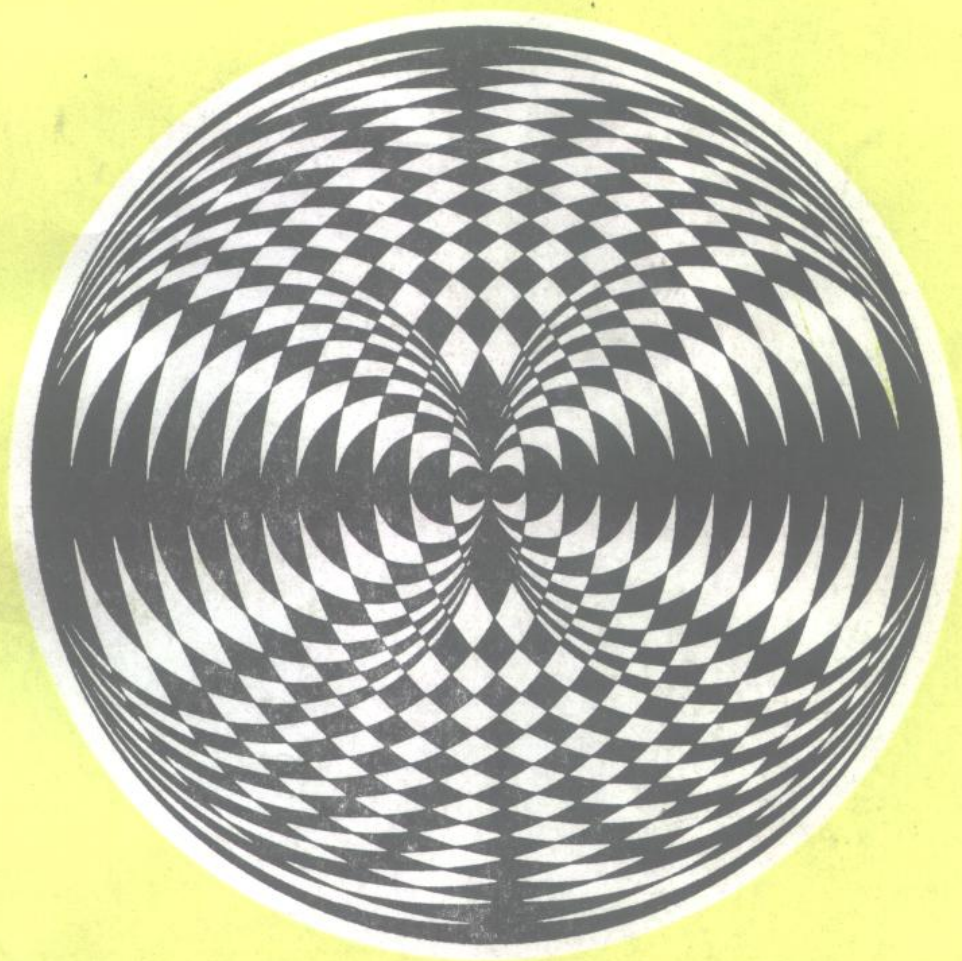


电磁场与电磁能

[美] H·A·豪斯 J·R·梅尔彻 著

江家麟 周佩白 钱秀英 王瑞禹 马西奎 译

冯慈璋 校



高等教育出版社

电 磁 场 与 电 磁 能

[美] H·A·豪斯 J·R·梅尔彻 著

江家麟 周佩白 钱秀英 王瑞禹 马西奎 译

冯慈璋 校

高 等 教 育 出 版 社

(京)112号

内 容 提 要

本书是1989年出版的美国家麻省理工学院本科生的电磁场理论教材。书中突出准静态电磁场。全书十五章中有九章是直接论述准静态场的,另有两章是为其作准备的。所有基本内容可概括成电准静态场,磁准静态场和电动力学场三大部分。电准静态场含四章(重叠积分观点,边值观点,极化,以及传导与电准静态电磁弛豫)。磁准静态场含三章(重叠积分与边值观点,磁化,以及磁准静态弛豫与扩散)。电动力学场部分含三章,包括平面电磁波、辐射、导波等传统内容。

本书注重理论联系实际,书中穿插了40个演示及135道例题。本书也注意教学方法,强调应用电路概念并与场作广泛类比。

本书可用作高等学校教材或教学参考书,也可供电类各专业的各级工程技术人员参考。

责任编辑 楼史进

[美]Hermann A. Haus & James R. Melcher
Electromagnetic Fields and Energy
PRENTICE HALL, 1989.

电 磁 场 与 电 磁 能

[美]H·A·豪斯 J·R·梅尔彻 著

江家麟 周佩白 钱秀英 王瑞禹 马西奎 译
冯慈璋 校

高等教育出版社出版

新华书店总店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 35.75 字数 820 000

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数 0001—2 090

ISBN7-04-003616-9/TM·182

定价 21.65元

译者前言

这是1989年出版的美国麻省理工学院的本科生电磁场理论教科书。两位作者都是该院电气工程和计算机科学系教授。在现有的为数众多的国内外电磁场理论教材中,这本书有其不同一般的特色。

本书的内容不仅涉及而且详尽地讨论了准静态电磁场。全书十五章中,有十一章是讨论准静态场(计九章)或为准静态场作准备(计两章)的。可以说,它突出了准静态场,这是其它同类书中前所未见的。

各章中除通常的正文、例题、小结和习题外,全书还穿插了四十个可在课堂上作的演示。这也是该书特有的。这些演示对于加深理解课堂讲授的概念以及理论联系实际都是大有好处的。

