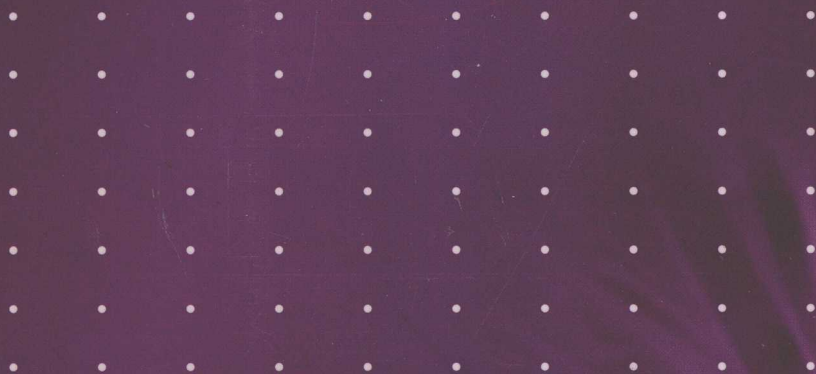


教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

电磁场教程

■ 叶齐政 陈德智 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导委员会推荐教材

电磁场教程

Diancichang Jiaocheng

■ 叶齐政 陈德智 主编

图在版编目(CIP)数据

电磁场教程 / 叶齐政、陈德智主编. — 北京: 高等教育出版社, 2012.2

ISBN 978-7-04-033843-0

I. ①电… II. ①叶… ②陈… III. ①电磁场—高等学校—教材 IV. ①0441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第283063号

责任编辑 陈美华 封面设计 张静华 版式设计 张静华 责任印制 张静华 印刷 北京印刷厂 发行 北京印刷厂 经销 北京印刷厂

10-0508

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

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

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

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

2012年3月第1版

2012年3月第1次印刷

34.50元



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制订的“电磁场”课程教学基本要求编写,是教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材。

本书主要讲解了电磁场的基本规律和基本方法。在保持一定系统性的前提下,章节安排和内容论述更多地体现了教科书的特点。为了培养学生实际电磁分析能力,全书注重电磁场模型与方法,将工程应用融入理论讲解中。全书共有9章,分别是绪论、矢量分析与场论基础、静电场、恒定电场、恒定磁场、静态场的边值问题、时变电磁场基本方程、低频电磁场——准静态场、高频电磁场——电磁波。每章后均附有习题,书后有部分习题答案。

本书可作为高等学校电气信息类专业电磁场课程的教材或教学参考书,强电专业和弱电专业都适用,教学内容全部讲授约需52学时(不含实验),若做适当删减,也可满足48学时的要求。本书还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场教程 / 叶齐政, 陈德智主编. — 北京: 高等教育出版社, 2012. 2

ISBN 978-7-04-033843-0

I. ①电… II. ①叶… ②陈… III. ①电磁场—高等学校—教材 IV. ①0441. 4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第283067号

策划编辑 杨 希
插图绘制 尹 莉

责任编辑 杨 希
责任校对 胡美萍

封面设计 赵 阳
责任印制 张泽业

版式设计 余 杨

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 三河市华润印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 23.5
字 数 530千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012年2月第1版
印 次 2012年2月第1次印刷
定 价 34.20元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 33843-00

序

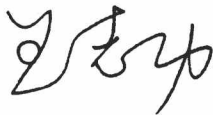
自1999年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型和种类较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。
2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过2~3年的试用,形成适用于本层次教学的教材。
3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。
4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010年12月

前 言

电磁场或工程电磁场课程是电类本科专业的一门重要基础课,其基本的教学内容是电磁场理论,由于理论性较强,学生学习和教师教学都有一些困难,编写一本合适的教材始终是教师最大的心愿。所谓合适,最重要的一点就是适合教学实际,既满足学生的要求,也符合大纲和教师的要求,同时也体现时代的变迁(包括电磁新技术本身和新教学手段)。

叶齐政、孙敏于2007年主编的《电磁场》已经在华中科技大学等院校使用了4年。本书是在该书的基础上,结合近年的教学实践,重新编写而成。

新的教材对原书的教学体系没有做调整,也仍然保持注重模型与方法的特点,但更多地体现了教科书的特点,而不是体现理论书籍的特点,同时补充了波导方面的一些内容。

本书的教学内容全部讲授约需52学时(不算实验4学时),若做适当删减,也可满足48学时的要求。特别指出的是第一章的教学可以以自学为主,放在静态场、时变场讲完后断续进行,不占用课时,希望学生在反复思考中有所总结和体会,以期在新的高度上认识和掌握电磁场理论。第二章的数学内容,既可以一开始讲授,如果课时紧张,也可以穿插在其他章节中进行,不影响教学体系的完整,实际上我们也有老师这样尝试多年,也比较符合学生的学习心理。另外,本书不仅针对“强电”专业,对“弱电”专业也同样适用。

