

励子伟 宋建平 编

普通物理学

• 电磁学 •

北京大学出版社

04
L356
:1
1601054

北京大学教材

普通物理学

(电磁学)

励子伟 宋建平 编



2111300006641

北京大学出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了电磁学的基本概念和基本规律,选材上考虑了不同系科的需要,适应面较宽。本书结构完整,叙述准确,各章后配有思考题和习题,是非物理类系科学生较为合适的教材。

本书可供综合大学非物理类系科学生学习,也可供工科院校物理系师生参考。

普 通 物 理 学

(电磁学)

励子伟 宋建平 编

责任编辑:周月梅

北京大学出版社出版

(北京大学校内)

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

850×1168毫米 32开本 18.375印张 475千字

1988年8月第一版 1988年8月第一次印刷

印数:0061—15,000册

ISBN 7-301-00292-0/O·055

定价:4.35元

前 言

本书是为大学理科非物理类各系、各专业普通物理课程编写的通用教材的电磁学部分，是编者在北京大学多年从事教学的基础上编写而成的。

在编写过程中，编者力求做到：充分注意物理学自身的系统性，着重基本概念、基本原理和基本方法的阐述；考虑到非物理类各系多数没有物理方面的后继课，在内容的深度和广度上尽可能做到有较丰富的层次，以扩大学生的知识面并有利于因材施教；为适应不同专业的教学要求，在章节的具体安排上充分考虑了相对独立性，以便于教师根据实际需要内容进行删节。

本书第一、二、三章和附录 II 由宋建平编写，第四、五、六、七、八章和附录 I 由励子伟编写。本书全部内容由陈秉乾副教授审定。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请广大师生和读者批评指正。

编 者

1987 年 5 月

目 录

第一章 真空中的静电场	1
§ 1-1 静电的基本现象和基本规律.....	1
§ 1-2 电场强度.....	9
§ 1-3 高斯定理.....	24
§ 1-4 带电体在电场中受的力.....	42
§ 1-5 静电场力所作的功. 电势.....	48
§ 1-6 静电场强和电势的关系.....	62
思考题	69
习 题	72
第二章 静电场中的导体和电介质	79
§ 2-1 静电场中的导体.....	79
§ 2-2 导体空腔.....	84
§ 2-3 电容和电容器.....	90
§ 2-4 电介质的极化.....	95
§ 2-5 电位移矢量和有介质存在时的高斯定理.....	108
§ 2-6 电场的边界条件.....	115
§ 2-7 静电场的能量.....	119
思考题	131
习 题	134
第三章 稳恒电流	145
§ 3-1 电流的稳恒条件和导电规律.....	145
§ 3-2 电流的功和功率. 焦耳定律.....	161
§ 3-3 金属导电的经典电子论解释.....	164
§ 3-4 电动势.....	169
§ 3-5 基尔霍夫定律.....	179
§ 3-6 金属和气体中的一些电现象.....	192

思考题	210
习 题	212
第四章 稳恒磁场	221
§ 4-1 磁的基本现象	221
§ 4-2 磁场。磁感应强度	225
§ 4-3 毕奥-萨伐尔定律及其应用	230
§ 4-4 磁通量。磁场的高斯定理	243
§ 4-5 安培环路定理及其应用	251
§ 4-6 磁场对载流导线的作用	259
§ 4-7 磁场对运动电荷的作用	273
思考题	292
习 题	297
附录 安培环路定理的普遍证明	306
第五章 磁介质中的磁场	311
§ 5-1 磁介质的磁化	311
§ 5-2 有磁介质存在时磁场的高斯定理和安培环路定理。磁场 强度矢量	319
§ 5-3 铁磁质	327
§ 5-4 磁场的边界条件	333
思考题	336
习 题	337
第六章 电磁感应	341
§ 6-1 电磁感应定律	341
§ 6-2 动生电动势	349
§ 6-3 感生电动势。涡旋电场	356
§ 6-4 自感应	363
§ 6-5 互感应	368
§ 6-6 磁场的能量	375
§ 6-7 暂态过程	383
§ 6-8 电磁感应现象的应用	390
思考题	403
习 题	407

