高等学校教材

物 理 学

第 四 版

下 册

严导淦 主编
严导淦 吴於人 修订

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内容简介

本书是为全日制普通高等学校本科大学物理课程编写的教材，兼作函授院校、夜大学、网络学院、高等职业技术学院以及高等教育自学考试的教学用书。

本书是在原《物理学》（第三版）的基础上修订而成的. 本书修订后，在内容和论述上删繁就简，使之易教易学，以适应广大师生的教学需求。

本书的自学辅导教材《物理学（第四版）阅读和解题指导》亦将同步出版，供函授院校、网络学院的师生作为面授课教学和自学指导用书，亦可作为全日制院校的习题课教学或复习用书。

全书分上、下两册，上册主要内容为力学的物理基础、机械振动和机械波、热学基础和附录；下册主要内容为电磁学、光学、量子物理简介. 本书为下册。

图书在版编目（CIP）数据

物理学. 下册/严导淦主编. — 4 版. —北京：高等教育出版社，2003. 12
ISBN 7 – 04 – 012978 – 7

Ⅰ. 物… Ⅱ. 严… Ⅲ. 物理学 – 高等学校 – 教材
Ⅳ. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2003）第 078922 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 – 64054588
社　　址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 – 810 – 0598
邮政编码	100011	网　　址	http://www. hep. edu. cn
总　　机	010 – 82028899		http://www. hep. com. cn
经　　销	新华书店北京发行所		
印　　刷			
开　　本	787 × 960　1/16	版　　次	1982 年 6 月　第 1 版
印　　张	21. 75		年　月　第 4 版
字　　数	400 000	印　　次	年　月　第　次印刷
		定　　价	22. 90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有　侵权必究

目　录

第篇　电　磁　学

引言 …… 3

第十一章　真空中的静电场 …… 4

§11－1　电荷 …… 4

§11－2　电荷间的相互作用　库仑定律 …… 7

§11－3　静电场　电场强度 …… 10

§11－4　电场强度的计算 …… 14

§11－5　电场线　电通量 …… 24

§11－6　真空中静电场的高斯定理 …… 28

§11－7　静电场的环路定律　电势能 …… 35

§11－8　电势　电势的计算 …… 39

§11－9　等势面　电场强度与电势的关系 …… 44

第十二章　静电场中的导体和电介质 …… 49

§12－1　静电场中的金属导体 …… 49

§12－2　静电场中的电介质 …… 55

§12－3　有电介质时静电场的高斯定理 …… 59

§12－4　电容　电容器 …… 64

§12－5　电场的能量 …… 71

第十三章　电流 …… 74

§13－1　电流强度　电流密度 …… 74

§13－2　稳恒电场　恒定电流 …… 78

§13－3　欧姆定律　电阻 …… 80

§13－4　电功率　焦耳定律 …… 85

§13－5　电动势　闭合电路的欧姆定律 …… 87

§13－6　一段含源电路　多回路电路 …… 92

第十四章　稳恒磁场 …… 97

§14－1　磁的基本现象 …… 97

§14－2　磁场　磁感应强度 …… 99

§14－3　毕奥－萨伐尔定律及其应用 …… 101

§14－4　磁感线　磁场的高斯定理 …… 109

§14－5　安培环路定理 …… 112
§14－6　磁场对载流导线的作用 …… 118
§14－7　带电粒子在电场和磁场中的运动 …… 125
§14－8　磁场中的磁介质 …… 134
§14－9　有磁介质时磁场的安培环路定理 …… 139
§14－10　铁磁质 …… 144
第十五章　电磁感应 …… 149
§15－1　电磁感应的基本规律 …… 149
§15－2　动生电动势 …… 156
§15－3　自感和互感 …… 162
§15－4　磁场的能量 …… 168
第十六章　电磁场与电磁波 …… 171
§16－1　涡旋电场 …… 171
§16－2　位移电流 …… 175
§16－3　电磁场理论的基本概念　麦克斯韦方程组的积分形式 …… 178
§16－4　电磁振荡 …… 180
§16－5　电磁波 …… 183
§16－6　电磁波谱 …… 187

