静电场

目录

一、起电方式.....4
(一)摩擦起电.....4
(二)感应起电.....4
(三)接触起电.....4
二、电荷.....4
(一)定义.....4
(二)电荷量.....4
(三)自由电子与金属.....4
1.自由电子.....4
2.金属导电的原因.....4
3.金属的微观结构模型.....4
(四)电荷守恒定律.....4
(五)元电荷.....4
1.定义.....4
2.荷质比.....4
三、验电器.....5
四、静电感应.....5
(一)定义.....5
(二)课本实验.....5
(三)课本第 23 页例题.....5
五、库仑定律与库仑力.....5
(一)点电荷.....5
(二)内容及表达式.....6
(三)实验验证.....6
1.实验装置.....6
2.实验流程.....6
(四)独立性原理与叠加原理.....6
(五)适用条件和适用范围.....7
课本第 10 页例题.....7
(六)精确程度.....7
(七)库仑力与万有引力的比较.....7
课本第 8 页例题.....7
六、电场与电场强度.....8
(一)电场与静电场.....8
(二)电场强度.....8
1.试探电荷.....8
2.场源电荷.....8
3.电场强度.....8
(三)点电荷的电场.....8
1.课本第 23 页例题.....9
2.三点电荷共线平衡规律.....9
(四)电场强度的叠加.....9
(五)对称法求电场强度(课本第 24 页例题).....9
(六)电场线.....10
1.定义.....10

2.特点 10
3.电场线与电场强度的关系 10
4.点电荷的电场线 10
5.等量异种点电荷和等量同种点电荷的电场线 10
(七)匀强电场 10
1.定义 10
2.特征 10
3.两平行带电平板之间的电场 10
七、密立根油滴实验 10
(一)实验原理 11
1.动态测量法 11
2.平衡测量法 11
(二)元电荷的测量方法 11
(三)实验装置 12
(四)例题 12
1.2023 年新课标卷第 12 题 12
2.2022 年广东卷第 14 题 12
八、静电的防止与利用 15
(一)静电平衡 15
(二)尖端放电 15
(三)静电屏蔽 15
(四)静电吸附 16
1.静电除尘 16
课本第 22 页例题 16
2.静电喷漆 16
3.静电复印 16
九、静电力做功的特点 17
(一)静电力是保守力 17
(二)静电场的环路定理 17
十、电势能和电势 17
(一)电势能 17
(二)电势 18
1.定义 18
2.决定式推导 18
3.叠加原理 18
4.等势面 18
5.例题(课本第 30 页例题) 18
十一、电势差 19
(一)静电力做功与电势差的关系 19
(二)电子伏定义(课本第 34 页例题) 19
(三)电势差与电场强度的关系 19
(四)由三点电势确定电场强度 20
1.电势等分法 20
2.正交分解法 20
3.投影合成法 21
(五)利用静电计比较电势差的大小 21
十二、电容器与电容 21

(一)定义 21
(二)电容器的充放电 21
1.实验:观察电容器的充放电现象 21
2.实验:用传感器观察电容器的放电过程 22
(三)电容 22
1.定义式 22
2.平行板电容器的电容决定式 22
3.单位 23
4.工作电压与击穿电压 23
(四)常用电容器 23
(五)电容器的功率 23
十三、带电粒子在电场中的运动 25
(一)分析带电粒子加速的问题的两种思路 25
(二)课本第 44 页例题 25
(三)带电粒子在匀强电场中的偏转 26
1.两个分运动 26
2.两个结论 26
3.功能关系 26
4.计算粒子打到屏上的位置离屏位置中心的方法 27
(四)示波管 27
1.原理 27
2.例题(2023 年 1 月浙江选考) 27
(五)范德格拉夫静电加速器 28
十四、电场中的图像问题 29
(一)$v-t$图像 29
例题(2023·重庆市八中检测) 29
(二)$\varphi-x$图像 29
1.图像斜率的意义 29
2.图像中可提取的信息 30
3.电场中常见的$\varphi-x$图像 30
(1)点电荷的$\varphi-x$图像 30
(2)两个等量异种点电荷连线上的$\varphi-x$图像 30
(3)两个等量同种点电荷的$\varphi-x$图像 30
例题(2023·贵州贵阳市一中高三检测 多选) 30
(三)$E-x$图像(电场方向与x轴平行) 31
1.静电场在x轴上的电场强度E随x的变化关系 31
2.与x轴所围图形面积含义 31
3.电场中常见的$E-x$图像 31
(1)点电荷的$E-x$图像 31
(2)两个等量异种点电荷的$E-x$图像 31
(3)两个等量正点电荷的$E-x$图像 31
例题 31
(四)E_p—x图像、E_k—x图像 32
1. E_p—x图像 32
2. E_k—x图像 32
例题(2023·北京北师大实验中学高三检测) 32

一、起电方式

(一)摩擦起电

指物体由于摩擦而带电.其原因是原子内部的质子和中子被紧密地束缚在一起构成原子核,原子核的结构一般是很稳定的.通常离原子核较远的电子受到的束缚较弱,容易受到外界的作用而脱离原子.当两种物质组成的物体互相摩擦时,一些受束缚较弱的电子会转移到另一个物体上.于是,原来电中性的物体由于得到电子而带负电,失去电子的物体则带正电.

(二)感应起电

指物体在静电场的作用下发生的电荷再分布的现象,要注意区分导体近端和远端.

(三)接触起电

指两个物体相互接触、不发生摩擦,当两个物体重新分开后所产生的静电起电现象.对于两个完全相同的物体,同种电荷直接平分,异种电荷先中和后再平分.

二、电荷

(一)定义

电荷是物体或构成物体的质点所带的正电或负电.自然界中只有两种电荷.目前没有发现对正电荷和负电荷均排斥或吸引的电荷.富兰克林命名了正电荷和负电荷.

(二)电荷量

电荷量表示电荷的多少,用Q表示,有时也可用q表示.在国际单位制中,其单位为库仑,简称库,符号是C.

库仑的定义为$1A$恒定电流在$1s$时间间隔内所传送的电荷量为$1C$.正电荷的电荷量为正值,负电荷的电荷量为负值.

(三)自由电子与金属

1.自由电子

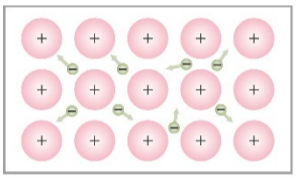
金属中原子的外层电子往往会脱离原子核的束缚而在金属中自由运动,被称为自由电子.

2.金属导电的原因

失去自由电子的原子便成为带正电的离子,它们在金属内部排列起来,每个正离子都在自己的平衡位置附近振动而不移动,只有自由电子穿梭其中,这就使金属成为导体.而绝缘体中几乎不存在能自由移动的电荷.

3.金属的微观结构模型

关于金属中原子核、电子所处的状态及其运动,这是一种简化描述,但它可以有效地解释与金属导电有关的现象,所以是一个物理模型.



(四)电荷守恒定律

电荷既不会创生,也不会消灭,它只能从一个物体转移到另一个物体,或者从物体的一部分转移到另一部分;在转移过程中,电荷的总量保持不变.近代物理实验中发现在一定条件下带电粒子可以产生或湮没,但带电粒子总是成对产生或湮灭,两个粒子带电数量相等且电性相反,电荷的代数和仍然不变.因此电荷守恒定律更普遍的表述为,一个与外界没有电荷交换的系统,电荷的代数和保持不变.

(五)元电荷

1.定义

目前发现的最小电荷量即电子所带的电荷量,质子与正电子所带的电荷量与其相同,电性相反.将该最小的电荷量称为元电荷,用e表示.所有带电体的电荷量都是e的整数倍,电荷量是不能连续变化的物理量,即电荷是量子化的.在计算中可取$e=1.6\times10^{-19}C$.元电荷不是带电体,是最小的电荷量.

2.荷质比

电子的电荷量e与电子的质量m_e之比,叫作电子的比荷,也叫做荷质比.

电子的质量为$m_e=9.11\times10^{-31}kg$,电子的比荷为$\frac{e}{m_e}=1.76\times10^{11}C/kg$.

芝士不鱼

三、验电器



原理是同种电荷相互排斥.玻璃瓶内有两片金属箔,用金属丝挂在一根导体棒的下端,棒的上端穿过绝缘的瓶塞从瓶口伸出.如果把金属箔换成指针,并用金属制作外壳,这样的验电器又叫作静电计.

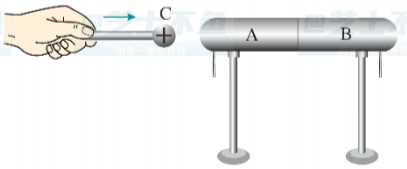
四、静电感应

(一)定义

当一个带电体靠近导体时,由于电荷间相互吸引或排斥,导体中的自由电荷便会趋向或远离带电体,使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.感应起电即利用静电感应使金属导体带电的过程.