附录 感应电动势可表示为动生电动势与感生电动势之和的 普遍证明	416
第七章 交流电	419
§ 7-1 交流电概述	419
§ 7-2 交流电路中的基本元件	424
§ 7-3 串联、并联电路的矢量图解法	429
§ 7-4 交流电路的复数解法	440
§ 7-5 谐振电路	453
§ 7-6 交流电的功率	464
§ 7-7 变压器原理	473
§ 7-8 三相交流电	479
思考题	492
习 题	496
第八章 电磁场和电磁波	505
§ 8-1 位移电流	505
§ 8-2 麦克斯韦方程组	511
§ 8-3 电磁场的边界条件	519
§ 8-4 电磁波	522
§ 8-5 电磁波性质的普遍推导	537
§ 8-6 电磁波谱	542
思考题	545
习 题	545
附录 I 矢量分析	548
附录 II 电磁学的单位制	563
习题答案	566

第一章 真空中的静电场

任何电荷(静止的和运动的电荷)周围都存在着电场,相对于观察者是静止的电荷在其周围所激发的电场称为静电场。本章的主要内容是研究真空中静电场的基本性质和规律。

在本章中将介绍静电场的基本规律——库仑定律和场强叠加原理,从库仑定律出发引入描述静电场的两个基本物理量——电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 和电势 U ,由基本规律导出两条基本定理——高斯定理和场强 $\mathbf{E}$ 的环路定理,讨论电荷在电场中的运动以及场强和电势的关系——积分和微分关系。

静电场是电磁学中首次遇到的场,是一矢量场。我们要由通量和环量所遵循的规律去了解矢量场的性质。因此本章是掌握电磁学的关键,也是以后各章重要的基础。

§ 1-1 静电的基本现象和基本规律

一、电荷. 电荷守恒定律

人们在很早很早以前就观察到一些静电现象,例如琥珀用毛皮摩擦过以后,具有一种特殊的性质:它能够将某些轻小的物体如草屑、羽毛、头发等吸引起来。有关这方面的文字记载最早见之于我国东汉时期王充所著的《论衡》。当某个物体具有上述这种吸引轻小物体的性质时,我们就说该物体带了电。带电的物体叫做带电体。带电体所带的电叫做电荷。有时候把小的带电体本身简称为电荷。

物体带电时具有两种完全不同的状态。两根用丝绸摩擦过的玻璃棒相互之间排斥,两根用毛皮摩擦过的硬胶木棒也相互排斥。

但是，用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的硬胶木棒之间却相互吸引。上述事实说明，玻璃棒上所带的电荷和胶木棒上所带的电荷是两种性质截然不同的电荷。美国物理学家弗兰克林第一个提出了正电荷和负电荷这两个名称。他把丝绸摩擦过的玻璃棒上所带的电荷称为正电荷，把毛皮摩擦过的硬胶木棒上所带的电荷称为负电荷。这种命名法在国际上一直沿用到现在。大量的实验表明，不论用什么方法使物体带电，物体所带的电不是正电荷就是负电荷，这说明自然界中只存在两种电荷。同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。这是大家所熟知的性质。

总结各种电现象后，人们发现：电荷既不能被创造，也不能被消灭。它只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的这一部分转移到另一部分，也就是说，在任何物理过程中，一个孤立系统内电荷的代数和是守恒的，这个结论就是电荷守恒定律。电荷守恒定律是物理学中最普遍的规律之一，它不仅在一切实观过程中成立，而且在微观领域中也成立。

二、物质的电结构

近代物理学的发展，使我们对物质的结构有了深入的认识，从而对带电现象有了更为本质的了解。一切物质都是由原子所组成的，原子又是由带正电的原子核和带负电的电子所组成的。原子核中有质子和中子，中子不带电，质子带正电。带电体所带电荷的数量叫做电量。一个质子所带的电量和一个电子所带电量的数值相等，符号相反。通常用 e 代表一个质子的电量，则一个电子的电量就是 $-e$ 。由实验测量得

$$e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ 库仑,}$$

库仑是电量的单位，记作 C，它的定义将在本节六中给出。在精度要求不高的情况下，取 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。在本书中均采用这一数值，在计算习题时也要求采用这一数值。