本书由叶齐政、陈德智主编。第一、七、八、九章由叶齐政编写,第二、五章由颜秋容编写,第二章2.7节、2.8节及第三、四、六章由陈德智编写。夏胜国和江中和参与了一些章节的讨论和部分编写工作。

一个学校“电磁场”课程的教学特点和风格是长期积累的结果,编写教材,虽然文责自负,但本教材也反映了长期以来本校教师对课程建设所付出的劳动和心血。教学相长,在多年来的教学实践中,一批批认真的学生使我们不断反思教学的次序、提法和讲法。他们的“反应”,是我们不断改进的起点和动力。在编写过程中,华中科技大学电气与电子工程学院孙敏和孙亲锡两位教师给予了很多关心和支持。夏胜芬老师以及简翔、许鸣皓、唐文明、熊雪君、别佩、刘佳等同学对第三章提出许多修改意见,第四、六章承蒙盛剑霓教授、周克定教授、詹琼华教授、马志云教授等批评指正。全书承蒙北京航空航天大学雷银照教授仔细审阅,提出了许多很好的修改意见和建议。在此谨向他们致以深深的谢意。

因学识和经验有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者指正,编者邮箱为 yqziq@mail.hust.edu.cn。

编 者

2011年9月

目 录

第一章 绪论	1	2.8.1 狄拉克函数的定义	36
1.1 引言	1	2.8.2 狄拉克函数的应用	37
1.2 电磁场理论的模型、方法和 体系	2	2.8.3 亥姆霍兹定理的证明	39
1.2.1 基本模型	2	习题	41
1.2.2 静态场的理论体系	4	第三章 静电场	43
1.2.3 时变电磁场的理论体系	10	3.1 自由空间中的静电场基本 方程	43
1.2.4 理论的学习	13	3.1.1 库仑定律与叠加原理	43
第二章 矢量分析与场论基础	15	3.1.2 电荷的分布形式	45
2.1 标量场和矢量场	15	3.1.3 电场强度	47
2.2 三种正交坐标系	16	3.1.4 自由空间中的静电场基本 方程	50
2.2.1 直角坐标系	16	3.2 电位及其方程	54
2.2.2 圆柱坐标系	17	3.2.1 电位的引入	54
2.2.3 球坐标系	18	3.2.2 电位的方程	57
2.2.4 位置矢量和距离矢量	20	3.2.3 电场的图形显示	60
2.3 矢量的代数运算	21	3.3 物质中的静电场	63
2.4 标量场的梯度	22	3.3.1 “自由空间”的物理图像	63
2.4.1 标量场的等值面	22	3.3.2 导体与静电场	64
2.4.2 标量场的梯度	22	3.3.3 电介质与静电场	65
2.5 矢量场的散度	25	3.3.4 物质中的静电场基本方程	67
2.5.1 矢量场的场图	25	3.3.5 媒质分界面条件	70
2.5.2 矢量场的通量与散度	26	3.3.6 基本方程中电荷形式的 再讨论	77
2.5.3 散度定理	28	3.4 静电场边值问题	78
2.5.4 拉普拉斯算子	29	3.4.1 边值问题	78
2.6 矢量场的旋度	31	3.4.2 解的唯一性定理	83
2.6.1 矢量场的环量与旋度	31	3.4.3 镜像法	86
2.6.2 斯托克斯定理	34	3.5 电容	101
2.7 亥姆霍兹定理	35		
2.8 狄拉克函数	36		

3.5.1 两导体之间的电容	102	5.1.4 安培环路定理的一般形式	149
3.5.2 多导体之间的部分电容	103	5.1.5 媒质分界面上的边界条件	152
3.6 电场能量与电场力	107	5.2 矢量磁位	154
3.6.1 电场能量	107	5.2.1 矢量磁位的引入	154
3.6.2 能量密度	108	5.2.2 矢量磁位的边值问题	160
3.6.3 电场力	109	5.3 标量磁位	165
3.6.4 虚位移法	110	5.4 镜像法	168
习题	113	5.5 电感	171
第四章 恒定电场	120	5.5.1 自感和互感	171
4.1 恒定电场的电流和电源	120	5.5.2 内自感和外自感的计算	172
4.1.1 电流及电流密度	120	5.5.3 互感的计算	175
4.1.2 电流密度与电场强度的关系 (欧姆定律的微分形式)	122	5.6 磁场能量和磁场力	176
4.1.3 传导电流的热效应 (焦耳定律的微分形式)	123	5.6.1 磁场能量	176
4.1.4 电源与电动势	123	5.6.2 磁场力	179
4.2 恒定电场的基本方程	125	习题	182
4.2.1 电流连续性方程	125	第六章 静态场的边值问题	188
4.2.2 恒定电场的基本方程	126	6.1 静态电磁场的数学模型	188
4.2.3 媒质分界面上的连续性条件	127	6.1.1 边值问题	188
4.3 导电媒质中的恒定电场与 静电场的比拟	130	6.1.2 静电场与恒定电场的场域 边界条件	190
4.4 电导与电阻	131	6.1.3 恒定磁场的场域边界条件	194
4.4.1 电导与漏电导	131	6.2 求解边值问题的方法概述	198
4.4.2 部分电导	134	6.3 分离变量法	200
4.4.3 接地电阻	135	6.3.1 直角坐标系中的分离 变量法	200
4.4.4 跨步电压	137	6.3.2 圆柱坐标系中的分离 变量法	205
习题	138	6.4 有限差分法	211
第五章 恒定磁场	141	习题	217
5.1 恒定磁场的基本方程	141	第七章 时变电磁场基本方程	220
5.1.1 磁感应强度和毕奥-沙伐 定律	141	7.1 麦克斯韦方程组	220
5.1.2 磁通连续性原理和安培 环路定理	144	7.1.1 电磁感应定律和全电流 定律	220
5.1.3 媒质的磁化	146	7.1.2 时变电磁场方程组	227
		7.1.3 时谐场中的复数表示	231

