

四川科学技术出版社

全泽松 编著

电磁场

与电磁波



电磁场与电磁波

全泽松 编著

四川科学技术出版社
1992年·成都

(川)新登字004号

责任编辑:安小望 赵 健

封面设计:朱德祥

技术设计:杨璐璐

责任校对:何 庆

电磁场与电磁波

全泽松 编著

四川科学技术出版社出版发行

(成都盐道街三号)

新华书店重庆发行所经销

内江新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张17.625 插页4 字数370千

1992年5月第一版 1992年5月第一次印刷 印数 1—3965 册

ISBN7-5364-1975-9/TN·65

定 价: 7.80 元

前 言

电磁场与电磁波是电类各专业的技术理论基础。编写出一本深广度比较适当,较能反映这一领域内教学和科研成果的读物,是一件极为有意义的工作,也是我的夙愿。希望通过本书的出版,能对电磁场与波的知识传播作出一点贡献。

在编写中,我力图做到结构合理,层次分明,重点突出,条理清晰,把物理概念与数学工具的使用较好地结合起来,使内容与科技水平相适应,使正文与例题、习题相配合。书中列举相当数量的例题,目的在于强调基本内容和说明典型问题的分析方法。每章之后附有相当数量的习题,目的在于培养学生应用概念、原理和公式去分析、解决问题的能力。书末有习题答案,可供读者在做完习题后核对结果。此外,还有一个附录,供读者方便地查找公式。

本书从真空中的四大实验定律即库仑定律、电荷守恒定律、安培定律和法拉第电磁感应定律出发,归纳总结为真空中的麦克斯韦方程组,进而推广到介质中,得到描述电磁现象的普遍规律——介质中的麦克斯韦方程组,然后再讨论静电场、静磁场以及正弦电磁场等特殊情况。这种论述体系既吸取了习惯上以实验定律为基础的传统性论述和以麦克斯韦方程组为起点的公理性论述的优点,又弥补了它们各自的不足。

本书有较广的适用面，只要适当掌握有*号的章节内容的取舍。

由于本人水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳望广大读者批评指正。

全泽松

1990年12月于电子科技大学

2008-12

目 录

绪 论

第一章 电磁现象的基本规律

§1.1 库仑定律 电场 静电场的散度和旋度	4
1.1.1 库仑定律	4
1.1.2 叠加原理	5
1.1.3 电场	8
1.1.4 点电荷密度的数学表示——狄拉克 δ 函数	10
1.1.5 静电场的散度和旋度	12
§1.2 安培定律 磁场 静磁场的散度和旋度	17
1.2.1 电流密度	18
1.2.2 电荷守恒定律	20
1.2.3 欧姆定律	22
1.2.4 焦耳定律	25
1.2.5 安培定律	25
1.2.6 磁场 毕奥—萨伐尔定律	28
1.2.7 磁场的散度和旋度	33
§1.3 法拉第电磁感应定律	38
§1.4 麦克斯韦方程组 洛伦兹力公式	42

1.4.1	位移电流 麦克斯韦方程组	42
1.4.2	洛仑兹力公式	46
§1.5	介质中的麦克斯韦方程组 电磁性质的本构关系	47
1.5.1	介质的极化 极化电荷和极化电流密度	48
1.5.2	介质的磁化 磁化电流密度	51
1.5.3	介质中的麦克斯韦方程组	53
1.5.4	电磁性质的本构关系	55
§1.6	电磁场的边界条件	58
1.6.1	场矢量 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{B}$ 的法向分量的边界条件	59
1.6.2	场矢量 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 的切向分量的边界条件	60
1.6.3	$\mathbf{P}$ 的法向分量和 $\mathbf{M}$ 的切向分量的边界条件	63
§1.7	电磁能量 能量守恒定律	67
*§1.8	电磁动量 动量守恒定律	74
§1.9	麦克斯韦方程组的完备性	81
§1.10	电磁场的波动性 光的电磁理论	84
§1.11	电磁场的位 达朗贝尔方程	86
1.11.1	用位来描述电磁场	86
1.11.2	规范变换	87
1.11.3	达朗贝尔方程	88
习题		90

第二章 静电场

§2.1	静电场的标位及其微分方程	96
2.1.1	静电场的基本方程	96
2.1.2	静电场的标位及其微分方程	97
2.1.3	电位差	98

2.1.4	电位的边界条件	99
2.1.5	静电场的唯一性定理	101
§2.2	分离变量法	108
2.2.1	直角坐标系中拉普拉斯方程的解	109
2.2.2	圆柱坐标系中拉普拉斯方程的解	117
2.2.3	球坐标系中拉普拉斯方程的解	129
§2.3	电象法	139
2.3.1	平面镜象	140
2.3.2	球面镜象	150
2.3.3	圆柱面镜象	156
*§2.4	格林函数法	163
2.4.1	格林函数	163
2.4.2	用格林函数表示边值问题的解	164
2.4.3	用格林函数求边值问题	168
*§2.5	复变函数法	171
2.5.1	复电位函数法	171
2.5.2	常用的解析函数	175
2.5.3	保角变换法	184
2.5.4	常用的变换	186
*§2.6	有限差分法	194
§2.7	电容和部分电容	199
2.7.1	电容器和电容	199
*2.7.2	电位系数和电容系数	200
*2.7.3	部分电容	202
§2.8	静电场能量	205
2.8.1	静电场的能量	205
2.8.2	点电荷系的相互作用能量	206
2.8.3	带电导体系的能量	207

