

大学物理学丛书

电磁学

周荣华 张坤仪 何琪英 编著

上海科学技术出版社

大学数理化实用手册

电 磁 学

周荣华 张坤仪 何琪英 编著

上海科学技术出版社

大学数理化实用手册

电 磁 学

周荣华 张坤仪 何琪英 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 常熟市印刷二厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 15.75 字数 347,000

1989 年 12 月第 1 版 1989 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—2,100

ISBN 7-5323-1324-7/0·126

定价: 6.45 元

前 言

电磁学是物理学的一个主要分支，是理工科各专业的一门重要的基础学科。为了方便读者更好地掌握电磁学概念、定律和公式、並用于解决实际问题，我们编写了此“手册”。

本手册不仅对电磁学概念的确切含义、电磁学规律的正确表述进行了重点的阐述，而且对常见问题进行了分类，各类问题均精选典型例题从不同角度采用多种方法进行分析解答。以便读者进一步搞清基本概念，开拓思路，培养灵活运用能力。另外各章附有参考资料(包括本章常用公式及介绍一些重要的物理实验和著名科学家的创造性成果)。

本手册按照传统电磁学教科书的主要章节顺序进行有关内容的条目编排。内容的深度和广度基本上在理、工科大学普通物理的范围内。可供理工科院校师生在工作和学习中参考，也可供中等学校物理教师和自学青年查阅。

本书经编者共同研究、分工编写，全书由周荣华复核定稿。由于编者水平有限，书中不免有缺点、错误之处，请广大读者批评指正。

编 者

1987. 10.

目 录

一、真空中的静电场

1.1 基础知识	1
1.1.1 电荷 电荷守恒定律	1
1.1.2 库仑定律	2
1.1.3 电场强度	3
1.1.4 常用的理想模型	5
1.1.5 高斯定理	7
1.1.6 静电场的环路定理 电位	8
1.1.7 场强与电位的关系	12
1.2 题目类型与解题方法	13
1.2.1 概念题分析与解答	13
1.2.2 计算题分析与解答	22
1.2.3 习题	68
1.3 参考资料	71
1.3.1 本章常用公式	71
1.3.2 电位梯度	73
1.3.3 基本电荷——电子的发现及其测定	74
1.3.4 卡文迪许的静电测量——电力平方反比律的验证	77
1.3.5 习题答案	79

二、静电场中的导体

2.1 基础知识	82
----------------	----

2.1.1	导体静电平衡的条件.....	82
2.1.2	封闭导体壳内外的场.....	83
2.1.3	电容器及其电容.....	85
2.1.4	带电体系的静电能.....	88
2.2	题目类型与解题方法	90
2.2.1	概念题分析与解答.....	90
2.2.2	计算题分析与解答.....	97
2.2.3	习题.....	116
2.3	参考资料	118
2.3.1	本章常用公式.....	118
2.3.2	能利用大气中的电位差开动电动机吗?	119
2.3.3	习题答案.....	120

三、静电场中的电介质

3.1	基础知识	123
3.1.1	电介质的极化.....	123
3.1.2	极化电荷.....	125
3.1.3	电介质中的电场.....	126
3.1.4	电位移矢量 $\mathbf{D}$ 与有介质时的高斯定理.....	126
3.1.5	静电场方程和边界条件.....	128
3.1.6	电场的能量.....	129
3.2	题目类型与解题方法	131
3.2.1	概念题分析与解答.....	131
3.2.2	计算题分析与解答.....	141
3.2.3	习题.....	166
3.3	参考资料	169
3.3.1	本章常用公式.....	169
3.3.2	压电效应及其应用.....	170
3.3.3	习题答案.....	171

四、稳恒电流

4.1	基础知识	174
4.1.1	电流与电场	174
4.1.2	电功率 焦耳定律	177
4.1.3	电阻	178
4.1.4	电源 电动势	182
4.1.5	欧姆定律	185
4.1.6	基尔霍夫定律	187
4.1.7	等效定理	188
4.1.8	金属的电现象	191
4.1.9	气体导电现象	192
4.2	题目类型与解题方法	193
4.2.1	概念题分析与解答	193
4.2.2	计算题分析与解答	201
4.2.3	习题	227
4.3	参考资料	230
4.3.1	本章常用公式	230
4.3.2	伏打发明电池	232
4.3.3	超导电性研究的发展及其应用前景	234
4.3.4	习题答案	235

五、真空中的稳恒磁场

5.1	基础知识	237
5.1.1	磁场 磁感应强度	237
5.1.2	毕奥-萨伐尔定律	240
5.1.3	磁场中的高斯定理	242
5.1.4	安培环路定理	243
5.1.5	磁场对载流导线和载流线圈的作用	244

