

高等学校电子信息类教材

工程电磁场 导论

王月清 吴桂生 王石 编著

Engineering

Principle

Electromagnetic Field

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

高等学校电子信息类教材

工程电磁场导论

王月清 吴桂生 王石 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了电磁场与电磁波的发展历史、基本理论、基本概念、基本方法及其在现实生活中的应用。主要内容包括：电磁场与电磁波理论建立的历史意义、静电场与恒定电流电场、电磁场的边值问题、静磁场、时变场和麦克斯韦方程组、准静态场、平面电磁波的传播以及有关电磁场理论应用发展方向的概述。

全书沿着电磁场理论发展的历史脉络，追踪前人进行理论与实验探索的艰辛里程，将历史发展的趣味性与理论叙述和推导有机地结合起来，同时论述了电磁场理论在日常生活和经济社会中的广泛应用。

本书内容叙述清晰、连贯一致、论述系统深入，可作为高等院校电气与电子工程学科高年级本科生、研究生的专业课教材，也可作为相关领域的工程技术人员和科研人员的参考书。

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。

图书在版编目(CIP)数据

工程电磁场导论/王月清等编著. —北京：电子工业出版社，2005.10

高等学校电子信息类教材

ISBN 7-121-01778-4

I. 工… II. 王… III. 电磁场—高等学校—教材 IV. O441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第109022号

责任编辑：许 楷

印 刷：北京市海淀区四季青印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

经 销：各地新华书店

开 本：787×1092 1/16 印张：15.5 字数：397千字

印 次：2005年10月第1次印刷

印 数：5000册 定价：22.00元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系。
联系电话：(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

工程电磁场理论一直是电气与电子工程学习计划中最重要的专业基础课程之一。它是已经完善确立的普遍理论，能够为其他理论不能解决的复杂电磁场和电磁波的问题提供诠释的理论基础。

但是在多年的教学实践中，我们深刻体会到：一方面本课程中出现的大量公式、定律、定理确实难以理解，并且容易使人产生为难情绪；另一方面对矢量微分及矢量积分公式的熟练应用令人感到十分困惑。为此，在编著本书的过程中，我们多次讨论了本教材的教学大纲。本着与时俱进及开拓创新的时代精神，我们沿着电磁场理论发展的历史脉络，追踪前人进行理论与实验探索的艰辛里程，将历史发展的趣味性理论与叙述和推导有机地结合起来，同时论述了电磁场理论在日常生活和经济社会中的广泛应用。

根据我们的经验，深感学生倾向于将理论推导看成观念的抽象并特别注重某些方程式，认为它们是公式。但是学生很快就发现这些所谓的公式，不仅对于不同的媒质而且对于不同的坐标系都是不同的。于是这门课程就成为满足信息与电气工程学士学位要求而必须通过的一门“困难”课程。仅仅计算一个场量，就需要一组方程式，这可能会使学生们感到畏惧和困惑并对这门课程失去兴趣。

所以我们认为教师的职责是：①说明每一项推导的目的；②证明一些假设对于这个推导是绝对必要的；③强调它们的局限性；④突出它的局限性的作用；⑤举例说明几何形状对一个方程式的影响。为此，教师必须应用他们自己在这一学科的经验，同时也要强调在其他领域的应用；在讨论基础理论的同时，注重介绍这个领域中的一些新进展。例如，在讲解电磁场的边值问题时，教师可以讨论在高速高密集成电路中互连结构的电磁参数提取；在讨论平面电磁波的传播时，可以讨论在移动通信技术中采用的地面发射模型。

在适当地讲解了主要内容并从基本定律出发推导出相关的方程式后，学生应该在学习中做到：①领会电磁场与电磁波理论的发展历史；②排除恐惧为难的情绪；③重新获得学习的动力和信心；④掌握分析问题和解决问题的能力；⑤把握推理的能力以开拓新的见解。

本书在安排上力图叙述清晰和连贯一致，并使逻辑思想顺畅。本书附有大量例题，目的在于强调基本概念，并说明分析和解决典型问题的方法；每章末尾所附的思考题，用于测验学生对于本章内容的记忆和理解程度；每章的习题是专门为了增强学生对于公式中不同物理量的相互关系的理解而设立的，同时也是为了培养学生应用公式分析和解决问题的能力。

