

高等学校试用教材

电 磁 学

梁灿彬 秦光戎 梁竹健

人民教育出版社

0333683

高等学校试用教材

电 磁 学

梁灿彬 秦光戎 梁竹健



21113000866819

人民教育出版社

本书由梁灿彬、秦光戎、梁竹健等在北京师范大学物理系使用的电磁学讲义的基础上,根据1977年10月全国高等学校理科物理教材会议所订的教材编写大纲编写而成的。

本书结合师范院校的特点,较系统地阐述了电磁现象的基本概念和基本规律,并收编了一定数量的思考题和习题。内容包括:静电场的基本规律、导体周围的静电场、静电场中的电介质、稳恒电流和电路、稳恒电流的磁场、电磁感应与暂态过程、磁介质、交流电路、电磁场和电磁波、电磁学的单位制。本书内容叙述比较详细,既考虑到与理论物理课程的衔接,也照顾到与中学物理教材的衔接。

本书可作为高等学校物理专业电磁学课程的试用教材,也可供其他专业有关教师、学生参考,也可供中学物理教师参考。

高等学校试用教材

电 磁 学

梁灿彬 秦光戎 梁竹健

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 22 字数 532,000

1980年12月第1版 1981年6月第1次印刷

印数 00,001—30,000

书号 13012·0544 定价 1.95 元

前 言

在 1978 年 8 月于济南召开的全国高等师范院校教材编审会议上,许多代表建议编写一套适合师范院校特点的普通物理学及理论物理学教材.我们接受会议的委托,根据 1977 年 10 月在全国高等学校理科物理教材会议所订的教材编写大纲,以作者之一梁灿彬在北京师范大学物理系几年来的自编讲义为基础,写成本书.

考虑到高等师范院校教学上的特点,本书对电磁学中的一系列基本概念和基本规律作了比较详尽的阐述,对教学中的重点和难点作了比较细致的分析.考虑到学生学习程度的不同,本书把对某些问题的进一步讨论以及某些扩大知识面的内容用小字排印,讲授时可以略去.大字部分的内容自成体系,不会由于略去小字内容而影响后续大字部分内容的学习.为了启发学生思考问题、巩固所学内容以及培养学生分析问题和解决问题的能力,本书每章都配有适量的思考题和习题,其中一部分选自国内外有关的教科书及习题集,另一部分系根据我们在教学中积累的经验和学生的典型问题自编而成.对于后一类题目,还有待读者的推敲和时间的考验.其中标以 * 号的习题与书中小字部分相对应.

本书共分十章.第一、二、三、六、七、八、十章及附录由梁灿彬执笔,第五、九章由秦光戎执笔,第四章由梁竹健执笔.每章的初稿都是在作者们共同讨论后分工修改定稿的.全书的思考题及习题由梁竹健、赵云英、任翠娥、张玉梅、陈淑娴负责.在本书的编写过程中,我们得到了北京师大物理系许多师生以及校外许多同志的关心、支持和帮助.梁绍荣同志在全书编写过程中负责组织和领导工作,与作者们讨论了重要章节的安排,还审阅过绝大部分章

节并提出过许多宝贵的意见。北京师大物理系电学教研室的大部分教师阅读过每章的初稿并参加了各章初稿的讨论，提出过许多有益的意见和建议。在1979年12月召开的本教材审稿会议上，上海师范学院(主审)、陕西师范大学、四川师范学院、华南师范学院、山东师范学院、武汉大学、江苏师范学院、哈尔滨师范学院、北京师范学院、天津师范学院、华中师范学院、山西师范学院等院校的代表提出了许多宝贵的修改意见。赵卓新、窦希如、冒已锋、陈佛生等同志帮助绘制了大部分插图。作者谨此一并致谢。

由于作者水平不高，编写时间又较仓促，书中错误和缺点一定不少。恳请广大教师和读者不吝指正。

梁灿彬 秦光戎 梁竹健

1980年8日于北京

目 录

第一章 静电场的基本规律	1
§ 1. 电荷	1
§ 2. 库仑定律	3
§ 3. 静电场	9
§ 4. 高斯定理	20
§ 5. 电力线	35
§ 6. 电位	40
第二章 导体周围的静电场	64
§ 1. 静电场中的导体	64
§ 2. 封闭导体壳内外的场	77
§ 3. 电容器及其电容	88
§ 4. 静电演示仪器	100
§ 5. 带电体系的静电能	106
第三章 静电场中的电介质	124
§ 1. 概述	124
§ 2. 偶极子	125
§ 3. 电介质的极化	133
§ 4. 极化电荷	139
§ 5. 电位移 D 有介质时的高斯定理	147
§ 6. 有介质时的静电场方程	160
§ 7. 电场的能量	164
* § 8. 压电效应及其应用	166
第四章 稳恒电流和电路	176
§ 1. 电流 稳恒电流	176
§ 2. 直流电路	183
§ 3. 欧姆定律 焦耳定律	187
§ 4. 电阻的串联和并联	200

