




中国科学院电子信息与通信系列规划教材

微波技术与天线

主 编 毛钧杰

参 编 柴舜连 刘 荧
刘继斌 杨 虎

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书系统地论述了微波技术与天线的基本理论与基本分析方法。全书分为9章,内容包括电磁场理论概述、导行电磁波、传输线理论、平面传输线、微波网络基础、无源微波电路、有源微波电路、天线基础和电波传播。本书以阐述基本概念、基本原理和基本分析方法为主,前5章是理论基础,后4章注重工程应用。各章内容前后呼应,有机结合。

本书可作为高等院校无线电技术、电子技术等专业本科生的教材,也可供相关专业的工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术与天线/毛钧杰主编. —北京:科学出版社,2006

(中国科学院电子信息与通信系列规划教材)

ISBN 7-03-017607-3

I. 微… II. 毛… III. ①微波技术-高等学校-教材②微波天线-高等学校-教材 IV. ①TN015②TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 075934 号

责任编辑:匡 敏 余 江 贾瑞娜 / 责任校对:邹慧卿
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 8 月第一次印刷 印张: 27 1/4

印数: 1—3 000 字数: 513 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

科学出版社 高等教育分社

教学支持说明

科学出版社高等教育分社为了对教师的教学提供支持，特对教师免费提供本教材的电子课件，以方便教师教学。

获取电子课件的教师需要填写如下情况的调查表，以确保本电子课件仅为任课教师获得，并保证只能用于教学，不得复制传播用于商业用途。否则，科学出版社保留诉诸法律的权利。

地址：北京市东黄城根北街16号，100717

科学出版社 高等教育分社 匡敏（收）

联系方式：010-64034548 010-64033787（传真）

kuangmin@mail.sciencep.com

登陆科学出版社网站：www.sciencep.com“教材天地”栏目可下载本表。

请将本证明签字盖章后，传真或者邮寄到本社，我们确认销售记录后立即赠送。

如果您对本书有任何意见和建议，也欢迎您告诉我们。意见一旦被采纳，我们将赠送书目，教师可以免费选书一本。

证 明

兹证明_____大学_____学院/_____系第_____学
年上/下学期开设的课程，采用科学出版社出版的
_____/_____（书名/作者）作为上课教材。任课
老师为_____共_____人，学生_____个班共_____人。

任课教师需要与本教材配套的电子课件。

电 话：_____

传 真：_____

E-mail：_____

地 址：_____

邮 编：_____

学院/系主任：_____（签字）

（学院/系办公室章）

_____年_____月_____日

《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》 编委会

顾问:保 铮 中国科学院院士 西安电子科技大学
刘永坦 两院院士 哈尔滨工业大学
陈俊亮 两院院士 北京邮电大学

主任:谈振辉 教授 北京交通大学

副主任:任晓敏 教授 北京邮电大学
梁昌洪 教授 西安电子科技大学
冯正和 教授 清华大学
张文军 教授 上海交通大学
林 鹏 编审 科学出版社

委员:(按姓氏汉语拼音排序)

段哲民 教授 西北工业大学
顾学迈 教授 哈尔滨工业大学
洪 伟 教授 东南大学
焦李成 教授 西安电子科技大学
李少谦 教授 电子科技大学
毛军发 教授 上海交通大学
沈连丰 教授 东南大学
唐朝京 教授 国防科学技术大学
王成华 教授 南京航空航天大学
王文博 教授 北京邮电大学
徐安士 教授 北京大学
严国萍 教授 华中科技大学
杨建宇 教授 电子科技大学
姚 彦 教授 清华大学
张宏科 教授 北京交通大学
张晓林 教授 北京航空航天大学

秘书:段博原 编辑 科学出版社

丛 书 序

信息技术的高速发展及广泛应用,使信息技术成为当今国际竞争中最重要、最重要的战略技术。信息技术对经济建设、社会变革乃至国家安全起着关键性的作用,它是经济发展的“倍增器”和社会进步的“催化剂”,是体现综合国力的重要标志。在人类历史上,没有一种技术像信息技术这样引起社会如此广泛、深刻的变革。在 20 世纪末和 21 世纪前半叶,信息技术乃是社会发展最重要的技术驱动力,可以说,21 世纪人类已经步入了信息时代。信息产业在世界范围内正在由先导产业逐步变为主导产业。从微观上看,表现为单位产品的价格构成中,能源和材料的消耗减少而信息技术和信息服务的比重上升;从宏观上看,表现为国民生产总值(GDP)中信息产业所占的比重增加。一个国家信息产业的发展水平将是衡量该国社会经济总体发展和现代化程度的重要标志之一。

