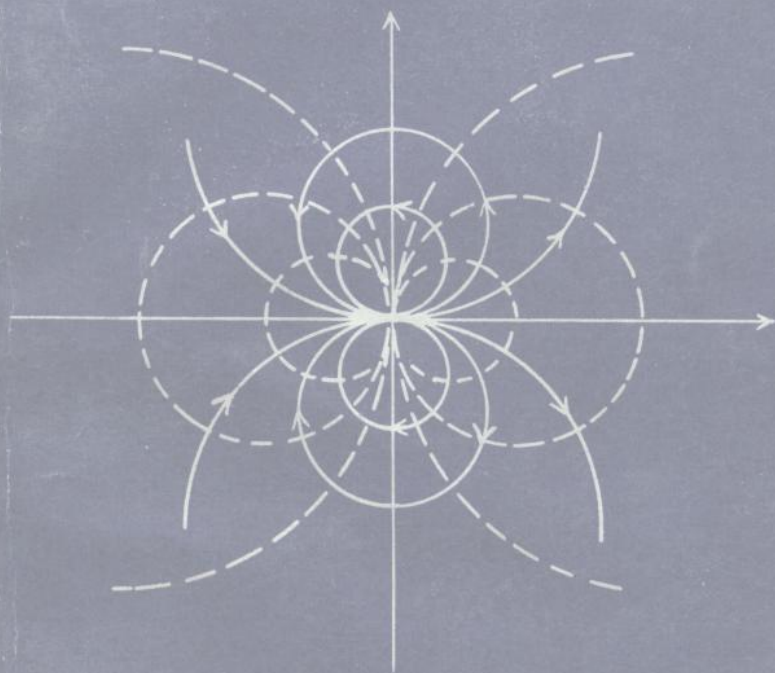


电磁场 和 电磁能 电磁波

上册

[美] L. M. 玛奇德 著

何国瑜 董金明 译
江贤祚 王振荣



人民教育出版社

电磁场、电磁能和电磁波

上册

[美] L. M. 玛奇德 著

465
312

50-68
4/15
32

电磁场、电磁能和电磁波

上 册

[美] L.M.玛奇德 著
何国瑜 董金明 译
江贤祚 王振荣

人民教育出版社

内 容 提 要

本书是美国麻省理工学院和布鲁克林工学院工程系本科生用的教材。主要内容是在经典电磁学的范围内系统地研究电磁场、电磁能和电磁波的基本理论、基本概念和基本方法。本书在叙述上比较细致,并给出了大量针对性较强的举例,因此适合于学生自学。

译本分上、下两册出版,上册包括:场和场论的引言;自由空间中的电磁场定律;矢量分析;微分场定律;静态场(一);静态场(二);物质中的宏观场等七章。下册包括:电磁能和功率;时变场的低频特性;TEM场和波(无损传输线理论);无损媒质中的平面波;辐射等五章及附录。

本书可作为电子工程和无线电工程系本科生的教材或参考书,也可供其它电类专业的师生和工程技术人员参考。

D014/08

Electromagnetic Fields, Energy, and Waves

Leonard M. Magid

John Wiley and Sons, Inc

1972

电磁场、电磁能和电磁波

上 册

[美] L. M. 玛奇德 著

何国瑜 董金明 江贤祚 王振荣 译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 17.5 字数 390,000

1982年7月第1版 1983年7月第1次印刷

印数 00,001—10,000

书号 15012·0417 定价 2.20 元

译者序

目前,适用于电子工程或无线电工程系本科学生用的《电磁场与电磁波》教材基本上有两种类型。一类是先讲静电场、静磁场、恒定电流场,然后讲时变电磁场并导出麦克斯韦方程,最后讲波动和辐射。这种讲法是从特殊的规律讲到一般的规律,其目的是使学生易于由简入繁地掌握较为抽象的电磁场概念。但是,由于这样做与物理学的讲法类似,往往容易使学生感到有些重复。另一类教科书是从一开始就提出积分形式的麦克斯韦方程组(它是普通物理中电磁学的主要结论),然后着重研究麦氏方程组的数学物理特性,研究它在各种不同条件下的解答,以及这些解答的数学物理特性。这样一来,在普通物理的电磁学和《电磁场与电磁波》之间就有了比较明确的分工。前者的任务是以大量实验结果为基础,导出宏观电磁现象应该服从的普遍规律——麦克斯韦方程组。后者的任务是研究麦克斯韦方程组的解法和解的特性。

L. M. 玛奇德编著的《电磁场、电磁能和电磁波》是按后一种讲法写的教科书中具有代表性的一本,从1972年出版后,一直为美国麻省理工学院和布鲁克林工学院等许多著名大学的电工程系用作本科学生的教材。1979年我们曾把这本书译成中文给我院无线电系学生作讲义。经过三届同学使用后,我们感到本书有以下几个特点:

1. 它有较强的系统性。全书从头至尾用麦克斯韦方程组构成了一条清晰的主线,不论研究静态场、时变场还是研究波和辐射,都是基于同一个麦克斯韦方程组。正因为如此,本书清楚地揭示出在静态场、准静态场和动态场之间以及在电场和磁场之间存在的深刻内在联系。