5.1.6	磁场对运动电荷的作用	247
5.1.7	霍尔效应	250
5.1.8	磁力(安培力)的功	252
5.2	题目类型与解题方法	253
5.2.1	概念题分析与解答	253
5.2.2	计算题分析与解答	262
5.2.3	习题	290
5.3	参考资料	293
5.3.1	本章常用公式	293
5.3.2	地球的磁场	295
5.3.3	磁单极简介	297
5.3.4	习题答案	298

六、电磁感应和暂态过程

6.1	基础知识	302
6.1.1	电磁感应定律	302
6.1.2	动生电动势与感生电动势	304
6.1.3	自感与互感 涡流	305
6.1.4	暂态过程	308
6.2	题目类型与解题方法	312
6.2.1	概念题分析与解答	312
6.2.2	计算题分析与解答	323
6.2.3	习题	359
6.3	参考资料	363
6.3.1	本章常用公式	363
6.3.2	物理学第二次革命的先驱——法拉第	365
6.3.3	粒子加速器	367
6.3.4	习题答案	370

七、磁 介 质

7.1 基础知识	374
7.1.1 磁介质的磁化	374
7.1.2 磁介质中磁场的基本规律	377
7.1.3 磁荷观点	380
7.1.4 铁磁质	382
7.1.5 磁路定理	386
7.1.6 磁场的能量	386
7.2 题目类型与解题方法	387
7.2.1 概念题分析与解答	387
7.2.2 计算题分析与解答	391
7.2.3 习题	402
7.3 参考资料	403
7.3.1 本章常用公式	403
7.3.2 习题答案	405

八、交 流 电 路

8.1 基础知识	406
8.1.1 交流电	406
8.1.2 交流电路中的元件	409
8.1.3 交流电路的计算方法	412
8.1.4 交流电路定律的复数形式	413
8.1.5 交流电的功率	421
8.1.6 谐振电路	423
8.1.7 变压器	424
8.1.8 三相交流电	425
8.2 题目类型与解题方法	427
8.2.1 概念题分析与解答	427

8.2.2	计算题分析与解答	437
8.2.3	习题	459
8.3	参考资料	462
8.3.1	本章常用公式	462
8.3.2	习题答案	465

九、电磁场与电磁波

9.1	基础知识	466
9.1.1	电磁场的理论基础	466
9.1.2	电磁波	469
9.1.3	电磁场的能量和能流密度矢量	471
9.2	题目类型与解题方法	472
9.2.1	概念题分析与解答	472
9.2.2	计算题分析与解答	475
9.2.3	习题	483
9.3	参考资料	483
9.3.1	本章常用公式	483
9.3.2	麦克斯韦与电磁场理论	484
9.3.3	习题答案	486
附录 I	常用物理常数	487
附录 II	国际单位制中电磁量的定义式、量纲式和导出单位	488
附录 III	国际制和高斯制中电磁学常用公式对照表	491
附录 IV	国际制和高斯制之间的单位换算关系	493

一、真空中的静电场

真空是指没有任何实物存在的空间。其中并非一无所有，在此空间中可以存在另外一种形式的物质，例如，电磁场、引力场等。相对于观察者静止的电荷所激发的电场称做静电场，它是电磁场的一种特殊状态。

静电学的基础是：库仑定律、叠加原理和电荷守恒定律。电场强度 E 和电势 U 是描述静电场的两个基本物理量。静电场的高斯定理和环路定理反映了静电场的基本规律。

1.1 基础知识

1.1.1 电荷 电荷守恒定律

1. 电荷 有正电荷和负电荷两种。同种电荷互相排斥，异种电荷相互吸引。电荷是物质的一种固有属性。电荷的数量称为电量。

2. 电荷的基本单元 物体都是由电子、质子及中子构成的。实验表明：任何物体所带电量均为 e 的整数倍。

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ (库仑)}$$

电子的电量是 $-e$ ，质子的电量是 e ，它们是电荷的基本单元。电荷的这种只能取不连续的量值的性质叫做电荷的量子化。

近代物理学理论已经预言，夸克(Quark)可以带有 $\pm e/3$

或 $\pm 2e/3$ 的电量，但目前还未被实验证实。

3. 电荷守恒定律 在一个与外界没有电荷交换的系统内，无论进行怎样的物理过程，系统内电量的代数和保持不变，称做电荷守恒定律。实验证明这个定律不仅在宏观现象中成立，在微观领域中也成立。它是物理学中最基本的规律之一。