编 著 者

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 电磁场理论建立的历史意义	(1)
1.2 电磁场理论与现代电子信息技术	(1)
1.2.1 无线通信系统	(2)
1.2.2 雷达系统	(2)
1.2.3 军事应用	(3)
1.3 电磁场学科的应用范围	(4)
1.4 麦克斯韦方程组——电磁场理论的基础	(6)
1.5 本书构架	(7)
思考题	(7)
第 2 章 静电场与恒流电场	(9)
2.1 库仑 (Coulomb) 定律的建立及意义	(9)
2.2 库仑定律和电场强度的定义	(10)
2.2.1 库仑定律	(10)
2.2.2 电场强度的定义	(11)
2.3 静电场的基本方程	(11)
2.4 电场强度的计算	(13)
2.4.1 离散电荷系统的电场强度	(14)
2.4.2 连续分布电荷的电场	(15)
2.5 高斯定理及其应用	(17)
2.6 标量电位函数	(20)
2.6.1 离散电荷的电位	(21)
2.6.2 分布电荷的电位	(22)
2.7 电介质中的高斯定律	(24)
2.7.1 极化媒质的等效电荷分布	(24)
2.7.2 媒质中的合成电场	(26)
2.7.3 媒质中的高斯定理	(26)
2.7.4 介质强度	(27)
2.8 静电场的边界条件	(30)
2.9 电容和电容器	(32)
2.10 静电场的能量和力	(34)
2.10.1 用电荷和电位函数表示的静电能量	(34)
2.10.2 用场量表示的静电能量	(36)
2.10.3 静电力	(37)
2.11 恒流电场	(39)

2.11.1	恒流电场的基本方程	(39)
2.11.2	导电回路中的外加电场	(41)
2.11.3	功率耗散和焦耳定律	(43)
2.11.4	恒流电场的边界条件	(44)
2.12	恒流电场与静电场的比拟	(45)
2.12.1	静电比拟	(45)
2.12.2	电导	(46)
2.13	现代应用的实例	(47)
2.14	提要	(48)
	思考题	(48)
	习题	(49)
第3章	边值问题	(52)
3.1	引言	(52)
3.2	泊松和拉普拉斯方程	(52)
3.3	静态场解的惟一性定理	(54)
3.4	分离变量法	(56)
3.4.1	直角坐标系中的分离变量法	(56)
3.4.2	圆柱坐标系中的分离变量法	(60)
3.4.3	球面坐标系中的分离变量	(64)
3.5	镜像法	(67)
3.5.1	点电荷和导体平面	(68)
3.5.2	线电荷和平行导体圆柱	(69)
3.5.3	点电荷和导体球	(71)
3.6	复变函数法	(73)
3.6.1	复电位函数法	(74)
3.6.2	保角变换法	(76)
3.6.3	复变函数法应用的类型	(77)
3.6.4	许瓦兹变换	(80)
3.7	现代应用的实例	(83)
3.8	提要	(84)
	思考题	(84)
	习题	(85)
第4章	静磁场	(86)
4.1	安培环路定律的建立及其意义	(86)
4.2	静磁场的基本方程	(88)
4.2.1	静磁场的定义	(88)
4.2.2	自由空间静磁场的基本假设	(88)
4.3	矢量磁位	(90)
4.4	比奥—萨伐尔定律及应用	(91)

4.5	磁偶极子	(93)
4.6	介质中的安培定律	(95)
4.6.1	磁化强度矢量	(95)
4.6.2	磁场强度和相对磁导率	(96)
4.7	标量磁位	(98)
4.8	静磁场的边界条件	(99)
4.9	电感和电感器	(102)
4.10	静磁场的能量和力	(107)
4.10.1	用场量表示静磁能	(108)
4.10.2	静磁力	(109)
4.10.3	用磁场储能表示力	(111)
4.11	现代应用的实例	(112)
4.12	提要	(113)
	思考题	(113)
	习题	(114)
第5章	时变场	(117)
5.1	麦克斯韦理论的建立及意义	(117)
5.1.1	法拉第 (Faraday) 电磁感应定律的建立	(117)
5.1.2	麦克斯韦理论的建立	(119)
5.2	法拉第电磁感应定律	(122)
5.2.1	时变磁场中的静止回路	(122)
5.2.2	静磁场中的运动导体	(123)
5.2.3	时变磁场中的运动回路	(123)
5.3	全电流定律	(126)
5.4	麦克斯韦方程组	(128)
5.5	媒质分界面的边界条件	(130)
5.5.1	不同媒质分界面上的边界条件	(130)
5.5.2	两种无损耗、线性媒质之间的边界面	(131)
5.5.3	电媒质与理想导体之间的分界面	(131)
5.6	达朗贝尔方程	(133)
5.7	坡印廷定律	(135)
5.8	正弦电磁场	(137)
5.8.1	正弦电磁场的复数表示法	(137)
5.8.2	位函数的复数表示法	(138)
5.8.3	坡印廷矢量的复数表示法	(138)
5.9	复电容率及复磁导率	(139)
5.9.1	复电容率的概念	(139)
5.9.2	复磁导率的概念	(140)
5.10	核磁共振效应	(140)
5.11	提要	(143)

