经全国中小学教材审定委员会 2004 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理 选修 3-1

PHYSICS

主编 束炳如 何润伟



上海科技教育出版社

亲爱的同学：



欢迎你选择学习《物理 3–1》！

我们曾经说过，从你打开物理课本起，你已经开始投身于一项激动人心的探索活动。让我们继续携手，度过这段美好的时光。

你周围世界发生的事情几乎都跟物理学有关，现代社会的许多技术进步都源于对物理规律的理解和应用。学习物理可以使你从事科学事业的愿望得以实现，甚至可以使你成为“专家”。作为现代社会的公民，我们要学会用物理学知识解决生活、生产中的许多问题。

你已经学习了《物理 1》和《物理 2》，初步领略了物理学的魅力。现在，你又跨进了《物理 3–1》的大门。这里，你将经历探索电场、电路与磁场的过程，体验物理学思想方法的威力；在科学探究和理论思维的过程中充分施展你的才智；你将比较全面地学习电磁学的有关知识，了解电磁学的研究成果及其在现代科学技术中的广泛应用，认识电磁学与社会发展以及人类文化的互动作用。

为了让你在学习《物理 3–1》的过程中获得更大的成功，请浏览以下的本书栏目介绍。

每章的开头都有一些情景，提出一些问题，让你明确本章研究的主要内容。



分析论证

在这里，你将经历分析、综合、应用数学工具进行推理，从而得出物理学规律和公式的过程，体会到高中物理理论思维的魅力。

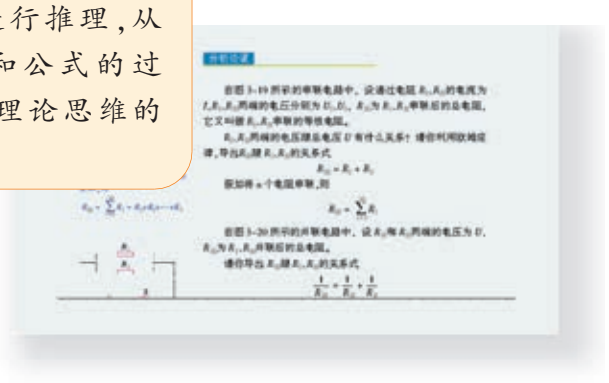




图 2–38　观察带电油滴在匀强电场中的偏移

实验探究　观察带电油滴在匀强电场中的偏移

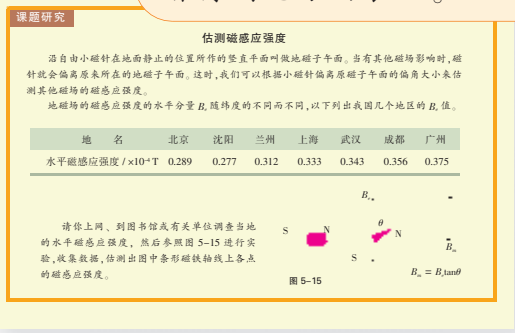
在图 2–38 所示的实验中，两块金属板分别与起电机的正负[illegible]针头与负极[illegible]油水平射

实验探究

这里将要求你提出问题，设计实验方案，动手做一些有意义的实验，进行科学探究。

课题研究

这里提供了一些课题供你选择研究，这种研究会让你的才智得到充分的展示。



课题研究

估测磁感应强度

沿自由小磁针在地面静止的位置所作的竖直平面叫做地磁子午面。当有其他磁场影响时，磁针就会偏离原来所在的地磁子午面。这时，我们可以根据小磁针偏离原磁子午面的偏角大小来估测其他磁场的磁感应强度。

地磁场的磁感应强度的水平分量 B_x 随纬度的不同而不同，以下列出我国几个地区的 B_x 值。

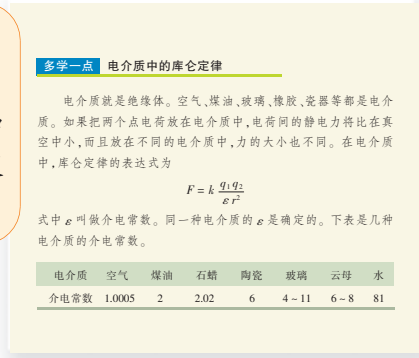
地　名	北京	沈阳	兰州	上海	武汉	成都	广州
水平磁感应强度 / ×10⁻⁴ T	0.289	0.277	0.312	0.333	0.343	0.356	0.375

请你上网、到图书馆或有关单位调查当地的水平磁感应强度，然后参照图 5–15 进行实验，收集数据，估测出图中条形磁铁轴线上各点的磁感应强度。

图 5–15

多学一点

这里有更多更深的奥秘，将进一步开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。



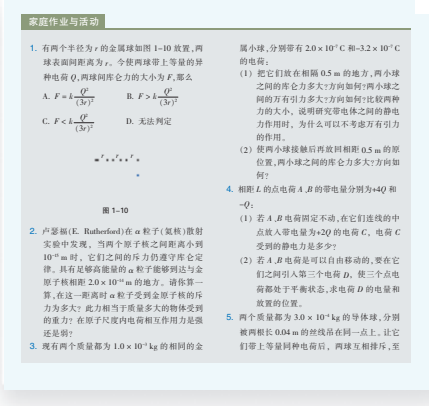
多学一点　电介质中的库仑定律

电介质就是绝缘体。空气、煤油、玻璃、橡胶、瓷器等都是电介质。如果把两个点电荷放在电介质中，电荷间的静电力将比在真空中小，而且放在不同的电介质中，力的大小也不同。在电介质中，库仑定律的表达式为

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

式中 ε 叫做介电常数。同一种电介质的 ε 是确定的。下表是几种电介质的介电常数。

电介质	空气	煤油	石蜡	陶瓷	玻璃	云母	水
介电常数	1.0005	2	2.02	6	4 ~ 11	6 ~ 8	81



家庭作业与活动

1. 有两个半径为 r 的金属球如图 1–10 放置，两球表面间距离为 r。今使两球带上等量的异种电荷 Q，两球间库仑力的大小为 F，那么

A. $F = k\frac{Q^2}{(3r)^2}$　　B. $F > k\frac{Q^2}{(3r)^2}$

C. $F < k\frac{Q^2}{(3r)^2}$　　D. 无法判定

图 1–10

2. 卢瑟福(E. Rutherford)在 α 粒子(氦核)散射实验中发现，当两个原子核之间距离小到 10^{-15} m 时，它们之间的斥力仍遵守库仑定律。具有足够高能量的 α 粒子能够到达与金原子核相距 2.0×10^{-14} m 的地方。请你算一算，在这一距离时 α 粒子受到金原子核的斥力为多大？此力相当于质量多大的物体受到的重力？在原子尺度内电荷相互作用力是强还是弱？

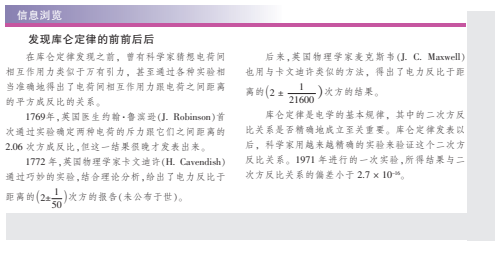
3. 现有两个质量都为 1.0×10^{-3} kg 的相同的金属小球，分别带有 2.0×10^{-7} C 和 -3.2×10^{-7} C 的电荷：
(1) 把它们放在相隔 0.5 m 的地方，两小球之间的库仑力多大？方向如何？两小球之间的万有引力多大？方向如何？比较两种力的大小，说明研究带电体之间的静电力作用时，为什么可以不考虑万有引力的作用。
(2) 使两小球接触后再放回相距 0.5 m 的原位置，两小球之间的库仑力多大？方向如何？

4. 相距 L 的点电荷 A、B 的带电量分别为 $+4Q$ 和 $-Q$：
(1) 若 A、B 电荷固定不动，在它们连线的中点放入带电量为 $+2Q$ 的电荷 C，电荷 C 受到的静电力是多少？
(2) 若 A、B 电荷是可以自由移动的，要在它们之间引入第三个电荷 D，使三个点电荷都处于平衡状态，求电荷 D 的电量和放置的位置。

5. 两个质量都为 3.0×10^{-4} kg 的导体球，分别被两根长 0.04 m 的丝线吊在同一点上。让它们带上等量同种电荷后，两球互相排斥，至

家庭作业与活动

这里为你提供了丰富多彩的学习活动，让你通过回顾进行自我评价，加深对知识的理解，提高解决有关问题的能力，体验到成功的喜悦。



信息浏览

发现库仑定律的前前后后

在库仑定律发现之前，曾有科学家猜想电荷间相互作用力类似于万有引力，甚至通过各种实验相当准确地得出了电荷间相互作用力跟电荷之间距离的平方成反比的关系。

1769 年，英国医生约翰·鲁滨逊(J. Robinson)首次通过实验确定两种电荷的斥力跟它们之间距离的 2.06 次方成反比，但这一结果很晚才发表出来。

1772 年，英国物理学家卡文迪许(H. Cavendish)通过巧妙的实验，结合理论分析，给出了电力反比于距离的$\left(2\pm\frac{1}{50}\right)$次方的报告(未公布于世)。

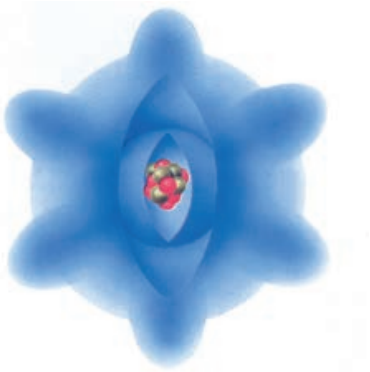
后来，英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)也用与卡文迪许类似的方法，得出了电力反比于距离的$\left(2\pm\frac{1}{21600}\right)$次方的结果。

库仑定律是电学的基本规律，其中的二次方反比关系是否精确地成立至关重要。库仑定律发表以后，科学家用越来越精确的实验来验证这个二次方反比关系。1971 年进行的一次实验，所得结果与二次方反比关系的偏差小于 2.7×10^{-16}。

信息浏览、STS 栏目

这里为你提供了各种有趣、有用的资料，包括物理学史上的经典事例、科学家小故事等，它们反映了物理学与科学、技术、社会的紧密联系。你的视野将更开阔，你会更加热爱科学。

目 录



第 1 章　电荷的相互作用　6

1.1 静电现象与电荷守恒　7

1.2 探究电荷相互作用规律　11

1.3 静电与生活　16

第 2 章　电场与示波器　23

2.1 探究电场的力的性质　24

2.2 研究电场的能的性质（一）　31

2.3 研究电场的能的性质（二）　35

2.4 电容器　电容　39

2.5 探究电子束在示波管中的运动　45

附录　熟悉示波器的面板　49

第 3 章　从电表电路到集成电路　54

3.1 学习使用多用电表　55

3.2 研究电流、电压和电阻　60

3.3 探究电阻定律　64

3.4 多用电表电路分析与设计　68

3.5 逻辑电路与集成电路　70





第4章 探究闭合电路欧姆定律 76

4.1 探究闭合电路欧姆定律 76

4.2 测量电源的电动势和内阻 82

4.3 典型案例分析 85

4.4 电路中的能量转化与守恒 89

第5章 磁场与回旋加速器 96

5.1 磁与人类文明 96

5.2 怎样描述磁场 100

5.3 探究电流周围的磁场 104

5.4 探究安培力 110

5.5 探究洛伦兹力 116

5.6 洛伦兹力与现代科技 121

总结与评价 课题研究成果报告会 131

研究课题示例 131

评价表 132

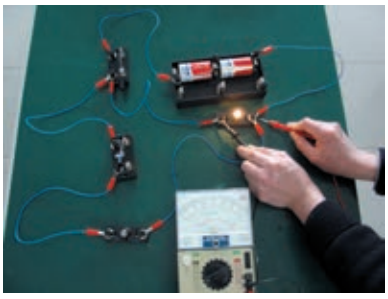






图 1–1　电闪雷鸣



富兰克林　(B. Franklin, 1706—1790)，美国科学家和政治家。1752 年,他冒着生命危险在雨中进行“风筝实验”，证明闪电与摩擦起电的电是相同的。他还创造了用“正电”和“负电”区分两种不同性质的电的方法，为定量研究电现象打下了基础。图为富兰克林正在进行“风筝实验”。

第 1 章
电荷的相互作用

闪电撕裂了天空,雷霆震撼着大地(图1–1)。在这惊心动魄的自然现象背后,蕴藏着许多物理原理,吸引了不少科学家进行探究。美国的富兰克林、法国的达利巴尔德(T. F. d'Alibard)等科学家冒着生命危险去捕捉闪电，证实了闪电与实验室中的电是相同的。

雷电是怎样形成的？物体带电是怎么回事？电荷有哪些特性？电荷间的相互作用遵从什么规律？人类应该怎样利用这些规律？这些问题正是本章要探究并做出解答的。



a 梳过干燥头发的塑料梳子能吸引轻小物体



b 用毛皮摩擦橡胶棒

图 1–2

1.1 静电现象与电荷守恒

实验表明,用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的橡胶棒都能吸引轻小物体，我们通常说它们带了电或有了**电荷**(electric charge)。物理学中规定,用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷叫做**正电荷**(positive charge);用毛皮摩擦过的橡胶棒所带的电荷叫做**负电荷**(negative charge)。自然界中只存在这两种电荷;同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引。

电荷的正负是相对的，哪一种叫做“正”,哪一种叫做“负”,都是可以的。现行的这种命名法是富兰克林首先提出的，国际上一直沿用至今。

物体起电的原因

分析论证　摩擦起电的原因

用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的橡胶棒(图 1–2)都带了电,这是什么原因呢?

原来,物体是由分子、原子组成的;原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的(图 1–3)。在两个不同物体相互摩擦的过程中，两个物体中都有一些电子脱离原子核的束缚而转移到对方。在通常情况下,两个不同材料的物体彼此向对方转移的电子数不相等。失去电子的物体就显示出带正电;得到电子的物体就显示出带负电。这就是说,摩擦起电并不是摩擦创生电荷,而是使物体中的正负电荷重新分配。

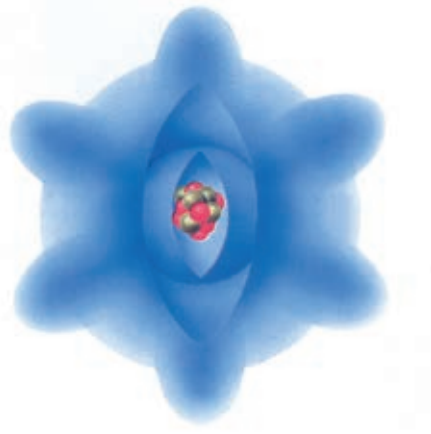


图 1–3　氟–19 原子模型

物体是否带电,可以用验电器来检验(图 1–4)。验电器的金属球通过金属杆跟可转动的金属指针相连。当带电的玻璃棒或橡胶

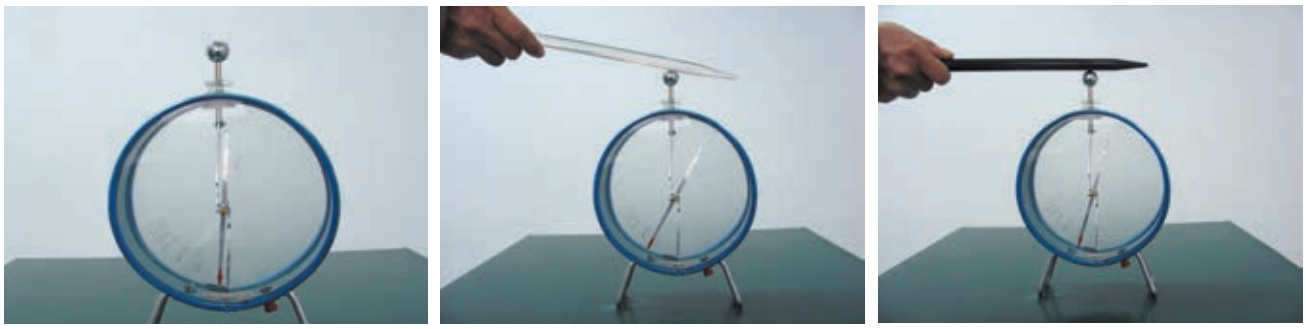


图 1–4　用验电器检验物体是否带电

棒接触金属球时，指针就会转过一定的角度。

你能用电荷间相互作用的知识，解释验电器带电后金属指针为什么偏转吗？

物体所带电荷的多少叫做**电荷量**，简称**电荷**或**电量**。在国际单位制中，电荷量的单位是库仑(coulomb)，简称库，用 C 表示。正电荷的电荷量用正值表示，负电荷的电荷量用负值表示。

实验探究　感应起电

在金属导体中，金属原子最外层的电子比较容易摆脱原子核的束缚在原子间自由运动，这种电子叫做自由电子。金属导体中存在着大量可以自由移动的自由电子。

在用验电器检验玻璃棒或橡胶棒是否带电的实验中，你是否发现，只要带电棒靠近验电器的金属球，验电器的指针就会发生偏转(图 1–5)。再用手接触一下验电器的金属球，然后移走带电棒，验电器的指针仍然保持某一偏转角度。这是怎么回事呢？

实验表明，一个带电的物体靠近一个导体时，导体的电荷分布会发生变化，显示出带电现象。物理学中把这种现象叫做**静电感应**(electrostatic induction)。利用静电感应使物体带电叫做感应起电。