在正常情况下，原子核中有几个质子，核外就有相同数量的电

子。不同原子其核外电子的数目是不一样的。例如氢原子的原子核中有一个质子,其核外就有一个电子;铝原子核内有 13 个质子,核外就有 13 个电子;铜原子核内有 29 个质子,核外就有 29 个电子。所以在正常情况下,整个原子所带电量的代数和为零。因而对外不呈现电性或者说它呈电中性状态。原子的这种电结构,可用下述示意图来表示(见图 1-1)。

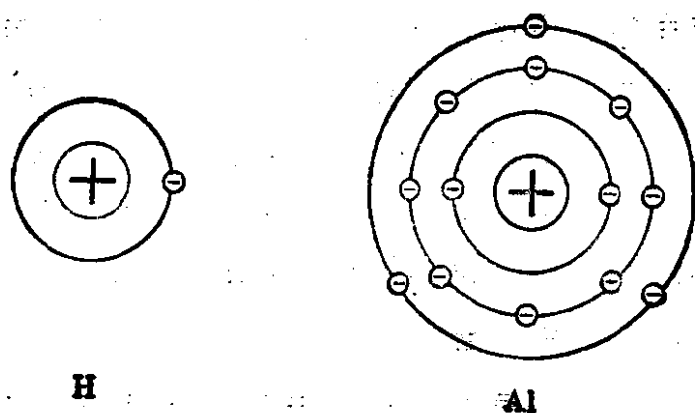


图 1-1

物质内部固有地存在着电子和质子这两类基本的带电粒子,这是各种物体能够带电的内在根据。由于在正常情况下,物体中任何一部分内所包含的电子总数与质子总数总是相等的,因而从整体上看物体不带电或者说呈电中性。当在一定外因条件下,一部分核外电子,通常是最外层的电子(称为价电子)摆脱了原子核的束缚,从一个物体转移到另一个物体,或者从物体的这一部分转移到物体的另一部分。这时,物体或者物体的某一部分就会因为失去或者得到一定数量的电子使得电子的总数和质子的总数不再相等,从而表现出一定的电性来。失去电子的物体或者物体的某一部分带正电;得到电子的物体或者物体的某一部分带负电。

由于电子和质子所带的电量其绝对值都是 e , 所以任何物体所带电量的数值只能是 e 的整数倍。从这个意义上,我们称 e 为基本电荷。核物理学家发现了许多基本粒子,它们所带的电量不是 $+e$, 就是 $-e$, 或者为零。由此可以得出一个结论,任何物体

所带的总电荷只能是基本电荷的整数倍。因而电荷的量值是不连续的,只能取一系列确定的分立值,也就是说电荷是量子化的。这已为迄今为止的实验结果所证实。虽然我们至今并不知道为什么电荷必然遵循这种量子法则。

三、摩擦起电。静电感应起电

使物体带电的过程叫做起电。起电的方法很多,用摩擦的方法使物体带电叫做摩擦起电。这是一种常用的起电方法。当我们将两种质料不同的物体互相摩擦,这两种物体都会带电。例如,毛皮和硬胶木棒互相摩擦后,胶木棒带负电,而毛皮则必然带正电。这是因为毛皮和胶木棒在摩擦这一外来因素作用下,毛皮中的一部分电子转移到了胶木棒上,胶木棒由于得到电子而带负电,毛皮则由于失去电子而带正电。

