磁场,讨论了色散和非色散传输系统中瞬变电磁场的分析方法和传输规律,讨论了偶极子和线型天线瞬态辐射的分析方法和特点。

在计算机高度发展的当代,能解决实际遇到的复杂瞬变电磁场问题的还是数值计算方法,而这也是该领域当前发展的主要方向,作为教材自然也就应该把数值方法放到重要的位置.本书的第五章讨论频域数值解到时域的变换问题,为了叙述的系统性和完整性,对频域方法的基本原理也进行了适当的讨论,这些内容还是后面接着论述的直接时域方法的基础.从第六章开始往后都是讨论瞬态电磁场计算的直接时域方法,这些方法包括时域积分方程法、时域有限差分法、时域多分辨分析法、时域有限元法和时域有限体积法.其中的时域有限差分法发展最为成熟,应用也最广泛,理应作为讨论的重点,但是,已经有一些著作对该问题进行专门的论述,故本书只做必要的讨论,而对最新的发展给予足够的重视.鉴于其他几种时域方法在国内已出版的相关著作中还很少论及,本书则对它们的原理进行了较系统深入的讨论,以期读者能对这些正在迅速发展的新方法有较深刻的理解。

本书的写作是在北京大学教材建设基金的资助和北京大学出版社的支持下完成的.在写作过程中得到了我国电磁理论界的诸多朋友们以及我校信息科学技术学院的领导、老师和同学们的帮助、关心和鼓励,在此一并对他们表示衷心的感谢.我们要特别地对本书的责任编辑王剑飞表示由衷的感谢,没有她的努力本书不可能顺利地出版,她为本书的出版所付出的辛劳和作出的贡献远远超出了对责任编辑的要求。

此外,我们还想借本书出版的机会表达一点自己的心迹,虽然已退休多年,总有一种责任感在不断地驱使着自己,想尽量发挥点余热,为社会继续做点有益的事情,这就是写作本书的动力.此外,在现在的年龄还能完成这样繁重的工作也和我们的儿女海波、海云的理解和支持分不开,他们的优秀表现不仅消除了我们的后顾之忧,更在精神上给了我们很多慰藉和鼓舞。

由于本书所涉及的内容相当广泛,很多内容是当前国内外学者最新研究成果,而作者的学识有限,可能会有理解不当之处,在写作中也会有所疏漏,书中不妥甚至错误之处在所难免.恳请读者不吝指正,以便有机会再版时加以改正。

王长清 祝西里
于北京大学承泽园
2007年4月

目 录

绪论	(1)
§ 0.1 时域电磁学的兴起和发展	(1)
§ 0.2 时域电磁场分析计算的主要方法	(2)
§ 0.3 在瞬变电磁场计算中直接时域法与频域法的比较	(4)
第一章 时域电磁场的理论基础	(6)
§ 1.1 描述宏观电磁场的基本方程	(6)
§ 1.2 电磁场的波动方程	(11)
§ 1.3 电磁场的标势和矢势	(13)
§ 1.4 非齐次波动方程的积分解——推迟势	(16)
§ 1.5 时域电磁场的几个基本定理	(20)
§ 1.6 时域电磁场的因果律	(23)
§ 1.7 矢量函数空间和矢量线性算子	(29)
第二章 非色散媒质中的瞬变电磁场	(33)
§ 2.1 均匀媒质中任意时变平面电磁波	(33)
§ 2.2 均匀媒质中的一维任意时变电磁场的边值问题	(37)
§ 2.3 均匀无耗媒质中点源的场——时域格林函数	(42)
§ 2.4 均匀导电媒质中点源的场	(49)
§ 2.5 半空间上方线源的瞬态响应	(53)
§ 2.6 半空间上方偶极子的瞬态响应	(56)
第三章 色散媒质中的瞬变电磁场	(64)
§ 3.1 色散媒质的特性	(64)
§ 3.2 波包、群速和能速	(66)
§ 3.3 色散媒质中瞬变电磁场传播的索末菲理论	(70)
§ 3.4 色散媒质中瞬变电磁场传播的布里渊理论	(77)
第四章 传输和辐射系统的瞬变电磁场	(90)
§ 4.1 瞬变电磁场的传输	(90)
§ 4.2 波导中电磁场的瞬变过程	(96)
§ 4.3 瞬变电磁偶极子的辐射场	(101)
§ 4.4 对称线天线的瞬态辐射	(106)