第5篇　波动光学

引言 …… 193
第十七章　光的干涉 …… 195
§17－1　光强度　光的干涉 …… 195
§17－2　杨氏实验 …… 199
§17－3　半波损失　光程 …… 202
§17－4　薄膜的等倾干涉 …… 209
§17－5　薄膜的等厚干涉 …… 214
§17－6　迈克耳孙干涉仪 …… 220
第十八章　光的衍射 …… 223
§18－1　光的衍射　惠更斯－菲涅耳原理 …… 223
§18－2　单缝衍射 …… 225
§18－3　衍射光栅　衍射光谱 …… 230
§18－4　光学仪器的分辨率 …… 237
§18－5　X射线的衍射　布拉格公式 …… 240
第十九章　光的偏振 …… 245
§19－1　自然光和偏振光 …… 245

§19－2　偏振片的起偏和检偏　马吕斯定律 …… 248
§19－3　反射和折射时光的偏振 …… 251
§19－4　椭圆偏振光和圆偏振光　波片 …… 256
§19－5　偏振光的干涉　人为双折射 …… 259

第篇　量子物理简介

引言 …… 265
第二十章　早期量子论 …… 266
§20－1　热辐射　普朗克量子假设 …… 266
§20－2　光电效应 …… 271
§20－3　康普顿效应 …… 277
§20－4　玻尔量子理论 …… 279
第二十一章　量子力学简介 …… 286
§21－1　德布罗意的假设　海森伯的不确定关系 …… 286
§21－2　波函数 …… 289
§21－3　薛定谔方程 …… 293
§21－4　定态薛定谔方程的应用 …… 295
§21－5　电子的自旋　多电子原子及电子壳层模型 …… 304
§21－6　激光 …… 309
§21－7　固体的能带结构　半导体 …… 314
第二十二章　原子核物理学简介 …… 321
§22－1　原子核的结构和基本性质 …… 321
§22－2　原子核的衰变和衰变规律 …… 325
§22－3　核反应 …… 329
§22－4　原子核能的利用 …… 333
§22－5　基本粒子简介 …… 337

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第篇

电　磁　学

引　言

电磁学是研究电磁现象及其基本规律的一门学科. 它是现代工程技术和自然科学的重要基础.

在日常生活和工农业生产的信息化、自动化方面以及医疗、生物学等各个领域中,电磁学得到了广泛的应用. 例如,电动机是工程上许多机械的原动力,电灯和电炉是照明和加热的常用器具,电话、电报、传真、电视、电子计算机等是信息传输中最有效的工具. 电的广泛应用是与电所具有的各种特性分不开的. 第一,电能较容易转变为机械能、热能、光能、化学能等其他形式的能量,所以利用电作为能源最为简便. 第二,大功率的电能便于远距离传输,而且能量的损耗较少. 第三,电磁信号可借电磁波的形式在空间传播,能够在极短时间内把信号传送到远方. 因而便于远距离控制、检测和自动控制,使工业自动化和探测遥远星体成为可能.

电磁学的研究,对人类认识物质结构也是极重要的. 从表面来看,自然界中许多现象,如植物的生长、水的冻结等等,似乎与电磁作用无关,但是研究表明,在从原子到细胞的广阔领域内,物质的物理和化学性质以及生物现象都与电磁作用有关. 例如,一切化学反应都可归结为分子中的原子在电的相互作用下进行重新组合.

19 世纪以来,许多科学家对电磁现象的规律和物质的电结构做了大量的实验和理论研究,总结出了经典电磁理论.

本篇主要研究经典电磁学.

第十一章　真空中的静电场

本章首先研究真空中的静电场，继而在下一章讨论有导体和电介质存在时的静电场.