*2.8.4 电荷分布在外电场中的能量	207
*§2.9 静电力	210
习题	216

第三章 静磁场

§3.1 稳恒电流场与稳恒电场	225
§3.2 静磁场的矢位及其微分方程	231
3.2.1 静磁场的矢位	231
3.2.2 静磁场矢位的微分方程	232
3.2.3 矢位 A 的边界条件	233
3.2.4 静磁场的唯一性定理	236
§3.3 静磁场的标位及其微分方程	250
§3.4 磁象法	264
§3.5 电感	272
§3.6 磁场能量和力	278
3.6.1 磁场的能量	278
3.6.2 电流回路系统的能量	279
*3.6.3 电流分布在外磁场中的能量	280
*3.6.4 磁场力	283
*§3.7 似稳场	289
3.7.1 似稳条件	289
3.7.2 似稳场方程	291
3.7.3 线型导线中的电路方程	294
习题	296

第四章 电磁波的传播

§4.1 正弦电磁场	301
------------------	-----

4.1.1	正弦电磁场的复数表示法	301
4.1.2	坡印廷定理的复数形式	303
4.1.3	亥姆霍兹方程	306
§4.2	电磁波在非导电媒质中的传播	307
§4.3	电磁波在导电媒质中的传播	315
§4.4	波的偏振	323
*§4.5	电磁波在等离子体中的传播	327
§4.6	电磁波在介质分界面上的反射和折射	339
4.6.1	反射、折射的基本规律	341
4.6.2	菲涅耳公式	342
4.6.3	功率反射系数和功率透射系数	349
4.6.4	布儒斯特角	352
4.6.5	全反射 临界角	352
§4.7	电磁波在导体面上的反射和折射	359
*§4.8	介质的频率色散	367
*§4.9	群速度	370
§4.10	电磁波在波导管中的传播	375
4.10.1	理想导体的边界条件	375
4.10.2	矩形波导管中的电磁场	376
4.10.3	截止频率	381
*4.10.4	波导管中的传输功率	385
*4.10.5	衰减	387
§4.11	谐振腔	389
4.11.1	谐振腔内的电磁场	389
4.11.2	谐振频率	394
*4.11.3	品质因数	395
习题		397

第五章 电磁波的辐射、散射和衍射

§5.1 达朗贝尔方程的解 推迟位	405
§5.2 电流元的辐射	410
5.2.1 电流元的矢位	410
5.2.2 电流元的辐射场	411
§5.3 对称振子天线辐射	416
5.3.1 天线上的电流分布	416
5.3.2 半波天线的辐射	417
*§5.4 天线阵	422
§5.5 电流环的辐射	425
*§5.6 电磁波的散射	429
*§5.7 电磁波的衍射	432
5.7.1 衍射问题	432
5.7.2 基尔霍夫公式	433
5.7.3 小孔衍射	434
习题	444

*第六章 狭义相对论

§6.1 爱因斯坦的基本假设	44
6.1.1 伽利略变换	447
6.1.2 伽利略相对性原理的困难	449
6.1.3 爱因斯坦的选择	450
§6.2 洛伦兹变换	451
6.2.1 间隔和间隔不变式	451
6.2.2 洛伦兹变换式	453
§6.3 相对论的时空性质	456

6.3.1	时空结构	456
6.3.2	因果关系对信号传递速度的限制	457
6.3.3	同时的相对性	458
6.3.4	运动时钟的延缓	459
6.3.5	运动尺的缩短	461
6.3.6	相对论的速度变换公式	462
§6.4	物理规律协变性的数学形式	464
6.4.1	洛伦兹变换的四维形式	464
6.4.2	四维张量	466
6.4.3	张量代数	469
6.4.4	四维矢量微商算符	470
6.4.5	物理规律的协变性	472
§6.5	电磁规律的四维形式	473
6.5.1	四维电流密度及四维形式的连续性方程	473
6.5.2	四维位矢量及协变形式的电磁位方程	476
6.5.3	四维电磁场张量及协变形式的麦克斯韦方程组	478
6.5.4	四维洛伦兹力密度矢量	482
§6.6	电磁场的变换关系	484
§6.7	平面电磁波的相位不变性 四维波矢量	490
§6.8	相对论力学	493
6.8.1	四维动量矢量	493
6.8.2	相对论动力学方程	495
6.8.3	质速关系式和动能公式	499
6.8.4	质能关系式	500
6.8.5	带电粒子在电磁场中的运动方程	501
§6.9	运动带电粒子的电磁场	502
6.9.1	李纳-维谢尔位	502

