

物理学教程

电学 1

〔法〕 R. 阿内甘 J. 布迪尼 著
江之永 译



高等教育出版社

物 理 学 教 程

电 学 1

[法] R. 阿内甘 J. 布迪尼 著
江之永 译

高 等 教 育 出 版 社

1983

内 容 简 介

本书系根据〔法〕R. 阿内甘和J. 布迪尼合著《物理学教程 电学 1》1976年第三版译出。这套教科书共八册：力学 1、力学 2、电学 1、电学 2、电学 3、光学 1、光学 2、热力学。本册内容为电荷、静电场、静电势、电偶极子、高斯定理、电学平衡导体、导体间空间中的电场和电势、导体系的静电平衡、静电屏蔽、具有静电力的简单系统、密立根实验、电流的磁效应、电流的磁场、磁场对电流的作用、带电粒子在匀强磁场中的运动等。

本书可供高等学校数学、力学和相近专业的大学生和教师参考。

R. Annequin et J. Boutigny

Cours de sciences physiques

Electricité 1

Librairie Vuibert

物 理 学 教 程

电 学 1

〔法〕R. 阿内甘 J. 布迪尼 著

江之永 译

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

上海商务印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 6.5 字数 153,000

1986年6月第1版 1986年8月第1次印刷

印数 00,001—5,500

书号 13010·0952 定价 1.50 元

目 录

静 电 学

第一章 电荷 静电场	1
§ 1-1 起电	1
§ 1-2 电荷	2
§ 1-3 库仑定律	3
例题	6
§ 1-4 静电场	7
例题	8
第二章 静电势 电偶极子	11
静电势	11
§ 2-1 一个电荷的静电场的电势	11
§ 2-2 点电荷系的电势	14
§ 2-3 连续分布电荷的静电场和电势	15
§ 2-4 梯度的概念	17
电偶极子	19
§ 2-5 电荷对	19
§ 2-6 电偶极子	20
§ 2-7 等势线和等势面· 电力线	22
例题	25
第三章 静电场的通量 高斯定理	37
§ 3-1 预备知识· 立体角	37
§ 3-2 穿过一面积的场矢量通量	39
§ 3-3 点电荷的场的通量	40
§ 3-4 电荷系的静电场通量· 高斯定理	42
§ 3-5 场管· 通量守恒	42

高斯定理的应用	44
§ 3-6 均匀带电球壳的电场和电势	44
§ 3-7 均匀带电、体密度为 ρ 的球体的电场和电势	46
§ 3-8 无限长的、表面均匀带电的旋转圆柱体的电场和电势	47
§ 3-9 均匀带电平面	49
例题	51
第四章 电学平衡导体	62
§ 4-1 金属的模型	62
§ 4-2 电学平衡和稳恒状态	63
§ 4-3 导体内部的电场	64
§ 4-4 电学平衡导体中的电势和电荷分布	65
例题	66
第五章 导体间空间中的电场和电势	68
§ 5-1 假设与记号	68
§ 5-2 导体间空间的性质	68
§ 5-3 对应元定理	69
§ 5-4 感应起电	70
§ 5-5 库仑定理	72
§ 5-6 导体间空间中的电势	73
§ 5-7 零电势	74
第六章 导体系的静电平衡	76
单独一个导体的情况	76
§ 6-1 平衡的唯一性	76
§ 6-2 单一导体的电容	77
导体系的情况	78
§ 6-3 电容和感应系数	78
§ 6-4 电容系数和感应系数的性质	79
例题	80
§ 6-5 两个导体处于全感应的情况	82
电容器	83
§ 6-6 定义·基本关系式	83

