



第一章

静电场的描述

远古时代一个风雨交加的漆黑夜晚，一群用兽皮树叶遮体的原始人为躲避风雨的侵袭，蜷缩在一个天然的山洞中。突然，整个山洞都被照亮，他们不由自主地向外望去，漆黑的苍穹被数道亮光撕裂。紧接而来的是震耳欲聋的巨响，人们赶紧收回刚刚向外望去的目光，大家挤得更紧了……这就是人们最早对电的认识。

雷电来去匆匆，稍纵即逝。几千年以来人们一直想探究其中的奥秘，更想将它驾驭于手中。人们想知道：雷电是怎样产生的？物体起电的原因是什么？自然界存在几种电荷？电荷间的相互作用遵循什么规律？在这一章里，我们将研究静电的产生、静电现象所遵循的规律，从而揭开它神秘的面纱。

在本章的学习中，我们将了解静电现象；能用原子结构模型和电荷守恒的观念分析静电现象；知道点电荷模型，体会科学研究中的理想化模型方法；知道两个点电荷间相互作用的规律；体会探究库仑定律过程中的科学思想和方法；知道电场是一种物质；了解电场强度，体会用比值定义物理量的方法；会用电场线描述电场；知道静电场中的电荷具有电势能；了解电势能、电势的含义；知道匀强电场中电势差及其与电场强度的关系。

第一节

静电现象



在干燥的冬天，人们常有这样的经历：经过铺有地毯的走道来到房门口，在伸手接触金属门把的一刹那，突然听到“啪”的一声，手被电了一下，是哪里来的电呢？答案可能令人有点意外，原来是电荷在作怪。

各种起电方式

公元前 600 年左右，希腊人泰勒斯（Thales，约前 624—约前 547）发现了用毛皮摩擦过的琥珀能吸引羽毛、头发等轻小物体。公元 1 世纪，我国学者王充在《论衡》一书中写下“顿牟掇芥”一语，指的是经过摩擦的玳瑁壳能够吸引轻小的物体。物体有了这种吸引轻小物体的性质，就说它带了电，或者说荷了电荷。那么，有哪些方法能使原来不带电的物体带上电呢？



实验与探究

实验 1：如图 1-1-1 所示，拿一把塑料直尺在头发上来回摩擦几下，然后将塑料直尺移近碎纸屑堆，观察发生的现象，探究其中的原因。



图 1-1-1 摩擦起电

实验 2：如图 1-1-2 所示，将带有绝缘柄的金属小球 D 先与带电体接触，再与验电器上部的金属球 A 接触，观察两片金属箔 C 、 C' 是否张开。重复多次，观察金属箔张开角度的变化情况，探究其中的原因。

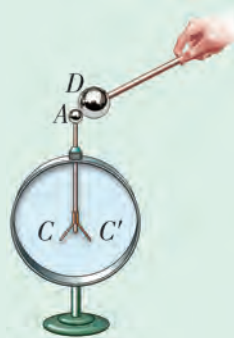


图 1-1-2 电荷传导

实验 3：如图 1-1-3 (a) 所示，取两个由绝缘柱支撑着的空心铝罐 A 和 B ，起初它们彼此接触且不带电，铝罐 A 的左端和铝罐 B 的右端各自安装有两片金属箔。

(1) 如图 1-1-3 (b) 所示，将带电金属小球 C 移近铝罐 A 的左侧，观察铝罐 A 和 B 各自的两片金属箔有什么变化？

(2) 如图 1-1-3 (c) 所示, 金属小球 C 和铝罐 A 保持在原来的位置上, 手持铝罐 B 的绝缘柱, 将其移开, 观察铝罐 A 、 B 各自的两片金属箔有什么变化?

(3) 如图 1-1-3 (d) 所示, 把金属小球 C 和铝罐 B 轻轻移走, 观察铝罐 A 的两片金属箔又有什么变化?

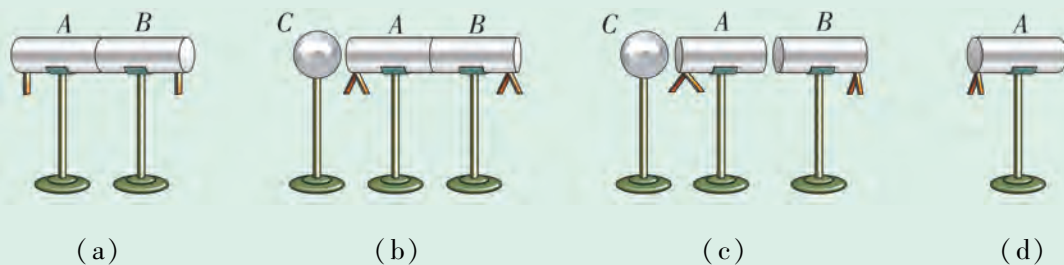


图 1-1-3 静电感应

从实验 1 可见, 经摩擦后的塑料直尺会吸引碎纸屑, 这是因为经过摩擦的塑料直尺带上了电而对碎纸屑有了吸引力. 这种用摩擦的方法使物体带电的过程叫作**摩擦起电**. 相互摩擦的两个物体一般选择不同的材料, 比如丝绸和玻璃棒、毛皮和硬橡胶棒等.

从实验 2 可见, 验电器的两片金属箔张开了一定的角度, 重复次数越多, 两片金属箔张开的角度越大. 这是由于通过传导, 金属小球 D 上的电荷不断传递至两片金属箔.

从实验 3 的 (1) 中可见, 铝罐 A 和 B 各自的两片金属箔都张开了相同的角度. 从 (2) 中可见, 铝罐 A 的两片金属箔张开的角度比 (1) 中的稍大一点, 铝罐 B 的两片金属箔张开的角度比 (1) 中的稍小一点. 从 (3) 中可见, 铝罐 A 的两片金属箔张开的角度比 (2) 中的稍小一点. 这说明铝罐 A 、 B 都带上了电荷. 由于电荷间相互吸引或排斥, 导体靠近带电体的一端带异种电荷, 远离带电体的一端带同种电荷. 这种由于受附近带电体影响而引起导体中正负电荷重新分布的现象叫作**静电感应** (electrostatic induction).

元电荷

物体所带电荷数量的多少叫作**电荷量** (electric quantity), 简称电量. 在国际单位制中, 它的单位是库仑, 简称库, 符号是 C . 研究发现, 自然界只存在两种电荷: 正电荷和负电荷. 我们把用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷叫作正电荷, 用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷叫作负电荷. 电子带有最少的负电荷, 质子带有最少的正电荷, 它们的电量的绝对值相等.

电子的电量最早是由美国物理学家密立根 (R. A. Millikan, 1868—1953) 通过油滴实验测定的. 实验还发现, 任何油滴所带的电量都等于电子或质子所带电量的整数倍, 因此, 人们把一个电子 (或质子) 所带电量的绝对值叫作**元电荷** (elementary charge), 用 e 表示. 在科学研究中, 常常用元电荷作为电量的单位.

根据 1999 年发布的数据, 元电荷的精确值 $e = 1.602176462(83) \times 10^{-19} \text{ C}$. 在通常的计算中, 可取 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$.

电子的电量 e 与电子的质量 m_e 之比, 叫作电子的比荷. 电子的质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 因此, 电子的比荷 $\frac{e}{m_e} = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$. 它是一个重要的物理常量.

电荷守恒定律

为什么通过摩擦或感应能使物体带电? 下面我们从物质的微观结构来认识静电现象的本质.

我们知道, 构成物质的原子由原子核和绕核运动的电子组成. 原子核带正电, 核外电子带负电. 原子核的正电荷数与核外电子的负电荷数相等, 所以整个原子呈电中性.



观察与思考

手持有机玻璃棒, 用力将两块由不同材料制成的起电板快速地摩擦后分开, 如图 1-1-4 (a) 所示.

将其中一块板插入箔片验电器上端的空心金属球 (注意不要接触金属球), 如图 1-1-4 (b) 所示, 我们可以观察到什么现象?

接着抽出这块板, 再将两块板互不接触地同时插入空心金属球 (同样不接触金属球), 如图 1-1-4 (c) 所示, 我们可以观察到什么现象?

请解释实验中所发生的现象.

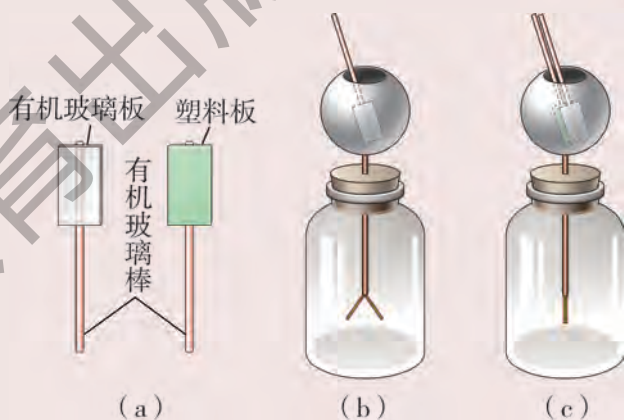


图 1-1-4 验证电荷守恒的实验

实验中, 两块起电板摩擦前呈电中性, 净电荷量为零. 在图 1-1-4 (b) 中可看到箔片张开, 即箔片带电, 说明插入验电器上端空心金属球内的起电板带上了电荷; 在图 1-1-4 (c) 中可看到箔片闭合, 说明两块起电板带有等量异种电荷, 净电荷量为零, 所以系统的电荷是守恒的.

实验中, 物体带电的过程实际上就是得失电子的过程, 从而使物体内的正电荷数与负电荷数不再相等, 这时物体就带电了. 但带电的两个物体所组成的系统的电量总和保持不变.