§11－1　电　　荷

（一）电荷

一切电的现象都起源于电荷的存在或电荷的运动. 那么什么是电荷呢？我们把两种质料不同的物体，例如丝绢和玻璃棒相互摩擦后，它们都能吸引羽毛、小纸片等轻微物体（图 11－1）. 这时，我们就说丝绢和玻璃棒这两个物体都已处于带电状态，它们分别带有电. 处于带电状态的物体，称为带电体或电荷. 归纳大量的实验结果证明，自然界中只存在两种电荷，即正电荷和负电荷. 带同种电荷的物体互相排斥，带异种电荷的物体互相吸引. 这种相互作用的吸力或斥力都是电性力. 根据带电体的性质和相互之间作用力的大小，我们能够确定物体所带电荷的多少（带电的程度）. 物体所带电荷的量值以 q 或 Q 表示. 在国际单位制中，电荷的单位是 C，称为库仑，简称库. 我们通常将正、负电荷分别表示为正值和负值. 例如. 将带有等量异种电荷的物体相接触，它们所带正、负电荷之代数和为零，表现为对外的电效应相互抵消，宛如不带电一样. 这时，它们呈电中性. 这种现象叫做放电或电中和.

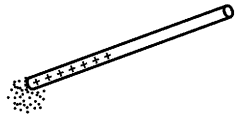


图 11－1　用丝绢摩擦过的玻璃棒能吸引轻微物体

使物体带电，叫做起电. 上述用摩擦方法使物体带电，叫做摩擦起电，任何物体都可能带电. 要使物体带电，除上述摩擦起电外. 有时也可利用接触起电、静电感应等方法.

至于物体为什么会带电？我们可从物质的内部结构来说明.

（二）物质的电结构理论

我们知道，宏观物体（固体、液体、气体）都是由分子、原子组成的.

1911 年，卢瑟福（E. Rutherfold）根据 α 粒子散射实验的研究结果，提出了原子的有核模型（图 11－2），认为：在原子序数为 Z 的元素的原子内包含一个正电荷为 Ze（e 称为元电荷）的原子核，原子的质量几乎全部集中于核上，核直径的数量级为 10^{-15} m，位于原子中央；核外有 Z 个带负电的电子，可看作处于真空中，分别绕核旋转. 与原子直径的数量级 10^{-10} m 相比，可见原子核远小于原子.

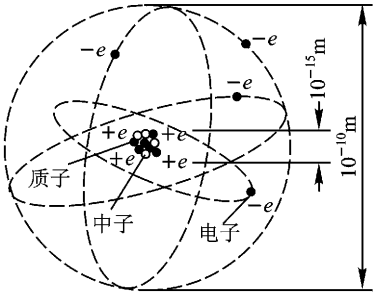


图 11－2　原子的结构

对最简单的氢原子来说，核外仅有一个电子. 氢原子的原子核带有电荷 $+e$，其质量约为电子的 1840 倍，称为质子.

原子核中含有带正电的质子和不带电的中子，原子核所带的正电荷就是核内全部质子所带正电荷之总和. 一个质子所带电荷的大小和一个电子所带电荷的大小相等，都用 e 表示. 据测定，$e \approx 1.60 \times 10^{-19}$ C. 我们把一个质子或一个电子所带电荷量的绝对值称为元电荷. 质子的质量和中子的质量大致相等. 据测定，电子的质量 $m_e \approx 9.11 \times 10^{-31}$ kg. 现将上述结果列于下表，供参考.

表 11－1　电子、质子、中子的电荷和质量

	电　子	质　子	中　子
电　荷	$-e$	e	0
质　量	m_e	$1840\ m_e$	$1840\ m_e$
其中：$e = 1.60 \times 10^{-19}$ C，　$m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg			

如上所述，从电学的角度来看，任何物体都是一个拥有大量正、负电荷的集合体. 在正常状态下，原子核外电子的数目，等于原子核内质子的数目，因此每个原子内的正、负电荷之代数和为零，即每个原子都呈现电

中性. 这时,整个物体对外界不显示电性. 换句话说,在一切不带电的中性物体中,总有等量的正、负电荷同时存在.

但是原子核所带的正电荷和核外电子所带的负电荷之间相互作用的电性力,随物质的不同而有强弱. 如果有若干个中性的原子或分子,由于外来原因,失去一个或若干个电子,则这些原子或分子内全部质子所带的正电荷多于全部电子所带的负电荷,于是,它们带正电荷而成为正离子;反之,如果有若干个中性的原子或分子从外界获得了一个或若干个电子,则这些原子或分子内的负电荷多于正电荷,于是,它们带负电荷而成为负离子. 上述这些现象称为电离. 在这两种电离情况下,对整个物体来说,都呈现带电状态.