§ 6-7 球形电容器	84
§ 6-8 平行板电容器	85
§ 6-9 柱形电容器	87
§ 6-10 极板非常靠近的任意形状的电容器	88
电容器的组合	90
§ 6-11 并联组合(或面积组合)	90
§ 6-12 串联组合	91
例题	92
带有电介质层的电容器	95
§ 6-13 电介质对电容器电容的影响	95
§ 6-14 电介质强度	96
常用电容器	97
§ 6-15 电容器的几种类型	98
静电屏蔽	99
§ 6-16 平衡状态的叠加	99
§ 6-17 静电屏蔽	100
第七章 具有静电力的简单系统	103
§ 7-1 均匀静电场对电荷为 q 的粒子的作用	103
§ 7-2 静电偏转示波器	105
密立根实验	107
§ 7-3 目的·实验装置	107
§ 7-4 带电油滴运动的研究	107
§ 7-5 操作方法的选择·结果	109
静电力系的例子	109
§ 7-6 均匀静电场对电偶极子的作用	109
§ 7-7 物质的电极化	111
§ 7-8 静电压强的概念	113
§ 7-9 处于平衡状态的导体间的相互作用力	115
§ 7-10 盘式静电计	117
例题	118

电 磁 学

第八章 电流的磁效应	122
§ 8-1 柱形导体中的电流强度	122
§ 8-2 磁相互作用	124
§ 8-3 磁场	125
§ 8-4 洛仑兹力	127
§ 8-5 运动电荷产生的磁场	129
线电流所受的或所起的磁作用	130
§ 8-6 拉普拉斯定律	130
§ 8-7 毕奥-萨伐尔定律	131
例题	132
第九章 电流的磁场	135
§ 9-1 直导线中电流的磁场	135
例题	137
§ 9-2 环形电流在其轴线上一点产生的磁场	140
例题	143
§ 9-3 环形电流在远处产生的磁场	146
例题	149
§ 9-4 载流线圈的磁矩· 磁偶极子	152
例题	154
§ 9-5 螺线管	156
§ 9-6 \vec{B} 的通量是守恒的	158
例题	159
第十章 磁场对电流的作用	162
§ 10-1 拉普拉斯力	162
§ 10-2 安培的正规定义	164
§ 10-3 科顿秤	165
§ 10-4 均匀磁场对平面回路的作用	166
§ 10-5 载流线圈或磁铁在均匀磁场中的平衡	169
§ 10-6 力测电流计秤	171

例题	172
第十一章 带电粒子在匀强磁场中的运动	175
§ 11-1 运动学基本知识的回顾	175
§ 11-2 带电质点在一匀强磁场作用下的运动	175
§ 11-3 实验验证	178
场对粒子运动的作用的若干应用	180
§ 11-4 粒子的鉴别	180
§ 11-5 磁偏转	183
§ 11-6 登普斯特质谱仪	184
§ 11-7 用汤姆孙法测定电子的荷质比	185
§ 11-8 均匀磁场和变化电场对带电粒子的作用·回旋加速器	186
例题	187
附录	190
索引	192

静 电 学

第一章 电荷 静电场

§1-1 起电

我们先来回顾一下与研究电的起源有关的一些经常观察到的事实。

很早以前,人们就发现,玻璃或胶木制品经过干燥的纺织品或毛皮摩擦之后能够吸引轻微的物体(如尘埃、纸片、泡沫等)。我们说这些物体经摩擦而带电。

干燥人体经过天然纤维或人造纤维的织物摩擦之后,或头发经过梳子梳理之后,也会带电,这些织物或梳子将同时带电。

然而,能实现上述摩擦起电实验的只有某些物体。若摩擦握在手中的金属制品则不能成功。根据这一发现,可以把固态物体分成两类:一类是可以获得并能保持带电状态的物体,称为绝缘体;另一类是不能获得,或者能够获得但不能保持带电状态的物体,称为导体。但是,必须指出,没有绝对的绝缘体,也没有绝对的导体,只有好的或差的绝缘体,及好的或差的导体。区分这两类物体有严格的标准,我们将在下面讨论。