7.2 分界面上的边界条件	234	8.5 三相输电线的似静场	280
7.2.1 边界条件的一般形式	234	8.5.1 三相输电线的等效电荷	280
7.2.2 理想导体的边界条件	235	8.5.2 三相输电线的电场	281
7.3 无源空间的电磁场方程	236	8.5.3 三相输电线的磁场	284
7.3.1 波动方程组	236	习题	284
7.3.2 波动方程组的复数表示	237	第九章 高频电磁场——电磁波	286
7.4 位函数表示的电磁场方程	238	9.1 波与媒质电磁特性	286
7.4.1 动态位	238	9.1.1 波与频率	286
7.4.2 动态位方程组(达朗贝尔方程)及 推迟项的意义	241	9.1.2 媒质电磁特性	287
7.4.3 动态位方程组的复数表示	244	9.2 电磁波的定向传播	291
7.5 电磁场能量守恒定律 (坡印亭定律)	245	9.2.1 定向传播的波动方程	291
7.5.1 坡印亭定律	246	9.2.2 波形	297
7.5.2 坡印亭定律的复数形式	249	9.2.3 波速	301
7.6 定解条件与唯一性定理	251	9.2.4 传播特性	304
习题	252	9.3 无界空间中的均匀平面 电磁波	309
第八章 低频电磁场——准静态场	255	9.3.1 均匀平面电磁波	309
8.1 准静态场方程	255	9.3.2 均匀平面电磁波的正入射	314
8.1.1 电准静态场方程	256	9.3.3 等离子体中的均匀平面 电磁波	316
8.1.2 磁准静态场方程	257	9.4 波导与传输线	318
8.1.3 准静态场的数学含义	259	9.4.1 矩形波导	319
8.2 低频电磁场的近似	261	9.4.2 平板波导	324
8.2.1 准静态近似	261	9.4.3 同轴传输线	329
8.2.2 高阶近似	266	9.4.4 传输线理论基础	329
8.3 集总参数电路近似	269	9.5 辐射	335
8.3.1 器件近似——元件的端口 特性	270	9.5.1 电偶极子产生的时变电 磁场	336
8.3.2 基本规律近似——基尔霍夫 定律	270	9.5.2 磁偶极子产生的时变电 磁场	338
8.3.3 忆阻器——第四个电路 器件	273	9.5.3 近场和远场	339
8.4 集肤效应和交流阻抗	274	9.5.4 LC 电路与偶极振子	343
8.4.1 集肤效应	275	9.6 电磁辐射干扰与电磁屏蔽	344
8.4.2 交流阻抗	278	9.6.1 电磁干扰	344
		9.6.2 辐射耦合	344

9.6.3 电磁屏蔽	345
习题	348
附录	349
附录 A 主要矢量运算式及微分算子	

运算式	349
附录 B 电磁学的量和单位	351
部分习题答案	353
参考文献	361

第一章

绪 论

1.1 引言

电气科学与工程领域的核心问题是电磁场与物质的相互作用,无论是电能传输、转换还是其他各种电磁现象都离不开电磁场理论对它们的分析计算,作为电气科学与工程的两大基础理论(电磁场理论与电路理论)之一的电磁场理论也一直是电类专业的重要技术基础课。实际上电路理论也是研究电磁系统的理论,不过是用积分量描述特定模型(例如准静态)的理论,而且“场”是“路”的基础,因此掌握好电磁场理论对我们深入理解和探索各种电磁现象、正确分析和认识各种电磁过程具有重要意义。