目前,信息科学已成为世界各国最优先发展的科学之一。党的十六大提出了“加速发展信息产业,大力推进信息化,以信息化带动工业化”的发展战略,以及“优先发展信息产业,在经济和社会领域广泛应用信息技术”的基本国策,使我国信息产业得到了前所未有的重视,信息产业呈现出飞速发展的势头。信息产业的发展离不开信息化人才,信息化人才建设将是信息产业可持续发展的关键。然而,有关调查表明,我国国家信息化指数为 38.46,而信息化人才资源指数仅为 13.43。据权威机构预测,从 2005 年到 2009 年,中国信息行业将以 18.5% 的年复合增长率高速增长,中国信息市场将迎来又一个“黄金年代”。

为了适应新世纪信息学科尤其是电子信息与通信学科的长足发展,在规模上、素质上更好地满足我国信息产业和信息科学技术的发展需要,更好地实现电子信息与通信学科专业人才的培养目标,推进国内信息产业的发展,中国科学院教材建设专家委员会和科学出版社组织电子信息与通信领域的院士、专家、教学指导委员会成员、国家级教学名师及电子信息与通信学科院校的相关领导等组成编委会,共同组织编写这套《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》。

本套教材主要面向全国范围内综合性院校电子信息工程、通信工程、信息工程等相关专业的本科生。本套教材的编委会成员具有国内电子信息与通信方面的较高学术水平,他们负责对本套教材的编写大纲及内容进行审定,可使本套教材的质量得以保证。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。依据最新专业规范,系列教材主要根据教育部最新公

布的电子信息与通信学科相关专业的“学科专业规范”和“基础课程教学基本要求”进行教材内容的安排与设置。同时,根据各类型高校学生的实际需要,编写不同层次的教材。

2. 结构体系完备。本套教材覆盖本科、研究生教学层次,各门课程的知识点之间相互衔接,以便完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。

3. 作者水平较高。我们将邀请设有电子、通信国家重点学科的院校,以及国家级、省级教学名师或国家级、省级精品课程负责人编写教材。

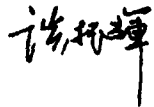
4. 借鉴国外优秀教材。编委会为每门课程推荐一本国外相关的经典原版教材,作为教师编写的参考书。

5. 理论与实际相结合,加强实践教学。教材编写注重案例和实践环节,着力于学生实际动手能力的培养。

6. 教材形式多样。本套教材除主教材外,还配套有辅导书、教师参考书、多媒体课件、习题库及网络课程等。

根据电子信息与通信学科专业发展的战略要求,我们将对本套系列教材不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子信息与通信领域教育及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。

北京交通大学校长



2005年10月

前 言

微波工程领域涉及电磁场理论、微波技术、微波网络、微波天线和电波传播等方面的内容,传统做法是将这些内容写成几本书、分几门课程讲授。随着大学本科专业目录的调整、专业内涵的变化,为适应新时期人才分层次培养的需要,各高等院校都将原有本科专业进行调整与整合,并相应调整了培养方案和课程设置,拓宽了专业口径。针对这些情况,我们本着避免内容重复、有一定深度、尽可能拓宽知识面、便于教和学的精神,将微波工程领域里所涉及的内容综合在《微波技术与天线》一书中,希望它能够比较全面、系统地论述微波工程领域各个方面的基础知识,尽可能讲清楚各部分之间的内在联系,以适应电子科学与技术、信息与通信工程等学科各有关专业教学的需要。

在编写本书的过程中,作者力求做到:①将电磁场与电磁波、微波技术、微波网络、微波电路、微波天线和电波传播等基础知识有机地融合成一个整体,力求消除拼接的痕迹。②不追求基本规律、基本定律的详细推导和严格证明,但应使读者明白提出问题的方法和解决问题的基本思路。③在论述微波电路和天线时,着重讲清它们的结构、工作原理和应用;在论述电波传播时,着重讲清楚各种无线电波的传播特点和应用。④对于先修了“电磁场与电磁波”的专业,本书便于在教学中引用、查阅要用到的“电磁场与电磁波”的知识和结论;对于没有先修“电磁场与电磁波”的专业,本书自成系统,便于教学。