大量事实证明：电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到其他物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。在任何转移的过程中，电荷的总量保持不变。这个规律叫作电荷守恒定律（law of conservation of charge）。

电荷守恒定律是自然界的基本守恒定律，它不仅在一切实宏观物理过程中成立，而且也是一切微观物理过程（如核反应过程）所普遍遵循的规律。

静电现象的解释

从前面实验中可知，利用摩擦的方法能够使物体带电。这是因为两种不同材料的物体相互摩擦时，使一个物体中一些原子的电子获得了能量，挣脱了原子核的束缚，转移到了另一个物体上。如图1-1-5所示，当毛皮摩擦硬橡胶棒时，毛皮中原子的电子便转移到了硬橡胶棒上，硬橡胶棒上出现多余的电子而带负电；失去电子的毛皮则带正电。但是，由这两个物体组成的系统的电荷总量保持不变，即电荷是守恒的。这说明，摩擦起电的实质是电子从一个物体转移到另一个物体的过程。

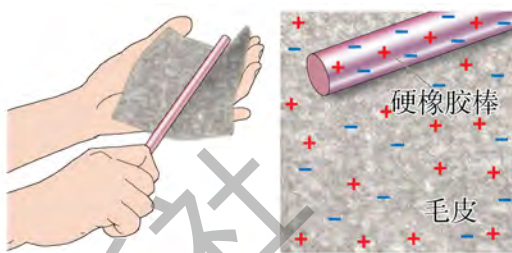


图1-1-5 硬橡胶棒与毛皮摩擦，毛皮带正电，硬橡胶棒带等量的负电荷

从前面实验中还可知，利用静电感应能够使导体带电。这是因为当带电体靠近导体时，导体内的自由电子会向靠近或远离带电体的地方移动。如图1-1-3(b)所示，若带正电的金属小球C靠近铝罐A的左侧，根据异种电荷相互吸引的性质，铝罐A与金属小球C距离最近的左端则带负电；根据同种电荷相互排斥的性质，铝罐B与金属小球C距离最远的右端带正电。当把铝罐B移开，铝罐A上的负电荷由于金属小球C的正电荷的吸引而继续保留；接着移走金属小球C，铝罐A就带上了负电荷，如图1-1-3(d)所示。因此，静电感应的实质是在带电体上的电荷的作用下，导体上的正负电荷重新分布，使电荷从导体的一部分转移到另一部分。

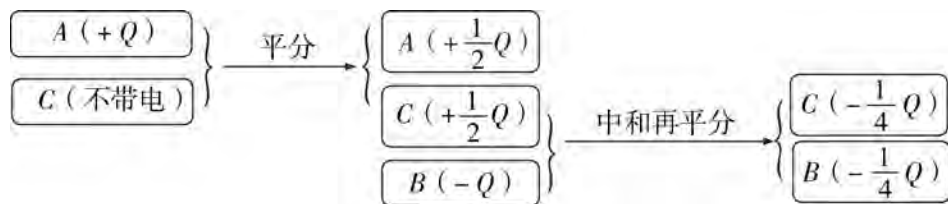
从以上的两种情况中我们可以看到，电荷既不能被创造，也不能被消灭，只是发生了转移。

例题：真空中两个完全相同的带等量异种电荷的小球A和B，分别被固定在两处。用一个不带电的相同小球C先和小球A接触，再与小球B接触，然后移走小球C，则小球A、B的带电量各是原来带电量的多少？

分析：完全相同的带电小球相接触，在电荷的转移过程中，电荷的分配遵循如下规律：

- (1) 不带电小球与带电小球接触，电量平分。
- (2) 带同种电荷的小球互相接触，电量相加再平分。
- (3) 带异种电荷的小球互相接触，正负电量中和后再平分。

解：先设小球 A 带正电，则小球 B 带负电，带电量大小均为 Q ，再采用如下思路分析：



由以上分析可知，小球 A 的电性与原来相同，带电量为原来的 $\frac{1}{2}$ ；小球 B 的电性与原来相同，带电量为原来的 $\frac{1}{4}$ 。



实践与拓展

查找资料，了解范德格拉夫 (R. J. van de Graaff, 1901—1967) 起电机的起电原理，并了解起电机在生产生活中的应用。



练习

1. 在如图 1-1-2 所示的实验中，两片金属箔可能带上什么性质的电？为什么？实验重复次数越多，两片金属箔张开的角度越大，这又是为什么？

2. 请用原子结构模型和电荷守恒的知识分析摩擦起电和静电感应实质的异同。

3. 某同学将用毛皮摩擦过的硬橡胶棒靠近绝缘细线下方悬挂的金属小球，如图 1-1-6 所示，观察金属小球的摆动情况，并解释其原因。

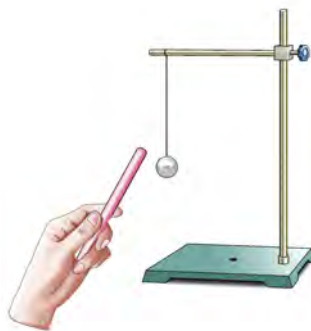


图 1-1-6

4. 两个完全相同的金属球 A 和 B 分别带有电荷 $Q_A = 3 \times 10^{-9} \text{ C}$ 和 $Q_B = -9 \times 10^{-9} \text{ C}$ ，两个球均被置于绝缘支架上。

(1) 将两球接触一下后分开，它们分别带有多少电荷？

(2) 简要论述电子是如何转移的，并计算转移的电子数目。

5. 打开水龙头，慢慢调节使水流变得很细，再用摩擦过的气球靠近细水流，如图 1-1-7 所示，仔细观察，会发现什么现象？这是静电现象吗？



图 1-1-7

第二节

库仑定律

同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引，这说明电荷之间存在着相互作用力。物理学上，把静止电荷之间的相互作用力称为**静电力** (electrostatic force)。受牛顿万有引力定律公式的启发，18 世纪的科学家推测带电体间的相互作用力也是与距离的二次方成反比。18 世纪末，法国物理学家库仑 (C. A. Coulomb, 1736—1806) 通过实验总结出静止电荷间的相互作用力即静电力的规律。



图 1-2-1 库仑

点电荷

研究表明，带电体之间的相互作用力除了与它们所带的电量及相对位置有关，还与它们的形状和大小有关，这大大增加了研究这一问题的复杂性。如果一个带电体本身的大小比它与其他带电体的距离小得多，那么在研究它与其他带电体的相互作用时，电荷在带电体上的具体分布情况可以忽略，即可以把带电体抽象成一个点。这个带电的点称为**点电荷** (point charge)。与力学中的质点模型一样，点电荷是一种理想化的物理模型。

带电体能否被视为点电荷，要看它们本身的几何大小是否比它们之间的距离小得多，而不是看带电体本身的大小。即使是两个比较大的带电体，只要它们之间的距离足够大，也可以被视为点电荷。至于带电体本身的大小比它们之间的距离小多少才能被视为点电荷，应由对两者之间相互作用的影响大小和测量的要求决定。只要在测量精度要求的范围内，带电体的形状、大小以及电荷分布等因素的影响可以忽略不计，即可视为点电荷。



讨论与交流

1. 谈谈建立理想化模型的方法在科学研究中的作用。
2. 与质点模型相比，体会在什么情况下可将带电体抽象为点电荷。

影响静电力的因素

两个带电体之间存在相互作用力，这种相互作用力的大小与哪些因素有关呢？让我们用实验进行探究。



观察与思考

如图 1-2-2 所示，用摩擦起电的方法分别让球形导体 A 和通草球 B 带同种电荷，并使球形导体 A 与通草球 B 处在同一水平面上。

- (1) 不断给 A 增加电量，观察摆线偏角的变化。
- (2) 保持 A 和 B 上的电量不变，改变 A 与 B 之间的水平距离，观察摆线偏角的变化。

分析以上实验现象，这两个带电体之间的静电力可能与什么因素有关？

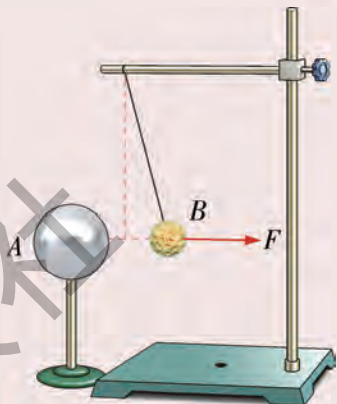


图 1-2-2 探究影响电荷间相互作用力的因素

从上面实验可知，当球形导体 A 电量增加时，摆线偏角增大，说明静电力随带电体电量增加而增大；当球形导体 A 和通草球 B 的电量不变，改变 A 和 B 之间的水平距离，发现距离越近，摆线偏角越大，说明静电力越大。

那么，两个带电体之间的静电力与它们的电量、距离之间存在怎样的定量关系？我们应怎样进行探究？

库仑定律

如图 1-2-2 所示的实验只能定性探究影响静电力的因素。科学家们花费很长时间，试图对静电力进行精密测量。18 世纪中叶以前，研究带电体之间的静电力遇到三大困难：一是这种“电力”非常小，没有仪器能测量这么小的力；二是当时还没有量度电量的单位；三是任意带电体上的电荷分布难以确定，因而无法确定相互作用的电荷之间的距离。

那么，这些困难可以解决吗？

1785 年，库仑通过扭秤实验解决了这些困难，并在实验的基础上提出了两个点电荷之间相互作用的规律。这项成果意义重大，它标志着电学研究从定性走向定量。下面我们借鉴科学家实验的思想方法，创新改进实验装置，开展一次实验探究。



观察与思考

如图 1-2-3 所示, 在干燥的环境中, 高精度电子秤上有两块金属圆片 A 、 B 固定在两个轻质绝缘支架上, 下支架放在电子秤检测台面上, 上支架等距贴上红色纸圈, 再穿过固定支架的小孔。

(1) 下支架放在电子秤检测台面上, 将电子秤的示数归零。

(2) 将 A 、 B 两块金属圆片正对距离调为 d , 然后用起电机让两块金属圆片带上相同的电量 (设为 q_0), 通过读出此时电子秤的示数, 经过单位换算便可得到 B 对 A 的静电力大小。

(3) 保持电量不变, 把 A 、 B 两块金属圆片的距离定量增大, 通过读取电子秤示数, 经过单位换算便可得到 B 对 A 的静电力大小, 把所得数据记录在表 1-2-1 中。

表 1-2-1 探究静电力 F 与两块金属圆片距离 r 的关系

探究变量	距离 r				
	d	$2d$	$3d$	$4d$	$5d$
F					
$\frac{1}{r}$					
$\frac{1}{r^2}$					

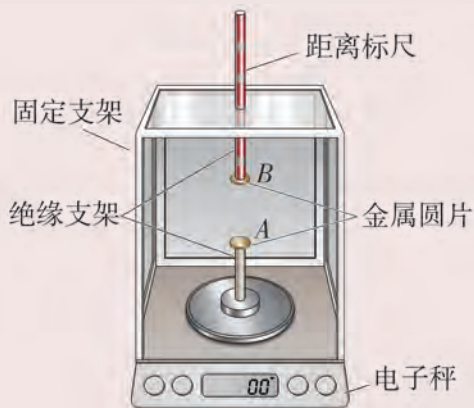


图 1-2-3 借助电子秤探究库仑力

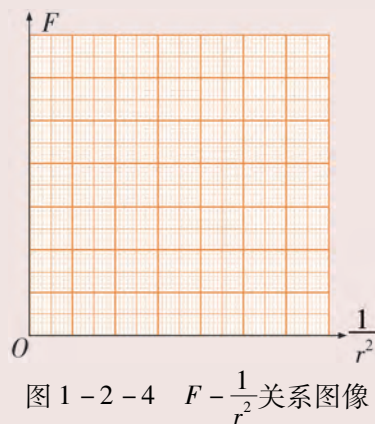


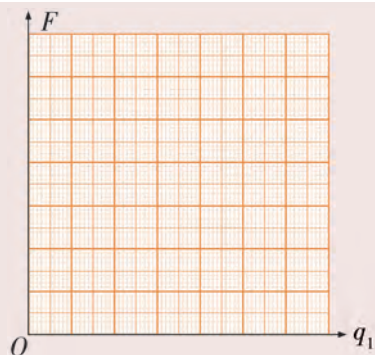
图 1-2-4 $F - \frac{1}{r^2}$ 关系图像

因 r 越大, 而 F 越小, 说明 F 与 r 不是正比关系. 利用计算器计算 $\frac{1}{r}$, 描点作图, 发现 $F - \frac{1}{r}$ 的关系图线是曲线. 进一步尝试作 $F - \frac{1}{r^2}$ 的关系图像, 概括实验结论.