电磁场理论的应用有两个方面,一方面由于它本身已经发展到非常成熟的阶段,大部分时候是作为电气工程定量分析的基础,分析和计算工程实际中的电磁问题,如电机电磁场、高压传输线电磁场、电磁干扰等。因此将一个实际问题“转化”或“简化”为一个物理模型,进而利用数学方程经济、快速、有效地计算(解析、近似解析或数值求解)是“电磁场”这门课的重要教学内容。另一方面,随着高新技术的发展,该学科的主题也不仅仅局限于电力系统、微波、光学和等离子体等内容,也逐渐增加了生物电磁学、半导体装置设计、微制造加工、机器人、磁记忆系统、新材料等内容,同时各种超微对象、超快或超强过程、非线性现象也对电磁理论的分析 and 计算提出了新的挑战。分析和探索这些来源于工程实际和交叉学科中的新电磁现象的变化规律(抑或是新的电磁变化规律),已成为电磁场理论和应用的一个重要创新源头。因此,电磁场理论本身也有发展的要求,反映在教学上,就要求我们掌握电磁场理论是如何建立它的基本模型、基本概念和基本规律的,以使得未来我们能够在更高的层次上发展电磁场理论和应用,进而推进电气科学与工程的进步。

基于计算、分析和探索新规律的需要,“电磁场”和“大学物理”中的电磁学比较起来也就有很大不同。它的理论性更强,从数学的角度来说它以微分形式为主,需要更多的数学知识;从物理来说它以更本质、更一般的规律为基础,需要更多的抽象思维的能力;从联系实际来说,它有更多的工程问题需要学习和研究。

下面以大学物理中的电磁学为出发点,简单描述本课程将要介绍的电磁场理论体系,以期大家对整门课程的内容有一个基本的了解,在学习过程中能够更多地关注一些核心问题(如物理模型的建立、近似方法的应用等)和事物之间的有机联系(如体系的来龙去脉、近似取舍的根据等)。

1.2 电磁场理论的模型、方法和体系

1.2.1 基本模型

1. 电荷和电流

首先回顾一下两个最基本的模型,电荷和电流。通常认为,电荷是物质的一种基本属性,用以描述物体是否因带电而产生相互作用,但在这里,我们将其理解为是一个模型要更恰当一些。图 1-2-1(a)表示了不同带电实体演变成一个点电荷模型的过程——一个没有体积大小的电荷模型。显然我们只有“站”得足够远,才能将这三个电磁实体“看”成是一个点,这也说明这个模型不能无限接近,是一种纯用于理论分析的模型。在点电荷模型 q 的基础上,借助微分概念引入微元电荷 dq 后,就可用体电荷、面电荷和线电荷模型描述具有不同特点的微元电荷

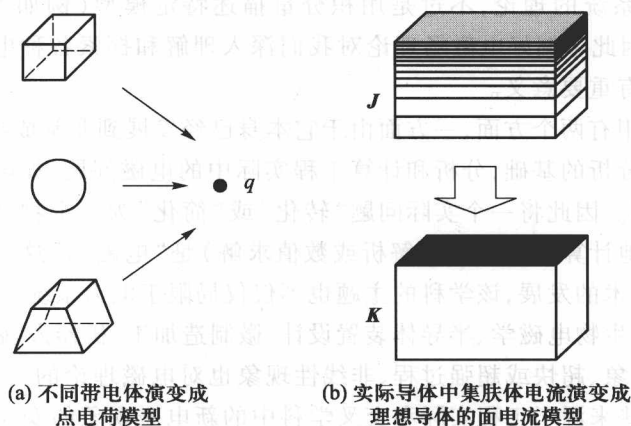


图 1-2-1 电磁实体的建模过程

$$dq = \rho dV = \sigma dS = \tau dl \quad (1-2-1)$$

其中 ρ 、 σ 和 τ 分别为电荷[体]密度、电荷面密度和电荷线密度。工程实践中的带电体就是这些体、面和线微元的积分。显然微分和积分就是我们必须采用的工具,一个令我们烦恼也会使我们着迷的工具。

同样,运动的电荷——电流也有微元电流概念 dqv ,工程实践中可以有体电流、面电流、线电流的模型,它们用来描述观察到的真实载流体

$$dqv = JdV = KdS' = Idl \quad (1-2-2)$$

其中 J 、 K 和 I 分别为电流体密度、电流面密度和电流线密度。我们在中学和大学物理中学习过线电流,而体电流基本上是一个最接近实际的电流模型,这些都好理解,但是面电流密度却是一

一个新模型,它是导体中的高频电流由于集肤效应而形成的一种简化近似,一种理想的模型,图 1-2-1(b)表示了这种演变,在理想导体(电导率为无穷大)中只存在面电流。

由此可以发现电磁场理论的基本工作就包括如何将一个实际带电体用一个合适的点、线、面、体及其叠加模型来描述和计算。一个合适和漂亮的模型,不但是方便的,也会令大家乐于采用。