思考题	(143)
习题	(144)
第 6 章 准静态场	(146)
6.1 对麦克斯韦理论革命重新评价的历史	(146)
6.2 动态场的基本方程	(148)
6.3 准静态场的分类和特点	(149)
6.4 准静态位	(150)
6.4.1 电准静态场的位函数	(150)
6.4.2 磁准静态场的位函数	(150)
6.5 导电媒质中自由电荷的弛豫过程	(150)
6.6 导电媒质分界面自由电荷的积累过程	(152)
6.7 通过导电媒质薄环的磁扩散过程	(156)
6.8 电子回旋加速器	(157)
6.9 提要	(159)
思考题	(159)
习题	(159)
第 7 章 平面电磁波的传播	(162)
7.1 海因利希·赫兹 (Hertz) 实验的贡献	(162)
7.2 在理想媒质中的平面电磁波	(163)
7.2.1 沿特定方向轴传播的平面电磁波	(164)
7.2.2 平面波的极化	(167)
7.3 在导电媒质中的平面电磁波	(169)
7.3.1 低损耗媒质	(170)
7.3.2 良导体	(171)
7.3.3 群速	(173)
7.4 各向异性媒质中的电磁波	(175)
7.4.1 等离子体中的电磁波	(175)
7.4.2 铁氧体中的电磁波	(179)
7.5 在导电平面边界上的垂直入射	(182)
7.6 在导电平面边界上的斜入射	(186)
7.6.1 垂直极化	(186)
7.6.2 平行极化	(188)
7.7 在媒质平面边界上的垂直入射	(189)
7.8 在媒质平面边界上的斜入射	(192)
7.8.1 垂直极化	(192)
7.8.2 平行极化	(194)
7.8.3 全反射现象	(196)
7.9 现代应用的实例	(197)
7.10 提要	(199)

思考题	(199)
习题	(200)
第 8 章 电磁场理论应用的发展方向	(205)
附录 A 矢量分析	(206)
A.1 矢量代数	(206)
A.2 正交坐标系	(209)
A.3 线积分、面积分和体积分	(215)
A.4 标量函数的梯度	(220)
A.5 矢量函数的散度和高斯定律	(222)
A.6 矢量函数的旋度和斯托克斯定理	(226)
A.7 场函数的微分算子和恒等式	(230)
A.8 亥姆霍兹定理	(232)
附录 B 单位和符号	(234)
附录 C 一些常用材料的基本常量	(236)
参考文献	(237)

第1章 绪 论

1.1 电磁场理论建立的历史意义

对电与磁现象的研究，早先是彼此独立进行的。在人类古老的发展历史中，并不缺少有关它们的记载。但是定量研究却晚在牛顿力学建成之后。电磁场理论的发展深深受到牛顿思想的影响。以 1687 年牛顿出版的《自然哲学的数学原理》一书为标志，经过两百多年的完善和壮大，物理学的发展达到了极高的境界。当时，人们对所有的物理现象均采用牛顿力学的模型来解释，万有引力的表达形式以及人们对它的超距作用的理解，直接影响了人们的研究方向和思维模式。

随后所发现的库仑（Coulomb）定律、安培（Appere）环路定律及法拉第（Faraday）电磁感应定律是电磁学三大基本实验定律，不仅标志着人类对于电磁现象的认识和研究发展到了新阶段，而且迅速转化为生产力，由此诞生了电力工业，使生产面貌发生了巨大变化。

1873 年，麦克斯韦出版的《电磁学通论》，建立了统一的电磁场理论，预言了电磁波的存在，将光波从机械弹力波纳入了电磁波。麦克斯韦方程组被爱因斯坦称为“自牛顿以来最重要的发现”。无论怎样评价麦克斯韦对于人类文明及其进步所做的贡献都不为过。

至少到 19 世纪末为止，没有哪一种理论所起的作用能比得上电磁场理论对人类社会生活产生的巨大的指导意义。在电磁场理论形成以前，人类的活动中没有电报、电灯、电话、收音机、雷达、电视机，更没有发电机、电动机、变压器，等等。而这一切都是电磁场理论的产物，是人类智慧的结晶。可以说，电磁场理论的形成和应用是科学时代到来的标志。电力的应用是继机械力之后最伟大的动力革命，其对社会经济和人们日常生活的影响更远远超出了机械力。20 世纪计算机的发展也依赖于电磁场理论的建立。而到 21 世纪，电磁波已经成为了信息时代最基本的物质载体。

