



高 等 学 校
工 科 电 子 类 规 划 教 材

微波工程基础

李宗谦 余京兆



东南大学出版社

微波工程基础

李宗谦 余京兆

东南大学出版社

内 容 简 介

本书由电磁场与微波技术编审委员会微波技术教材编审小组审定，作为全国高等学校工科电子类无线电技术专业第四轮统编教材。

本书包括电磁场概述、传输线理论、导波与波导、微波网络、无源和有源微波电路、天线、微波工程子系统等内容，取材广泛、富有新意，且有一定深度。全书采用场与路相结合的分析方法，并注意建立微波工程系统的概念，使各章之间相互呼应、有机结合、自成系统。

本书可作为高等院校无线电技术、微波技术专业的教材，亦可供从事微波工作的科技人员参考。

责任编辑：朱经邦

责任校对：孙 宁

责任印制：刘娟娟

微波工程基础

李宗谦 余京兆

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

江苏省新华书店经销 南京雄州彩印厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 23 字数 538 千

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

印数：1—2500 册

ISBN 7-81050-144-5/TN·18

定价：28.00 元

(凡因印装质量问题，可直接向承印厂调换)

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面应”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由电磁场与微波技术教材编审委员会微波技术编审小组征稿并推荐出版。责任编辑为姚德森教授。

本教材由清华大学李宗谦担任主编,国防科技大学姚德森教授担任主审。

本课程参考学时为 64 学时,全书共分 8 章,其主要内容为电磁场理论概述、传输线理论、导波、微波网络、无源和有源微波电路、天线以及微波工程子系统简介。第 1 章电磁场概述,介绍了电磁场方程组、边界条件和一些重要的定理。第 2 章传输线理论,讨论了史密斯圆图、线上的工作状态、匹配技术,引入了电源波,分析了有耗传输线的噪声,导出了时域信号通过分布参数电路的形式解。第 3 章导波与波导,讲述了导波的一般理论和各种具体传输线的结构和特点。第 4 章微波网络,介绍了各种网络参量、微波网络的几个定理、网络的联接以及信号通过微波电路的分析方法。第 5 章无源微波电路,讨论了从一端口到端口的各种器件和电路,以及谐振腔、非互易器件和微波滤波器。第 6 章有源微波电路,讨论了微波混频器、微波晶体管放大器,微波二极管和三极管振荡器。第 7 章天线,讨论了天线的各种参数、振子天线、阵列天线、口面天线的基本原理,简要介绍了抛物面天线。第 8 章微波工程子系统,简要介绍了微波发射机、微波接收机前端、卫星通信线路的分析计算。

本教材取材广泛,自成体系,所提供的材料略多于 64 学时的需要,各院校在使用本教材时可有不同的选材方案,详见本书绪论 0.4。在使用本教材时还应注意以下三点。第一,场和波与电路相结合的分析方法是贯穿全书的一个基本观点。第二,模型、仿真和实验是现代科学技术的三个主要的研究手段,本教材的主要内容是建立微波电路的模型。电磁场理论、传输线理论、导波、微波网络都是用来建立微波电路的模型的工具,用来在不同侧面和不同的近似程度上说明微波电路的特点。第三,注意建立微波工程系统的概念。

本教材由余京兆编写第 5 章,其余各章以及第 5 章的 5.17 节由李宗谦编写并统编全稿。姚德森教授认真审阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见,编者在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

于北京清华园

1995. 11

目 录

0 绪论	(1)
1 电磁场概述	(6)
1.1 引言	(6)
1.2 时变电磁场方程组和媒质的本构关系	(6)
1.3 谐变电磁场方程组和媒质的本构关系	(8)
1.4 边界条件	(9)
1.5 坡印亭定理	(12)
1.6 唯一性定理	(13)
1.7 等效源和广义电磁场方程组	(15)
1.8 对偶性	(16)
1.9 波动方程	(17)
1.10 矢量位和标量位	(18)
1.11 反作用和互易定理	(20)
习题	(21)
2 传输线理论	(22)
2.1 引言	(22)
2.2 传输线波动方程和它的解	(22)
2.3 阻抗与驻波	(25)
2.4 史密斯圆图	(31)
2.5 功率衰减与噪声	(41)
2.6 含信号源与负载的简单传输线电路	(46)
2.7 简单传输线电路中的时域信号	(49)
习题	(56)
3 导波与波导	(60)
3.1 引言	(60)
3.2 规则金属波导的一般理论	(61)
3.3 矩形波导	(66)
3.4 圆波导	(82)
3.5 同轴线与平行双线	(89)
3.6 传输线理论的推广	(97)
3.7 平面传输线	(103)
3.8 激励耦合	(116)
3.9 介质波导与光纤简介	(119)