2. 突出了电磁场的基本理论、基本概念和基本方法。本书所讨论的问题始终局限于经典电磁理论范围之内(即在宏观、非相对论、各向同性和线性媒质等条件下),这样取材对工学院的学生是比较适当的。

3. 本书在叙述上很细致,并列举了大量的实际例题,这将会使读者不致感到这门课程非常抽象难学。本书对于那些不易掌握的内容和概念讲得比较深透。

本书的不足之处主要是有些内容不够精练,以致篇幅显得过大。另外由于我国的课程体系与美国不同,许多学校在电磁场理论之后还要开设《微波技术》和《天线》课程,如果这样做,本书的一部分内容就要被划到其它有关课程中去了。尽管如此,我们认为本书目前仍是可以借鉴的一本教材,至少它是一本较好的参考书。

在本书的翻译过程中得到了我院宋丽川教授大量的具体帮助和指导,并承成都电讯工程学院文希理同志校阅了前四章,人民教育出版社杨陵康同志校阅了全书,对此译者表示衷心感谢。

对原书中的印刷错误,凡发现的均已改正,但没作一一注明。由于译者水平所限,译文中错误和不妥之处一定不少,望读者指正。

译者 于北京航空学院无线电系

82年3月

前 言

本书以这样一种方式阐述电磁场理论的基本原理：使电工程系的一般本科学学生能充分理解其物理(和数学)意义，并有助于他们在这个领域内深入钻研。

按原计划，这本书只想对麻省理工学院(MIT)电工程系的两本本科教材^①的某些较基本内容作一次修订。然而，后来却成了另外一本新书，它使得电磁场理论更简单易懂；同时又加强了基本内容，使之可为 MIT 以外的学校通用。

本书保持了上述两本书的基本风格，所以，和它们颇为类似，先从电磁学基本假设入手，接着以数理并重的方式，在经典(非相对论)范围内从静态场一直到辐射，推演出电磁场的物理和数学特性。然而，不同的地方是，它使这种方法更适合于一般电工程系学生的水平。关于这一点，我是把我和前作者之一(朱兰成教授)多次长时间并且富有成效的讨论意见，与我自己在麻省理工学院和布鲁克林工学院向各类学生讲授这门课时的经验结合而成的。其结果是突出了场和场论的基本概念，并采用大量起源于实际的例题来说明所有重要的理论问题。对于后面这一点，也许有人会指责我太啰嗦。对此，我是承认的。然而，所以如此，完全是为了让读者对场理论有更透彻的理解，并且看到场理论的严谨与完美。

根据经验，书中绝大多数内容适合作为电工程系和物理系的两学期、三学分本科课程的教材。所需要的预备知识又是大学一、二年级常规的微积分和物理学。不需要专门设矢量分析课，用到的矢量和矢量分析概念在书中都会讲到。

后面的“致读者”全面论述本书内容的细节，我们在这里就不再重复了。希望那个详细提纲可以作为一个“阅读指南”，使读者在使用本书时，不致有只见树木不见森林之虞。

为了得到最大的灵活性，前四章首先讲述电磁场一般理论中最基础的部分。剩下的八章，主要讲述和说明电磁场的多种不同用途，从静态场到动态场和辐射。而每章的内容也按同样方法进行组织，先讲基本概念，紧接着举一些简单例子加以说明。各章中较深的内容按由浅入深的原则依次排列。因此，可将第五章到第十二章末尾内容较难的许多小节(特别是黑三角►的那些节)略去，而不致影响本书的连贯性。

希望在静电学之前就侧重讲波和辐射的教师，可以在讲完头一章之后立即开始以分布参数电路的观点，讨论第十章的无耗传输线上的标量波。然后，按顺序讨论微分和积分形式的基本场定律(第二章到第四章)，电磁功率(第八章)，横电磁场、平面波和辐射(第十二章)，最后再讲静电场、物质中的场和低频(准静态)场(第五章到第七章和第九章)。

另外，只能排一学期场论课的时候，可先讲授有关一般理论的前四章，然后集中只讲剩下的关于场具体应用的各章中的开始几节。对于这种情况，在目录结尾处，列有可以略去的各小节。

L. M. 玛奇德

^① 阿德勒、朱兰成、范诺著“电磁场、电磁能和电磁力”和“电磁能的传输和辐射”。(译者注：该两本书已由上海科学技术出版社于1965年翻译出版)

致 读 者

下面介绍本书内容的详细提纲，同时强调指出各章中每个基本概念的具体安排。其目的是提供一个循序阅读的指南，使读者在学习本书过程中始终有观察事物整体联系的能力。

在第一章简短介绍场和场论之后，第二章引出并讨论电磁场理论的基本假设。在那里，我们把自由空间中积分形式麦克斯韦方程组看作是多年来对电磁场特性所做实验工作的最终结果。电场和磁场本身是用另一个基本假设(洛伦兹力定律)来定义的。在把基本场定律应用于几个极其对称的系统后，人们发现相应的微分场定律更有用些。