现代社会通过广播塔、微波转播、移动通信系统和通信卫星建立起来的经济、文化和政治上的广泛联系都直接产生于麦克斯韦在他的真空状态下的方程组中所包含位移电流的判断。电视也是源自麦克斯韦的发现，虽然它并不完美地指引着我们的生活并提供娱乐。雷达成为英国在第二次世界大战时反击侵略和粉碎纳粹的战斗中的决定性因素。飞机、船舶和宇宙飞船的控制与导航，射电天文学和探索外星智能以及电力和微电子工业的重要作用都要归功于麦克斯韦。

今天，地球周围和高空中充满了各种频率的电磁波，我们每时每刻都生活在电磁波的环境中。电磁波——人类聪明智慧的结晶，越来越多地渗透到现代生产、国防、科学技术以及人们生活的各个领域，发挥着无与伦比的神奇作用。

1.2 电磁场理论与现代电子信息技术

自从 1862 年，麦克斯韦在前人研究的基础上创立了麦克斯韦方程组理论以来，特别是进

入 20 世纪以来，电力工业、无线电广播、导航、移动通信、短波通信、电视、微波通信、雷达以及遥控、遥感、遥测、卫星通信、射电天文等，如雨后天春笋般相继出现，给我们整个物质世界的面貌带来了深刻变化。

1.2.1 无线通信系统

近十年以来，随着技术的进步和市场需求的推动，促进了移动通信系统（如 GSM 及 CDMA）、无线局域网（WLAN：Wireless Local Area Networks）、本地多点分配业务（LMDS：Local Multi-point Distribution Services）等网络的飞速发展，也极大地改变了人们的生活状态。

图 1.1 显示了一个典型的数字无线通信系统的基本结构。由于无线通信系统要求能够提供各种综合业务，因此这里的信源也就包含了话音、数据、图形以及活动图像等。通过编码器将这些信源转换成数字形式的信息。然后通过信号处理部分将数字信息进行编码以抵抗各种信道衰落的影响，与更多的用户共享所给定的频谱。接着调制功能通过调制器、混频器、滤波器、射频放大器等将基带信号转换成能够经由发射机天线发送的射频波形。而另一方面，在接收端，接收机天线接收射频波形。首先射频（RF）信号通过低噪声放大器、混频器、带通滤波器、放大器及检波器等解调为基带信号，然后在信号处理部分将不同的用户从共享的特殊频谱中分离开来，并且解码功能将试图修正无线信道所引入的误差，最后解码功能将基带信号信息转换回原来的信源信号。

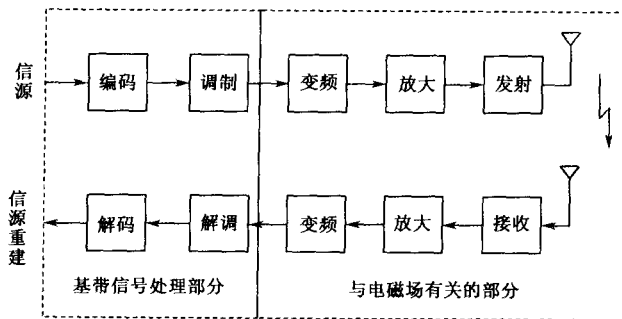


图 1.1 一个数字无线通信系统的基本结构

其中，从混频器、射频放大器、发射天线、电磁波在空间的传播路径、接收天线、低噪声放大器、混频器到滤波器等都要涉及到电磁场理论的内容。

1.2.2 雷达系统

现在雷达已经广泛地用于探测地面、海面、空中、太空甚至是地下的目标。雷达的应用范围主要在以下几个方面：军事应用、遥感、遥测、航空交通控制、法律强制执行和高速公路安全、空中交通安全和导航、石油和天然气的探测、轮船安全、太空探测以及在工业中也用于速度和距离的非接触性探测等。

一个超外差式常规脉冲雷达操作原理的结构图如图 1.2 所示。发射机既可以是诸如速调管、行波管或晶体管放大器等功率放大器，也可以是一个诸如磁控管那样的功率振荡器；发射机的输出通过波导管或其他类型的传输线传送到天线然后发射到空中；天线是能够机械扫描的抛物面天线、或平面天线阵列、或电子扫描的相控阵天线。双工器允许发射机和接收机