1.1.2 库 仑 定 律

1. 库仑定律 1785年法国科学家库仑 (Charles Augustin Coulomb 1736~1806) 通过扭秤实验总结出静止电荷之间相互作用的规律。库仑定律是：真空中两个静止点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力 F 的大小与电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比、与它们之间的距离 r 的平方成反比；力 F 的方向沿着它们的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸：

$$\mathbf{F} = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}},$$

式中比例系数 K 依赖于各量所选用的单位。在国际单位制 (SI) 中，有

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 (\text{牛} \cdot \text{米}^2 / \text{库}^2),$$

式中 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} (\text{库}^2 / \text{牛} \cdot \text{米}^2)$ (或法/米) 称为真空介电常数。

在国际单位制中，电量的单位是库仑 (C)。

电荷 q_1 作用在 q_2 上的力 F_{12} 可写为

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}$$

电荷 q_2 作用在 q_1 上的力 F_{21} 可写为

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{21}$$

式中 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 表示由 q_1 指向 q_2 方向的单位矢量, $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ 表示由 q_2 指向 q_1 方向的单位矢量。式中 q_1 和 q_2 是可正可负的代数量。 $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{F}_{21}$ 遵从牛顿第三运动定律。

2. 叠加原理 若有多个电荷同时作用在某一个点电荷 q_0 上, 其合力等于各个电荷单独作用在 q_0 上的力的矢量和, 称为叠加原理。它是由大量实验得出的结果, 是电磁学理论基础之一。从叠加原理可以看出, 两个点电荷之间的相互作用力与它们是否受到其它电荷的作用无关, 这也就是力的独立作用原理。

1.1.3 电 场 强 度

1. 电场 电场是电磁场的一个方面。电场最基本的特性是对处于其中的电荷施以作用力。电场可以由电荷激发(也常说产生), 也可以由变化的磁场激发。相对于观察者(或者所选取的惯性参照系)静止的电荷所激发的电场称为静电场, 它是电磁场的特殊状态。

带电物体之间的电磁相互作用是由电磁场来传递的。理论和实验都证明了电磁场是物质存在的一种形式。与任何实物都是由基本粒子构成的一样, 构成电磁场的基本粒子是光子。

2. 电场强度 从电场对电荷施以作用力这个基本特性出发, 引入电场强度矢量 $\mathbf{E}$ (简称场强) 作为描述电场性质的一个基本物理量。电场中某一点的电场强度, 在数值上等于单位电荷在该点所受电场力的大小, 其方向与正电荷在该点所受电场力的方向一致。即

$$E = \frac{F}{q_0},$$

式中 q_0 是试探电荷的电量, F 是试探电荷在该点所受的力。在国际单位制中, 电场强度的单位是牛顿/库仑或伏特/米 (V/m)。

电场强度的大小和方向一般随空间位置 r 和时间 t 而变化, 即 $E = E(r, t)$ 。 E 不随时间变化即为静电场。

3. 点电荷所受的力 电荷 q 所受电场力的表示式为

$$F = qE,$$

式中 E 是除 q 以外所有其它电荷在 q 所在处产生的电场。当 q 为正, F 与 E 同方向; 当 q 为负, F 与 E 方向相反。

4. 点电荷所产生的电场 按电场强度的定义和库仑定律, 点电荷 q 的电场的场强为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \hat{r}.$$

通常将激发电场的电荷称为场源, 其空间位置称为源点, 将需要讨论的点称为场点或观察点。式中 r 是源点与场点 p 之间的距离, $\hat{r}$ 是源点指向场点的单位矢量。在点电荷 q 的电场中, 当 $q > 0$ 时, E 与 $\hat{r}$ 同方向; 当 $q < 0$ 时, E 与 $\hat{r}$ 方向相反。

5. 电场的叠加原理 由几个点电荷在某一点共同产生的电场的场强等于各个点电荷单独存在时在该点产生的电场强度的矢量和。这叫做电场的叠加原理, 即有

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \Sigma E_i.$$

利用点电荷产生的电场强度的公式和叠加原理, 可求出任何电荷分布情况所产生的电场。对于电荷连续分布的大块

带电体，可以把带电体分割为无限多个“电荷元 dq ”，每一个电荷元都当作一个点电荷，它产生电场 dE ：

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dq}{r^2} \hat{r}.$$

所有电荷元在某点 P 产生的电场叠加，得

$$E = \iiint_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\rho dV}{r^2} \hat{r},$$

式中 ρ 是体电荷密度。上式是矢量积分，计算时必须把矢量 E 分解为三个坐标分量(标量)，分别对每个分量进行积分，并注意被积函数中的 r 和 $\hat{r}$ 等都随体积元位置而变，需要统一表示为积分变量的函数。关于如何选取合适的坐标系及电荷元，请参考 1.2.2 的例题。