习题	(128)
4 微波网络	(131)
4.1 引言	(131)
4.2 微波网络的几个定理	(132)
4.3 阻抗矩阵和导纳矩阵	(135)
4.4 散射矩阵	(139)
4.5 二端口网络	(143)
4.6 网络的联接	(156)
4.7 信号通过微波电路的分析方法	(162)
习题	(173)
附录	(175)
5 无源微波电路	(178)
5.1 引言	(178)
5.2 匹配负载	(178)
5.3 波导接头和同轴接头	(179)
5.4 短路器	(180)
5.5 衰减器	(182)
5.6 模式抑制器	(184)
5.7 波导 T 形接头	(184)
5.8 微带线功分器与合成器	(187)
5.9 波导双 T 接头与魔 T	(189)
5.10 定向耦合器概述	(194)
5.11 微带线电桥和定向耦合器	(201)
5.12 圆极化器	(212)
5.13 旋转对称五端口结	(214)
5.14 六端口结及其应用	(215)
5.15 铁氧体器件	(217)
5.16 谐振腔	(223)
5.17 微波滤波器	(235)
习题	(251)
6 有源微波电路	(254)
6.1 引言	(254)
6.2 半导体材料	(254)
6.3 混频器	(260)
6.4 微波晶体管放大器	(270)
6.5 振荡器	(286)
习题	(296)
7 天线	(297)

7.1	引言	(297)
7.2	辐射场	(297)
7.3	等效原理和镜像定理	(303)
7.4	天线的基本参数(一)	(304)
7.5	天线的基本参数(二)	(311)
7.6	振子天线	(319)
7.7	阵列天线	(324)
7.8	口面天线	(329)
7.9	抛物面天线	(335)
	习题	(338)
8	微波工程子系统	(340)
8.1	引言	(340)
8.2	微波接收机前端	(340)
8.3	微波发射机	(340)
8.4	卫星通信中的微波子系统	(342)
8.5	卫星通信中的天馈分系统	(347)
	习题	(350)
	附录	(351)
	附录 I 物理常数	(351)
	附录 II 矢量微分算子	(351)
	附录 III 矢量恒等式	(352)
	附录 IV 常用同轴射频电缆	(353)
	附录 V 矩形与扁矩形波导	(354)
	参考文献	(355)

0 绪论

本绪论将简要叙述微波的范围、微波的优点、微波的应用,以及本书结构和使用本书的注意事项。

0.1 微波的范围

通常微波指的是分米波、厘米波和毫米波。关于其频率范围,一种说法是 300MHz~300GHz(1MHz=10⁶Hz,1GHz=10⁹Hz),相应的自由空间中的波长约为 1m~1mm;另一种说法是 1~1000GHz,相应的自由空间中的波长约为 30cm~0.3mm。波长 λ 与频率 f 的乘积等于光速 c

$$f\lambda = c$$

这里,频率 f 的单位为 Hz,波长 λ 的单位为 m,光速 $c=3\times 10^8$ m/s。从超长波直至亚毫米波的波段划分列于表 0-1。当频率再高、波长再短时将达到远红外、红外,与光波相衔接。从表 0-1 可以看出微波的频率范围在整个无线电波波谱中的重要地位。

表 0-1 无线电波的波段划分

波段	频率	波长	波段	频率	波长
超长波	3-30kHz	10 ⁵ -10 ⁴ m	分米波	0.3-3GHz	1-0.1m
长波	30-300kHz	10 ⁴ -10 ³ m	厘米波	3-30GHz	10-1cm
中波	0.3-3MHz	10 ³ -10 ² m	毫米波	30-300GHz	10-1mm
短波	3-30MHz	100-10m	亚毫米波	300-3000GHz	1-0.1mm
超短波	30-300MHz	10-1m			