同时共享同一个天线。接收机的射频(RF)端首先是低噪声放大器,接着由混频器和本振(LO)转换为中频(IF)信号,然后由中频(IF)放大器进一步放大,紧跟着一个通常被称为第二检波器或解调器的晶体二极管,其目的是从载频中提取调制信号。在接收机的输出端,进行判决以确定是否有目标存在。

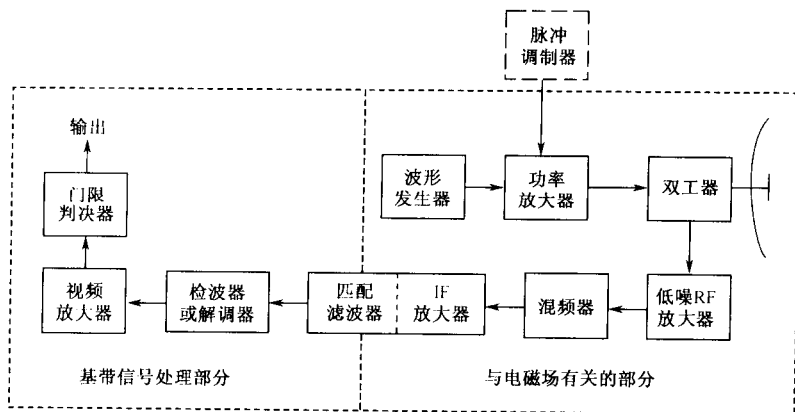


图 1.2 一个超外差式常规脉冲雷达系统的结构图

其中,从功率放大器、发射天线、双工器、电磁波在空间的传播路径、接收天线、低噪声放大器、混频器到滤波器等都要涉及到电磁场与电磁波理论的知识。

1.2.3 军事应用

世纪之交的信息技术正进入一个关键的转折时期,未来十年将是技术发展最为活跃的时期。信息化社会的到来以及IP技术的兴起,正深刻地改变着整个世界的面貌、未来信息作战的形态以及未来军事技术的走向。当今世界各主要国家都在以互连网络、多媒体、移动电话和电子邮件为代表的信息高速公路上抢占“制高点”,并由此开创了信息战所涉及的范围之广,可以说无所不包,一切与信息有关的事物都可能被纳入信息战的范畴。广义的信息战存在于和平时期、危机时期和战争时期,可以公开地也可以秘密地进行。和平时期的信息战表现为政治、军事、经济和科学等多方位的为争夺信息优势进行的对抗,危机和战争时期的信息战是和平时期信息战的延续和能量激增。

同其他战争模式一样,信息战也包括军事科技领域中“信息战”的时代,分为进攻和防御两个方面。进攻性信息战是为使己方自由地利用信息和防止敌方自由地利用信息进行的心理战、战术欺骗、电子战、直接攻击等行动。防御性信息战是保护己方的信息系统不受敌方的攻击,以顺利地获取及传递信息。信息战包括三种重要形式:电子战、网络中心战和心理战。

而电子战是近年来快速发展的一种作战形式,尤其是1991年海湾战争以来,电子战技术日益受到重视。电子战(EW: electronic warfare)是一个控制电磁(EM: electromagnetic)频谱的军事行动。为了达到这个目标,需要主动性的电子攻击(EA: electronic attack)和防御性的电子防护(EP: electronic protection)等两个方面。另外,电子支援(ES: electronic warfare support)也是必需的,以便为执行电子攻击和电子防护任务时提供情报和威胁识别。在现代战争中,摩擦不再是主要目标,而用精确打击或者将军事指挥员与他的军队分离开来的行动

来代替。作为电子作战 (EW) 中的一个重要的功能是指挥控制战 (C²W)。战场的态势感知是正在逐步受到重视的电子作战的另一个功能, 这主要涉及到进行电子支援的接收机功能能够为军事部队提供完整的战场信息。另外, 利用电磁能量制造成的新型武器将会得到广泛应用。其中包括有定向辐射武器、隐形武器、智能武器、无人武器、信息战武器、电子伪装以及空间战武器, 等等。

网络中心战是指将军队的所有侦察探测系统、通信联络系统、指挥控制系统和各种武器系统, 组成一个以计算机为中心的网络体系, 各级部队与人员利用该网络体系了解战场态势、交流作战信息、指挥与实施作战行动的作战样式。通过战场各作战单元的网络化, 把信息优势变为作战行动的作战行动优势, 使各分散配置的部队共同感知战场态势, 从而协调行动, 发挥最大的作战效能。网络中心战理论强调: 作战行动将主要围绕计算机网络进行, 网络是信息实时流动的渠道; 信息既是战斗力, 也是战斗力的倍增器; 作战单元的网络化可“产出高效的协同”, 即“自我协调”, 可使指挥官以更灵活的方式指挥作战, 增强作战的灵活性和适应性。网络中心战是信息战的一部分, 而且是其核心的部分。