静电感应的方法是另一种常用的起电方法。如图 1-2 所示,

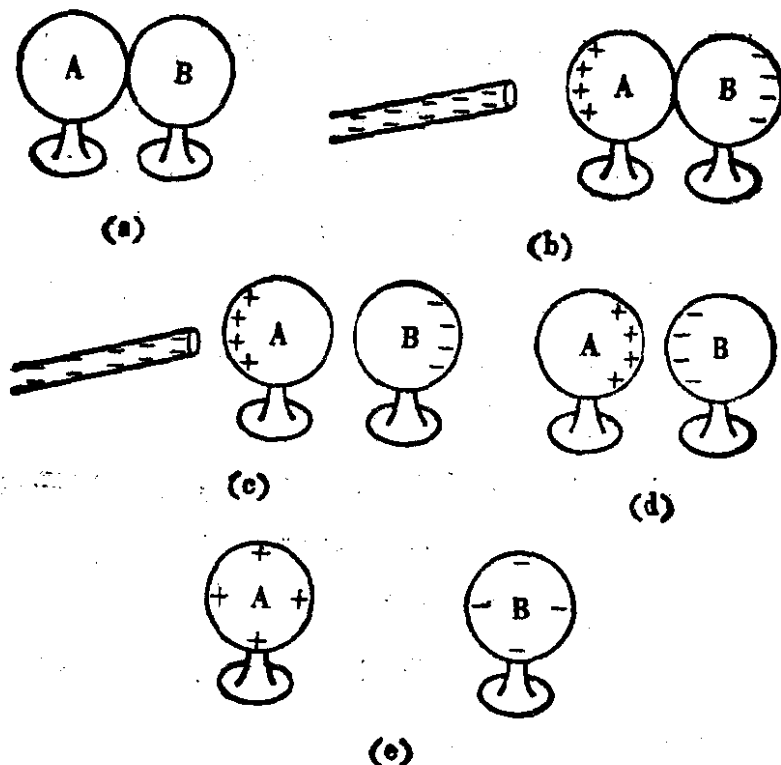


图 1-2 静电感应现象

有一对带有绝缘支架的金属球 A、B，它们本身不带电（见图 1-2(a)）。当我们将一根带电棒移近一个金属球的一端时，可以使图 1-2(b) 中的 A 球靠近带电棒的一端带正电，同时使 B 球远离带电棒的一端带负电。我们称这种现象为静电感应现象。这时若使金属球 A 和 B 分离开，随后将带电棒移走，则金属球 A 带正电荷，金属球 B 带负电荷，见图 1-2(c) 和 (d)。根据电荷守恒定律，球 A 和球 B 所带的电量数值相等而符号相反，这点很容易就能得到证实，只要将 A 球和 B 球再次接触，则它们所带的正、负电荷将中和而对外不显示电性。当金属球 A 和 B 相接触时，可以把它们看成是一个整体，静电感应起电的实质是在外界带电棒的作用下，金属球 A 内的自由电子转移到球 B 的结果。

四、导体。绝缘体。半导体

按照电荷在其中传导或者转移的难易程度，将物质大致分成三大类：

(1) 导体：电荷在其中很容易传导或者转移的物体称为导体。如金属、石墨、电解液（酸、碱、盐类的水溶液）、人体、大地、电离了的气体等等都是导体。

(2) 绝缘体：电荷在其中很不容易转移的物体称为绝缘体。如玻璃、橡胶、丝绸、琥珀、松香、硫磺、瓷器、油类、未电离的气体等等都是绝缘体。

(3) 半导体：有一类物质，电荷在其中传导或转移的性能介于导体和绝缘体之间。如硅、锗及砷化镓、砷化镓等等都是半导体。目前得到广泛应用的晶体管、各种集成电路都是在半导体材料上制成的。

五、库仑定律

库仑对于电荷之间的相互作用进行了定量的研究，并在 1785 年总结出了相互作用力所遵循的规律。现在称之为库仑定律。库

仑定律只对点电荷成立。下面先讨论点电荷的概念。

对于任意两个带电体，它们之间的相互作用力不仅与它们所带的电量以及它们之间的距离有关，而且还与带电体的几何形状以及电荷在带电体上的分布情况有关。实验表明，随着带电体之间距离的增大，带电体本身的形状、大小以及电荷在其上分布情况的影响将逐渐减弱。当带电体之间的距离比起它们自身的线度大得很多的时候，上述影响可以忽略不计，这种情况下就可以把带电体抽象成一个几何点，同时认为带电体上所有电荷都集中在该点上，而忽略带电体的形状、大小以及电荷在其上分布情况等因素的影响。我们把可以作上述抽象的带电体称为点电荷。显然，点电荷是一种经过科学抽象的理想模型。值得注意的是“点电荷”这一概念和力学中的“质点”概念一样，只具有相对的意义。一个带电体是否可以作为点电荷来处理，必须根据具体情况而定。

库仑定律是对于两个彼此相对静止的点电荷之间相互作用规律的总结。它的文字表述如下：在真空中两个点电荷之间的相互作用力的大小与它们所带电量的乘积成正比，与它们之间的距离