表 0-1 中的分米波、厘米波和毫米波又可细分为 17 个波段,各有其相应的英文符号,这些符号在科技文献中经常出现。表 0-2 列出了这 17 个波段的频率范围、相应的波长和英文符号。表 0-2 中的 Q、U、M 和 E 波段相互有所重叠。

表 0-2 微波波段的划分及其相应符号

符号	频率(GHz)	波长	符号	频率(GHz)	波长
UHF	0.3-1.12	1-0.27m	S	2.6-3.95	12-7.6cm
L	1.12-1.7	0.27-0.18m	C	3.95-5.85	7.6-5.1cm
LS	1.7-2.6	0.18-0.12m	XC	5.85-8.2	5.1-3.7cm

续表 0-2

符号	频率(GHz)	波 长	符号	频率(GHz)	波 长
X	8.2—12.4	3.7—2.3cm	M	50.0—75.0	6.0—4.0mm
Ku	12.4—18.0	2.3—1.7cm	E	60.0—90.0	5.0—3.3mm
K	18.0—26.5	1.7—1.1cm	F	90.0—140.0	3.3—2.1mm
Ka	26.5—40.0	11—7.5mm	G	140.0—220.0	2.1—1.4mm
Q	33.0—50.0	9.1—6.0mm	R	220.0—325.0	1.4—0.9mm
U	40.0—60.0	7.5—5.0mm			

0.2 微波的优点

微波波谱处于无线电波谱的高端,波长比较短,由此带来一系列的优点。因为波长短,使得同样尺寸天线的辐射具有较高的方向性和分辨能力,或相同性能的天线具有相对小的尺寸。在微波波段,电波在大气中衰减比较小(与红外、光波相比较),并且能够穿过电离层。对于通信、雷达、遥感、遥控、遥测等应用系统来说,微波确实提供了非常好的性能:低的大气传播衰减,高的辐射方向性和高的分辨率。因为波长短,同样的相对频率带宽,微波能提供较宽的可用的频谱,例如分米波段、厘米波段和毫米波段的频谱宽度分别为2.7GHz、27GHz和270GHz,这是一个非常丰富的频谱资源,必须很好的分配和利用。因为波长短,使得微波设备的尺寸可以做得相对较小,便于安装在各种飞行物中,例如飞机、导弹、卫星等。正是由于微波的这些优点,微波工程在国防工业和信息产业中的地位是至关重要的,几十年来对微波波谱的开发和利用经久不衰。

0.3 微波的应用

自二次世界大战以来,微波工程与技术得到了迅速的发展,微波工程技术已深入到科学、工业、农业、军事、生物、医学等各个领域。从分米波到毫米波的各个微波波段的开发正逐步成熟,其标志是商业化的进程大大加快。当今世界已进入信息时代,微波波谱是一种非常宝贵的信息资源。

微波工程技术在通信系统中占有非常重要的地位,它是通信系统中必不可少的部分,例如微波中继通信、地面移动通信、卫星通信、机载移动通信等等。

雷达是传统的微波工程技术领域,微波工程的早期发展的动力就是来自二战对雷达的需求。导弹的制导也需要微波工程技术的支持。近年来合成孔径雷达得到了发展,这是由于遥感的需要。从机载平台或卫星平台上对地球进行微波遥感,其最突出的优点就是它的全天候特点,不受云层覆盖的影响,在地球资源调查、农业资源调查、海洋研究方面取得了大量的资料和有用的成果。

被动微波遥感是用微波辐射计接收自然界的各种地物本身发射的非相干的微波辐射,从中提取有用的信息。

射电天文学是由微波工程技术的发展而形成的天文学的分支。在地面建立几十米至数百米口径的大型抛物面天线,再配以高增益、低噪声、宽频带的微波接收机,捕捉来自宇宙星体的微波辐射。

近年来卫星直播电视得到了迅速的发展。在卫星上利用微波进行电视广播,在地面各家各户用 2m 左右口径的抛物面天线和低噪声固态接收机,外加一个解调器就可以直接收看卫星广播的电视节目。