此外,人们还发现另外一些起电方式。例如,通过接触也可以起电:一根玻璃棒与一已带电物体接触之后就能吸引尘埃。

用一个简单、可靠而又灵敏的仪器可以很方便地检验一个物体的带电状况,这种仪器称为验电器。验电器有金属薄片式的,还

有指针式的。

在金属薄片式验电器(图 1-1-1)中, T 是一金属杆, 杆的上端装有金属球 B (或金属平台), 杆的下端装有两片很薄(几个微米)靠得很近的金箔或铝箔。为了排除外界的静电干扰, 杆和金属箔都装在一个外面包有金属网的玻璃罩里。将带电体 C 引进金属球 B , 或和它接触时, 两金属箔将彼此分开。这种装置可以检验非常微弱的带电状态。

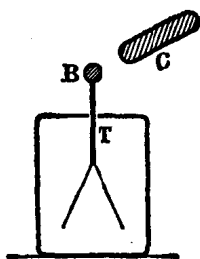


图 1-1-1

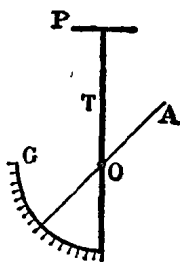


图 1-1-2

在指针式验电器中, 金属箔为一根很轻的铝针所代替, 铝针可以围绕一水平轴转动, 该轴牢固地固定在金属杆 T 上(图 1-1-2)。整个装置形成一个导电的整体。当用接触或感应方式使验电器带电时, 指针 A 将受到杆 T 的排斥而偏转。偏转的角度可在有刻度的面板 G 上读出。

静电学研究的对象是静止物体的带电, 以及与之有关的现象, 特别是研究带电体之间的力学作用。

下面我们打算建立一种数学模式来解释与物体带电有关的各种现象, 并使它们之间协调一致起来。我们将介绍并讨论电荷、电场和电势等基本概念。

§ 1-2 电荷

设 p 为一质点。令 (Q) 为建立在 \mathbf{R} 上的一维向量空间, 并令

(Q)的一个矢量 q 与此质点缔合: q 表示该质点的电荷, 是电荷矢量空间的元素。作出这种规定之后, 我们假定

$q_1 + q_2$ 是一个电荷,

λq_1 也是一个电荷 (λ 是从属于 \mathbf{R} 的)。

两个电荷相加就是把两个质点叠合在同一点上, 构成一个单一的质点。电荷 q 乘上标量 λ 就等于把 λ 个粒子叠合在一起, 构成一个单一的质点 (当 λ 是自然数时, 上面的论断是可行的。但是当 λ 为任一实数时, 我们仍然承认上面的论断)。

在(Q)矢量空间中, 我们选定一个基底 e , 所有其他电荷都可以写作

$$q = \bar{q}e,$$

\bar{q} 是以基底 e 为单位对 q 进行测量时所得的值 ($\bar{q} \in \mathbf{R}$)。

基底 e 是电荷的单位: 在国际单位制(SI)中, 电荷的单位叫作库仑。在讨论电磁现象时, 可以给库仑下一个精确的定义。

从现在起, 我们把矢量 q 和它的度量值 \bar{q} 混为一谈 (两者都用同一符号 q 表示)。

§ 1-3 库仑定律

电荷为 q_0 和 q 的两质点 p_0 及 p 分别放在实空间 (\mathcal{E}) (仿射的、欧几里得的、三维的) 中的 P_0 和 P 点处 (图 1-3-1)。设 (\mathbf{E}) 为与 (\mathcal{E}) 缔合的矢量空间。令 $\vec{r} = \overrightarrow{P_0P}$, $r = |\vec{r}|$; 带电状态将通过带电体之间的相互作用

