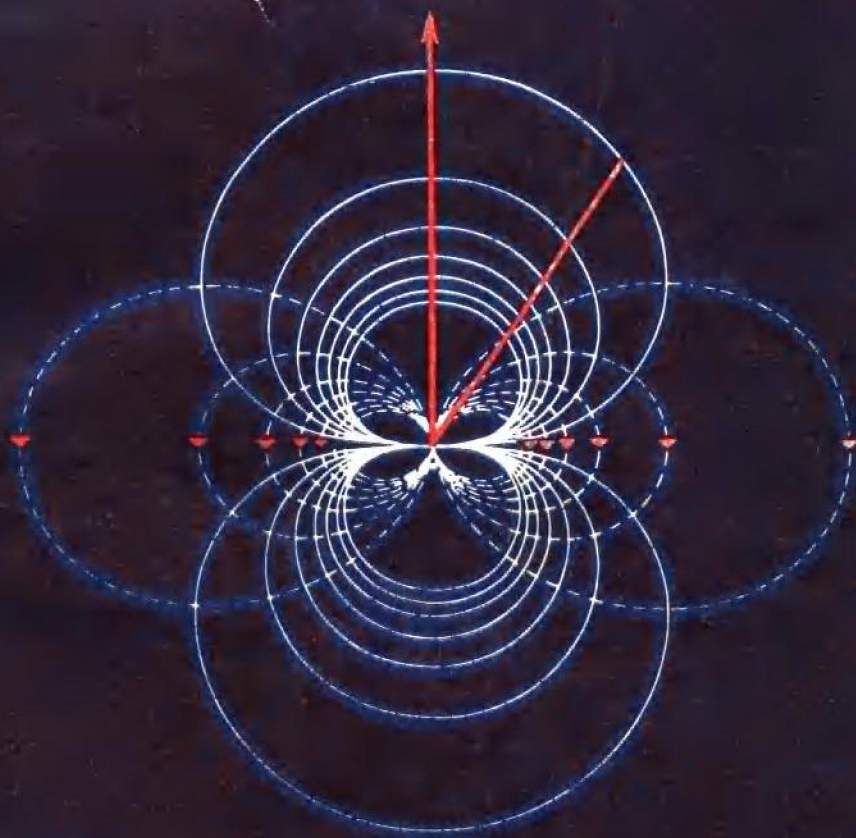


电磁场与波

美 D. 郑钧 著 赵姚同 黎滨洪 译

上海交通大学出版社

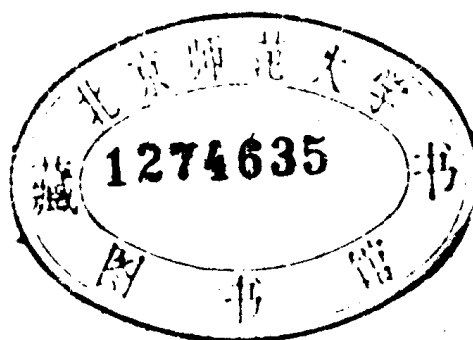


电 磁 场 与 波

[美] D. 郑钧 著

赵姚同 黎滨洪 译

1211/59/22



上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是美国西瑞库斯(Syracuse)大学郑钧教授的新著。他创造性地采用以亥姆霍兹定理为基础的逐步公理性论述法,通过建立电磁模型来导出电磁场与电磁波理论。全书体系新颖,内容充实,易于理解和掌握。本书共分十一章:电磁模型、矢量分析、静电场、静电问题的解法、稳定电流、静磁场、时变电磁场和麦克斯韦方程组、平面电磁波、传输线理论及其应用、波导和谐振腔、天线和辐射系统。

本书可供工院校、业余大学和函授大学有关专业作为电磁场理论课程的教科书或教学参考书,也可作工程技术人员的自学读本或参考书。

电 磁 场 与 波

【美】D·郑钧 著

赵姚同 黎滨洪 译

孟 侃 审校

*

上海交通大学出版社出版
(上海淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

常熟文化印刷厂排版

印装

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:25.25 字数:646,400

1984年10月第一版 1984年10月第一次印刷

印数:1-10,000

统一书号:13324·0019 科技新书目:82-150

定价:3.70元

译 者 的 话

美国西瑞库斯(Syracuse)大学 David K. Cheng. (郑钧)教授毕业于上海交通大学电机系,在美国哈佛大学先后获得硕士和博士学位,现为国际著名的电磁理论和天线学者、上海交大、西北电讯工程学院和北京邮电学院的名誉教授。他在电磁场理论、天线和天线阵列、通信和信号处理等方面都有很高的造诣和杰出的贡献。郑钧教授所著的“线性系统分析”一书在我国翻译出版后,很受欢迎。“电磁场与波”(Field and Wave Electromagnetics)是他的最新著作。