该书应用了电路概念并与场作广泛类比。这样做不但使学生易于掌握场的概念与理论,并且为深入理解场与路的联系创造了很好的条件。

在材料的组织上,该书力图使学生能实现电的、磁的和电磁元件的模型建立。并且采取了适用于连续媒质力学和传热学的基本方法,强调场与源之间的关系。

电磁场理论有两个分支。一个是从无线电频率到光频的电磁波传播问题,其中特征时间 τ 比电磁波通过系统的特征长度 L 所需时间要短得多即 $\tau \ll L/c$ (这里 c 是光速)。另外一个分支是对于频率较低和特征长度较小的系统,其中特征时间 τ 比起电磁波通过的时间要长得多即 $\tau \gg L/c$ 的情况,也就是准静态电磁场问题。实际上,很多电工(包括电力工程)学科中的电磁场问题,大多是准静态的。准静态场绝不是静态场,它是与时间有关的。并且不论哪一类准静态场,都是既含电场又含磁场的。因此,以准静态场为主要内容来介绍、讨论和研究,就是十分必要了,特别对于强电专业尤其是这样。

此外,在理论联系实际,应用电路概念及类比方法于场的教学以及加强场与路的联系等方面,该书都有独特之处,值得我们借鉴。

我们希望本书的引进,将能积极促进并加速我国高校电磁场理论的教材建设和课程建设。

书中不但有传统的微波和天线内容,也包括了为广泛的工业需要(包括电力工业)服务的内容。因此不仅可用作教材,也是电类工程技术人员再学习的对象。

译者的分工是,江家麟:序言,1—3、6、7、15章和附录;周佩白:12—14章;钱秀英:4、5章;王瑞禹:11章;马西奎:8—10章。

翻译不当以及错误之处,欢迎读者指正。

译者

于西安交通大学
电工原理教研室
1990.12.

序 言

本教科书是针对已见过麦克斯韦方程组的积分或微分形式(一年级第二学期物理学)和已接触过一些积分定理和微分算子(一年级第二学期微积分)的读者而写的。前二章以及提供的习题与附录是对这些内容的复习。

在第三章中,提出了一个简单而又实际上引人入胜的论据,以证明如果已知初始的电荷密度和速度以及电场和磁场时,麦克斯韦方程组能预计由自由电荷所产生的场随时间的演变情况。这是以后更严格地建立的唯一性定理的一种形式。作为这种论述的一部分,证明在整个空间,场是由它的散度和旋度完全地确定的,是解释麦克斯韦方程组的普遍形式的论据。

在此基础上,把麦克斯韦方程组简化为它们的电准静态(EQS)和磁准静态(MQS)形式。建立这一步是为了用结构方法,以便在为解决工程问题的需要而发展数学技能时,给出物理的概述。

本书建立在,并加强于对模拟电路的理解上。场决不是静态的。它们的动态特性往往用系统的阶跃响应和正弦稳态响应来说明,在这些系统中,空间相关性已包含在(偏微分方程解的)时间相关的系数中,因而满足常微分方程。然而,与模拟电路的联系,远远超过电路理论中所用的解微分方程的同样的方法。从麦克斯韦方程组推导电路理论所固有的近似,非常明显地显示出来,使学生能理解在什么条件下电路理论中隐含的假设不再适用。

要了解本书材料的组织,与模拟电路作更微妙的联系,可能是有益的。我们把电路理论看作类似于场论。在此类比中,我们的推导从电容器——电荷以及有关的场开始,用等电位面来表示完纯导体。接着用电阻器——稳定传导表示损耗。然后将这些元件组合以表示电荷弛豫,即“RC”系统动力学(第4—7章)。由于EQS场未必是静态的,学生能理解R-C型动力学,其中自由电荷的分布由与R-C系统比拟的连续媒质确定。

采用相同的方法,我们接着研究L-R系统的连续媒质一般化(第8—10章)。和前面一样,首先我们根据给定的源(电流密度)求磁场。然后研究完纯导电系统,并再一次用边值的观点来处理。对此电感器系统的连续媒质模拟再加上有限电导率,我们得到在电路类比中的似L-R系统动力学。

基于对这些准静态现象提供的源与场之间的联系的理解,利用对电和磁的能量储存与耗散的研究进入电动力学的研究是自然的(第11章)。

电动力学主要讨论无损媒质中的电磁波(第12—14章)。在此极限情况下,它的电路类比是具有分布的微分电感器和电容器的系统,即L-C系统。按照EQS和MQS系统所用的相同方式,首先对已知的源——天线和天线阵求场。然后将边值观点引入微波和光波导与传输线。

我们以有损材料的电动力学,即L-R-C系统的一般化(第14—15章)作为结束。利用在EQS,

• J •

MQS和电动力学系统中已学到的。例如主特性时间的物理意义,作出了在实际系统中电磁场如何利用的展望。在电路类比中,这些特性时间是 RC , L/R 和 $\sqrt{LC}$ 。场论观点的一个好处是它表明了用这些时间表示的物理尺寸与结构对动态过程的影响。对于为什么往往可以将世界看成是EQS或MQS的问题,电路类比给出了一个启示。时间 $\sqrt{LC}$ 是 RC 和 L/R 的几何平均值。 RC 或 L/R 都可小于 $\sqrt{LC}$,但不能两者都小于 $\sqrt{LC}$ 。对于大的 R ,当频率增高时,首先出现 RC 动力学(EQS),接着是电动力学。对于小的 R ,首先出现 L/R 动力学(MQS),接着仍是电动力学。这暗示出在恰当地模拟为EQS和MQS的系统中“完纯导体”的含意有巨大的差别。

这样组织材料是试图使学生意识到电、磁和电磁器件与系统是可以被分成几个部分的,每一部分往往可用麦克斯韦方程组的某一种极限形式来描述。识别这些极限情况是建立模型技巧的一部分,也是使器件或系统适合于解析处理或计算机分析而作些必要的简化,以及有效地应用定律的适当简化来指导创造发明过程的技巧的一部分。