全书共分9章。第1章电磁场理论概述,从麦克斯韦方程组出发,讨论各种电磁场的场方程、基本属性和边界条件,研究时变电磁场的运动规律、无界均匀媒质中的平面电磁波的传播特性、电磁波投射到不同媒质分界面上的反射和折射、时变电磁场中的位函数以及后续章节要用到的时变电磁场中的若干定理和原理。第2章导行电磁波,以纵向场法为基础,研究矩形波导、圆柱形波导和同轴线中的导行电磁波的场结构和传播特性。第3章传输线理论,引入电压、电流、分布参数等概念,画出传输线的等效电路,建立起传输线方程,并对方程求解,把研究传输线中导行电磁波传输特性这样一个本质上是电磁场的问题,转化为研究传输线上的电压、电流波传播特性的问题,最后讨论了传输线的工作特性、圆图和阻抗匹配等问题。第4章平面传输线,用传输线理论分析、介绍微波工程中常用的几种平面传输线(如带线、微带线、耦合带线、耦合微带线等)的结构和性质。第5章微波网络基础,将研究非均匀区(微波元件)外特性这样一个本质上是电磁场的问题,转化为微波网络的电路问题,介绍了描述非均匀区外特性的各种网络参数。第6章无源微波

电路,介绍各种常用微波元件的结构,应用传输线理论、导行波理论和网络理论分析了各种微波元件的工作原理和基本特性;还介绍了微波滤波器的设计方法、设计步骤及集总参数的微波实现。第7章有源微波电路,介绍了混频器、放大器和振荡器等三种有源微波电路中常用的有源微波器件的结构及工作原理,并以此为基础研究了这三种有源电路的组成、工作原理和特性。第8章天线基础,介绍了天线工作机理、天线电参数,分析了常用天线,并简单讲述了阵列天线技术和宽带天线技术中的基本概念,最后介绍了天线电参数的测量方法,这是天线工程应用和深入研究天线技术的基础。第9章电波传播,介绍了电波传播的基本知识,研究了地波传播、天波传播和视距传播的特点及其应用。

本书第1、6章由毛钧杰执笔,第5、7章由柴舜连执笔,第3、4章由刘荧执笔,第8、9章由刘继斌执笔,第2章由杨虎执笔,毛钧杰统编全书。在编写过程中,得到了国防科学技术大学电子科学与工程学院电子技术系老师们的支持和帮助,在此对他们表示感谢。

尽管编者作了努力,但书中仍难免存在缺点和错误,希望读者批评和指正。

编 者

2006年5月于国防科学技术大学

目 录

丛书序

前言

第 1 章 电磁场理论概述	1
1.1 麦克斯韦方程组与洛伦兹力	1
1.1.1 麦克斯韦方程组	1
1.1.2 辅助方程——结构关系式	3
1.1.3 边界条件	4
1.1.4 洛伦兹力	7
1.2 时谐电磁场	7
1.2.1 时谐电磁场电磁量的复数形式	8
1.2.2 时谐电磁场方程的复数形式	9
1.2.3 复介电常数和复磁导率	10
1.3 静态场	12
1.3.1 静态场方程	12
1.3.2 静态场的边界条件	18
1.3.3 静态场中的多导体系统	20
1.3.4 静态场的能量	23
1.4 时变电磁场的能量与能流	26
1.4.1 坡印亭矢量和坡印亭定理	26
1.4.2 复坡印亭矢量和复坡印亭定理	27
1.5 时变电磁场的波动性	29
1.5.1 波动方程	30
1.5.2 波动性	31
1.6 无界均匀媒质中平面电磁波的传播	32
1.6.1 无界均匀理想媒质中平面电磁波的传播	33
1.6.2 向任意方向传播的均匀平面电磁波	36
1.6.3 电磁波的极化	37
1.6.4 无界均匀有耗媒质中平面电磁波的传播	41
1.7 电磁波在两不同媒质交界面上的反射和折射	43
1.7.1 在两不同媒质界面处电磁波反射与折射的基本规律	43