在上述实验的过程中，如果带正电荷的物体靠近金属球时，导体中的自由电子就被吸引过来，球上出现多余的负电荷；验电器指针上则带有正电荷，使指针偏转。

请思考一下，当带有负电荷的物体靠近金属球时，指针上带什么电荷？为什么？

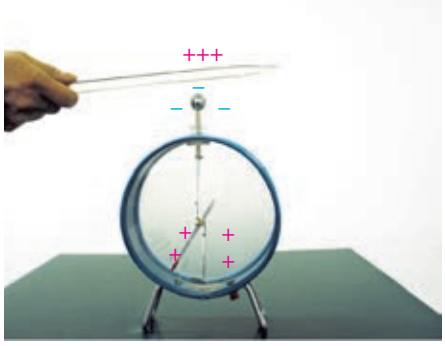


图 1–5　静电感应

电荷守恒

电荷守恒

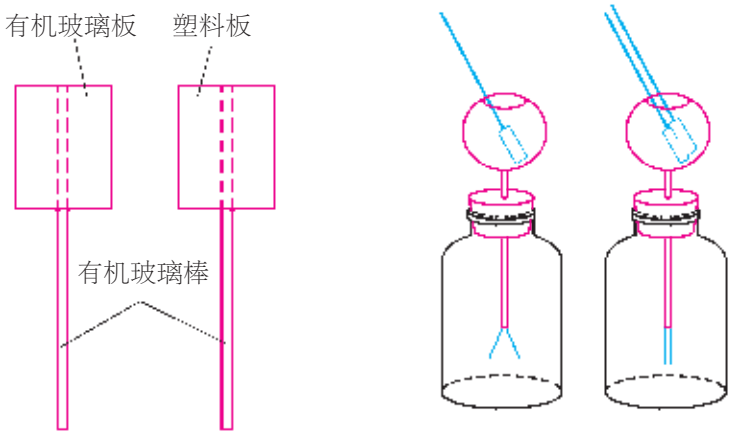
摩擦起电和感应起电的过程，都是电荷从一个物体转移到另一个物体，或从物体的一部分转移到另一部分的过程。

下面让我们做一个如图 1–6 所示的实验。

手持起电板柄，用力将两块起电板快速摩擦后分开，将其中一块板插入箔片验电器上端的空心金属球（不要接触金属球），接着抽出这块板，再将两块板同时插入空心金属球。你观察到怎样的现象？

请你解释实验中所发生的现象。

箔片验电器通常是在金属导杆下贴一条或挂两条金属箔片，其原理与指针验电器相同。



a 起电板　　b 箔片验电器

图 1–6

大量事实表明，电荷既不能被创造，也不能被消灭，只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一个部分转移到另一个部分，在转移过程中，电荷的总量不变。这个结论叫做**电荷守恒定律**（law of conservation of charge）。

近代科学研究表明，电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立，在微观过程中也成立。因此，电荷守恒定律是物理学中普遍适用的规律。

元电荷

自然界中电荷的总量是守恒的。原子核中的每个质子和核外每个电子所带的电荷量有多少？它们是不是自然界中最小的电荷单元呢？

美国实验物理学家密立根（R. A. Millikan）设计了如图 1–7 所示的实验。将两块水平放置的金属板分别与电源的正、负极相接，两板便带上异种电荷。用喷雾器喷入雾状带电油滴，当带电油滴进入两平板间时，调节两板间电压，使带电油滴受到的电力与重力平衡，由此就可以求出油滴所带的电荷量。密立根不断改进实验方法，取得了上千组测量数据，发现这些雾状油滴所带电荷量总是某一个**元电荷**（elementary charge）的整数倍。

电子的电荷量 e 跟电子的质量 m_e 之比，叫做电子的比荷。它是一个重要的物理常量。电子的质量 $m_e = 9.1\times10^{-31}$ kg，因此，电子的比荷为

$$\frac{e}{m_e} = 1.76\times10^{11}\ \mathrm{C/kg}$$

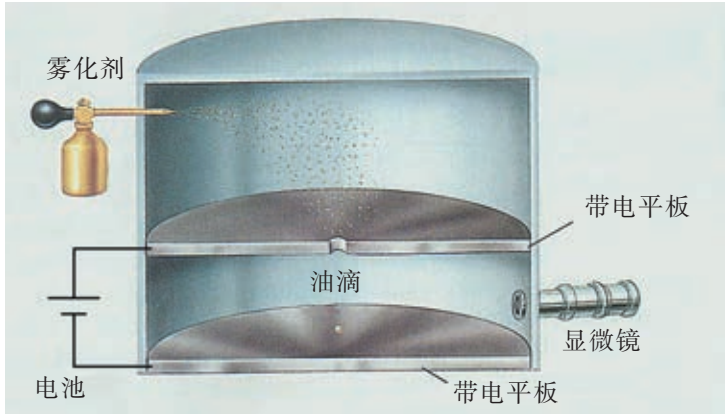


图 1–7　密立根油滴实验示意图

进一步研究表明，这个“元电荷”就是电子所带的电荷，一般用 e 表示。1986 年国际计量大会推荐的元电荷值为 $e = 1.60217733\times10^{-19}$ C，通常取 $e = 1.6\times10^{-19}$ C。

信息浏览

电荷量子化与正电子

元电荷的精确测定，在理论和实践上都有重要意义。密立根在元电荷的测量和光电效应的研究上做出了杰出的贡献，因而荣获 1923 年的诺贝尔物理学奖。

密立根的油滴实验，证明了微小粒子的带电量不是连续变化的，电荷量总是某个元电荷的整数倍，电荷量遵循量子变化规律。

1964 年，盖尔曼(M. Gell-Mann)等人提出的夸克模型认为，质子和中子等，分别由具有 $-\frac{1}{3}e$ 和 $\frac{2}{3}e$ 的**夸克**(quark)组成，这表明，电荷可以是 e 的 $\frac{1}{3}$ 或 $\frac{2}{3}$ 的倍数。这也已为实验所证实。这里电荷量仍是量子化的。

现代物理研究发现，除了通常带负电的电子外，自然界还存在着带正电的电子，这种带正电的电子被叫做**正电子**(positron)。当一个正电子和一个负电子在一定的条件下互相靠近时会发生“湮灭”，同时产生两个或三个不带电的光子。而当一个高能光子与一个原子核相碰时，又会产生一对正负电子。这就是说，在微观过程中，正负电子总是成对产生或成对“湮灭”，系统中电荷的总量不会改变。

家庭作业与活动

1. 请你列举一些日常生活中摩擦和感应两种起电方法的事例。
2. 如果用验电器检验直接用手拿着摩擦后的金属棒是否带电，那么金属棒带电吗？怎样才能使摩擦后的金属棒带电？
3. 算一算，多少个电子所带的电荷量之和是 1C。
4. A、B、C、D 四个球都带电，A 球能排斥 B 球，C 球能吸引 A 球，D 球又排斥 C 球。已知 D 球带正电，则 B 球应带何种性质的电？
5. 有 A、B、C 三个用绝缘柱支撑的相同导体球，A 带正电，电荷量为 q，B 和 C 不带电。讨论用什么办法能使：
   (1) B、C 都带等量的正电；(2) B、C 都带负电；(3) B、C带等量的异种电荷；(4) B带 $\frac{3}{8}q$ 正电。

1.2

探究电荷相互作用规律

人类很早就发现了电现象。但长期以来，由于社会生产力的发展还没有提出应用电力的需要，同时人们研究电的规律没有较精密的测量仪器，所以人们对电的认识一直处于定性的水平。直到 18 世纪中叶，人们才开始对电荷之间的相互作用规律进行定量的研究。

决定电荷相互作用的因素

实验探究　探究电荷相互作用规律

电荷间相互作用力的大小跟哪些因素有关？请你参照图 1–8 所示装置，按以下步骤进行实验：

（1）用摩擦起电的方法分别让球形导体 A 和通草球 B 带上同种电荷，并使球形导体 A 与通草球 B 处在同一水平面上。

（2）不断改变球形导体 A 的电荷量，观察悬线与竖直线偏角的变化。

（3）保持球形导体 A 和通草球 B 上的电荷量不变，改变球形导体 A 与通草球 B 之间的距离，观察悬线与竖直线偏角的变化。

请根据你观察的现象，通过分析得出结论。

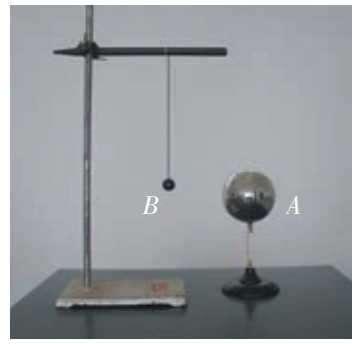


图 1–8　探究电荷相互作用规律的实验装置

电学中第一个定律——库仑定律

定量研究的困难

18 世纪中叶以前，研究电荷间的作用力存在三大困难：一是这种作用力非常小，没有足够精密的测量器具；二是那时连电量的单位都没有，当然就无法比较电荷的多少了；三是带电体上电荷的分布不清楚，难以确定相互作用的电荷之间的距离。

请思考一下，看看你有没有好的方法来解决这些困难。

库仑的探究

法国物理学家库仑经过长期研究，较好地解决了这些困难。

为测量电荷间微小的作用力，库仑发明了一种扭秤，后人将这种扭秤称为库仑扭秤。1785 年，库仑在《电力定律》一文中写道："这种扭秤能非常准确地测量物体上的电力，即使它仅带少量的电。"



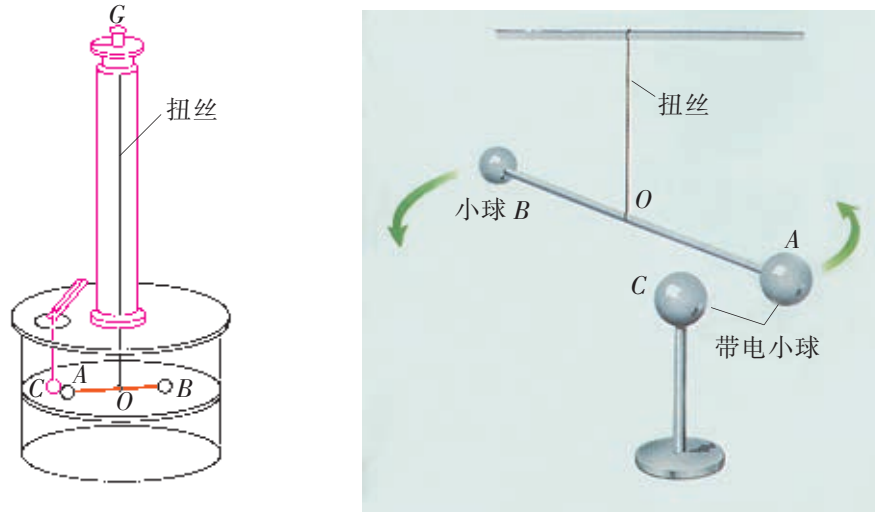
库仑 （C. Coulomb，1736—1806），法国军事工程师、物理学家、科学院院士。他从事摩擦力和电磁力的研究，设计制作库仑扭秤并发现库仑定律。

库仑扭秤的结构如图 1–9a 所示。其主要部件是一根弹性扭丝（细金属或石英丝），上端由悬头 G 夹持固定，下端悬挂一根绝缘横杆。杆的一端装有用来带电的小球 A，另一端装一平衡小球 B。另外还有一固定小球 C。当弹性扭丝处于自然状态时，调节悬头 G，使 A 与 C 接触。当 C 球带电时，A、C 之间的斥力使横杆转动。当 A、C 间斥力产生的转动作用与扭丝弹力的作用达到平衡时，横杆就静止在某一角度上（图 1–9b）。根据这一角度，便可测出带电小球间的斥力。

为了使物体的电量按实验的需要而改变，库仑根据对称性原理，用两个相同的金属球，让其中一个带上电荷 q，另一个不带电，把它们接触后分开。由于"对称"关系，这两个金属球的电量均应为 $\frac{q}{2}$。若再用第三个相同的金属球与带电荷 $\frac{q}{2}$ 的金属球接触，然后分开，这两个金属球的电荷均应为 $\frac{q}{4}$，依此类推。这样，就可以保证实验中金属球的电荷量成倍变化。

库仑根据电荷在金属球表面上均匀分布的特点，把金属球上的电荷想象成集中在球心的"点电荷"。这样就解决了测量带电体之间距离的问题。

库仑把球形带电体看做"点电荷"是一种理想化做法。当两个带电体之间的距离比它们本身的尺寸大得多时，带电体可看作是一个点，即"点电荷"。



a 库仑扭秤结构示意图　　b 库仑扭秤原理图

图 1–9

库仑当时得到的几组数据

A、C 两球距离	距离比	扭秤转角	转角比
36 个刻度	1	36°	1
18 个刻度	$\frac{1}{2}$	144°	4
8.5 个刻度	$\frac{1}{4}$	575.5°	16

注：第 3 组数据略有偏差，库仑分析是因为漏电所致。

库仑定律

1785 年，库仑在前人研究的基础上，通过实验得出结论：**真空中两个静止的点电荷之间相互作用力的大小，跟它们的电荷量 q_1 与 q_2 的乘积成正比，跟它们的距离 r 的平方成反比，作用力的方向沿着它们的连线**。这就是**库仑定律**(Coulomb's law)，它的数学表达式为

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

式中 k 是一个常量，叫做**静电力常量**(electrostatic force constant)。这种电荷间的相互作用力叫做**库仑力**或**静电力**。在国际单位制中，电荷量的单位是库[仑](C)，力的单位是牛[顿](N)，距离的单位是米(m)，则由实验可得出

$$k = 9.0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$$

库仑定律虽仅适用于计算点电荷间的作用力，但对任意带电体来说，如果知道电荷的分布情况，利用库仑定律和力的合成法则即可求出带电体之间的作用力。

库仑定律是电磁学中的一个基本定律，它的建立使电磁学进入了定量研究的阶段，使电磁学真正成为了一门科学。从 18 世纪末到 19世纪初这一段时期，由于数学的应用，有关静电学和静磁学的研究取得了很有意义的进展。

案例分析

案例　已知氢原子核的质量 $m_1 = 1.7 \times 10^{-27}$ kg，电子的质量 $m_2 = 9.1 \times 10^{-31}$ kg，核外电子与氢原子核间的距离 $r = 0.53 \times 10^{-10}$ m。试求氢原子核与核外电子间的库仑力和万有引力之比。

分析　氢原子核与核外电子间的库仑力 F_1 和万有引力 F_2 分别为

$$F_1 = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad F_2 = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

所以，代入数据便可求得 F_1 和 F_2。显然，

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{kq_1 q_2}{Gm_1 m_2}$$

上式中 $k = 9.0 \times 10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}$，$G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$，$q_1 = q_2 = 1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$。代入上式，得

$$\frac{F_1}{F_2} = 2.3 \times 10^{39}$$

可以看出，氢原子核与核外电子间的库仑力为它们间万有引力的 2.3×10^{39} 倍。因此，在研究微观带电粒子间的相互作用时，常常可以忽略万有引力。

多学一点　电介质中的库仑定律

电介质就是绝缘体。空气、煤油、玻璃、橡胶、瓷器等都是电介质。如果把两个点电荷放在电介质中，电荷间的静电力将比在真空中小，而且放在不同的电介质中，力的大小也不同。在电介质中，库仑定律的表达式为

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

式中 ε 叫做相对介电常数。同一种电介质的 ε 是确定的。下表是几种电介质的相对介电常数。

电介质	空气	煤油	石蜡	陶瓷	玻璃	云母	水
相对介电常数	1.0005	2	2	6	4 ~ 11	6 ~ 8	81

信息浏览

发现库仑定律的前前后后

在库仑定律发现之前，曾有科学家猜想电荷间相互作用力类似于万有引力，甚至通过各种实验相当准确地得出了电荷间相互作用力跟电荷之间距离的平方成反比的关系。

1769年，英国医生约翰·鲁滨逊(J. Robinson)首次通过实验确定两种电荷的斥力跟它们之间距离的2.06次方成反比，但这一结果很晚才发表出来。

1772年，英国物理学家卡文迪许(H. Cavendish)通过巧妙的实验，结合理论分析，给出了电力反比于距离的$\left(2\pm\frac{1}{50}\right)$次方的报告(未公布于世)。

后来，英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)也用与卡文迪许类似的方法，得出了电力反比于距离的$\left(2 \pm \frac{1}{21600}\right)$次方的结果。

库仑定律是电学的基本规律，其中的二次方反比关系是否精确地成立至关重要。库仑定律发表以后，科学家用越来越精确的实验来验证这个二次方反比关系。1971年进行的一次实验，所得结果与二次方反比关系的偏差小于 2.7×10^{-16}。

课题研究

验证电荷的分配规律

给你一只指针验电器、一台感应起电机(参见第 19 页旁批)和两个带有绝缘柄的大小相同的金属球,请你设计一个实验,粗略验证电荷在两个相同金属球之间等量分配的原理。

(1) 说明实验原理,写出实验步骤。

(2) 按实验步骤操作,并写出实验报告。

家庭作业与活动

1. 有两个半径为 r 的金属球如图 1–10 放置,两球表面间距离为 r。今使两球带上等量的异种电荷 Q,两球间库仑力的大小为 F,那么

A. $F = k\dfrac{Q^2}{(3r)^2}$　　B. $F > k\dfrac{Q^2}{(3r)^2}$

C. $F < k\dfrac{Q^2}{(3r)^2}$　　D. 无法判定

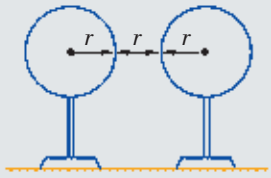


图 1–10

2. 卢瑟福(E. Rutherford)在 α 粒子(氦核)散射实验中发现,当两个原子核之间距离小到 10^{-15} m 时,它们之间的斥力仍遵守库仑定律。具有足够高能量的 α 粒子能够到达与金原子核相距 2.0×10^{-14} m 的地方。请你算一算,在这一距离时 α 粒子受到金原子核的斥力为多大?此力相当于质量多大的物体受到的重力?

