

普通物理学

第二卷 第一分册

电磁学



И. В. 萨韦利耶夫 著 雷祖猷 译 高等教育出版社

365973

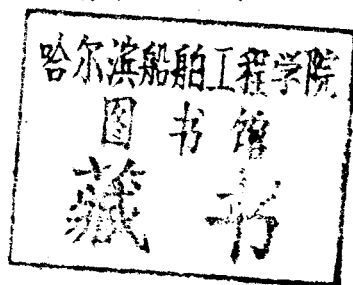
普通物理学

第二卷 第一分册

电 磁 学

[苏]И. В. 萨韦利耶夫 著

雷祖猷 译



高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书系据苏联科学出版社出版的 И. Б. 萨韦利耶夫著《普通物理学》第二卷 1982 年增订第二版译出。

这套《普通物理学》共三卷。内容包括：力学与分子物理学(第一卷)；电磁学、波与光学(第二卷)；量子光学、原子物理学、固体物理学、原子核与粒子物理学(第三卷)。

这套书的主要目的在于向大学生介绍物理学的基本概念和方法，特别注意物理定律涵义的解释及其应用。该书保持了苏联教材在叙述上严谨、简洁的特色，并在可能的情况下将物理学的近代成就(包括相对论和量子论)引入普通物理学，这种引入不只是作一般知识性介绍，而是尽可能与普通物理学传统内容融为一体，使经典理论成为它的相对论或量子论表述的经典极限。在内容、风格和处理方法上给人以“新”的感觉。

该书是莫斯科工程物理学院使用的教材，可用于高等工科院校使用多学时(扩充的)普通物理学教学大纲的专业作为教学参考书。但就其内容的深度与广度而言，它也可供我国理科物理等专业师生参考。

普 通 物 理 学

第二卷 第一分册

电 磁 学

[苏] И. Б. 萨韦利耶夫 著

雷祖猷 译

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

北京顺义县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 10.125 字数 240 000

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数 0001—2 155

ISBN 7-04-003613-4/O·1082

定价 6.45 元

前 言

本卷内容包括电磁学和波(弹性波,电磁波和光波)的理论。

全书采用国际单位制(*SI*),但也顺便让读者熟悉高斯制(相应的课文用小字排印)。在书末的附录中列出国际单位制和高斯单位制中电学量和磁学量的单位,并对两种单位制中电磁学基本公式的形式作了对比。

出第二版时,对原本进行了修改。第11,13,19,45,,48,52,107,112,120和129等节作了改写和补充。

感谢在本书写作过程中给予有益讨论、批评和建议的同事们和朋友们,特别是B. B. 斯维托扎罗夫, B. И. 格尔维德斯, H. Б. 纳罗日诺姆, И. Е. 伊罗多夫和 B. H. 利哈契夫。

同样要向Л. Л. 戈利金教授表示感谢,感谢他的许多有益的建议和意见。

本教程首先是供采用多学时(扩充的)物理教学大纲的高等工科院校使用的。但是叙述安排得使采用通用大纲的高等院校也可用本书作为教材,只要略掉个别章节就行了。在正文前的“教学法建议”中,除了其它材料外,列出了在时间不足以讲完全部内容的情况下大体上可以删去的章节(即正文中可以省略和缩减的部份)。

И. Б. 萨维利叶夫

1981年9月于莫斯科

教学法建议

在本建议中对一些并非总能正确地加以阐述的问题给予说明。此外,还列出一份目录,借以指出在课时不足以讲完本书全部内容的情况下,哪些章节或章节中的哪些部份大体上是可以略去的。这份目录仅反映作者个人的观点,因而只带有建议的性质。

1. 不应当像某些书那样把电学常数 ϵ_0 和磁学常数 μ_0 称为“真空介电常数”和“真空磁导率”。这样的称呼是没有物理意义的。相应地不应当研究没有物理意义的“绝对介电常数” $\epsilon_{\text{绝}} = \epsilon \epsilon_0$ 和“绝对磁导率” $\mu_{\text{绝}} = \mu \mu_0$ 。