(二)课本实验

取一对用绝缘柱支持的导体A和B,使它们彼此接触.起初它们不带电,贴在下部的两片金属箔是闭合的.

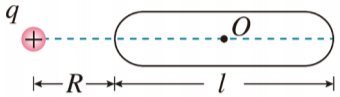


手握绝缘棒,把带正电荷的带电体C移近导体A,金属箔有什么变化?这时手持绝缘柱把导体A和B分开,然后移开C,金属箔又有什么变化?再让导体A和B接触,又会看到什么现象?利用金属的微观结构模型,解释看到的现象.

当带正电荷的带电体C移近导体A时,C的正电荷吸引导体A和B中的自由电子,导体A有多余电子积累而带负电,导体B因失去电子而带正电,金属箔带同种电荷,因此两对金属箔都张开;此时把A和B分开,再移去C,则A和B都带上电荷,而且是等量异种电荷,因而金属箔依然张开,但由于A和B上的电荷都会重新分布,故金属箔张角会稍稍变小;再让A和B接触,则A和B所带电荷中和,两对金属箔都闭合.

(三)课本第23页例题

长为l的导体棒原来不带电,现将一个带正电的点电荷q放在棒的中心轴线上距离棒的左端R处,如图所示.当棒达到静电平衡后,棒上感应电荷在棒的中点O处产生的电场强度大小和方向如何?



静电平衡时,导体棒中点处的电场强度为0,所以导体棒上感应电荷在O处产生的电场强度与点电荷q在棒中点O处产生的电场强度大小相等,方向相反.$E_{感}=k\frac{q}{(R+\frac{l}{2})^2}$,方向向左.

五、库仑定律与库仑力

(一)点电荷

实验事实说明两个实际的带电体间的相互作用力与它们自身的大小、形状以及电荷分布都有关系.任何带电体都有形状和大小.当带电体之间的距离比它们自身的大小大得多,以致带电体的形状、大小及电荷分布状况对它们之间的作用力的影响可以忽略时,这样的带电体可以看作带电的点,叫作点电荷.

点电荷与力学中的质点类似,也是一种理想化模型.

(二)内容及表达式

库仑定律是电荷间相互作用的规律,真空中两个静止点电荷之间的相互作用力,与它们的电荷量的乘积成正比,与它们的距离的二次方成反比,作用力的方向在它们的连线上.这种电荷之间的相互作用力叫作静电力或库仑力.表达式为

$$F=k\frac{q_1q_2}{r^2}$$

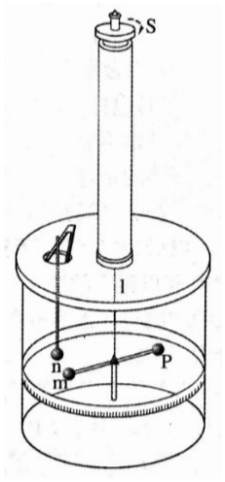
其中k为静电力常量,$k=9.0\times10^9N\cdot m^2/C^2$.

对库仑定律引入矢量表示即

$$\overrightarrow{F_{12}}=k\frac{q_1q_2}{r_{12}^2}\overrightarrow{e_{12}}$$

其中$\overrightarrow{F_{12}}$是电荷2对电荷1的作用力,$\overrightarrow{e_{12}}$是两点电荷间的单位矢量,方向从电荷2指向电荷1,k是比例系数,在SI单位制中写作$k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$,其中$\varepsilon_0$是真空介电常量,其近似值为$\varepsilon_0=8.854\times10^{-12}F/m$.

当两个点电荷所带的电荷量为同种时,它们之间的作用力为斥力;反之,为异种时,它们之间的作用力为引力.库仑定律指出两静止电荷间的作用是有心力.力的大小与两电荷间的距离服从平方反比律.静电场的基本性质正是由静电力的这两个基本特性决定的.



(三)实验验证

1.实验装置

l是一根银丝,它的上端固定于纽头s上,下端悬有一根浸蜡的绝缘草杆.杆的一端带有一个木髓小球m,另一端悬有一个平衡体p.全部设备置于玻璃罩内,使其不受空气流动的影响.玻璃罩的盖上有一小孔,用以放入装在绝缘柄上的另一木髓小球n.实验时,先使两个小球带电;小球m在小球n的电力作用下,将转过某一角度.旋转纽头s使小球回到原来的位置.此时,悬丝的扭转力矩等于电力施于小球m上的力矩.如果悬线的扭转常数已事先测定,则由纽头转过的角度,就可以确定力矩的大小.若再知道杆的长度,就可以确定小球m与n之间的相互作用力.至于小球m在实验开始时的位置也可转动纽头s来改变,从而改变小球m与n之间的相对距离,由此可测定在各种不同距离下的小球m和n之间的相互作用力.

2.实验流程

要确定作用力与电量之间的关系,须先确定比较两个电量的方法.为了比较两个电荷q_1和q_2的大小,我们把这两个电荷先后放在某一定的第三电荷q_0的距离同为r_0的地方,度量这两个电荷与第三个电荷q_0相互作用的力f_1和f_2.具体的做法是我们依次给小球n以电荷q_1和q_2,保持小球m的电荷q_0不变.实验表明力之比$\frac{f_1}{f_2}$是和第三电荷q_0的大小无关的,也和电荷q_1和q_2至第三电荷的距离r_0无关.由此可见,力之比值$\frac{f_1}{f_2}$仅由电荷q_1和q_2决定,因此就取电荷之比$\frac{q_1}{q_2}$等于力之比$\frac{f_1}{f_2}$.这样就得到两个电荷之比$\frac{q_1}{q_2}$的测量方法.有比较电荷的方法后,现在就可以将不同的电荷$q_1,q_2,q_3,\ldots$两两放置在彼此距离相同的地方,在此情形下,实验表明,两个电荷q_i,q_k之间的相互作用力f是和它们的大小的乘积q_iq_k成比例的.

(四)独立性原理与叠加原理

库仑定律原初的表达式是针对真空中的点电荷,但当研究的两个点电荷周围有其他带电体存在时,根据

力的独立作用原理,两个电荷之间的静电力仍然满足库仑定律.实验表明,两个点电荷之间的作用力不因第三个点电荷的存在而改变.两个或两个以上点电荷对某一个点电荷的作用力,等于各点电荷单独对这个点电荷的作用力的矢量和.

(五)适用条件和适用范围

库仑定律中的点电荷状态原初是指两电荷相对静止,且相对观察者静止.这个条件可以放宽为静止源电荷对运动点电荷的作用力,但不能推广到运动点电荷对静止点电荷的作用力.

根据α粒子在原子核上的散射实验,可以断定库仑定律直到数量级为$10^{-14}\sim10^{-20}\ m$的距离上仍正确.

课本第 10 页例题

半径为r的两个金属球,其球心相距$3r$.现使两球带上等量的同种电荷Q,两球之间的静电力$F=k\frac{Q^2}{9r^2}$吗?说明道理.

两球之间的静电力不等于$k\frac{Q^2}{9r^2}$.因为库仑定律适用于真空中点电荷间静电力的计算,两个半径为r的金属球球心相距$3r$时,由于两球距离太近,电荷在两金属球上的分布发生变化,两球不能视为点电荷,因而它们之间作用力的大小已不能直接用库仑定律进行计算,所以$F\neq k\frac{Q^2}{9r^2}$.

(六)精确程度

点电荷是一个极限的东西和抽象的概念.在库仑定律的验证实验中,二个带电体不能很小,它们之间的距离不能很大,因此库仑的扭秤直接测定的结果的精密程度是不能很大的.但是库仑定律的正确性,不仅在于这一定律的直接验证,而且更重要的是,由这一定律得到的全部推论与实验均一致.库仑定律可说是实验材料的概括,因而就成为静电场理论的基础.

以后我们将要看到,导体内部没有电荷存在是库仑定律的一个结论.麦克斯韦曾于1879年以很大的准确度确定了这个事实,并从而断定二个点电荷间的作用力随距离而消减的方次与 2 相差不会超过5×10^{-5}.1936年有人又用放大器和电流计证明这个相差不会大于10^{-9}.

(七)库仑力与万有引力的比较

库仑力是带电体或电荷之间由电性产生的力,比较强,主要表现在微观,库仑定律所规定的作用力并不小;万有引力是任何两个物体之间由质量产生的力,比较弱,主要表现在宏观.微观粒子间的万有引力远小于库仑力.因此,在研究微观带电粒子的相互作用时,可以把万有引力忽略.

课本第 8 页例题

在氢原子内,氢原子核与电子之间的最短距离为$5.3\times10^{-11}\ m$.试比较氢原子核与电子之间的静电力和万有引力.