1.7.2	电磁波向理想导体界面入射	48
1.7.3	电磁波向两理想媒质交界面的入射	52
1.7.4	电磁波向有损耗媒质界面的入射	57
1.8	时变电磁场的位函数	62
1.8.1	位函数的引入	63
1.8.2	位函数满足的方程	63
1.8.3	位函数方程的解——滞后位	64
1.8.4	时谐电磁场的滞后位	67
1.9	时变电磁场的唯一性定理	67
1.10	麦克斯韦方程组的对称形式与对偶性原理	69
1.10.1	麦克斯韦方程组的对称形式	69
1.10.2	对偶性原理	71
1.11	镜像原理、等效原理和互易定理	73
1.11.1	镜像原理	74
1.11.2	等效原理	75
1.11.3	互易定理	76
	习题	78
第2章	导行电磁波	81
2.1	导行电磁波的分析方法	81
2.1.1	均匀传输线中导行电磁波的基本形式	81
2.1.2	纵向场法	83
2.2	导行电磁波的一般传播特性	85
2.2.1	导行电磁波的模式	85
2.2.2	TEM模的一般传播特性	86
2.2.3	TE模和TM模的一般传播特性	88
2.3	矩形波导中的导行电磁波	91
2.3.1	矩形波导中TE模和TM模的表示式	91
2.3.2	矩形波导中TE模和TM模的传播参数及特点	94
2.3.3	矩形波导中的 TE_{10} 模	96
2.3.4	矩形波导的衰减	104
2.3.5	矩形波导横截面尺寸的选择	106
2.4	圆柱波导中的导行电磁波	107
2.4.1	圆柱波导中TE模和TM模的表示式	107
2.4.2	圆柱波导中TE模和TM模的传播参数及特点	111
2.4.3	圆柱波导中常用的三种模式	113

2.5	同轴线中的导行电磁波	116
2.5.1	同轴线中的 TEM 模	116
2.5.2	同轴线中的高次模及其尺寸选择	118
	习题	118
第 3 章	传输线理论	120
3.1	传输线方程及其时谐稳态解	120
3.1.1	电压、电流的引入及传输线上的分布参数	121
3.1.2	传输线方程及其时谐稳态解	123
3.1.3	传输线的工作特性参数和工作状态参数	126
3.2	无耗传输线的工作状态	129
3.2.1	无反射工作状态	129
3.2.2	全反射工作状态	130
3.2.3	部分反射工作状态	134
3.2.4	传输功率	138
3.3	阻抗圆图和导纳圆图	139
3.3.1	等反射系数圆	139
3.3.2	等电阻圆和等电抗圆	141
3.3.3	导纳圆图	144
3.3.4	圆图应用举例	145
3.4	阻抗匹配	147
3.4.1	微波源的阻抗匹配	147
3.4.2	负载阻抗匹配	148
3.5	广义传输线理论	154
3.5.1	推广的可行性分析	155
3.5.2	归一化等效电压和归一化等效电流	155
3.5.3	广义传输线理论中的基本关系式	157
	习题	158
第 4 章	平面传输线	161
4.1	带线	161
4.2	微带线	165
4.3	耦合带线	170
4.4	耦合微带线	172
4.5	槽线	175
4.6	共面波导	176
	习题	177

第 5 章 微波网络基础	178
5.1 微波元件等效成微波网络的基本原理	178
5.2 微波网络的阻抗参数和导纳参数	181
5.2.1 阻抗参数	181
5.2.2 导纳参数	183
5.2.3 阻抗参数和导纳参数的性质	184
5.2.4 归一化阻抗参数和归一化导纳参数	185
5.3 微波网络的散射参数	187
5.3.1 散射参数	187
5.3.2 散射参数的物理意义	188
5.3.3 散射参数与阻抗参数和导纳参数之间的关系	189
5.3.4 散射参数的基本性质	190
5.4 转移参数与二端口网络	192
5.4.1 转移参数	192
5.4.2 几个基本二端口网络的转移参数	194
5.4.3 二端口网络的级联	196
习题	197
第 6 章 无源微波电路	198
6.1 基本电抗元件	198
6.1.1 矩形波导中的简单不均匀结构	198
6.1.2 同轴线中的简单不连续性	203
6.1.3 微带线中的简单不连续性	204
6.2 终端元件	205
6.2.1 匹配负载	205
6.2.2 短路器	206
6.3 连接元件	207
6.3.1 同轴接头	207
6.3.2 波导法兰	207
6.4 衰减器与移相器	208
6.4.1 衰减器	208
6.4.2 移相器	210
6.5 分支元件	211
6.5.1 矩形波导分支接头	211
6.5.2 微带线三端口功率分配器	216
6.6 定向耦合器	218