§ 4.5	对称圆柱天线的瞬态辐射	(110)
§ 4.6	分布加载天线的瞬态辐射	(113)
第五章	频域数值解到时域的变换	(119)
§ 5.1	算子方程近似求解的加权余量法	(119)
§ 5.2	频域积分方程及其矩量解法	(125)
§ 5.3	频域微分方程和有限元法	(136)
§ 5.4	频域到时域的变换	(153)
§ 5.5	奇点展开法	(155)
第六章	时域积分方程法	(158)
§ 6.1	时域积分方程的导出	(158)
§ 6.2	任意形状细导线散射问题的时域积分方程法	(164)
§ 6.3	任意导体散射问题的时域积分方程法	(170)
§ 6.4	时域平面波法	(178)
第七章	时域有限差分法	(189)
§ 7.1	时域有限差分法的基本原理	(189)
§ 7.2	数值稳定性分析	(198)
§ 7.3	数值色散问题	(202)
§ 7.4	在电磁散射和辐射问题中的应用	(206)
§ 7.5	Engquist-Majda 吸收边界条件	(222)
§ 7.6	Berenger 完全匹配层	(233)
§ 7.7	各向异性完全匹配层	(241)
§ 7.8	高阶时域有限差分法	(246)
§ 7.9	ADI-FDTD 法	(250)
§ 7.10	时域有限差分法的并行算法	(255)
第八章	时域多分辨分析法	(265)
§ 8.1	多分辨分析和小波正交基	(265)
§ 8.2	常用的小波正交基	(272)
§ 8.3	基于 Haar 小波基的时域多分辨分析法	(280)
§ 8.4	基于 Battle-Lemarie 小波基的时域多分辨分析法	(287)
§ 8.5	数值稳定性和数值色散分析	(294)
§ 8.6	时域多分辨分析法的应用	(297)
§ 8.7	基于双正交基的 MRTD	(299)
第九章	时域有限元法	(308)
§ 9.1	时域有限元法的基本原理	(308)
§ 9.2	完全匹配层在时域有限元法中的应用	(317)

§ 9.3 时域有限元——边界积分法	(326)
第十章 时域有限体积法	(330)
§ 10.1 基于守恒形式控制方程的时域有限体积法	(330)
§ 10.2 基于积分形式麦克斯韦方程的时域有限体积法	(335)
参考文献	(340)

绪 论

§ 0.1 时域电磁学的兴起和发展

时域电磁学(Time Domain Electromagnetics)是电磁学领域非常活跃并正在蓬勃发展的一个前沿分支,它的主要研究对象是瞬变或非时谐电磁场的辐射、传输和散射等问题的分析和计算方法及其规律和特征.由于历史的原因,传统的电磁场理论重点放在对时谐稳态电磁场的研究,其成果主要适用于单一频率或窄带电磁信号,其研究分析方法是隐去时间变量的频域方法,相比之下可称为频域电磁学.

时域电磁学的兴起主要源于 20 世纪 60 年代对核爆炸所产生的电磁脉冲(NEMP)对电子系统巨大破坏力的关注.这种电磁脉冲有两个主要的特点:其一,它是在时间上短暂的单个脉冲,有比较陡峭的前沿,当它与系统作用时能在时间上展现其特性.其二,它有很宽的频谱,包含了从直流开始的很宽的频率分量.系统对单个脉冲的响应包含了宽频带的信息,与时谐稳态场的作用有巨大的差异.为了深入了解核电磁脉冲与各类电磁系统相互作用的机制和规律,人们从理论和实验等角度开展了多方面的研究,从而开启了瞬变电磁场研究的新方向.随着对瞬变电磁场研究的不断深入,人们不仅加深了对这种复杂现象所具特性的认识,更认识到可能的广泛应用.这些研究成果不仅直接有助于核电磁脉冲的防护和电磁脉冲武器的研究,在冲激雷达、遥感和雷达目标识别等的研究中也发挥了重要作用.

