

理论物理学基础教程丛书

蔡圣善 朱耘 编著

经典电动力学



复旦大学出版社

理论物理学基础教程丛书

经典电动力学

蔡圣善 朱 耘 编著

复旦大学出版社

04967:

经典电动力学

复旦大学出版社出版

新华书店上海发行所发行

复旦大学印刷厂印刷

字数 502千字 开本 850×1168 1/32 印张 20

1985年9月第一版

1985年9月第一次印刷

印数: 1—9,000

书号: 13253·019 定价: 4.90元

内 容 提 要

本书是复旦大学物理系编写的《理论物理学基础教程丛书》中的一本,它系统地讲述经典电动力学的基本概念、原理以及处理电磁体系的常用方法。第一、二章阐述电动力学的基本原理和对称性质;第三~五章讨论静态场,着重介绍静态场问题的各种解法;第六章开始转入讨论动态场,六~十章阐述似稳场、超导电动力学、电磁波传播、波导和等离子体电动力学;第十一章讨论狭义相对论和四维形式的电动力学;第十二、十三章讲述电磁波的辐射、散射、衍射;第十四章介绍电磁场的拉格朗日函数;最后,第十五章专门介绍关于麦克斯韦理论的讨论。为配合教学的需要,每章附有一定数量的例题和习题。

本书可作为理工科大学和高等师范大学物理专业、无线电技术专业以及相近的物理类专业的教材或参考书,也可供研究生、教师和科研工作者参考。



序

《理论物理学基础教程丛书》包括《经典力学》、《数学物理方法》、《经典电动力学》、《量子力学》和《统计物理学》五册,这是根据我们多年来在复旦大学物理系教学实践的基础上编写的。我们在编写过程中力求注意以下几个问题:

1. 理论联系实际。各门学科虽有自身的“纵向”逻辑体系,但这种体系的严格性不宜过分强调,以致相对忽视了各种具体的体系和物质属性的综合分析。物理讲的是“物”之“理”,我们一定要避免有“理”无“物”的毛病。加强各门学科之间的“横向”联系,则是克服这种毛病的有效方法之一。

2. 在确保概念正确的基础上加强计算的训练。事实上,理论物理的正确概念只有通过大量计算才能真正学到手。经验告诉我们,必须大声疾呼地对我们的学生说:要动手算,多算算,算了再多想想。

3. 反映科学的新进展。这一点要在基础课程里做到是相当困难的,但是又非做不可。为此目的,我们删除了一些较陈旧的内容,对那些最基本、最重要而又相当成熟的内容,则努力注意体系的改革和观点的提高,同时在保证准确性和稳定性的前提下,适当增加新的内容,以较快和较多地反映近代物理学的发展。

4. 我们希望适应性广一些。这套教程希望不仅可以作为大学生的教学用书,而且可以作为教师和研究生的参考书。为此目的,我们在编写过程中努力做到简明扼要,条理清楚,使读者查阅起来感到比较实用和方便。

这套教程在复旦大学出版社的支持下,将陆续与读者见面,但

· 14 ·

HAZ 96/10 07

限于我们的水平，书中的缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

复旦大学物理系理论物理教研室

1984年4月

作 者 的 话

本书是根据作者在物理系多年讲授这门课程的讲义修改补充而成的。

在教学实践中我们体会到,一本好的教材不仅是一个好的“导游”,它简捷地把学生带进丰富多采的物理世界的某个领域,引人入胜地向学生们叙述这个领域的“名胜古迹”,让他们从这里进一步领略大自然的奥妙和奇迹;而且它更是探索者的向导和挚友,因为它所面对的毕竟不是“游客”,而是一批充满着学习热情、求知欲极其旺盛的青年学生,更确切地说是一批兴致勃勃的未知世界的探索者。教学的目的不是让他们陶醉于已知世界的美景之中,而是保持并进一步激发起他们的热烈的求知欲望和理想,激励他们去钻研各种问题,勇敢地去思考、去探索、去追求、去创造。