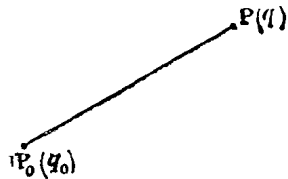


图 1-3-1

而得到反映, 正如质点之间的万有引力相互作用一样。上述类比指出质点 p_0 对质点 p 的作用力可以用牛顿型的方程来表示, 即可以写作

$$\vec{f} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^3} \vec{r} (\epsilon_0 \in \mathbf{R}).$$

q_0 、 q 、 ϵ_0 和 r 都是实数。由上式定义的矢量 \vec{f} 是 (E) 场中的矢量。

如果 \vec{u} 表示沿 \vec{r} 方向上的单位矢量, 因而有 $\vec{r} = r\vec{u}$, 则 \vec{f} 可写作

$$\vec{f} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0q}{r^2} \vec{u}.$$

作用在电荷之间的, 并服从 $\frac{1}{r^2}$ 规律的力, 通常叫做库仑作用力。

$4\pi\epsilon_0$ 是一个正值系数。但是, 电荷间的相互作用有相互吸引的, 也有相互排斥的。因此, q_0q 应具有代数数量的性质, 可以是正的, 也可以是负的。我们将把出现的某种电荷人为地规定为正电荷, 而把另一种电荷规定为负电荷。我们已经选定玻璃棒经呢绒摩擦后所带的电荷为正电荷, 根据这一规定, 电子的电荷是负的。

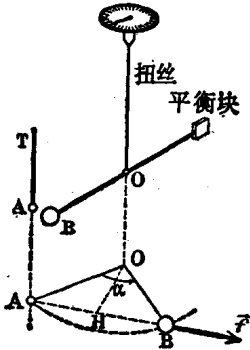


图 1-3-2

从公元 1780 年起, 库仑就着手用一扭秤来对 $\frac{1}{r^2}$ 定律进行实验验证。扭秤

包括一个绝缘杆 OB, 杆的一端装有一小金属球 B, 一扭丝通过 O 点将杆水平悬挂着。A 为另一金属球, ($\overline{OA} = \overline{OB}$), 固定在绝缘棒 T 的下端。试验时, 通过接触使 A 和 B 同时带电, 于是 B 受到 A 的斥力而偏转, 直至平衡为止(图 1-3-2)。相对于这一平衡位置, 有

$$\vec{f} \text{ 的力矩} = \text{悬丝的扭力矩} = C\alpha.$$

而 \vec{f} 的力矩可写作 $k \frac{d}{AB^2}$, 式中 $d = \overline{OH}$, 代入上式, 得

$$\frac{\alpha \cdot \overline{AB}^2}{d} = \frac{k}{C}.$$

实验时,改变 α 的量值,因而 d 的量值也跟着改变,但保持 A、B 两球上的电荷不变。如果相互作用满足 $\frac{1}{r^2}$ 定律,应能证明 $\frac{\alpha \cdot \overline{AB}^2}{d}$ 是一个常数。当年库仑的实验达到 2% 的精确度。考虑到实验装置中存在不少实际困难,能够得到上述成绩,已经是令人十分满意的了。

电荷之间相互作用的规律,只有通过根据库仑定律的形式导出的其他许多结论(场、电势、静电通量等)的验证,才能得到真正的验证。例如,人们曾预言并且已完全证明,在带电导体内部的空腔中如果不存在其他电荷,则空腔内部的电场恒等于零。

库仑定律

在真空中,两个相距为 r 的点电荷 q_0 和 q 之间的相互作用力,可以表示成如下的矢量形式:

$$\vec{f} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^3} \vec{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \vec{u},$$

\vec{f} 是斥力还是引力,取决于两点电荷是否同号。

读者注意:引力相互作用永远是吸引力。

关于 ϵ_0 的问题

ϵ_0 叫做真空介电常数,是一个有量纲的量。在库仑公式中,如果有关物理量都用 SI 单位表示,则 ϵ_0 的量值为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9},$$

ϵ_0 的常用值,取

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}.$$

作为一个比例系数,写成 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 的形式,可能令人感到意外,但也不是没有道理的,因为实际上按上述安排方式,可以把根据库仑定律导出的一些常用公式中的 4π 因子消掉,以实现这些公式的有理

化。

例题 E-1. 设有二质量相等 ($M=1\text{ kg}$), 间距 $d=1\text{ m}$ 的物体。假定每一物体中含有数量相等的质子和中子, 但电子与质子的比例是 99 对 100。试求此两物体之间的相互作用力, 并把该力和两物体间的万有引力加以比较。从这比较中可得出什么结论?