而信息战武器是网络系统的“克星”。为适应 21 世纪信息时代的需要, 许多国家都在研究新概念信息战武器。电磁脉冲武器可由核爆炸或特殊的波束发生器产生极强的电磁脉冲, 其作用时间极短, 电场强度高达数十千伏, 以光速向爆心周围传播, 频率可覆盖从极低频到特高频的广阔范围, 可对通信线路、电子设备、计算机系统产生干扰和破坏作用。高功率微波武器可产生峰值功率高达 100 兆瓦的电磁波, 破坏武器系统的电子线路、计算机控制系统。海湾战争中美军曾用“战斧”式巡航导弹试验, 在战斗部队内安装微波发生器, 干扰、破坏伊军 C³I (指挥、控制、通信、情报) 系统。美国在科索沃战争中曾用石墨炸弹将大量碳纤维丝投撒到发电厂上空, 破坏供电网输电功能。在计算机病毒武器中, 迄今已有近万种计算机病毒。近来出现的比特武器可破译密码后进入网络, 干扰作战指挥、武器控制系统或直接摧毁计算机硬件, 导致整个网络系统彻底瘫痪。

由此可见, 在信息战领域中, 电磁场与电磁波的理论知识将发挥重要的作用。

1.3 电磁场学科的应用范围

电磁场理论在当今科学技术发展的进程中得到了广泛应用。无线电系统中的电磁波辐射、传播及接收均需要用电磁场的理论来解释。

无线电系统中的天线是用来发射和接收携带信息电磁波的设备, 是极其重要的部件, 其基本原理只能通过电磁场理论的知识来解释。电磁波由波源产生进而脱离波源传播的现象被称为电磁波的辐射; 当电磁波产生后, 即使波源不复存在, 已产生的电磁波仍可继续传播; 而通过天线接收空间传播的携带信息的电磁波被称为接收。

所有无线电系统的工作原理与工程设计, 均依赖于其电磁波在空间的传输路径。而电磁波在空间的传播不仅与工作频率有关, 而且还与收发天线的形状以及传播环境等均有很大关系。

电磁波在空中的传播在很大程度上受频率的影响。从理论上来说, 有关电磁波的讨论更耐人寻味一些, 这是因为电磁波作为基本场定律的解, 应该同样适用于经典电磁场理论所研究的整个频率范围。到目前为止, 实验上已经观察到的波谱如图 1.3 所示, 它能够连续地从低至直流的零赫兹到无线电长波然后再一直延伸到在宇宙线中观察到的能量很高的 γ 射线。无线电长波的频率约为 10Hz, 波长为 3×10^4 米; 而后者频率的数量级为 10^{24} Hz (以及更高),

波长的数量级为 3×10^{-16} 米（以及更短）。已知的波谱覆盖了二十多个数量级。由于无线电、光波、X 射线和 γ 射线等频率相差几个数量级，因此辐射源、探测方法以及与物质的相互作用方式均有显著的差别。

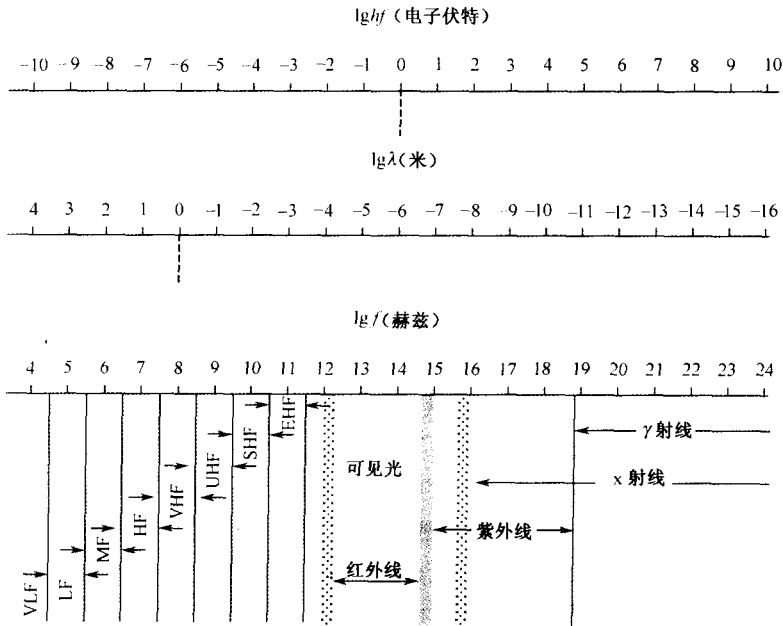


图 1.3 电磁频谱图

缩写 VLF、LF、MF、HF、VHF、UHF、SHF、EHF 的意义分别是：甚低频、低频、中频、高频、甚高频、特高频、极高频和至高频。用阴影区表示的界限只是近似的。能量 hf 是一个光子或辐射量子的能量，其中 h 是普朗克常数 (6.63×10^{-34} 焦耳·秒)， f 是频率。