3. 现有两个质量都为 1.0×10^{-3} kg 的相同的金属小球,分别带有 2.0×10^{-7} C 和 -3.2×10^{-7} C 的电荷:

(1) 把它们放在相隔 0.5 m 的地方,两小球之间的库仑力多大?方向如何?两小球之间的万有引力多大?方向如何?比较两种力的大小,说明研究带电体之间的静电力作用时,为什么可以不考虑万有引力的作用。

(2) 使两小球接触后再放回相距 0.5 m 的原位置,两小球之间的库仑力多大?方向如何?

4. 相距 L 的点电荷 A、B 的带电量分别为 $+4Q$ 和 $-Q$:

(1) 若 A、B 电荷固定不动,在它们连线的中点放入带电量为 $+2Q$ 的电荷 C,电荷 C 受到的静电力是多少?

(2) 若 A、B 电荷是可以自由移动的,要在通过它们的直线上引入第三个电荷 D,使三个点电荷都处于平衡状态,求电荷 D 的电量和放置的位置。

5. 两个质量都为 3.0×10^{-4} kg 的导体球,分别被两根长 0.04 m 的丝线吊在同一点上。让它们带上等量同种电荷后,两球互相排斥,至图 1–11 所示位置平衡。

(1) 试求两球间静电力的大小和导体球所带的电量。

(2) 如果让其中一个小球的电荷量减少一半,而另一个小球的电荷量加倍,小球还能在原位置平衡吗?

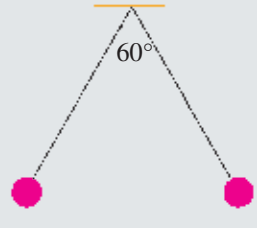
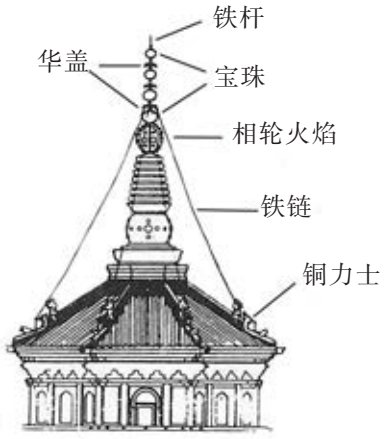
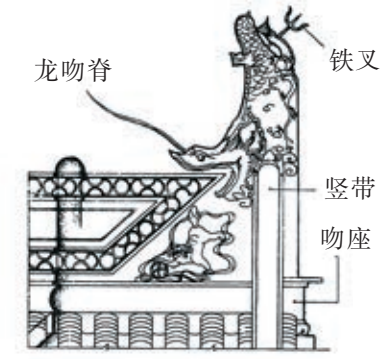


图 1–11

1.3 静电与生活



a 庆州白塔塔刹构件



b 殿脊吻兽

图 1–12　古建筑上的避雷针

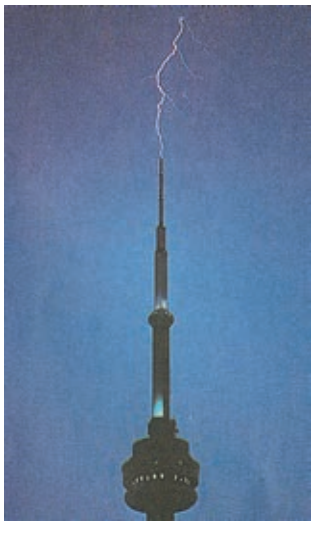


图 1–13　现代建筑上的避雷针

自然界到处都有静电。生产中的挤压、切割、搅拌和过滤，生活中的起立、行走、穿衣和脱衣等过程都会产生静电。

静电给我们的工作与生活带来了什么影响？我们应如何“趋其利，避其害”呢？

雷电与避雷

自然界产生雷电主要原因是云层的相互摩擦，导致了云层间异种电荷大量集聚。靠近地面的云层中电荷的大量集聚，会使地面因静电感应而引起电荷集聚。云层之间、云层与地面之间会形成几百万伏以上的电压。这个电压足以击穿空气（使空气电离），产生几十万安培的瞬间电流。电流生热使空气发光产生闪电，空气受热突然膨胀发出巨响形成雷声。

云层与地面之间的雷电会对我们的生命财产产生威胁，甚至带来巨大的损失。那么，如何避免雷电的危害呢？

我国大约从汉代起，人们就注意到长兵器尖端在大气中的放电现象。古代人们利用这种现象，在许多建筑物上安装了既有避雷作用，又有装饰作用的塔刹构件和殿脊吻兽（图 1–12），这就是现代避雷针的雏形。现代建筑上的避雷针如图 1–13 所示。

实验探究　避雷针为什么能避雷

用如图 1–14 所示的感应圈，可以观察“实验室中的雷电现象”，帮助我们理解避雷针能避雷的原理。将两枚放电针分别安装在感应圈的接线柱上，再将低压电源的 8 ~ 10 V 直流电接在感应圈上，闭合开关，适当调节感应圈上振动簧片的位置（有些感应圈会自动完成这一操作），就可以观察到火花放电的现象。

请比较火花放电图景与雷电时看到的闪电图景。它们有哪些

相似之处？

试用放电针放电的现象说明避雷针的原理。



图 1–14　火花放电现象

感应圈可以在两接线柱之间产生几万伏的电压。安装放电针之后，两针尖端附近的空气就会被击穿，形成放电电流。

注意！感应圈通电后，切勿用手触摸放电针。

静电与现代科技

随着科学技术的发展，人们对静电特性的认识越来越深入，静电的应用范围也越来越宽广。

用静电净化空气

图 1–15 是电子空气净化器的工作原理示意图。电子空气净化器利用风扇将空气送入机内。空气流经正负电极间时，首先经过带正电的网格，这时带负电的烟尘等微粒被吸附在其上。接着，空气又通过带负电的网格，这时带正电的烟尘等微粒被吸附在其上。最后，活性炭过滤器再将空气中的剩余尘粒过滤一遍，把洁净的空气送入室内。

静电提高喷洒农药效果

喷洒农药的飞机上安装有静电喷嘴。静电喷嘴内装有一根带正电的针，喷洒过程中农药水珠离开喷嘴时会带有大量正电荷。由于与大地相连的农作物的叶子一般都带负电，带正电的农药水珠喷洒到农作物上时，就被吸附在叶子上，不会被风吹走（图 1–16）。

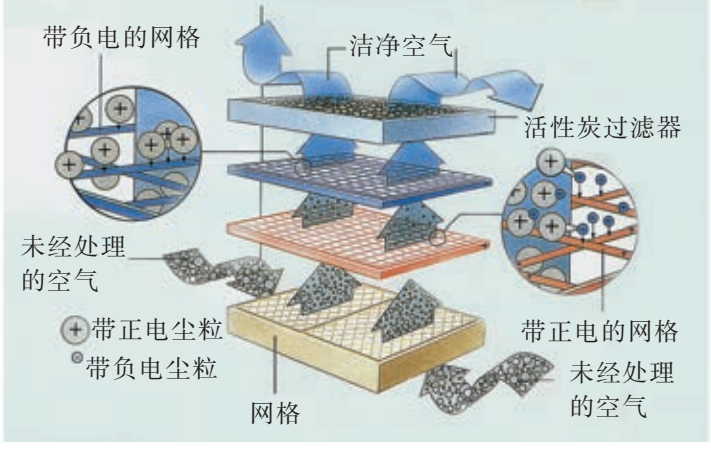


图 1–15　电子空气净化器工作原理示意图



图 1–16　利用静电喷洒农药示意图

静电复印

静电复印机的使用已经很普遍。它的基本工作原理是：激光扫描原稿上的文字或图案，经反射，聚焦在携带静电的硒鼓上。激光扫描到原稿上的空白处，硒鼓上相应部位的静电荷就被消除，留在硒鼓上的静电荷就形成了原稿上的文字或图案。墨粉被硒鼓上的静电吸引，被转移到复印纸上并被加热固定，复印纸上就出现了原稿上的文字或图案。图 1–17 用图解的方式展示了这一过程。

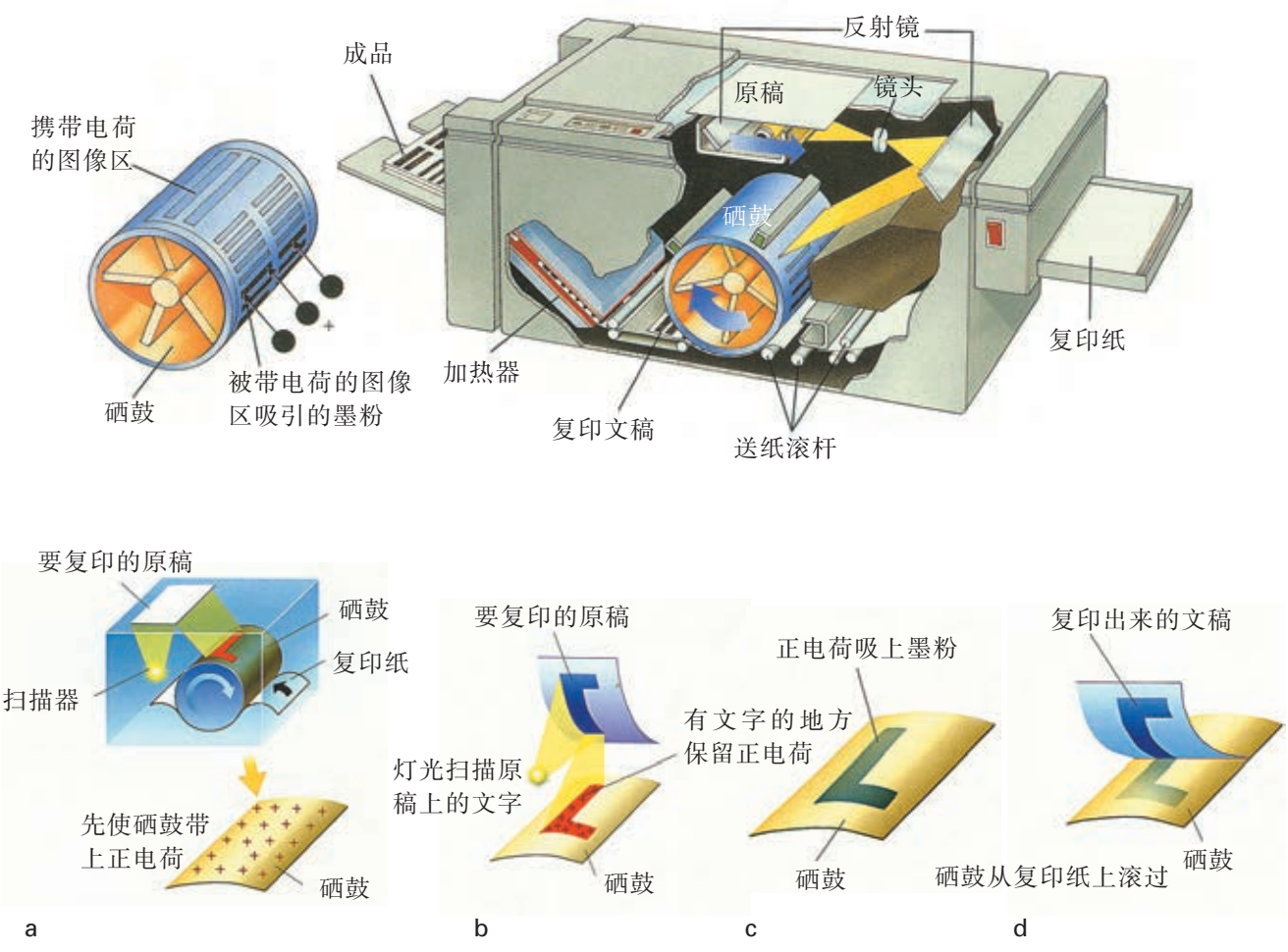


图 1–17　静电复印机结构及工作过程图解

静电植绒

实验探究　静电植绒

参照图 1–18 所示的装置准备器材，进行安装，然后进行如下模拟静电植绒的操作：

1. 用蘸上胶水的毛笔在硬纸片上写字、作画，再用夹子将此硬纸片固定在金属圆板 *A* 下面(有字画的一面朝下)。

2. 将各种颜色的细碎纸屑均匀撒在金属圆板 *B* 上，调整两块金属板之间的距离，使之为 4 ~ 5 cm。

3. 用导线将两块金属板分别接到感应起电机的两个放电球上，转动起电机，观察“静电植绒”的过程。

近年来，静电的应用已开始在海水淡化、人工降雨、低温冷冻等方面大显身手，甚至在宇宙飞船上也安装有静电加料装置。

请你在课后上网收集有关静电应用方面的资料并与同学开展交流。

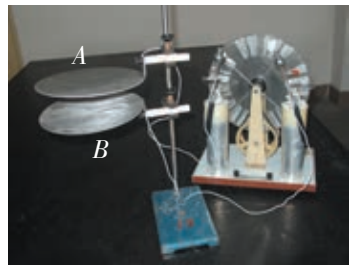


图 1–18　静电植绒实验装置

感应起电机利用静电感应，使两个莱顿瓶(参阅第 2 章信息浏览)不断集聚电荷，从而在两放电球之间形成极高的电压。把两块金属圆板分别接在两个放电球上，两块金属板就分别带上异号的电荷。

静电的危害及控制

无论是在日常生活和工农业生产中，还是在科学实验中，随时都可能发生因静电作用而引起的危害。下表列出了一些因静电作用而造成的危害。

静电力作用的不良后果	静电火花引起的危害
● 电视机的荧屏表面容易吸附灰尘，使图像的清晰度和亮度下降。 ● 混纺衣服上常出现不易拍掉的灰尘。 ● 印刷厂里，纸页之间因静电而黏合，给印刷带来不便。 ● 制药厂里，因静电吸引尘埃，使药品达不到标准纯度。	● 医院手术台上，静电火花会引起麻醉剂爆炸。 ● 煤矿里，静电火花会引起瓦斯爆炸。 ● 在航天工业里，静电放电会干扰航天器的运行，甚至会造成火箭和卫星发射的失败。 ● 在石化工业里，因静电放电引起的事故屡见不鲜。

当人们认识到静电危害的起因后，各种防止静电危害的措施便应运而生。

例如在工业生产中，改造起电强烈的工艺环节，采用起电较少的设备和抗静电材料；用导线将设备接地，把电荷导入大地；适当增加工作环境的湿度以让静电随时释放等。图 1–19 所示是用抗静电材料包装电子产品，图 1–20 所示是飞机加油时，飞机与加油车之间安装的接地装置。

空气与飞机摩擦使飞机带上正电，如果电荷量积累到一定程度就会向大地放电，在放电的过程中，会产生放电火花，引起火灾



图 1–19　用抗静电材料包装电子产品

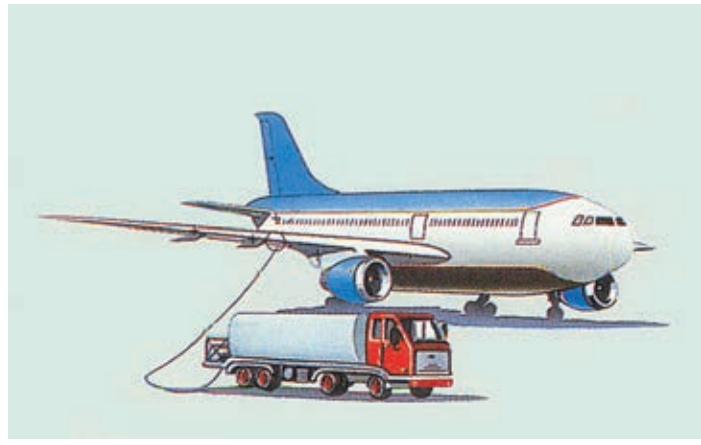


图 1–20　飞机加油

或爆炸事故。为了避免事故，飞机在加油前，往往要用接地的金属导线把油车和飞机连接起来。

信息浏览

奇怪的马特利现象

在沙特阿拉伯腹地的哈迪岩村，居住着牧羊人拉西德·马特利一家。1986 年开斋节的一天中午，他家的一间毛毡房突然失火，火被妻子和女儿及时扑灭。第二天，一间内室又突然起火。地方政府派人调查，未找到起火原因，只是建议他搬家。于是他迁到离哈迪岩村 30 km 的哈斯渥，在那里支起了两顶帐篷。不料有一天，妻子、女儿居住的帐篷又起火了，而且他放在汽车里的一件羊皮衣服也无缘无故地自燃起来。马特利家中的怪事引起了科学界的重视，人们把这种无名火叫做马特利现象。

目前科学界对此问题的猜想很多，其中得到较多人认同的是：干燥的冬天，差不多每个人的身体与地之间的电压都要上升到几千伏，在 10 万人中就会有一个人的皮肤特别干燥，因此，他身体与大地之间的电压就特别高，甚至可以达到几万伏。具有这种特征的人是十分危险的，如果放电火花遇到空气中的易燃气体，就会引发火灾。

马特利现象的原因是否与人体静电有关？你的猜想是什么呢？

家庭作业与活动

1. 观察你身边发生的静电现象，分析产生的原因。
2. 分析保鲜膜在使用过程中，为什么会常常吸附在手上。
3. 静电的应用有多种，如静电除尘、静电喷涂、静电植绒、静电复印，它们共同的物理原理是：让带电的物质微粒在_____力作用下，“奔向”并吸附到_____电极上。
4. 把带电体上产生的静电荷移走可以防止静电荷积累而造成的危害。下列措施中，采取了上述方法的是