6.9.2 运动带电粒子的电磁场	505
6.9.3 非相对论运动带电粒子的辐射	510
习题	512
附录 矢量和张量	516
习题答案	526
主要参考书目	551

绪 论

“电磁场与电磁波”是在物理学的基础上，进一步系统地研究电磁场的基本属性、运动规律以及它与带电物质的相互作用。

在生产实践和科学研究中，存在着大量与电磁现象有关的问题。例如，电机、电力工程、雷达、无线电技术、电磁探矿、粒子加速器、微波能应用等，都涉及到电磁场与波的问题。因此，掌握好电磁场与波的基本理论，有助于更好地解释世界和改造世界。

电磁理论是人类对电磁现象进行长期观察、实验和在生产实践的基础上产生、发展起来的。18世纪中叶以后，在工业生产发展的推动下，对自然科学的实际探索使电磁学得到了较快的发展。人们研究了静电、静磁和电流等现象，积累了大量的实验资料，总结出了适用于各个特殊范围的、相互独立的实验定律，如库仑定律、毕奥——萨伐尔定律等。但是，电磁学的重大进展却是在人们认识到电现象和磁现象之间存在着密切的联系之后。1820年，奥斯特发现了电流的磁效应；1831年，法拉第发现了著名的电磁感应现象。至此，电和磁之间的内在联系才开始被人们所认识。这些研究成果后来被广泛应用于生产实践，推动了电磁理论的进一步发展。1864年，麦克斯韦系统地归纳、推广了上述各个实验

定律，用统一的理论概括了电磁场的运动规律，总结出了麦克斯韦方程组，从而奠定了电磁理论的基础。同时，麦克斯韦还从他的理论出发，提出了“光的电磁理论”，并预言了电磁波的存在。这是物理学上的一个伟大成就，也是人类认识自然的一个巨大进展。1888年，赫兹用实验证实了电磁波的存在，因而也证实了麦克斯韦理论的正确性。在麦克斯韦理论的指导下，电磁波的研究和应用逐渐发展起来。到今天，电磁波的应用已广泛而深入地渗透到科学的各个领域，形成了许多专门的学科。在物理学发展史上，这是从实践上升为理论，再以理论指导实践的一个典型范例。

在麦克斯韦方程组被总结出来之后，许多人认为物理现象的基本规律已完全掌握，剩下的只是把这些基本规律应用到各种具体问题上，解方程、计算的工作了。但这种看法后来被新的实验事实所否定。1905年，爱因斯坦提出了崭新的时空观念，发表了“论运动物体的电动力学”一文，创立了狭义相对论，使电磁理论在新的时空理论基础上，发展成更加完整的、适用于一切惯性参考系的理论。狭义相对论是研究高速运动现象的有力工具，是现代物理学发展的基础理论之一。

本世纪20年代，量子理论建立以后，电磁理论与量子理论结合起来，形成一门新的学科——量子电动力学。它是研究微观世界中电磁现象的有力工具。可见，客观世界的变化运动永无止境，人们在实践中对于真理的认识不会完结。业已发现的定律、方程等，不过是在一定范围和一定条件下起作用的相对真理。它们仅仅标志着整个认识过程中的一定发展阶段。

随着科学技术的不断发展，电磁学理论的应用前景必将十分广阔，电磁理论本身也将得到丰富和发展。

本书从真空中的四大实验定律——库仑定律、电荷守恒定律、安培定律以及法拉第电磁感应定律出发，归纳总结为真空中的麦克斯韦方程组；进而推广到介质中，得到电磁场运动的一般规律；然后讨论特殊情形。内容包括：电磁现象的基本规律，静电场，静磁场，电磁波的传播、辐射、散射和衍射以及狭义相对论等。

但愿通过本书的学习，能够使读者：（1）掌握电磁场的基本属性和运动规律；（2）掌握分析和处理电磁场基本问题的能力，为今后的深造、生产实践和科学研究打下良好的基础；（3）通过狭义相对论的学习，加深对电磁场本质的理解和认识。

第一章 电磁现象的基本规律

本章主要研究描述电磁现象的基本规律。首先，我们从真空中的基本实验定律出发，建立起真空中的麦克斯韦方程组，继而将其推广到介质中，得到介质中的麦克斯韦方程组，并导出电磁场的边界条件。然后研究电磁场的能量、动量，最后讨论麦克斯韦方程组的完备性、电磁场的波动性以及电磁场的位。

§ 1.1 库仑定律 电场 静电场的散度和旋度

1.1.1 库仑定律

库仑定律是从实验中总结出的描写真空中两个静止点电荷 q_1 和 q_2 之间相互作用力的定律，其数学表达式为

$$\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{q_1 q_2 \mathbf{R}_{12}}{4\pi\epsilon_0 R_{12}^3} \quad (1.1.1)$$

式中 $\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2}$ 表示点电荷 q_1 作用在点电荷 q_2 上的力， $\mathbf{R}_{12} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ 表示由 q_1 指向 q_2 的距离矢量，如图1.1所示， $R_{12} = |\mathbf{R}_{12}| = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{1/2}$ ， ϵ_0 称为