这些电磁波的基本的同一性，是由在它们波谱的重叠部分上进行的大量实验所证实的。此外，在自由空间中，它们都是以共同的速度 c 传播的横波这一事实，也是一个证明。例如，同时用无线电方法和光学方法观察耀变星，证明了当波长相差 6 个数量级时，传播速度在实验误差范围内确实一致。

自从赫兹在 1888 年验证了电磁波的存在之后，电磁场和电磁波应用到了我们生活的方方面面。如果按照图 1.3 所示的频段来划分，在静场范围内，有磁性水雷、磁法探矿及预报地震等方面的应用，而电磁探测法是利用电磁波与地层的反射时间及强度以探测地层状况，主要应用于地下水、海水入侵、断层破碎带、地层构造及地下管线探测、钻孔电磁波法和坑道电磁波法的勘探应用等方面。在几十赫兹的范围内，是电力与电机方面的应用。在甚低频及低频的波段范围内的电磁波，则用于对潜艇的长波通信。在中频及高频波段范围内的电磁波，则用于广播和电视的发射及接收。在高频、甚高频和特高频波段范围内的电磁波，则应用于移动通信、短波通信、无线互联网等方面。在极高频和至高频波段范围内的电磁波，则应用于卫星通信、高速数据传输、雷达、电子对抗（其中包括隐身和反隐身、假目标、诱饵等技术）、导航、雷达成像及射电望远镜等方面。红外线波段范围内的电磁波，则应用于近程数据传输、防盗监视系统等方面。在可见光波段范围内的电磁波，则应用于光纤传输及数据交换

等方面,随着技术的发展与进步,光纤传输已经逐渐变成一种比较廉价的传输媒质。激光武器是将激光的能量高度集中,比太阳光亮 200 亿倍,足以摧毁任何坚固的目标;海洋激光探测是一种可脱离水面、可遥测垂直剖面参数的新型海洋探测方法和技术;激光射击时几乎没有后座力,可随意变换射击方向,精确打击目标的要害部位。激光治疗仪进行美容。另外, X 射线、红外线、热成像、核磁共振等成像诊断设备,生物电信号检测及临床监护设备, γ 射线、超声、激光、电磁波等治疗装置,以及新型中医诊断与治疗仪器,均在医疗卫生系统及行业中得到应用。在紫外线波段范围内的电磁波,则应用于医疗消毒。总而言之,电磁波已经深入到我们日常生活的各个方面。

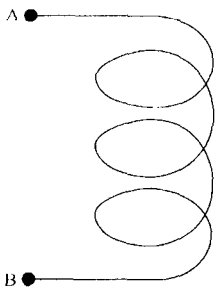


图 1.4 随频率变化的线圈

最后,为了避免人们得到这样一种印象,即改变电磁场的激励频率仅影响场响应的速率,我们讨论图 1.4 所示的一个简单线圈的作用。在没有电源时,这个线圈可以只是一个床垫弹簧或启瓶塞钻。反之,当在线圈两端加上直流电源时,它的作用就像一个简单的集总参数电阻 R 。

在时变激励(交流)时,其作用就完全不同了,并且随着激励频率的不同而有明显的变化。在低频波段,它起着简单的电感 L 的作用(如果导线的损耗足够大,那就需要再加上一个电阻),随着频率的提高,逐渐依次变成 LC 谐振电路、螺旋慢波结构,最后在高频变成一个辐射天线。

在这个线圈举例中,最耐人寻味且颇为惊人的一点是,所有这些看起来毫无关联的响应都是起源于一个电磁场。

就这个场而言,每一种不同的响应完全是由于激励频率的不同所致。从这样一个线圈产生的电磁场,可以得到如此之多的实际电路元件,实际上这表明了电磁场理论的完美性。借助电磁场理论,人们能够简单而透彻地理解和解决许多不同的系统和器件,并且对于未来的许多系统和器件也是如此。