郑钧教授积数十年研究和教学的经验,在本书中创造性地应用了逐步公理性论述法,以亥姆霍兹定理为基础,首先定义有关电磁场理论的基本物理量,然后借助若干与实践相符的基本假设确定上述物理量之间的关系,由此建立起电磁模型,再利用上述模型揭示和导出电磁场与波的全部规律和理论。这种独特的论述方法既吸取了习惯上以实验定律为基础的传统性论述法和以麦克斯韦方程组为起点的公理性论述法的精华,又弥补了它们的不足,使得全书陈述方法新颖、论理严密,内容生动,别具一格,有利于激发读者的学习兴趣,便于深入和系统地领会及掌握电磁场与电磁波的理论。因此,该书于一九八三年四月在美国和加拿大出版后,颇得好评,同年内就被五十余所大学选定为教科书。

本书内容着重于电磁场与波的基本理论知识,并注意训练读者具有应用这理论解决工程实际问题的能力,这些与我国工科院校有关专业的《电磁场与电磁波》课程的教学要求是一致的。另外,书中插图形象,列表实用,每章附有大量例题和习题。因此,我们特将此书翻译,以介绍给我国高等院校有关专业的师生和工程技术人员。

本书第一至六章由黎滨洪同志翻译,第七至第十一章由赵姚同同志翻译。

孟侃教授审阅了全部译稿并提出了宝贵意见。本书的翻译出版曾得到上海交大电子工程系和出版社领导的支持,责任编辑陈克俭同志仔细校阅了全部译稿。在此谨致以深切的谢意。

由于译者水平有限,难免有错误与不妥之处,请读者批评指正。

译 者

一九八四年七月

序 言

有关电磁学方面的许多书,就其论述体系而言,大致可以归纳为两大类。第一类采用传统性论述法:从一些实验定律开始,逐步将其一般化,最后综合成麦克斯韦方程组的形式。这是一种归纳法。第二类采用公理性论述法:一开始就给出麦克斯韦方程组,认定每一方程与一个实验定律相对应,在分析静态和时变的情况时,再专门说明这些一般化方程。这是一种演绎法。少数书从讨论特殊相对论开始,由库仑定律引出全部电磁理论;不过,这种方法需要首先讨论和理解特殊相对论,因此它或许最适合于一门高级水平的课程。

主张传统性论述法的学者认为,他们的方法反映了电磁理论产生的历史过程(从具体的实验定律到麦克斯韦方程组),它比其它方法更易于使学生理解。可是,我认为阐述历史知识的方法不一定是给学生讲授课程的最好方法。这一论述法使论题趋于零碎,而且不能充分利用矢量微积分的简洁性优点。学生对后来引入的梯度、散度和旋度运算将感到迷惑,而且常会造成心理上的障碍。作为论述电磁模型的一种方法,它显得既不严密,又欠雅致。

公理性论述法,通常从一组四个微分形式或积分形式的麦克斯韦方程开始,将其作为基本假设。这些方程式颇为复杂,并难于掌握。对一打开书就遇上所有这些方程的学生来说,会引起惶惑和厌恶的心情。机灵的学生会对场矢量的意义以及这些一般方程的必要性和充分性感到愕然。一开始,学生就搞不清电磁模型的概念,而且他们还未习惯于有关的数学运算。不管怎样,这些一般的麦克斯韦方程式很快就被简化,以用于静态场,且允许分别考虑静电场和静磁场。那么,为什么非从课程一开始就引出整套四个麦克斯韦方程式不可呢?

可以这样说,虽然库仑定律是基于实验证明的,但实际上,它也只是是一个假设。我们可以考虑库仑定律的两个规定:带电物体相对于它们之间的距离而言是很小的;带电物体之间的力与其距离的平方成反比。对于第一个规定,就产生这样的问题:带电物体必须多么小才可以认为相对于其距离为“很小”呢?实际上,带电物体的尺寸不可能趋于零(理想点电荷),而且确定两个有限尺寸的物体之间的“真实”距离也有困难。对给定尺寸的物体,间距越大,测量距离的相对精度就越高。可是,实际情况(力的微弱,外界带电体的存在,等等)限制了实验室中的可用间距,实验的误差也难以全部避免。这又导致另一个与第二个规定中反比平方关系有关的更大的问题:即使带电物体的尺寸趋于零,无论测量者如何熟练和谨慎,实验测量还是不可能达到无限精确。那么,库仑怎么可能知道力是严格地与间距的平方(而不是 2.000001 或 1.999999 次方)成反比呢?这个问题是不可能从实验的观点来回答的,因为在库仑的年代,实验不可能精确到七位数。因此只能说,库仑定律本身是一个假设,它是库仑在有限精度的实验基础上发现和设想出来的自然规律(见3-2节)。