氢原子核与质子所带的电荷量相同,是$1.6\times10^{-19}\ C$.电子带负电,所带的电荷量也为$1.6\times10^{-19}\ C$.质子质量为$1.67\times10^{-27}\ kg$,电子质量为$9.1\times10^{-31}\ kg$.根据库仑定律和万有引力定律进行求解.

根据库仑定律,它们之间的静电力为

$$F_{库}=k\frac{q_1q_2}{r^2}=8.2\times10^{-8}N$$

根据万有引力定律,它们之间的万有引力为

$$F_{引}=G\frac{m_1m_2}{r^2}=3.6\times10^{-47}N$$

它们之间的库仑力与万有引力的比值为

$$\frac{F_{库}}{F_{引}}=\frac{8.2\times10^{-8}}{3.6\times10^{-47}}=2.3\times10^{39}$$

氢原子核与电子之间的静电力是万有引力的2.3×10^{39}倍.

六、电场与电场强度

(一)电场与静电场

电场由法拉第提出,认为在电荷的周围存在着由它产生的电场.电场已被证明客观存在.电场是看不见、摸不着的,但却可以根据它所表现出的性质来认识它、研究它.处于电场中的其他电荷受到的作用力就是这个电场给予的.场具有能量,场是物质存在的一种形式.

只有在研究运动的电荷,特别是运动状态迅速变化的电荷时,场的物质性才突显出来.此处只讨论静止电荷产生的电场,叫作静电场.

(二)电场强度

电场的特性是在与电荷的相互作用中表现出来的.在研究电场的性质时,应将电荷放入电场中,从电荷所受的静电力入手.

1.试探电荷

被放入电场中的电荷应该是电荷量和体积都很小的点电荷.电荷量很小,是为了放入后不影响原来要研究的电场.体积很小,是为了便于研究电场各点的性质.这样的电荷常被称作试探电荷.

2.场源电荷

激发电场的带电体所带的电荷叫作场源电荷,或源电荷.

3.电场强度

在点电荷Q的电场中的P点,放一个试探电荷q_1,它在电场中受到的静电力是F_1,根据库仑定律,有

$$F_1=k\frac{Qq_1}{r^2}$$

若将试探电荷换成q_2,它在电场中受到的静电力是F_2,有

$$F_2=k\frac{Qq_2}{r^2}$$

可以得到

$$\frac{F_1}{q_1}=\frac{F_2}{q_2}=k\frac{Q}{r^2}$$

放在P点的试探电荷受到的静电力与它的电荷量之比,与该点的试探电荷的电荷量无关,与产生电场的场源电荷的电荷量Q及P点与场源电荷之间的距离r有关.

实验表明,在电场的不同位置,试探电荷所受的静电力与其电荷量之比一般不同,它反应了电场在各点的性质,叫作电场强度.电场强度常用E来表示,根据分析知

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

电场强度的单位为牛每库,符号为N/C.

电场强度是矢量.电场中某点的电场强度的方向与正电荷在该点所受的静电力的方向相同,负电荷在电场中某点所受静电力的方向与该点电场强度的方向相反.

(三)点电荷的电场

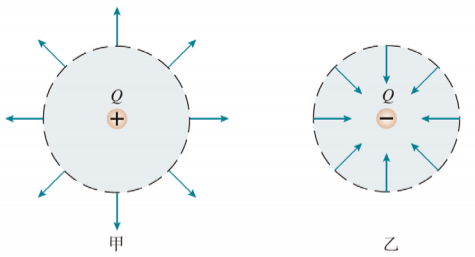
点电荷是最简单的场源电荷,一个电荷量为Q的点电荷,在与之相距r处的电场强度为

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

以电荷量为Q的点电荷为中心作一个球面,则球面上各点的电场强度大小相等.当Q为正电荷时,电场强

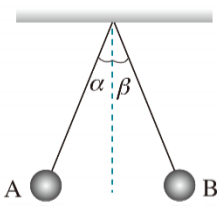
度E的方向沿半径向外;当Q为负电荷时,电场强度E的方向沿半径向内.与点电荷相距r的球面上各点的电场强度示意图如下图所示.

芝士不鱼
闲鱼·禁止外传



1.课本第 23 页例题

如图,用两根同样长的细绳把两个带同种电荷的小球悬挂在一点.两小球的质量相等,球 A 所带的电荷量大于球 B 所带的电荷量.两小球静止时,悬线与竖直方向的偏角分别为 α 和 β,请判断二者的关系并说明原因.



对球 A 和球 B 做受力分析,利用相似三角形知识可知 $\alpha=\beta$.

2.三点电荷共线平衡规律

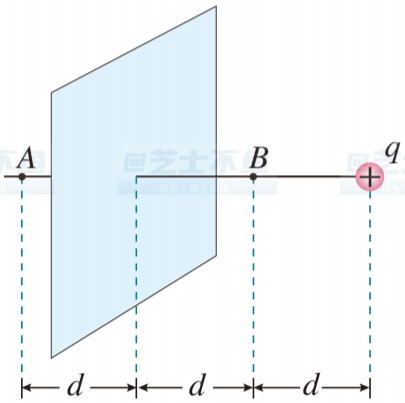
“三点共线”:三个点电荷分布在同一条直线上;
“两同夹异”:正、负电荷相互间隔;
“两大夹小”:中间电荷的电荷量最小;
“近小远大”:中间电荷靠近电荷量较小的电荷.

(四)电场强度的叠加

若场源是多个点电荷,则电场中某点的电场强度等于各个点电荷单独在该点产生的电场强度的矢量和.一个半径为R的均匀带电球体(或球壳)在球的外部产生的电场,与一个位于球心、电荷量相等的点电荷在同一点产生的电场相同.

(五)对称法求电场强度(课本第 24 页例题)

电荷量为 q 的点电荷与均匀带电薄板相距 $2d$,点电荷到带电薄板的垂线通过板的几何中心.若图中A点的电场强度为0,求带电薄板产生的电场在图中B点的电场强度.



带电薄板不能看成是点电荷,它在B点产生的电场要利用对称思想进行分析.

由于A点的电场强度为0,说明点电荷 q 在A点产生的电场强度与带电薄板在A点产生的电场强度大小相等、方向相反,即 $E_{板A}=k\dfrac{q}{(3d)^2}=k\dfrac{q}{9d^2}$,方向向右.根据对称性可知,带电薄板在$B$点产生的电场强度跟带

电薄板在A点产生的电场强度大小相等、方向相反,所以$E_{板B}=k\frac{q}{9d^2}$,方向向左.

(六)电场线

1.定义

电场线是画在电场中的一条条有方向的曲线,用于形象地了解和描述电场中各点电场强度的大小和方向,曲线上每点的切线方向表示该点的电场强度方向.

2.特点

电场线从正电荷或无限远出发,终止于无限远或负电荷.

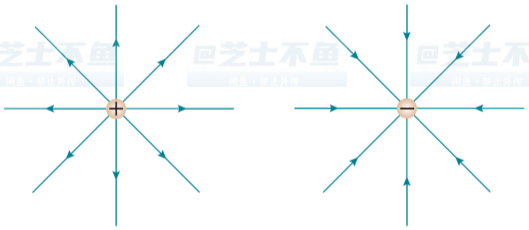
电场线在电场中不相交,这是因为在电场中任意一点的电场强度不可能有两个方向.

3.电场线与电场强度的关系

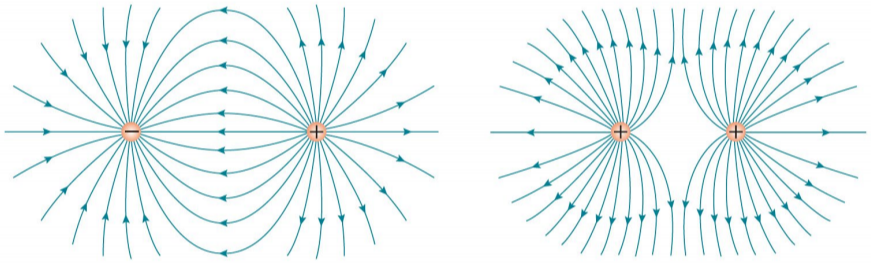
在同一幅图中,电场强度较大的地方电场线较密,电场强度较小的地方电场线稀疏.在同一幅图中可以用电场线的疏密来比较各点电场强度的大小.

4.点电荷的电场线

点电荷的电场线呈辐射状.



5.等量异种点电荷和等量同种点电荷的电场线



(七)匀强电场

1.定义

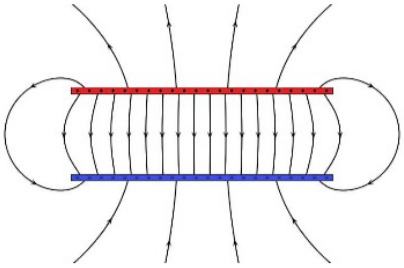
电场中各点的电场强度的大小相等、方向相同的电场为匀强电场.匀强电场的电场线可以用间隔相等的平行线来表示.