在EQS近似情况下,有机会处理象晶体管、静电除尘器以及静电传感器和传动机构之类的器件和装置,同时继电器、电动机和磁记录媒质则是MQS系统的例子。传输线、天线阵和电介质波导(即光导纤维)是必须采用完整的动态麦克斯韦方程组的例子。

与例子相联系,书中叙述了约40个演示。它们被设计成使数学结果具有物理意义。在相对简单的结构和仪器安排的基础上,它们并不复杂,而且要求在推导出来的与观察到的量之间有直接联系。它们的目的是帮助学生实际观察用符号所描述的东西。常常提出一条理论预计的曲线,以便能与教室中取得的数据比较,它们为检验理论有效性的范围以及传播处理物理世界的定量方法提供了机会。演示的更详细的考虑可以是特殊课题的基础,这些课题往往引入计算机模拟。对于只有教科书作为唯一资源的学生来说,依赖对实验的描述本身作为抽象与物理实际之间的联系。对于那些非常有幸能在教室中看到演示的学生来说,这些描述起了所演示内容的记录的作用。经常出现学生未能从演示中得益的情况,这是由于传统的记笔记方式没有公平地对待表演。有关获得演示录像带的信息请与作者联系。

本书中包括的演示,物理现象方面的多于实际应用方面的。为了充实教室感受,提供工程刺激,实际应用也应作为示例。在我们讲授的课程中,以及实际情况中,它们更多的是“表演和讲述”性质,而不是工作演示,后者往往反映教师现在的经验和兴趣,并且通常包含更多的复杂性,超出适当定性处理的需要。

在将数值方法扩大到几何细节和非线性时,本书规定普通的参考系,从矩量法作为重叠积分解决边值问题开始,而以能量法作为有限元法的基础终结。为了实际应用场论,同时帮助学生获得物理的理解,J. L. Kirtley教授和S. D. Umans博士目前领导我们的研究工作使学生接受计算机提供的“力量”。工作站、有限元软件包等等使在常规的工程设计中仔细考虑几何形状的影响成为可能。然而,不论在将来学生能得到的计算机软件包变得如何先进,学生借助于特殊情况理解工作中的物理现象仍是基本的。这就是本书中把重点放在简单几何形状的原因,使得当场与媒质相互作用时,对工作过程提供物理内涵。

麦克斯韦方程组的数学使学生能很好地理解梯度、散度和旋度算子。精通这些数学将会帮

助学生进入其他领域,例如流体与固体力学,传热与传质,以及量子力学,它们也应用经典场的用语。为使内容用来达到这一较大的目的,着重于源-场关系,用标量位和矢量位表示场的无旋和无散部分,以及对计及有限系统尺寸和有限时间变化率时边界条件的理解。

麦克斯韦方程组形成了一个没有被任何其他物理学学科所超过的知识体系。极少数的方程包容了如此大范围的物理现象。在相对论提出之前的麦克斯韦方程组,不仅经受住相对论的表述的考验,而且有助于形成它。由于在场中它们是线性的,要使它们在量子理论上正确,将场的矢量用算子取代就是全部所需要的;因此它们也经受住量子理论的引入。

介绍磁化的内容与通常的处理有所不同,我们采用成对的磁荷,即磁偶极子作为磁化的源。另一个常用的是环行的安培电流。磁荷法是基于电动力学的朱氏表示法。朱(Chu)利用方程组的对称性,用从极化类推的办法来使磁化的学习变得方便。随着年代的过去,这一方法会受到批评是不可避免的,因为电子的偶极矩,铁磁性的主要源,是与电子的自旋有关的,这样似乎用环行电流来描述更为合适。

因特勒根定理而闻名的特勒根(Tellegen),对这个方法特别持异议。尽管他承认在给出相同答案的两种方法中,选择哪一个是爱好问题,他给出在电流回路(磁偶极子的安培模型)上力的推导,并证明和磁偶极子上的力有不同的答案。差别是小的,校正项只是相对论性质的;因此,在宏观测量时要检测出这一影响是困难的。它只是在时变电场存在的情况下才出现。然而这一批评如果能成立,就会使应用磁偶极子的处理法被高度怀疑。

对这一问题的解决,采用了仔细研究的办法,一方面是作用在电流回路上的力,另一方面是作用在磁偶极子上的力。结果是,以沿回路的恒定环行电流为前提的特勒根的分析是错误的。时变电场引起环行电流的变化,考虑到这一变化会引起附加的力,它抵消了被批评的那一项。磁偶极子的两种模型都得到了相同的力表达式。分析中出现的困难是由于电流回路包含有“运动部分”,即环行电流,因此要求在回路的静止坐标系中采用相对论性的校正。从而,电流回路模型从本质上说比磁荷-偶极子模型更难于分析。

关于力的疑题的解决,也有助于说明能量动量张量的对称性问题。差不多在这个工作正在进行的同时,斯坦福的 Shockley 和 James 独立地提出有联系的问题,他们和哈佛的 Coleman 和 Van Vleck 之间引起热烈的交流,Shockley 用“隐藏的动量”作为对于存在磁化材料的电磁场的动量的贡献。Coleman 和 Van Vleck 证明,基于狄拉克方程(即相对论性的描述)的适当表述,自动地包括了这些项。在我们背后已有这些理论工作的情况下,我们舒适地用磁荷-偶极子模型作为磁化的源。没有把这一错综复杂的问题向学生介绍,虽然在本书中对这些已作了简要提及。

作为差不多等于学习这一材料的学生的典型年龄的一个时期内(两位作者从 1968 年开始他们的合作)课程发展过程的一部分,本书归入第二次世界大战期间及以后起源于“辐射实验室”的场论的演变中。由 Richard B. Adler, L. J. Chu 和 Robert M. Fano 教授在教科书中传播的准静态学也是本书中的一个主要的题目。然而,概念被扩展并且变得更加严密和有用,这是由于认识到在电磁波现象可以被忽略,但仍然可以是与变化率相关的意义上来说,电磁现象是“准静态的”。正如本书中所用的,准静态范围包括当特性时间比与电磁波有关的时间为长时的动态现