本书用逐步公理法来建立电磁模型:首先对静电场(第三章),接着对静磁场(第六章),最后对导出麦克斯韦方程组的时变场(第七章)进行阐述。每个阶段所用的数学基础是亥姆霍兹定理,它可表述为:如果矢量场在各处的散度和旋度均已给定,则它就确定了,最多只差一个附加常量。因此,为了论述自由空间的静电模型,只需以假设的形式规定其散度和旋度,以此来定义一个单独的矢量(也就是电场强度 \mathbf{E})即可。自由空间静电学的所有其它关系,包括库仑定

律和高斯定理,都可以从这两个相当简单的假设导出。在材料媒质中的关系,可以通过极化电介质的等效电荷分布的概念推导出来。

类似地,对自由空间的静磁模型,需要以假设形式规定其散度和旋度,以此来定义一个单独的磁通密度矢量 \mathbf{B} ;所有其它公式可以从这两个假设导出。在材料媒质中的关系,可以通过等效电流密度的概念推导出来。当然这些假设的有效性,有赖于它们是否能引出与实验相一致的结果。

在时变场中,电场和磁场强度是相互耦合的。静电模型中 \mathbf{E} 的旋度假设必须修改,使其与法拉第定律相符。此外,静磁模型中 \mathbf{B} 的旋度假设也必须修改,以便与连续性方程相一致。于是,我们得到了构成电磁模型的四个麦克斯韦方程式。我相信,这种基于亥姆霍兹定理,对电磁模型的逐步论述是新颖、系统和更易为学生所接受的。

在内容的安排方面,我力图叙述明晰和连贯一致,并使逻辑思路顺畅。本书附有大量例题(共 135 题),目的在于强调基本概念和说明解决典型问题的方法。每章末尾还附有复习题,用以测验学生对本章基本内容的记忆和理解程度。每章的习题是专为增强学生对公式中不同物理量的相互关系的理解力而设的,同时也为了培养他们应用公式去解决实际问题的能力。我认为,做一些简单心算式的题目,充其量只不过和做一次计算器练习一样,是无济于事的。

除了电磁场基础之外,本书内容还包括传输线理论及其应用、波导和谐振腔、天线和辐射系统。电磁学的基本概念和主要理论不会因新型电磁器件的出现而变化。在 1-1 节,列举了够多的理由以鼓励对电磁学基本原理的学习。我希望,本书的内容加上新颖的论述方法,将对学生理解和分析基本的电磁现象提供可靠而充分的基础,并为学习更高深的电磁理论课程作好准备。

本书有足够的材料供两学期课程使用。第一章至第七章包括了场方面的内容;第八章至第十一章讲述波及其应用。对只有一学期电磁学课程的学校,第一章至第七章,加上第八章的前面四节,将在场方面提供很好的基础,在无界媒质中的波方面提供一个导论。余下的内容可以留作应用方面的参考书,或作后续选修课程的教科书。如果时间很紧,某些内容,如 2-3.3 节的例 2-2、关于静电力的 3-11.2 小节、关于标量磁位的 6-5.1 小节、关于磁路的 6-8 节和关于磁力和转矩的 6-13.1 小节以及 6-13.2 小节均可以略去。实行学季制的学校,可以根据分配给电磁学课程的学时数调整所需的内容。

本书的手稿,作者在西瑞库斯(Syracuse)大学讲授电磁学时曾试用过几次。作者感谢那些授课班级的全体学生,他们曾对本书的内容作出反响。作者也感谢手稿的所有评阅者,他们曾给以鼓励和有益的建议。特别感谢梁昌洪和马北林两位先生,他们帮助提供了一些习题的答案。

郑 钧

于纽约州 西瑞库斯 1983 年 1 月

目 录

第一章 电磁模型	1
1-1 引言	1
1-2 电磁模型	2
1-3 国际单位制单位和通用常数	4
复习题	6
第二章 矢量分析	7
2-1 引言	7
2-2 矢量加法和减法	7
2-3 矢量的乘积	9
2-3.1 标量积或点积	9
2-3.2 矢量积或叉积	10
2-3.3 三个矢量的乘积	10
2-4 正交坐标系	11
2-4.1 笛卡儿坐标	14
2-4.2 柱面坐标	16
2-4.3 球面坐标	20
2-5 标量场的梯度	24
2-6 矢量场的散度	26
2-7 散度定理	29
2-8 矢量场的旋度	31
2-9 斯托克斯定理	35
2-10 两个零恒等式	36
2-10.1 恒等式 I	36
2-10.2 恒等式 II	37
2-11 亥姆霍兹定理	38
复习题	40
习题	41
第三章 静电场	44
3-1 引言	44
3-2 自由空间静电学的基本假设	45
3-3 库仑定律	47
3-3.1 离散电荷系的电场	49
3-3.2 连续分布电荷的电场	51
3-4 高斯定理及其应用	52
3-5 电位	55
3-5.1 分布电荷的电位	56
3-6 静电场中的导体	60