2.特征

由于方向相同,匀强电场中的电场线互相平行;由于电场强度大小相等,电场线的疏密程度相同.

3.两平行带电平板之间的电场

相距很近的一对带等量异种电荷的平行金属板,它们之间的电场除边缘外,可以看作匀强电场.其电场线如下图所示.



七、密立根油滴实验

密立根油滴实验是密立根与其学生福莱柴尔于1909年在美国芝加哥大学瑞尔森物理实验室所进行的一项物理学实验,该实验首次测量出了电子的电荷量.密立根因而获得1923年的诺贝尔物理学奖.该实

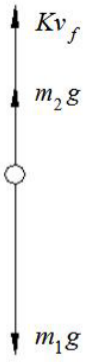
验首次证实电荷的量子化,测定了电子电荷的正确数值.

(一)实验原理

根据油滴在电场中作直线运动或静止两种运动方式分为动态测量法和平衡测量法.

1.动态测量法

考虑重力场中一个足够小油滴的运动,设此油滴质量为m_1,空气是粘滞流体,故油滴除重力和浮力外还受粘滞阻力的作用.由斯托克斯定律,粘滞阻力与物体运动速度成正比.设油滴以匀速v_f下落,则有

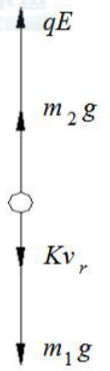


重力场中油滴受力示意图

$$m_1 g - m_2 g = K v_f$$

此处m_2为与油滴同体积空气的质量,K为比例常数,g为重力加速度.

若此油滴带电荷为q,并处在场强为E的均匀电场中,设电场力qE方向与重力方向相反,若油滴以匀速v_r上升,则有



电场中油滴受力示意图

$$qE = (m_1 - m_2) g + K v_r$$

联立解得

$$q = \frac{(m_1 - m_2) g}{E v_f} (v_f + v_r)$$

当油滴以匀速下降时,原理相同.由于喷雾器喷出的小油滴半径r是微米量级,直接测量其质量m_1是困难的,故希望消去m_1,而带之以容易测量的量.设油与空气的密度分别为ρ_1,ρ_2,故半径为r的油滴视重为

$$(m_1 - m_2) g = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) g$$

2.平衡测量法

其出发点是使油滴在均匀电场中静止在某一位置,或在重力场中作匀速运动.当油滴在电场中平衡时,油滴在两极板间受到的电场力qE、重力m_1g和浮力m_2g达到平衡,从而静止在某一位置,即

$$qE = (m_1 - m_2) g$$

其处理方法与动态测量法相似.

(二)元电荷的测量方法

测量油滴上带的电荷的目的是找出电荷的最小单位e.为此可对不同油滴分别测得其所带的电荷值q_i,它们应近似为某一最小单位的整数倍,即油滴电荷量的最大公约数,或油滴带电量之差的最大公约数,即为元电荷.实验中采用紫外线、X射线或放射源等改变同一油滴所带的电荷,测量油滴上所带电荷的改变值$\Delta q_i = n_i e$,其中n_i为一整数.也可用作图法求e的值,根据拟合直线即可求得e.

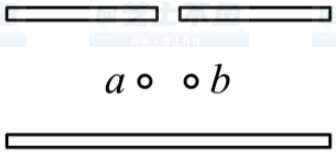
(三)实验装置

密立根设置了一个均匀电场,方法是将两块金属板以水平方式平行排列作为两极,两极之间可产生相当大的电位差.金属板上有四个小洞,其中三个是用来将光线射入装置中,另外一个则设有一部显微镜,用以观测实验.喷入平板中的油滴可经由控制电场来改变位置.为了避免油滴因为光线照射蒸发而使误差增加,此实验使用蒸气压较低的油.其中少数的油滴在喷入平板之前,因为与喷嘴摩擦而获得电荷,成为实验对象.

(四)例题

1.2023 年新课标卷第 12 题

密立根油滴实验的示意图如图所示.两水平金属平板上下放置,间距固定,可从上板中央的小孔向两板间喷入大小不同、带电量不同、密度相同的小油滴.两板间不加电压时,油滴 a 、 b 在重力和空气阻力的作用下竖直向下匀速运动,速率分别为 v_0 、 $\frac{v_0}{4}$;两板间加上电压后(上板为正极),这两个油滴很快达到相同的速率 $\frac{v_0}{2}$,均竖直向下匀速运动.油滴可视为球形,所受空气阻力大小与油滴半径、运动速率成正比,比例系数视为常数.不计空气浮力和油滴间的相互作用.



(1)求油滴 a 和油滴 b 的质量之比;

设油滴半径 r ,密度为 ρ ,则油滴质量 $m=\frac{4}{3}\pi r^3\rho$.速率为 v 时受阻力 $f=krv$,当油滴匀速下落时 $mg=f$,

解得 $r=\sqrt{\frac{3kv}{4\pi\rho g}}\propto\sqrt{v}$,可知 $\frac{r_a}{r_b}=\sqrt{\frac{v_0}{\frac{1}{4}v_0}}=2$,计算得 $\frac{m_a}{m_b}=\frac{r_a^3}{r_b^3}=8$,故 $m_a:m_b=8:1$.

(2)判断油滴 a 和油滴 b 所带电荷的正负,并求 a 、 b 所带电荷量的绝对值之比.

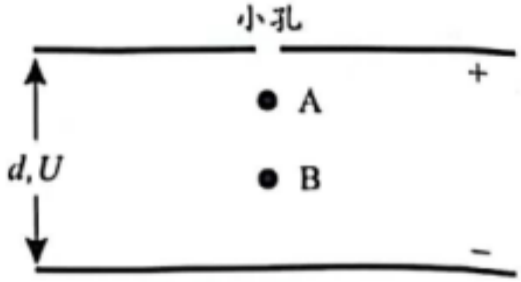
两极板加上电压后(上板为正极),这两个油滴很快达到相同的速率 $\frac{v_0}{2}$,分析可知油滴 a 做减速运动,油滴 b 做加速运动,因此可知油滴 a 带负电,油滴 b 带正电.

当再次匀速下落时,对 a 由受力平衡分析可得 $|q_a|E+f_a=m_ag$,其中 $f_a=\frac{\frac{v_0}{2}}{v_0}m_ag=\frac{1}{2}m_ag$,对 b 由受力平衡分析可得 $f_b-q_bE=m_bg$,其中 $f_b=\frac{\frac{v_0}{2}}{\frac{1}{4}v_0}m_bg=2m_bg$,联立解得 $\left|\frac{q_a}{q_b}\right|=\frac{m_a}{2m_b}=4$,故 a 、 b 所带电荷量的绝对值之比为4.

2.2022 年广东卷第 14 题

密立根通过观测油滴的运动规律证明了电荷的量子性,因此获得了1923年的诺贝尔奖.图为密立根油滴实验的原理示意图,两个水平放置、相距为 d 的足够大金属极板,上极板中央有一小孔.通过小孔喷入一些小油滴,由于碰撞或摩擦,部分油滴带上了电荷.有两个质量均为 m_0 、位于同一竖直线上的球形小油滴 A 和 B ,在时间 t 内都匀速下落了距离 h_1 .此时给两极板加上电压 U (上极板接正极), A 继续以原速度

下落,B 经过一段时间后向上匀速运动.B 在匀速运动时间 t 内上升了距离 $h_2(h_2 \neq h_1)$,随后与 A 合并,形成一个球形新油滴,继续在两极板间运动直至匀速.已知球形油滴受到的空气阻力大小为 $f = km^{\frac{1}{3}}v$,其中 k 为比例系数,m 为油滴质量,v 为油滴运动速率.不计空气浮力,重力加速度为 g.求:



(1)比例系数 k;

未加电压时,油滴匀速时的速度大小

$$v_1 = \frac{h_1}{t}$$

匀速时

$$mg = f$$

又

$$f = km^{\frac{1}{3}}v_1$$

联立可得

$$k = \frac{m^{\frac{2}{3}}gt}{h_1}$$

(2)油滴 A、B 的带电量和电性;B 上升距离 h_2 电势能的变化量;

加电压后,油滴 A 的速度不变,可知油滴 A 不带电,油滴 B 最后速度方向向上,可知油滴 B 所受电场力向上,极板间电场强度向下,可知油滴 B 带负电,油滴 B 向上匀速运动时,速度大小为

$$v_2 = \frac{h_2}{t}$$

根据平衡条件可得

$$mg + km^{\frac{1}{3}}v_2 = \frac{U}{d}q$$

解得

$$q = \frac{mgd(h_1 + h_2)}{h_1 U}$$

根据

$$\Delta E_p = -W_{电}$$

又

$$W_{电} = \frac{U}{d}qh_2$$

联立解得

$$\Delta E_p = -\frac{mgh_2(h_1+h_2)}{h_1}$$

(3)新油滴匀速运动速度的大小和方向.