为了便于微分场定律的推导和理解，第三章讲矢量和矢量分析的基本性质。这一章最重要的是标量场和矢量场的空间导数的概念，即梯度、散度和旋度的运算。

第四章中，根据旋度和散度的基本定义，把积分场定律变换成相应的微分场定律。人们发现，在一些曲面上基本场量发生突变引起微分方程组中某些项成为无限大(也就是奇异)。因此，微分场定律必须由边界条件加以补充才能完善。可是，这些微分形式的基本场定律也只有在本来亦能用积分场定律来求解的那些极其对称的系统中，才能进行直接积分。因此，狭义地为了能够解决非对称系统的问题，广义地为了更透彻地了解场特性，我们需要对基本场定律作更加深入的研究。这种基于1.2节概述的场方法的研究，将在第五章从场定律的最简单形式——静态或非时变系统——开始。

第五章开头，先讲自由空间和均匀导体中的静态场。从静电场起，我们引入电位的概念，从而导致泊松方程和拉普拉斯方程。在那里，我们花费了不少时间和功夫来讨论直角坐标拉普拉斯方程的性质和通解。随即发现，正是这些拉普拉斯方程的通解，才是全面了解静态场特性的关键。

第六章把静态场的讨论扩充到圆柱坐标和球坐标拉普拉斯方程的解。接着证明，在没有电流存在的空间中，静磁场也由标量位拉普拉斯方程的解所制约。为了便于获得载流区域的磁场，引出了矢量(磁)位的概念，但仅从理论上加以考虑。在实用上，毕奥-沙伐定律(它能从矢量位导出)和标量磁位用起来更简单和更直接些。最后讲述了多极子展开和偶极层模拟。前者的应用能对远离任意源分布的场给出合理的近似，后者使得人们能借助更容易理解的电荷模拟去研究螺线管线圈周围的磁场。

至此，本书所研究的基本场定律以及它们的解都只限于自由空间(也就是真空)和均匀导体。第七章弥补了这个缺陷，讲述电介质和磁性材料中电磁场的宏观特性。首先借助极化强度这个量对电介质进行研究，极化强度代表单位体积内包含的等效偶极子数。然后对自由空间的基本场定律加以修正，使之适用于物质中的场。具体地说，我们假设极化物质对场定律的唯一影响，就是在原来存在于基本场定律中的自由电荷和电流之上，加入极化电荷和电流。相仿，磁的作用也能以单位体积内等效磁偶极子数(即磁化强度)来加以研究。但此时我们发现，要在麦克斯韦方

程中引入附加的磁源。可以有两种同样有效的数学模型：磁荷模型和安培电流模型。这两种模型都要讲到，并且分析了它们的不同之处。虽然，磁荷模型缺乏物理基础(也就是说，磁荷从未为人所发现)，但是它不但在真空中能给出完全正确的结果，而且在物质中也能导出与另一种模型完全一致的结论。何况，仅就作为数学模型来说，它还具备一个优点，即与电荷系统完全相似，常常使人通过类比便能得到许多磁场的解答。实际上，正是由于后面这种原因，我们在此将之引出。本章还讨论了关于外加场对物质影响的组成关系式，并且详细地阐述了介电系数和磁导率的概念。

第八章阐述电磁功率的概念，它把静态场的研究和时变场的研究衔接起来。运用洛伦兹力定律和麦克斯韦方程组，导出了表述一般时变电磁系统内能量平衡关系的坡印亭定理。并从所得到的电磁能和功率表示式演述了一些结论，然后以几个静态场的例子来加以说明。

第九章正式开始研究时变场。原先研究静态系统时基本场定律中被略去的时间导数项，现在必须保留下来。时变电场和磁场之间出现的直接耦合，引起了新的复杂情况。不过，本章的研究内容仅限于慢变化的场量，因而我们能够把这个困难减少到最低限度，使得纯静态系统顺利地过渡到低频(准静态)系统。准静态场有两个显著特点：(1)一般说来，时变场可以从较为简单的静态解中获致(它们之间的关系是平稳而连续的)；(2)准静态(或称低频)场理论概括了所有集总电路理论的内容。不但如此，电路寄生元件的出现以及频率较高时分布电路的最终形式，都直接起源于场理论，只不过频率高于准静态场的频率范围而已。正是为了解决这类问题，我们讨论了正规的幂级数解法，以频率($\omega=2\pi f$)的幂级数求解电磁场。由于集成电路越来越需要更为新颖的设计，这种方法现时变得更有意义了。

我们讨论电磁波是从第十章讲述无耗媒质中的横电磁(TEM)波开始的。TEM场可以分成两部分：一是纯粹横向和静态的矢量部分，它仅随横坐标(x, y)变化，与 z 和 t 无关；另一部分是完全独立的标量波，它仅与 z 和 t 有关。由于每个TEM场的横向矢量部分服从于业已熟悉的静态场定律，故只有后一标量波与 z 和 t 的依从关系才是陌生的。我们随即知道，能维持TEM场的各种结构全都属于理想导体传输线系统这一大类，而TEM场的标量波部分就是沿这类传输线传播的电压和电流波。在这里，无耗传输线理论的阐述简明地引出行波和驻波(时域及频域)以及它们的反射和传输特性(频域)，这些内容是本书其余各章讨论波动的基础。