3-7	静电场中的电介质	63
3-7.1	极化电介质的等效电荷分布	64
3-8	电通密度和介电常数	65
3-8.1	电介质强度	68
3-9	静电场的边界条件	69
3-10	电容和电容器	72
3-10.1	电容器的串联和并联	74
3-11	静电能量和力	76
3-11.1	用场量表示静电能	79
3-11.2	静电力	80
	复习题	83
	习题	84
第四章	静电问题的解法	87
4-1	引言	87
4-2	泊松方程和拉普拉斯方程	87
4-3	静电场解的唯一性	91
4-4	镜像法	92
4-4.1	点电荷和导体平面	93
4-4.2	线电荷和平行导体圆柱	94
4-4.3	点电荷和导体球	96
4-5	笛卡儿坐标中的边值问题	98
4-6	柱面坐标中的边值问题	103
4-7	球面坐标中的边值问题	107
	复习题	109
	习题	110
第五章	稳定电流	113
5-1	引言	113
5-2	电流密度和欧姆定律	114
5-3	电动势和基尔霍夫电压定律	116
5-4	连续性方程和基尔霍夫电流定律	117
5-5	功率耗散和焦耳定律	119
5-6	电流密度的边界条件	119
5-7	电阻的计算	122
	复习题	124
	习题	125
第六章	静磁场	128
6-1	引言	128
6-2	自由空间静磁学的基本假设	129
6-3	矢量磁位	132
6-4	毕奥-萨伐定律及其应用	133
6-5	磁偶极子	136
6-5.1	标量磁位	138

6-6	磁化强度和等效电流密度	139
6-7	磁场强度和相对导磁率	141
6-8	磁路	143
6-9	磁性材料的性质	146
6-10	静磁场的边界条件	149
6-11	电感和电感器	150
6-12	磁能	155
6-12.1	用场量表示磁能	157
6-13	磁力和磁转矩	159
6-13.1	用磁场储能表示力和转矩	162
6-13.2	用互感表示力和转矩	164
	复习题	165
	习题	166
第七章	时变电磁场和麦克斯韦方程组	171
7-1	引言	171
7-2	法拉第电磁感应定律	172
7-2.1	时变磁场中的静止回路	172
7-2.2	静磁场中的运动导体	173
7-2.3	时变磁场中的运动回路	175
7-3	麦克斯韦方程组	177
7-3.1	麦克斯韦方程组的积分形式	179
7-4	位函数	180
7-5	电磁边界条件	182
7-5.1	两种无损耗线性媒质之间的分界面	183
7-5.2	电介质与理想导体之间的分界面	184
7-6	波动方程及其解	185
7-6.1	位函数的波动方程的解	185
7-6.2	无源波动方程	186
7-7	时谐场	187
7-7.1	相量的应用——复习	187
7-7.2	时谐电磁学	189
7-7.3	在简单媒质中的无源场	190
	复习题	192
	习题	193
第八章	平面电磁波	195
8-1	引言	195
8-2	在无损耗媒质中的平面波	195
8-2.1	横电磁波	199
8-2.2	平面波的极化	200
8-3	导电媒质中的平面波	202
8-3.1	低损耗电介质	203
8-3.2	良导体	203

8-3.3	群速	206
8-4	电磁功率流和坡印亭矢量	208
8-4.1	瞬时和平均功率密度	210
8-5	在导电平面边界上的垂直入射	212
8-6	在导电平面边界上的斜入射	215
8-6.1	垂直极化	215
8-6.2	平行极化	217
8-7	在电介质平面边界上的垂直入射	218
8-8	在多层电介质分界面上的垂直入射	221
8-8.1	总场的被阻抗	222
8-8.2	用多层电介质作阻抗变换	223
8-9	在电介质平面边界上的斜入射	225
8-9.1	全反射	225
8-9.2	垂直极化	227
8-9.3	平行极化	229
	复习题	231
	习题	231
第九章	传输线理论及其应用	236
9-1	引言	236
9-2	沿平行板传输线的横电磁波	237
9-2.1	有损耗的平行板传输线	239
9-3	一般的传输线方程组	242
9-3.1	在无限长传输线上波的特性	243
9-3.2	传输线的参数	246
9-3.3	由功率关系导出衰减常数	248
9-4	在有限长传输线上波的特性	249
9-4.1	传输线用作电路元件	253
9-4.2	电阻性终端的传输线	256
9-4.3	任意终端的传输线	259
9-4.4	传输线电路	261
9-5	史密斯圆图	263
9-5.1	有损耗线的史密斯圆图计算	271
9-6	传输线的阻抗匹配	272
9-6.1	用四分之一波长变换器作阻抗匹配	273
9-6.2	单短截线匹配	275
9-6.3	双短截线匹配	279
	复习题	281
	习题	283
第十章	波导和谐振腔	287
10-1	引言	287
10-2	沿均匀导波结构的波的一般特性	288
10-2.1	横电磁波	289