2. 在电学常数和磁学常数以乘积 $\epsilon_0 \mu_0$ 形式出现的情况下,宜用 $\frac{1}{c^2}$ 代替这一乘积,其中 c 为电动力学恒量,它与真空中的光速一致[见公式(39.15)]。

3. 值得注意的是 ϵ_0 和 μ_0 在公式中以与因数 4π 组合的形式出现,同时 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9$, 而 $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}$ 。所以不宜与数值 $\epsilon_0 = 0.885 \times 10^{-11} \text{ F/m}$ 和 $\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ 打交道。最好是利用通过 π 来表示的常数值,即 $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9}$ 和 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。

4. 不应当舍不得花时间去掌握矢量分析的基本概念和关系式(§11)。花掉的时间能由较简单较精炼地得到一系列结果而得到补偿。此外,要真正理解电磁场的本质和各种性质,不利用散度和旋度的概念是办不到的。

5. 不时见到这样的论断,好像电位移 D (或磁场强度 H) 是

一个与介质性质无关的电场(或磁场)特征量,即 $D=D_0$, $H=H_0$, 此处 D_0 和 H_0 是介质不存在时这两个量的值,而 D 和 H 则是这两个量在介质中的值. 相应的,介质的相对介电常数和相对磁导率被定义为 $\epsilon=E_0/E$ 和 $\mu=B/B_0$. 应当注意到这样的论断是不正确的. 关系式 $E=E_0/\epsilon$ 和 $B=\mu B_0$ 仅在极其特殊的条件下才是正确的. 这些特殊条件对于电场来说,见第()页,而对磁场来说,则见第()页.

等式 $D=D_0$ 在普遍情况下的不正确性,比方说,可以从图 20.3 看出. 为了证实关系式 $\mu=B/B_0$ 在普遍情况下是不正确的,我们考虑一块由均匀的各向同性的铁磁质做成并放置得与外磁场 B 线相垂直的大而薄的平板. 在这种情况下, $B=B_0$, 而 μ 却可以达到数量级为 10^5 的值.

6. 量 D 和 H 应当解释成公式(19.3)和(52.5)所定义的电磁场的辅助特征量(基本的特征量是 E 和 B). D 是一有用的量,因为它的散度仅由外电荷的密度决定; H 也是一有用的量,因为它的旋度仅由宏观电流密度决定[见公式(19.8)和(52.6)].

7. 如果用指数函数来代替简谐函数(即余弦函数或正弦函数),那么涉及振动与波的许多问题的叙述就可大为简化. 所以在大学物理教程中用指数函数来表示波,已成为一种紧迫的需要. 应当看到习惯于这种表示方法并不困难,花在“习惯”这种方法上的时间将得到补偿.

8. 在 § 18 中,束缚电荷体密度的公式(18.4)可以只提出而不予推导.

9. 在时间不足时, § 45“作为相对论效应的磁学”可以删去.

10. § 57 和 § 58 中的推导可以略去而仅限于定性地研究顺磁质和抗磁质.

11. § 76 中关于电子感应加速器的场的计算[公式(76.1)—

(76.6)]可以省去.

12. 第十二章“气体中的电流”,对于压缩的大纲来说,是可以不纳入的.

13. 在 § 97“固体介质中弹性波的速度”这节,所有的计算都可以略去,而仅仅给出最终的公式(97.7)和(97.8).

14. 在 § 98“弹性波的能量”中,公式(98.5)的推导可以略去而从公式(98.5)开始学习这一节.

15. §112 中公式 (112.7)和 (112.8) 前的那一部分可以略去.

16. 第 116 节“共轴光具组”可以略去.

17. 在 § 120“相干性”中,从公式(120.4)开始到公式(120.6)为止的计算可以略去.