油滴 B 与油滴 A 合并后,新油滴的质量为 $2m$,新油滴所受电场力

$$F' = \frac{Uq'}{d} = \frac{mg(h_1+h_2)}{h_1}$$

若 $F' > 2mg$,即

$$h_2 > h_1$$

可知

$$v_2 > v_1$$

新油滴速度方向向上,设向上为正方向,根据动量守恒定律

$$mv_2 - mv_1 = 2mv_{共}$$

可得

$$v_{共} > 0$$

新油滴向上加速,达到平衡时

$$2mg + k\cdot(2m)^{\frac{1}{3}}v = F'$$

解得速度大小为

$$v = \frac{h_2 - h_1}{\sqrt[3]{2t}}$$

速度方向向上;

若 $F' < 2mg$,即

$$h_1 > h_2$$

可知

$$v_2 < v_1$$

设向下为正方向,根据动量守恒定律

$$mv_1 - mv_2 = 2mv'_{共}$$

可知

$$v'_{共} > 0$$

新油滴向下加速,达到平衡时

$$2mg = F' + k\cdot(2m)^{\frac{1}{3}}v'$$

解得速度大小为

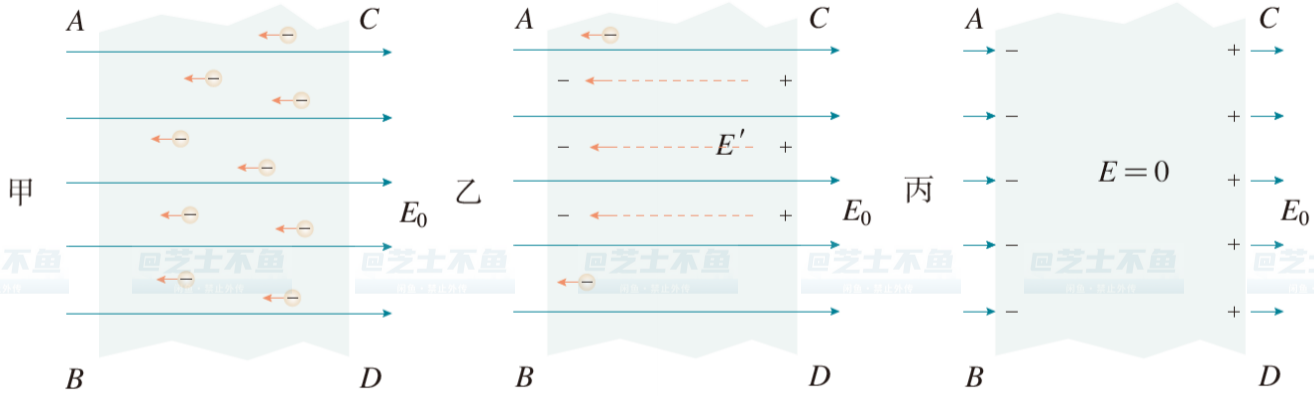
$$v' = \frac{h_1 - h_2}{\sqrt[3]{2t}}$$

速度方向向下.

八、静电的防止与利用

(一)静电平衡

如图甲,把一个不带电的金属导体$ABCD$放到电场强度为E_0的电场中.由于静电感应,在导体AB侧的平面上将感应出负电荷,在CD侧的平面上将感应出正电荷.导体两侧出现的正、负电荷在导体内部产生与电场强度E_0方向相反的电场,其电场强度为E'(图乙).这两个电场叠加,使导体内部的电场减弱.在叠加后的电场作用下,仍有自由电子不断运动,直到导体内部各点的电场强度$E=0$为止(图丙),导体内的自由电子不再发生定向移动.这时我们说,导体达到静电平衡状态.处于静电平衡状态的导体,其内部的电场强度处处为0.



(二)尖端放电

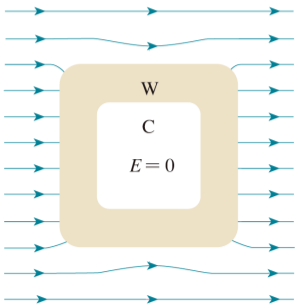
静电平衡时,导体内部没有净剩电荷,电荷只分布在导体的外表面.并且在导体外表面,越尖锐的位置,电荷的密度(单位面积的电荷量)越大,周围的电场强度越大.

在一定条件下,导体尖端周围的强电场足以使空气中残留的带电粒子发生剧烈运动,并与空气分子碰撞从而使空气分子中的正负电荷分离.这个现象叫作空气的电离.中性的分子电离后变成带负电的自由电子和失去电子而带正电的离子.这些带电粒子在强电场的作用下加速,撞击空气中的分子,使它们进一步电离,产生更多的带电粒子.那些所带电荷与导体尖端的电荷符号相反的粒子,由于被吸引而奔向尖端,与尖端上的电荷中和,这相当于导体从尖端失去电荷.这种现象叫作尖端放电.

将尖锐的金属棒安装在建筑物的顶端,用粗导线与埋在地下的金属板连接,保持与大地的良好接触,就成为避雷针.当带电的雷雨云接近建筑物时,由于静电感应,金属棒出现与云层相反的电荷.通过尖端放电,这些电荷不断向大气释放,中和空气中的电荷,达到避免雷击的目的.尖端放电会导致高压设备上电能的损失,所以高压设备中导体的表面应该尽量光滑.夜间高压线周围有时会出现一层绿色光晕,俗称电晕,这是一种微弱的放电现象.

(三)静电屏蔽

处于静电平衡状态的导体内部没有电荷,电荷只分布在导体的外表面.我们讨论带空腔的导体.静电平衡时,内表面没有电荷,导体壳壁W内的电场强度为0,即电场线只能在空腔C之外,不会进入空腔之内.所以导体壳内空腔里的电场强度也处处为0.无论导体外部电场是什么样的,导体内部都不会有电场.导体壳的这种性质在技术上很有实用价值.把一个电学仪器放在封闭的金属壳里,即使壳外有电场,但由于壳内电场强度保持为0,外电场对壳内的仪器不会产生影响.金属壳的这种作用叫作静电屏蔽.



实现静电屏蔽不一定要用密封的金属容器,金属网也能起到屏蔽作用.野外高压输电线受到雷击的

可能性很大,所以在三条输电线上方还有两条导线,它们与大地相连,形成一个稀疏的金属“网”,把高压线屏蔽起来,使其免遭雷击.

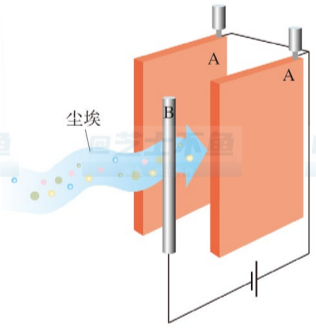
(四)静电吸附

在电场中,带电粒子受到静电力的作用,向着电极运动,最后会被吸附在电极上.这一原理在生产技术上被广泛应用.

1.静电除尘

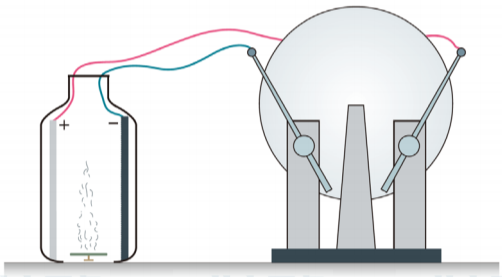
设法使空气中的尘埃带电,在静电力作用下,尘埃到达电极而被收集起来,这就是静电除尘.静电除尘用于粉尘较多的各种场所,除去有害的微粒,或者回收物资,如回收水泥粉尘.

静电除尘器由板状收集器A和线状电离器B组成.A接到几千伏高压电源的正极,B接到高压电源的负极,它们之间有很强的电场,而且距B越近,电场强度越大.B附近的空气中的气体分子更容易被电离,成为正离子和电子.正离子被吸到B上,得到电子,又成为分子.电子在向着正极A运动的过程中,遇到烟气中的粉尘,使粉尘带负电.粉尘被吸附到正极A上,最后在重力的作用下落入下面的漏斗中.



课本第 22 页例题

在一次科学晚会上,一位老师表演了一个“魔术”:如图,一个没有底的空塑料瓶上固定着一根铁锯条和一块易拉罐(金属)片,把它们分别跟静电起电机的两极相连.在塑料瓶里放一盘点燃的蚊香,很快就看见整个透明塑料瓶里烟雾缭绕.摇动起电机,顿时塑料瓶清澈透明,停止摇动,又是烟雾缭绕.起电机摇动时,塑料瓶内哪里电场强度最大?是锯条附近还是金属片附近?若锯条接电源负极,金属片接正极,这些烟尘最终到哪里去了?