(4) 保持 A 、 B 两块金属圆片的距离为 d , 逐次用另一相同且不带电的金属圆片 C 与 A 接触, 使 A 的电量依次减半, 通过读取电子秤的示数, 经过单位换算便可得到 B 每次对 A 的静电力大小, 把所得数据记录在表 1-2-2 中, 尝试作 $F - q_1$ 的关系图像, 概括实验结论.

表 1-2-2 探究静电力 F 与金属圆片 A 的电量 q_1 的关系

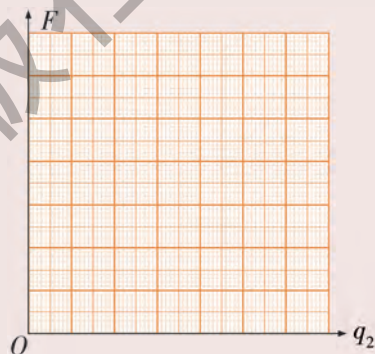
静电力	电量 q_1			
	q_0	$\frac{q_0}{2}$	$\frac{q_0}{4}$	$\frac{q_0}{8}$
F				

图 1-2-5 $F-q_1$ 关系图像

(5) 保持两块金属圆片 A 、 B 的距离为 d ，逐次用另一相同且不带电的金属圆片 D 与 B 接触，使 B 的电量依次减半，通过读取电子秤的示数，经过单位换算即可得到 B 每次对 A 的静电力大小，把所得数据记录在表 1-2-3 中，尝试作 $F-q_2$ 的关系图像，概括实验结论。

表 1-2-3 探究静电力 F 与金属圆片 B 的电量 q_2 的关系

静电力	电量 q_2			
	q_0	$\frac{q_0}{2}$	$\frac{q_0}{4}$	$\frac{q_0}{8}$
F				

图 1-2-6 $F-q_2$ 关系图像

实验表明，在保持两个带电体的电量不变时，它们之间静电力的大小与它们之间距离的二次方成反比，即 $F \propto \frac{1}{r^2}$ 。在保持两个带电体间的距离不变时，它们之间静电力的大小与每个带电体的电量成正比，即 $F \propto q_1$ ， $F \propto q_2$ 。

库仑在前人工作的基础上通过实验研究得到：在真空中两个静止点电荷之间的相互作用力，其大小与它们的电量 q_1 、 q_2 的乘积成正比，与它们之间距离 r 的二次方成反比。作用力的方向在它们的连线上。这个规律称为库仑定律 (Coulomb law)。电荷之间的这种相互作用力称为静电力，也称为库仑力。

库仑力的大小可表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.2.1)$$

式 (1.2.1) 中 k 是一个常量，叫静电力常量。若式中各物理量均使用国际单位制，即力的单位为 N ，电量的单位为 C ，距离的单位为 m ，通过实验可以得出 $k = 9.0 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2$ ，它表示真空中静止的两个相距为 $1 m$ 、电量都为 $1 C$ 的点电荷的静电力大小为 $9.0 \times 10^9 N$ 。

电量的单位 C (库仑) 是为了纪念库仑而命名的. 通常, 一把梳子和衣袖摩擦后所带的电量不到百万分之一库仑, 但天空中发生闪电之前, 巨大的云层中积累的电量可达几百库仑.

与其他力一样, 静电力也是矢量, 它既有大小又有方向, 上面的库仑定律仅仅给出了静电力的大小. 为了确定静电力的方向, 就需要利用电荷之间“同性相斥, 异性相吸”的特点加以判断. 两个或两个以上点电荷对某一点电荷的作用力, 等于各点电荷单独对这个电荷的作用力的矢量和.



讨论与交流

1. 谈谈利用电子秤探究库仑力的实验中, 我们可以使用理想化模型的前提条件.
2. 相隔一定距离的两个带电金属球, 因体积偏大而不能被视为点电荷, 如果用两个金属球的球心间距离来计算库仑力, 计算结果比真实值偏大、偏小还是相等? 为什么?

例题: 氢原子由一个质子和一个电子组成. 根据经典模型, 电子绕核做圆周运动, 轨道半径 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$. 已知质子的质量 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 电子的质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 万有引力常量 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$.

- (1) 求电子受到质子的静电力和万有引力的大小.
- (2) 库仑定律和万有引力定律的表达式有哪些相似之处?
- (3) 在研究微观物质的相互作用力时, 在库仑定律和万有引力定律中, 哪一种力可以被忽略呢? 请说明理由.

分析: 这是一道计算静电力和万有引力, 并进行对比研究的题目. 在氢原子系统中, 质子和电子可被视为点电荷, 也可被视为质点, 根据库仑定律和万有引力定律可以解答本题.

解: (1) 由库仑定律, 得两粒子间的静电力的大小为

$$F_e = k \frac{e^2}{r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.60 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 8.20 \times 10^{-8} \text{ N}.$$

由万有引力定律, 得两粒子间的万有引力的大小为

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 3.61 \times 10^{-47} \text{ N}.$$

(2) 静电力和万有引力的计算公式具有高度相似性. 它们都包含一个常量: 静电力常量 k 或万有引力常量 G ; 都包含两个物质的参量: 电量或质量; 都表现为与距离的二次方成反比关系; 计算结果单位都一致等.

(3) 由 (1) 的计算结果, 可得静电力与万有引力的大小之比为

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{8.20 \times 10^{-8}}{3.61 \times 10^{-47}} = 2.27 \times 10^{39}.$$

根据计算结果, 可知氢原子中电子与质子的静电力远远大于万有引力. 因此, 在研究微观带电粒子的相互作用时, 万有引力通常可以忽略.

库仑扭秤实验

库仑扭秤的结构如图 1-2-7 所示. 在悬丝下挂一根秤杆, 它的一端有一小球 A , 另一端有平衡体 P , 在 A 旁还放置有一固定小球 B . 先使 A 、 B 各带一定的电荷, 这时秤杆会因 A 端受力而偏转. 通过观察悬丝扭转的角度可以比较力的大小. 改变 A 、 B 之间的距离 r , 记录每次悬丝扭转的角度, 便可找到力 F 与距离 r 的关系, 结果发现力 F 与距离 r 的二次方成反比, 即

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

库仑当时还不知道怎样测量电量, 但他巧妙地解决了这个难题. 他将带有电量 q 的小球与另一相同的不带电小球接触, 使带电小球的电荷减半. 利用此方法, 库仑把带电小球的电量分为

$$\frac{q}{2}, \frac{q}{4}, \frac{q}{8}, \dots$$

通过进一步研究, 库仑又给出了力 F 与电量的关系: 力 F 与 q_1 和 q_2 的乘积成正比, 即

$$F \propto q_1 q_2$$

这样就可以用一个公式来表示库仑定律, 即

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

库仑定律是库仑从大量实验中归纳出来的基本实验定律, 是电学发展史上的第一个定量规律, 是建立整个电学理论的基础.

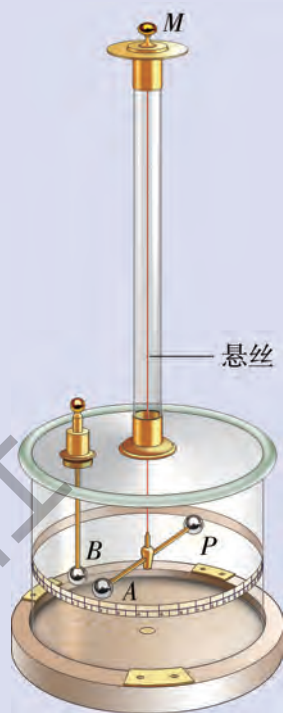


图 1-2-7 库仑扭秤



练习

1. 在真空中两个点电荷间的相互作用力, 是否会因其他一些电荷被移近而改变? 试说明其中的原因.

2. 如图 1-2-8 所示, 在一条直线上有两个相距为 r 的点电荷 A 、 B , A 带电 $+Q$, B 带电 $-9Q$. 现引入第三个点电荷 C , 恰好使三个点电荷都处于平衡状态, 则点电荷 C 应带什么性质的电? 放于何处? 所带电量为多少?

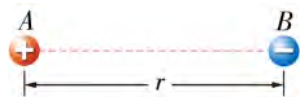


图 1-2-8

3. 假定我们正在用一个带正电的小塑料球和一个带正电的大金属球验证库仑定律. 根据库仑定律可知, 它们之间的静电力与 $\frac{1}{r^2}$ 有关, 其中 r 是两球球心间的距离. 然而, 随着两球间距离的减小, 它们之间的静电力比用库仑定律计算所得到的要小, 试说明原因.