§ 5. 电流、电压和电阻的测量·····	210
§ 6. 电源和电动势·····	218
§ 7. 基尔霍夫方程组·····	234
§ 8. 二端网络理论简介·····	244
§ 9. 接触电位差 温差电现象·····	252
§ 10. 液体导电和气体导电·····	260
第五章 稳恒电流的磁场 ·····	279
§ 1. 基本磁现象概述·····	279
§ 2. 磁感应强度 B 磁感应线 运动电荷在磁场中 受到的力·····	284
§ 3. 毕奥-萨伐尔定律·····	294
§ 4. 磁通量 磁场的“高斯定理”·····	303
§ 5. 安培环路定理·····	310
§ 6. 带电粒子在磁场中的运动·····	318
§ 7. 磁场对载流导体的作用·····	327
§ 8. 闭合电流的磁矩·····	334
§ 9. 电流强度单位——安培的定义·····	337
第六章 电磁感应与暂态过程 ·····	353
§ 1. 电磁感应·····	353
§ 2. 楞次定律·····	356
§ 3. 动生电动势·····	362
§ 4. 感生电动势 感生电场·····	373
§ 5. 自感·····	388
§ 6. 互感·····	392
§ 7. 涡电流·····	398
§ 8. RL 电路的暂态过程 ·····	404
§ 9. RC 电路的暂态过程 ·····	414
§ 10. RLC 电路的暂态过程 ·····	421
§ 11. 磁能·····	429
第七章 磁介质 ·····	445
§ 1. 磁介质存在时静磁场的基本规律·····	445

§ 2. 顺磁性与抗磁性	459
§ 3. 铁磁性与铁磁质	464
* § 4. 磁荷观点 永磁体	476
§ 5. 磁路及其计算	483
§ 6. 磁场的能量	492
第八章 交流电路	501
§ 1. 交流电	501
§ 2. 三种理想元件的电压与电流的关系	506
§ 3. 复数法和矢量法	511
§ 4. 复阻抗	527
§ 5. 交流电路定律的复数形式	532
§ 6. 功率和功率因数	537
§ 7. 谐振现象	552
§ 8. 变压器	564
第九章 电磁场和电磁波	598
§ 1. 位移电流	598
§ 2. 麦克斯韦方程组	604
§ 3. 平面电磁波	606
§ 4. 偶极振子的辐射场 电磁波谱	618
§ 5. 似稳电磁场和似稳电路	633
第十章 电磁学的单位制	639
§ 1. 单位制基本知识	639
§ 2. 国际单位制(SI)	645
§ 3. 电磁学的单位制	649
附录	663

第一章 静电场的基本规律

§ 1 电 荷

大家知道,用丝绢或毛皮摩擦过的玻璃、火漆、硬橡胶等都能吸引轻小物体,这表明它们在摩擦后进入一种特别的状态.我们把处于这种状态的物体叫做**带电体**.并说它们带有**电荷**^①.大量实验表明,自然界中的电荷只有两种,一种与丝绢摩擦过的玻璃棒的电荷相同,叫**正电荷**;另一种与毛皮摩擦过的火漆棒的电荷相同,叫**负电荷**.同种电荷间有斥力,异种电荷间有吸力.当异种电荷在一起时,它们的效应有互相抵消的作用.

利用同性相斥的现象可以制成验电器(图 1-1),它是检验物体是否带电的最简单仪器.验电器的主要部分是一根上端带有金属小球的金属棒,棒的下端悬挂着两片金属箔片.当带电体与金属小球接触时,金属箔便得到同种电荷并张开.为了避免气流的影响,金属棒和箔片封闭在一个玻璃瓶中.



图1-1 验电器

从验电器的实验看出,电荷可以从金属棒的一端移至另一端。

① 按通常的理解,带电体是指处于带电状态的物体,电荷是指带电体的一种属性,而电量则是电荷的定量测度(电量的确切定义见 2.1 节末小字).但这三个词往往被不加区别地使用,其中电荷一词用得最广.在某些情况下,电荷实际是指带电体本身(如把小电带体叫:“点电荷”),在更多情况下则把电荷作为电量的同义词.