10-2.2	横磁波	290
10 2.3	横电波	293
10-3	平行板波导	296
10-3.1	在平行板间的 TM 波	296
10-3.2	在平行板间的 TE 波	299
10-3.3	在平行板波导中的衰减	301
10-4	矩形波导	303
10-4.1	在矩形波导中的 TM 波	304
10-4.2	在矩形波导中的 TE 波	306
10-4.3	在矩形波导中的衰减	309
10-5	介质波导	311
10-5.1	沿介质板的 TM 波	312
10-5.2	沿介质板的 TE 波	314
10-6	谐振腔	317
10-6.1	TM _{mnp} 模	318
10-6.2	TE _{mnp} 模	319
10-6.3	谐振腔的品质因素	320
	复习题	322
	习题	323

第十一章 天线和辐射系统 326

11-1	引言	326
11-2	基本振子的辐射场	327
11-2.1	电基本振子	327
11-2.2	磁基本振子	329
11-3	天线的辐射方向图和天线的参数	330
11-4	细线天线	334
11-4.1	半波振子	335
11-5	天线阵	337
11-5.1	二元阵	337
11-5.2	一般的均匀直线阵	340
11-6	接收天线	344
11-6.1	内阻抗和方向图	344
11-6.2	有效面积	346
11-7	一些其它的天线型式	347
11-7.1	行波天线	347
11-7.2	八木天线	349
11-7.3	宽频带天线	350
11-8	口径辐射器	352
	参考资料	355
	复习题	356
	习题	357

符号和单位 360

A-1 国际单位制 (SI 或有理化 MKSA 制) 的基本单位	360
A-2 导出单位	360
A-3 单位的倍数和约数	362
附录 B 一些有用材料的常数	363
B-1 自由空间的常数	363
B-2 电子和质子的物理常数	363
B-3 相对电容率 (介电常数)	363
B-4 电导率	364
B-5 相对导磁率	364
附录 C 重要的矢量公式	365
C-1 一些有用的矢量恒等式	365
C-2 梯度、散度、旋度和拉普拉斯运算	365
名词索引	367
习题答案 (部分)	381

第一章 电磁模型

1-1 引言

简单地说,电磁学是研究静止和运动电荷的效应的学科。从初等物理学我们就知道,电荷有正电荷和负电荷两种。正、负电荷都是电场的源。运动电荷形成电流,电流产生磁场。这里,我们先一般地讨论电场和磁场,以后再对这些名词给予精确的定义。场是一个空间分布量,它可以是时间的函数,也可以不是。时变的电场伴随着磁场,反之亦然。换句话说,时变的电场和磁场是耦合在一起的,从而形成电磁场。在某些条件下,时变电磁场产生波,从源辐射出去。在解释相隔一段距离而发生的作用时,场与波的概念是根本性的。在《电磁场与波》这本书中,我们将研究电磁学的原理以及支配电磁现象的定律的应用。

对物理学家和电机工程师来说,电磁学是一门重要的基础学科。要理解原子裂变原理、阴极射线示波器、雷达、卫星通信、电视接收、遥感、射电天文学、微波器件、光纤通信、盲目着陆系统、电机能量转换等等,电磁理论是必不可少的。电路概念表示电磁概念的一种局限性的特殊形式。在第七章中我们将看到,当源频率很低,以致导电网络的尺寸远小于波长时,我们便得到一种准静态情况,它把电磁问题简化为电路问题。不过,我们得赶紧补上一句:电路理论本身已是一门高度发展的成熟学科,它应用于不同种类的电机工程问题中,就其本身而言,无疑是一门十分重要的学科。

现在,用两个实例来说明电路理论概念的不足之处以及为何需要电磁场概念。图 1-1 表示一种步话机用的单极天线。当天线处于发射状态时,位于底部的源把具有适当载波频率、携有信息的电流馈给天线。从电路理论观点看,天线顶端实际上没有连接任何东西,源是在给一个开路电路馈电,因此并无电流流通,什么现象也不会发生。当然,这种观点无法解释相隔一段距离的两部步话机为何能够进行通话;要解释就必须用到电磁概念。在第十一章中我们将看到,当天线长度可与载波波长[†]相比拟时,沿终端开路的天线将会有非均匀电流的流动,这个电流向空间辐射时变电磁场,时变电磁场又能够在相隔一段距离的另一天线上感应出电流来。