第三节 电场 电场强度

我们知道，两个相隔一定距离的电荷之间有相互作用力。这种相互作用力与手推车的推力、绳拉船的拉力、滑块在桌面上滑动受到的摩擦力不同，后三者都是物体在和另一个物体直接接触的情况下产生的，而电荷之间的相互作用力却可以发生在两个相隔一定距离的物体之间。那么，电荷之间是如何发生作用的呢？

电场

经过长期的科学研究，人们认识到电荷之间的相互作用是通过电场发生的。场是物质存在的形式之一，引进场的概念对物理学的发展有重要意义。凡是有电荷的地方，在它周围就存在电场，电场对处于其中的其他电荷有力的作用。下面用如图 1-3-1 和图 1-3-2 所示的模拟示意图来分析。

如果从电荷 A 的角度来看，电荷 A 在其周围产生电场，放在此电场中的电荷 B 受到电荷 A 的电场施加的力 F_1 ，如图 1-3-1 所示。如果从电荷 B 的角度来看，电荷 B 在其周围产生电场，放在此电场中的电荷 A 受到电荷 B 的电场施加的力 F_2 ，如图 1-3-2 所示。我们把产生电场的电荷称为场源电荷；把电场对电荷的作用力称为电场力。本章只研究静止场源电荷在其周围产生的电场，即**静电场** (electrostatic field)。

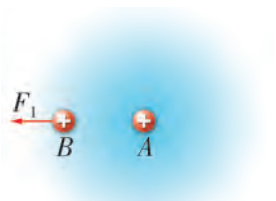


图 1-3-1 电荷 B 受到电荷 A 的电场施加的力 F_1

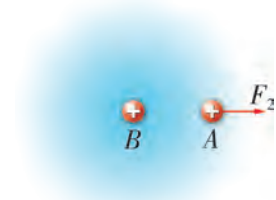


图 1-3-2 电荷 A 受到电荷 B 的电场施加的力 F_2

电场强度

电场的基本性质之一是对放入其中的电荷有作用力，因此我们可以通过这一性质来研究电场。放入电场中探测电场性质的电荷称为**试探电荷**，试探电荷的电量应足够小，使得它被放入电场后不会明显影响原有电场的分布；另外，它的体积也应足够小，这样才能方便研究电场中各点的情况。



观察与思考

1. 如图 1-3-3 所示, 把两个带电量均为 $+q$ 的试探电荷分别放置在电量为 $+Q$ 的固定小球两边, 且使它们与固定小球间距离不相等, 观察两个试探电荷在电场不同位置受到的电场力是否相同.

2. 移动电量为 $+Q$ 的固定小球, 使它处于两试探电荷的正中央, 再给两个试探电荷分别带上 $+q$ 和 $+2q$ 的电量, 如图 1-3-4 所示. 比较它们受到的电场力.

3. 保持试探电荷的电量及位置不变, 改变固定小球所带的电量, 观察实验现象.

实验现象表明了什么呢?

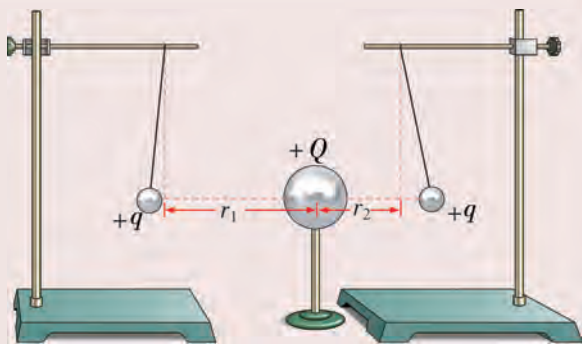


图 1-3-3 不同点电场强弱不同

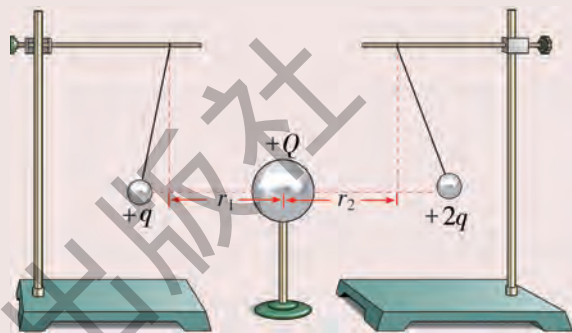


图 1-3-4 同点电场强弱相同

同一试探电荷放在电场中的不同位置时, 它受到电场力的大小和方向一般并不相同, 这表明电场中不同点的电场强弱不同; 另一方面, 电量不同的试探电荷在电场的同一点上受到电场力的大小不同.

大量实验表明, 在电场的同一点, 电场力的大小 F 与试探电荷的电量 q 之比是恒定的, 与试探电荷的电量无关, 它只与场源电荷以及试探电荷在电场中的具体位置有关, 也就是说 F 与 q 的比值反映了电场自身的某种性质.

物理学中把放入电场某点处的试探电荷受到的电场力 F 与它的电量 q 之比, 叫作电场在该点的电场强度 (electric field intensity), 简称场强, 用符号 E 表示, 即

$$E = \frac{F}{q} \quad (1.3.1)$$

在国际单位制中, 场强的单位为牛顿每库仑, 符号为 N/C . 如果 1 C 的电荷在电场中某点受到的电场力的大小为 1 N , 则该点的场强的大小就等于 1 N/C .

场强是矢量. 物理学上规定, 电场中某点的场强的方向与正电荷在该点受到的电场力的方向相同. 负电荷在某点受到的电场力的方向与该点场强的方向相反.

各点场强的大小和方向都相同的电场叫作匀强电场 (uniform electric field).

点电荷的电场

点电荷作为一种理想化的物理模型，其在空间产生的电场是静电学中最基本的，也是很重要的研究对象。

以点电荷 $+Q$ 在真空中形成的电场为例。如图 1-3-5 所示，把试探电荷 $+q$ 放在距离场源电荷 r 处，设电场对 $+q$ 的电场力大小为 F ，根据场强公式 $E = \frac{F}{q}$ 和库仑

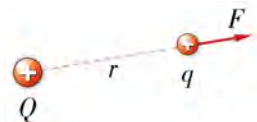


图 1-3-5 试探电荷 $+q$ 在距离场源电荷 r 处的受力情况

定律公式 $F = k \frac{Qq}{r^2}$ ，可以推导出真空中的点电荷 Q 在与其距离为 r 处的场强为

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad (1.3.2)$$

式 (1.3.2) 说明了场强 E 的大小与场源电荷自身的电量 Q 成正比，与 r^2 成反比，而与试探电荷是否放入电场无关。

如果以 Q 为中心任意作一球面，如图 1-3-6 所示，则球面上各点的场强大小相等。当 Q 为正电荷时， E 的方向沿半径向外；当 Q 为负电荷时， E 的方向沿半径向内。



(a) 正点电荷的电场 (b) 负点电荷的电场

如果在空间中同时存在多个点电荷，这时在空间某一点的场强等于各点电荷单独存在时在该点产生的场强的矢量和。这叫作**电场强度叠加原理** (superposition principle of electric field intensity)。

图 1-3-6 点电荷的电场



讨论与交流

1. 公式 $E = \frac{F}{q}$ 与 $E = k \frac{Q}{r^2}$ 都可以用来计算场强，它们有什么区别呢？
2. 把一个试探电荷 $+q$ 放在电场中的一点 A 上，其受到电场力的大小为 F ，方向向东；如果把试探电荷 $+q$ 取走，则该点的场强是否为零？

电场线

电场看不见、摸不着，能否用一种形象的方式来描述它呢？最早引入电场概念的法拉第 (M. Faraday, 1791—1867) 提出用电场线来描述电场。

在电场中画出一系列有方向的曲线，使曲线上每一点的切线方向和该处的场强方向一致，如图 1-3-7 所示，这样的曲线就叫作**电场线** (electric field line)。电场线的形状可以通过实验来模拟。我们把奎宁的针状结晶或头发屑悬浮在蓖麻油里，加上电场后，它们就会按照场强的方向排列，显示出电场线的分布情况。

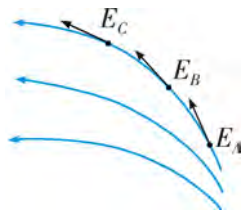
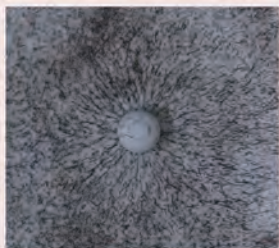


图 1-3-7 电场线



观察与思考

观察从图 1-3-8 到图 1-3-11 中的电场线，从中能发现什么规律？



(a) 模拟点电荷的电场线



(b) 正点电荷的电场线分布

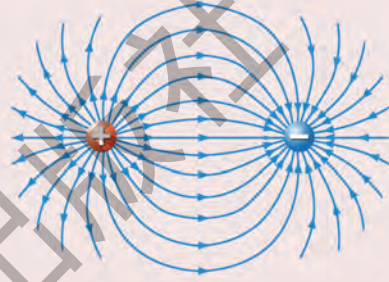


(c) 负点电荷的电场线分布

图 1-3-8 点电荷的电场线分布情况

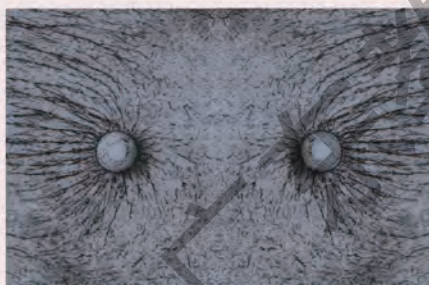


(a) 模拟等量异种点电荷的电场线

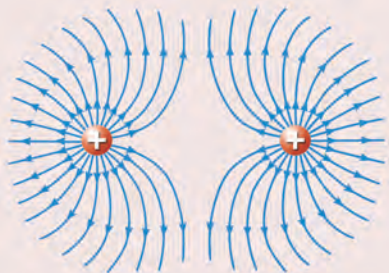


(b) 等量异种点电荷的电场线分布

图 1-3-9 等量异种点电荷的电场线分布情况



(a) 模拟等量同种点电荷的电场线

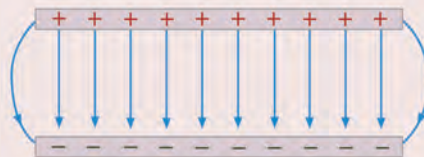


(b) 等量同种点电荷的电场线分布

图 1-3-10 等量同种点电荷的电场线分布情况



(a) 模拟带等量异种电荷的平行金属板的电场线



(b) 带等量异种电荷的平行金属板的电场线分布

图 1-3-11 带等量异种电荷的平行金属板的电场线分布情况

从以上各图可以看出，电场线有以下几个特点：

- (1) 电场线从正电荷或无限远出发，终止于无限远或负电荷。
- (2) 同一幅图中，场强越大的地方，电场线越密；场强越小的地方，电场线越疏。电场线的疏密程度反映了场强的相对大小。
- (3) 任意两条电场线都不相交，这是因为电场中每一点处的场强只能有一个确定的方向。