象。(包括了没有时间变化率过程的模型,这模型称为“似稳的”,以资区别。)

由于承认本书的血统,谨以此书献给 R. B. Adler, L. J. Chu 和 R. M. Fano 教授。Adler 教授,以及 J. Moses, G. L. Wilson 和 L. D. Smullin 教授,他们在发展时期担任系主任,是知识的、道德的和财政资助的源泉。我们的灵感也来自从事教学工作的同事们——教授和助教,以及对“讲稿”的演变提出有关见解的学生们。近年来的讲课已成为课程主要依靠的 Alan J. Grodzinsky 教授的教学工作已反映在本书中。其他对课程发展作出贡献的部分名单包括 J. A. Kong, J. H. Lang, T. P. Orlando, R. E. Parker 和 D. H. Staelin 等教授。M. Zahn 教授(他协助最后阅读了本书)帮助把演示制成录像带,使在我们的教室之外也能看到。“提纲”是 Amy Hendrickson 女士写的,正文是 Cindy Kopf 女士写的,她设法使最后的出版过程对于作者成为乐事。

目 录

序言.....	1	第3章 准静电学与准静磁学导言.....	49
第1章 自由空间中的麦克斯韦积分定律.....	1	3.0 引言.....	49
1.0 引言.....	1	3.1 由麦克斯韦、洛伦兹和牛顿定律所支配世界的 时间演变.....	50
内容概述.....	1	3.2 准静态定律.....	53
1.1 自由空间中的洛伦兹定律.....	5	3.3 场成为准静态的条件.....	54
1.2 电荷密度与电流密度.....	7	3.4 准静态系统.....	58
1.3 电场强度的高斯积分定律.....	9	3.5 应用概述.....	61
奇异电荷分布.....	11	3.6 小结.....	63
高斯连续性条件.....	14	习题.....	64
1.4 安培积分定律.....	14	第4章 电准静态场: 重叠积分观点.....	68
奇异电流分布.....	16	4.0 引言.....	68
安培连续性条件.....	17	4.1 用标量电位表示的无旋电场. 梯度算子 和梯度积分定理.....	69
1.5 电荷守恒的积分形式.....	18	二维无旋场的形象化.....	73
电荷守恒连续性条件.....	21	4.2 泊松方程.....	73
1.6 法拉第积分定律.....	21	4.3 叠加原理.....	74
无环量的电场强度.....	22	4.4 与电荷奇异性相关的电场.....	75
有环量的电场强度.....	23	位于原点的电偶极子.....	77
法拉第连续性条件.....	24	无限远处的一对等量异号电荷.....	78
1.7 磁通的高斯积分定律.....	24	其它的电荷奇异性.....	78
磁通连续性条件.....	25	4.5 对特定电荷分布的泊松方程的解答.....	79
1.8 小结.....	25	面电荷密度的重叠积分.....	80
参考文献.....	27	线电荷密度的重叠积分.....	81
习题.....	27	二维的电荷和电场分布.....	82
第2章 自由空间中的麦克斯韦微分定律.....	33	均匀的偶极子层的电位.....	83
2.0 引言.....	33	4.6 存在完纯导体时的电准静态场.....	85
2.1 散度算子.....	34	电容.....	86
2.2 高斯积分定理.....	35	4.7 镜像法.....	91
2.3 高斯定律、磁通连续性与电荷守恒.....	37	4.8 求解边值问题的模拟电荷法.....	94
2.4 旋度算子.....	37	4.9 小结.....	97
2.5 斯托克斯积分定理.....	39	参考文献.....	99
2.6 安培微分定律与法拉第微分定律.....	39	习题.....	99
2.7 场的形象化以及散度和旋度.....	40	第5章 根据边值观点的电准静态场.....	110
2.8 麦克斯韦微分定律和积分定理小结.....	44	5.0 引言.....	110
习题.....	45	5.1 泊松方程与拉普拉斯方程的特解和齐	

次解	111
为满足边界条件的叠加方法	112
电容矩阵	113
5.2 泊松方程解的唯一性	113
5.3 连续性条件	114
5.4 笛卡儿坐标系中拉普拉斯方程的解	115
5.5 满足边界条件的模态展开式	119
5.6 带有边界条件的泊松方程的解	125
5.7 极坐标系中拉普拉斯方程的解	129
5.8 在极坐标系中的例子	133
简单解	134
方位角模式	135
径向模式	136
5.9 球坐标系中拉普拉斯方程的三个解	138
5.10 拉普拉斯方程的三维解	141
笛卡儿坐标的乘积解	141
笛卡儿坐标系中的模态展开	142
其他坐标系中的模态展开	145
5.11 小结	146
参考文献	146
习题	147
第6章 极化	158
6.0 引言	158
6.1 极化强度	160
6.2 存在极化时的定律与连续性条件	162
极化电流密度与安培定律	162
位移通量密度	163
6.3 永久极化	164
6.4 极化构成定律	168
6.5 存在电线性电介质情况下的场	170
电容	171
感应极化电荷	171
6.6 分块均匀的电线性电介质	173
均匀电介质	173
分块均匀电介质	175
6.7 平滑地不均匀的电线性电介质	179
6.8 小结	181
习题	182
第7章 传导与电准静态的电荷弛豫	189
7.0 引言	189
7.1 传导构成定律	190