2. 电偶极子和磁偶极子

电磁场存在于真空和实物中,它与物质的相互作用可以通过两个理想模型——电偶极子和磁偶极子来体现。两个同量异号电荷组成的一个系统,如果只关心离它们较远处的电场,就可以用一个电偶极子模型代替这样的系统;一个环行电流组成的载流体,如果只关心离它较远处的磁场,也可以用一个磁偶极子模型代替这样的系统。组成物质的分子和原子在电磁场中的特性可以用它们来描述。

电子绕原子核运动,在外电场作用下电子云的中心将相对原子核发生偏移,它可以看做一对正负电荷形成的电偶极子,图 1-2-2(a)显示了这种“电子极化”类型的模型化过程。电子绕原子核运动,也可以看做一个电流环(原子核相对电子来说不动),本身就可以看做一个磁偶极子,在外磁场作用下磁偶极子会发生偏转,图 1-2-2(b)显示了这种“电子轨道磁化”类型的模型化过程。显然,同一个原子,竟然形成了不同的模型,也就是不同的认识,这似乎是“盲人摸象”,不同的“角度”看到事物不同的一面。其实,人类哪一次科学新认识又不是“盲人摸象”呢?我们总在探寻未知的一面。进一步,如果我们知道电场和磁场本身是有关系的,将一个原子有时候看做电偶极子,有时候又看做磁偶极子也就不难理解了。一般来说一种物质的极化和磁化(也包括传导)特性是同时存在的。

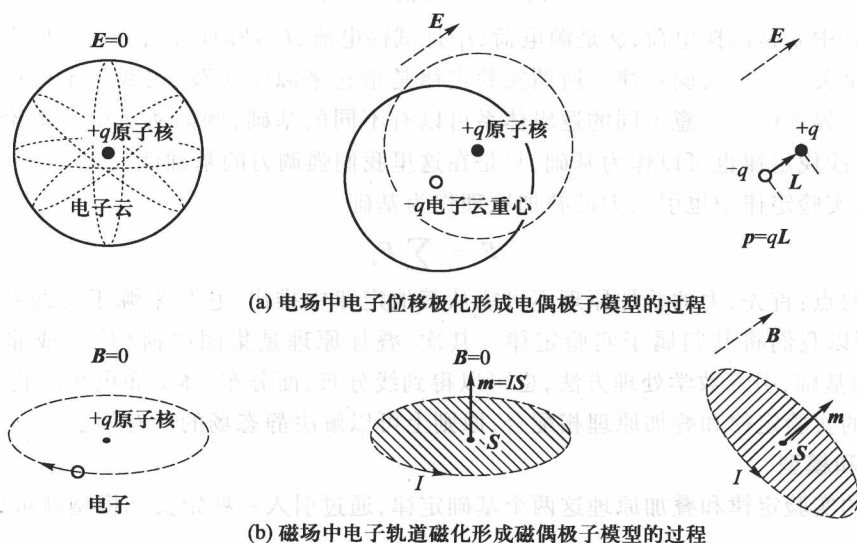


图 1-2-2 场中原子经典模型演变过程

对电场中的介质来说,很多个电偶极子在外电场作用下的统计表现就反映了介质宏观的介电特性;对磁场中的媒质(介质)来说,很多个磁偶极子在外磁场中的统计表现就反映了媒质宏观的磁化特性。但是,如果我们深入到材料内部分子附近,上述模型就有很大问题,分子是否还能用一个偶极子代表?其余偶极子是否有干扰作用?这种相互之间强耦合的系统也是目前的一个研究热点。更进一步,原子模型还是应该采用量子力学的方法来建立。

总之,从电荷、电流、电偶极子、磁偶极子这些基本模型的建立过程中,可以看到一种抓住物理本质,大胆近似的思想和方法。由此出发,可以认识电磁场与物质相互作用的基本概念(电场强度、电位移矢量,磁感应强度、磁场强度),进一步认识描述电磁现象的基本规律,同时也可以认识描述电磁装置的基本参数。

1.2.2 静态场的理论体系

学习总是从最简单的情况开始,我们先来看静态场。它包括静电场、恒定电(流)场和恒定磁场。电荷建立的静电场、电流建立的恒定磁场的理论体系,如图1-2-3和图1-2-4所示。它由实验定律、定义模型和数学理论组成^①,下面分述其意义。

1. 实验基础

由于受力是人们最初感受和观察的对象,因此,将理论体系建立在库仑定律

$$F = q \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (1-2-3)$$

和安培力定律

$$F = \oint_{l_1} I_1 dl_1 \times \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_2} \frac{I_2 dl_2 \times e_r}{r^2} \quad (1-2-4)$$