   A. 油罐车后面装一条拖地铁链

   B. 电工钳柄上套有绝缘胶套

   C. 飞机上安装接地电缆

   D. 印染车间里保持适当的湿度
5. 请你上网或去图书馆收集关于防止雷电危害的资料，写一篇科普报告。

1.x

第 1 章家庭作业与活动

A组

1. 打开自来水龙头，慢慢调节龙头，使水流变得很细，再用摩擦过的塑料棒靠近细水流，你发现了什么？解释你所观察到的现象。
2. 用毛皮摩擦过的橡胶棒靠近用绝缘细线悬挂的轻小软木球，请按照图 1–21 所示的装置做一做。除了观察到软木球被吸引以外，你还发现了什么现象？用学过的知识解释这些现象。

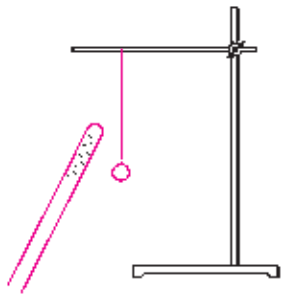


图 1–21

3. 请你尽可能多地找一些不同材料制成的物体，如塑料片、纸板、玻璃、毛线、腈纶丝、石蜡、铅笔杆等，分别让它们相互摩擦，比较这些物体得失电子的难易程度。
4. 有同学设计了一个验证库仑定律的实验：让两个软木球带电，用绝缘丝线将其中一个球悬挂起来，另一个球装在绝缘柄上，使它们处在同一水平高度上，保持某一水平距离，如图 1–22 所示。这时，只要测出悬挂球偏离竖直方向上的角度 θ，就能算出库仑力。他认为：①保持两球带电量 q_1、q_2 不变，改变它们之间的水平距离 r，②保持两球水平距离不变，改变两球的带电量 q_1、q_2，只要收集这两个实验的数据，就可以验证库仑定律。

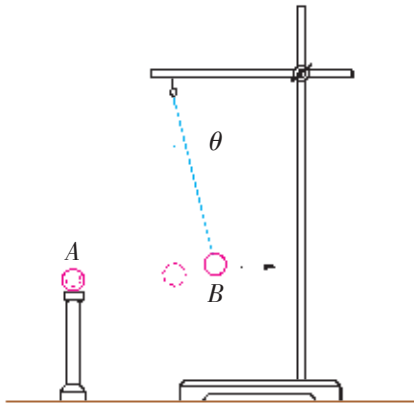


图 1–22

(1) 请你利用测出的角度 θ，根据共点力的平衡条件，推导库仑力和 θ 角之间的关系式。

(2) 怎样让两个软木球带上等量同种电荷？又怎样改变它们的电荷量？

(3) 怎样测量两球之间的水平距离？为什么要这样测量？

5. 某同学设计了一个验证电荷守恒定律的实验，实验装置如图 1–23 所示。实验步骤如下：

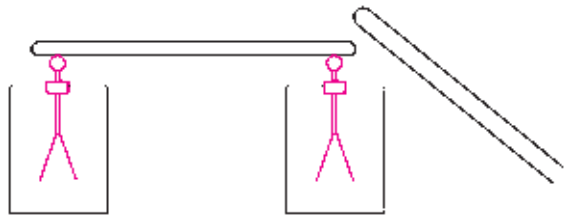


图 1–23

(1) 用一根金属杆连接两只相同的验电器，让带电的有机玻璃棒靠近金属杆的一端，两只验电器的箔片均张开，为什么？

(2) 在两只验电器的箔片均张开的情况下，先移走金属杆，再移走带电的有机玻璃棒，这时验电器的箔片是否保持张开状态？为什么？

(3) 再用金属杆连接两只验电器，将会出现什么现象？这个现象说明了什么？这个实验能验证电荷守恒定律吗？为什么？

B 组

1. 下面是几个有趣的静电实验，请你动手做一做，体验一下做实验的乐趣。

(1) 静电间歇喷泉

取一根尖嘴玻璃管(尖嘴内径 0.5～0.8 mm)，管的另一端用橡皮管与自来水龙头相连。玻璃

管尖嘴口朝上，并固定在铁支架上，如图 1–24 所示。打开水龙头，使尖嘴喷射出高 15 ~ 20 cm 的喷泉，用带电的有机玻璃棒置于喷泉上方约 30 cm 处，你会观察到断续喷射的喷泉。想一想，出现这个现象的原因是什么？

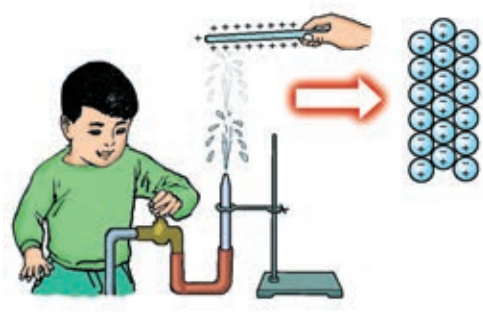


图 1–24

（2）自动蓬松的腈纶线

取一小团腈纶线，剪 40 根长为 80 cm 的线段，梳理整齐后，两端用粗铜丝扎紧，让腈纶线松松地悬于木架的两只羊眼圈上，如图 1–25a 所示。再用一枝铅笔按在线上，用力快速来回摩擦几下。移开铅笔后，你会观察到腈纶线向四周蓬松，呈橄榄状，如图 1–25b 所示。请你解释这个现象。若用沾少量水的脱脂棉在腈纶线上从左至右揩一下，再用铅笔重复摩擦，它们再也不会呈现橄榄状了，这又是什么原因？

（3）人体不仅能产生数千伏静电压，而且能承受数千伏到数万伏的静电压，下面请你尝试一

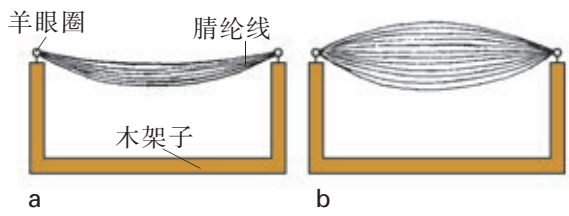


图 1–25

下人体静电实验。

① 晚上，取一根 8 W 日光灯管，用干净布将灯管上的灰揩去。左手握住灯管一端，右手捏住灯管管身并来回连续摩擦，灯管就会闪光。不信，你就试一试，想一想为什么。

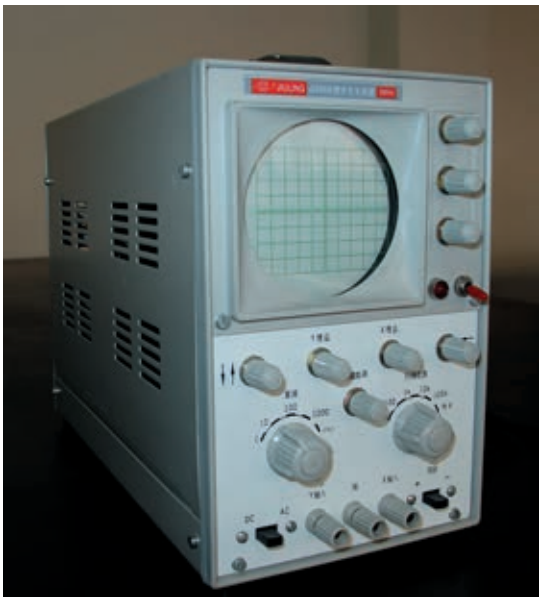
② 请你站在聚苯乙烯绝缘板上，手握 8 W 日光灯管的一个电极，让伙伴手握塑料薄膜或化纤布，反复在你身上拍打。再找另一位伙伴握住 8 W 日光灯管的中间或另一个电极，若在暗室里或晚上，你会发现日光灯管发光。请你与你的伙伴们试一试，仔细观察现象并加以解释。

2. 真空中，带电荷量分别为+Q 和–Q 的点电荷 A、B 相距 r，在距 A、B 电荷都为 r 的地方放置带电荷量为+Q 的点电荷 C。求：

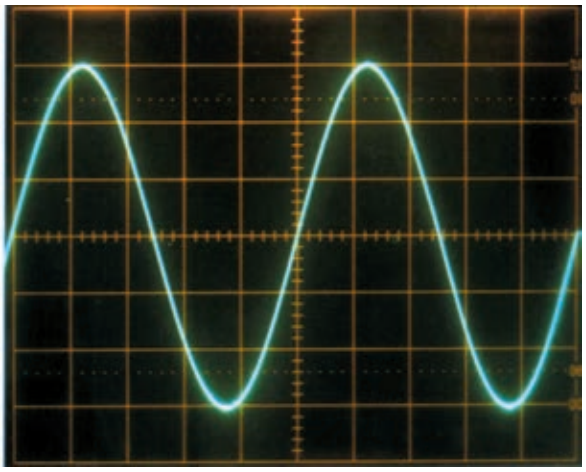
（1）点电荷 C 所受的静电力。

（2）点电荷 A 所受的静电力。

3. 把一个点电荷的电荷量 Q 分为两部分 q_1 和 q_2，使点电荷 q_1 和 q_2 相距一定的距离。问：q_1 和 q_2 满足什么关系时，它们之间的库仑斥力达到最大值？



a J2459 型示波器



b 波形

图 2–1　示波器

第 2 章
电场与示波器

示波器(oscilloscope)在电子技术中有着广泛的应用,它可以形象地显示和测量有关电学量及其变化情况。示波器的工作原理是,用电信号产生变化的电场来控制电子束的运动,使电子束打在荧光屏上不同的位置,从而显示出电信号变化的图像。那么:

电场具有什么性质?

如何研究电场?

电场对场中电荷会产生什么作用?

如何利用电场控制场中电荷的运动?

……

本章由电荷的相互作用引入电场,从电场力的性质和能的性质两方面较全面地研究电场,接着在实验基础上探究电容器的特性,最后以示波管为例,分析带电粒子在电场中的运动,并初步学习示波器的使用方法,为今后学习电磁学奠定基础。

2.1 探究电场的力的性质

库仑定律揭示了电荷间的相互作用规律，那么，电荷间的相互作用是靠什么传递的呢？

电场

在物理学中出现了一个新的概念，这是牛顿时代以来最重要的发明：场。用来描写物理现象最重要的不是带电体，也不是粒子，而是带电体之间与粒子之间的空间中的场，这需要很大的科学想像力才能理解。

——爱因斯坦

在万有引力定律发现之后，引力作用靠什么传递这一问题就一直困扰着人们。牛顿时代的人认为，引力作用和电荷相互作用可以不需要任何中介，也不需要花时间，就能够由一个物体传递到另一个物体，这就是所谓“超距作用”的观点。

19 世纪 30 年代，法拉第在大量实验的基础上，提出了“近距作用”的观点。他认为，电荷周围存在着由它产生的**电场**(electric field)，处在电场中的其他电荷受到的作用力，就是这个电场给予的。电荷间的相互作用是靠电场来传递的。在法拉第研究的基础上，麦克斯韦建立了完整的电磁场理论。现在，场的概念已经成为现代物理学中最重要的基本概念之一。

场是物质存在的一种形态。凡是有电荷的空间，周围就存在着电场，其基本性质是能够对场中的电荷有力的作用，这个力叫做**电场力**(electric field force)。

电场是由电荷产生的，我们把产生电场的电荷称为场源电荷(或称源电荷)。

本章只讨论相对于观察者静止的电荷的电场，这种电场叫做**静电场**(electrostatic field)。

怎样描述电场

定量描述电场

为了研究电场的力的性质，我们需要在电场中引入一个**试探电荷**(test charge)，然后考察试探电荷的受力情况。

试探电荷是一种理想化的物理模型。试探电荷的电荷量和尺

寸都必须充分小，以致可忽略对原来电场的影响，同时又能确切地反映它在电场中的位置。

分析论证　定量研究电场的力的性质

假设我们所研究的电场是由点电荷+Q所产生的，则定量研究电场的力的性质可分为两步进行。

1. 如图 2–2 所示，把电量为+q 的试探电荷分别放在电场中的 A、B、C 各处（设 $r_A = 3r_C$，$r_B = 2r_C$），计算电场对 +q 的电场力 F_A、F_B、F_C。

可以发现，同一试探电荷 q 在电场中不同点受到的电场力不同，其比值$\frac{F}{q}$也不同。

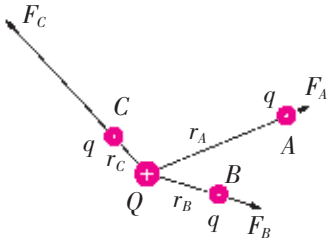


图 2–2　点电荷电场研究

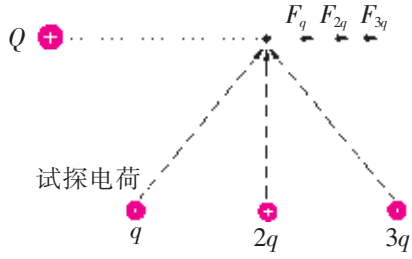


图 2–3　点电荷电场研究

2. 如图 2–3 所示，把电量分别为+q、+2q、+3q 的试探电荷依次放在电场中的同一点，计算电场对它们的电场力 F_q、F_{2q}、F_{3q}。

可以发现，对于不同的试探电荷，在电场中同一点受到的电场力虽然不同，但比值$\frac{F}{q}$却相同。

由此可见，在电场中确定的点，试探电荷受到的电场力 F 与试探电荷的电荷量 q 的比值$\frac{F}{q}$是一个不变的量，它与试探电荷的电荷量无关，仅与试探电荷在电场中的位置有关。因此，可以用这个比值反映电场的强弱，即电场的力的性质。

物理学中把放入**电场中某点的电荷所受到的电场力 F 跟它的电荷量 q 的比值叫做电场在该点的电场强度**（electric field strength），简称**场强**，用 E 表示，即

$$E = \frac{F}{q}$$

用比值定义物理量是一种常用的研究方法。用这种方法可以揭示物质的某种属性，如：物质的密度 $\rho = \frac{m}{V}$，电阻 $R = \frac{U}{I}$ 等。

电场强度是由电场本身决定的物理量，它跟电场中是否有试探电荷、试探电荷的电量以及试探电荷受到的电场力均无关。

电场强度的单位是牛[顿]/库[仑]，符号是 N/C，其物理意义是，如果 1 C 的电荷在电场中某点受到的电场力是 1 N，则该点的电场强度就是 1 N/C。下表给出了一些典型电场的电场强度的大小。

典型电场的一般强度值

电　　场	电场强度 $E/(\mathrm{N\cdot C^{-1}})$
带电硬橡胶棒的近处	1×10^{3}
在电视机显像管中	1×10^{5}
能在真空中产生火花	3×10^{6}
氢原子的电子轨道上	5×10^{11}

电场强度是矢量。物理学中规定，电场中某点的场强方向跟正电荷在该点所受到的电场力的方向相同。显然，负电荷在电场中某点所受到的电场力的方向跟该点的场强方向相反。

如果已知电场中某一点的电场强度为 E，就可以求出放在该点的电荷 q 受到的电场力，即

$$F = qE$$

根据库仑定律和电场强度的定义式，很容易得到点电荷电场强度的公式

$$E = k\frac{Q}{r^2}$$

式中 r 是场点离开场源电荷 Q 的距离。

讨论与思考

（1）公式 $E=\dfrac{F}{q}$ 和 $E=k\dfrac{Q}{r^2}$ 中的 q 与 Q 分别表示什么意义？两个公式的适用条件有何不同？

（2）如何从点电荷电场强度公式 $E=k\dfrac{Q}{r^2}$ 去理解库仑定律？

（3）根据公式 $E=k\dfrac{Q}{r^2}$ 可知，场点离场源电荷 Q 越近，该场点处的场强越大，当 $r\to0$ 时，$E\to\infty$，显然这是不可能的，那么该如何理解这个问题呢？

形象描述电场

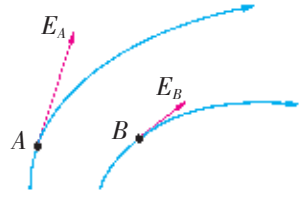


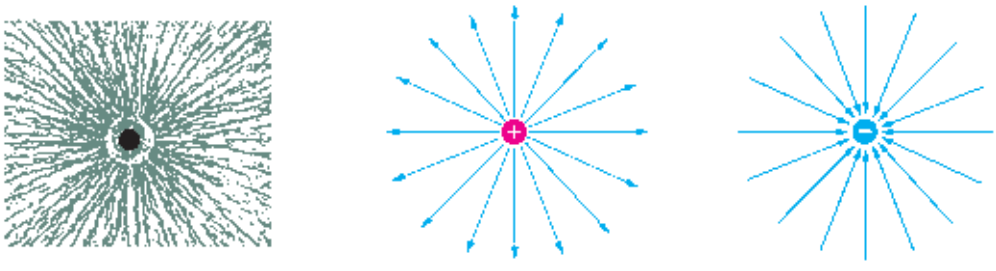
图 2–4　电场线与电场强度

在初中物理中，我们用磁感线来形象地描述磁场。在研究电场时，我们也可以用电场线来形象地描述电场。**电场线**(electric field lines)就是在电场中画出的一些有方向的曲线，在这些曲线上，每一点的切线方向都表示该点的电场强度方向(图 2–4)。应该注意，电场线不是电场中实际存在的线，而是形象地描述电场的假想的线。

电场线的疏密程度可以表示空间各点场强的大小。在同一幅电场线的图中，电场线密的地方，场强大；电场线稀疏的地方，场强小。

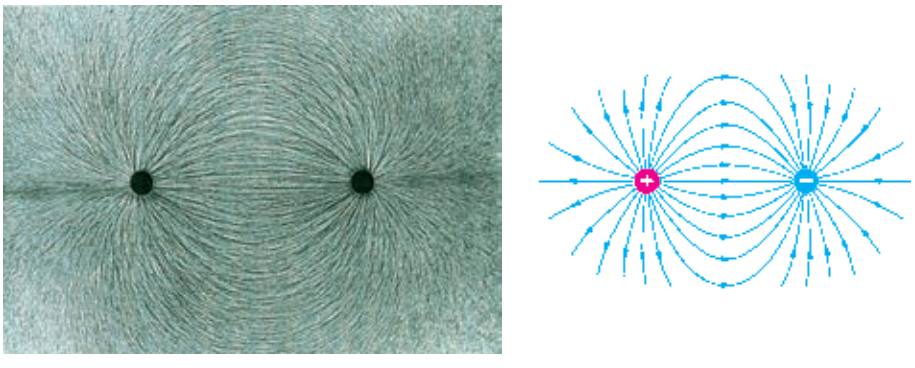
把奎宁的针状结晶或头发屑悬浮在蓖麻油里，加上电场，针状奎宁结晶或头发屑就按照场强的方向排列起来，形象地显示出电场线的大致分布情况(图 2–5a、图 2–6a 和图 2–7a)。