平方成反比；作用力的方向沿着它们之间的连线，同号电荷相排斥，异号电荷相吸引。

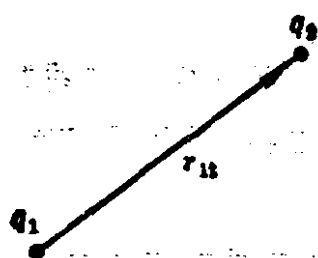


图 1-3 库仑定律

如果用 q_1 和 q_2 分别表示两个点电荷所带的电量，以 r 表示它们之间的距离，以 F 表示相互作用力的大小，则库仑定律可以表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1-1)$$

其中 k 是比例系数，它的数值由力、距离以及电量单位的选择决定。为了进一步表示出它们之间作用力的方向，我们用 $\mathbf{r}_{12}$ 表示从 q_1 指向 q_2 的矢径，点电荷 q_1 作用于点电荷 q_2 上的力 $\mathbf{F}_{12}$ 可用矢量式来表示，有

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}_{12}}{r}. \quad (1-2)$$

令 $\hat{\mathbf{r}}_{12} = \mathbf{r}_{12}/r$ 表示 q_1 指向 q_2 方向上的单位矢量。上式可写成

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}. \quad (1-3)$$

(1-2) 式和 (1-3) 式为库仑定律的矢量表示式。当 q_1 和 q_2 同号时, $\mathbf{F}_{12}$ 沿 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 的方向, 表示 q_2 受到斥力的作用, 见图 1-4(a); 当 q_1 和 q_2 异号时, $\mathbf{F}_{12}$ 和 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 方向相反, 表示 q_2 受到 q_1 的引力作用, 见图 1-4(b)。同样 q_2 对 q_1 的作用力 $\mathbf{F}_{21}$ 可以写成

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} (-\hat{\mathbf{r}}_{12}) = -k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12},$$

即有

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}. \quad (1-4)$$

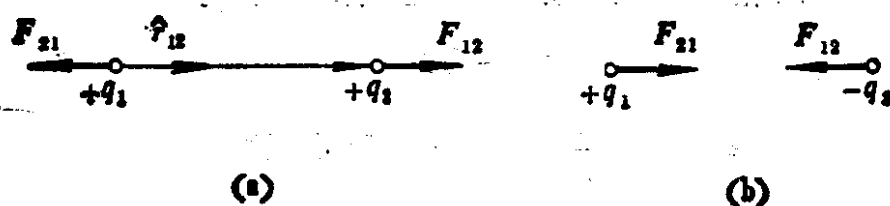


图 1-4 两个点电荷之间的作用力

上述结果说明静止电荷之间的库仑力满足牛顿第三定律。

六、电量的单位

前面曾指出, 库仑定律的数学表达式中的比例系数 k 的数值和单位取决于式中各量单位的选择, 而各量的单位又取决于所采用的单位制。本书采用国际单位制, 其国际简称为 SI。在国际单位制中电量的单位称为库仑, 用符号 C 表示。1 库仑的电量是这样规定的: 当导线中通过 1 安培的稳恒电流时, 1 秒钟内通过导线任一给定横截面的电量。

当采用国际单位制时, 在式 (1-1) 中, 电量的单位用 C, 距离的单位用 m, 力的单位用 N, 则 k 的数值可由实验测定。由实验

测得

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2.$$

为了使其他一些由库仑定律推导出来的更为常用的公式表述成比较简洁的形式,通常引入一个新的恒量 ϵ_0 ,从而将 k 写成比较复杂的形式.令 $k = 1/4\pi\epsilon_0$. 称这个新的恒量 ϵ_0 为真空中的介电常数.实验测得

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2.$$

不过,该值的最好结果并不是由测量静止电荷之间作用力直接求出的,而是由其他实验间接求出的. ϵ_0 的数值只能由实验来确定.

在一般情况下,对 k 值取近似值 $k \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 就可以了.