第十一章继续研究无耗媒质中的均匀平面电磁波。与静态场相仿，先从一般的波动解讲起，接着列举一些各类边界上反射和透射的例子，既有均匀平面波垂直入射的情况，也有斜入射的情况。平面波斜射到平面边界的反射和透射(或折射)，引出无耗媒质内的横电(TE)和横磁(TM)非均匀平面波(或称慢波)。此外，并给出表示为空间坐标的一阶指数关系的麦克斯韦方程组最一般的解，来对非均匀(和均匀)平面波特性和进行更直接的研究。本章最后导出无耗矩形波导内所出现的一般 TE_{mn} 和 TM_{mn} 模式。首先证明，波导中的场是由平面波在波导壁上多次反射所形成的。然后给出另一种更直接的方法，以确定矩形波导中的模式。这种方法以麦克斯韦方程组的通解为基础，并与以前在直角坐标中求拉普拉斯方程静态场解(在第五章)所用的方法大致相仿。这里，我们再次看到，存在于麦克斯韦方程组一切解中的内在相似性。为了完整起见，附录

四(在本书末尾)简略地讨论了有耗(色散)媒质中均匀平面波的特性。

本书以第十二章讨论的一个实际偶极子天线的辐射场及其特性作为结束。偶极子辐射场可由滞后位概念和波以有限速度传播时产生的时间延迟效应推导出来。当我们察觉,在阐述静态场理论时,早已用过的同一标量电位和矢量磁位现在又一次帮助我们分析纯粹动态的辐射场,且偶极子辐射场的低频(及直流)特性可以蜕变为我们以之作为研究电磁学的开始的准静态(及静态)场;真可以说是周而复始了。本章最后,简略地研究偶极子阵和它们的辐射和绕射特性,作为我们对经典电磁场理论的结束。

目 录

第一章 场和场论的引言	1
1.1 场的类型	1
1.2 典型的场特性	1
1.2.1 场的方法——温度场举例	2
1.3 电磁场、电磁能和电磁波的初步论述	4
第二章 自由空间中的电磁场定律	7
2.1 基本假设和定义	7
2.2 电荷密度和电流密度	9
2.3 假设 IV——自由空间中的场方程组	11
2.3.1 线积分、面积分和体积分	12
2.3.2 场方程组的物理意义	15
2.4 积分场定律的应用	18
2.4.1 点电荷的场	18
2.4.2 线电荷的场	19
2.4.3 线电流的场	20
2.5 小结和结论	22
2.6 参考文献	22
习题	23
第三章 矢量分析	26
3.1 标量和矢量	26
3.2 矢量的加法和减法	26
3.3 正交坐标系	27
3.3.1 笛卡儿坐标	28
3.3.2 圆柱坐标	29
3.3.3 球坐标	31
3.4 标量积或点积	32
3.5 矢量积或叉积	34
3.6 线积分、面积分和体积分	37
3.6.1 微分长度、面积和体积	37
3.6.2 线积分的计算	41
3.6.3 面积分的计算	44
3.6.4 体积分的计算	47
3.7 标量场的梯度和方向导数	48
3.7.1 梯度的定义	48
3.7.2 梯度的特性和举例	49
3.7.3 梯度的计算	52
3.8 散度和高斯定理	53

3.8.1 定义和计算	53
3.8.2 散度的特性和举例	58
3.8.3 高斯定理	59
3.9 旋度和斯托克斯定理	60
3.9.1 定义和计算	60
3.9.2 旋度的物理特性——旋度计	65
3.9.3 旋度的数学特性——斯托克斯定理	68
3.10 小结和结论	70
3.11 参考文献	71
习题	71
第四章 微分场定律	74
4.1 自由空间中的微分场定律	74
4.1.1 散度关系	75
4.1.2 旋度关系——麦克斯韦方程	75
4.1.3 微分场定律的意义	76
4.2 面电荷密度与面电流密度	77
4.3 边界条件	79
4.3.1 法线分量不连续性	79
4.3.2 场的切线分量	81
4.3.3 边界条件的意义	82
4.4 微分场定律的某些直接应用	82
4.4.1 球形电荷云	82
4.4.2 电荷壳	85
4.4.3 电流圆柱	86
4.4.4 电流壳层	89
4.5 导体中的电磁场	91
4.5.1 导体材料的宏观模型	91
4.5.2 导体中的微分定律	91
4.6 “场方法”的预习——某些数学上可成立的静态场	92
4.6.1 点电荷场	92
4.6.2 均匀电场	93
4.6.3 均匀磁场	94
4.7 小结和结论	95
习题	96
第五章 静态场(一)	99
5.1 静态场定律	99
5.2 静电场	100