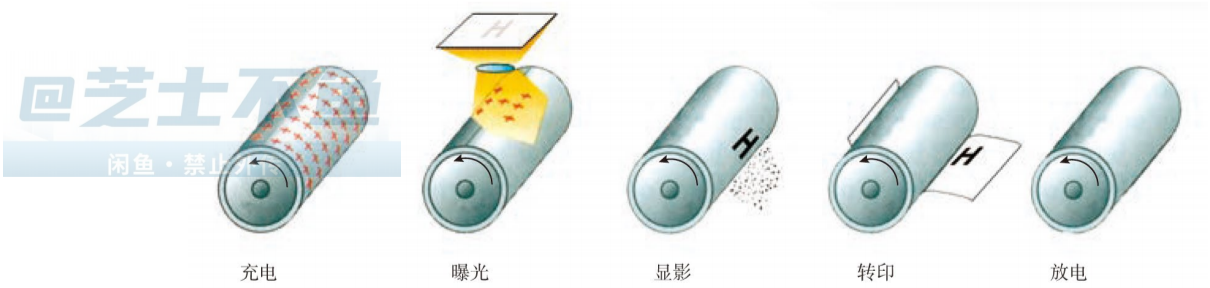
起电机摇动时,锯条附近电场强度最大.空气被电离后形成的自由电子会附着在烟尘上,这些被自由电子附着的烟尘最终会到接正极的金属片上.

2.静电喷漆

接负高压的涂料雾化器喷出的油漆微粒带负电,在静电力作用下,这些微粒向着作为正极的工件运动,并沉积在工件的表面,完成喷漆工作.

3.静电复印

复印机的核心部件是有机光导体鼓,它是一个金属圆柱,表面涂覆有机光导体(OPC).没有光照时,OPC是绝缘体,受到光照时变成导体.复印机复印的工作过程如图所示.



九、静电力做功的特点

(一)静电力是保守力

静电力是保守力,静电场是保守力场,静电力所做的功与电荷经过的路径无关,只与起始位置和终止位置有关.利用库仑定律和叠加原理证明静电场力是保守力.

点电荷的场中移动点电荷q_0从$\vec{r}$到$\vec{r}+d\vec{r}$,电场做的功

$$dW=q_0\vec{E}\cdot d\vec{l}=\frac{q_0q}{4\pi\varepsilon_0r^2}\vec{e}_r\cdot d\vec{l}$$

知$\vec{e}_r\cdot d\vec{l}=dl\cos\theta=dr$,故点电荷$q_0$从$A$到$B$点,电场所做的功为

$$W=\int_A^B dW=\int_{r_A}^{r_B}\frac{q_0q}{4\pi\varepsilon_0r^2}dr=\frac{q_0q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_A}-\frac{1}{r_B}\right)$$

对于由多个静止点电荷组成的系统或静止的连续带电体,可看成是由无数电荷元组成的点电荷系.由场强叠加原理有

$$\vec{E}=\sum_{i=1}^{n}\vec{E}_i$$

对于点电荷系的电场力所做的功,等于组成此点电荷系的各点电荷的电场力所做功的代数和,即

$$W=q_0\int_l\vec{E}\cdot d\vec{r}=q_0\int_l\left(\sum_{i=1}^{n}\vec{E}_i\right)\cdot d\vec{r}=q_0\sum_{i=1}^{n}\int_l\vec{E}_i\cdot d\vec{r}$$

上式中每一项都与路径无关,所以它们的代数和也必然与路径无关.

(二)静电场的环路定理

场强度沿任意闭合路径的线积分等于零.

$$\oint_L\vec{E}\cdot d\vec{l}=0$$

环路定理可以用于检验一个电场是不是静电场.

十、电势能和电势

(一)电势能

电荷在电场中具有势能,称为电势能,用E_p表示.

用W_{AB}表示电荷由A点运动到B点静电力所做的功,E_{pA}和E_{pB}分别表示电荷在A点和B点的电势能,它们之间的关系为

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

当W_{AB}为正值时,$E_{pA} > E_{pB}$,表明静电力做正功,电势能减少;当W_{AB}为负值时,$E_{pA} < E_{pB}$,表明静电力做负功,电势能增大.

静电力做的功只决定电势能的变化量,不能决定电荷在某场中某点电势能的数值.只有先把电场中某点的电势能规定为0,才能确定电荷在电场中其他点的电势能.由功能关系知,电荷在某点的电势能,等于把它从这点移动到零势能位置时静电力所做的功.通常把电荷在离场源电荷无限远处的电势能规定为0,或把电荷在大地表面的电势能规定为0.电势能是相互作用的电荷所共有的,或者说是电荷对它作用的电场所共有的.说某个电荷的电势能只是一种简略的说法.

(二)电势

1.定义

电荷在电场中某一点的电势能与它的电荷量之比,叫作电场在这一点的电势.若用φ表示电势,用E_p表示电荷q的电势能,则

$$\varphi = \frac{E_p}{q}$$

在国际单位制中,电势的单位是伏特,符号是V.在电场中的某一点,如果电荷量为$1C$的电荷在这点的电势能是$1J$,这一点的电势就是$1V$,即$1V = 1J/C$.

沿电场线的方向电势逐渐降低.沿电场线的方向,电势降低最快.

先规定电场中某处的电势为0,才能确定电场中其他各点的电势.规定零电势点后,电场中各点的电势可以是正值,也可以是负值.电势是标量,正负表示大小,没有方向.理论研究中常取离场源电荷无限远处的电势为0,在实际应用中常取大地的电势为0.

2.决定式推导

由电势的定义及功能关系知点电荷q_0在距离点电荷r处产生的电势为

$$\varphi = \frac{\int_r^{+\infty} k\frac{q_0 q}{r^2}dr}{q} = kq_0\int_r^{+\infty}\frac{dr}{r^2} = k\frac{q_0}{r}$$

3.叠加原理

当在一个电场中存在多个电荷时,它们所产生的电势可以通过将每个电荷所产生的电势分别计算出来,然后进行叠加得到整个电场的电势.叠加原理适用于连续分布体系中的电势.在这种情况下,需要使用积分来对电荷的分布进行求和,从而得到整个体系的电势.

4.等势面

在电场的图示中,常用等势面来表示电势的高低,把在电场中电势相同的各点构成的面叫作等势面.

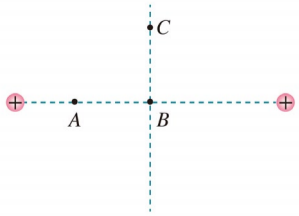
在同一个等势面上,任何两点的电势都相等.所以,在同一个等势面上移动电荷时,静电力不做功.由此可知,等势面一定跟电场线垂直,即跟电场强度的方向垂直.这是因为,假如不垂直,电场强度就有一个沿着等势面的分量,在等势面上移动电荷时静电力就要做功,这与这个面是等势面矛盾.沿着电场线的方向,电势越来越低.所以概括起来就是:电场线跟等势面垂直,并且由电势高的等势面指向电势低的等势面.

电场中两个电势不同的等势面不能相交.假若两个电势不同的等势面相交,相交处的电势就相等,这两个等势面的值就不能不同,所以电场中两个电势不同的等势面不能相交.

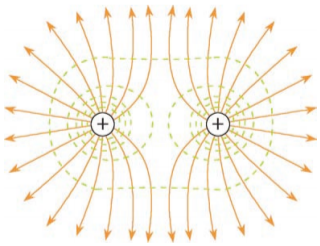
5.例题(课本第 30 页例题)

如图,A、B为一对等量同种电荷连线上的两点(其中B为中点),C为连线中垂线上的一点.今将一个电荷量为q的负点电荷自A沿直线移到B再沿直线移到C,请分析在此过程中该电荷的电势能的变化情况.

芝士不鱼
闲鱼·禁止外传



等量同种正电荷的电场线及等势面的分布如图所示:



沿电场方向电势逐渐降低,而负电荷在电势越低处的电势能越大,所以负电荷自 A 点沿直线移动到 B 点,电势降低,电势能增大;从 B 点沿直线移动到 C 点,电势降低,电势能增大.

十一、电势差

选择不同的位置作为零电势点,电场中某点电势的数值也会改变,但电场中某两点之间电势的差值却保持不变.在电场中,两点之间电势的差值叫作电势差,电势差也叫做电压.设电场中A点的电势为φ_A,B的电势为φ_B,则它们之间的电势差可以表示为

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

也可表示为

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

显然$U_{AB} = -U_{BA}$.

电势差可以是正值,也可以是负值.