18. 第 124 节“多光束干涉”可以删去.

19. 在 § 131“伦琴射线的衍射”中可以将劳厄公式的推导及该公式本身略去,而仅限于讨论布拉格-乌利弗公式.

20. 第 133 节“全息照相”可以删去.

21. § 135 中关于费涅耳公式的部份可以不讨论.

22. 在 § 143“群速度”中,可以仅限于对公式(143.7)以前的内容作初步的讨论. 从公式(143.8)开始到公式 (143.13) 终止的计算可以略去.

强调指出,所提出的删节目录只是大体性的. 教师可以酌情予以改变或补充.

目 录

前言	1
教学法建议	1

第一篇 电学和磁学

第一章 真空中的电场	1
§ 1. 电荷	1
§ 2. 库仑定律	3
§ 3. 单位制	5
§ 4. 公式的有理化记法	6
§ 5. 电场 电场强度	7
§ 6. 电势	11
§ 7. 电荷系的相互作用能	15
§ 8. 电场强度和电势的关系	17
§ 9. 偶极子	20
§ 10. 电荷系在远处产生的电场	26
§ 11. 矢量场性质的描述	29
§ 12. 静电场的环流量和旋度	45
§ 13. 高斯定理	47
§ 14. 利用高斯定理计算电场	49
第二章 电介质中的电场	56
§ 15. 有极分子和无极分子	56
§ 16. 电介质的极化	58
§ 17. 电介质内的电场	60
§ 18. 体束缚电荷和面束缚电荷	61
§ 19. 电位移矢量	66

§ 20. 计算电介质中电场的例子	69
§ 21. 边界条件	74
§ 22. 作用于电介质中电荷的力	78
§ 23. 酒石酸钾钠电介质(铁电体)	80
第三章 电场中的导体	82
§ 24. 导体上电荷的平衡	82
§ 25. 外电场中的导体	84
§ 26. 电容	85
§ 27. 电容器	87
第四章 电场的能量	90
§ 28. 带电导体的能量	90
§ 29. 带电电容器的能量	90
§ 30. 电场的能量	93
第五章 稳恒电流	97
§ 31. 电流	97
§ 32. 连续性方程	100
§ 33. 电动势	101
§ 34. 欧姆定律 导体的电阻	103
§ 35. 电路不均匀段的欧姆定律	107
§ 36. 有分支的电路 基尔霍夫定则	109
§ 37. 电流的功率	111
§ 38. 焦耳-楞次定律	112
第六章 真空中的磁场	115
§ 39. 电流的相互作用	115
§ 40. 磁场	118
§ 41. 运动电荷的场	119
§ 42. 毕奥-萨伐尔定律	122
§ 43. 洛伦兹力	125
§ 44. 安培定律	128
§ 45. 作为相对论效应的磁学	130
§ 46. 磁场中的载流回路	137

§ 47. 载流回路产生的磁场·····	143
§ 48. 磁场中移动电流所做的功·····	146
§ 49. 磁场的散度和旋度·····	150
§ 50. 螺线管和环形螺线管的磁场·····	155
第七章 物质中的磁场 ·····	161
§ 51. 磁介质的磁化·····	161
§ 52. 磁场强度·····	162
§ 53. 计算磁介质中的场·····	168
§ 54. 在两种磁介质分界面上的条件·····	171
§ 55. 磁介质的种类·····	175
§ 56. 磁旋现象·····	176
§ 57. 抗磁性·····	181
§ 58. 顺磁性·····	184
§ 59. 铁磁性·····	187
第八章 电磁感应 ·····	193
§ 60. 电磁感应现象·····	193
§ 61. 感应电动势·····	194
§ 62. 磁感的测量方法·····	198
§ 63. 傅科电流·····	200
§ 64. 自感现象·····	201
§ 65. 在电路接通和切断时的电流·····	204
§ 66. 互感·····	207
§ 67. 磁场的能量·····	209
§ 68. 铁磁质反复磁化的功·····	211
第九章 麦克斯韦方程 ·····	214
§ 69. 涡旋电场·····	214
§ 70. 位移电流·····	216
§ 71. 麦克斯韦方程·····	221
第十章 带电粒子在电场和磁场中的运动 ·····	224
§ 72. 带电粒子在均匀磁场中的运动·····	224
§ 73. 用电场和磁场使运动的带电粒子偏转·····	226