1.1.4 常用的理想模型

实际的带电体都占有一定的空间体积，求解它所产生的电场，就是计算各个电荷元 $dq = \rho dV$ 在场点产生的电场 dE 的矢量积分。这种积分计算一般是比较麻烦的。在某些特殊条件下，可以采用理想化的模型将问题简化。当然，这样计算出的结果，只在该模型满足的条件下成立，超出了这个条件的范围就不成立了。

1. 点电荷模型 当讨论的场点与场源(带电体)之间的距离 r 比带电体的线度 d 大很多，即满足 $r \gg d$ 的条件时，带电体的形状大小及其电荷分布情况对场点的影响可以忽略不计，而将带电体看作一个点电荷。这时只需用一个几何点来标志它的位置，用 q 表示它的电量。

2. 面电荷模型 当场点与薄层带电体之间的距离远大于薄层的厚度时，可以忽略其厚度的影响，把带电体看作一

个无限薄的几何面。引入面电荷密度 σ 来表示电荷分布的情况：

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{dS}.$$

在小面元 dS 中带有电荷 $dq = \sigma dS$ ，这个电荷元产生的场强为 dE ，整个面上所有电荷元在场点 P 的场强为

$$E = \int dE = \iint_S \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\sigma dS}{r^2} \hat{r}.$$

3. 线电荷模型 当场点与棒形带电体的距离远大于棒的粗细时，可以忽略其粗细的影响，把带电体看作一条无限细的线。引入线电荷密度 λ ：

$$\lambda = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl}.$$

在线元 dl 中带有电量 $dq = \lambda dl$ ，这个电荷元产生电场 dE 。线上所有电荷元在场点 P 的电场强度为

$$E = \int dE = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda dl}{r^2} \hat{r}.$$

4. 无限大带电面模型 一个均匀带电的薄圆板，当场点到圆板中心的距离 r 远小于到圆板边缘的距离时，可将圆板近似看作是无限大的带电平面。对于一个任意的较大的带电面，只要场点在带电面的中部附近区域内，都可以将它看作无限大带电面。

5. 无限长带电体模型 当带电圆柱或带电直线的长度 l 很大，只要讨论的场点在靠近它的中部附近区域内，就可将它看作是无限长的。

无限长带电直线这种理想模型，包含了线模型和无限长模型。不能采用这种模型来讨论 $r \rightarrow 0$ 和 $r \rightarrow \infty$ 时的情形，

因为前者超出了线模型的适用范围，后者超出了无限长模型的适用范围。如果场点的位置已经超出了模型的适用范围而仍采用该模型来讨论，不仅在概念上是混乱的，而且所得结果也是不正确的。

1.1.5 高 斯 定 理

1. 电力线 电场可以用一系列假想的曲线——电力线来形象地描绘它的分布情形。电力线上每一点的切线方向表示该点电场强度 E 的方向；电力线的疏密程度表示电场强度 E 的大小。可以规定：通过某处垂直于电场强度的单位面积的电力线数目（电力线数密度）等于该处电场强度的大小。即

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta S_{\perp}}.$$

在匀强电场中，电力线是一些互相平行、分布均匀的直线。

电力线具有如下性质：

(1) 电力线起自正电荷（或来自无限远处），终于负电荷（或伸向无限远处），但不会在没有电荷的地方中断。

(2) 在没有电荷的空间，电力线不会相交。

(3) 静电场的电力线不会形成闭合曲线。

2. 电通量 在电场中任取面元 ΔS ，其法线方向的单位矢量 $\hat{n}$ 与场强 E 之间的夹角为 θ ，如图 1-1 所示。计算通过面元 ΔS 的电力线数目 $\Delta\phi$ ，有 $\Delta\phi = E \Delta S_{\perp} = E \Delta S \cos\theta = E \cdot \Delta S$ ，

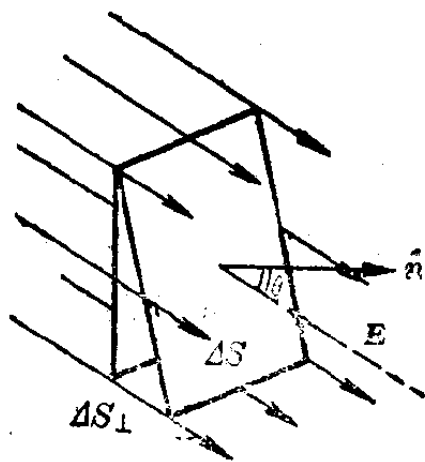


图 1-1