5.2.1	已知固定电荷的库仑场	100
5.2.2	静电场的举例	103
5.2.2.1	电偶极子	103
5.2.2.2	电荷环	105
5.2.2.3	半圆电荷环	108
5.3	标量位的微分方程	109
5.3.1	泊松方程和拉普拉斯方程	109
5.3.2	泊松方程的特解	110
5.3.3	齐次解的必要性	111
5.4	拉普拉斯方程的物理特性	112
5.4.1	线栅模拟	112
5.4.2	弹性膜模拟	115
5.5	拉普拉斯方程的数学特性	117
5.5.1	极大值和极小值定理	117
5.5.2	唯一性定理	117
5.6	直角坐标系中拉普拉斯方程的解	119
5.6.1	平凡解	120
5.6.2	一般解	120
5.6.3	二维解	122
5.7	直角坐标系中静电场的举例	123
5.7.1	平行板电容器	123
5.7.2	电阻的矩形模型	126
5.7.3	矩形导电片	129
5.7.4	矩形空气槽	134
5.7.4.1	正弦激励	136
▶5.7.4.2	均匀激励	138
▶5.7.4.3	任意激励	141
5.8	小结和结论	142
	习题	143
第六章	静态场(二)	147
6.1	圆柱坐标系中拉普拉斯方程的二维解	147
6.1.1	平凡解	147
6.1.2	一般解	149
6.2	球坐标系中拉普拉斯方程的解	153
6.2.1	平凡解	153
6.2.2	一般解	154
6.3	拉普拉斯方程解的总结	156
6.4	静电场举例	157
6.4.1	导体球内的静电偶极子	157
6.4.1.1	未充电球壳	157
6.4.1.2	充电球壳	161
6.4.1.3	壳内任意电荷分布	163
6.4.2	均匀场中的导体球	165
6.4.3	均匀电流中的导体圆柱	169

6.4.3.1	情况A: $\sigma_1 = \sigma_2$	171
6.4.3.2	情况B: $\sigma_2 = 0 (\sigma_1 > 0)$	171
6.4.3.3	情况C: $\sigma_2 = \infty (0 < \sigma_1 < \infty)$	173
6.4.3.4	情况D: σ_1 和 σ_2 为一般值	175
▶6.4.4	具有边缘效应的圆形电阻	175
6.4.4.1	导体内和源内的场	176
6.4.4.2	外面的(边缘)场	177
6.5	静磁场	180
6.5.1	磁矢量位	180
6.5.2	已知固定电流的磁场	181
6.6	标量磁位	184
6.6.1	V' 内的电流——特解	184
6.6.2	齐次解和标量磁位	185
6.6.3	边界条件和唯一性	185
6.7	静磁场的举例	186
6.7.1	单匝电感器	186
6.7.2	球形线圈	187
▶6.8	静电流回路的偶极层模拟	191
6.8.1	单匝电流回路	192
6.8.2	偶极层模拟	193
6.8.3	电流回路的偶极子场	196
6.8.4	密绕螺线管	198
▶6.9	远场区电位和多极子展开	202
6.9.1	零阶近似	202
6.9.2	高阶近似	203
6.9.3	多极子展开	204
6.10	小结和结论	208
6.11	参考文献	210
	习题	210
第七章	物质中的宏观场	216
7.1	物质中的微观场与宏观场	216
7.2	极化物质的宏观模型	217
7.2.1	极化的机理	217
7.2.2	极化强度	219
7.2.3	极化体电荷密度与体电流密度(体积效应)	219
7.2.4	极化表面的作用	221
7.3	电介质材料中的电磁场定律	222
7.3.1	极化物质中 $\mathbf{E}-\mathbf{P}$ 形式的场定律	222
7.3.2	物质中 $\mathbf{E}-\mathbf{D}$ 形式的场定律	224
7.4	永久极化物体的举例	225
7.4.1	永久极化板	225
7.4.1.1	情况1: 均匀极化	225
7.4.1.2	情况2: 非均匀极化	227
7.4.2	永久极化块	230

7.4.3 均匀极化球.....	231	7.8 磁荷模型.....	251
7.5 给定介电系数 ϵ 系统的举例.....	235	7.8.1 磁荷的概念.....	251
7.5.1 均匀场中均匀介电系数的球.....	235	7.8.2 磁荷与磁荷密度.....	252
7.5.2 填充均匀 ϵ 材料的平行板电容器.....	240	7.9 物质中 \mathbf{B} - \mathbf{D} 形式的场定律.....	254
7.5.3 填充非均匀 ϵ 材料的平行板电容器.....	242	7.10 磁性材料中场的举例	256
7.5.4 由多层电介质块构成的平行板电容器.....	245	7.10.1 永久磁化圆柱	256
7.6 磁化物质的宏观模型	247	7.10.1.1 应用安培电流模型.....	256
7.6.1 磁化的物理基础.....	247	7.10.1.2 应用磁荷模型.....	258
7.6.2 磁化矢量.....	248	7.11 组成关系.....	260
7.7 安培电流模型	248	7.12 小结和结论.....	263
7.7.1 安培电流密度.....	248	7.13 参考文献.....	264
7.7.2 物质中安培电流形式的场定律.....	250	习题.....	264

第一章 场和场论的引言

本书的主要目的,是把电磁理论的基本原理阐述得使一般水平的电工程系和物理系学生既在数学上容易理解,又在物理上知道它的明确含义。

我们采用的方法是演绎讲述,而不是依循历史的进程。一开始就介绍作为麦克斯韦方程组(它简要地总结了多年实验观察电磁现象的结果)的核心的一些基本假设。然后,以这些假设作为电磁学的定律,齐头并进地推演出电磁现象的数学和物理特性。讨论的过程将不断地向我们揭示出电场和磁场在理论上和特性上的固有相似性;还揭示出在电磁理论的整个适用范围内从静态场过渡到微波和辐射是顺势成章的。