但并非所有物体都允许电荷通过。允许电荷通过的物体叫**导体**，不允许电荷通过的物体叫**绝缘体**。绝缘体也叫**电介质**。干燥的玻璃、橡胶、塑料、陶瓷等是良好的绝缘体，而金属、石墨和酸、碱、盐的水溶液(统称**电解液**)则是良好的导体。人体、墙壁和地球也是导体，但导电性不如金属。干燥且未被电离的气体是绝缘体，但被电离的气体却是导体。此外，还有一种导电性介于导体与绝缘体之间而且电性质非常特殊的材料(例如锗和硅)，叫做**半导体**。半导体是近代电子技术的重要材料，有关半导体的知识将在后续课程中予以介绍。

物体具有不同的导电性，这可用物质的微观结构解释。金属之所以导电，是因为内部存在许多**自由电子**，它们可以摆脱原子核的束缚而自由地在金属内部运动。电解液之所以导电，是因为内部存在许多能作宏观运动的正、负离子。反之，在绝缘体内部，由于电子受到原子核的束缚，基本上没有自由电子，因此呈绝缘性质。

大量实验证明，在一个与外界没有电荷交换的系统内，正负电荷的代数和在任何物理过程中始终保持不变，这叫做**电荷守恒定律**，是物理学的重要规律之一。

电荷的另一个重要特性是它的“量子性”，即任何带电体的电荷都只能是某一基本单位的整数倍。这个基本单位就是一个电子所带的电荷，叫做**电子电荷**，记作 e 。质子的电荷与电子电荷的绝对值相同，只不过质子的电荷是正的。近代物理从理论上预言有一种电量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的基本粒子(称为层子或夸克)存在，并认为质子和中子等许多粒子都由层子组成，不过层子至今尚未直接为实验发现。

§ 2 库 仑 定 律

2.1 库仑定律

观察表明, 两个静止的带电体之间的作用力(静电力)除与电量及相对位置有关外, 还依赖于带电体的大小、形状及电荷的分布情况. 要用实验直接确立所有这些因素对静电力的影响是困难的. 但是, 如果带电体的线度比带电体之间的距离小得多, 那么静电力就基本上只取决于它们的电量和距离, 问题就会大为简化. 满足这个条件的带电体叫做**点带电体**或**点电荷**. 点电荷的概念类似于力学中质点的概念. 带电体能否被看作点电荷, 不仅取决于本身的大小, 而且取决于它们之间的距离. 例如, 两个半径为 1 厘米的带电球, 当球心距离为 100 米时可充分精确地被看作点电荷; 当球心距离为 3 厘米时再看作点电荷就会带来很大误差. 但是, 究竟带电体的线度比距离小多少才能被看作点电荷, 却没有一个绝对的标准, 它取决于讨论问题时所要求的精确程度. 带电体一旦被看作点电荷, 就可用一个几何点标志它的位置, 两个点电荷的距离就是标志它们的位置的两个几何点之间的距离.

真空中两个静止的点电荷间的静电力服从的规律叫做**库仑定律**, 包括如下两个内容:

(1) 两个点电荷间的静电力大小相等而方向相反, 并且沿着它们的连线; 同号电荷相斥, 异号电荷相吸.

(2) 静电力的大小与各自的电量 q_1 及 q_2 成正比, 与距离 r 的平方成反比, 即

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

其中 k 是比例常数, 依赖于各量单位的选取.

库仑定律是法国科学家库仑在 1785 年确立的。库仑注意到电荷之间的静电力与万有引力有许多类似之处，大胆地假设静电力的规律与万有引力定律有类似的形式，如式(1. 1)。为了证实这一假设，他精心设计了一些实验，其中主要的一个是研究同性电荷相互作用力的“扭秤实验”。扭秤的结构如图 1-2。在悬丝下端挂一横杆，杆的一端有一小球 A ，另一端有一平衡物 P 。 A 的旁边还有一固定小球 B 。令 A 、 B 带同性电荷， A 便因 B 的斥力而转开，直至悬丝的扭力矩与 A 所受的静电力矩平衡为止。设此时 A 、 B 的