微波工程技术在工业、农业、生物、医学领域的应用主要是利用微波的热效应,也可以说这是微波能的应用。用微波对各种类型的介质材料进行加热可深入到材料的内部,并有快速和瞬时的特点,易于控制,在食品、木材、造纸、化工、塑料等方面都有应用。在农业方面可用微波处理种子、杀虫等。医学方面可用微波治癌,制作微波手术刀,在外科手术的同时迅速止血。

传统的微波工程处理的都是频域的问题。随着大规模、高密度、高速数字集成电路的发展,高速信息公路的发展,数字通信高达 2.4Gbit 的速率,使时域微波的问题变得愈来愈突出。无论是芯片内部或是集成电路的互联线问题,都向传统的频域微波工程提出了挑战,因此有必要发展时域微波工程技术。

在一个大的通信系统或雷达系统或遥感系统中,微波工程系统通常是某一种大系统的一个子系统,这指的是硬件,但在确定一个大系统的总体指标时微波子系统的参数起着非常关键的作用,例如天线的增益、工作频率、微波子系统的噪声等等。

一个大系统,例如卫星系统,在总体设计中必须完成电磁兼容性(EMC)的设计,特别是微波电磁兼容性的设计,因为电磁兼容性的问题是造成严重航天事故的主要原因之一。

随着频率的提高,集成化的发展,小型化的需求,微波电路的元器件、部件的封装问题变得十分突出,封装成为微波电路的一个有机组成部分,微波工程技术的分析方法在这一领域将大显身手,用以提高微波系统的可靠性,加快商业化的步伐。

0.4 本书结构以及学习注意事项

微波工程所涉及的范围非常广泛,它包括了微波的产生、变换、放大、传输、辐射、传播、散射、接收、检测等许多课题。在掌握了这些课题的内容后便可设计和分析微波工程系统,研究微波工程子系统与大系统之间的关系。

全书共分 8 章。第 1 章电磁场概述,用较少的篇幅简要介绍了场方程、边界条件和一些重要定理。第 2 章传输线理论,讨论了传输线上的波动过程,引入了史密斯圆图,分析了各种匹配技术,引入电源波的概念,藉助电源波给出了信源与负载都失配时的入射波反射波,从而给出了简单传输线电路的形式解,由此说明 3 种匹配概念的区别与联系。传输线是分布参数电路,本章还讨论了有耗分布参数电路的噪声问题。本章的最后导出了时域信号通过简单分布参数电路的形式解,给出了若干例子。第三章导波与波导,从场的观点讲述了导波的一般特点和各种具体传输线的结构和特点,包括矩形波导、圆波导、同轴线、平行双线、带线、微带线、耦合带线和耦合微带线等,进一步对传输线理论做了推广,本章还简单介绍了光纤。第 4 章微波网络,是微波技术中电路理论的进一步发展,本章介绍了微

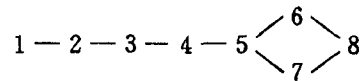
波网络的各种网络参量、微波网络的性质,本章以散射参量作为主要的微波网络参量。本章还介绍了微波网络的等效电源波定理,将传输线理论和微波网络理论紧密地联系起来。第 5 章无源微波电路,讨论了从一口到六口的各种无源微波器件与电路,以及谐振腔、非互易器件,最后简单介绍了微波滤波器。第 6 章有源微波电路,选择了三类典型的有源微波电路进行了讨论,其中包括混频器、微波晶体管放大器、微波二极管和三极管振荡器。有源微波电路的种类是非常多的,限于篇幅只能割舍。为了帮助读者掌握微波固态二极管和三极管的工作机理,本章还简单介绍了半导体材料和 p-n 结、M-S 结的一些性质特点。第 7 章天线,在导出电偶极子辐射场后,从总体要求的角度对天线的各种参数做了较详细的分析,然后讨论了振子天线、阵列天线、口面天线的基本原理,最后介绍了抛物面天线。第 8 章微波工程子系统,简要介绍了微波发射机,微波接收机前端的构成,卫星通信系统中微波子系统的构成,通信线路分析计算。通过本章的介绍,使读者能了解前述各章微波工程的各个课题在微波工程系统中的作用,从而加深对所学内容的理解并初步接触到微波工程系统的概念。以上八章,从电磁场概述开始到微波工程子系统终止,构成了微波工程一书的一条线索。电磁场理论是基础,中间 6 章是基本内容,最后一章是学习微波工程的目的;从事微波工程子系统及其部件的研制,并了解微波子系统在更大的系统中的地位和作用。