欧姆传导	191
单向传导	193
7.2 稳定的欧姆传导	193
连续性条件	194
电导	195
导体中场的定性图景	195
7.3 分布的电流源和相关的场	198
分布电流源的奇异性	198
与电流源奇异性相关的场	199
镜像法	200
7.4 稳定传导解的叠加和唯一性	201
为满足边界条件的叠加	201
电导矩阵	202
唯一性	203
7.5 分块均匀导体中的稳定电流	203
与线性电介质中场的比拟	203
内部-外部近似法	204
7.6 传导比拟	209
满足拉普拉斯方程的场的绘制	210
7.7 均匀导体中的电荷弛豫	211
浸没在均匀材料中的物体上的净电荷	213
7.8 对于不均匀物质的电准静态的传导定律	216
不成对电荷密度的演变	216
电准静态的电位分布	216
唯一性	217
7.9 均匀和分块均匀系统中的电荷弛豫	218
具有均匀特性的区域中的场	218
分块均匀系统中的连续性条件	219
分块均匀系统中的不均匀场	222
7.10 小结	228
参考文献	229
习题	229
第8章 磁准静态场: 重叠积分和边值观点	236
8.0 引言	236
唯一地确定的矢量场	237
8.1 矢量位和矢量泊松方程	238
二维的电流和矢量位分布	239
8.2 毕奥-沙伐重叠积分	241
计算电磁铁磁场的棒模型	244

8.3 标量磁位.....	246	10.5 磁扩散定律.....	330
电流环的标量位.....	267	物理解释.....	331
8.4 存在完纯导体时的磁准静态场.....	269	10.6 磁扩散瞬态响应.....	333
边界条件及感应的面电流密度的		一维扩散方程的乘积解.....	334
计算.....	250	10.7 集肤效应.....	336
完纯导体线圈端钮间的电压.....	251	10.8 小结.....	341
自感.....	253	习题.....	342
8.5 分块磁场.....	255	第 11 章 能量、功率流和力	349
8.6 矢量位和边值观点.....	258	11.0 引言.....	349
二维场的矢量位.....	258	电路中的功率流.....	350
球坐标系中轴对称场的矢量位.....	259	11.1 积分和微分形式的守恒陈述.....	352
用“观察法”求边值解.....	260	11.2 坡印亭定理.....	352
镜像法.....	262	由完纯导体和自由空间组成的系统.....	354
二维边值问题.....	263	11.3 具有线性极化与磁化的欧姆导体.....	356
8.7 小结.....	267	电准静态系统中的另一个守恒定律.....	353
习题.....	269	与电路功率输入相关的坡印亭功率	
第 9 章 磁化	275	密度.....	360
9.0 引言.....	275	坡印亭通量和电磁辐射.....	360
9.1 磁化强度.....	276	11.4 能量储存.....	360
9.2 涉及磁化时的定律和连续性条件.....	277	能量密度.....	361
包含磁化的法拉第定律.....	277	用端钮变量表示的能量储存.....	362
磁通密度.....	278	11.5 电磁损耗.....	365
考虑磁化时的端电压.....	278	时间周期性系统的能量守恒.....	367
9.3 永久磁化.....	279	感应加热.....	367
9.4 磁化构成定律.....	283	电介质加热.....	369
9.5 存在磁线性绝缘材料时的场.....	288	磁滞损耗.....	371
存在线性磁化材料时的自感.....	288	11.6 作用于宏观媒质上的电力.....	371
感应磁荷: 去磁化.....	292	11.7 宏观的磁力.....	378
9.6 分块均匀磁线性材料中的场.....	292	互易条件.....	379
9.7 磁路.....	297	求余能量.....	380
电气端部关系及其特性.....	300	力的计算.....	380
9.8 小结.....	303	电起因的力矩.....	382
参考文献.....	304	11.8 作用于微观的电偶极子和磁偶极子	
习题.....	304	的力.....	385
第 10 章 磁准静态弛豫和扩散	313	作用于电偶极子的力.....	385
10.0 引言.....	313	根据能量原理导出的作用于电荷	
10.1 完纯导体系统中的磁准静态的电场.....	315	的力.....	386
10.2 有限电导率导体系统中感应场的特性.....	319	作用于磁荷和磁偶极子的力.....	388
10.3 轴向磁场通过薄板导体的扩散.....	323	作用于电子的库仑力与其磁偶极	
10.4 横向磁场通过薄板导体的扩散.....	327	子所受力的比较.....	389
对外施场中阶跃的响应.....	329	11.9 宏观力密度.....	391