随着信息技术的发展,在通信和计算机等电子系统中,超短脉冲或超宽带信号的应用越来越普遍.为了开发设计高品质的宽带系统,需要对系统的宽带特性有尽可能精细和准确的了解,甚至需要深入了解其中所发生的瞬变过程.为了满足这些要求,需要发展精确的、高效的、能对瞬变电磁场进行分析和计算的方法.经典的频域方法已经不能适应这种需要,从而促进了直接时域方法的发展.

从本质上讲,在实践中所遇到的电磁波都是复杂的时变过程,时谐稳态电磁波只是电磁现象的一种特定的理想状态.为了深入探索电磁现象的普遍规律,自麦克斯韦电磁理论诞生以来,人们就没有停止过直接在时域研究各种复杂电磁过程的努力.在早期所开展的工作中,主要发展的是解析方法.由于在时域求解麦克斯韦方程比在频域求解增加了一个时间变量,大大增加了求解的难度.为了克服直接求解的困难,往往采用积分变换的方法,但在求逆变换时仍然存在各种限制,使得解析方法只能解决一些相对简单的问题.随着电子计算机的诞生和发

展,研究重点转向了时域电磁场分析计算的数值方法.自20世纪八九十年代以来,电磁场计算的直接时域方法越来越受到重视,并且得到了迅速的发展.与此同时,时域电磁学的影响也越来越广泛,已经在通信、计算机网络、电子工程、雷达、地物探测、电磁兼容和生物电磁学等领域发挥着重要作用.

§ 0.2 时域电磁场分析计算的主要方法

实践已经充分证明,麦克斯韦方程是宏观电磁场理论的可靠基础,电磁场理论的任务就是在各种复杂的实际条件下求解麦克斯韦方程,以便更深刻地理解各种复杂的电磁过程,并满足科学技术发展的各种需要.对时域电磁学而言,就是在各种需要的条件下求解包含时间变量的麦克斯韦方程.在所需条件下求得由麦克斯韦方程导出的各类数学方程的封闭形式的解析解,是人们所追求的解决问题的理想方法,它被称为解析法.解析法的优点是显然的,如果不考虑建立数学方程时对实际问题所作的近似处理,解析法所得到的解是精确的.一旦求得了解析解,则该解对其中所包含的某些参数是普适的,当参数改变时无需重新求解.同时,解对某些参数的依赖关系反映了一定的规律,从中可获得非常丰富的信息.遗憾的是,与求频域解相比,由于增加了时间变量使得直接求时域方程的解析解变得更加困难.实际上,求解时域电磁场问题的解析法主要是积分变换方法,即利用傅里叶变换或拉普拉斯变换,先在变换域求得解析解,然后再变换到时域.显然,这种方法会遇到双重困难,首先必须在变换域求得封闭形式的解析解,然后还要求其逆变换不仅存在而且还得具有封闭解析式.可想而知,能得到这种解的问题一定非常有限,而且问题一般都比较简单.尽管如此,这方面的努力还是非常有价值的,因为这些解能深刻地揭示电磁场的运动规律,具有重要的科学价值.

由于求得时域电磁场问题的解析解的难度极大,甚至对比较复杂的问题根本就不可能获得解析解,使得数值近似方法变得更加重要.求解电磁场问题的数值方法首先在频域得到了长足发展,例如求解频域积分方程的矩量法和求解频域微分方程的有限元法等.原则上讲,频域方法也可以用来求时域解,即先在所感兴趣的频带内的足够多的频点上求得频域数值解,然后利用离散傅里叶逆变换或快速傅里叶变换求得所需的时域数值解.这种方法可称为频域-时域数值变换法.这种方法主要受到效率和精度等方面的限制.