如上所述,物体带电实际上是获得或失去电子的结果. 这意味着电荷不能离开电子、质子而存在. 由此看来,电荷乃是电子、质子等微观粒子所具有的一种属性.

可以这么说,所有电磁现象都是电子的得失或运动而引起的.

问题 11.1.1　简述物质的电结构理论;电荷是什么?何谓起电和放电?

(三) 电荷守恒定律

在两种质料不同的物体相互摩擦而起电的过程中,使每个物体中都有一些电子摆脱了带正电的原子核的束缚,转移到另一个物体上去. 但由于不同质料的物体,彼此向对方转移的电子个数往往不相等,其结果,必然是一个物体因失去一部分电子而带正电,另一个物体则得到这部分电子而带负电. 所以,摩擦起电时,两个物体总是同时带异种而等量的电荷.

由摩擦起电和其他起电过程的大量实验事实表明,一切起电过程其实都是使物体上正、负电荷分离或转移的过程,在这种过程中,电荷既不能消灭,也不能创生,只能使原有的电荷重新分布. 由此可以总结出电荷守恒定律:一个孤立系统的总电荷(即系统中所有正、负电荷之代数和)在任何物理过程中始终保持不变. 所谓孤立系统,就是指它与外界没有电荷的交换. 电荷守恒定律也是自然界中一条基本的守恒定律,在宏观和微观领域中普遍适用.

根据电荷守恒定律可知,电荷不能被创造或消灭,只能被迁移或中和. 当我们分离正、负电荷时,必须付出某种形式的能量,以反抗正、负电荷间的吸引力而作功. 在正、负电荷分离过程中,所做的功就转变为电能. 相反地,两种电荷互相中和时,电能就转变为其他形式的能量(如热能、声能、光能等). 例如,大量的正、负电荷中和时,往往会发生火花,并伴有劈啪声,形成火花放电;火花放电有时甚至还会引起爆炸. 所以,随着物体

起电或中和过程的进行，必定有电能和其他形式能量在相互转换着．并且，在转换过程中，是遵循能量守恒定律的．

（四）电荷的量子化

实验表明，电子是自然界具有最小电荷的带电粒子．任一带电体所带电荷量的大小都是电子所带电荷量的大小 e 的整数倍，这就是说，e 是电荷的一个基本单元．当带电体的电荷发生改变时，它只能按 e 的整数倍改变，不能作连续的任意改变．这种电荷只能一份一份地取分立的、不连续的数值的性质，叫做电荷的量子化．电荷的量子就是 e．不过，常见的宏观带电体所带的电荷远大于元电荷，在一般灵敏度的电学测试仪器中，电荷的量子性是显示不出来的．因此在分析带电情况时，可以认为电荷是连续变化的．这正像人们看到江河中滔滔流水时，认为它是连续的，而并不感觉到水是由一个个分子、原子等微观粒子组成的一样．

问题 11.1.2　（1）何谓电荷的量子化？试述电荷守恒定律．

（2）在干燥的冬天，人在地毯上走动时，为什么鞋和地毯都有可能带电？人在夜里脱卸化纤衣服时，为什么衣服上会出现闪光的火花？

§11－2　电荷间的相互作用　库仑定律

带电物体相互间有力的作用，这是电荷的一种对外表现，人们对电现象的认识，就是从这种作用开始的．一般地说，两个带电体之间的相互作用，除了和它们所带的电荷有关外，还和它们本身的大小、形状、电荷在带电体上的分布以及周围介质的性质等有关，情况相当复杂．为此，下面我们先讨论最简单的、也是最基本的问题，即两个相对静止的点电荷在真空中相互作用力的规律．

（一）点电荷

在电学中，当所研究的带电体之间的距离比它们本身的线度大得多时，我们就可把这些带电体看作点电荷．点电荷本身不一定是体积很小的带电体，只是它的形状和大小可以不必考虑，而用一个拥有带电体全部电荷的几何点来表示；这样，它在空间的位置也就便于确定．