诚然,担当这样的“导游”并不容易,而成为一个探索者的向导和挚友更加艰难,但无论如何这应当是我们的目标。为此,我们首先在本书中尽可能地介绍足够的现代物理题材,让学生多接触一些新奇的、与现代物理密切相关的概念和论题,以期引起学生的注意和兴趣。例如,在§1.9、§1.10、§2.6、§2.8、§2.9等章节中,我们从电动力学角度探讨了磁单极子及其电荷量子化;在规范变换不变性的讨论中涉及了规范场的概念,这些是现代物理中的前沿论题;在这同时对对偶场以及 Q 、 P 、 T 守恒定律作了讨论。再如,§2.7节叙述了阿哈朗诺夫-玻姆效应,对矢势 $\mathbf{A}$ 的物理本质作了分析,这个效应的涵义极为深刻,曾使许多人颇受震惊。电磁场角动量在一般教科书中常被忽略,其实这是个很值得讨论的题材,我们在全书的有关章节中都涉及了,并在§2.4节中,半经典地导出

了光子的自旋。还譬如,我们从电动力学角度描述了超导电动力学和等离子体电动力学这两个领域的一些基本物理规律。这两个领域近几十年中取得了很大进展,在应用方面前景广阔,之所以撰写这两章还出于我们希望教材能更多地联系实际的想法。凡是与实际联系较为密切的内容我们都作适当的加强。例如第八章关于电磁波传播的内容作了一定的充实;第九章波导问题本身是很实际的课题,其中我们专门讨论了多连通波导(§9.5),谐振腔频率的漂移和 Q 值的计算方法(§9.7),以及腔体频率微扰理论(§9.8)等。再如,对切伦可夫辐射我们作了详细的分析,因为这是一个极为普遍的现象,而且有着很重要的应用。电磁波的散射和衍射无论在应用物理(或实验物理)方面还是理论物理中都很重要,我们把他单独列为一章。我们在选材方面的第三个想法是适当选取能开阔学生思路、扩展学生眼界的题材,希望学生从中受到启发,给学生留下“悬念”。为此,我们尝试地写了最后一章,即第十五章,对麦克斯韦理论作了专门讨论,以便对此理论有个全面的概括了解。在§15.6中对光子质量不为零可能引起的物理效应我们也作了讨论,以期加深学生对库伦定律的平方反比性的理解和让学生看到一种物理理论是如何与实验物理紧密相关。总之,我们希望这些内容能活跃学生的思想。

在本书内容的叙述上,我们力图把物理模型的直观性和数学工具的简洁性结合起来,充分地让学生发挥他们已掌握的数学知识和技能。例如,复变函数、格林函数、特殊函数、数理方程、矩阵、张量分析等。不回避必要的数学工具,既可使叙述简洁明了又能提高学生的演绎能力和抽象思维能力,后者也许更为重要,因为从某种意义上说,这是基础理论课程应当承担的义务。为了便于学生自学和加强对概念的理解,公式的推导过程尽可能详细,每章都有一定数量的例题和习题,并且对大部分的习题在本书的最后给出了答案。

应当说明,我们所作的这些努力最多也只能算是一种启发性的尝试,尝试的目的旨在抛砖引玉。

上完本书的全部章节需要 90 个学时。但我们考虑到各方面的需求,在章节内容的安排上有一定的独立性,因此教师可根据实际情况选择有关的章节进行讲授。

本书的许多内容曾在 82 年、83 年召开的全国高等师范院校电动力学讨论会上讲授过,与会的各地同事们向我们提出了宝贵意见和表达了他们对本书修改后出版的热切期望。如果本书对大家有所启发和裨益,这也就了却了我们的心愿,并表达了我们的谢意。我们还要感谢参加过电动力学教学小组的同志和物理系各届学生,他们的认真讨论和质疑使我们受益非浅。

本书的单位制原先采用高斯制,在付印前,国务院发布统一实行法定计量单位命令后,我们立即全部改为国际单位制。由于时间仓促,加上作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,乞望读者批评指正。

1984 年 4 月于复旦大学

目 录

序

作者的话

第一章 麦克斯韦方程组

§1.1 库仑定律 静电场的散度和旋度	1
§1.2 安培定律 静磁场的散度和旋度	10
§1.3 法拉第定律	17
§1.4 麦克斯韦方程组和洛伦兹力	20
§1.5 介质中的麦克斯韦方程组 电磁性质的本构关系	24
§1.6 交界面上麦克斯韦方程组的形式	29
§1.7 宏观麦克斯韦方程组的微观基础	32
§1.8 麦克斯韦方程组的完备性	37
§1.9 对偶场	40
§1.10 磁单极的奇异势	42
习题	44

第二章 电磁场的守恒定律和对称性

§2.1 电磁场的能量守恒和转化定律	47
§2.2 电磁场的动量守恒定律	50
§2.3 电磁场的角动量守恒定律	56
§2.4 光子的自旋	59
§2.5 介质中的电磁能量和动量守恒定律	61
§2.6 规范不变性与磁单极的奇异弦	64
§2.7 阿哈朗诺夫-玻姆(Aharonov-Bohm)效应	72
§2.8 电荷的量子化	75