求解时域电磁场问题最具发展前途的还是直接时域数值方法,这类方法的特点是在时域建立场的方程,并直接在时域求得方程的数值解.时域积分方程法、时域有限差分法、时域多分辨分析法、时域有限元法、时域有限体积法以及传输线模型法等这类方法已经被证明十分有效.下面对这些方法做些简单评述.

时域积分方程法 它是相对发展比较早的一种电磁场计算的直接时域方

法,但当时主要用简单求和的积分近似法,这使得电磁场计算不仅效率低且精度也难提高.时域积分方程法的出发点是时域积分方程,这种方程可由频域积分方程经傅里叶逆变换获得,也可借助时域辅助势函数来表达.现代对时域积分方程的求解方法是,对其空间变量部分采用矩量法方式进行离散,而对时间变量则采用差分法,且既能构成显式格式,也可以构造隐式格式,后者将是无条件稳定的.时域积分方程法保留了积分方程法的所有优点,即由于方程已包含了边界条件而可缩小计算空间,而对由表面积分方程所描述的问题,计算空间仅限于积分表面,使计算空间相对较小.

时域有限差分法 时域有限差分法是在 Yee 氏网格中直接对时域麦克斯韦旋度方程进行差分近似的一种电磁场的数值计算方法.它于 20 世纪 60 年代提出,直至 80 年代才比较成熟.到现在不仅应用广泛,而且仍处于不断发展之中.实践已经表明,时域有限差分法是已知各种电磁场的数值方法中运用范围最广的一种方法.由于时域有限差分法直接从麦克斯韦方程出发,不需要任何导出方程,避免了使用更多复杂的数学工具,而且直接在时域中模拟电磁波的传播及其与物体相互作用的物理过程,使得它具有简单、直观和容易掌握等特点.在时域有限差分法的差分格式中,被模拟空间电磁性质的参量是按空间网格给出的,因此只需在相应的空间网格点设置适当的参数,即可模拟各种复杂的电磁结构,而且媒质的非均匀性、各向异性、色散特性和非线性等均能很容易地被精确模拟.在网格空间中电磁场分量是被交叉放置的,而且在计算中用差分代替微商,使得介质交界面上的边界条件自然得到满足,这就为模拟复杂电磁结构提供了极大的方便.以上特点保证了时域有限差分法极广泛的适用性.虽然时域有限差分法由于其微分方程特性而需要在计算空间的截断处设置必要的吸收边界条件,从而扩大了计算空间的范围,但由于它所需要的存储空间和 CPU 时间只与未知量个数成正比,具有所有数值方法中最小的复杂度,仍然有较高的计算效率.尤其是,它非常适合于并行计算,这正好符合了当今计算机高速计算的发展趋势,使之有利于在解决大尺度极复杂电磁场问题中的应用.时域有限差分法的主要缺点是对曲线或曲面模拟中阶梯近似引入的误差,而采用共形网格又过于复杂.

时域多分辨分析法 为了克服时域有限差分法的不足,20 世纪 90 年代把小波分析的多分辨分析概念引入到电磁场的计算中,形成了一种电磁场计算的时域多分辨分析法.该方法将电磁场各分量用多分辨分析的尺度函数和小波函数进行展开,用伽辽金法对时域麦克斯韦方程进行离散,构成一种既与时域有限差分法有关,又具有更广泛更深刻意义的电磁场的时域计算格式.时域多分辨分析法给出了一个全新的统一的理论构形,不仅将各种时域有限差分法与其他电磁场的分析方法联系起来,而且使电磁场问题的计算复杂度几乎可以降低一个数量级.与传统的时域有限差分法相比,时域多分辨分析法之所以能降低对计算

机资源的需求,是因为在相同的精度水平上,后者所用的网格尺度可以更大些,只在需要的地方自动选择更高的分辨率.事实上,从某种意义上讲,时域多分辨分析法是时域有限差分法的更一般化形式,后者只不过是前者将小波基函数换成矩形脉冲函数的一种特殊情况.从应用方面看,时域多分辨分析法还有不少问题有待于进一步完善,目前还没有被广泛地应用,但其发展前景值得关注.