（二）真空中的库仑定律

1785 年，库仑（C. A. Coulomb）通过扭秤实验，总结出真空中两个静止的点电荷间相互作用的基本规律，称为真空中的库仑定律，简称库仑定

需要全本请访问 www.ertongbook.com

律，可陈述为：在真空中，两个静止的点电荷之间相互作用力 F 的方向沿着它们的连线，作用力的大小 F 与电荷 q_1 与 q_2 的乘积成正比，与它们之间距离 r 的平方成反比，即

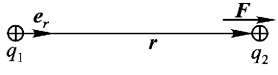
$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad ⓐ$$

式中 k 是比例系数. 这种静止电荷之间的相互作用力称为静电力，常称库仑力.

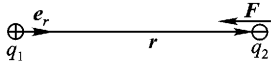
为了确定力的方向，在图 11－3 中，若以 $\boldsymbol{r}$ 表示 q_2 相对于 q_1 的位矢，其大小为 $|\boldsymbol{r}| = r$，方向从 q_1 指向 q_2，则电荷 q_2 受到 q_1 的作用力 $\boldsymbol{F}$，可用矢量形式的库仑定律来表示，即

$$\boldsymbol{F} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}\left(\frac{\boldsymbol{r}}{r}\right) = k\frac{q_1 q_2}{r^2}\boldsymbol{e}_r \qquad ⓑ$$

式中，$\boldsymbol{e}_r = \boldsymbol{r}/r$ 是沿 $\boldsymbol{r}$ 方向的单位矢量，它标志位矢 $\boldsymbol{r}$ 的方向. 上式中，若 q_1 与 q_2 是同种电荷，乘积 $q_1 q_2 > 0$，$\boldsymbol{F}$ 沿 $\boldsymbol{e}_r$ 的方向，表示为斥力[图 11－3(a)] 若 q_1 与 q_2 是异种电荷，$q_1 q_2 < 0$，$\boldsymbol{F}$ 沿 $\boldsymbol{e}_r$ 反向，表示为引力[图 11－3(b)].



(a) q_1、q_2为同种电荷



(b) q_1、q_2为异种电荷

图 11－3　q_1对q_2的作用力

利用式ⓑ，同样可求电荷 q_2 对 q_1 的作用力 $\boldsymbol{F}'$，它是上述 $\boldsymbol{F}$ 的反作用力，即 $\boldsymbol{F}' = \boldsymbol{F}$. 这时，只需把式中的 $\boldsymbol{e}_r$ 理解为从 q_2 指向 q_1 的单位矢量就行了.

在国际单位制中，电荷的单位是 C(库)，距离的单位是 m(米)，力的单位是 N(牛)，根据间接的实验推断，k 值为

$$k = 8.987\ 776 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}} \approx 9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}}$$

通常，我们引用一个新的常量 ε_0 来取代 k，令 $k = 1/(4\pi\varepsilon_0)$，则真空中库仑定律便可完整地表示成如下的常用形式，即

$$\boxed{\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\boldsymbol{e}_r} \qquad (11-1)$$

在式(11－1)中，ε_0 称为真空电容率，它表征真空的电学特性，在电学中是一个重要的常量，其值为

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} \approx \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}}} \approx 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}}$$

问题 11.2.1 (1) 试述库仑定律及其比例系数 k；说明 ε_0 在国际单位制中的大小和单位. 什么叫做点电荷？在库仑定律中，倘若令 $r \to 0$，则库仑力 $F \to \infty$，显然没有意义. 试对此作出解释.

例题 11－1 计算氢原子内电子和原子核之间的库仑力与万有引力之比值.