此外，匀强电场的电场线是间隔距离相等的平行直线。两块相同、正对放置的平行金属板，若板间距离很小，当它们分别带有等量的异种电荷时，板间的电场（除边缘附近）就是匀强电场。

虽然电场并不存在电场线，但引入电场线概念可以形象地描绘出电场的总体情况，对于分析某些实际问题很有帮助。在研究某些复杂的电场时，常采用模拟的方法把它们的电场线画出来。

例题：如图 1-3-12 所示，带箭头的直线是某电场中的一条电场线，电场线上 a 、 b 两点的场强分别用 E_a 、 E_b 表示，试根据下面的情况确定 E_a 与 E_b 的关系。

- (1) 如果这条电场线在匀强电场中。
- (2) 如果这条电场线在由一个正点电荷产生的电场中。
- (3) 如果这条电场线在由一个负点电荷产生的电场中。



图 1-3-12 某电场中的一条电场线

分析：在匀强电场中，电场线分布均匀，场强处处相等；在点电荷产生的电场中，越靠近场源电荷，电场线分布越密集，则该区域内场强越大。本题讨论的情况如图 1-3-13 所示。



图 1-3-13 分析图

解：根据以上分析可知：

- (1) 如果这条电场线在匀强电场中，则 $E_a = E_b$ ，方向由 a 指向 b 。
- (2) 如果这条电场线在由一个正点电荷产生的电场中，则 a 点靠近场源电荷， $E_a > E_b$ ，方向由 a 指向 b 。
- (3) 如果这条电场线在由一个负点电荷产生的电场中，则 b 点靠近场源电荷， $E_a < E_b$ ，方向由 a 指向 b 。



练习

1. 电场线有曲有直, 如图 1-3-14 所示. 如果把试探电荷放入电场中使电荷仅在电场力的作用下开始运动, 那么, 电场线是不是电荷运动的路径?



图 1-3-14

2. 如图 1-3-15 所示是带电量不同的正、负点电荷的电场线, 其中 A 、 B 、 C 三点的位置如图所示.

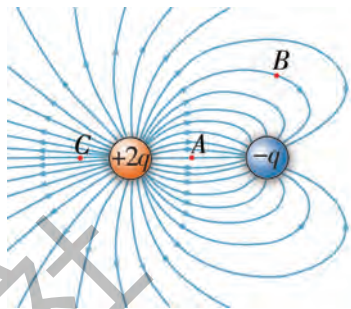


图 1-3-15

(1) 在 A 、 B 、 C 三点中, 试探电荷置于哪一点时所受到的电场力最大?

(2) 把一个正点电荷置于点 A , 试作出电场作用于该电荷上的力的示意图.

(3) 把一个负点电荷置于点 B , 试作出电场作用于该电荷上的力的示意图.

3. 如图 1-3-16 所示, 一倾角 $\theta = 30^\circ$ 的光滑绝缘斜槽放在方向竖直向下的匀强电场中. 有一质量为 m 、电量为 q 的带负电小球从斜槽顶端 A 处, 以初速度 v_0 沿斜槽向下运动.

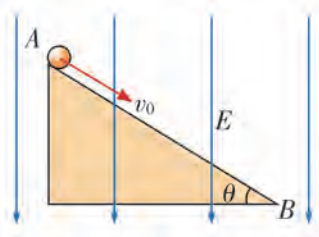


图 1-3-16

(1) 为了保证小球能到达点 B , 场强 E 的大小应满足什么条件?

(2) 如果场强的大小 $E = \frac{mg}{2q}$, 求小球的加速度.

4. 模拟点电荷电场的电场线, 如图 1-3-17 所示.

(1) 用 3~5 mm 厚的透明有机玻璃制成一个框架, 中间放置一个培养皿, 两边架子上有两个接线柱固定电极, 用自行车辐条制成点电荷电极.

(2) 向培养皿内倒入适量蓖麻油, 再轻轻把干燥木屑均匀撒在油面上.

(3) 将一个点电荷电极放在培养皿中央并接到起电机的一个电极上.

(4) 缓慢地加速转动起电机.

观察木屑的分布排列情况, 并解释这样排列的原因.

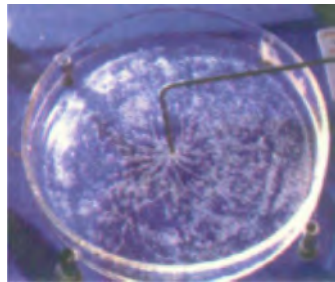


图 1-3-17

第四节

电势能与电势

我们学习了场强的概念，知道它是描述电场性质的物理量，而电场力在电场中能够做功，功是能量转化的量度，所以电场也有“能”的性质。为了研究电场中“能”的性质，我们首先要研究电场中电场力做功的特点。

电场力做功

当物体在地球表面沿竖直方向上的高度差发生变化时，我们说重力对物体做了功。重力的方向始终是竖直向下的。根据功的表达式，可以归纳出重力做功的特点：重力做功的多少与路径无关，仅取决于物体始末位置沿竖直方向上的高度差。那么，电场力做功是否具有类似的特点呢？



讨论与交流

如图 1-4-1 所示，在场强为 E 的匀强电场中，电量为 $+q$ 的试探电荷沿三种不同路径从点 A 移动到点 B 。试讨论：

- (1) 沿 s_1 (AB) 路径的电场力做功是多少？
- (2) 沿 s_2 (ACB) 路径的电场力做功是多少？
- (3) 沿 s_3 (ACB) 路径的电场力做功是多少？

这三种情况下电场力做功相同吗？

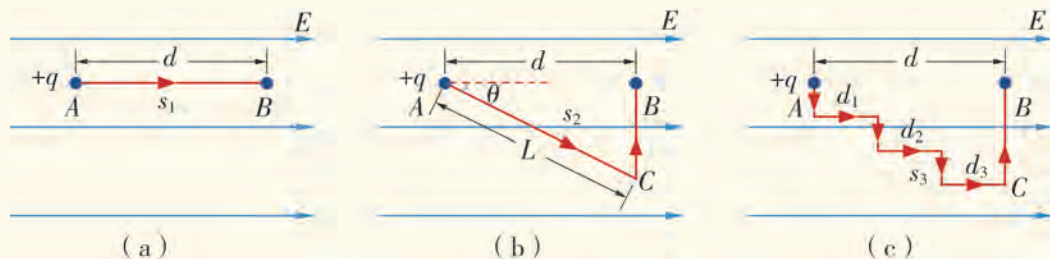


图 1-4-1 试探电荷沿不同路径移动时电场力做功情况

分别对上述三种情况进行计算：

(1) 电场力做功 $W_1 = qEd$ (正功).

(2) 沿斜线电场力做功 $W_2 = qEL\cos\theta = qEd$, 沿竖直向上的路径不做功, 故电场力做功为 $W_2 = qEd$ (正功).

(3) 沿三段水平线, 电场力做功 $W_3 = qEd_1 + qEd_2 + qEd_3 = qEd$, 沿竖直向下和竖直向上的路径不做功, 故电场力做功为 $W_3 = qEd$ (正功).

研究表明, 在匀强电场中移动电荷时, 电场力所做的功只与电荷的电量及其起点、终点的位置有关, 与路径无关. 更多的研究表明, 上述结论也适用于非匀强电场.

电势能

既然电场力对电荷做功和重力对物体做功都与路径无关, 我们便可以采用与引入重力势能类似的方法来引入电势能.

一个物体在地面附近的某一位置具有重力势能. 同样, 一个电荷在静电场中的某一位置也具有势能, 这种势能叫作电势能 (electric potential energy), 用符号 E_p 表示.



讨论与交流

如图 1-4-2 所示, 在匀强电场中, 电荷从点 A 移动到点 B , 电荷电势能的变化与电场力做功有什么关系?

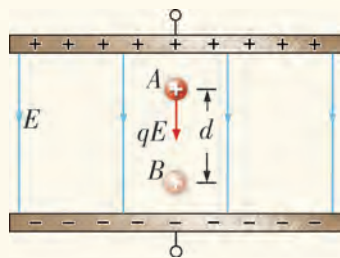


图 1-4-2 电势能的变化与电场力做功的关系

类似于物体重力势能变化与重力做功的关系, 设电荷在匀强电场 A 、 B 两点所具有的电势能分别为 E_{pA} 和 E_{pB} , 电荷从点 A 移动到点 B , 电场力做功 W_{AB} 等于始点的电势能 E_{pA} 减去终点的电势能 E_{pB} , 即

$$W_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$$

若 $W_{AB} > 0$, 表示电场力做正功, 有 $E_{pA} > E_{pB}$, 则从点 A 移动到点 B , 电荷的电势能减少; 若 $W_{AB} < 0$, 表示电场力做负功, 有 $E_{pA} < E_{pB}$, 则从点 A 移动到点 B , 电荷的电势能增加.

与重力势能一样, 只有选择了参考点 (零电势能位置) 之后, 电势能才有确定的值. 若将无穷远点 O 处的电势能定为零, 则电荷在电场中点 A 的电势能大小就等于将电荷从该点移到无穷远处电场力所做的功, 即

$$E_{pA} = W_{AO}$$

在国际单位制中, 电势能的单位是焦耳, 简称焦, 符号是 J.