§ 74. 确定电子的电荷和质量	229
§ 75. 离子荷质比的确定 质谱仪	234
§ 76. 带电粒子加速器	238
第十一章 金属导电性的经典理论	245
§ 77. 金属中载流子的本质	245
§ 78. 金属的初级经典理论	247
§ 79. 霍尔效应	252
第十二章 气体中的电流	256
§ 80. 非自持导电性和自持导电性	256
§ 81. 非自持气体放电	256
§ 82. 电离室和计数器	260
§ 83. 在自持放电中导致载流子出现的一些过程	265
§ 84. 气体放电等离子体	269
§ 85. 辉光放电	272
§ 86. 电弧放电	275
§ 87. 火花放电和电晕放电	276
第十三章 电振荡	280
§ 88. 似稳电流	280
§ 89. 无电阻回路中的自由振荡	281
§ 90. 自由衰减振荡	284
§ 91. 强迫电振荡	288
§ 92. 交变电流	293
附录	297

第一篇 电学和磁学

第一章 真空中的电场

§ 1. 电 荷

自然界中的一切物体都能够带电，即可以获得电荷。电荷的存在，表现于一个带电体与其它带电体之间存在着相互作用。电荷有两种，并约定分别称之为正电荷和负电荷。同号电荷互相排斥，异号电荷互相吸引。

电荷是某些基本粒子的一种不可分割的属性。一切基本粒子的电荷(如果它不等于零)均具有同一绝对值。此电荷可以称为基本电荷。我们将用字母 e 表示正的基本电荷。

基本粒子包括，比方说，电子(带负电荷 $-e$)，质子(带正电荷 $+e$)和中子(不带电荷)。任何物质的原子和分子都由这些粒子构成，所以在一切物体中均含有电荷。通常，带有不同符号电荷的粒子是以相等的数目存在于物体之中，并以相同的密度分布在物体中。在这种情况下，在物体的任一体积元中，电荷的代数和均为零，因而每一个这样的体积元(以及整个物体)都是中性的。如果用某种方法使物体中一种符号的粒子数超过另一种符号的粒子数，则物体变成带电的。也可以不改变正负粒子的总数，而使它们在物体中重新分布，使物体的一部分出现净余正电荷，另一部分出

现净余负电荷. 用一个带电体靠近一个电中性的金属体, 便可做到这一点.

既然任何一个电荷都是由一些基本电荷组成的, 所以电荷的量值 q 便都是 e 的整数倍:

$$q = \pm Ne. \quad (1.1)$$

但是基本电荷是如此的小, 以致宏观电荷的电量都可以看做是连续变化的.

如果一个物理量只可以取一些确定的分立值, 则我们说这个量是量子化的. 公式(1.1)所表述的事实, 意味着电量是量子化的.

从不同的惯性参考系中测量同一电荷, 所得的电量都相同, 因而电量乃是相对论性不变量. 由此得出结论, 电荷的量值与该电荷是运动还是静止无关.

电荷可以消失, 也可以重新产生. 然而, 符号不同的两种基本电荷总是同时产生或消失的. 例如, 电子和正电子在相遇时将湮没, 即转变为中性的 γ 光子. 在这种情况下, 电荷 $-e$ 和 $+e$ 消失了. 在称为电子偶的产生过程中, 坠入原子核的场中的 γ 光子转变为一对粒子——电子和正电子. 在这种情况下, 有电荷 $-e$ 和 $+e$ 产生.