已知: 质子的质量 = 中子的质量 = $1.67 \times 10^{-27}\text{ kg}$,

基本电荷 $e=1.60 \times 10^{-19}\text{ C}$,

万有引力常数 $G=6.67 \times 10^{-11}\text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$ 。

[解]:

电子的质量很小, 和中子与质子相比, 可忽略不计。每一物体中的质子数为

$$n = \frac{1}{2 \times 1.67 \times 10^{-27}}$$

因为质子数超出电子数百分之一, 所以每一物体中, 超额质子数的总电荷就等于该物体的电荷, 即为

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{100} n \times e = \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{2 \times 1.67 \times 10^{-27}} \times 1.6 \times 10^{-19} \\ &= 4.8 \times 10^5\text{ C}. \end{aligned}$$

于是两物体间的静电力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2},$$

或
$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{23.0 \times 10^{10}}{1} = 2.0 \times 10^{21}\text{ N},$$

而万有引力则为

$$f = 6.67 \times 10^{-11}\text{ N};$$

与 F 相比, 是微不足道的。

可以看出, 在带电差异只不过是 $\frac{1}{100}$ 的情况下, 两物体间的相互作用力 F 竟如此之巨大。但是在现实世界中, 这样巨大的斥

力从来没有遇到过, 因为处于自由状态的物体都是电中性的。

注意: 对 F 的如上计算是在点电荷的假定下作出的, 这种近似计算说明电荷间存在着巨大的相互作用。

§ 1-4 静电场

1. 单一电荷建立的静电场(图 1-4-1)。

假定在(\mathcal{E})空间的 P_0 点放有一个带电粒子 q_0 , 另一个带电粒子 q 放在 P 点, 则 q_0 作用在 q 上的库仑力为

$$\vec{f} = q \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}.$$

对应于(\mathcal{E})空间中的任意点 P , 作(E)空间的矢量

$$\vec{E} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r},$$

除 P_0 点外, 矢量 \vec{E} 在每一点都是有定义的。对于(\mathcal{E})中的任一点 P 都能缔合一个属于空间(E)的矢量 $\vec{E}(P)$, 这种映射叫作矢量场。这时, 我们说, 放在 P_0 点的粒子 q_0 在(\mathcal{E})空间的每一点上都建立一个静电场 \vec{E} 。 \vec{E} 的表达式如上所述, 但通常写为

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r^2} \vec{u},$$

\vec{u} 为矢量 $\vec{P_0P}$ 的单位矢量, 方向从 P_0 指向 P 。当 q_0 的电荷 q_0 为正时, 则 \vec{E} 与 \vec{u} 同向; 如果 q_0 为负, 则 \vec{E} 与 \vec{u} 的方向相反。

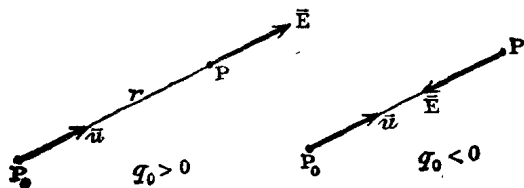


图 1-4-1

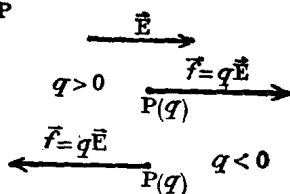


图 1-4-2

电荷为 q 的粒子 p 放在场 \vec{E} 中时, 场 \vec{E} 对它的作用力为(图 1-4-2)

$$\vec{f} = q\vec{E}.$$

通过矢量的模量之间的关系式 $|\vec{f}| = |q||\vec{E}|$, 可以定义场的单位: 即作用在 1 库仑电荷上的力等于 1 牛顿的场定义为单位场。因此, $|\vec{E}|$ 可以用 $\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$ 表示。在法国, $|\vec{E}|$ 常用伏特每米 ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$) 来量度。这一单位是根据电场和电势之间的对应关系来定义的(见第二章)。