正是由于使人们能一下子就看到整个电磁理论的这种能力,而不是看到表面上互不相关的各部分的集合,麦克斯韦在十九世纪中叶就从当时盛行的电力和磁力的“超距作用”这个概念转到更有效的场方法上去。历史上,电磁学的早期研究是从提出超距作用这种概念开始的,它认为作用在每个电荷或电流元上的力是其它源向它施加力的直接结果。与此相反,麦克斯韦却采纳了法拉第的倡议,法拉第首先提出电场的概念,认为在源电荷周围的媒质(他称之为以太)内的各点上存在有电场,正如出现于弹性材料中的应力和应变一样。麦克斯韦后来在1864年用他汇集的卓越的方程组,完成了对电磁场特性的数学表述。事实上,正是这些麦克斯韦方程组将成为我们学习电磁学的基础。

1.1 场的类型

我们可将场定义为给定区域内各点数值的集合,它规定了该区域内某一特定量的特性。某一点存在着多少种型式的数学量或物理量,则该点也存在着多少种类型的场量。例如在经典物理学的普通三维空间中有标量场、矢量场和张量场;在相对论的四维时空域中有四维矢量场。原则上,场的类型或区域的维数在数学上是没有限制的。然而,在经典电磁学的研究中,我们只涉及三维空间的标量场和矢量场。

人们熟悉的标量场有气体的温度和压力、海拔的高度和流体的密度。这些场分别代表一个标量函数(仅由大小来表示)在空间各点上的特性。

另一方面,典型的矢量场有重力场、流体的速度和加速度场,以及我们马上就要学到的起源于电和磁的力场。在这些情况下,各点上场是以矢量(既有大小又有空间指向)来表示的。

1.2 典型的场特性

多次实验观察证明,上节中提到的每个可以实际观察的场,其特性是受物理学的基本定律所支配的。在数学形式上,这些定律一般都可以表示为空间三个坐标和时间的微分方程,这些微分方程把我们所关心的场在某一给定点上的特性与该点上其它场和源联系起来。这里应特别注意:

这些场的特性与被讨论点所在媒质以及其邻近媒质的性质有着固有的联系。因此，人们可直接研究空间中有限区域内的场特性而无需考虑给定区域以外的情况。事实上，人们往往能求出适合于某区域内所有的可能解，从而很容易地确立适合于一系列可能出现的源分布所产生的场的固有特性。我们以后将会了解，这正是法拉第和麦克斯韦场论方法的美妙之处。

我们将会知道，为了确定由特定源分布所建立的场型，只需要查阅一下适合于该类系统的通解（例如静电场、静磁场、波导等等），然后找出一个满足给定边界条件的解。人们可以证明所获得的场将是该系统的唯一（也就是仅有）解。

上面概述的步骤就是我们准备在本书中研究电磁学所阐述的场论方法。简单地说，它仅包含三个基本步骤，即

- (1) 列出一组基本场定律；
- (2) 求出场的通解；
- (3) 利用边界条件求出场的特解。

为了用实际的场系统来说明这三个步骤的具体用法，下面我们来讨论一个简单的非电学的实例——标量温度场。

1.2.1 场的方法——温度场举例

把相距 L 的两块在 y 和 z 方向上无限伸长的恒温平行板，分别放在 $x=0$ 和 $x=L$ 处，如图 1.1 所示。这两块板间充满了均匀的导热材料，并使两板温度分别固定在 T_2 和 T_1 上。让我们求出该导热材料中各点上所出现的温度分布（也就是温度场）。

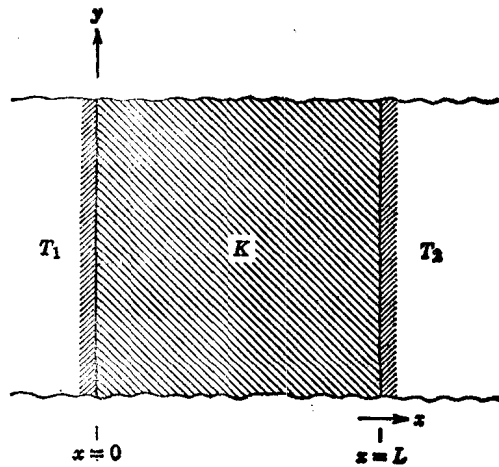


图 1.1

这个系统的基本“运动方程”（或者物理定律）是，导热体内单位面积在 x 方向上热流量 H_x （瓦/米²）与温度在同一方向上的空间导数的负值保持线性关系。更确切一点，导热体内 x 方向的热流量由下式确定：

$$H_x = -K \frac{dT}{dx} \quad \text{当 } 0 < x < L \quad (1.1)$$

式中，比例系数 K 定义为该材料的热传导率，其单位是（瓦/（米·开））。

因为材料的热传导率是已知（或可以测出的）常数，故式 1.1 中还有两个未知变量：热流量 H_x 和温度 T 。因此需要另一个物理关系式或场定律，才能全面地描述这两个变量（作为位置 x 的函数）的特性。该系统必须遵循的另一个物理定律是能量（也就是热量）守恒关系。在静态（即与时间无关）平衡情况下，系统内所有点的内在能量必须达到一个恒定值。结果，热量（或能量）在 x 方向流过导热材料时，不得有任何损失或在强度上有所减弱。这个能量守恒条件数学上可以表示为①