洛伦兹力密度.....	391	在驻波节点的边界.....	441
开尔文极化力密度.....	392	12.8 小结.....	443
开尔文磁化力密度.....	394	参考文献.....	444
可选择的力密度.....	394	习题.....	445
11.10 小结.....	397	第 13 章 电动力学场: 边值观点	449
参考文献.....	400	13.0 引言.....	449
习题.....	400	13.1 TEM 波简介.....	450
第 12 章 电动力学场: 重叠积分观点	408	MQS 极限.....	453
12.0 引言.....	408	MQS 近似.....	453
12.1 电动力学场和位.....	409	EQS 极限.....	454
叠加原理.....	411	EQS 近似.....	455
连续性条件.....	411	13.2 平行板间的二维模式.....	456
12.2 奇异源的电动力学场.....	413	13.3 平行板间的 TE 和 TM 驻波.....	460
点电荷的位.....	413	13.4 矩形波导模式.....	466
电偶极子场.....	415	13.5 介质波导: 光纤.....	471
正弦稳态下的电偶极子.....	418	13.6 小结.....	475
远区场和均匀极化的平面波.....	420	习题.....	476
磁偶极子场.....	420	第 14 章 一维波动力学	481
12.3 电动力学场的重叠积分.....	421	14.0 引言.....	481
瞬变响应.....	42	14.1 分布参数等效电路和分布参数模型.....	481
正弦稳态响应.....	422	平面波.....	483
12.4 正弦稳态下的天线辐射场.....	423	理想传输线.....	483
分布电流的分布.....	424	准一维的模型.....	484
天线阵.....	425	14.2 横电磁波.....	484
边射天线阵中的偶极子.....	426	空心管中不存在 TEM 场.....	487
端射天线阵中的偶极子.....	426	功率流与能量储存.....	487
端射天线阵中的有限偶极子.....	426	14.3 无限长传输线上的瞬变过程.....	489
增益.....	427	对初始条件的响应.....	491
12.5 复坡印亭定理和辐射电阻.....	428	14.4 有界传输线上的瞬变.....	494
复坡印亭定理.....	428	匹配.....	496
辐射电阻.....	429	14.5 正弦稳态下的传输线.....	501
12.6 周期性的面源场: 均匀和非均匀的平		传输线阻抗.....	502
面波.....	431	14.6 传输线的反射系数表示法.....	506
横磁(TM)场.....	431	史密斯图.....	507
亥姆霍兹方程的乘积解.....	432	驻波比.....	508
横电(TE)场.....	435	反射系数平面内的导纳.....	510
12.7 存在完纯导体时的电动力学场.....	438	14.7 有耗时的分布参数等效电路和模型.....	511
镜像法.....	438	14.8 在欧姆导体($R=0$)内的均匀 TEM 波.....	514
地平面上方的四分之一波长的天线.....	439	位移电流远大于传导电流.....	516
地平面上方的两个单元构成的天线阵.....	440	传导电流远大于位移电流.....	517
带有反射器的地平面.....	441	14.9 准一维模型($G=0$).....	519

电荷扩散的传输线.....	522	15.4 能量,功率与力.....	543
集肤深度比所有关心的尺寸小的情况.....	523	能量与准静态学.....	543
14.10 小结.....	524	习题.....	545
习题.....	527	附录 1 矢量运算	547
第 15 章 电磁场综述	532	矢量.....	547
15.0 引言.....	532	矢量加法.....	547
15.1 源和材料的结构.....	533	标量积的定义.....	549
增量偶极子.....	533	矢量积的定义.....	549
平面周期性的结构.....	534	标量三重积.....	550
圆柱形的和球形的.....	534	双重叉积.....	551
平行平板之间的场.....	535	附录 2 线积分与面积分以及旋度为	
轴对称的(同轴的)场.....	535	矢量的证明.....	552
有纵向边界条件的 TM 和 TE 场.....	536	线积分.....	552
圆柱形的导体对和导体平面.....	536	面积分.....	553
15.2 宏观媒质.....	536	旋度运算结果为矢量的证明.....	554
宏观媒质的源表示法.....	536	表 I 笛卡儿坐标系、圆柱坐标系和	
材料的理想化.....	537	球坐标系中的微分算子.....	557
完纯性的相对性.....	537	表 II 积分定理	557
15.3 特性时间,物理过程与近似法.....	538	表 III 矢量恒等式	558
近似定律的自洽性.....	538	表 IV 基本常数	558
相似性与麦克斯韦方程组.....	539		
特性时间与特性长度.....	540		

第1章 自由空间中的麦克斯韦积分定律

1.0 引言

实践的、智力的和文化的的原因促进电学和磁学的研究。用来执行某些工程任务的电系统的工作取决于,至少部分地取决于电的,机电的或电化学的现象。这些应用的电的状况是用麦克斯韦方程组描述的。作为在三维空间里描述电磁场的时间演变,这些相同的方程构成了较在任何其他学科所能找到的更为广泛的现象的简明总结。麦克斯韦方程组是智力的成就,每一个学习物理现象的学生都应熟悉。作为包括连续媒质力学、量子力学、热传导和质量传递,以及许多其他学科的场论的一部分,我们的主题阐述数学的语言和方法,它们是这些其他领域的基础。