解 设氢原子里电子的质量为 m_1，原子核的质量为 m_2，两者相距为 r，且因电子和原子核所带的电荷等量异种，电荷大小均为 e，故电子与原子核间的库仑力(吸引力)[①]和万有引力大小分别为①

$$F_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} \quad , \quad F_m = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

式中 G 为万有引力常量. 把上两式相比，有

$$\frac{F_e}{F_m} = \frac{\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}e^2}{Gm_1 m_2}$$

查阅表 11－1，$e = 1.60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$，$m_1 = 9.11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$，$m_2 = 1840 m_1$；而常量 $1/4\pi\varepsilon_0 = 9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}}$，$G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}$，将它们代入上式，可算出库仑力与万有引力的比值为

$$\frac{F_e}{F_m} = \frac{(9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}}) \times (1.60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C})^2}{(6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}) \times 1840 \times (9.11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg})^2} = 2.26 \times 10^{39}$$

说明 上述结果表明，$F_e \gg F_m$，即在物质的原子内，电子和原子核之间的静电力远比它们之间的万有引力为大，因此在考察原子内电子与原子核之间的相互作用时，万有引力可以忽略不计.

习题 11－1 铁原子核里的两个质子间相距 $4.0 \times 10^{-15}\ \mathrm{m}$. 求：(1) 它们之间的库仑力 F；(2) 比较这个力与每个质子所受重力 W 的大小.

答案 $F = 14.4\ \mathrm{N}$，斥力；$W = 1.64 \times 10^{-26}\ \mathrm{N}$；$F \gg W$

习题 11－2 设例题 11－1 中的氢原子里，电子沿圆形轨道绕原子核旋转，轨道半径为 $0.529 \times 10^{-8}\ \mathrm{cm}$. 求电子的向心加速度和每秒钟绕核的转数.

答案 $9.04 \times 10^{22}\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$，$6.58 \times 10^{15}\ \mathrm{r \cdot s^{-1}}$

(三) 静电力叠加原理

在一般情况下，对于两个以上的点电荷，实验证明：其中每个点电荷所受的总静电力，等于其他点电荷单独存在时作用在该点电荷上的静电

① 在本篇内容及所有问题、例题和习题中，凡对电荷周围介质的情况未加任何说明时，均指真空而言.

力之矢量和. 这就是静电力的叠加原理. 也就是说,不管周围有无其他电荷存在,两个点电荷间的相互作用力总是符合库仑定律的. 设 $\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$、…、$\boldsymbol{F}_n$ 分别为点电荷 q_1、q_2、…、q_n 单独存在时对点电荷 q_0 作用的静电力,则 q_0 所受静电力的合力 $\boldsymbol{F}$ 为

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \cdots + \boldsymbol{F}_n = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_i^n \frac{q_i q_0}{r_i^2} \boldsymbol{e}_{r_i} \qquad (11-2)$$

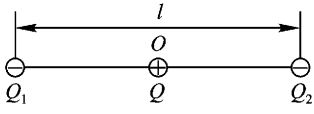
上式即为静电力叠加原理的表达式.

库仑定律与静电力叠加原理是静电学的最基本规律. 原则上,有关静电学的问题都可用这两条规律解决.

例如,在求两个带电体之间的作用力时,若不能把它们当作点电荷,就无法直接应用库仑定律,这时根据上述叠加原理,可将它们划分成无数个能看成为点电荷的电荷元,求出一个带电体上每一电荷元对另一带电体上每一电荷元的相互作用力,再求其矢量和,就可得到两个带电体之间相互作用的静电力.

问题 11.2.2 (1) 试述静电力叠加原理. 对不能看作点电荷的带电体,它们之间的相互作用力如何求法?

(2) 如图,两个带负电的静止点电荷 Q_1 和 Q_2,相距为 l,一个正的点电荷 Q 放在两者连线的中点 O,试在两电荷的大小 $|Q_1| = |Q_2|$ 和 $|Q_1| \neq |Q_2|$ 这两种情形下,分别讨论电荷 Q 所受静电力的合力方向.



问题 11.2.2(2)图

习题 11-3 在问题 11.2.2(2)中,设正电荷 Q 的质量为 m,把它沿两个固定的负电荷 Q_1、Q_2 连线的中垂线方向稍微移开,然后释放. 倘若电荷 Q_1、Q_2 和 Q 的大小均等于 q,求证:正电荷 Q 在释放后作简谐运动,其频率为 $\nu = q/(\pi\sqrt{\pi\varepsilon_0 m l^3})$.