6.6.1	定向耦合器的主要技术指标	219
6.6.2	双孔定向耦合器的工作原理	219
6.6.3	矩形波导裂缝电桥	221
6.6.4	分支定向耦合器	223
6.7	微波谐振器	226
6.7.1	微波谐振器的基本电参数	227
6.7.2	圆柱形谐振腔	229
6.7.3	同轴谐振腔	233
6.7.4	微波传输线型谐振器的等效电路	235
6.7.5	微波谐振器的激励与耦合	240
6.8	微波滤波器	242
6.8.1	滤波器的一般知识	242
6.8.2	微波滤波器的主要技术指标	244
6.8.3	低通原型	245
6.8.4	集总参数滤波器的设计	248
6.8.5	集总参数元件的微波实现	253
6.9	传输线的激励	259
6.9.1	传输线激励的基本原则和基本形式	259
6.9.2	传输线的激励装置	260
6.10	隔离器与环行器	262
6.10.1	磁化铁氧体简介	263
6.10.2	隔离器	264
6.10.3	环行器	267
	习题	268
第7章	有源微波电路	270
7.1	微波混频器	270
7.1.1	肖特基势垒二极管	270
7.1.2	微波混频器的混频原理	273
7.1.3	混频器的主要特性	275
7.1.4	典型的微波混频电路	283
7.2	微波场效应晶体管放大器	290
7.2.1	微波场效应晶体三极管	290
7.2.2	微波晶体管放大器的增益	299
7.2.3	微波晶体管放大器的稳定性	300
7.2.4	微波晶体管放大器的噪声系数	305

7.2.5	小信号微波晶体管放大器的设计	307
7.3	微波振荡器	313
7.3.1	微波二极管振荡器	314
7.3.2	微波晶体三极管振荡器	329
	习题	332
第8章	天线基础	334
8.1	天线的工作机理、功能与特性	334
8.1.1	天线的工作机理	334
8.1.2	天线的功能与特性	335
8.2	基本辐射元	336
8.2.1	基本电流元	336
8.2.2	基本磁流元、基本电流环与基本缝隙元	339
8.2.3	基本辐射元的组合	340
8.3	天线的电参数	342
8.3.1	引言——天线的收、发互易性	342
8.3.2	辐射阻抗	343
8.3.3	输入阻抗与驻波比	343
8.3.4	方向图	344
8.3.5	波束立体角与主波束效率	345
8.3.6	方向性系数、效率和增益	345
8.3.7	有效口径	346
8.3.8	有效长度或有效高度	346
8.3.9	极化方式	347
8.3.10	带宽	348
8.3.11	相位中心	348
8.3.12	噪声温度	348
8.3.13	接收功率与弗里斯传输公式	349
8.4	常用天线与基本特点	350
8.4.1	振子天线	350
8.4.2	缝隙天线	352
8.4.3	喇叭天线	354
8.4.4	反射面天线	355
8.4.5	微带天线	359
8.4.6	特殊天线应用举例	361
8.5	阵列天线技术	364

8.5.1 均匀直线阵的辐射场	364
8.5.2 相控阵天线基本原理	366
8.5.3 阵列天线的栅瓣与副瓣的相位控制	366
8.5.4 阵列天线副瓣的幅度控制	367
8.6 宽带天线技术基础	368
8.6.1 天线匹配网络的宽频带设计	368
8.6.2 天线辐射结构的宽频带技术	369
8.7 天线测量	371
8.7.1 天线测量中的基本概念	371
8.7.2 天线电参数测量	374
习题	378
第9章 电波传播	379
9.1 电波传播的基本知识	379
9.1.1 概述	379
9.1.2 自由空间中的电波传播	382
9.1.3 媒质对电波传播的影响	383
9.1.4 干扰与噪声	385
9.2 地波传播	386
9.2.1 地球表面的电特性	386
9.2.2 地波传播特性	387
9.3 天波传播	388
9.3.1 电离层的结构特点	389
9.3.2 天波传播模式	391
9.3.3 短波天波传播	393
9.4 视距传播	399
9.4.1 自由空间电波传播的非涅耳区	399
9.4.2 地面对电波传播的影响	403
9.4.3 低空大气层对电波传播的影响	407
习题	411
参考文献	412
部分习题答案	413