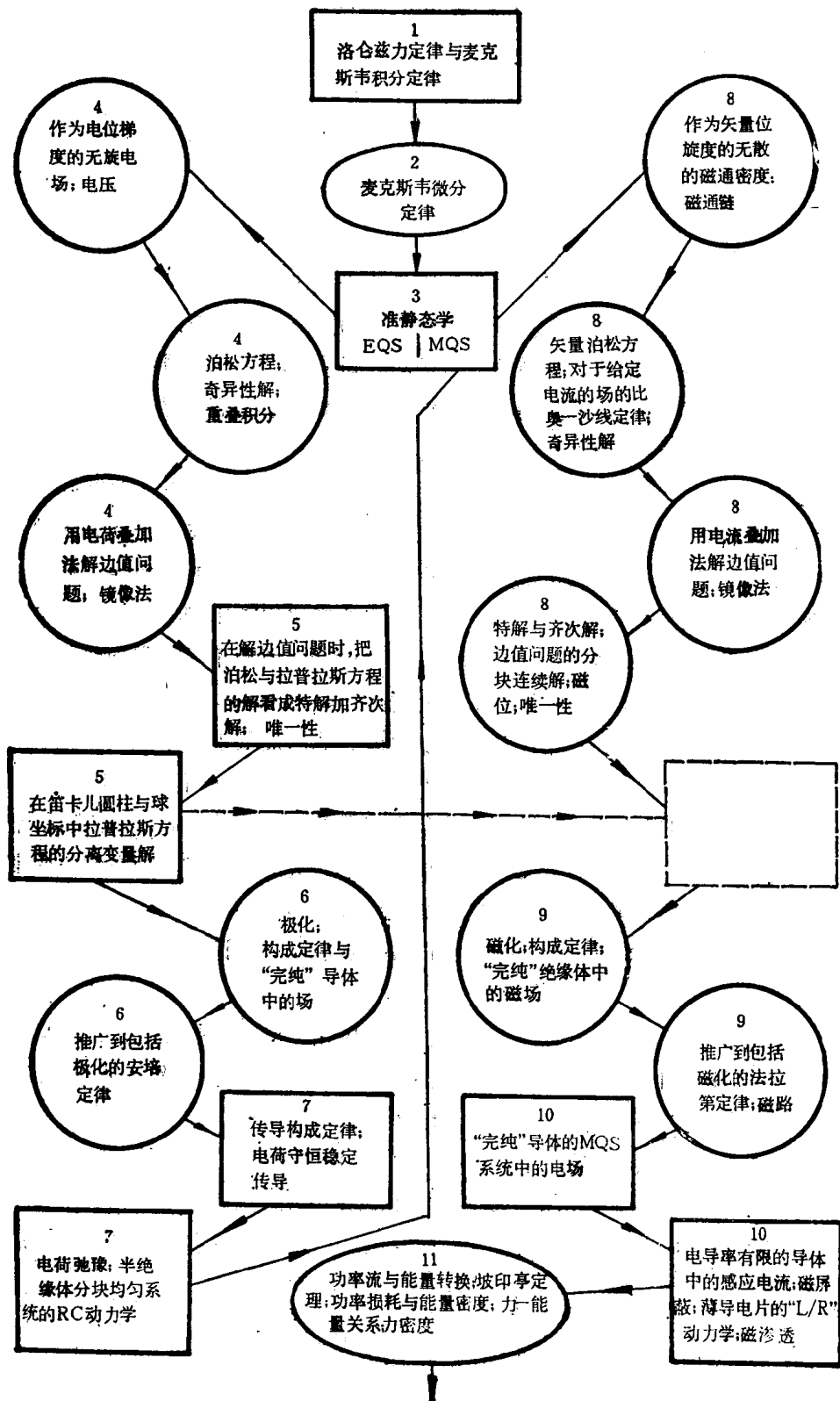
对于那些对机电能量转换,工频或无线电频率下的传输系统,微波或光频的波导,天线或等离子体有兴趣的人来说,不需要去论证成为处理电磁场问题的专家的必要性。另有一些人可能需要鼓励。例如,电路设计者也许满足于电路理论,它的定律用电压和电流,以及电路元件对电压和电流的约束关系来阐明。然而,这些定律在高频时失效,因而不用电磁场理论就不能理解这点。当频率增加到这样高,使电磁场的传播时间变得可与一个周期相比时,电路模型的局限性开始起作用,结果是“电感器”表现为“电容器”或反之。其他的局限性与损耗现象有关。随着频率的增加,电阻器与晶体管被“电容”效应所限制,而变流器与变压器被“涡”流所限制。

任何一个与提出物理系统的电路模型有关的人都需要有场论的基础,以证明近似是正确的,并得出电路参数的值。因此,与心电图学或神经生理学有关的生物工程师在建立物理现实与模型之间有意义的联系,并把这些模型用电路元件表示时,必须借助于场论。类似地,即使控制理论家利用集总参数模型,它的正确性也依赖于连续媒质理论,不论性质上是电磁的,机械的或热的。

计算机硬件似乎是不依赖于电磁场理论的另一个应用。我们往往通过软件接口才注意到计算机,使得我们认为计算机似乎与我们的主题无关。虽然硬件通常用电路来实现,但用来完成逻辑运算的计算机的实际实现是被电磁定律所限制的。例如,起源于计算机中某一处的信号不可能在小于一个以光速传播的信号通过连接导线所需要的时间内到达另一处。随着计算速度的增加,电路模型仍保持有用对固体技术是个贡献,从而使基本电路元件的尺寸减小成为可能。由电磁场施加的基本限制终究会确定计算机技术的计算速度极限,不论它是由电磁波延迟或是由电功率损耗所引起的。

内容概述

如图 1.0.1 中的图解说明所示,我们从积分形式的麦克斯韦方程组开始。本章从用力和源所表示的场的定义开始,继之以各个积分定律的回顾。与论述紧密结合的是一些例题,这些例题