读者在学习微波工程课程时三点值得注意。其一,场与路相结合的分析方法。本书在第 1 章中简要回忆了电磁场的基本概念和定理,并且在适当的章节进一步应用电磁场理论分析微波工程技术问题,尤其是在第 3 章导波、第 4 章微波网络和第 7 章天线等课题中。这样做的目的是帮助读者复习和巩固电磁场的基本概念。在本书中,路的理论,包括传输线理论和网络理论都是可以从场的理论导出的,因此它是场的理论的某种简化。其二,模型、仿真和实验相结合的观点。微波工程技术所处理的对象是非常复杂的,因为场是空间时间的函数,场量本身又是矢量,并且器件电路的几何尺寸与微波波长是可以相互比拟的。为了分析一个具体的电路,需要建立一个分析的模型。电磁场理论、传输线理论、导波、网络理论都是分析的模型,同时又是建立具体电路模型的工具,它们都只能在一定的近似程度上说明电路的特性。通常计算机对一个具体电路的仿真计算可能比模型分析的结果精确些,同时在软件的支持下可以对具体电路的参数进行调整、模拟实验过程,即用计算机进行实验。最后,在模型分析、仿真研究的基础上设计出合理的优化的电路,而后加工制造、调试、实验。综上所述,模型、仿真、实验相结合的观点是一种科学的方法论。本书的重点是建立模型,如何作计算机的数值仿真和真正的实验调试,读者应参考有关的专著。其三,注意建立微波工程系统和微波工程子系统的概念,这将有助于这门课程的学习。

本书是微波工程的一本入门的书,一本基础的书,它为读者提供了建造微波工程的建筑材料,勾画出了微波工程的框架,如何提高、如何构造新的微波工程系统,那是读者在学习了微波工程之后的事情了。如果本书对读者的进一步学习有所裨益,那就是作者的欣慰。

在学习本课程时,读者应具备电磁场理论、线性代数、信号与系统和通信电路原理方面的知识。虽然本书中用到了诸如波动方程、贝塞尔方程等数理方程方面的内容,但读者不必担心没有修过数理方程课程,本书将在有关章节结合具体问题予以介绍。

本书各章的关系流程图如下：



使用本教材开设微波工程或微波技术课，根据学时数和课程要求有几种方案可供选择：其一，按全书各章流程图学习全部内容，估计学时为 80 学时左右；其二，学习部分内容，例如

1—2—3—4—5

1—2—3—4—5—6

1—2—3—4—5—7

其三，学习全部八章内容，但每章适当删去若干节，保留最必要的材料。二与三所列方案估计学时为 60 学时左右。第一章是复习性质的，事实上并不占用授课学时，可由学生自己阅读；或在学习过程中查阅。第八章的内容是可更换的，根据教师和学生现在或将来所从事的工作领域，安排相应的微波工程系统的内容，例如微波接力通信系统、微波遥感系统、雷达、电子对抗、微波电磁兼容等等。

1 电磁场概述

1.1 引言

本章将对时变电磁场的基本概念和基本定律作一简要叙述。首先介绍麦克斯韦电磁场方程组、媒质的本构关系和边界条件,然后导出一系列对本书有用的概念和定理,其中包括坡印亭定理、唯一性定理、对偶性、波动方程和矢量位、反作用和互易定理。这些内容构成了全书的基础。熟悉这些内容是必要的和有益的。当应用时变电磁场的基本概念去解决微波工程中的各种问题时,我们才能体会到“场”的概念的重要性,应用的广泛性和高度的概括性。由于应用了这些基本的概念和定理,才得以使我们对许多问题的叙述更加简洁并且便于理解和记忆。

1.2 时变电磁场方程组和媒质的本构关系

麦克斯韦根据前人大量的实验与理论的结果总结出电磁场方程组,这些方程的真实性已被实验所证实。媒质的本构关系(亦称物质方程,辅助方程)描述了媒质的性质,这种描述是表象的。场方程和本构关系构成了一个完整的方程组。原则上,给定源的分布,媒质的性质和媒质的几何形状,电磁场问题总是有解的。由此可见,我们可以把场方程和本构关系作为微波技术理论的一个主要的出发点,作为全书的基础之一。虽然微波工程的领域极其广泛,但可以在麦克斯韦方程组和本构关系的基础上统一起来,表面上相异的各个领域存在着内在的联系。此外,需要指出的是本构关系是不同学科的结合点,为了导出某种具体的媒质的本构关系常常要借助于其他学科的知识,仅仅依据电磁理论是不够的。