图 2–8 显示的是两块靠近的、分别带有等量异号电荷的平行金属板的电场线分布。除边缘附近外，两板之间电场的电场线是



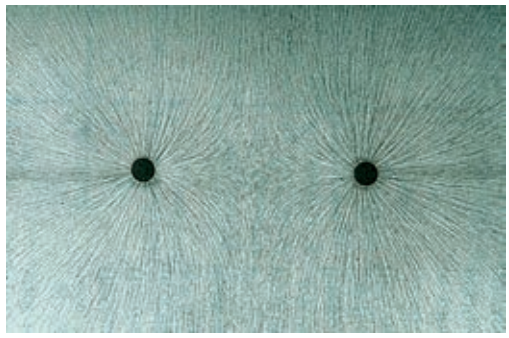
a 奎宁结晶或头发屑在点电荷电场中的分布情况　　b 正电荷的电场线　　c 负电荷的电场线

图 2–5　点电荷的电场线分布情况：电场线从正电荷(或从无限远)出发到无限远(或到负电荷)

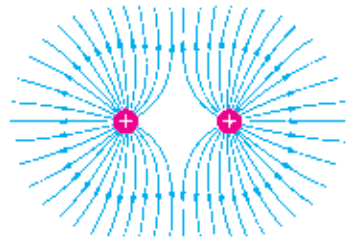


a 奎宁结晶或头发屑在等量异号点电荷的电场中的分布情况　　b 等量异号电荷电场线分布情况

图 2–6



a 奎宁结晶或头发屑在等量同号点电荷的电场中的分布情况



b 等量同号电荷电场线分布情况

图 2–7

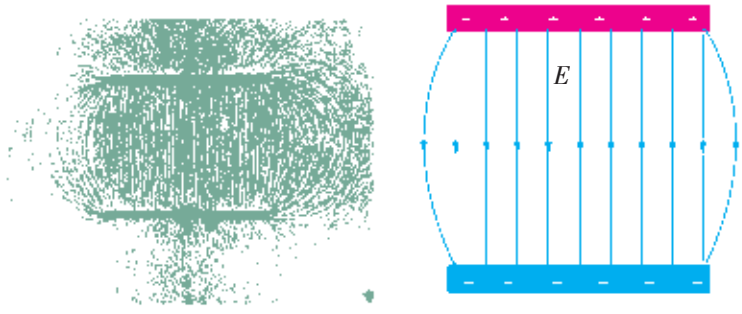


图 2–8　匀强电场

距离相等的平行直线。这表明，该区域中场强的大小和方向都相同。

物理学中，**把场强的大小和方向都相同的电场叫做匀强电场**（uniform electric field）。同一电荷在匀强电场中各处受到的电场力相同。

请归纳一下电场线有哪些特点？想一想，电场中是否存在两条相交的电场线？

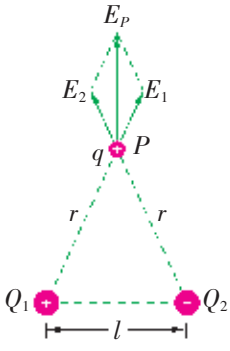


图 2–9

一个带电体或带电板（例如示波管偏转电极），我们可以看成是由若干点电荷组成的。因此，它产生的电场实际上就是若干点电荷产生的电场的叠加。

电场的叠加原理

分析论证

我们知道，每个电荷都会在它的周围空间产生电场，那么当许多电荷同时存在时，空间各处的场强应该怎样计算呢？

我们先研究两个点电荷的电场。如图 2–9 所示，在真空中有两个相距为 l 的点电荷 Q_1、Q_2（设均为正电荷，且 $Q_1 = Q_2 = Q$）。空间某处 P 离开两点电荷的距离均为 r，用 E_1、E_2 分别表示点电荷 Q_1、Q_2 单独存在时在 P 点产生的电场强度。根据放置在 P 点的正

电荷 q 所受电场力可以知道，场强的合成跟力的合成一样，所以 P 点的合场强 E_P 应该由 E_1、E_2 用平行四边形定则得到。

一般情况下，许多点电荷在某点的合场强，等于各点电荷的电场在该点场强的矢量和，可以表示为 $E_{合} = E_1 + E_2 + \cdots + E_n$，这叫做电场的**叠加原理**。

有人说，空间某处周围的正电荷越多，该处的电场强度一定越大；有人说，在一个正电荷周围再放一个负电荷，空间各处的电场强度一定变小。这两种说法对不对，为什么？

多学一点　匀强电场中金属导体的电荷分布

我们知道，导体中有许多自由电荷，当在匀强电场中放入一块导体板时，在电场力的作用下，自由电荷会发生移动，使导体的两侧呈现出等量异号的电荷（感应电荷），如图 2–10a 所示。感应电荷也会产生一个电场 E'（称为附加电场），其方向跟原来的电场 E 相反，它将阻碍着导体中自由电荷的移动。因此，导体内部存在着两个电场。随着电荷的移动，感应电荷不断增多，感应电荷产生的附加电场也不断增强（图 2–10b）。最后达到稳定状态时，E' 和 E 的大小相等，导体内部合场强为零（图 2–10c）。电荷就不再在导体内和表面移动，我们称这时的导体处于**静电平衡**（electrostatic equilibrium）状态。

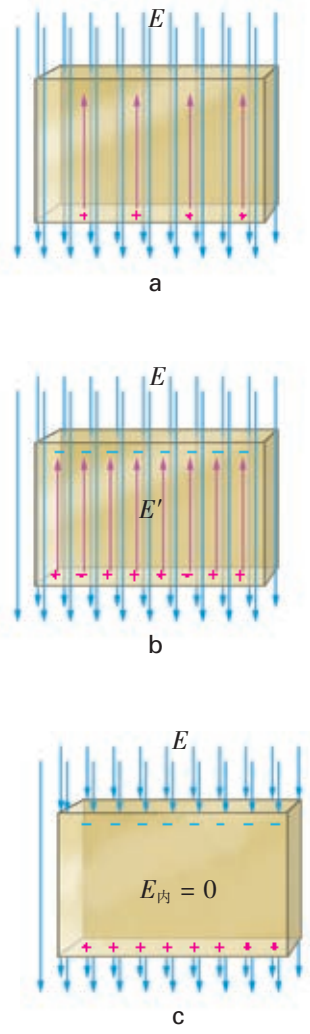


图 2–10　匀强电场中的金属导体

所以，在静电平衡时，导体内部的电场强度一定为零；在导体表面附近，电场线一定垂直于导体表面；并且，电荷只分布在导体的外表面。

上述从匀强电场中分析得出的静电平衡现象及其规律，也适用于任意静电场中的导体。

请思考：处于静电平衡时，导体内部是否会有电荷？导体表面附近的电场线为什么一定垂直于导体表面？

信息浏览

场

现代物理学的研究表明，引力作用和电荷相互作用是通过“场”来传递的。场是物质存在的另一种形态。常见的场有电场、磁场、引力场（在地球附近称为重力场）、强相互作用场和弱相互作用场等。物体间的电磁相互作用通过电磁场以 3×10^8 m/s 的速度传递。

场与实物一样，具有质量、能量和动量等，也能够对处于其中的物体产生作用力、压强等。电磁场的密度很小，大约为 10^{-23} kg/m^3。光是电磁场，太阳光每秒照射在每平方米地球表面上的能量约为 1.35×10^3 J，对地球上物体产生的光压约为 10^{-6} Pa。

家庭作业与活动

1. 下列关于电场线的说法中正确的是
   A. 电场线越密的地方，同一试探电荷受到的电场力就越大
   B. 电场线就是点电荷在电场中的运动轨迹
   C. 电场线弯曲的地方是非匀强电场，电场线为直线的地方是匀强电场
   D. 不存在两条平行的电场线
2. 地球的表面通常存在一竖直方向的电场，一带负电的微粒在此电场中受到一个向上的力，电场强度的方向是竖直向上，还是竖直向下？
3. 氢原子中，电子和质子的平均距离是 5.3×10^{-11} m。电子受到的电场力多大？方向如何？质子在这个距离处产生的电场的场强多大？方向如何？
4. 两个固定的异号电荷 q_1 和 q_2，电荷量给定且大小不等。用 E_1 和 E_2 分别表示两个点电荷产生的电场强度的大小，则在通过两个点电荷的直线上 $E_1 = E_2$ 的点
   A. 有三个，其中两处合场强为零
   B. 有三个，其中一处合场强为零
   C. 只有两个，其中一处合场强为零
   D. 只有一个，该处合场强不为零
5. 如图 2–11 所示，在真空中有两个点电荷 $Q_1 = +3.0 \times 10^{-8}$ C 和 $Q_2 = -3.0 \times 10^{-8}$ C，它们相距 0.1 m，A 点与两个点电荷的距离均为 0.1 m。试求 A 点的场强。
6. 图 2–9 中 P 点的电场强度多大（用题中已知量的字母表示）？

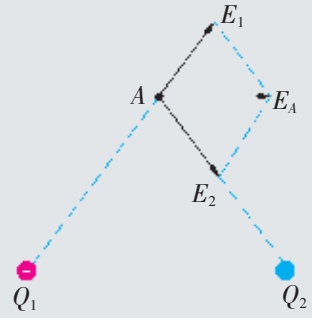


图 2–11

课题研究

研究带电空心金属球的电荷分布

在实验室完成下述实验（图 2–12）：将一只开口的空心金属球放在验电器 A 的导杆上，用与丝绸摩擦过的玻璃棒靠近空心金属球，观察验电器 A 指针的情况。用绝缘小金属球与空心金属球内壁接触，再与验电器 B 的金属球接触（即要把电荷转移到验电器 B 上）。反复操作几次，观察验电器 B 指针的情况。你发现了什么？请画出带电空心金属球的电场线分布情况。

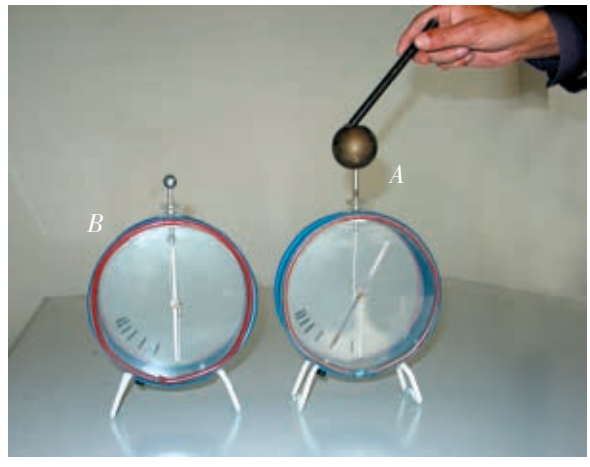


图 2–12　研究带电空心金属球的电荷分布

2.2 研究电场的能的性质(一)

上一节,我们运用比值的方法,引入了描述电场的一个重要的物理量——电场强度,初步认识了电场的力的性质。现在,我们进一步从电荷在电场中移动时电场力做功,引起电荷能量变化的关系上,研究电场的能的性质。

研究电场力做功的特点

分析论证

如图 2–13 所示,在场强为 E 的匀强电场中,有一个电量为 q 的正电荷,它在电场力作用下从 A 点沿着电场线移到 B 点($AB=L$),电场力对它做功

$$W_{AB} = FL = qEL$$

如果使它在电场力作用下从 A 点沿路径 ACB 移到 B 点,电场力做功为

$$\begin{aligned} W_{ACB} &= W_{AC} + W_{CB} \\ &= qE\cdot\overline{AC}\cos\alpha + 0 \\ &= qEL \end{aligned}$$

因此

$$W_{AB} = W_{ACB}$$

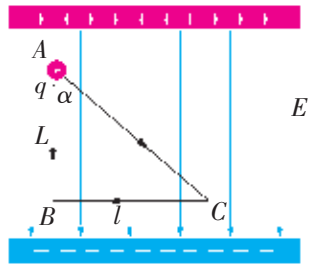


图 2–13　探究电场力对带电粒子做功的特点

也就是说,电场力做功跟移动电荷的路径无关。

上面从匀强电场中得到的结论具有普遍意义,可以证明,在任意**静电场中,电场力对电荷所做的功跟移动电荷的路径无关**。

研究电荷在电场中的功能关系

分析论证

我们知道,重力做功与路径无关;物体在重力场中具有重力

用重力场与电场类比,可以帮助我们用熟悉的重力场去认识尚未了解的有相似规律的电场。

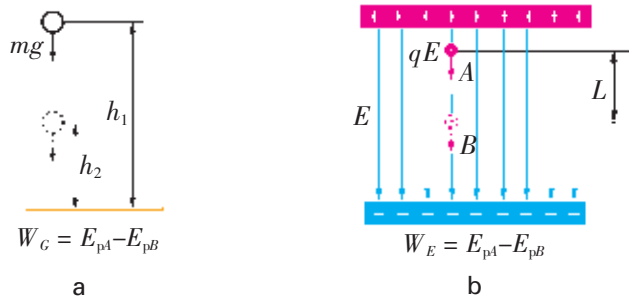


图 2–14　重力做功和电场力做功

势能;重力做功的结果引起物体重力势能的变化。如今电场力做功也与路径无关,可以推知,电荷在电场中也一定具有势能。电场力做功,必然会引起电荷势能的变化。

我们把电荷在电场中具有的势能叫做**电势能**(electric potential energy),用 E_p 来表示。如图 2–14 所示,设电量为 q 的点电荷在 A、B 两点的电势能分别为 E_{pA} 和 E_{pB}。根据电场力做功与重力做功的类比,可以得出电荷从 A 移到 B 的过程中,电场力做功与电势能变化的关系,即

$$W_E = E_{pA} - E_{pB}$$

这个关系式也适用于任何电场。

所以,在电场中移动电荷,电场力做正功时,电荷的电势能一定减少;电场力做负功时,电荷的电势能一定增加。

电势能跟重力势能一样,也是一个相对量。电势能的大小跟零电势能位置的选择有关。如果规定 B 点的电势能为零,则 $E_{pA} = W_E$,这就是说,电荷在电场中某处的电势能,等于在电场力作用下把它从该处移动到零电势能位置时电场力所做的功。

在物理学中,通常把离开场源电荷无限远处规定为零电势能位置,或者把地球表面规定为零电势能位置。

电势差

分析论证

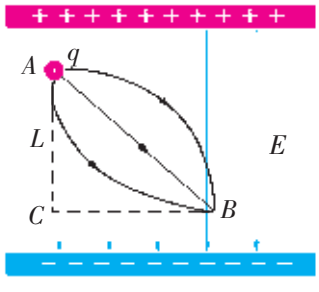


图 2–15　研究匀强电场中的电势差

根据电场力做功的特点,在匀强电场中,电荷 q 由 A 点移动到 B 点(图 2–15),无论沿怎样的路径,电场力所做的功都是

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

由此可得　$\dfrac{W_{AB}}{q}=\dfrac{E_{pA}-E_{pB}}{q}=EL$

可见在匀强电场中，电场力对电荷做的功 W_{AB} 与电荷 q 的比值 $\dfrac{W_{AB}}{q}$，只跟电场中 A、B 两点的位置和电场强度有关，它反映了电场的能的性质。物理学中，把 $\dfrac{W_{AB}}{q}$ 叫做电场中 A、B 两点间的**电势差**(electric potential difference)。

上面的结论虽然是从匀强电场中得出的，但它对任意电场都是适用的。

因此，一般情况下(图 2–16)，如果电荷 q 在电场中由 A 点移动到 B 点，电场力做的功为 W_{AB}，则 A、B 两点间的电势差 U_{AB} 为

$$U_{AB}=\frac{W_{AB}}{q}$$

或

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

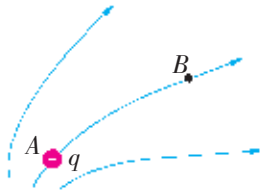


图 2–16　研究电势差

电场力所做的功可以是正功也可以是负功。两点间的电势差可以是正值，也可以是负值。

电势差也叫**电压**。在国际单位制中，电势差的单位是伏特(volt)，简称伏，符号是 V。如果 1 C 的正电荷在电场中由一点移动到另一点，电场力所做的功为 1 J，这两点间的电势差就是 1 V，即

$$1\ \mathrm{V}=1\ \mathrm{J/C}$$

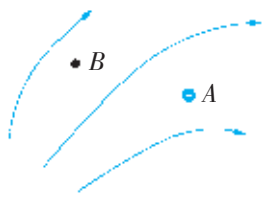


图 2–17　非匀强电场中各点间的电势差

案例分析

案例　在图 2–17 所示的非匀强电场中，如果已知带电量 $q=-1\times10^{-5}$ C 的点电荷由 A 点移动到 B 点，电场力所做的功 $W_{AB}=8\times10^{-3}$ J，则电荷的电势能如何变化？A、B 两点的电势差 U_{AB} 等于多少？

分析　在任意电场中，移动电荷时电场力做功跟电荷电势能的变化、两点间的电势差之间始终有关系式

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

因此可以直接利用该式求解。

解答　由题意知，电荷从 A 移到 B 时电场力做正功($W_{AB}>0$)，因此电荷的电势能减少。电势能的减少量为

$$E_{pA}-E_{pB}=W_{AB}=8\times10^{-3}\ \mathrm{J}$$

由于移动的是负电荷($q<0$)，因此 A、B 两点间的电势差为

$$U_{AB}=\frac{W_{AB}}{q}=\frac{8\times10^{-3}}{-1\times10^{-5}}\ \mathrm{V}=-800\ \mathrm{V}$$