§2.9 CPT 反演不变性	79
习题	84

第三章 导体和电介质静电学

§3.1 静电问题	86
§3.2 导体静电学	88
§3.3 导体系的能量、固有能和相互作用能	90
§3.4 静电体系的稳定性问题	95
§3.5 格林互易定理	96
§3.6 导体表面所受的静电力	98
§3.7 电介质静电学	101
§3.8 极化率的微观模型	104
§3.9 晶体电介质	107
§3.10 介电常数增加的效应	109
§3.11 混合物介电常数的立方根相加律	111
§3.12 关于作用在介质上的静电力的讨论	114
习题	118

第四章 静电场边值问题的解法

§4.1 唯一性定理	120
§4.2 镜像法	121
§4.3 特解法	131
§4.4 保角映像法	142
§4.5 格林函数法	146
§4.6 多极矩法	159
§4.7 多极矩同外场的相互作用	166
习题	168

第五章 静磁场

§5.1 稳定电流分布的普遍定理	172
------------------------	-----

§5.2 磁场的矢势方程和边界关系	177
§5.3 静磁场的唯一性定理	178
§5.4 二维问题	180
§5.5 旋转对称的三维问题	183
§5.6 磁偶极子	187
§5.7 磁介质中的磁场	195
§5.8 永久磁铁在介质中激发的磁场	201
§5.9 金属磁化的半经典理论	202
§5.10 铁磁介质的外斯理论	207
§5.11 作用在磁介质上的静磁力	210
习题	210

第六章 似稳场

§6.1 似稳条件	218
§6.2 似稳场方程 场的扩散	215
§6.3 线型导线中的电工学方程	216
§6.4 导体表面层内的场分布 趋肤效应	218
§6.5 反常趋肤效应	221
§6.6 地球磁场的起源	225
习题	228

第七章 超导电动力学

§7.1 超导体的电磁性质	229
§7.2 伦敦方程	232
§7.3 超导体中的电流分布	236
§7.4 居间态	239
§7.5 磁通俘获和磁通量子化	243
§7.6 皮帕非定域理论	245
§7.7 超导电性的介电常数模型	250
习题	254

第八章 电磁波的传播

§8.1 电磁波在非导电介质中的传播	256
§8.2 波的偏振和偏振矢量	260
§8.3 电磁波在导电介质中的传播	263
§8.4 电磁波在等离子体中的传播	267
§8.5 各向异性介质中的单色平面波的结构	271
§8.6 电磁波在介质面上的反射和折射	275
§8.7 全反射	280
§8.8 电磁波在金属面上的反射和折射	284
§8.9 电磁波在非均匀介质内的传播	289
§8.10 介电常数的色散定律	295
§8.11 介质的色散模型	298
§8.12 群速度	302
习题	305

第九章 波导和谐振腔

§9.1 波导管中的场方程和边界条件	307
§9.2 矩型波导	311
§9.3 圆柱型波导	316
§9.4 波导中的能流和能量的损耗	318
§9.5 多连通截面波导	323
§9.6 谐振腔	328
§9.7 谐振腔的品质因子和本征频率漂移	332
§9.8 谐振腔频率的微调	336
习题	339

第十章 等离子体电动力学

§10.1 等离子体的基本特征	341
§10.2 基本方程和广义欧姆定律	344

§10.3	磁场的冻结和扩散效应	351
§10.4	$E \times B$ 漂移和抗磁性漂移	354
§10.5	无作用力磁场与丝状电流	356
§10.6	箍缩效应	358
§10.7	电磁流体的不稳定性	360
§10.8	等旋定律	364
§10.9	磁流体力学波和磁声波	366
§10.10	等离子体振荡和电子等离子体波	371
§10.11	等离子体的介电常数和朗道阻尼	375
习题		379

第十一章 狭义相对论和相对论电动力学

§11.1	爱因斯坦的基本假定	380
§11.2	洛伦兹空间和洛伦兹变换	385
§11.3	相对论时空性质	389
§11.4	物理规律协变性的数学形式	397
§11.5	协变形式的麦克斯韦方程	402
§11.6	对偶场张量	407
§11.7	电磁场的变换公式	408
§11.8	电磁场的不变量	412
§11.9	电磁场的能量、动量和角动量的协变形式	414
§11.10	介质中麦克斯韦方程的协变形式	418
§11.11	相对论力学	422
习题		428