1.4 麦克斯韦方程组——电磁场理论的基础

从本质上说,麦克斯韦方程组能够解释所有宏观的电磁现象,因此是宏观电磁理论的基础。

通常分析和求解麦克斯韦方程组所采用的方法有:格林函数法、分离变量、镜像法、变分法、矩量法、保角变换法、场分量匹配法以及准静态场法积分方程,等等。

随着技术的发展,人们遇到了越来越复杂的电磁场边值问题,许多边界无法用解析法来分析,因而普遍采用了计算机的数值运算,这就需要用到计算机语言、计算机软件、电磁场问题的数值方法等方面的知识。

本课程将学习电磁场理论的基础知识,就特别需要全面掌握和熟练应用高等数学、数学物理方法与特殊函数、复变函数、矢量分析及场论等课程的知识,以便掌握电磁场理论的基本概念和分析方法,为以后专业课的学习和实际工作打下良好的基础。

1.5 本书构架

本书共由 8 个章节组成, 根据电磁场理论发展的历史, 沿着前人所探索过的足迹, 阐述了电磁场理论的基本概念、基本方程、定理以及应用。

在第 2 章将首先讨论静电场与恒定电流电场。首先回顾了建立库仑 (Coulomb) 定律的历史及意义, 讨论了库仑定理、电场强度、静电场的基本方程、高斯定理和应用, 并引入了标量电位的概念, 接着介绍了电介质中的高斯定律, 推导了静电场的边界条件, 随后讨论了电容和电容器以及静电场的能量和力, 然后讨论了恒定电流电场以及恒定电场与静电场的比较, 最后列举了静电场的应用实例: 喷墨打印机。

在第 3 章将讨论电磁场的边值问题。首先讨论了泊松和拉普拉斯方程以及静态场解的惟一性定理, 接着讨论了在直角坐标系、圆柱坐标系和球坐标系中的分离变量法, 然后讨论镜像法和复变函数法, 最后列举了电磁场的边值问题的应用实例: 高速高密度集成电路互连参数提取。

在第 4 章将讨论静磁场。首先回顾了建立安培 (Ampere) 环路定律的历史及意义, 讨论了静磁场的基本方程, 并引入了矢量磁位、比奥—萨伐尔定律, 然后计算了磁偶极子所产生的磁场强度, 接着介绍了磁介质中的安培定律, 与标量电位相对应地引入了标量磁位, 随后推导了静磁场的边界条件, 然后讨论了电感和电感器以及静磁场的能量和力, 最后列举了静磁场的应用实例: 磁流体发电机。

在第 5 章将讨论时变场和麦克斯韦 (Maxwell) 方程组。首先回顾了法拉第 (Faraday) 电磁感应定律的基础上建立的麦克斯韦 (Maxwell) 理论以及对这次理论革命重新评价的历史, 讨论了法拉第电磁感应定律和麦克斯韦方程组, 并引入了矢量磁位和标量电位, 接着推导了时变电磁场的边界条件, 随后讨论了坡印廷定律, 然后讨论了正弦电磁场和复电容率及复磁导率的概念, 最后列举了时变电磁场的应用实例: 核磁共振效应。

在第 6 章将讨论准静态场 (一个准静磁场、准静电场的内容) 的问题。首先回顾历史, 讨论了准静态场的基本方程, 引入了位函数的概念, 接着推导了准静态场的边界条件, 最后列举了准静态场的应用实例: 电子回旋加速器。

在第 7 章将平面电磁波的传播。首先回顾了海因利希 赫兹 (Hertz) 实验对验证麦克斯韦 (Maxwell) 理论的贡献, 讨论了在理想介质中的平面电磁波的特性, 接着讨论了在导电介质中的平面电磁、在各向异性介质中的电磁波, 然后讨论了在导电和介质平面边界上的垂直入射和斜入射, 最后列举了电磁波的应用实例: 移动通信中的地面发射模型。

在第 8 章将综合论述宏观电磁场理论应用的发展方向。

思考题

- T1-1 电磁场理论建立的基础是什么?
- T1-2 电磁场理论建立的历史意义是什么?
- T1-3 电磁场理论与电子信息技术之间的关系是什么?
- T1-4 在一个无线通信系统中, 哪些子系统将涉及电磁场与电磁波理论的知识?

- T1-5 在一个雷达系统中, 哪些子系统要涉及到电磁场与电磁波理论的知识?
- T1-6 在信息战的领域里, 哪些系统将涉及到电磁场与电磁波理论的知识?
- T1-7 电子战是通过什么形式进行作战的?
- T1-8 电磁波频谱是如何划分的?