电势能是能量的一种形式，电荷的电势能是由电荷和电场共有的，就像重力势能由在地球上的物体和地球共有的一样，平时我们说某电荷的电势能只是一种简略的说法。

尽管静电场中的电势能与地球表面存在的重力势能有很多相似之处，但是也有很大的区别。因为电荷有正负之分，而质量却没有。例如，在图 1-4-2 中，若从点 A 到点 B 移动的是正电荷，则电势能减少；若移动的是负电荷，则电势能增加。

电势

我们通过对静电力的研究认识了场强，现在通过对电势能的研究来认识另一个表征电场性质的物理量——电势。

下面用比值定义法，从研究电荷在电场中的电势能与其电量之比入手研究电势。



讨论与交流

有一个场强为 E 的匀强电场，如图 1-4-3 所示，规定负极板的电势能为零（极板接地）。取极板附近一点 O ，从与点 O 距离为 d 的点 A ，把一个电量 $q = q_0$ 的正试探电荷由点 A 移到点 O ，则电场力做功为 $W = q_0Ed$ ，电荷在点 A 的电势能 $E_{pA} = W$ ，电势能与电量之比为 $\frac{E_{pA}}{q} = Ed$ 。如果把电量换为 $q = 2q_0$ ， $3q_0$ ， \dots ， nq_0 ，试分析它们之间的规律，并填入表 1-4-1 中。

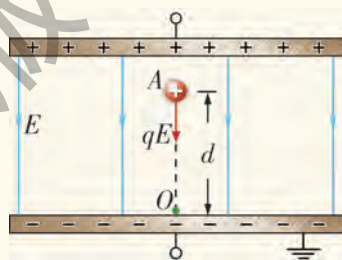


图 1-4-3 讨论电荷在某点的电势能与电量之间的关系

表 1-4-1 电势能与电量之比的规律

试探电荷的电量 q	q_0	$2q_0$	$3q_0$	\dots	nq_0
电荷从点 A 移到点 O 时电场力所做的功 W	q_0Ed				
电荷在点 A 具有的电势能 E_{pA}	q_0Ed				
电荷在点 A 具有的电势能与电量之比 $\frac{E_{pA}}{q}$	Ed				

由表 1-4-1 可见，在匀强电场中，电荷在任意一点 A 的电势能 E_{pA} 与 q 成正比；无论电量 q 是多少，它的电势能与电量之比 $\frac{E_{pA}}{q}$ 都是相同的。

研究表明，电荷在电场中某一点的电势能与它的电量之比，是由电场中这点的电场性质决定的，与试探电荷本身无关。这个结论虽然是从匀强电场中得出的，但可以证明对其他电场同样适用。

电荷在电场中某一点的电势能与它的电量之比,叫作这一点的**电势** (electric potential). 如果用 E_{pA} 表示电荷 q 在点 A 的电势能,用 φ_A 表示点 A 的电势,则

$$\varphi_A = \frac{E_{pA}}{q} \quad (1.4.1)$$

在国际单位制中,电势的单位是伏特,简称伏,符号是 V. 在电场中某一点,电量为 1 C 的电荷在该点的电势能为 1 J, 这一点的电势就是 1 V, 即 $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$.

在图 1-4-3 中,假如正试探电荷沿着电场线自上而下运动,则它的电势能减少,电势逐渐降低. 因此,电场线指向电势降低的方向.

确定某点的电势时,同样要规定电势的零点. 在物理学的研究中,常取离场源无限远的电势为零. 在实际应用中,则常取大地的电势为零.

在规定了电势零点之后,电场中各点的电势可以取正值,也可以取负值,这由场源电荷的性质决定.

电势也是反映电场性质的物理量. 电势只有大小,没有方向,是个标量.

等势面

在地图中常用等高线来表示地势的高低. 与此相似,在电场的示意图中常用等势面来表示电势的高低.

电场中电势相同的各点构成的面叫作**等势面** (equipotential surface). 与电场线相似,等势面是一个虚构的面,用来形象地描绘电场的另一性质.

在同一个等势面上,任何两点间的电势都相等. 所以,在同一等势面上移动电荷时电场力不做功. 由此可知,等势面一定与电场线垂直,即与场强的方向垂直.

我们可以在与电场线垂直的曲面(包括平面)上绘制等势面. 如图 1-4-4 所示是几种常见电场的电场线和等势面,实线表示电场线,虚线表示等势面.

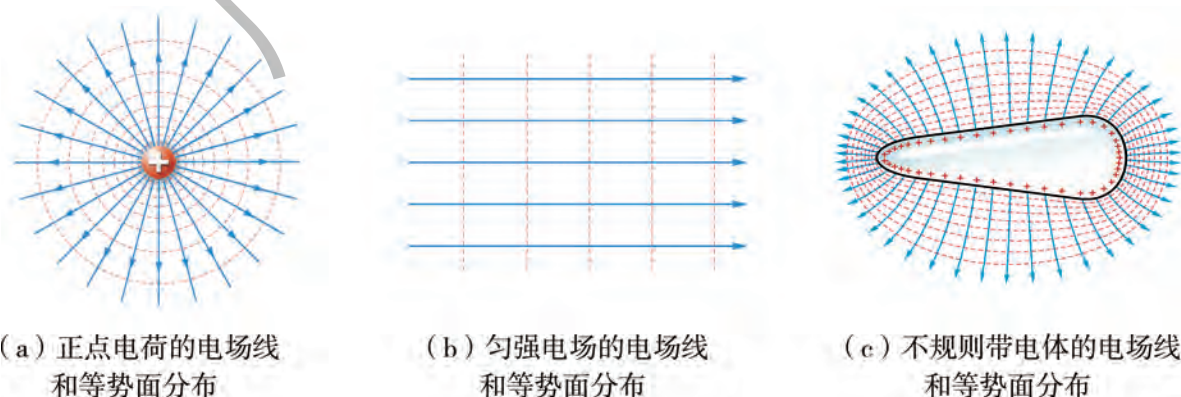


图 1-4-4 几种常见电场的电场线和等势面分布图

沿着电场线的方向,电势越来越低,即电场线由电势高的等势面指向电势低的等势面.

例题：雷雨云层可以形成几百万伏以上的电压，足以击穿空气产生几十万安培的瞬间电流，电流生热使空气发光，形成闪电；空气受热突然膨胀发出巨响，发出雷声。如图 1-4-5 所示，雷雨云底部的电势较地面低 $1.5 \times 10^8 \text{ V}$ ，闪电时，一个电子从雷雨云底部抵达地面，求它的电势能变化量。

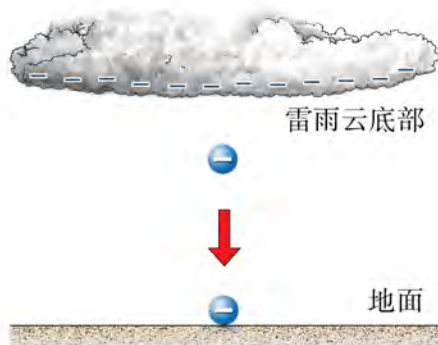


图 1-4-5 电子从雷雨云底部抵达地面

分析：因为电势能和电势都是标量，故在计算时，电势、电量的正负值都要代入，得到的正数越大，说明电势能越大，得到的负数越大，说明电势能越小。本题运用的公式为 $\Delta E_p = E_{p地} - E_{p云}$ ，而 $E_{p云} = -e\varphi_{云}$ ， $E_{p地} = -e\varphi_{地}$ 。因地面的电势为零，所以 $\Delta E_p = e\varphi_{云}$ 。

解：取地面的电势 $\varphi_{地} = 0$ ，一个电子在雷雨云底部和在地面的电势能分别为

$$E_{p云} = -e\varphi_{云} = -1.6 \times 10^{-19} \times (-1.5 \times 10^8) \text{ J} = 2.4 \times 10^{-11} \text{ J}$$

$$E_{p地} = -e\varphi_{地} = 0$$

一个电子从雷雨云底部抵达地面，电势能的变化量为

$$\Delta E_p = E_{p地} - E_{p云} = 0 - 2.4 \times 10^{-11} \text{ J} = -2.4 \times 10^{-11} \text{ J}$$

故电势能减少。这些电势能的减少量转化为闪电所发出的热和光。

练习

1. 试解答如下问题：

(1) 取无限远的电势为零，则正点电荷产生的电场中电势是正值还是负值？移入一个正电荷，则该正电荷的电势能是正值还是负值？移入一个负电荷，结果又如何？总结电势与电势能两个物理量的区别与联系。

(2) 两个同种电荷相互靠近，它们的电势能增加还是减少？两个异种电荷相互靠近，结果又如何？总结判断依据，可以通过几种方法判断？

(3) 沿着电场线的方向移动正电荷，电荷的电势能增加还是减少？沿着电场线的方向移动负电荷，结果又如何？说明判断依据，并总结电势能增减的判断方法。

2. 两个带等量正电的点电荷的等势面分布如图 1-4-6 所示， a 、 b 、 c 、 d 、 e 处在不同等势面上，则各点的电势大小应如何排列？负试探电荷在各点的电势能大小又应如何排列？

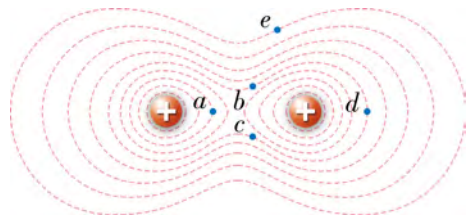


图 1-4-6

3. 将电量为 $q = 3.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的点电荷移至电场中的点 A，该电荷具有的电势能为 $6.0 \times 10^{-7} \text{ J}$ ，求点 A 的电势；若把 $q' = -5.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的点电荷移至电场中的点 A，其具有的电势能为多少？

第五节

电势差及其与
电场强度的关系

我们已知描述电场有两个物理量：场强和电势。场强从电场对电荷有作用力的角度来描述电场，电势则从电场力对在电场中移动的电荷做功的角度来描述电场。既然描述的是同一电场，那么场强与电势、电势差有什么联系呢？

电势差

电场中两点间电势的差值叫作电势差 (electric potential difference)，也叫电压 (voltage)，用符号 U 表示。设电场中点 A 的电势为 φ_A ，点 B 的电势为 φ_B ，则 A 、 B 两点之间的电势差 U_{AB} 可以表示为

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (1.5.1)$$

电势差与电势一样都是标量，它可以为正值，也可以为负值。若 U_{AB} 为正值，则表示点 A 的电势比点 B 的电势高；若 U_{AB} 为负值，则表示点 A 的电势比点 B 的电势低。



讨论与交流

当电量为 $+q$ 的电荷从点 A 移至点 B 时，电场力做功为 W_{AB} ，而 A 、 B 两点的电势差为 U_{AB} 。如何借助电势能作为“桥梁”，找出电场力做功 W_{AB} 与电势差 U_{AB} 之间的关系呢？

根据从电场力做功与电势能的关系，可得

$$W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} = q\varphi_A - q\varphi_B = q(\varphi_A - \varphi_B) = qU_{AB}$$

即

$$W_{AB} = qU_{AB}$$

这说明在电场中把正电荷从电势高的点 A 移至电势低的点 B 时，电场力做的功由移动电荷的电量以及 A 、 B 两点间的电势差共同决定。移动的正电量 q 越大， A 、 B 两点间的电势差 U_{AB} 越大，电场力做的功 W_{AB} 越多。