(一)静电力做功与电势差的关系

电荷q在电场中从A点移动到B点时,静电力做的功W_{AB}等于电荷在A、B两点的电势能之差.由此可以导出静电力做功与电势差的关系

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

即

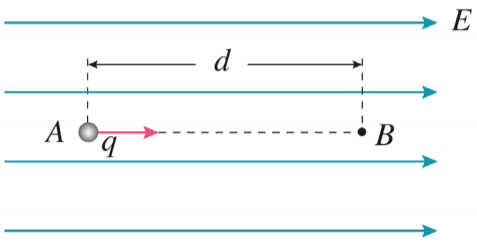
$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$$

(二)电子伏定义(课本第 34 页例题)

在研究微观粒子时常用电子伏 (eV) 作为能量的单位.$1\ eV$ 等于一个电子经过 $1\ V$ 电压加速后所增加的动能,那么,$1\ eV$ 等于多少焦耳?

$1\ eV = 1.6\times10^{-19} C \times 1\ V = 1.6\times10^{-19} J$.

(三)电势差与电场强度的关系



匀强电场的电场强度为E,电荷q从A点移动到B点,静电力做的功W与A、B两点的电势差U_{AB}的关系为$W_{AB} = qU_{AB}$.从q所受的静电力来计算功,静电力为$F = qE$.在匀强电场中,电荷q所受的静电力F是恒力,

所做的功为$W = Fd = qEd$.比较两个计算结果得到

$$U_{AB} = Ed$$

匀强电场中两点间的电势差等于电场强度与这两点沿电场方向的距离的乘积.
电场强度与电势差的关系可以写作

闲鱼·禁止外传

$$E = \frac{U_{AB}}{d}$$

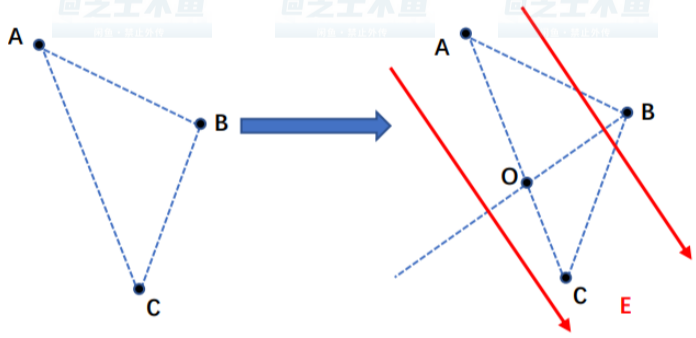
其意义是:在匀强电场中,电场强度的大小等于两点之间的电势差与两点沿电场强度方向的距离之比,即电场强度在数值上等于沿电场方向单位距离上降低的电势.

此关系式可以得到电场强度的单位是伏每米.这个单位与牛每库相同.即$1V/m = 1N/C$.

上式表明,两相邻等势线之间的电势差U相同时,电场强度E越大的地方,两相邻等势线之间的距离d越小,故电场线较密的地方等势线也较密的原因.

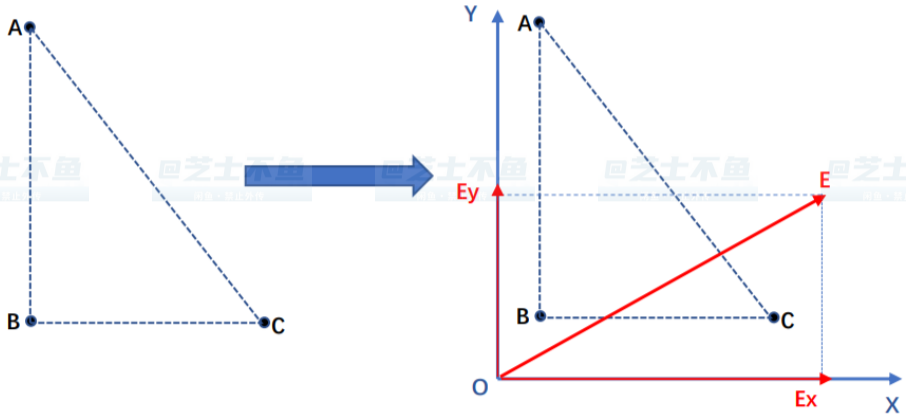
(四)由三点电势确定电场强度

1.电势等分法



如果题目中给出三个点的电势,找到两个电势相等的点,做连接两个电势相等的点的直线,做该直线的垂线,该垂线就是电场线,最后依据电势的高低判断电场线方向.上图中B点的电势处于A、C两点的电势之间,A、C连线上一定有与B点相等电势的O点,根据匀强电场电势的升降和位移成比例找到O点,连接OB,做直线OB的垂线,垂线即为电场线,最后根据三点的电势高低确定电场线方向.

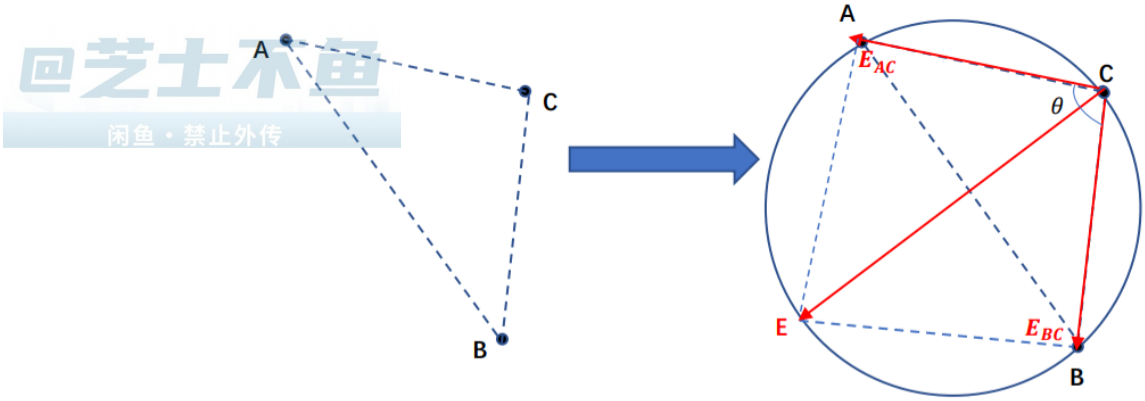
2.正交分解法



首先确定x、y方向的电势,求出x、y两个方向的电势差.

在x轴方向电场强度的分量为$E_x = \frac{U_x}{d_x}$,在y轴方向电场强度的分量$E_y = \frac{U_y}{d_y}$,则合场强为$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$.

3.投影合成法



(1)确定CA与CB的夹角θ.(C点电势最高)

(2)确定场强沿着CA、CB方向的投影$E_{AC}=\dfrac{U_{AC}}{|AC|}$、$E_{BC}=\dfrac{U_{BC}}{|BC|}$.

(3)合场强为$E=\dfrac{\sqrt{E_{AC}^2+E_{BC}^2-2E_{AC}E_{BC}\cos\theta}}{\sin\theta}$,上图所示 E 为圆的直径.

(4)结论:实际场强E必是两个投影组成的三角形的外接圆的直径.

(五)利用静电计比较电势差的大小

把静电计的金属球与一个导体连接,金属外壳与另一个导体连接(或者金属外壳与另一个导体同时接地),从指针偏转角度的大小可以推知两个导体间电势差的大小.

十二、电容器与电容

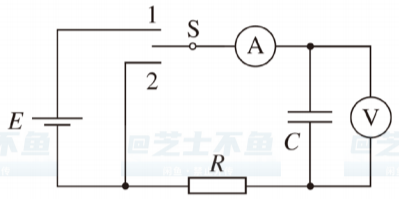
(一)定义

电容器是一种重要的电学元件.在两个相距很近的平行金属板中间夹上一层绝缘物质,即电介质,就组成一个最简单的电容器,叫作平行板电容器.这两个金属板叫作电容器的极板.实际上,任何两个彼此绝缘又相距很近的导体,都可以看成一个电容器.

电容器所带的电荷量Q指一个极板所带电荷量的绝对值.

(二)电容器的充放电

1.实验:观察电容器的充放电现象



电容器的充、放电

把直流电源、电阻、电容器、电流表、数字电压表以及单刀双掷开关组装成上图所示的实验电路.把开关S接1,此时电源给电容器充电.在充电过程中,可以看到电压表示数迅速增大,随后逐渐稳定在某一数值,表示电容器两极板具有一定的电势差.通过观察电流表指针的偏转方向可以知道,充电时电流由电源的正极流向电容器的正极板.同时,电流从电容器的负极板流向电源的负极.