① 对于一维热流来说，这个关系的更一般形式是 $\partial H_x / \partial x = -\partial U / \partial t$ ，其中 U 为导热材料单位体积的总能量。

$$\frac{dH_x}{dx} = 0 \quad \text{对 } 0 < x < L \quad (1.2)$$

上述这两个相关的一阶线性微分方程,就是支配一维均匀导热系统标量温度场的基本定律。如果我们把式 1.1 代入式 1.2,我们得到一个适用于导热体内各点的二阶线性微分方程

$$-K \frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

或者更简单一点

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad \text{对 } 0 < x < L \quad (1.3)$$

式 1.3 表明标量温度场 $T(x)$ (达到平衡后) 物理上可以实现的条件,也就是说,只有满足这个方程的温度分布才能在导热体中建立起来。任何其它函数在该系统内都不满足 $T(x)$ 的基本场定律。

对式 1.3 进行两次积分,并注意加上必要的待定积分常数(在下文中 C_1 和 C_2),人们很容易求出物理上可实现的温度分布的通解。即

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad (1.4)$$

和

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad \text{对 } 0 < x < L \quad (1.5)$$

该二阶线性微分方程的解包含两个待定常数,这表明式 1.5 实际上是导热体内标量温度场的通解。

根据式 1.5 给出的该导热材料中可实现的温度场的通解,再利用边界上给定的条件,我们就能够求出适合于该系统的特解。具体地说,由图 1.1 我们看到当系统达到最终的稳态热平衡时,导热体两端面的温度必须和相邻的恒温板有同样数值。即

$$\left. \begin{array}{l} (1) \text{ 在 } x=0 \text{ 处 } \quad T_{(x=0)} = T_1 \\ (2) \text{ 在 } x=L \text{ 处 } \quad T_{(x=L)} = T_2 \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

将这两个边界条件代入式 1.5,我们将获得带有两个未知数的两个方程式

$$T_1 = C_2 \quad (1.7)$$

$$T_2 = C_1 L + C_2 \quad (1.8)$$

对这些方程联立求解,很容易得出两个待定常数的具体值

$$\left. \begin{array}{l} C_1 = -\left(\frac{T_1 - T_2}{L}\right) \\ C_2 = T_1 \end{array} \right\} \quad (1.9)$$

因此,在均匀导热媒质内建立的标量温度场通常表现为从高温到低温呈线性下降的形式。即

$$T(x) = T_1 - \left(\frac{T_1 - T_2}{L}\right)x \quad (1.10)$$

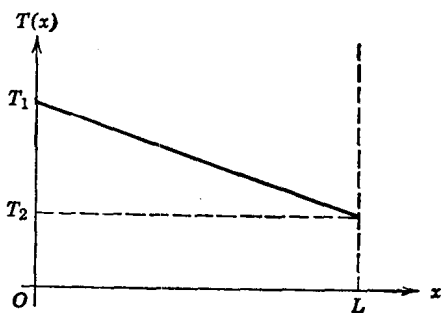


图 1.2

图 1.2 给出这种关系。为了简单地核对一下这个场解,我们可以设想一下 $T_1 = T_2$ 的情况,当稳

态平衡时, 整个系统将全部达到同一温度。而上述解是满足要求的。

现在借助于式 1.10, 在稳态平衡时流过导热体的热流量可直接由式 1.1 求出, 即

$$H_x = -K \frac{dT}{dx} = + \frac{K}{L} (T_1 - T_2) \quad (1.11)$$

简单核算表明: 确实象式 1.2 的能量守恒所要求的那样, H_x 的幅度是恒定的。此外, 当 $T_1 = T_2$ 时, 热流量 $H_x = 0$, 这又是从物理上能预料到的。

虽然通过对以上演算的检查, 使我们相信式 1.10 是一个正确的解, 但是我们还是很想知道是否有别的更奇妙的温度变化, 可以在 T_1 和 T_2 两端间建立起来。换句话说, 在这个特定系统中式 1.10 是唯一可能的温度场解吗? 也就是说, 它是唯一解吗?

唯一性问题不单单是一个理论问题, 原因是倘若我们不能确信已经找到了所有的可能解, 那么我们就永远弄清什么时候才得到正确解。另一方面, 实验表明, 如果我们将两种不同的温度加到一块金属(或其它导热体)两端, 总是出现同样的线性温度下降。人们觉察到, 自然界(至少在经典范围内)是有规律和可预期的, 因而我们可以指望得到唯一的物理解。如果我们的理论可为热流的正确数学模型, 它应该与真实世界相符合, 并给出唯一的数学解。

幸而, 证明上述温度场的唯一性并不太困难。我们以后(在第五章)将要证明, 如在包围所论区域的边界的所有各点上(例如, 这里的 $x=0$ 和 $x=L$), 标量场[本例中是 $T(x)$]的值均已确定, 式 1.3 所给微分方程——即拉普拉斯方程将给出唯一的数学解。因此, 当人们找到满足规定边界条件的拉普拉斯方程的解以后, 就不必再找了, 因为他已经得到了唯一的解。