在研究微观粒子时，常用**电子伏特**（简称**电子伏**，符号是 eV）作为能量的单位。如果两点间的电压为 1 V，若电场力把一个电子由一点移动到另一点，电场力所做的功等于 1 eV。已知电子的电荷量 $e = 1.6\times10^{-19}$ C，则

$$1\ \mathrm{eV} = 1.6\times10^{-19}\ \mathrm{J}$$

家庭作业与活动

1. 下列说法中正确的是

   A. 无论是正电荷还是负电荷，从电场中某点移到无穷远处时，电场力做的正功越多，电荷在该点的电势能就越大

   B. 无论是正电荷还是负电荷，从电场中某点移到无穷远处时，电场力做的正功越少，电荷在该点的电势能越大

   C. 无论是正电荷还是负电荷，从无穷远处移到电场中某点时，克服电场力做功越多，电荷在该点的电势能越大

   D. 无论是正电荷还是负电荷，从无穷远处移到电场中某点时，电场力做功越多，电荷在该点的电势能越大

2. 在某电场中，把带电量 $q = -5\times10^{-9}$ C 的点电荷由 A 点移动到 B 点，电场力所做的功为 1×10^{-7} J。A、B 两点间的电势差 U_{AB} 是多大？B、A 两点间的电势差 U_{BA} 是多大？

3. 电荷的电势能的变化，其减少量总是等于电场力对电荷所做的正功。在正电荷Q的电场中（图 2–18），把正电荷 q 从 A 点移到 B 点，电场力的方向与电荷移动的方向相同，电场力对电荷 q 做什么功？电势能怎样变化？在正电荷 Q 的电场中，负电荷 q 在 A、B 间移动时电势能如何变化？你能得出什么结论？

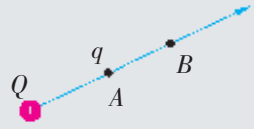


图 2–18

4. 如图 2–19 所示，在场强为 E 的匀强电场中有相距为 L 的 A、B 两点，连线 AB 与电场线的夹角为 θ，将一电荷量为 q 的正电荷从 A 点移到 B 点，若沿直线 AB 移动该电荷，电场力做的功 W_1 = _____；若沿路径 ACB 移动该电荷，电场力做的功 W_2 = _____；若沿曲线 ADB 移动该电荷，电场力做功 W_3 = _____。由此可知电荷在电场中移动时，电场力做功的特点是_____。

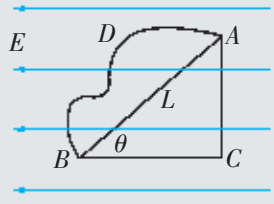


图 2–19

2.3 研究电场的能的性质(二)

电势

分析论证

我们从电场力做功与电势能变化的关系,可以推知同一电荷在电场中不同位置上的电势能不同,不同电荷在电场中同一位置上的电势能也不同。进一步的研究指出,在一个确定的电场中,不同电荷(q_1、q_2、q_3、…、q_n)在场中同一位置的电势能(E_{p1}、E_{p2}、E_{p3}、…、E_{pn})与其电荷量之比是一定的,即

$$\frac{E_{p1}}{q_1}=\frac{E_{p2}}{q_2}=\frac{E_{p3}}{q_3}=\cdots=\frac{E_{pn}}{q_n}$$

这个比值仅由电场所决定,而跟放在该处的电荷无关,可见,这个比值可以客观地反映电场的能的特性。在物理学上,**把电荷在电场中某一点的电势能与其电荷量的比值,叫做这一点的电势**(electric potential)。如果用 φ_M 表示电场中任意一点 M 的电势,用 E_{pM} 表示电荷在该处的电势能,则

$$\varphi_M=\frac{E_{pM}}{q}$$

在国际单位制中,电势的单位也是伏[特]。

电势也具有相对的意义,电场中某点电势的大小跟零电势位置(称为零电势点)的选择有关。在理论研究中,常取离场源电荷无限远处的电势为零;在实际应用中,常取大地的电势为零。

如果我们选定了零电势点,电场中 A、B 两点的电势分别为 φ_A、φ_B,则 A、B 两点间的电势差就可表示为

$$U_{AB}=\varphi_A-\varphi_B$$

在 A、B 两点间移动电荷时电场力做的功为

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

电荷在电场中的这个特性同样可跟重力场类比:同一物体在重力场中不同位置上的重力势能不同,不同物体在重力场中同一位置上的重力势能也不同。

令 $\varphi_B=0$、$q=1\ \mathrm{C}$,可以看出,电场中某点 A 的电势 φ_A,数值上等于把单位正电荷从该点移到零电势点时电场力所做的功。

对点电荷的电场,我们通常选无穷远处为零电势参考点。

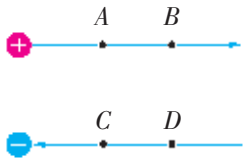


图 2–20

讨论与思考

请根据电场力做功与电势差的关系，比较图 2–20 所示点电荷电场中 A、B 两点与 C、D 两点电势的高低。由此你能否找出比较点电荷场中各点电势高低的简单方法？

电势是标量，没有方向，但有大小及正负之分。理论上可以证明，在任何电场中，某处电场线的指向就是该处电势降落最快的方向。

案例分析

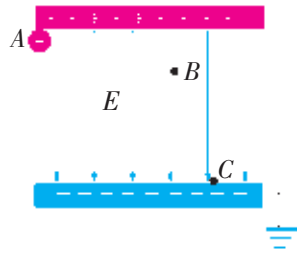


图 2–21　探究电场中各点的电势

案例　在图 2–21 所示的匀强电场中，带电量 $q = 4 \times 10^{-9}$ C 的点电荷由极板上 A 点移至 B 点时，电场力做的功为 8×10^{-3} J；由 B 点移至 C 点，电场力做的功为 1×10^{-2} J。问 A、B、C 各点的电势分别为多大？

分析　图中的下极板接地，表示取下极板电势为零，C 点在下极板上，$\varphi_C = 0$。根据电场力做功与电势差的关系，求出 U_{BC}、U_{AB} 就可确定 φ_B、φ_A 的大小。

解答　由题知，$q = 4 \times 10^{-9}$ C，$W_{AB} = 8 \times 10^{-3}$ J，$W_{BC} = 1 \times 10^{-2}$ J，C 点为接地的负极板上的一点，故 $\varphi_C = 0$。

对于 B、C 两点，$U_{BC} = \dfrac{W_{BC}}{q} = \dfrac{1 \times 10^{-2}}{4 \times 10^{-9}}$ V $= 2.5 \times 10^{6}$ V

由 $U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C$ 得 B 点电势

$$\varphi_B = U_{BC} + \varphi_C = 2.5 \times 10^{6}\ \text{V} + 0 = 2.5 \times 10^{6}\ \text{V}$$

对于 A、B 两点，$U_{AB} = \dfrac{W_{AB}}{q} = \dfrac{8 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-9}}$ V $= 2.0 \times 10^{6}$ V

由 $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ 得 A 点电势

$$\varphi_A = U_{AB} + \varphi_B = 2.0 \times 10^{6}\ \text{V} + 2.5 \times 10^{6}\ \text{V} = 4.5 \times 10^{6}\ \text{V}$$

电场的等势面

在地理学中，为了形象地表示地形的高低，常采用在地图上画等高线的方法。在电场中，我们也可以采用类似的方法表示电

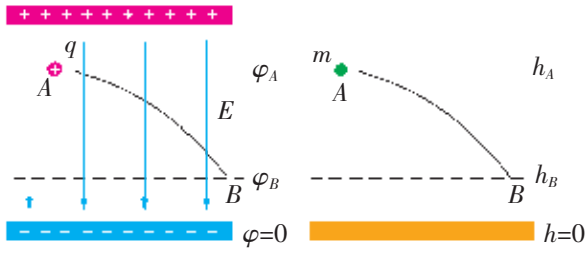


图 2–22　等势面与等高线

势的高低分布(图 2–22)。物理学中把电场中电势相等的点构成的线(面)叫做等势线(面)(equipotential line/surface)。同一等势线(面)上任意两点间的电势差为零,所以,在同一等势线(面)上移动电荷时,电场力不做功。

在静电平衡时,因为导体表面的电荷不再移动,导体各处的电势一定相等,导体表面是一个等势面,导体是一个等势体。因此,静电平衡时在导体表面移动电荷时电场力不做功。可见,在导体表面附近,电场线垂直于导体表面。

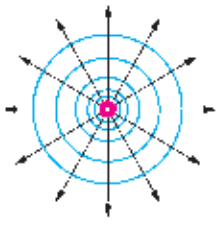
请你证明:电场线一定跟等势面垂直,并且由电势高的等势面指向电势低的等势面。

多学一点　介绍几种等势面

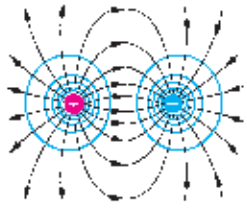
在定量研究电场时,由于测量电势比测量电场强度容易,所以常常先测绘出电场的等势面的形状和分布,再根据电场线跟等势面垂直的关系,绘出电场线的分布,就可以知道电场的情况。例如,在设计示波管的电子枪、静电加速器的加速管时,为了聚焦电子束,对阴极和阳极的形状、大小等都有一定技术要求。设计人员往往根据实验测绘出的等势面的形状和分布来进行设计和调整。

常见的几种电场的等势面如图 2–23 所示。

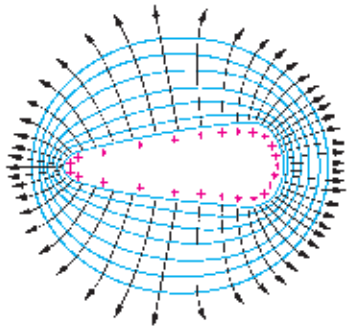
请思考一下,图中几种电场的等势面是什么样的?



a 点电荷电场的等势面



b 等量异号点电荷电场的等势面



c 带电导体周围的等势面,电场线垂直于导体表面

图 2–23　各种等势面

电势差与电场强度的关系

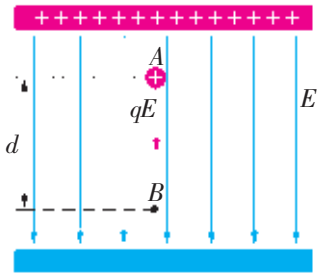


图 2–24

电场强度和电势差都是描述电场性质的物理量，两者必然有内在的联系。

为了研究电势差与电场强度之间的关系，我们以匀强电场为例进行分析。图 2–24 表示某一匀强电场的电场线分布情况。设 A、B 两点间的距离为 d，电势差为 U，场强为 E。把正电荷 q 由 A 点移动到 B 点，电场力所做的功 $W = Fd = qEd$，而 $W = qU$，可见

$$U = Ed$$

这表明，在匀强电场中，沿场强方向的两点间的电势差等于场强与这两点间距离的乘积。上式可变换为

$$E = \frac{U}{d}$$

这表明，在匀强电场中，电场强度在数值上等于沿场强方向每单位距离上的电势差。因此，电场强度的另一个单位是 V/m。

请证明：电场强度的两个单位 N/C 和 V/m 是等价的。

家庭作业与活动

1. 在图 2–25 所示的匀强电场中，如果 A 板接地，M、N 两点中，哪一点的电势高？电势是正值还是负值？如果 B 板接地，哪一点的电势高？电势是正值还是负值？取大地的电势为零。

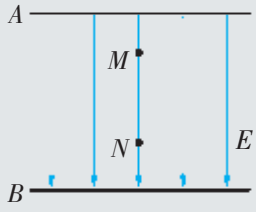


图 2–25

2. 如图 2–26 所示，M、N 为电场中两个等势面，GH 直线是其中的一条电场线，则下列说法中正确的是



图 2–26

A. $E_{pG} < E_{pH}$

B. 正电荷置于 G 点时电势能大于置于 H 点时的电势能

C. $\varphi_G < \varphi_H$

D. 负电荷由 H 点移动到 G 点时电场力做正功

3. 电场中 A、B 两点的电势 $\varphi_A = 900\ \text{V}$，$\varphi_B = -300\ \text{V}$。把电荷 $q = -1.5 \times 10^{-8}\ \text{C}$ 由 A 点移到 B 点，电场力做了多少功？电势能是增加还是减少？增加或减少了多少？

4. 已知处于电场强度大于 $3 \times 10^6\ \text{V/m}$ 的电场中的空气将被击穿而发生放电现象。现在有一片带电的乌云距离地面 300 m，发生闪电时乌云与地面间的电势差至少有多大？

5. 如图 2–27 所示，匀强电场的场强 E 为 100 V/m，A、B 两点的连线长为 0.1 m，A、B 连线与电场线的夹角 θ 为 60°，则 A、B 两点间的电势差为多少？

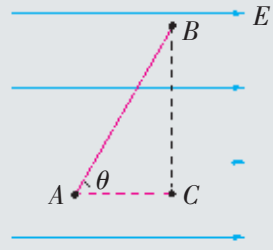


图 2–27

2.4 电容器　电容

电容器

在示波管中，如果给偏转电极两极加上一定的电势差，两极板上就有电荷积累。因此，偏转电极的两极板实际上相当于一个储存电荷和电能的装置。物理学中，把能储存电荷和电能的装置叫做**电容器**(capacitor)。电容器的图形符号如图 2–28 所示。电容器的种类很多，如图 2–29 所示。它是电气设备中的一种重要元件，在生产和生活中有着广泛应用。两个正对的平行金属板中间夹上一层绝缘物质(例如空气、聚苯乙烯、云母等)，就组成一个最简单的电容器，叫做平行板电容器。这两个金属板叫做电容器的极板。因此，示波管中的偏转电极的两极板可近似看作一个平行板电容器。实际上，任何两个彼此绝缘又相隔很近的导体，都可以看成是一个电容器。

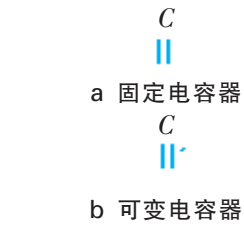


图 2–28　电容器的图形符号



图 2–29　各种电容器

实验探究　观察电容器的放电过程

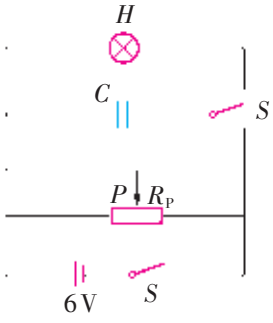


图 2–30　电容器充电、放电电路图

参照图 2–30 接好电路，图中 *C* 为电容器，*H* 为手电筒小灯泡。调节滑动变阻器，用单刀双掷开关将一定电压加在电容器上，两个极板就分别带上等量的异种电荷。这个过程叫做**充电**(charging)。在电容器充电的过程中，回路中有短暂的充电电流通过。充电后，断开电容器与电源的连接，两个极板上都储存有电荷，两极板间有电场存在。

然后，用单刀双掷开关让小灯泡与电容器构成闭合回路，两极板上的电荷就中和，电容器最终就不再带电。这个过程叫做**放电**(discharging)。放电电流会使小灯泡闪亮一下。

再调节滑动变阻器改变加在电容器上的电压，重新完成上述充电和放电过程。注意观察电容器放电过程中小灯泡的发光情况。

结合上述实验，思考和了解照相机闪光灯的工作原理。

比较两次实验中小灯泡闪光的亮度和持续时间的差异，你能够得出什么结论？

固定滑动变阻器阻值，换用不同的电容器进行实验。比较不同的电容器在充电电压相同时，放电过程中小灯泡闪光的亮度和持续时间的差异。

电容

电容器到底储存了多少电荷？在以上实验中，充电电压越高，电容器放电时小灯泡发光越亮、持续时间越长，说明电容器储存的电荷越多。精确的实验表明，对于同一个电容器，每个极板所带的绝对电荷量 Q 跟电容器两极板间的电势差 U 成正比，也就是说它们的比值 $\frac{Q}{U}$ 是一个确定的值，用 C 表示这个比值。对于一个电容器来说，有

$$\frac{Q_1}{U_1}=\frac{Q_2}{U_2}=\cdots=\frac{Q_n}{U_n}=C$$

或

$$\frac{Q}{U}=C$$

实验还表明，对于不同的电容器，即使两极板间的电势差相同，电容器储存的电荷也不一定相同。因此，对于不同的电容器，这个比值 $\frac{Q}{U}$ 一般是不同的。可见，这个比值反映了电容器储存电荷的本领。

物理学中把电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极板间的电势差 U 的比值，叫做电容器的**电容**(capacitance)。电容器的电容在数值上等于两极板间的电势差为 1V 时，电容器上所储存的电荷量。

在国际单位制中，电容的单位是**法拉**(farad)，简称**法**，符号是 F。如果一个电容器带 1 C 的电荷量时，两极板间的电势差是 1 V，这个电容器的电容就是 1 F。法这个单位太大，实际中常用较小的单位：微法(μF)和皮法(pF)。它们的换算关系为

$$1\ \mathrm{F}=10^{6}\ \mu\mathrm{F}=10^{12}\ \mathrm{pF}$$

探究影响平行板电容器电容的因素

实验探究

前面指出，电容是反映电容器储电特性的物理量。那么，电容器的电容大小究竟由什么因素决定呢？下面，我们对最简单的平

行板电容器进行研究。

参照图 2–31 所示的实验装置和实验操作进行探究。用摩擦过的玻璃棒或橡胶棒使与静电计相连的极板带电。在保持极板上的电荷量 Q 不变的条件下，分别改变两极板的正对面积 S、两极板间的距离 d、两极板间的电介质，用静电计测量已充电的平行板电容器两极板间的电势差 U。通过不同情况下 U 的大小来探究电容 C 的大小跟相对介电常数 ε、正对面积 S 及两极板间距离 d 的关系。