如果把上面的式子变换一下，可得两点间的电势差

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1.5.2)$$

利用比值定义法，我们也可以把电场力做的功与所移动电荷的电量之比叫作电势差。电势差反映的是电场自身在 A 、 B 两点间的性质，与电量 q 无关，只和电场中 A 、 B 的位置有关。 $U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$ 说明电场中 A 、 B 两点间的电势差 U_{AB} 等于把单位电荷从点 A 移动到点 B 时电场力所做的功。

电势差与电场强度的关系

场强和电势差都是描述电场的物理量，那么电势差与场强之间存在着什么联系呢？



讨论与交流

如图 1-5-1 所示是一匀强电场的电场线和等势面，匀强电场的场强大小为 E ， A 、 B 两点在同一条电场线上，但在两个不同的等势面上，它们之间的距离为 d ，电势差为 U 。如何借助电场力所做的功 W 作为“桥梁”，找出电势差 U 与场强 E 的关系呢？

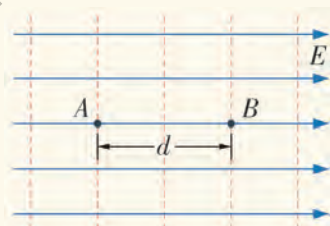


图 1-5-1 匀强电场

如果沿着场强的方向，将一个点电荷 $+q$ 由匀强电场中的点 A 移到点 B ，则点电荷 $+q$ 受到电场力的大小 $F = qE$ ，电场力所做的功 $W = Fd = qEd$ ，因此，由电势差的定义式 $U = \frac{W}{q}$ ，可得 A 、 B 两点电势差 U 与场强大小 E 的关系为

$$U = Ed \quad (1.5.3)$$

理论研究表明，在匀强电场中任意两点之间的电势差等于场强与这两点沿电场方向的距离的乘积。

式 (1.5.3) 可变换为

$$E = \frac{U}{d} \quad (1.5.4)$$

由此说明，在匀强电场中，场强在数值上等于沿场强方向距离为每单位长度的两点间的电势差。由 $E = \frac{U}{d}$ 还可以看出，场强的另一个单位是伏/米，符号为 V/m 。



讨论与交流

1. 公式 $U = Ed$ 适用于非匀强电场吗?
2. 匀强电场中两点的连线与电场线互成一定角度时, 该怎样分析这两点之间的电势差?

例题: 在如图 1-5-2 所示的匀强电场中 (未画场强方向) 有 A 、 B 、 C 三点, $d_{AB} = 4 \text{ cm}$, $d_{BC} = 6 \text{ cm}$, 其中 AB 与电场线平行, BC 和电场线成 37° 角. 一个电量为 $q = -4 \times 10^{-8} \text{ C}$ 的电荷从点 A 移动到点 B , 电场力做功为 $W_{AB} = 8 \times 10^{-6} \text{ J}$, 已知 $\cos 37^\circ = 0.8$.

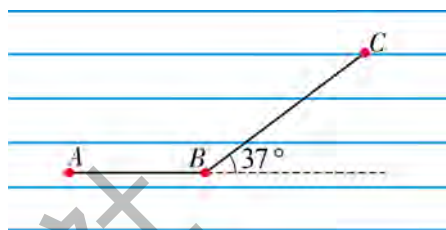


图 1-5-2 某一场强方向未知的匀强电场

(1) 求场强的大小和方向. 若根据 $W = Fl$ 和 $E = \frac{F}{q}$, 可得场强的大小 $E = 5 \times 10^3 \text{ N/C}$, 这与解得的结果有矛盾吗?

(2) 若取点 B 的电势为零, 则点 C 的电势为多大? 请解释电势和电势差的区别.

分析: 在计算电场力做功、电势能、电势、电势差时, 需要把正负数值代入; 而在计算场强的大小时, 要取电势差的绝对值代入, 场强的方向要通过分析电荷所受的电场力方向或电势的高低来判断.

解: (1) 根据 $E = \frac{U}{d}$, 可得场强的大小

$$E = \frac{|U_{AB}|}{d_{AB}} = \frac{\left| \frac{W_{AB}}{q} \right|}{d_{AB}} = \frac{\left| \frac{8 \times 10^{-6}}{-4 \times 10^{-8}} \right|}{4 \times 10^{-2}} \text{ V/m} = 5 \times 10^3 \text{ V/m}.$$

分析可知负电荷所受的电场力的方向向右, 所以场强的方向向左.

$E = 5 \times 10^3 \text{ N/C}$ 与 $E = 5 \times 10^3 \text{ V/m}$ 没有矛盾. V/m 和 N/C 都是场强的单位, 物理本质相同, 只不过 V/m 由电势差的定义推导得到, N/C 由场强的定义推导得到.

(2) 根据 $U = Ed$, 可得

$$|U_{BC}| = |Ed_{BC} \cos 37^\circ| = 5 \times 10^3 \times 6 \times 10^{-2} \times 0.8 \text{ V} = 240 \text{ V}.$$

由于场强的方向向左, 故

$$U_{BC} = -240 \text{ V}.$$

而 $U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C$, $\varphi_B = 0$, 可得

$$\varphi_C = 240 \text{ V}.$$

要确定电场中某点的电势, 需要规定电势的零点. 而电势差是指电场中两点电势的差值, 既与电荷无关, 也与电势零点的选取无关.

电势差和医学诊断

资料活页

在人体细胞内以及细胞和细胞之间的液体中都含有大量的离子，例如钠离子 (Na^+)、钾离子 (K^+) 和氯离子 (Cl^-) 等。由于离子会进入和离开细胞，因此细胞内外的电势会改变，导致人体表面不同点之间存在微小的电势差 ($30 \sim 500 \mu\text{V}$)。这个电势差成了某些重要医学诊断技术发展的基础，心电图学便是其中一例。如图 1-5-3 所示，在进行心电图检查时，先把电极放在人体上的不同位置。由于人的心脏跳动过程中，不同点之间的电势差会随时间变化，由此可根据这些变化获取与心脏健康状态有关的信息。

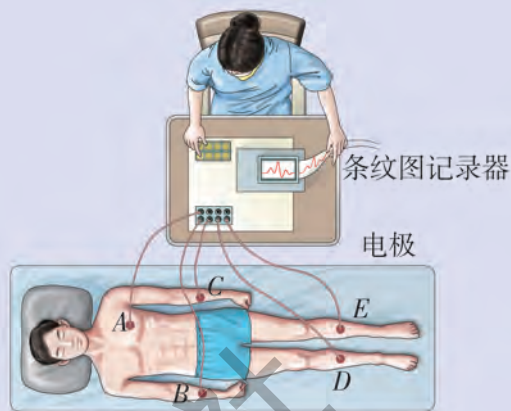


图 1-5-3 心电图检查



练习

1. 在电场中，哪些物理量会受到电势零点选取的影响？选择不同的电势零点，得到的值有何变化？

2. 如图 1-5-4 所示，在一点电荷产生的电场中，三个等势面 a 、 b 和 c 的电势分别为 6 V 、 4 V 和 1.5 V 。当电量为 e 的质子从 a 上某处由静止释放，经过等势面 b 时的速率为 v ，求：

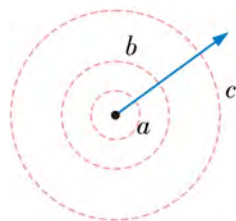


图 1-5-4

- (1) 该场源电荷带什么电？
- (2) 质子从等势面 a 运动到 b 时电场力做多少功？
- (3) 质子经过等势面 c 时的速率为多大？

3. 如图 1-5-5 所示，两块平行金属板 A 、 B 相隔 6 cm ，分别接在 36 V 的直流电源的正、负极上。点 C 在两板间且到板 A 的距离为 2 cm ，正极板 A 接地。

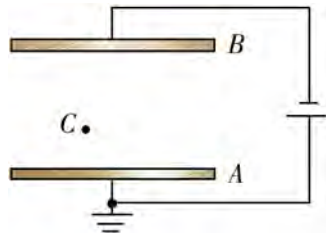


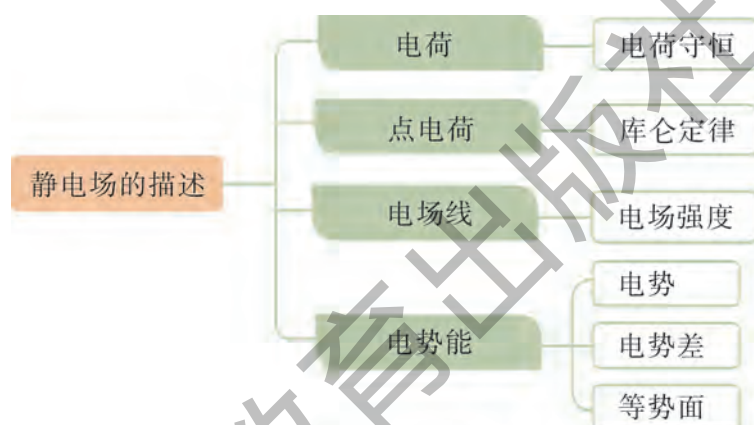
图 1-5-5

- (1) 求 A 、 B 两板间的场强。
- (2) 以地面为电势零点，求点 C 的电势。

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 比较点电荷、电场线等物理模型的建构方法有何异同，它们在物理研究中有何重要作用？设想一下，缺少这些物理模型对研究这些具体问题有何影响？
2. 结合本章场强、电势等物理量的定义，谈谈对应用物理量之比定义新物理量的方法的认识。
3. 结合实例分析，在研究电场性质时主要学习了哪些科学思维方法，对电场产生了哪些新的认识。
4. 谈谈对“电场是一种物质”的认识。

习题一

1. 某同学做静电感应实验, 步骤及结论如下: ①把不带电的绝缘导体球甲移近带负电的绝缘导体球乙, 但甲、乙两球不接触; ②用手触摸甲球; ③手指移开; ④移开乙球; ⑤甲球带正电; ⑥甲球不带电. 下列操作过程和所得结论正确的有 ().

- A. ①→②→③→④→⑥ B. ①→②→④→③→⑥
C. ①→②→③→④→⑤ D. ①→②→④→③→⑤

2. 法拉第首先提出用电场线形象生动地描绘电场. 如图 1-1 所示是点电荷 a 、 b 所形成电场的电场线分布图, 下列说法正确的是 ().