的基础上。其中 q 是试探电荷, Q 是源电荷, I_1 是试探电流, I_2 是源电流,并认为库仑定律和安培力定律是两个关于力的实验定律。所谓实验定律是指它来源于实践,实践决定理论体系也是符合唯物主义世界观的。注意不同的逻辑体系可以有不同的基础,例如从历史上理论建立的顺序来看,毕奥-沙伐定律也可以作为基础,只是在这里我们强调力的基础性。

另外,在实验定律中也引入力的叠加原理作为基础。

$$F = \sum F_i \quad (1-2-5)$$

理由有两点:首先,力的叠加原理不可能从其他定律中推出,它是来源于实践并被证明是正确的原理,所以我们将其归属于实验定律。其次,叠加原理是集团电荷(连续或非连续分布电荷)作用力的基础,引入数学处理方法,也可以得到线分布、面分布、体分布电荷的物理模型。

关于力的实验定律和叠加原理相配合,原则上可以解决静态场的所有问题。

2. 定义和模型

有了力的实验定律和叠加原理这两个基础定律,通过引入一些定义和模型就可以建立理论

^① 在本书中,将来源于实验、第一性、公理性质的电磁场规律称为定律,而将由定律推导出的规律称为定理。

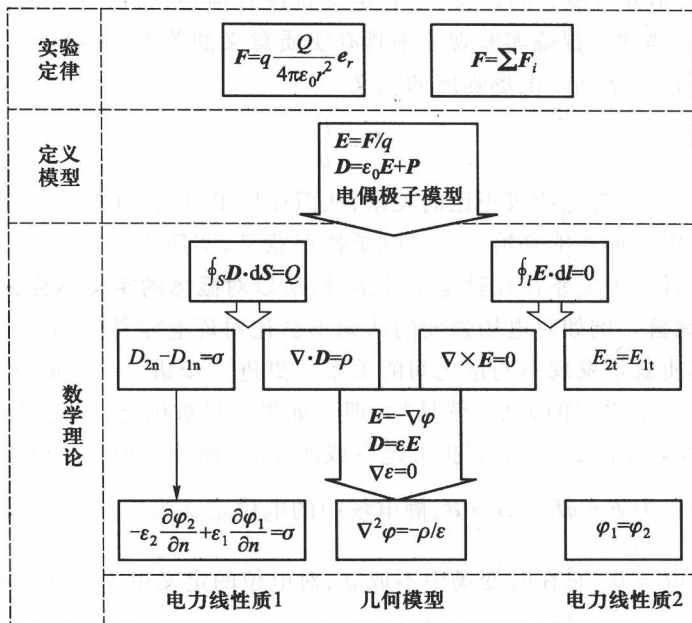


图 1-2-3 静电场理论逻辑关系图

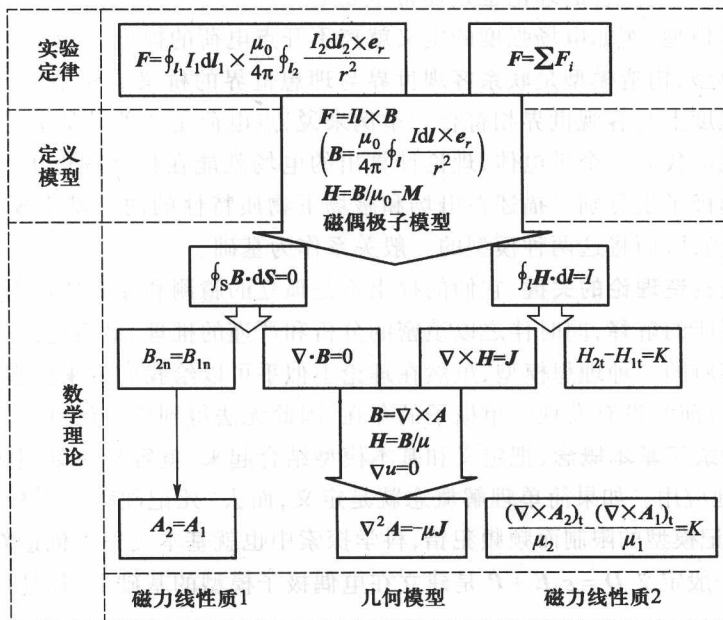


图 1-2-4 恒定磁场理论逻辑关系图

体系。任何理论都离不开对概念的定义,没有定义就没有描述,就没有定量,电磁场基本规律将只能用现象学的语言描述。提炼实验现象中具有实质意义的关系,并赋予这些关系一定的物理意义,是构造一切理论的基础。电场强度的定义