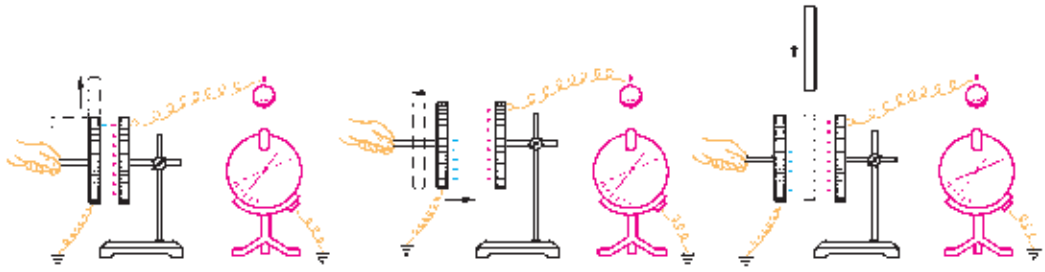
静电计是测量电势差的仪器。其指针的偏转角度越大，表示被测的两个导体间的电势差越大。

理论研究指出，平行板电容器的两极间为真空时，其电容跟极板的正对面积成正比，跟两极板的间距成反比，即

$$C = \frac{S}{4\pi kd}$$

式中 k 为静电力常量。

电容器极板间充满电介质时电容增大的倍数，叫做电介质的相对介电常数，用 ε 来表示。



a 保持 Q 和 d 不变，研究 C 与 S 的关系
——发现 S 越小，U 越大，说明 C 越小

b 保持 Q 和 S 不变，研究 C 与 d 的关系
——发现 d 越大，U 越大，说明 C 越小

c 保持 Q、S 和 d 都不变，插入介质板，研究 C 与电介质的关系
——发现插入介质后，U 减小，说明 C 变大

图 2–31　探究影响平行板电容器电容的因素

当两极间充满相对介电常数为 ε 的介质时，电容量增大到 ε 倍，可以表示为

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi kd}$$

常用电容器

从构造来看，常用的电容器可以分为固定电容器和可变电容器。

固定电容器的电容是固定不变的，常用的有聚苯乙烯电容器和电解电容器。聚苯乙烯电容器是在两层锡箔或铝箔中间夹以聚

苯乙烯薄膜，卷成圆柱体制成的（图 2–32）。改变锡箔或铝箔的面积，就可以制成不同电容的聚苯乙烯电容器。

电解电容器（图 2–33）是用铝箔作为一个极板，用铝箔上很薄的一层氧化膜作为电介质，用浸渍过电解液的纸作为另一个极板制成的。由于氧化膜很薄，电解电容器的电容就较大。电解电容器的极性是固定的，使用时不能接错。

可变电容器由两组铝片组成（图 2–34），它的电容是可以改变的。固定的一组铝片叫做定片，可以转动的一组铝片叫做动片。转动动片，就可以使两组铝片的正对面积发生变化，电容就随着改变。

当加在电容器两极板上的电压超过某一限度时，电容器两极板间的电介质将被击穿，成为导体，两极板上的电荷就会中和，电容器就损坏了。这个极限电压叫做击穿电压。因此，电容器工作时的电压应低于击穿电压。电容器上一般都标明其电容和额定电压的数值。额定电压是电容器正常工作时所能承受的电压，它比击穿电压要低一些。



图 2–32　聚苯乙烯电容器内部结构示意图

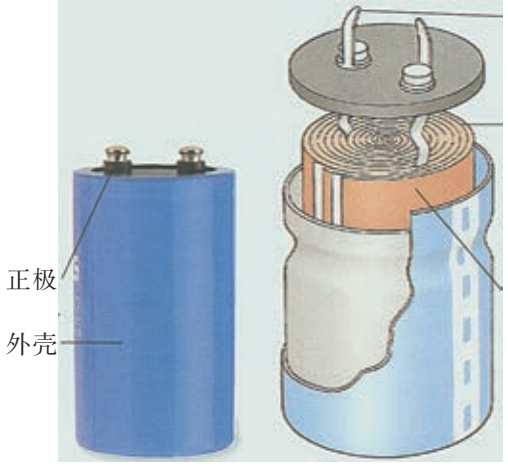


图 2–33　电解电容器

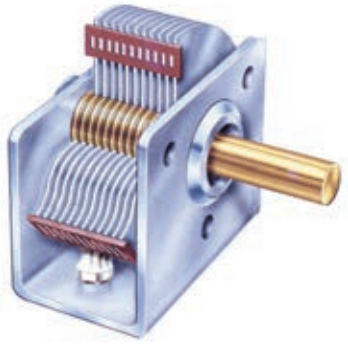


图 2–34　可变电容器

信息浏览

莱顿瓶

上一章我们使用过感应起电机。感应起电机上有两个内外表面都贴有金属箔的瓶子，这种瓶子叫做莱顿瓶。莱顿瓶是用来储存电荷的，实际上就是电容器。

莱顿瓶是由德国物理学家克莱斯特（E. G. Kleist）和荷兰莱顿大学的物理学家穆欣布罗克（P. Musschenbrock）于 1745 年、1746 年几乎同时发明的。

有一次，克莱斯特用传导的方法给装有钉子的玻璃瓶充电。当他的一只手拿着玻璃瓶，另一只手接触铁钉时，他感到肩膀和手臂受到了一下猛击。

穆欣布罗克在做电学实验时，看到好不容易使带电体带上的电很快在空气中消失，便想找出一种保存电的办法。有一次，他用丝线吊起一支枪管来接收从摩擦起电机玻璃球传来的电。他在枪管的一端

吊一根黄铜线，铜线的下端放在一只盛有水的玻璃瓶中。穆欣布罗克让助手一只手拿着玻璃瓶，同时自己使劲转动起电机。助手不慎将另一只手碰到枪管上，感到一阵强烈的电击，大喊起来。穆欣布罗克与助手互换位置，自己一手拿瓶，另一手去碰枪管，也遭到电击。

克莱斯特和穆欣布罗克的实验表明，把带电体放在玻璃瓶中可以将电保存起来。后来人们把这个蓄电的瓶子叫做“莱顿瓶”(图 2–35)。但是，当时克莱斯特并不清楚装有钉子的玻璃瓶为什么能够保存电荷；穆欣布罗克也不知道电荷是保存在瓶子上还是保存在瓶内的水中。莱顿瓶几经改进后，瓶内外表面都贴上金属箔，瓶盖上插一根金属杆，杆上端装一金属球，下端用金属链子与瓶内表面接触。莱顿瓶放电时产生的电火花可以点燃火药、氢气等。莱顿瓶的出现为进一步研究电现象提供了有力的手段。

其实，莱顿瓶就是一个同轴柱形电容器。按照克莱斯特和穆欣布罗克的实验，握瓶的手是圆柱形电容器的正极板，水和铁钉(或铜线)是负极板，电介质是玻璃。瓶中盛水并不能够改变其电容的大小，只是起到让瓶盖上插的金属杆与瓶内表面金属箔连接的作用。改进后的莱顿瓶内外表面都贴上金属箔，两金属箔分别构成两个极板，电介质是玻璃。



图 2–35　莱顿瓶

家庭作业与活动

1. 对电容 $C = \frac{Q}{U}$，下列说法中正确的是

   A. 一个电容器充的电荷量越多，电容就越大

   B. 对于固定的电容器，它所充电荷量跟它两极板间所加电压的比值保持不变

   C. 可变电容器充的电荷量跟加在两极板间的电压成正比

   D. 由 $C = \frac{Q}{U}$ 知，如果一个电容器没有电压，就没有充电的电荷量，也就没有电容

2. 一个电容器的电容是 1.5×10^{-2} μF，把它的两极接在 90 V 的电源上，电容器每个极板所带的电荷量是多少？

3. 有一个电容器，如果使它带的电荷量增加 5×10^{-8} C，两极板间的电势差就增大 30 V。这个电容器的电容多大？

4. 连接在电池两极的平行板电容器，当两极板间距离减小时

   A. 电容器的电容 C 增大

   B. 电容器的带电量 Q 增大

   C. 电容器两板间的电压增大

   D. 电容器两板间的场强 E 增大

5. 两块平行金属板带等量异号电荷，要使两板间电压加倍，两板间场强减半，可采用的办法有

   A. 两板电量加倍，间距变为原来的 4 倍

   B. 两板电量加倍，间距变为原来的 2 倍

   C. 两板电量减半，间距变为原来的 4 倍

   D. 两板电量减半，间距变为原来的 2 倍

6. 请收集各种电容器，观察它们的外形，并了解规格和用途。

2.5

探究电子束在示波管中的运动

示波管是示波器的核心部件，它由电子枪、偏转电极和荧光屏等组成，管内抽成真空。

在示波管工作过程中，通电灯丝发射的电子在电子枪阴极和阳极间受电场力的作用被加速，形成电子束，进入偏转电极 YY'、XX'（图2–36）。电子束在 YY'、XX'中受到电场力的作用，发生偏转，打到荧光屏上形成亮斑。亮斑的偏转情况跟电子束在 YY'、XX'两板间电场中受到的力有关。

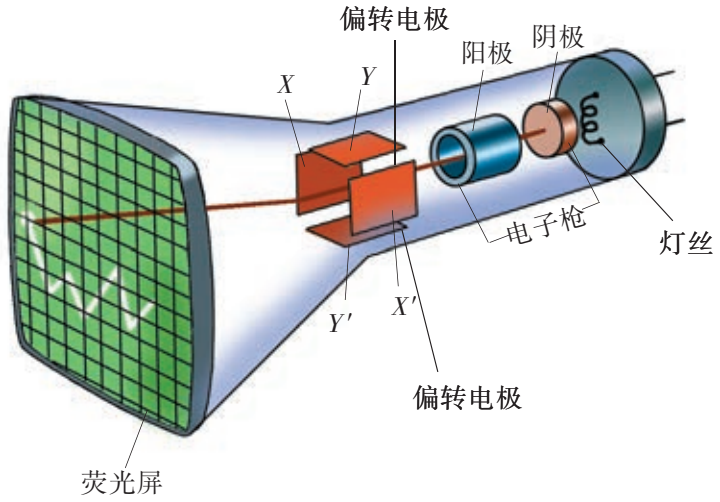


图 2–36　示波管示意图

探究电子束在偏转电极中的偏移

示波管偏转电极 YY'实际上是两块靠近的、大小相等、互相正对的平行金属板。

由于偏转电极的两块导体板靠得很近，可以认为，除了两板边缘外，电荷在板面中部均匀分布，电场线垂直于偏转板表面且均匀分布。

偏转电极 YY'两极间的电场是匀强电场，电子在两极间受到一个大小和方向都不变的电场力（图 2–37）。电子束进入偏转电极后是怎样运动的呢？下面用图 2–38 所示的模拟实验进行探究。

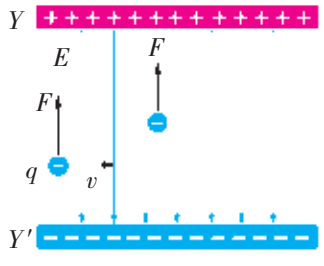


图 2–37

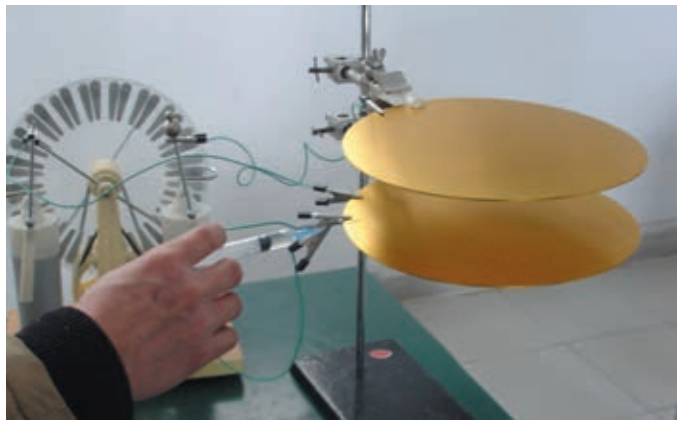


图 2–38　观察带电油滴在匀强电场中的偏移

实验探究　观察带电油滴在匀强电场中的偏移

在图 2–38 所示的实验中，两块金属板分别与起电机的正负极连接。在注射器中注入缝纫机油，用导线把注射器针头与负极金属板连接起来。摇动起电机后，推动注射器活塞，将机油水平射入两金属板之间的匀强电场，观察带电油滴的运动情况。

根据上述实验，描出图 2–37 中电子运动轨迹的大致图形。请思考：电子束在匀强电场中的运动跟力学中学过的什么运动相似？

电子束在示波管中的运动规律

分析论证

设电子枪阴极与阳极之间的电压为 U，偏转电极 XX' 不加电压，偏转电极 YY' 的电压为 U'，则电子运动轨迹如图 2–39 所示。

下面分别研究电子在电子枪中、在偏转电极 YY' 中和离开偏转电极后的运动情况。

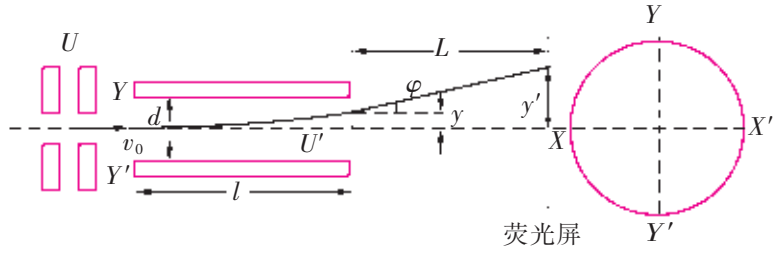


图 2–39　示波管工作原理图

1. 电子在电子枪中的运动。

为简化起见,我们假定电子枪阴极与阳极之间的电场可看成匀强电场,通电金属丝释放出的电子的速度为零,则电子从阳极小孔平行于极板方向射出的速度 v_0 可以由动能定理计算。因为 $W = qU$, $E_k = \frac{mv_0^2}{2}$,由 $W = E_k - 0$ 得

$$v_0 = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

2. 电子在偏转电极中的运动。

电子以速度 v_0 进入偏转电极 YY' 之间的匀强电场后,如果偏转板的长度为 l,两板距离为 d,则电子在平行于极板方向上做匀速直线运动,速度为 v_0;电子在垂直于极板方向上做初速度为零的匀加速运动,加速度为 $a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} = \frac{qU'}{md}$。电子经过时间 $t = \frac{l}{v_0}$ 离开偏转电极 YY',在垂直于极板方向上偏移 y,垂直于极板方向上的分速度为 v_y,离开偏转电场时的偏转角为 φ,即

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{qU'}{md} \left(\frac{l}{v_0}\right)^2 = \frac{l^2U'}{4dU}$$

$$v_y = at = \frac{qU'}{md} \cdot \frac{l}{\sqrt{\frac{2qU}{m}}} = \frac{lU'}{d}\sqrt{\frac{q}{2mU}}$$

$$\tan\varphi = \frac{v_y}{v_0} = \frac{lU'}{2dU}$$

3. 电子离开偏转电极后的运动。

电子离开偏转电极YY'后不再受电场力,做匀速直线运动。如果偏转电极YY'与荧光屏的距离为 L,则电子打在荧光屏上的亮斑将在垂直于极板方向上发生偏移 y'。

请自己推导出 $y' = \frac{lU'\left(L + \frac{1}{2}l\right)}{2dU} = \frac{lU'(2L + l)}{4dU}$

即 $y' = kU'$

请思考讨论:

1. 如果在电极YY'之间加一个不变的电压(Y 的电势比 Y'高),电子将打在荧光屏的什么位置?