场方程是宏观电磁现象的普遍规律:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.2-1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (1.2-1b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.2-1c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.2-1d)$$

式(1.2-1a)称作法拉第电磁感应定律,式(1.2-1b)称作安培全电流定律,式(1.2-1c)称作电场的高斯定律,式(1.2-1d)称作磁场的高斯定律。式(1.2-1)中各物理量的名称和量纲如下:

\mathbf{E} : 电场强度(V/m)

\mathbf{D} : 电位移(C/m²)

H : 磁场强度(A/m)

B : 磁感应强度(Wb/m²)

J : 电流密度(A/m²)

ρ : 自由电荷密度(C/m³)

迄今为止,人们尚未从实验上发现电荷的不守恒现象,因此我们有电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1.2-2)$$

又称电流连续性方程。

关于算符 ∇ ,请读者参看本书末附录 I。

安培全电流定律中的 $\frac{\partial D}{\partial t}$ 这一项是麦克斯韦的极其重要的贡献。电场的高斯定律在形式上与静电场没有区别,但是,把这一定律从静电场推广到时变场时,它的物理内容发生了变化;磁场的高斯定律也有类似的情况,它描述了磁荷不能单独存在这一物理事实。

考虑到电荷守恒定律,可以从安培全电流定律推出电场的高斯定律。对式(1.2-1b)取散度,并注意到一个矢量的旋度的散度恒等于零,于是

$$\nabla \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) = 0 \quad (1.2-3)$$

将此式中对空间的微分运算与对时间的微分运算交换顺序,再代入式(1.2-2),得

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{D} - \rho) = 0 \quad (1.2-4)$$

对时间作积分,得

$$\nabla \cdot \mathbf{D} - \rho = c \quad (1.2-5)$$

式中, c 是与时间无关的常数,因为我们所讨论的对象是时变场,可取 $c=0$,于是得到电场的高斯定律,对法拉第电磁感应定律取散度可得到磁场的高斯定律。

上述讨论表明,4个场方程并不是相互独立的,从两个旋度方程和电流连续性方程可以导出两个散度方程。但是这并不说明两个散度方程是无用的,相反在有些情况下使用两个散度方程是必要的和方便的。一般来说,在大多数情况下求解时变电磁场问题常常从两个旋度方程入手。两个旋度方程是两个矢量微分方程,在给定源 \mathbf{J} 和 ρ 后,在两个矢量微分方程中共计是四个未知的场矢量 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{D} 和 \mathbf{B} ,显然从两个矢量微分方程去求解四个未知矢量是不够的,还必须再补充两个矢量关系式。待补充的方程给出了 \mathbf{E} 和 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{H} 之间的关系,它们描述了媒质的性质,称作本构关系。

均匀、线性、各向同性媒质中的本构关系为

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.2-6)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.2-7)$$

式中, ϵ 、 μ 是标量。 ϵ 称作电容率(或介电常数),单位是F/m; μ 称作导磁率,单位是H/m。真空中的电容率和导磁率分别为

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} = 1.2566 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

在实际工作中常常引入相对介电常数(相对电容率) ϵ_r 和相对导磁率 μ_r :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1.2-8)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.2-9)$$

对于非磁性材料 $\mu_r = 1$, ϵ_r 则随具体材料而异。

对于导电媒质

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.2-10)$$

式中, σ 称作电导率, 单位是 Ω/m 。

各向异性材料的电容率、导磁率和电导率不能简单地用标量表示, 而要用张量电容率 $\bar{\epsilon}$ 、张量导磁率 $\bar{\mu}$ 和张量电导率 $\bar{\sigma}$ 来表示。