电量 q 和真空中介电常数 ϵ_0 的量纲式分别为:

$$[q] = \text{TI};$$

$$[\epsilon_0] = \frac{[q]^2}{[F][r]^2} = \text{L}^{-3}\text{M}^{-1}\text{T}^4\text{I}^2.$$

在采用国际单位制时,库仑定律可以写成如下形式

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}_{12}}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}. \quad (1-5)$$

例题 1 在氢原子内,电子和原子核之间的距离 $r = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$, 试计算氢原子内电子和原子核之间的静电力和万有引力,比较两者的大小. 已知万有引力常数 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, 质子质量 $M = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 电子质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

解 根据库仑定律,电子和原子核之间的静电力(又可叫库仑力)的大小为

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \\ &= 9.0 \times 10^9 \times \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(5.29 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 8.23 \times 10^{-8} \text{ N}. \end{aligned}$$

根据万有引力定律,电子和原子核之间的万有引力的大小为

$$\begin{aligned} F_m &= G \frac{Mm}{r^2} \\ &= 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(5.29 \times 10^{-11})^2} \text{ N} \\ &= 3.64 \times 10^{-47} \text{ N}. \end{aligned}$$

库仑力和万有引力的比值为

$$\frac{F_e}{F_m} = 2.27 \times 10^{39}.$$

由此可见,在原子内,电子和原子核之间的库仑力远比万有引力大得多。因此,在处理电子和原子核之间的相互作用时,万有引力可以忽略不计,只需考虑它们之间的电磁力,其中主要是库仑力。

在卢瑟福实验中, α 粒子具有足够高的能量,足以使它接近金原子核,进入到 $2 \times 10^{-14} \text{ m}$ 的范围内(这一距离还在核力程之外)。

由习题 1-2 知, α 粒子在此距离所受到的斥力约为 765N。也就是说,在单个原子范围内起作用的静电力,比 76kg 的物体所受的重力还要大。

在正常情况下,我们观察不到有如此之强的静电力,这是因为物质通常都呈电中性。不但大块物体呈电中性;即使小到一个孤立的原子,其原子核含有的正电荷也正好与围绕它的负电荷相抵消。实验证明,这种抵消是非常精确的,一个中性原子的净电荷数值不会大于 10^{-20} e 。

§ 1-2 电场强度

一、电场

库仑定律给出了两个点电荷之间相互作用的定量关系,可是

这些作用是怎样传递的呢？围绕着这个问题，历史上曾有过两种不同观点的长期争论。一种观点叫做超距作用观点，一种叫做近距作用观点。超距作用观点认为，由于两个电荷在真空中也产生相互作用，所以电荷之间的相互作用既不需要任何媒介传递，也不需时间，可以超越空间，直接地、瞬时地互相作用。我们用一个简单的模式来表示这种观点：

电荷 $\longleftrightarrow$ 电荷。

近距作用观点认为，电荷之间的相互作用是通过一种充满空间的弹性媒质——“以太”来传递的。

超距作用和近距作用这两种观点在物理学史上经历了此消彼长的反复争论过程，“以太”也随之渡过了一段漫长的兴衰史，“以太”在物理学的发展中曾经起过重要的作用。有兴趣的读者可参阅本节后面带“米”号的部分。随着物理学的发展，人们的认识在不断深化，“以太”的涵义也在不断地发生变化，它逐步失去了原来赋予它的具体、生动的物理性质。一种新的观点——场的观点逐步建立起来并被人们所接受，该观点认为电磁场本身就是物质存在的一种形式，场可以在真空中以波的形式传播。

近代物理学的发展如量子力学的建立更加强了上述观点。人们发现，物质的原子以及组成原子的电子、质子和中子等粒子的运动也都具有波的属性。波动性已成为物质运动的基本属性的一个方面，那种仅仅把波动理解为某种媒介物质力学振动的狭隘观点已被人们所抛弃。一个电荷对另一电荷的作用是需要经过一定的时间来进行传递的，尽管传递的速度很快，约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。电荷之间的相互作用是通过电场来实现传递的，超距作用观点是完全错误的，这就是场的观点。场的观点认为，任何电荷的周围都存在着电场，电场的基本特性是对于处在其中的任何其他电荷都存在着力的作用，我们把这种力称为电场力。根据这种观点，空间存在着两个电荷之间产生相互作用，是由于电荷“1”在其周围空间激发一个电场，电荷“2”在电荷“1”所激发的电场中将受到电场力的