图 1-1 单极天线

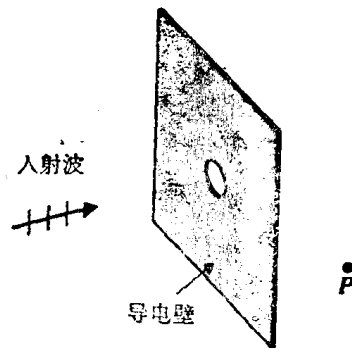


图 1-2 电磁问题

[†] 交流源的波长和频率的乘积等于波传播的速度。

图 1-2 给出另一个例子, 电磁波从左面入射到一块开小孔的大导电壁上。在位于壁右面的点(例如图中的 P 点)处, 即使该点不在小孔的正后方, 也将有电磁场存在。显然, 用电路理论来确定这 P 点的场是徒劳的, 甚至根本就无法解释该处有场的存在。然而, 图 1-2 的例子却代表着一个在实际中很重要的问题, 因为它的解与计算导电壁的屏蔽效果有关。

一般地说, 电路理论是用来处理集中参数系统的, 所谓集中参数系统就是由电阻、电感和电容等集中参数表征的元件所组成的电路。电压和电流是主要的系统变量。在直流电路中, 系统变量是常量, 支配它们的是代数方程; 在交流电路中, 系统变量是标量, 它们与时间有关, 但与空间坐标无关, 支配它们的方程是常微分方程。可是, 大部分电磁变量是时间和空间坐标的函数, 并且许多是既有大小又有方向的矢量, 它们的表示和运算需要矢量代数和矢量微积分的知识。即使在静态场, 支配方程一般来说也是偏微分方程。具备处理矢量及与时间和空间有关的变量的能力是重要的。矢量代数和矢量微积分的基础将在第二章中讨论。在处理某些类型电磁问题时, 需要求解偏微分方程的方法。这些方法将在第四章中讨论。对学习电磁学来说, 熟练地应用这些数学工具的重要性, 是怎么强调也不会过份的。

1-2 电磁模型

在论述一种学科时, 有两种方法可以遵循: 归纳法和演绎法。采用归纳法, 人们按照学科的历史发展进程, 由观测一些简单的实验开始, 从其中推断出一些定律和定理来。这是一种从具体现象到普遍原理的推理过程。而演绎法则是对一个理想化模型, 假设几个基本关系——即假设几条公理, 从中可以推导出特殊的定律和定理来。模型和公理是否有效, 可从其是否能预测到与实验观测相符合的结果来证实。在本书中, 我们喜欢采用演绎法(或称公理法), 因为它更雅致, 而且能使电磁学学科的论述有条不紊。

我们为研究科学学科而采用的理想化模型, 必须与现实情况相联系, 并且能够解释物理现象, 否则我们只不过在盲目地从事智力练习而已。例如, 可以建立一种理论模型, 从其中可得出许多数学关系; 但是, 如果这些关系与观测结果不一致, 那么这种模型就毫无用处。这里, 数学运算可能是正确的, 但有关模型的基本假设却可能是错误的, 或者所包含近似的合理性无法予以证实。

根据理想化模型建立理论有三个基本步骤: 第一, 定义一些与所研究的学科有关的基本量; 第二, 规定这些量的数学运算规则; 第三, 假设一些基本关系。这些假设的关系或公理, 总是基于在可控制条件下所得到的大量实验观测结果, 由聪明的人综合出来的。一个熟悉的例子是建立在由理想电源和纯电阻、纯电感及纯电容所组成的电路模型之上的电路理论。此时, 基本量是电压(V)、电流(I)、电阻(R)、电感(L)和电容(C); 运算规则是代数、常微分方程和拉普拉斯变换; 基本假设是基尔霍夫电压和电流定律。很多关系和公式均可从这种基本而简单的模型导出, 很复杂的网络的响应也可由此确定。这种模型充分显示了它的有效性和价值。

用类似的办法, 电磁理论也可以建立在适当选择的电磁模型之上。在这一节里, 我们将进行第一步, 即定义基本的电磁量。第二步是确定运算规则, 包括矢量代数、矢量微积分和偏微分方程。矢量代数和矢量微积分的基础将在第二章(矢量分析)中讨论, 解偏微分方程的方法, 将在本书后面章节提出这些方程时再予以介绍。第三步, 即提出基本假设, 在第三、六和七章中讨论静电场、静磁场和时变电磁场时将分三次予以介绍。

我们的电磁模型的基本量, 大体上可以分成两类: 源量和场量。然而, 电磁场可以引起电

荷的重新分布,这种重新分布反过来又将影响场,因此,原因和效果之间的区别不总是那么明显的。

我们用符号 q (有时用 Q) 来表示电荷。电荷是物质的一种基本特性,它仅以单个电子电荷 e 的正或负整数倍的形式存在,

$$e = -1.60 \times 10^{-19} \text{ (C)}, \quad (1-1)$$

其中 C 是电荷单位库仑的缩写,这样命名是为了纪念法国物理学家库仑 (Charles A. de Coulomb), 他于 1785 年总结出库仑定律(库仑定律将在第三章讨论)。库仑是个非常大的电荷单位,需要 $1/(1.60 \times 10^{-19})$ 或 6.25×10^{18} 个电子才构成 1 C 的负电荷。两个相距 1 米的 1 C 电荷之间的作用力约为 1 百万吨。电子的一些其它物理常量已列于附录 B-2 中。