§11-3 静电场 电场强度

(一) 电场是物质 静电场及其对外表现

大家知道,人们用手推小车时,人与车之间的相互作用力是通过手和小车的直接接触来实现的. 两个带电体在真空中并未直接接触,那么,它们之间的相互作用是如何实现的呢?对于这个问题,在很长时间内,人们

误认为带电体之间的作用是一种“超距作用”①. 直到上世纪,人们才从电、磁现象的实践和电磁波的发现中,逐渐形成了另一种观点,即认为带电体之间的相互作用同样是通过物质间的直接接触而实现的. 人们认为,任何带电体的周围空间内都存在着一种特殊的物质,这种特殊物质叫做由该带电体所激发的电场;当另一个带电体处于该带电体所激发的电场中时,它就要受到所在处的电场力作用. 换句话说,电荷与电荷之间是通过电场这种特殊物质而相互作用的. 例如,两个电荷 q_1、q_2 间的相互作用,是由于电荷 q_1(作为场源电荷)在周围空间激发的电场对电荷 q_2 有力的作用;同时,电荷 q_2(作为场源电荷)在周围空间激发的电场对电荷 q_1 也有力的作用. 这种相互作用可表示为①

$$\text{电荷} \rightleftharpoons \text{电场} \rightleftharpoons \text{电荷}$$

近代的科学实验充分肯定了场的观点,而且还证实了电场和一切由分子、原子组成的物质一样,也具有能量、动量和质量等属性. 因此,电场也是一种物质. 但是电场这种物质与人们平常所理解的由分子、原子等微粒所构成的物质,在表现的形态上是不相同的.

如上所述,带电体的周围伴随有一个电场. 如果带电体相对于观察者所在的惯性参考系(例如地球等)是静止的,则在这带电体周围存在的电场称为静电场. 它对外的表现主要是:

(1) 引入静电场中的任何带电体都要受到电场所施力的作用,库仑力实际上就是这种电场力.

(2) 当引入静电场中的带电体在电场中移动时,电场力也可能对它做功.

静止的带电体既然是通过它在周围所激发的静电场对其他带电体施加作用的,那么,我们必须对静电场所具有的性质和规律有较详尽的认识,才有可能进一步来研究许多电学上的问题.

问题 11.3.1 (1) 电荷间的相互作用是如何实施的?静电场对外有何表现?

(2) 两个等量异种电荷互相接触而被中和,在它们的周围空间里是否存在电场?若存在,则另一个电荷放在此空间中,是否受到电场力?

(二) 电场强度

一般地说,电场是由电荷激发的. 为了显示电场的存在,并研究电场

① 所谓“超距作用”,是指一个带电体所受到的作用力是由另一个带电体直接给予的,这种作用的传递并不需要中间媒介,也不需要时间,而完全可以从一个带电体即时地作用于另一个带电体.

中各点(简称场点)的性质,我们通常取一个试探电荷 q_0 放在各场点,以测定其所受的力.试探电荷应符合下列要求:首先,它所带的电荷必须很小,以免它本身激发的电场对所研究的电场有显著影响;其次,它的几何尺寸必须很小,因而可视作点电荷.

如图 11-4 所示,在带电体 q 周围的空间里,我们把用丝线悬挂着的带电小球作为试探电荷 q_0,将它先后放到待测的某些点 P_1、P_2、P_3 上,如果测得 q_0 在这些点上都受到力的作用,这就表明在这些点上存在着电场;而电场对 q_0 的作用力 F 的大小可由丝线偏离铅垂线的角 θ 来量度.实验发现,在不同位置上,试探电荷 q_0 的偏角 θ 和偏离的方向不尽相同.距离 q 越远,偏角 θ 越小,试探电荷 q_0 所受的力也越小,因而表明该处电场越弱.同时,在空间的不同位置(例如在 P_1、P_3 点上),试探电荷 q_0 偏离的方向亦不相同,因而表明电场对 q_0 施力的方向亦可能随位置而变化.这也就是说,把试探电荷 q_0 放在电场的不同地点时,它所受电场力的大小和方向可以是逐点变化的.