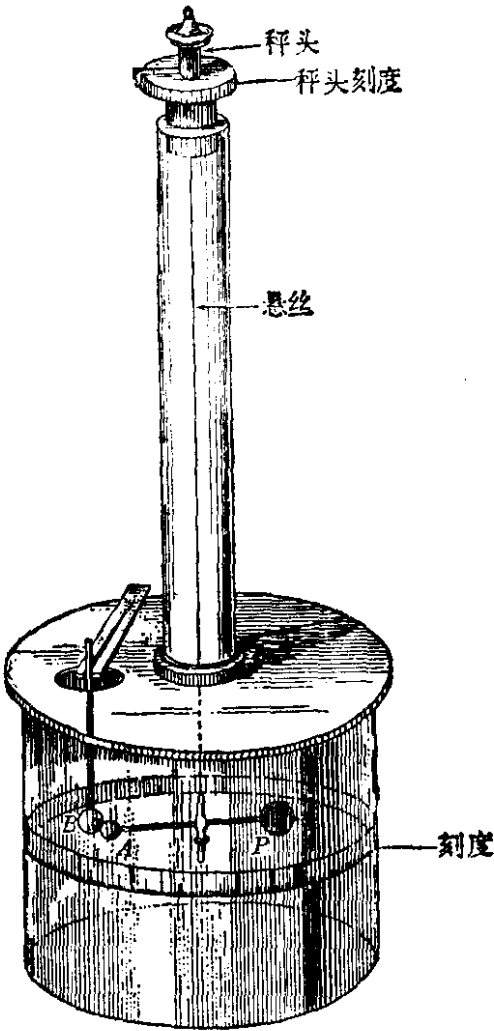


图 1-2 库仑扭秤

距离为 r 。若沿相反向转动秤头使悬丝扭角增大，球 A 便会重新向 B 靠近。令 A 、 B 间的距离稳定于 $r/2$ 。读出秤头的转角，不难推知悬丝此时的扭角(见小字部分)。库仑发现这个扭角等于当两球相距为 r 时的悬丝扭角的 4 倍。注意到扭力矩与扭角成正比以及两球电量并无变化，便知静电力与距离的平方成反比。

由于悬丝下悬横杆，上联秤头，其扭角应由横杆转角及秤头转角共同决定。设横杆转角为 α ，秤头(沿反向)转角为 β (图 1-3)，则悬丝扭角

$$\varphi = \alpha + \beta$$

α 及 β 可分别由玻璃圆筒及秤头上的刻度读出。

库仑的原始实验数据如表 1-1 所示。由表可知，从实验①到实验②， A 、 B 间的夹角减至一半($18^\circ/36^\circ=1/2$)，故距离减至一半(近似认为距离与夹角成正比)，而悬丝扭角 φ 增至 4 倍($144^\circ/36^\circ=4$)，说明扭力矩增至 4 倍。

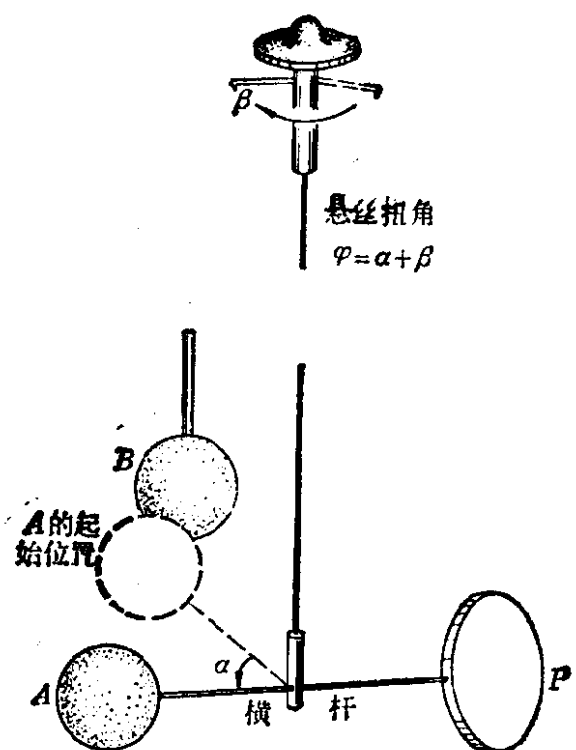


图 1-3 银丝扭角的计算

表 1-1 库仑扭秤实验数据

		横杆转角 (即 A、B 间夹角) α	秤头转角 β	悬丝扭角 $\varphi = \alpha + \beta$
球 A, B 未带电时		0°	0°	0°
球 A, B 电量不变 情况下的两次实验	①	36°	0°	36°
	②	18°	126°	144°