时域有限元法 这是一种从时域微分方程出发建立的有限元方法,其途径主要有两个:一条途径是直接从事域麦克斯韦方程组出发,另一条途径是以时域麦克斯韦方程导出的波动方程为基础.对方程中空间变量的离散都采用伽辽金法,而展开函数则是频域有限元法中通用的基函数.时间变量的离散也是采用差分法,可有显式和隐式两种格式.由它所采用的基函数可知,在空间离散上时域有限元法与频域有限元法没有什么区别,因此保留了对空间精确模拟所具有的强大功能,这也正是发展时域有限元法的主要动力.当然,时域有限元法仍然保留了具有较高计算复杂度的缺点,从而限制了这种方法的值,使其主要体现在对复杂几何结构的精确模拟方面.

时域有限体积法 用于电磁场计算的时域有限体积法是在 20 世纪 80 年代末至 90 年代初逐步发展起来的.有限体积法最早发源于流体力学,以守恒方程为出发点,故在引入电磁场问题时也是把麦克斯韦方程转化为守恒形式,以便可以对比地继承有限体积法在流体力学中的应用成果.另一方面,也可以由积分形式的时域麦克斯韦方程出发来构造时域有限体积法的离散格式,使之与时域有限差分法建立起联系,并可视为时域有限差分法的直接发展.和有限元法类似,时域有限体积法的网格具有很大灵活性,从而有很强的精确模拟复杂几何结构的能力.所以可以说,时域有限体积法具备了有限元法和时域有限差分法二者所具有的优点.

传输线模型法 这种方法是用虚拟传输线构成空间网格,在其公共结点处形成场(电压或电流)的传输与反射,由此建立与麦克斯韦方程的等效关系.另一方面,传输线模型法也可以用惠更斯原理解释,场在传输线矩阵中的传播由一系列二次源产生.在某些简单的情况下,传输线模型法与时域有限差分法有同样的表示.因为传输线模型法需要反方向传播的信息,故需要更多的计算机资源.虽然传输线模型法在某些方面比时域有限差分法有一定的优越性,但由于它缺乏直观性,运用起来有诸多不便,故始终没能得到广泛的应用.因此,在本教材中不再对此进行深入讨论.

§ 0.3 在瞬变电磁场计算中直接时域法与频域法的比较

如上所述,在瞬变电磁场问题中如果能在时域直接获得解析解当然是最理想的,只是难度非常大,往往做不到.如果能做到,则可避免变换方法的复杂过程

及所受到的种种限制. 实际上, 不管是用哪种方法获得时域解析解都是极力追求的, 永远是一种努力方向. 现在我们关心的是: 如果需要用数值方法解决问题, 那么在频域法和直接时域法中应选择哪一种? 下面对这两种方法加以简单的比较.

所谓瞬变电磁场问题, 往往是指非时谐激发电流源在各种环境下所激发电磁场的求解. 当源位于无穷远时, 就相当于入射场为非时谐平面波的情况. 为了对问题有更好的物理了解, 或者为了实际的需要, 往往要求得在时域上直接表示的解答. 当然也存在另一种情况, 最终需要的是在宽频带上的信息, 而求得时域解只是一个手段. 不管哪种情况, 利用频域法或直接时域法都能达到目的, 问题是哪种方法有更高的效率.

总体上说, 当计算目的是获得时域响应时, 时域方法往往有更高的效率. 这是因为时域方法只需一次计算就能获得全部时域信息; 而用频域方法则需在所需频带内足够多的取样点上进行多次计算, 才能获得足够多的数据, 以便能利用离散傅里叶变换求得所需的时域解. 如果所需要的只是在脉肿信号作用下系统的峰值响应, 则时域法比频域法更加有效得多, 因为即使并不需要全部时域信息, 频域法也必须由全部频域取样数据才能求得, 而时域方法只需运算到峰值点出现即可停止. 当然, 两者之间在效率上的差异并不能直接从计算次数上判断, 因为时域法往往采用步进算法, 其效率也和计算步数相关. 当计算目的仅为获得宽频带信息时, 时域方法也可能在效率方面仍然占有优势, 因为一次时域计算就可以获得宽频带的信息. 但是, 对于不同波形的时域激励源系统的响应, 用时域方法必须分别计算; 而就频域方法而言, 对于时不变线性系统, 只要获得了它的频域响应函数, 则系统对不同时域源的响应, 只需通过卷积计算就可获得.