第十二章 电磁波的辐射

§12.1	推迟势	432
§12.2	多极辐射	436
§12.3	多极辐射的对偶性	445
§12.4	线型天线辐射	449

§12.5 天线阵	452
§12.6 李纳-维谢尔势	457
§12.7 非相对论运动带电粒子的辐射	462
§12.8 韧致辐射	463
§12.9 带电粒子作圆周运动时的辐射	465
§12.10 运动带电粒子辐射的频谱分析	468
§12.11 切伦可夫辐射	473
§12.12 跃迁辐射	481
§12.13 辐射阻尼和辐射角动量损失	485
§12.14 振子辐射谱线的自然宽度	488
习题	491

第十三章 电磁波的散射和衍射

§13.1 自由电子对电磁波的散射(汤姆逊散射)	494
§13.2 束缚电子对电磁波的散射 偶极求和规则	497
§13.3 多电子体系对电磁波的散射	502
§13.4 电磁波在宏观物体上的散射	504
§13.5 玻恩近似法	508
§13.6 光学定理	511
§13.7 电磁波在晶体上的衍射	514
§13.8 基尔霍夫衍射理论	516
§13.9 夫琅和费衍射和非涅耳衍射	520
§13.10 超声波对电磁波的衍射	524
习题	528

第十四章 电磁体系的拉氏形式

§14.1 作用量原理	530
§14.2 电磁场中的带电粒子的拉格朗日函数和哈密顿函数	533
§14.3 准确到二级的带电粒子系的拉格朗日函数	539
§14.4 电磁场的拉格朗日函数	544

§14.5 电磁场的哈密顿函数	550
§14.6 电磁场的量子性	552
习题	555

第十五章 关于麦克斯韦理论的若干讨论

§15.1 阿伯拉罕-洛伦兹模型	557
§15.2 经典电动力学的适用界限	563
§15.3 匀速运动电荷的电磁场的能量、动量的非协变性	567
§15.4 彭加勒张力张量	570
§15.5 改进麦克斯韦理论的尝试	572
§15.6 光子的静质量	578
§15.7 电动力学和电荷守恒定律	583

附 录

一、矢量公式	587
二、并矢公式	588
三、曲线坐标中的矢量微分公式	589
四、单位制换算表	591
五、狄拉克 δ 函数与电荷分布	594
六、主值定理	596
七、勒让德球函数的常用公式	598
八、贝塞尔函数的常用公式	600
九、镜像法典型问题一览表	603
十、重要的物理常数表	607

习题答案和提示

第一章 麦克斯韦方程组

本章将从基本的电磁实验定律出发建立真空中的麦克斯韦方程组。并从微观角度论证了存在介质时的麦克斯韦方程组的形式及其电磁性质的本构关系。继而给出麦克斯韦方程组在边界上的形式。最后讨论方程组的完备性和电磁场的对偶性。

§1.1 库伦定律 静电场的散度和旋度

1. 库伦定律

库伦定律是描写真空中两个静止点电荷 q_1 和 q_2 之间相互作用的定律,其数学表达式为

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{q_1 q_2 \mathbf{R}_{21}}{4\pi\epsilon_0 R_{21}^3}, \quad (1.1)$$

式中的符号如图 1.1 所示, $\mathbf{R}_{21} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ 表示电荷 q_1 到 q_2 的矢径; $\mathbf{F}_{21}$ 表示电荷 q_2 受到 q_1 的作用力。同理, q_1 受到 q_2 的作用力 $\mathbf{F}_{12}$ 是

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{12} &= \frac{q_1 q_2 \mathbf{R}_{12}}{4\pi\epsilon_0 R_{12}^3} \\ &= -\mathbf{F}_{21}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

库伦定律的内容已为大家熟知。这里要着重指出的

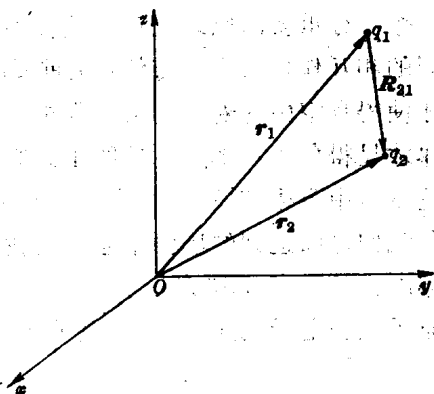


图 1.1