如果在电场中某一个确定点 P 上,先后放置一量值不同而同种的试探电荷 q_0、$2q_0$、$3q_0$、…,实验指出,试探电荷受力的方向相同、而大小不同,相应地为 $\boldsymbol{F}$、$2\boldsymbol{F}$、$3\boldsymbol{F}$、….显然,在同一点 P 上,有

$$\frac{\boldsymbol{F}}{q_0}=\frac{2\boldsymbol{F}}{2q_0}=\frac{3\boldsymbol{F}}{3q_0}=\cdots=\text{恒矢量}$$

可见,在电场中的某一个确定点上,若试探电荷 q_0 的量值改变,它所受的力 F 的大小也改变,但它们两者之比 F/q_0 这个矢量却是确定不变的,亦即其大小 $F/|q_0|$ 和力 F 的方向是一定的.

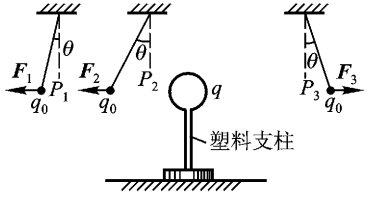


图 11-4 试探电荷在电场中不同位置的受力情况
(假定图中的场源电荷 q 和试探电荷 q_0 均为正)

对于电场中不同的点,一般来说,F/q_0(包括其大小 $F/|q_0|$ 和 F 的方向)也要随之而变,但各点分别有其确定的大小和方向.

由此可见,F/q_0 反映的是静电场在各场点所表现的一种性质,因而它只与激发电场的场源电荷 q 和电场中各点的位置有关.于是,我们便可在

电场中的每一点上，把所测出的作用于该处试探电荷 q_0 上的力 F 与 q_0 之比 F/q_0，作为描述静电场性质的一个物理量，并称为电场强度，它是一个矢量，以符号 E（简称 E 矢量）表示，即

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_0} \tag{11-3}$$

从上述电场强度的定义式可知，电场中某点的电场强度等于位于该点的单位正电荷所受的力. 也就是说，某一点的电场强度矢量，其大小等于单位正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；与负电荷在该点所受电场力的方向相反（如图 11-5 中的 E_1、E_2 等）[①]. ①

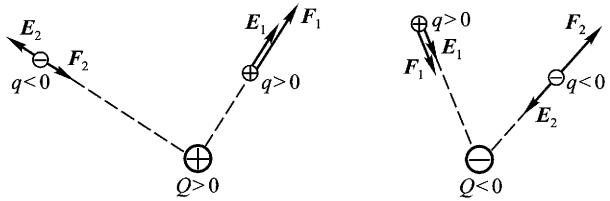


图 11-5　电场强度和电场力的方向（图中 Q 表示场源电荷）

场强的单位是 $\mathrm{N \cdot C^{-1}}$（牛每库）.

问题 11.3.2　（1）试述电场强度的定义？它的单位是怎样规定的？

（2）在一个带正电的大导体附近的一点 P，放置一个试探电荷 q_0（$q_0 > 0$），实际测得它所受力的大小为 F. 若电荷 q_0 不是足够小，则 F/q_0 的值比点 P 原来的电场强度 E 大还是小？若大导体带负电，情况又将如何？

（3）有人问："对于电场中的某场点，电场强度的大小为 $E = F/q_0$，这不是与试探电荷 q_0 成反比吗？为什么却说 E 与 q_0 无关？"你能回答这个问题吗？

（三）电场强度叠加原理

在点电荷 q_1、q_2、…、q_n 共同激发的电场中某场点 P，放置一个试探电荷 q_0. 根据静电力的叠加原理，试探电荷 q_0 所受的力 F，等于各个点电荷 q_1、q_2、…、q_n 单独存在时电场施于试探电荷 q_0 的力 F_1、F_2、…、F_n 之矢量和，即

---

① 读者注意，为了表示电荷的正、负，我们约定电荷 q 是一个代数量，即将正、负电荷分别用 $q > 0$ 和 $q < 0$ 表示（见图 11-6），但有时我们也常将正、负电荷分别表示为 $+q$ 或 $-q$，这时，应将 q 理解为电荷的大小（绝对值）.

需要全本请访问 www.ertongbook.com