由此可见, 电孤立系统^①的总电量不会改变. 这个结论称为电荷守恒定律.

应当指出, 电荷守恒定律与电荷的相对论性不变性是紧密地相互联系着的. 的确, 要是电荷的量值与电荷的速度有关, 则当我们使某一种符号的电荷运动起来时, 孤立系统的总电量就会改变了.

① 若带电粒子不能穿越某个系统的界面, 则此系统称为电孤立系统.

§ 2. 库 仑 定 律

点电荷之间相互作用力所遵从的定律,是库仑 (Coulomb) 于 1785 年从实验上确定的. 点电荷是指这样的带电体, 它的线度与它跟其它带电物体的距离相比可予忽略.

我们在卷一 § 45 曾介绍过卡文迪许 (Henry Cavendish) 确定引力常量时所用的扭秤. 库仑使用类似的装置 (图 2.1), 测量了两个带电小球之间的相互作用力跟两球所带电量及球间距离这两者的关系. 在这个实验中, 库仑利用了如下事实: 当一个带电金属球跟另一个与它全同的不带电金属球接触时, 电荷将在这两球之间平均分配.

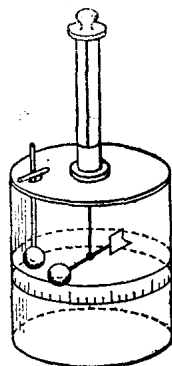


图 2.1

库仑根据实验得出结论: 两个静止点电荷之间的相互作用力与两者电量之积成正比, 而与两者间的距离的平方成反比. 力的方向在联接两电荷的直线上.

我们指出, 相互作用力方向应沿联接两个点电荷的直线, 这是从对称性考虑得出的结论. 虚空的空间被认定是均匀的和各向同性的, 因而对被移入该空间中的两个静止点电荷而言, 由一个点电荷引向另一个点电荷的方向是能够标出的唯一方向. 我们假定, 作用于电荷 q 的力 F 与由 q_1 指向 q_2 的方向构成异于零或 π 的角度 α (图 2.2). 但由于轴对称, 没有任何根据把力 F 从与该 q_1-q_2 轴构成同一角度 α 的众多其它方向的力 (这些力的方向围成一个张角为 2α 的圆锥) 中分出来. 只有在 α 等于零或 π 时, 由此而引起的困难才能自行消失.

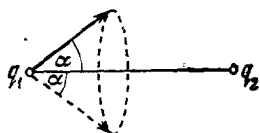


图 2.2

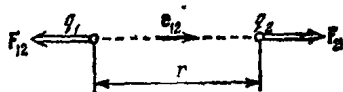


图 2.3

库仑定律可以用如下公式表示:

$$F_{12} = -k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_{12}. \quad (2.1)$$

其中 k 是一个正的比例系数, q_1 和 q_2 分别是两个相互作用的电荷的电量, r 是两电荷间的距离, e_{12} 是由电荷 q_1 指向电荷 q_2 的方向的单位矢量, F_{12} 是作用在电荷 q_1 上的力(图 2.3; 该图相应于同号电荷的情况). 力 F_{21} 与力 F_{12} 的差别在于符号不同:

$$F_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_{12}. \quad (2.2)$$

相互作用力之模对两电荷都相同, 可以表为

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}. \quad (2.3)$$

实验指出, 两个电荷之间的相互作用力不会因在它们附近还放有其它电荷而发生改变. 设有电荷 q_a 和另外 N 个电荷 $q_1, q_2, \dots, q_N$. 由以上所述推出, 所有这 N 个电荷 q_i 对 q_a 的作用力的合力 F 由下述公式确定:

$$F = \sum_{i=1}^N F_{a,i} \quad (2.4)$$

式中 $F_{a,i}$ 是电荷 q_i 在其余 $N-1$ 个电荷不存在时作用于 q_a 的力.