如同动量守恒原理一样,电荷守恒原理是物理学的一个基本假设或定律。它表示电荷是守恒的,也就是说它既不能被创造也不能被消灭。电荷可以从一处移到另一处,在电磁场的影响下也可以重新分布;但是,在一个封闭(孤立)系统中的正、负电荷的代数和是保持不变的。在任何时刻和任何条件下都必须满足电荷守恒原理,它可以用连续性方程作数学表示,这将在 5-4 节讨论。有关电磁问题的任何公式或解答,若违反电荷守恒原理,就必定是错误的。回想电路理论中的基尔霍夫电流定律,它表示流出一个节点的电流之和等于所有流入该节点的电流之和,这就是电荷守恒性质的一种论断。(电流定律的含义在于节点无电荷积累。)

虽然,在微观意义下,电荷是以离散的方式要么存在要么不存在于某一点的,但是当我们考虑大量聚集的电荷的电磁效应时,这种原子范围内的突变并不重要。在建立宏观或大范围的电磁学理论时,发现采用平滑平均密度函数会收到很好的效果(同样的方法也用于力学中,在那里我们定义了平滑的物质密度函数,虽然在原子范围内,质量仅以离散的方式与基本粒子相联系着)。定义体电荷密度作为一个源量如下:

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta v} \text{ (C/m}^3\text{)}, \quad (1-2)$$

其中 Δq 是微小体积 Δv 中的电量。 Δv 为多小呢?它应该小到足以表示 ρ 的精确变化,但又要大到足以包含大量的离散电荷。例如,一个各边均为 $1 \mu\text{m}$ (10^{-6} m) 的立方体元的体积是 10^{-18} m^3 , 它仍然包含着大约 10^{11} 个原子。以这样小的 Δv 定义出来的空间坐标的平滑函数 ρ , 在几乎所有的实际问题中,可望产生准确的宏观结果。

在某些物理情况中,电量 Δq 可能存在于面元 Δs 或者线元 Δl 上。此时,定义一个面电荷密度 ρ_s 或者线电荷密度 ρ_l 就更为适宜:

$$\rho_s = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta s} \text{ (C/m}^2\text{)}; \quad (1-3)$$

$$\rho_l = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} \text{ (C/m)}. \quad (1-4)$$

除了一些特殊情况之外,电荷密度在各点是不相同的;因此,一般地说, ρ 、 ρ_s 和 ρ_l 都是空间坐标的点函数。

电流是电荷对时间的变化率,即

† 1962 年盖尔曼(Murray Gell-Mann)假设夸克(quarks)为物质的基本结构成分,夸克曾被预测带有一个电子电荷的几分之一,但是至今实验仍未证实其存在。

†† 单位制将在 1-3 节讨论。

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (\text{C/s 或 A}), \quad (1-5)$$

其中 I 本身可能与时间有关。电流的单位是库仑每秒(C/s), 即安培(A)。电流必须流过一定的面积(例如一根固定截面的导线), 所以它不是一个点函数。在电磁学中, 我们定义了一个矢量点函数体电流密度(或简称电流密度) \mathbf{J} , 它表示流过垂直于电流流动方向的单位面积的电流总量。黑体字母 \mathbf{J} 是一个矢量, 其大小为每单位面积的电流(A/m²), 方向为电流流动的方向。我们将在第五章详细讨论 I 与 \mathbf{J} 之间的关系。对良导体, 高频交流电流是局限在表面层的, 它并不流过整个导体内部。此时有必要引入面电流密度 \mathbf{J}_s , 它是流过导体表面垂直于电流流动方向的单位宽度的电流, 其单位为安培每米(A/m)。

电磁学中有四个矢量场量: 电场强度 \mathbf{E} 、电通密度(或电位移) \mathbf{D} 、磁通密度 \mathbf{B} 和磁场强度 \mathbf{H} 。这些量的定义和物理意义, 在本书后面章节将作详细的解释。目前我们只想说明下列各点: 电场强度 \mathbf{E} 是讨论自由空间中静电学(静止电荷的效应)时需要的唯一矢量, 它的定义是作用在单位试验电荷上的电作用力; 电位移矢量 \mathbf{D} 在研究媒质中的电场时有用, 这点在第三章将会看到。相似地, 磁通密度 \mathbf{B} 是讨论自由空间中静磁学(稳定电流的效应)时需要的唯一矢量, 它与以一定速度运动的电荷所受的磁作用力有关; 磁场强度矢量 \mathbf{H} 在研究媒质中的磁场时有用。 \mathbf{B} 和 \mathbf{H} 的定义和意义将在第六章讨论。