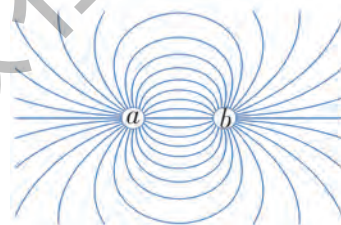


图 1-1

- A. a 、 b 为异种电荷, a 的带电量大于 b 的带电量
B. a 、 b 为异种电荷, a 的带电量等于 b 的带电量
C. a 、 b 为同种电荷, a 的带电量等于 b 的带电量
D. a 、 b 为同种电荷, a 的带电量小于 b 的带电量

3. 如图 1-2 所示, 一正电荷仅在电场力作用下从点 a 运动到点 b , 在点 a 的速度大小为 v_0 , 方向与电场方向相同. 该电荷从点 a 到点 b 的 $v-t$ 图像正确的是 ().

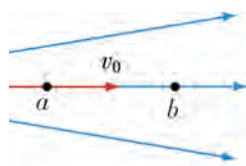
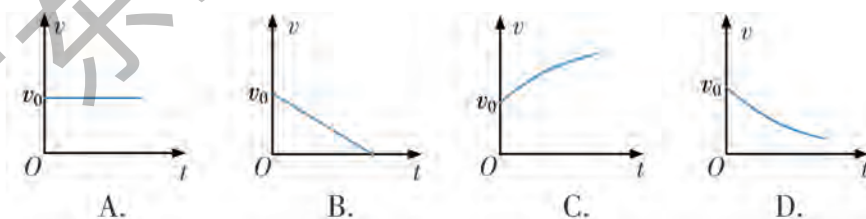


图 1-2



4. 如图 1-3 所示的实线为一正点电荷的电场线, 虚线为其等势面. 如果在点 A 处轻轻放入一个质子 (带正电) 或一个电子, 下列判断正确的是 ().

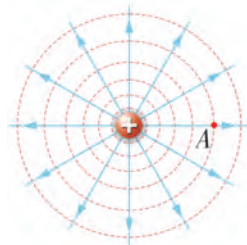


图 1-3

- A. 质子的电势能将不断减少
B. 电子的电势能将不断减少
C. 质子将沿着电场线向电势低的地方运动
D. 电子将沿着电场线向电势低的地方运动

5. 式① $E = \frac{F}{q}$ 和式② $E = k \frac{q}{r^2}$ 分别为场强大小的定义式和点电荷场强大小的表达式. 下列说法错误的是 ().

- A. 式①和式②都只对点电荷产生的场成立
 B. 式②中 E 是某电场的场强大小, q 是场源电荷
 C. 式①中 F 是放入某电场中的电荷所受的力, q 是产生这电场的电荷
 D. 式①中的 E 是式中的电荷 q 所产生的电场的场强, 式②中的 E 是式中的电荷 q 产生的电场的场强

6. 将一整条塑胶带撕成几十条小塑胶丝, 用黑胶布把上端裹紧, 然后用手提塑胶丝, 如图 1-4 (a) 所示. 取一条干净的干布料, 自上而下地摩擦塑胶丝, 如图 1-4 (b) 所示. 观察被摩擦后的塑胶丝, 发现几十条小塑胶丝分散开来, 如图 1-4 (c) 所示. 这是什么原因造成的? 通过这个实验可以证明带电体的什么性质?

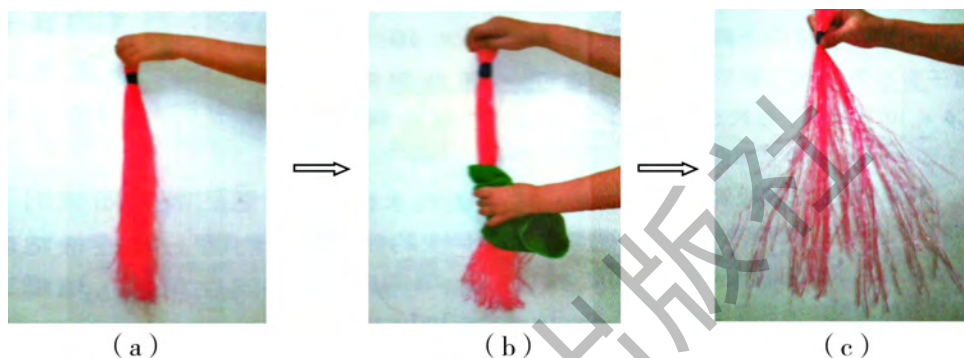


图 1-4

7. 用一块干的毛皮摩擦一个塑料球, 再把带电的塑料球悬吊在半空, 在它正下方的桌面上放置一台电子秤, 秤上放置一个静止的中性金属球. 然后把塑料球慢慢接近金属球, 如图 1-5 所示.

- (1) 试画出两个球体上的电荷分布.
 (2) 试描述并解释电子秤的示数变化.
 (3) 一名同学认为这个装置可以用来验证库仑定律. 他的看法对吗? 为什么?

(4) 如果保持塑料球静止, 把金属球瞬时接地, 电子秤的示数有什么变化?

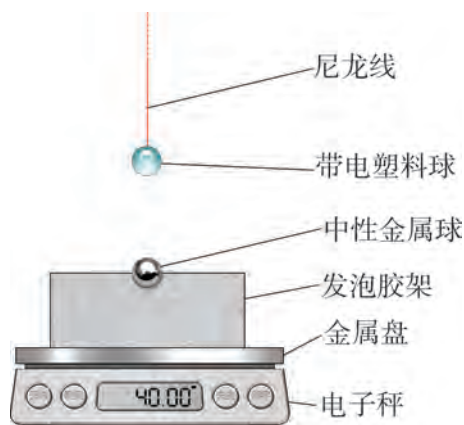


图 1-5

8. 如图 1-6 所示是滚筒式静电分选器, 由料斗 A , 导板 B , 导体滚筒 C , 刮板 D , 料槽 E 、 F 和放电针 G 等部件组成. C 和 G 分别接于直流高压电源的正、负极, 并令 C 接地. 电源电压很高, 足以使放电针 G 附近的空气发生电离而产生大量离子. 现有导电性能不同的两种物质粉粒 a 、 b 的混合物从料斗 A 下落. 沿导板 B 到达转动着的滚筒 C , 粉粒 a 具有良好的导电性, 粉粒 b 具有良好的绝缘性.

- (1) 刮板 D 的作用是什么?
 (2) 粉粒 a 会落入哪个料槽, 粉粒 b 会落入哪个料槽? 为什么?

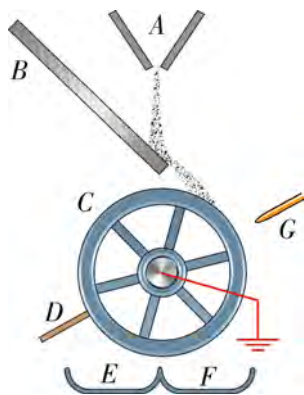


图 1-6

9. 如图 1-7 所示, 在绝缘的光滑水平面上有 A 、 B 两个点电荷, A 带正电, B 带负电, 电量都是 q , 它们之间的距离为 d . 为使两电荷在电场力作用下都处于静止状态, 必须在水平方向加一个匀强电场. 求两电荷都处于静止状态时, AB 连线的中点处的场强. (已知静电力常数为 k .)



图 1-7

10. 如图 1-8 所示, 一个质量为 m 的金属小球 B , 用长为 l 的绝缘细线固定在左边一檐角上, 使其刚好贴着正面墙壁. 在正面墙壁上画好一个量角刻度尺. 取一个与小球 B 完全相同的小球 A , A 连接绝缘细杆. 手提绝缘细杆让小球 A 接触某带电体, 然后与小球 B 接触一下, 会发现小球 B 向右偏转. 小球 A 上下移动至小球 A 、 B 在同一水平线上且平衡时, 读出小球 B 偏离竖直方向 θ 角. 请利用库仑定律、平衡力、三角关系推导每个小球的电量 q 与 θ 、 l 、 m 、 g 、 k 的关系式.

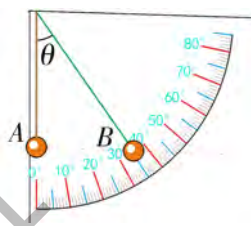
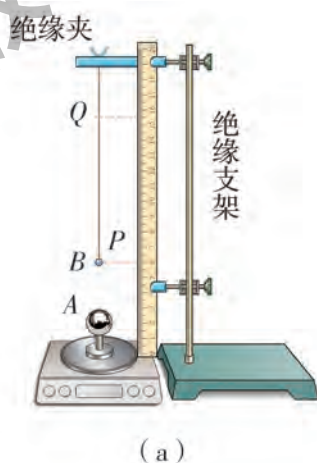


图 1-8

11. 为研究一均匀带正电球体 A 周围静电场的性质, 某同学在干燥的环境中先将球 A 放在一灵敏电子秤的绝缘托盘上, 如图 1-9 (a) 所示, 此时电子秤的示数为 N_1 ; 再将另一小球 B 用绝缘细线悬挂在一绝缘支架上, 使其位于球 A 的正上方点 P , 电子秤稳定时的示数减小为 N_2 . 缓慢拉动绝缘细线, 使小球 B 从点 P 沿竖直方向逐步上升到点 Q , 用刻度尺测出点 P 正上方不同位置到点 P 的距离 x , 并采取上述方法确定该位置对应的场强 E , 然后作出 $E-x$ 图像, 如图 1-9 (b) 所示. 已知点 M 和点 Q 到点 P 的距离分别为 $5x_0$ 和 $10x_0$. 小球 B 所带电量为 $-q$, 且 q 远小于球 A 所带的电量, 球 A 与球 B 之间的距离远大于两球的半径. 忽略空气阻力的影响, 重力加速度为 g .



(a)

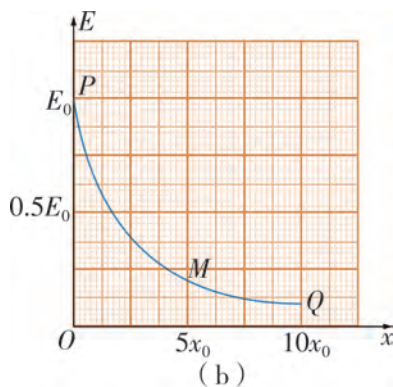


图 1-9

- (1) 求点 M 处, 由球 A 所激发的电场的场强大小.
- (2) 小球 B 位于点 M 时, 电子秤的示数应为多大?
- (3) 实验过程中, 当小球 B 位于点 Q 时, 剪掉细线, 小球 B 将由静止开始运动, 估算小球 B 落回到点 P 时动能的大小.