2. 一电荷系建立的静电场

设一个电荷为 q 的粒子 p 同时受到几个粒子 p_i 的作用, 粒子 p_i 的电荷为 q_i , 位于 P_i 点, i 从 1 变到 n ,

每个粒子 p_i 对 p 的作用力为

$$\vec{f}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_i}{r_i^2} \vec{u}_i,$$

因此, 粒子 p 受到的力应为

$$\vec{f} = \sum_1^n \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_i}{r_i^2} \vec{u}_i \right),$$

或写为

$$\vec{f} = q \sum_1^n \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u}_i \right).$$

为了突出电荷系在 P 点所建立的静电场, 可令

$$\vec{E}(P) = \sum_1^n \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u}_i \right).$$

上式给出电荷系在除诸 P_i 点外的任一点 P 所建立的静电场。

例题 E-2 在一条直线上有两个电荷 $-q$ 和 $+q$, 它们之间的距离为 $2a$ 。求在此直线上的电场。

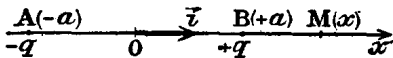


图 E-2-1

[解]: 如图, O 为 AB 线段的中点, (O, \vec{i}) 为线上的方位

标, x 为 M 点的横坐标(图 E-2-1)。

可运用下式来计算 $E(x)$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u}_i,$$

若用 \vec{u}_B 和 \vec{u}_A 分别表示从 B 指向 M 和从 A 指向 M 的单位矢量, 则上式可写成

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q\vec{u}_B}{(x-a)^2} + \frac{-q\vec{u}_A}{(x+a)^2} \right].$$

当 $x > 0$ 时, 在 $x = a$ 处电场没有定义, 因此只能讨论以下两种情况:

(1) $x > a$:

$$\vec{u}_B = \vec{u}_A = \vec{i}, \quad \vec{E} = E(x)\vec{i},$$

$$E(x) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{4ax}{(x^2 - a^2)^2}.$$

如果用 $-x$ 代替 x , 则 \vec{u}_B 和 \vec{u}_A 都等于 $-\vec{i}$, 于是

$$E(x) = E(-x).$$

(2) $0 < x < a$:

$$\vec{u}_B = -\vec{i}, \quad \vec{u}_A = +\vec{i},$$

$$E(x) = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{2(x^2 + a^2)}{(x^2 - a^2)^2}.$$

变 x 为 $-x$ 时 \vec{u}_B 和 \vec{u}_A 不变, 因而有 $E(x) = E(-x)$.

在 $x > 0$ 的情况下, $E(x)$ 的变化曲线如图 E-2-2 所示。在 O 点, 场强指向与 \vec{i} 相反的方向, 其模为

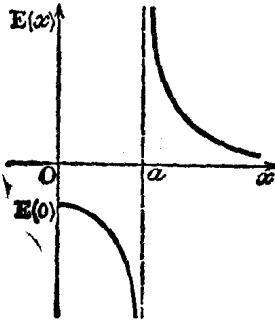


图 E-2-2

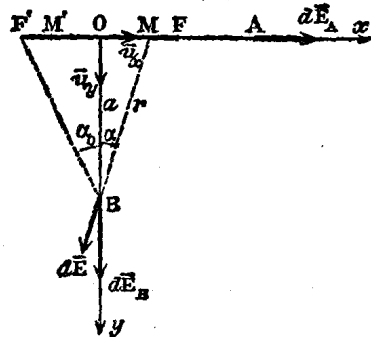


图 E-3