关于静电力与电量成正比的验证则要麻烦一些。问题在于,当时关于电荷还只有一个定性的概念,根据这个概念,可以谈到一物体是否带电,却无从确定它的电量。为了找到电力与电量的关系,库仑使用了一个巧妙(但不严格)的方法。他从对称性的考虑断定,令一个带电金属球与一个半径、材料完全相同的另一不带电金属球接触后再分开,每球的电量应是原带电球电量的一半。他用这个方法证实了电力与电量成正比的关系。但是,电量的严格定义是后来的科学家(特别是高斯)作出的,他们的定义过程如下。

设有 A, B, C 三个点电荷。先令 A 与 C 间距离为 r (图 1-4a), 用扭秤测出它们的电力 F_{AC} 。再令 B 与 C 间有同样距离(图 1-4b), 测出它们的电力 F_{BC} 。记下这两个力的比值 F_{AC}/F_{BC} 。用其他点电荷 D, E, ... 代替 C 重复以



(a) 测得力为 F_{AC} (b) 测得力为 F_{BC}

图 1-4 电量的定义.

上实验, 发现

$$\frac{F_{AC}}{F_{BC}} = \frac{F_{AD}}{F_{BD}} = \frac{F_{AE}}{F_{BE}} = \dots\dots \quad (1.2)$$

可见这个比值只取决于点电荷 A 、 B 而与第三个点电荷无关. 改变距离 r 重复以上实验, 发现式(1.2)仍成立. 可见, 比值 F_{AC}/F_{BC} 反映 A 与 B 本身的带电性质, 可以把它定义为 A 与 B 的电量之比, 以 q_A 及 q_B 表示 A 及 B 的电量 (暂时还没有定义), 有

$$\frac{q_A}{q_B} = \frac{F_{AC}}{F_{BC}} \quad (1.3)$$

任意指定 A 的电量为一个单位 (即指定 $q_A=1$), 有

$$q_B = \frac{F_{BC}}{F_{AC}}$$

这就是电量的定义, 它提供了一种测量点电荷电量的方法: 为测某一点电荷的电量, 只须令它为 B 并与选作单位的点电荷 A 及任一点电荷 C 按图 1-4 作实验, 测出 F_{BC}/F_{AC} 便得 B 的电量 q_B .

2.2 电量的单位

电磁学中最常用的单位制是**高斯制**和**国际制**. 高斯制由力学中的厘米·克·秒制 (CGS 制) 发展而成. 在高斯制中电量的单位叫做**静库**, 它是通过令式(1.1)中的 $k=1$ 而定义的:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.4)$$

当 $q_1=q_2=1$ 及 $r=1$ 时由上式有 $F=1$, 可见, 当两个电量相等的点电荷相距 1 厘米而电力为 1 达因时, 每个点电荷的电量就是 1 静库.

国际制是目前国际上流行的一种单位制 (记作 SI), 其力学及电磁学部分叫做 **MKSA 制**. MKSA 制以长度、质量、时间及电流

强度为基本量, 以米、千克、秒及安培^①为基本单位. 其他力学量及电磁学量的单位都可由这四个基本单位表示, 例如力的单位

$$\text{牛顿} = \text{米} \cdot \text{千克} / \text{秒}^2.$$

功、能及热量的单位

$$\text{焦耳} = \text{牛顿} \cdot \text{米} = \text{米}^2 \cdot \text{千克} / \text{秒}^2.$$

在 MKSA 制中电量的单位叫库仑, 它与安培和秒有如下关系

$$\text{库仑} = \text{秒} \cdot \text{安培}.$$

库仑与静库的关系则为

$$\text{库仑} = 3 \times 10^9 \text{ 静库}.$$

必须指出, 采用 MKSA 制时, 式(1.1)中各量的单位已分别指定为牛顿、库仑和米, 故比例系数 k 不能再任意指定而只能由实验测出. 实验测得 k 在 MKSA 制中的数值为

$$k \cong 9 \times 10^9$$

为了方便起见, 今后我们在 MKSA 制中将 k 写成

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

的形式(常数 ϵ_0 的意义见第三章), 相应的 ϵ_0 数值为

$$\epsilon_0 \cong 8.9 \times 10^{-12}$$

今后还将看到 ϵ_0 在 MKSA 制中有一定的单位和量纲, 其单位是库仑²/牛顿·米². 关于单位问题将在第十章中详细讨论.

引入 ϵ_0 后, 式(1.1)应改写为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.5)$$

同一物理规律在不同单位制中可有不同的数值表达式. 式(1.4)及(1.5)分别是库仑定律在高斯制和 MKSA 制中的表达式. 式(1.5)虽比(1.4)复杂, 但由它推出的许多关系式却比较简单.