2. 如果在XX'之间不加电压,只在 YY'之间加电压 $U'=U'_{max}\sin\omega t$,在荧光屏上会看到怎样的图形?请画出此图形。

STS

范德格拉夫静电加速器

范德格拉夫静电加速器（Van de Graaff generator and accelerator）主要用于加速带电粒子，其基本原理如图 2–40 所示。高压容器中充有绝缘气体，电荷源实际上是一个有一定电压的电源，它通过导体与一排指向电荷传输带的金属针（电荷喷射针）相连。金属针引起周围气体电离，产生正负离子。如果金属针排斥正离子，正离子就附着在电荷传送带上。这些正电荷传到上部的一排金属针（电荷收集器）处时，由于电荷要分布在导体的表面，正电荷就不断积累在金属球壳外表面。因此，球壳与地面的电势差就越来越大，产生静电高压。最后，将离子引入加速管，离子就像位置很高的小球在重力场中下降那样，获得很大的动能。加速管的加速原理与示波管电子枪的原理一样，经过加速管多级加速的高速带电离子可供原子核反应实验之用。

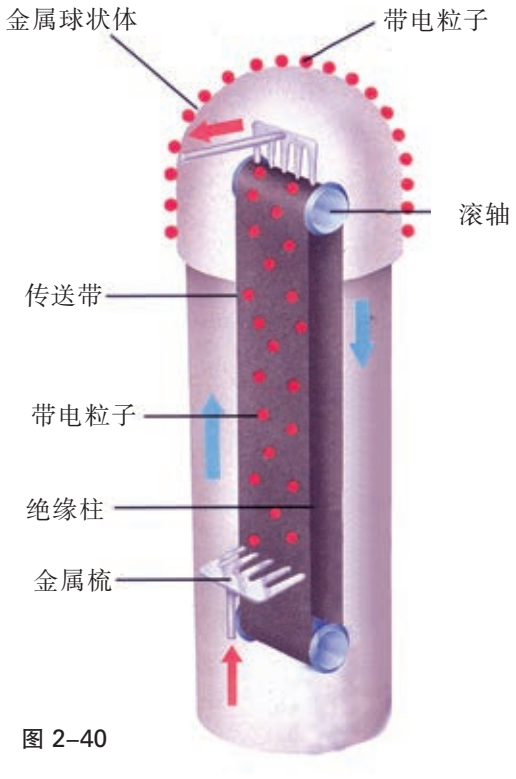


图 2–40

课题研究

示波器及其使用

示波器在电子技术领域中有着广泛的应用。图 2–41 所示的是 J2459 型学生示波器。请参照使用说明书对照实物着重研究以下问题。

1. 示波器的面板上的开关、旋钮和接线柱的功能和作用怎样？
2. 怎样调节示波器？
3. 怎样使用示波器测量直流电压？
4. 怎样用示波器观察直流电和交流电的波形？
5. 上网查找示波器还有哪些主要用途？

附录　熟悉示波器的面板

使用示波器，首先要熟悉示波器面板上的各个开关、旋钮和接线柱。请对照实物 J2459 型学生示波器，了解这些开关、旋钮和接线柱的名称及作用。

1. 电源开关。

2. “辉度调节”旋钮　调节图像亮度。示波器不用时应将其沿逆时针方向旋转到底。

3. “聚焦调节”旋钮　调节电子束在荧光屏上的聚焦情况，使图像清晰。

4. “辅助聚焦调节”旋钮　通常与聚焦调节旋钮配合使用。示波器不用时，聚焦调节旋钮和辅助聚焦调节旋钮都应旋在中间位置。

5. 电源指示灯　电源接通时亮，电源断开时灭。

6. “竖直位移”旋钮　用来调节图像在竖直方向上的位置。

7. “水平位移”旋钮　用来调节图像在水平方向上的位置。

8. “Y 增益”旋钮　调节图像在竖直方向上的幅度。

9. “X 增益”旋钮　调节图像在水平方向上的幅度。

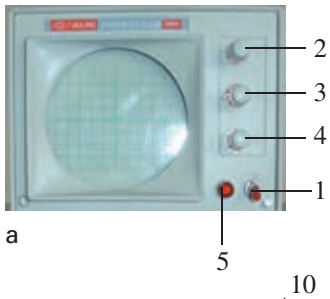
10. “衰减”旋钮　降低输入信号的电压，使荧屏上出现的图像大小适当。该旋钮分 1、10、100、1000 共四挡。1 挡对信号电压不作衰减；10、100、1000 各挡则把信号电压依次衰减为原来的 $\frac{1}{10}$、$\frac{1}{100}$、$\frac{1}{1000}$；∿ 挡不是衰减，而是示波器自行提供竖直方向的按正弦规律变化的交流电压。

11. “扫描范围”旋钮　改变机内提供的水平方向扫描电压的频率范围。该旋钮从左到右也有四挡。第一挡扫描频率是 10 ~ 100 Hz，以后每向右调一挡，扫描频率增大到原来的 10 倍。最右一挡是“外 X”挡，在水平方向上的扫描电压由外部输入。

12. “扫描微调”旋钮　对选定范围内的扫描频率进行连续



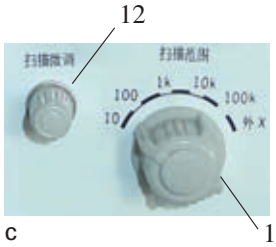
示波器面板



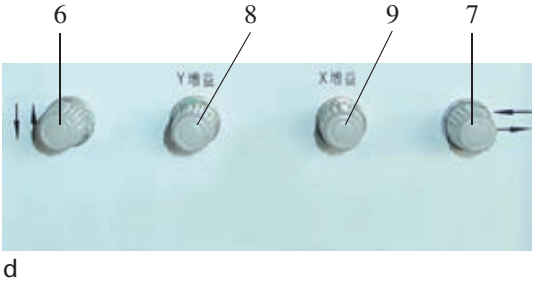
a



b



c



d



e

图 2-41　J2459 型学生示波器面板分解图

的调节，以使波形稳定。

13. “Y输入”和“X输入”接线柱　分别让竖直方向和水平方向的信号电压输入。

14. “地”接线柱　接地线。

15. “DC　AC”选择开关　选择竖直方向上信号的输入方式。当置于“DC”位置时，信号电压直接输入，这种选择适用于观察低频及含有直流分量的信号；当置于“AC”位置时，信号电压是通过一个电容器输入的，因而直流信号被阻隔，只有交流信号能通过，这种选择适用于观察交流信号。

16. “同步”选择开关　当置于“+”位置时，荧光屏上显示的正弦曲线从正半周开始；当置于“–”位置时，正弦曲线从负半周开始。

在“Y 增益”顺时针旋到底时，“Y 衰减” 的挡位跟竖直方向每格电压值的对应关系如下：

“1”挡	0.05 V/格
“10”挡	0.5 V/格
“100”挡	5 V/格
“1000”挡	50 V/格

使用示波器

● 调节示波器

1. 按照示波器说明书中的操作步骤，调节有关旋钮，直到荧光屏的中央出现一个亮斑。

2. 调节聚焦调节旋钮和辅助聚焦调节旋钮，使亮斑最圆最小。

3. 调节竖直位移旋钮，观察亮斑怎样移动。

4. 调节水平位移旋钮，观察亮斑怎样移动。

● 观察亮斑偏移距离跟输入电压的关系

1. 将示波器的“DC　AC”开关置于“DC”位置。按图2–42连接电路，电源为一节干电池。

2. 想一想：图2–42中输入示波器的是怎样的信号？

3. 闭合开关 S，逆时针旋转“衰减”旋钮，使衰减逐步减小，应观察到亮斑向上偏移；再调节“Y增益”旋钮，使亮斑偏移一段适当的距离。

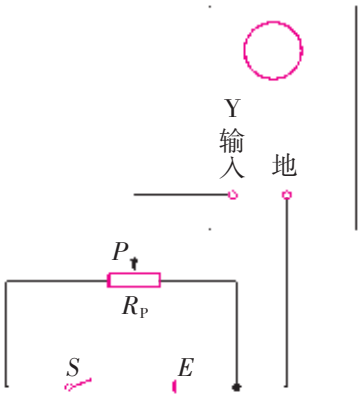


图 2–42　向左移动滑片 P 时，滑片和电池负极间的电压增大，即输入电压增大

● 用示波器测量直流电压

我们知道，亮斑偏移的距离跟输入电压成正比，用示波器可以测量电压。

1. 将“DC　AC”开关置于“DC”位置，将“Y 增益”旋钮顺时针转到底。先将“Y 输入”和“地”连接，调节亮斑，使它处于荧屏方格坐标的正中，然后断开“Y 输入”和“地”的连接。

2. 为什么“Y 输入”和“地”连接时，亮斑不会上下偏移？

3. 参考图 2–42，将一节干电池的正极接在“Y 输入”接线柱上，负极接在“地”接线柱上，电压值是多少？适当调节“衰减”旋钮，亮斑偏移的格数有无变化？被测电压有无变化？

家庭作业与活动

1. 一束质量为 m、电荷量为 q 的带电粒子以平行于两极板的速度 v_0 进入匀强电场，如图 2–43 所示。如果两极板间电压为 U，两极板间的距离为 d、板长为 L。设粒子束不会击中极板，则粒子从进入电场到飞出电场时电势能的变化量为 _____。(粒子的重力忽略不计)

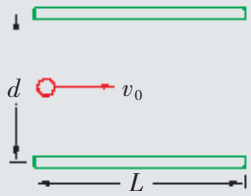


图 2–43

2. 图 2–44 是示波管的工作原理图。电子经加速后以速度 v_0 垂直进入偏转电场，离开电场时偏转量是 h，两平行板间的距离为 d，电势差是 U，板长是 L。每单位电压引起的偏移量 $(\frac{h}{U})$ 叫做示波管的灵敏度，为了提高灵敏度，可采用下列办法中的

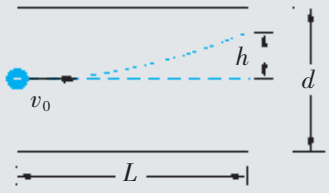


图 2–44

A. 增大两极板间电势差 U

B. 尽可能使板长 L 做得短些

C. 尽可能使两极板间距 d 减小些

D. 使电子入射速度 v_0 大些

3. 如图 2–45 所示，电子在加速电压 U_1 作用下从 P 板中间小孔射出，进入平行板电容器间的电场，在偏转电压 U_2 作用下，偏转一段距离。现在使 U_1 加倍，要想使电子的运动轨迹不发生变化，应该

A. 使 U_2 也加倍

B. 使 U_2 变为原来的 4 倍

C. 使 U_2 变为原来的 $\sqrt{2}$ 倍

D. 以上三种方法都不行

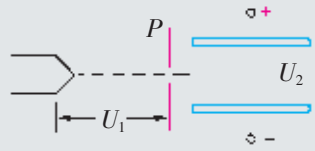


图 2–45

4. 让一价氢离子、一价氦离子和二价氦离子的混合物经同一加速电场由静止开始加速，然后在同一偏转电场中偏转，它们会分为三股吗？说明理由。

2.x

第 2 章家庭作业与活动

A组

1. 如图 2–46 所示，电场中的一条电场线为直线，a、b 为这条直线上的两点，则

A. a 点场强必大于 b 点场强

B. a 点电势必高于 b 点电势

C. 把负电荷由 b 点静止释放，不计重力时，负电荷一定向 a 点做匀加速直线运动



图 2–46

D. 一负电荷从 a 点向 b 点运动，它的电势能一定增加

2. 如图 2–47 所示，三个质量相等，分别带正电、负电和不带电的小球，从平行板电场中的 P 点以相同初速度垂直于竖直方向的电场 E 进入电场，它们分别落到 A、B、C 三点，则可判断

A. 落到 A 点的小球带正电，落到 B 点的小球不带电

B. 三个小球在电场中的运动时间相等

C. 三个小球到达正极板时的动能关系是 $E_{kA}>$

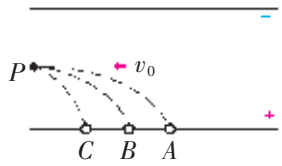


图 2–47

$E_{kB} > E_{kC}$

D. 三个小球在电场中运动的加速度关系是 $a_A < a_B < a_C$

3. 如图 2–48 所示，在粗糙水平面上固定一点电荷 Q，在 M 点无初速度释放一带有恒定电量的小物块，小物块在 Q 的电场中运动到 N 点静止，则从 M 点运动到 N 点的过程中

A. 小物块所受电场力逐渐减小

B. 小物块具有的电势能逐渐减少

C. M 点的电势一定高于 N 点的电势

D. 小物块电势能变化量的大小一定等于克服摩擦力所做的功



图 2–48

4. 在水深超过 200 m 的深海，光线极少，能见度极低。有一种电鳗具有特殊的适应性，能通过自身发出生物电，获取食物，威胁敌害，保护自己。若该电鳗的头尾相当于两个电极，它在海水中产生的电场强度达到 10^3 V/m，可击昏敌害。身长 50 cm 的电鳗，在放电时产生的瞬间电压可达

A. 10 V　　B. 500 V

C. 5000 V　　D. 10000 V

5. 传感器是一种采集信息的重要器件，如图 2–49 所示的是一种测定压力的电容式传感器。当待测压力 F 作用于可动膜片电极上时，下列说法中正确的是

① 若 F 向上压膜片电极，电路中有从 a 到 b 的电流

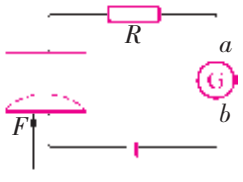


图 2–49

② 若 F 向上压膜片电极，电路中有从 b 到 a 的电流

③ 若 F 向上压膜片电极，电路中不会出现电流

④ 若电流表有示数，则说明压力 F 发生变化

⑤ 若电流表有示数，则说明压力 F 不发生变化

A. ②④　　B. ①④

C. ③⑤　　D. ①⑤

6. 1999 年 7 月 12 日，日本原子能公司所属敦贺湾核电站由于水管破裂导致高辐射冷却剂外泄。在检测此次重大事故中应用了非电量变化(冷却剂外泄使管中液面变化)转移为电信号的自动化测量技术。图 2–50 是一种通过检测电容器电容的变化来检测液面高低的仪器原理图。容器中装有导电液体，是电容器的一个电极，中间的芯柱是电容器的另一个电极，芯柱外面套有绝缘管(塑料或橡皮)作为电介质，电容器的两个电极分别用导线接在指示器上，指示器上显示的是电容的大小，但从电容的大小就可知容器中液面位置的高低。对此，下列说法中正确的是

A. 如果指示器显示出电容增大了，则两电极正对面积增大，必为液面升高

B. 如果指示器显示出电容减小了，则两电极正对面积增大，必为液面升高

C. 如果指示器显示出电容增大了，则两电极正对面积减小，必为液面降低

D. 如果指示器显示出电容减小了，则两电极正对面积增大，必为液面降低

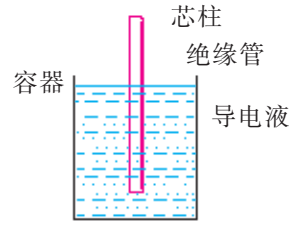


图 2–50

7. 密立根油滴实验进一步证实了电子的存在，揭示了电荷的非连续性。图 2–51 是密立根油滴实

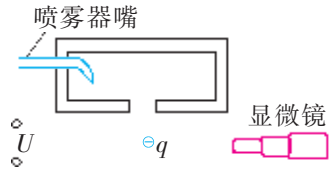


图 2–51

验的原理示意图，设小油滴质量为 m，调节两板间电势差为 U，当小油滴悬浮不动时，测出两板间距离为 d，可求出小油滴的带电量 q = _____。

B组

1. 如图 2–52 所示，虚线 a、b、c 代表静电场中的三个等势面，它们的电势分别为 φ_a、φ_b 和 φ_c，$\varphi_a > \varphi_b > \varphi_c$。一带正电的粒子射入电场中，其运动轨迹如图中实线 $KLMN$ 所示，由图可知

   A. 粒子从 K 到 L 的过程中，电场力做负功

   B. 粒子从 L 到 M 的过程中，电场力做负功

   C. 粒子从 K 到 L 的过程中，电势能增加

   D. 粒子从 L 到 M 的过程中，动能减少

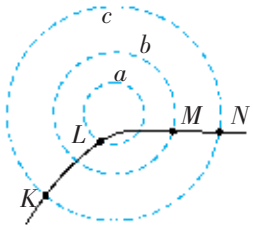


图 2–52

2. 一个质量为 m、电荷量为 $+q$ 的小球，用丝线悬挂在水平方向的匀强电场中，场强为 E。小球平衡时，悬线与竖直方向间夹角 $\alpha = 30°$，如图 2–53 所示。若将匀强电场 E 的方向逆时针转过角度 $\beta = 45°$，小球重新达到平衡时悬线与竖直方向间夹角为多大？

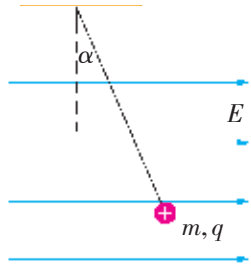


图 2–53

3. 图 2–54 是静电分选器的原理示意图。将磷酸盐和石英的混合颗粒由传送带送至两个竖直的带电平行板上方，颗粒经漏斗从电场区域中央处开始下落，经分选后的颗粒分别装入 A、B 桶中。混合颗粒离开漏斗进入电场时磷酸盐颗粒带正电，石英颗粒带负电，所有颗粒所带的电量与质量之比均为 1×10^{-5} C/kg。已知两板间的距离为 10 cm，颗粒在电场中下落的竖直高度为 50 cm。设颗粒进入电场时的初速度为零，颗粒间的相互作用力不计。如果要使两种颗粒离开两极板间的电场区域时不接触到极板而且有最大的偏转量（g 取 10 m/s^2），

   （1）求两极板间所加的电压。

   （2）若带电平行板的下端距 A、B 桶底的高度为 H=1.3 m，求颗粒落至桶底时的速度大小。

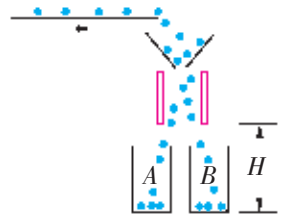


图 2–54

4. 喷墨打印机的结构简图如图 2–55 所示，其中墨盒可以发出半径约为 1×10^{-4} m 的墨汁微滴，此微滴经过带电室时被带上负电，带电的多少由计算机按字体笔画最低位置输入信号控制。带电后的微滴以一定的初速度进入偏转电场，带电微滴经过偏转电场发生偏转后打到纸上，显示出字体。无信号输入时墨汁微滴不带电，径直通过偏转板而注入回流槽流回墨盒。设偏转板板长 1.6 cm，两板间的距离为 0.50 cm，偏转板的右端距纸 3.2 cm。若一个墨汁微滴的质量为 1.6×10^{-8} kg，以 20 m/s 的初速度垂直于电场方向进入偏转电场，两偏转板间的电压是 8.0×10^3 V，若墨汁微滴打到纸上的点距原射入方向的距离是 2.0 mm，求这个墨汁微滴通过带电室带的电量。不计空气阻力和重力，可以认为偏转电场只局限在平行板电容器内部，忽略边缘电场的不均匀性。为了使纸上的字体放大 10%，请你分析提出一个可行的方法。

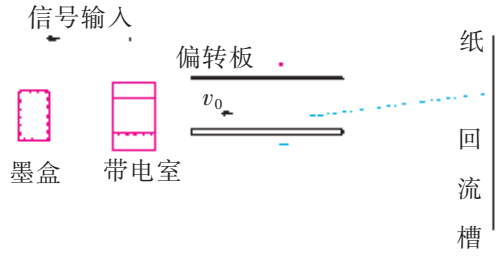


图 2–55