第 1 章 电磁场理论概述

研究微波技术与天线所需的基本理论是经典电磁理论,且主要是以麦克斯韦(Maxwell)方程组为核心的电磁场理论。为便于读者学习微波技术与天线,本章简要介绍电磁场理论的基本概念和基本定律。这些基本概念和基本定律,构成了本书的理论基础,读者应当熟悉并掌握这些内容。

1.1 麦克斯韦方程组与洛伦兹力

英国物理学家法拉第(Faraday)通过多次精巧设计的实验,最早发现了电、磁之间的一种相互关系,于 1831 年建立起法拉第电磁感应定律,揭示了“动磁生电”规律,开启了人们对电场、磁场相互作用的研究。根据自然界普遍存在对称性的事实,人们开始探求“动电生磁”的可能性及规律。英国物理学家麦克斯韦在前人研究成果的基础上,将电流概念扩展,于 1862 年提出著名的“位移电流”概念,证实了“动电生磁”的可能性;同时,他还提出涡流电场的概念,使法拉第电磁感应定律更具普适性。这样,麦克斯韦根据前人和自己的研究成果,总结出了描述一般电磁现象的基本方程——麦克斯韦方程组。

1.1.1 麦克斯韦方程组

由麦克斯韦归纳、总结出的描述宏观电磁场基本特性的电磁场方程的积分形式和微分形式为

全电流定律:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_s \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{s}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-1a)$$

法拉第电磁感应定律:

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \iint_s \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{s}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-1b)$$

磁通连续性原理:

$$\oiint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-1c)$$

高斯定理:

$$\oiint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \iiint_V \rho dV, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-1d)$$

本书所有物理量均采用我国法定计量单位。式(1-1)中各物理量的名称和单位分别为

- E**: 电场强度,单位是伏特/米(V/m);
D: 电位移,单位是库仑/米²(C/m²);
H: 磁场强度,单位是安培/米(A/m);
B: 磁感应强度,单位是韦伯/米²(Wb/m²);
J: 电流密度,单位是安培/米²(A/m²);
 ρ : 自由电荷密度,单位是库仑/米³(C/m³)。

在式(1-1)中, ∇ 称为哈密尔顿(Hamilton)算子,它在直角坐标系中的表示式为

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{z}$$

算子 ∇ (读音为“nabla”或“del”)是一个具有矢性和微分双重性质的运算符号,它像矢量一样参与运算,同时又对它后面的函数施以偏微分运算。

迄今为止,人们尚未发现电荷不守恒的现象。从理论上讲,电荷也是守恒的,电荷守恒定律的积分形式和微分形式分别为

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = - \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1-2)$$

上面两方程又称为电流连续性方程。

麦克斯韦方程组的建立,对于近代电磁学的发展起了十分巨大的推动作用,它的正确性在大量的科学实践中已得到了证实,它的伟大之处不仅在于用它可以解释在它之前已发现的光、电、磁等物理现象,而且还在于它预言了后来被实验所证实的电磁波的存在。麦克斯韦方程组是电磁理论的核心,是研究各种宏观电磁现象的理论基础。由麦克斯韦方程组还可以看出以下几条规律:

(1) 随时间变化的电荷和电流是产生电磁场的源,而且时变电场和时变磁场也互相激励,时变电场和时变磁场构成了完整的不可分割的统一的电磁场整体。

(2) 时变电场的旋度和散度一般都不为零,所以电力线可以是闭合的,也可以是不闭合的;在 $\rho \neq 0$ 处,电力线不闭合,电力线起始于正电荷而终止于负电荷;在 $\rho = 0$ 处,电力线闭合,电力线与磁力线相互铰链。

(3) 时变磁场的旋度不为零,但其散度恒为零,说明磁力线一定是闭合曲线;在 $\mathbf{J} \neq 0$ 处,磁力线与电流线相铰链;在 $\mathbf{J} = 0$ 处,磁力线与电力线相铰链。

(4) 场源一旦激励起了时变电磁场,即使去掉场源,时变电场与时变磁场也会互相激励,且闭合的电力线与闭合的磁力线相互铰链,电磁场分布的空间区域会逐渐增大,电磁场以波的形式向远处传播,如图 1-1 所示。