我们在上述例子中所介绍的内容, 就是我们准备对电磁场所用的方法的实质。仿照上例, 我们首先讨论电磁学的基本定律, 随后求出物理上可实现的(或通用的)场解, 最后利用适当的边界条件定出唯一解。下节将对本书所采用的方法作一个比较详细的说明。

1.3 电磁场、电磁能和电磁波的初步论述^②

在下章正式开始对电磁学进行讨论之前, 我们先就所采用的思路和逐步展开的一些较为重要的概念作一简略概述。我们希望藉此使读者在学习本书时始终有观察事物整体联系的能力, 并望读者不致遗忘这个适用于各种场的理论。

我们对电磁场的讨论是从第二章提出电磁学的基本假设(或定律)开始的。这些假设可归纳为自由空间积分形式的麦克斯韦方程组, 它们代表了多年来对电磁现象进行实验研究的最后结果。这些方程组自 1864 年问世以来, 已有许多资料(文献)证明它们具有成功地预测电磁场特性的能力。我们将把它作为电磁场理论的基本定律, 从中推演出所有的理论结果。实质上, 本书的所有内容不过是我们对这些关系式所包括的基本内容所作的解释或具体应用。

第三章和第四章介绍必需的数学方法, 把这个理论表示成最适于作细致分析的形式。第三章讲矢量分析, 第四章讲微分形式的基本场定律。

^② 本节在初读时很快浏览即可。本节是提供对本书内容的一个连续使用时的阅读指南。为此还可参阅在前言之后的致读者中给出的更详细的提纲。

我们第一次全面详细地分析场,实际上是从第五章和第六章的自由空间中的静态场开始的,然后扩展到第七章电介质和磁性材料中的场特性。由于静电场和静磁场的独立性,人们能比较简单地、但仍是圆满地求得这类特殊电磁场的一般特性和解答。从这两种场导出的大多数基本概念(甚至许多解答)在以后更一般的时变系统中还会用到。

电磁能和功率的讨论放在第八章,它进一步完善了对场的物理特性的阐述。在这方面,特别引人注目的结果是弄清了在电路中功率是按哪种方式流动的。和电路理论导致的结论相反,场理论将证明:电功率并不是由导体内流动的电流来携带的,而是由导线外的有关空间中的电磁场来携带的。这个结论不仅在接近于电磁辐射的高频段是正确的,而且在极低频率甚至直流情况下也是正确的!

第九章是从静态场到动态场的一个桥梁,它举例说明了从静电场到低频(即准静态)场存在一个平稳的过渡。这里最有趣的事实是,低频(准静态)场理论完全能解释所有电路理论的基本特点。事实上,这也证明电路理论只不过是电磁场理论的低频近似。人们还会体会到,为什么通常用静态场方法计算其值的单个集总参数电路元件 R 、 L 、 C ,在时变电源激励时还工作得这么圆满(事实上,竟然完全能够使用)。更不用说在某些情况下,甚至直到几百兆也没有高频效应。更有一层,当电路元件确实出现高频效应时,人们必须采用更为基本的场理论才能解释它们的特性。

第十章就无耗传输线上的一维标量波(电压和电流波)这种简单情况,引出时变场的波动特性这一基本概念。在十一章,我们把波的讨论扩展到包括矢量场的运动,其形式为自由空间和矩形波导内的平面波。最后,在结尾的十二章中再扩展到出现于天线所发出的电磁辐射中的球面波。电磁波理论在各种器件中的实际应用异常众多,其中包括:信号及能量沿着双线传输线、同轴电缆、波导、慢波结构的传输;天线和天线阵的向外辐射;最后还有新近出现的由激光产生的高度相干光波的传输。

从理论上来说,波的讨论包含有耐人寻味的一点,即波作为基本场定律的解,应同样适用于经典电磁场理论所研究的整个频率范围,也就是说,高至超过可见光的 10^{15} 赫兹,低至直流的零赫兹。在我们认识到基本场定律的所有波动解,在趋向静态或直流极限时也是正确的,其中许多直接蜕化成我们早先讨论静态时所遇到过的那些场,至此,我们对电磁理论的讨论可说是完成了一个循环。

最后,为了避免人们得到这样一个印象,即改变电磁场的激励频率仅影响场响应的速率,让我们来讨论图 1.3 所示简单线圈的作用。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,当在它的两端(在 a - a' 处)加上直流电源时,它的作用就象一个简单的集总参数电阻 R 。在时变激励(交流)时,它的作用就完全不同了,且随着激励频率不同而有明显变化。在低频段,它起着简单的电感 L 的作用(如果导线的损耗足够大,那就再串上一个电阻),随着频率的提高,逐渐依次变成 LC 谐振电路,螺旋慢波结构,最后在高频段变成一个辐射天线。

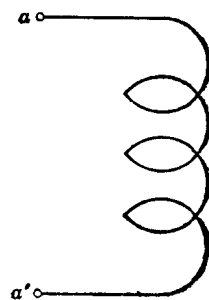


图 1.3