四个基本的电磁场量, 连同它们的单位, 列于表 1-1 中。表中 V/m 是伏特每米, C/m² 代表库仑每平方米, T 代表特斯拉或伏秒每平方米, A/m 代表安培每米。当与时间无关时(例如在静止、恒定或稳定情况下), 电场量 \mathbf{E} 和 \mathbf{D} 以及磁场量 \mathbf{B} 和 \mathbf{H} 构成两个独立的矢量对。可是, 在与时间有关的情况下, 电场量和磁场量是耦合在一起的; 就是说, 时变的 \mathbf{E} 和 \mathbf{D} 将产生 \mathbf{B} 和 \mathbf{H} , 反之亦然。所有四个量均为点函数, 它们是在空间每个点上定义的, 一般是空间坐标的函数。物质(或媒质)的性质决定 \mathbf{E} 与 \mathbf{D} 和 \mathbf{B} 与 \mathbf{H} 之间的关系。这些关系称为媒质的本构关系, 以后再予以研究。

表 1-1 电磁场量

场量的符号和单位	场量	符 号	单 位
电 的	电 场 强 度	\mathbf{E}	V/m
	电通密度(电位移)	\mathbf{D}	C/m ²
磁 的	磁 通 密 度	\mathbf{B}	T
	磁 场 强 度	\mathbf{H}	A/m

学习电磁学的主要目的, 是根据电磁模型去理解相隔一段距离的电荷之间和电流之间的相互作用。场与波(与时间和空间有关的场)是这种模型中的概念性基本量。一些基本假设将把 \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} 和源量联系起来, 由此推出的关系可以用来解释和预测电磁现象。

1-3 国际单位制单位和通用常数

任何物理量的测量结果, 必须表示为一个带有单位的数。这样, 我们才可以谈论 3 米的长度、2 千克的质量和 10 秒的时间等等。为了实用, 单位制应建立在一些大小合适(实际)的基本单位的基础上。在力学中, 所有的量都可以用三个基本单位(即长度、质量和时间单位)表示

出来。在电磁学著作中需要第四个基本单位(电流单位)。国际单位制(SI)就是 MKSA 单位制,它是建立在表 1-2 所列的四个基本单位之上的。电磁学中所有其它单位,包括表 1-1 中的单位,都是可以用 m、kg、s 和 A 表示的导出单位。例如,电荷单位库仑(C)为安培·秒(A·s);电场强度单位(V/m)为 kg·m/(A·s²);磁通密度单位特斯拉(T)为 kg/(A·s²)。附录 A 更完整地给出了各种量的单位。

表 1-2 基本国际单位制单位

量	单 位	缩 写
长 度	米	m
质 量	千 克	kg
时 间	秒	s
电 流	安 培	A

除了表 1-1 中的场量之外,在电磁模型中,还有三个通用常数。它们与自由空间(真空)的性质有关。具体如下,自由空间中电磁波(包括光)的速度 c ;自由空间的电容率 ϵ_0 和自由空间的导磁率 μ_0 。人们做过大量的实验,测量光的速度精确到小数许多位;不过在本课程中,我们只需记住下式就够了:

$$c \approx 3 \times 10^8 \quad (\text{m/s}). \quad (1-6)$$

另外两个常量 ϵ_0 和 μ_0 分别与电现象和磁现象有关; ϵ_0 是自由空间中电通密度 \mathbf{D} 与电场强度 \mathbf{E} 之间的比例常量,即

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad (1-7)$$

μ_0 是自由空间中磁场强度 \mathbf{H} 与磁通密度 \mathbf{B} 之间的比例常量,即

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B}. \quad (1-8)$$

ϵ_0 和 μ_0 的值与所选择的单位制有关,而且它们不是相互独立的。在电磁学著作中普遍采用的 SI 制(有理化† MKSA 制)中,自由空间的导磁率为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (\text{H/m}), \quad (1-9)$$

其中 H/m 代表亨利每米。利用式(1-6)中的 c 值和式(1-9)中的 μ_0 值,就可以从下列关系导出自由空间的电容率值:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (\text{m/s}) \quad (1-10)$$

或

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \approx 8.854 \times 10^{-12} \quad (\text{F/m}), \quad (1-11)$$

其中 F/m 是法拉每米的缩写。三个通用常数和它们的值综述于表 1-3 中。

† 这种单位制称为有理化的,因为因子 4π 不出现在麦克斯韦方程(电磁学的基本假设)中。可是,该因子将出现在许多导出关系中。在非有理化 MKSA 制中, μ_0 为 $10^{-7}(\text{H/m})$,因子 4π 将出现在麦克斯韦方程中。