$$E = \frac{F}{q} \quad (1-2-6)$$

就是抓住了库仑定律中力与电荷成正比的关系,从而提炼出电场强度这个概念。

应该明确的是:定义形式上是给一个量赋予物理意义,实质上是对一个关系进行描述,也就是说定义是交互的,且这种关系往往就是定理本身,所以对概念的定义不会比对作为它们依据的物理定理的认识更完善。例如对电场强度的认识不会比对库仑定律的认识更完善。反过来,也就是说,发现定理实质就是发现不同量之间的关系。更进一步讲,一方面,我们已经习惯于认为物理定理(也就是量与量之间的关系)就是“真理”,如果一旦被确立,就是不能被违背的,然而物理定理和定义是相互联系的,当定义要扩大范围或改变时,物理定理必须修正。例如将电场力扩展到磁场力,则要修正为 $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$;静电场中的电位定义为 $\varphi = \int_P^{P_0} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$,实际指的是电场的“环路定理” $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$,它在时变场中不成立,对电位的定义也不成立。另一方面,虽然量与量之间的关系是客观的,但定义的选择仍然具有一定的随意性,例如时变场中要介绍的两种规范,这种随意性直接影响了后继理论和计算的繁易与本身的意义,因此选择合适的对象和本质关系进行定义,对建立一个完善的理论也是非常重要的。

定义也离不开模型,例如电场强度的定义就离不开点电荷的模型,其实任何理论对客观世界的描述都离不开模型,构造模型是联系客观世界与理想世界的桥梁。模型的好坏直接决定了构造的理论在多大程度上与客观世界相符合。举例来说,点电荷是一种最基本的模型,点电荷的模型在什么程度上能够代表一个带电体,理论计算出的电场就能在什么程度上反映实际电场。另外电偶极子和磁偶极子也分别是描述在电场和磁场下物质特性的两种基本模型,这里我们不讨论真空下的电、磁场,因而将这两种模型的一般关系作为基础。

定义和模型是构造理论的关键,它们的提出不是孤立的臆测和随心所欲的胡思乱想,它需要细致地衡量各种可能的解释,同时伴之以缜密的分析和严谨的推理,最后还需要实践的支持。电荷模型也是描述媒质的一种理想模型,虽然在理论上似乎可以给我们带来更多想要的东西,例如对称性等,但由于目前并没有发现磁单极子的存在,因此无法得到广泛认可。

定义和模型构筑了基本概念,把定义和基本模型结合起来,就容易深刻理解基本概念后面的东西,而不会错误地应用。如果简单理解概念就是定义,而去“死记硬背”,大概考试后就会忘记,工程实践中也会忘记模型的限制而频频犯错,科学探索中也就基本丧失了创造新概念的能力。例如,电位移矢量的一般定义 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ 是建立在电偶极子模型的基础上,凡是可用电偶极子模型描述的物质,该定义都成立,且因为极化强度是电偶极矩的宏观统计量 $\mathbf{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \sum \mathbf{p}_i / \Delta V$,所以电位移矢量是宏观量,在微观上是没有意义的(讨论一个原子周围的电位移矢量是错误的),而电

场强度没有这个限制,因此电场强度在微观上是有意义的(原子周围有电场强度的概念)。当然不是说宏观量就不是“点”位置的函数,而是这个点是宏观无限小(微观上包含有很多偶极子或原子)。同样的道理也适用于磁场强度和磁感应强度。再看一个例子,如果采用 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ 的定义,除了上面的限制以外,还是建立在线性、各向同性的理想模型基础上,它的适用范围更小,由此导致泊松方程 $\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon$ 适用的范围也缩小,工程实际中多是近似采用,这一点在磁场中表现得更突出,因为大部分的工程材料不满足 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$,所以泊松方程 $\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}$ 适用范围更小。但也许正是因为用多了(包括例题、作业题以及一些工程计算),有时就忽视了这种“天生”的缺陷,而科学研究中不能信奉“走的人多了就成了路”。需要指出的是高斯定理和环路定理并不要求线性、各向同性,也就是说它们比要求此条件的泊松方程处理问题的范围要广一些。

3. 反比平方关系和线性的原则

首先,库仑定律和安培力定律都满足反比平方关系(与万有引力定律类似),这是整个理论体系的关键,也是后续数学理论的一个基础,任何对反比平方关系的偏离都会颠覆整个理论体系。

其次 $F \propto Q$, $F \propto \oint_{l_1} I_1 dl_1$ 。正比即是线性的关系,这种关系既是实际的一种反映,也符合构造理论的唯美追求——简洁;叠加原理则是线性原则在空间的体现,这两者保持了内在一致性。

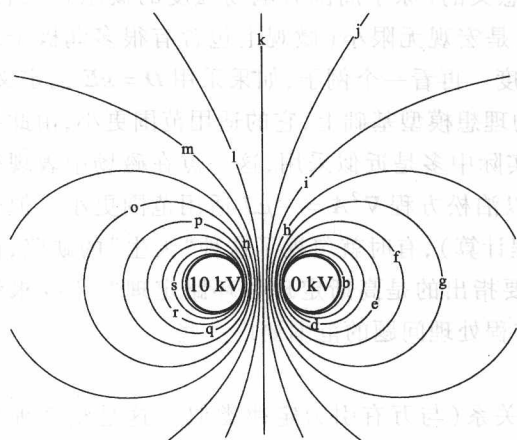
物质的特性也涉及线性的原则,即 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$,这是一种在电偶极子和磁偶极子模型的基础上更进一步理想化的处理方法或者说是近似处理方法, $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$ 也是一种线性化的处理方法。虽然它们适用的物质非常有限,也是造成工程实际中非线性的一个主要因素,但它们有助于建立简单明了的理论体系。