^① 安培的定义及测量方法见第五章 § 9.

本书一律采用 MKSA 制。

2.3 库仑定律的矢量形式

库仑定律对两个点电荷间静电力的大小和方向都作了确切的描述,其全部内容包括 2.1 节的(1)(2)两点。式(1.5)只反映静电力的大小所服从的规律,并未涉及静电力的方向。要反映方向就要把它改写为矢量形式。在介绍这一形式之前,先对本书所用的有关矢量的符号作一说明。以矢量 $\mathbf{a}$ 为例,黑体字母 $\mathbf{a}$ 表示矢量,斜体字母 a 表示矢量 $\mathbf{a}$ 的长度(恒为正),即

$$a = |\mathbf{a}| > 0$$

$\hat{\mathbf{a}}$ 表示与 $\mathbf{a}$ 同方向但长度为 1 的矢量,叫单位矢。显然

$$\mathbf{a} = a\hat{\mathbf{a}}$$

库仑定律的矢量形式可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}_{12} &= \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \\ \mathbf{F}_{21} &= \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}}_{21} \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

其中 $\mathbf{F}_{12}$ 表示点电荷 1 对点电荷 2 的作用力, $\mathbf{F}_{21}$ 表示点电荷 2 对点电荷 1 的作用力, $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 表示由点电荷 1 指向点电荷 2 的单位矢, $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ 表示由点电荷 2 指向点电荷 1 的单位矢(显然 $\hat{\mathbf{r}}_{12} = -\hat{\mathbf{r}}_{21}$)。只要把 q_1 及 q_2 理解为可正可负的代数量(区别于只取正值的算术量,如 ϵ_0),不难看出式(1.6)可以同时反映静电力的大小及方向。例如,设 q_1 与 q_2 同号,则 $q_1 q_2 > 0$, 矢量 $\mathbf{F}_{12}$ 等于一个正数乘矢量 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$, 故 $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 同向,即点电荷 1 对点电荷 2 的静电力沿两者联线且由点电荷 1 指向点电荷 2,这就是斥力。同理可知 $\mathbf{F}_{21}$ 也是斥力。反之,当 q_1 与 q_2 异号时,由式(1.6)不难看出 $\mathbf{F}_{12}$ 及 $\mathbf{F}_{21}$ 都是吸力(见图 1-5)。

可见,矢量等式具有比标量等式更丰富的表达力。今后,在涉

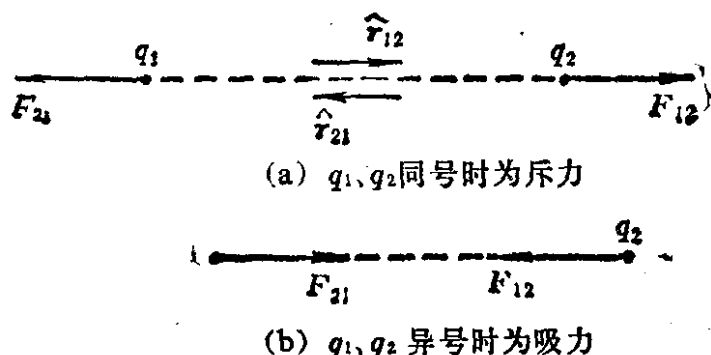


图 1-5 用库仑定律的矢量形式判断两个点电荷间静电力的方向。

及矢量问题时,我们将经常使用矢量表达式,请读者注意它们所表达的全部内容,不要与标量表达式等同看待。

2.4 迭加原理

库仑定律讨论的是两个点电荷之间的静电力。当空间有两个以上的点电荷时,就必须补充另一实验事实——作用于每一电荷上的总静电力等于其他点电荷单独存在时作用于该电荷的静电力的矢量和^①这叫做迭加原理。库仑定律与迭加原理相配合,原则上可以解决静电学中的全部问题。

迭加原理不但可用直接实验来证明,而且还被大量间接实验所证实。所谓用间接实验证实某一看法,是指由这一看法推出的各种结论与实验事实相符。这是物理学中的一个重要方法。今后说到一个物理规律可由实验证明时,可能是指直接实验,也可能是指间接实验。

§ 3 静 电 场

3.1 电场

对于电荷之间作用力的性质,历史上有过几种不同的观点。一

^① 这意味着:一个点电荷作用于另一点电荷的力总是符合库仑定律的,不论周围是否存在其他电荷。