时域法对频域法的另一个优势, 是时域法也适用于非线性系统和时变系统. 时域法也存在一个特有的稳定性问题, 对显式算法而言, 其稳定性是有条件的, 即当空间离散尺度给定后, 其时间步长就受到了限制, 由于采用小的时间步长, 就增加了计算步数, 从而限制了计算效率. 隐式算法虽然是无条件稳定的, 时间步可取得比较长, 但每一时间步需要矩阵求逆, 也会影响计算效率. 实际上, 即使稳定条件得到了满足, 由于各种误差的积累, 也可能在计算的后期出现不稳定现象, 需要进一步采取措施加以解决.

虽然瞬变电磁场计算的时域方法还存在着种种问题, 但已经在一些重要方面显示出其优越性, 这也正是它成为当前计算电磁学中很活跃的研究领域的重要原因.

第一章 时域电磁场的理论基础

宏观电磁场理论建立在坚实的科学实验和长期工程实践的基础之上,具有完美的理论体系和极为丰富的内容. 电磁场理论的任务是阐述电磁学的物理原理和用以求解各种电磁场问题的方法,给出各种条件下电磁场的运动规律及其工程应用前景. 本章将概述电磁场理论的最基本部分,作为后续各章所述内容的理论基础. 根据本书的需要,将以时域电磁场理论为要点进行论述.

§ 1.1 描述宏观电磁场的基本方程

一个多世纪前,麦克斯韦(Maxwell)集电磁学研究之大成,创立了描述宏观电磁场运动规律的方程组,从而奠定了宏观电磁场的理论基础. 一百多年来,无数科学实验和电磁场工程实践没有发现与之相违背的事例,这使人们坚定地相信,解决各种宏观电磁场问题,可以以麦克斯韦电磁场理论为依据. 现在通用的麦克斯韦方程组是由赫兹(Hertz)和亥维赛(Heaviside)对原方程经过简化整理而得到的. 针对不同的需要,麦克斯韦方程组可表示成不同的形式.

1.1.1 微分形式的麦克斯韦方程

在麦克斯韦方程组中,用于表示电磁场特性的主要有4个物理参量. 由于电磁场本质上为矢量场,所以这4个参量均为矢量,分别用 \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{H} 和 \mathbf{B} 表示,其中: \mathbf{E} 称为电场强度(单位为伏[特]/米,表示为V/m), \mathbf{D} 称为电通量密度或电位移矢量(单位为库[仑]/米²,表示为C/m²), \mathbf{H} 称为磁场强度(单位为安[培]/米,表示为A/m), \mathbf{B} 称为磁通量密度或磁感应强度(单位为韦[伯]/米²,表示为Wb/m²).

从本质上讲,宏观电磁场产生的根源是带电粒子在空间的分布及其运动而产生的电流. 电量的最基本单位是一个电子所带的电量,因此电量的变化是不连续的,其空间分布也是不连续的. 电磁场是分立的光子,也是不连续的. 宏观电磁场理论是在宏观尺度下才成立的一种电磁场理论,在宏观尺度下电量和场量的分立性质都可以忽略,在空间和时间上都认为是连续的.

在一般情况下,表征电磁场的各物理参量都是位矢 \mathbf{r} 和时间 t 的函数. 在满足宏观尺度的条件时,在媒质连续的空间中,可假定场是 \mathbf{r} 和 t 的连续函数并具有连续导数. 作为电磁场的源或被电磁场所诱导产生的电荷密度 ρ (单位为库