还有准静态近似其实是一阶近似的结果,也是一种线性化的处理方法,当然它必须结合物理条件来做取舍。

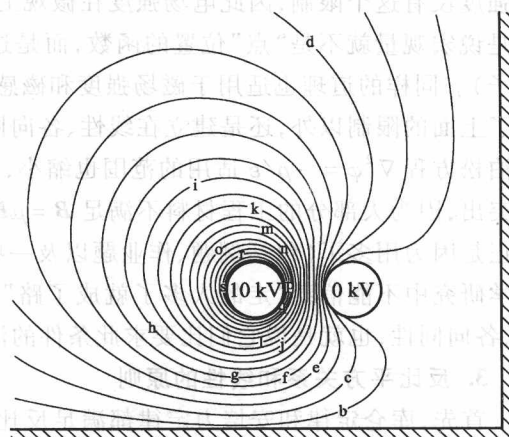
大部分经典理论的特点是尽可能使用线性的框架来处理问题,这是排除干扰,抓住主要矛盾(也许它本身就是线性的),揭示自然规律的一种有效方法。然而令人遗憾的是大部分自然现象都不是线性的,当线性化失效以后,就充满了数学上的困难和概念上的困难,实验中甚至可能出现与理论计算相差几个数量级的差异,对此必须有清楚的认识。第一,抓事物本质,线性化是最好、最简单的办法,“简单就是美”;第二,非线性是工程中的常态,这也许是事物的本质,也许是不满足适用条件的结果,美的未必是真的。这两点相辅相成,在学习、工作中认真领会,善加利用往往会取得高水平的成果。

4. 边界条件与等效方法

从中学到大学,我们接触的电磁场问题,多半是例题和习题,出于简洁性,它们都离工程实际很远,举例来说,两个孤立的球的电场分布,我们都可以画出图 1-2-5(a) 所示的分布,无论这两个球的电位是 10 kV 对 0 kV,还是 5 kV 对 -5 kV,周围的电位分布都是这样对称,没有人怀疑,然而,这只是“纸上谈兵”的结果。实际情况是这两个球不可能孤立地悬在那里,例如这两个球靠近接地的墙和大地时,其电位分布就明显不同,如图 1-2-5(b) 所示。这个例



(a) 两个孤立的带电导体球



(b) 两个带电导体球靠近接地墙和大地

图 1-2-5 两个带电导体球周围的电位分布

子告诉我们三点。第一,周围的条件,也就是所谓的边界条件起了很重要的作用,物理情况就是如此;它的数学基础是唯一性定理,在区域内部电磁结构确定以后,边界条件实际是定解条件,所有的电磁场计算方法都与此有关。第二,在靠近接地墙和大地时,这两个球的电位如果是 5 kV 对 -5 kV,电位分布还会发生变化。按照过去的理解,电位是相对的,只要差值不变,电场也不变,而现在的结果显示电场明显发生不对称的变化,原因是“边界”的改变,边界和这两个球的电位差在两种情况下是不一样的。第三,当我们把球移到离墙和大地很远处时,它们的影响就很小,特别在一些区域,例如球间,这除了说明真实边界的影响有一个程度以外,还带来计算中的一些近似处理方法和条件。边界条件的学习贯穿本课程整个教学内容,必须给予足够的重视。

唯一性定理这个数学基础还带来和边界条件有关的等效计算方法,例如镜像法、电轴法等,这些方法未必能解决实际工程问题,但带来的一些思想和思路却是有益的,例如在一些条件下,工程中往往将分布在长直导体表面的电荷等效为位于轴心的线电荷,这一点在部分电容的计算,甚至时变场中三相输电线的电场计算中都得以体现,这实际是一种近似解析方法。至于数值计算方法我们会有新的课程需要学习,本课程只能做简单介绍。

5. 数学理论

在逻辑图中,将一些定理归之为数学理论,一方面是因为它们本身是可以通过数学公式互相推导的,当然有时要引入一些简化和近似,例如线性、各向同性的物质特性;另一方面也是因为在力场、流场等其他学科中这些定理也会出现。用数学工具精确地描述理论是学科发展的要求,也是一门学科成熟的标志,只有定量化的数学描述才能经得起实践检验。用数学理论来描述物理现象的另外一个好处是其简洁性。所谓的电磁场理论实际上是用合适的定义和模型、合适的数学工具,定量和简洁地反映及预测实验现象。