公式(2.4)所表述的事实, 使我们能够在知道点电荷间相互作用定律后求出集结于有限尺寸物体上诸电荷之间的相互作用力. 为此需要把每一个电荷分成许多小到可以看成是点电荷的元电荷 dq , 按公式(2.1)算出一对对元电荷 dq 之间的作用力, 然后

对这些力施行矢量加法。这种运算在数学上完全与有限尺寸物体间万有引力的计算相同(见卷一, § 45)。

§ 3. 单 位 制

适当选取电量的单位(F 和 r 的单位已在力学中选定), 可以使公式(2.1)中的比例系数等于 1. 这样选定的电量单位(设 F 和 r 用 CGS 制的单位)称为绝对静电制电量单位(简称为 CGSE 电量单位或 e. s. u.). 它是这样的一个电荷, 当它跟另一个与之相同的电荷在真空中相距 1cm 时, 它们之间的作用力恰为 1dyn.

藉助精密的测量(见 § 74)业已确定, 基本电荷的电量为

$$e = 4.80 \times 10^{-10} \text{ e. s. u.} \quad (3.1)$$

取长度、质量、时间和电荷量四者的单位为基本单位之后, 可以建立电学量和磁学量的单位制. 以厘米、克、秒和 CGSE 电量单位为基本单位的单位制, 称为绝对静电单位制(CGSE 制). 这单位制的基础是库仑定律, 即静止电荷之间的相互作用定律. 后面我们还要介绍绝对电磁单位制(CGSM 制), 其基础是载流导体间的相互作用力定律. 高斯单位制也是绝对单位制, 其电学量的单位与 CGSE 制单位相同, 而磁学量单位则与 CGSM 制单位相同.

在 CGSE 制中, 公式(2.3)为

$$F = \frac{|q_1 q_2|}{r^2}. \quad (3.2)$$

此公式仅在点电荷位于真空中时才是正确的. 当电荷处于介质中时, 公式需加以修正(见 § 22).

在苏联, 从 1963 年元旦起, 国家计量标准 ГОСТ 9867—61 付诸实施, 该标准规定要全面采用简称 SI 的国际单位制. 此制的基本单位是米、千克、秒、安培、开尔文、坎[德拉]和摩尔. SI 中力的

单位为牛顿(N),它等于 10^5 dyn.

在确定 SI 以及 CGSM 制的电学量和磁学量的单位时,我们是从载流导体之间的相互作用定律出发,而不是从电荷之间的相互作用定律出发.所以库仑定律公式中的比例系数将是一个不等于 1 的有量纲的量.

SI 中的电量的单位称为库仑(代号 C).实验已经确定,

$$1\text{C} = 2.998 \times 10^9 (\text{接近于 } 3 \times 10^9) \text{e. s. u.} \quad (3.3)$$

为了得到 1 C 电量的概念,让我们来计算一下各带 1 C 电量的两个点电荷在真空中彼此相距 1m 时,它们之间的作用力.根据(3.2),

$$F = \frac{3 \times 10^9 \times 3 \times 10^9}{100^2} \text{dyn} = 9 \times 10^9 \text{N} \approx 10^9 \text{kgf.} \quad (3.4)$$

用库仑为单位时,基本电荷的电量为

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{C.} \quad (3.5)$$

§ 4. 公式的有理化记法

电磁学和电动力学中有许多公式,如果采用 CGS 单位制(包括高斯制),公式中就会包含有 4π 和一个称为电动力学常数 c (等于真空中的光速)的因数.为了使这两个因数不再出现在实际上最重要的公式中,应当令库仑定律的比例系数等于 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. 在这种情况下,位于真空中的电荷的库仑定律取如下形式:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}. \quad (4.1)$$

其它公式也相应地改变形式.公式的这种变形记法称为有理化记法.利用有理化公式建立的单位制,也称为有理化制. SI 也属于有理化制.