1.3 谐变电磁场方程组和媒质的本构关系

谐变电磁场是时变电磁场的特例。谐变场的瞬时值为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r})e^{j\omega t}] \quad (1.3-1a)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{r})e^{j\omega t}] \quad (1.3-1b)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[\dot{\mathbf{D}}(\mathbf{r})e^{j\omega t}] \quad (1.3-1c)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[\dot{\mathbf{B}}(\mathbf{r})e^{j\omega t}] \quad (1.3-1d)$$

式(1.3-1)中 $\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r})$ 、 $\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{r})$ 、 $\dot{\mathbf{D}}(\mathbf{r})$ 、 $\dot{\mathbf{B}}(\mathbf{r})$ 是复数振幅, 它们是空间坐标 \mathbf{r} 的函数, Re 表示取实部。以 $\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r})$ 为例再作详细说明:

$$\dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = \hat{x}\dot{E}_x + \hat{y}\dot{E}_y + \hat{z}\dot{E}_z \quad (1.3-2)$$

式中, \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 是直角坐标系中的单位矢量,

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_x &= E_{xm}e^{j\varphi_x} \\ \dot{E}_y &= E_{ym}e^{j\varphi_y} \\ \dot{E}_z &= E_{zm}e^{j\varphi_z} \end{aligned} \right\} \quad (1.3-3)$$

\dot{E}_x 、 \dot{E}_y 、 \dot{E}_z 称为电场强度各分量的相量, 相量是一个复数符号, 它的模代表时谐时间函数的振幅, 幅角表示时谐时间函数的相位。

本书中的绝大部分内容只与谐变电磁场有关, 所以采用简化的复数符号, 省去 Re 和相量上的点, 于是

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{j\omega t} \quad (1.3-4)$$

或

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}e^{j\omega t} \quad (1.3-5)$$

$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ 、 $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ 、 $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ 亦有类似的表示方法

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}e^{j\omega t} \quad (1.3-6)$$

$$\mathbf{D}(t) = \mathbf{D}e^{j\omega t} \quad (1.3-7)$$

$$\mathbf{B}(t) = \mathbf{B}e^{j\omega t} \quad (1.3-8)$$

将式(1.3-5)~(1.3-8)代入式(1.3-1),得复数形式的电磁场方程组

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mathbf{B} \quad (1.3-9a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\mathbf{D} + \mathbf{J} \quad (1.3-9b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.3-9c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.3-9d)$$

电荷守恒定律为

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + j\omega\rho = 0 \quad (1.3-10)$$

对于线性各向同性媒质,复数形式电磁场方程组中的两个旋度方程可写作

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (1.3-11a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (1.3-11b)$$

式(1.3-11b)中的电流 \mathbf{J} 可分解为两部分:场在媒质中引起的传导电流和激发电磁场的激励电流,前者将引起损耗。现在,我们把式(1.3-11b)中的传导电流和局外电流分开来写

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} + \sigma\mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (1.3-12)$$

式中, \mathbf{J} 仅代表激励电流,为了简化符号, \mathbf{J} 未加任何下标。在今后的讨论中,根据上下文的意思很容易弄清 \mathbf{J} 的具体含义。

对于导电媒质,亦称有耗媒质,可引入复介电常数。由式(1.3-12)

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\tilde{\epsilon}\mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (1.3-13)$$

式中, $\tilde{\epsilon}$ 称作复介电常数

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega} = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (1.3-14)$$

或

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon(1 - j\text{tg}\delta) \quad (1.3-15)$$

其中

$$\text{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad (1.3-16)$$

称为介质的损耗角正切,它表示介质损耗的大小。有时也用到相对复介电常数

$$\tilde{\epsilon}_r = \frac{\tilde{\epsilon}}{\epsilon_0} = \epsilon_r(1 - j\text{tg}\delta) \quad (1.3-17)$$

当介质无损耗时 $\text{tg}\delta$ 等于零, $\tilde{\epsilon}$ 等于 ϵ , $\tilde{\epsilon}_r$ 等于 ϵ_r 。

对于线性各向同性有耗媒质,电磁场方程组中的两个旋度方程可写作

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (1.3-18a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\tilde{\epsilon}\mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (1.3-18b)$$

1.4 边界条件

边界条件描述了媒质分界面两侧场量之间的关系。式(1.2-1)是电磁场方程组的微分形式,四个方程中的每一个都分别对应着一个边界条件。为了推导边界条件,我们把微