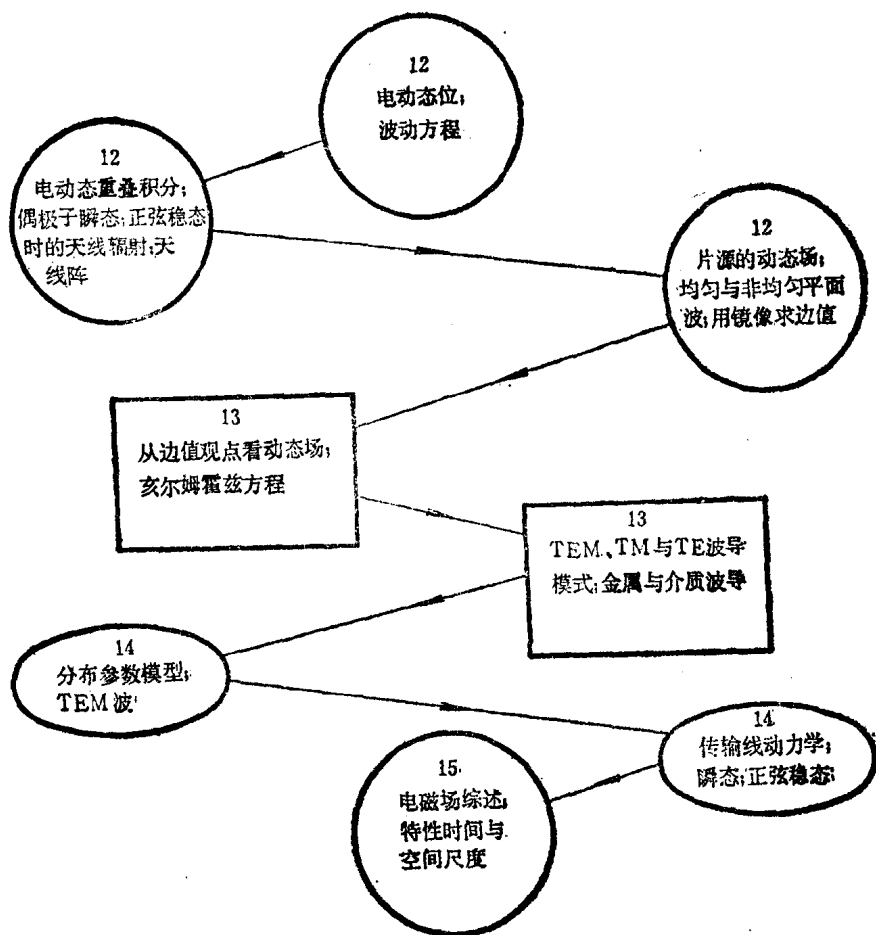


图1.0.1 内容略图。所示三栏分别是关于准静态电学, 准静态磁学与电动力学, 表明论述是相对应的。

用来阐明在陈述积分定律时要用的面积分和体积分方法。例题也企图使每一个定律至少与一种物理情况相联系。在以后几章中我们的目的是使这些定律有用, 不仅是在模拟工程系统, 而且也在以定性的方式处理实际系统时(如同发明者经常做的那样)。在以下三种情况下: (a) 以这种定性的方式处理场时, (b) 为对称的简单图形求场时, (c) 把场与它们的源相联系时, 积分定律是直接可用的。

第2章从积分定律导出微分的描述。然后通过与每一节相联系的例题和一些家庭作业, 阐述了数学定理和算子的最低限度的基础知识。微分算子以及相关的积分定理在需要时引入。因此, 散度和旋度算子, 与高斯定理和斯托克斯定理一起在第2章中提出, 而梯度算子和积分定理自然是在第4章中导出。

在深入理解由麦克斯韦方程组所预见的现象时, 静态场往往是第一个题目。场是不可测量的, 更不用说实际关心了, 除非它们是动态的。象这里所论述的, 场决不是真正静态的。在第3章开始的准静态学的主题, 对于我们理解麦克斯韦方程组的含意所用的方法是重要的。当我们学会忽略无关紧要的混杂时, 才能达到对这些方程的完全理解。如果时间变化率足够慢(频

率足够低),以致由于电磁波的传播引起的延迟成为不重要时,电准静态的(EQS)和磁准静态的(MQS)近似法证明是正确的。第3章所考察的一些例子,可使人们大概地知道,对于一种给定的情况,这两类近似法中的哪一类是合适的。当在第11至15章中把EQS和MQS移到一起加以论述时,对准静态近似法的全面评价将提到面前。

虽然电容器和电感器分别是电准静态和磁准静态范畴的例子,但准静态系统通常能用与频率无关的电路元件来模拟的说法是不正确的。晶体管的高频模型正确地以EQS近似为基础。晶体管中的电磁波延迟是不重要的。但是,动态效应是重要的,而EQS近似能包括电荷移动的有限时间。涡流屏蔽或加热器的模型正确地以MQS近似为基础。电磁波的延迟时间仍然是不重要的,而最重要的磁场的渗透时间用MQS定律描述。作用于电子束的空间电荷波或饱和磁化材料中的自旋波,即使所考虑的频率在吉赫范围内,也往往分别用EQS和MQS定律描述。

EQS系统(第4—7章)和MQS系统(第8—10章)的对应的论述通过图1.0.1的第一页可明显地看出。对于左边EQS栏中的每一个题目,在MQS栏中相同的位置处有一个类似的题目。虽然场的概念以及在处理EQS和MQS系统中所用的数学方法常常是相似的,但是比较研究展现出与直接类比同样多的差异。在电的与磁的研究之间,有双向的相互作用。不仅论述EQS系统得到的结果可应用于描述MQS系统,而且对MQS情况的检验导致对EQS定律的更多了解。

在图1.0.1的第一页,EQS和MQS两栏的顶端,给出了电场和磁场的一般(对比的)特性。然后论述从场源是规定的情况转到场源是待定的情况。因此,从给定的电荷分布首先求得EQS电场,而MQS磁场是由给定的电流确定的。EQS场解答的推导过程为以后的MQS的推导直接作了准备。在许多实际情况中,认为这些源是在材料中感生出的,因而必须作为场的解答的一部分求出。这些情况中的第一个是,感生的源是在具有足够高电导率的导体边界上,这种导体可以用“完纯”导体作为模型。对于EQS系统,这些源是表面电荷;而对于MQS系统,它们是表面电流。在任何一种情况下,场必须满足边界条件,并且EQS的研究不仅提供数学方法,而且甚至提供可直接应用于MQS问题中的偏微分方程。

极化与磁化说明能被确定的场源(驻极体与永久磁铁)或由场本身所感生的场源的原因。在此处所用的朱氏表示法中,极化与磁化的阐述方式之间有完全的类比。因而,从第6章到第9章有概念的直接转移。

平行的准静态的研究以在第7和10章中对损耗现象的检验而告终结。此处我们知道对一方面是EQS,而另一方面是MQS所提出的“导体什么时候是完纯的?”问题,必须给出很不同的答案。

在第11章中,以前提出的许多概念通过研究功率流,能量储存和电磁力的产生而得到应用。由此章开始,不再近似地应用麦克斯韦方程组。从而注意到在EQS和MQS近似所表示的系统中,分别是电能量储存或是磁能量储存占支配地位。

在第12至14章中,焦点集中于电磁波。其发展过程是EQS和MQS两栏中包含的方法的自然扩展。它用图1.0.1第二页上的略图来突出地表示。第12和13章的题目对应于前页EQS和MQS两栏的题目。用来表示电动力学场的电位是EQS和MQS系统中所用电位的自然推