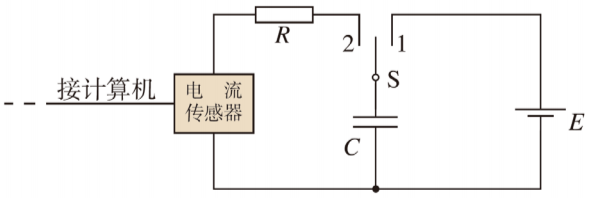
随着两极板之间电势差的增大,充电电流逐渐减小至0,此时电容器两极板带有一定的等量异种电荷.即使断开电源,两极板上的电荷由于相互吸引而仍然被保存在电容器中.把开关S接2,电容器对电阻R放电.观察电流表可以知道,放电电流由电容器的正极板经过电阻R流向电容器的负极板,正负电荷中和.此时两极板所带的电荷量减小,电势差减小,放电电流也减小,最后两极板电势差以及放电电流都等于0.

电容器充电的过程中,两极板的电荷量增加,极板间的电场强度增大,电源的能量不断储存在电容器中;放电的过程中,电容器把储存的能量通过电流做功转化为电路中其他形式的能量.

2.实验:用传感器观察电容器的放电过程

电流传感器可以测量电流并捕捉到瞬间的电流变化.此外,由于它与计算机相连,还能显示出电流随时间变化的$I-t$图像.

闲鱼·禁止外传



观察电容器放电的电路图

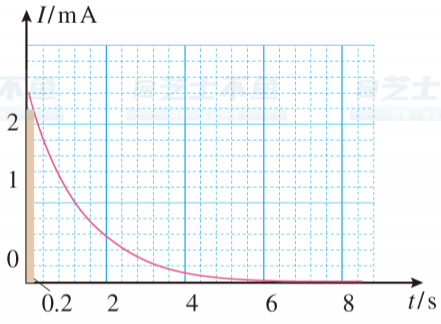
按照上图连接电路.电源电压为直流$8\ V$,电容器可选几十微法的电解电容器.先使开关S与1端相连,电源向电容器充电,这个过程可在短时间内完成.然后把开关S掷向2端,电容器通过电阻R放电,传感器将电流信息传入计算机,屏幕上显示出电流随时间变化的$I-t$图像.一位同学得到的$I-t$图像如下图所示,电源电压为$8\ V$.

(1)在图中画一个竖立的狭长矩形,它的面积的物理意义是什么?

矩形的面积表示在$0.2\ s$内电容器放出的电荷量.

(2)怎样根据$I-t$图像估算电容器在全部放电过程中释放的电荷量?试着算一算.

用数方格的方法估算电容器在全部放电过程中释放的电荷量,方法是数小方格的个数,不足半个舍去,半个以上记一个.图中每个小方格表示$8\times10^{-5}C$,曲线与坐标轴围成的面积中有43个小方格,电容器释放的电荷量约为$3.44\times10^{-3}C$.(本题小方格个数在$42\sim45$范围内均视为正确,以对应的小方格数算出的电荷量也视为正确)



一个电容器放电的I–t图像

如果要测绘充电时的$I-t$图像,应该怎样连接电路?怎样进行测量?得到的$I-t$图像可能是什么形状?

把电源E、开关S、电容器连成电路,闭合开关S,电源给电容器充电,传感器将电流信息传入计算机,屏幕上显示与放电时的$I-t$图像类似的充电时的$I-t$图像.

(三)电容

1.定义式

电容器所带的电荷量Q与电容器两极板之间的电势差U之比,叫作电容器的电容.用C表示,即

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

上式表示电容器的电容在数值上等于使两极板间的电势差为$1\ V$时电容器需要带的电荷量.电荷量越大,表示电容器 0 的电容越大.不同的电容器,电容一般不同,电容表征了电容器储存电荷的特性.

电容器接电源时U不变,不接电源时Q不变.

2.平行板电容器的电容决定式

当平行板电容器的两极板之间是真空时,电容C与极板的正对面积S、极板间的距离d的关系为

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

式中k为静电力常量.

当两极板之间充满同一种介质时,电容变大为真空时的ε_r倍,即

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

ε_r是一个常数,与电介质的性质有关,叫作电介质的相对介电常数.

3.单位

在国际单位制中,电容的单位是法拉,简称法,符号是F.一个电容器两极板之间的电势差是$1\ V$时,所带的电荷量是$1\ C$,这个电容器的电容就是$1\ F$.实际中常用的单位还有微法(μF)和皮法(pF),它们之间的换算关系为

$$1\ \mu F=10^{-6}\ F$$

$$1\ pF=10^{-12}\ F$$

4.工作电压与击穿电压

加在电容器两极板上的电压不能超过某一限度,超过这个限度电介质将被击穿使电容器损坏.这个极限电压叫作击穿电压.电容器外壳上标的是工作电压,或称额定电压,这个数值比击穿电压低.

(四)常用电容器

常用的电容器,从构造上看,可以分为固定电容器和可变电容器两类.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.

以聚苯乙烯薄膜为电介质,把两层铝箔隔开,卷起来,就制成了聚苯乙烯电容器.改变铝箔的面积和薄膜的厚度,可以制成不同电容的聚苯乙烯电容器.以陶瓷为电介质的固定电容器也很多.

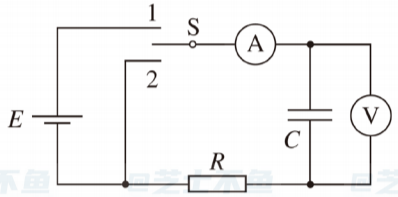
电解电容器是用铝箔作为一个极板,用铝箔上很薄的一层氧化膜为电介质,用浸过电解液的纸作为另一个极板(要靠另一片铝箔与外部引线连接)制成的.由于氧化膜很薄,所以电容较大.

可变电容器由两组铝片组成,它的电容是可以改变的.固定的一组铝片叫作定片,可以转动的一组铝片叫作动片.转动动片,使两组铝片的正对面积发生变化,电容就随着改变.

超级电容器是 20 世纪 70 年代根据电化学原理研发的一种新型电容器,它的出现使电容器的容量得到了巨大的提升.超级电容器的充电时间短,储存电能多,放电功率大,使用寿命长.这些优点展现了它作为新型动力电源的广阔发展前景.

(五)电容器的功率

电容器充放电原理图如下图所示,试求电容器充电时的电功率(放电时同理).



设电源内阻为r.

知

$$U=E-Ir$$

则

$$dU=-rdI$$

由电流的定义知

$$I=\frac{dQ}{dt}=C\frac{dU}{dt}$$

代入$dU=-rdI$有

芝士不鱼
闲鱼·禁止外传

$$I=-rC\frac{dI}{dt}$$

变形有

$$-\frac{dt}{rC}=\frac{dI}{I}$$

积分有

$$\ln I=-\frac{1}{rC}t+C_0$$

即

$$I=e^{-\frac{1}{rC}t+C_0}$$

$t=0$时,$I=e^{C_0}$,此时有

$$U=E-e^{C_0}r=0$$

解得

$$C_0=\ln\frac{E}{r}$$

故

$$I=e^{-\frac{1}{rC}t+\ln\frac{E}{r}}$$

由功率的定义知

$$P=UI=(E-Ir)I$$

代入得

$$P=\left(E-re^{-\frac{1}{rC}t+\ln\frac{E}{r}}\right)\cdot e^{-\frac{1}{rC}t+\ln\frac{E}{r}}$$

对时间求导有

$$\frac{dP}{dt}=e^{-\frac{1}{rC}t+\ln\frac{E}{r}}\left(\frac{2}{c}e^{-\frac{1}{rC}t+\ln\frac{E}{r}}-\frac{E}{rC}\right)$$

令$\frac{dP}{dt}=0$,解得

$$t=\ln 2\cdot rC$$

当$t\in(0,\ln 2\cdot rC)$时,$\frac{dP}{dt}>0$;当$t\in(\ln 2\cdot rC,+\infty)$时,$\frac{dP}{dt}<0$.

故电容器的功率先增大后减小,在$t=\ln 2\cdot rC$处取得最大值.

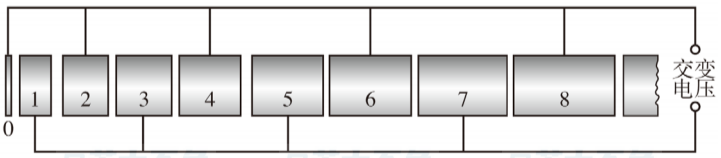
十三、带电粒子在电场中的运动

(一)分析带电粒子加速的问题的两种思路

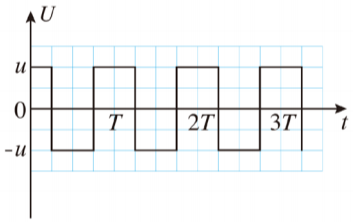
一种是利用牛顿第二定律结合匀速直线运动公式分析;另一种是利用静电力做功结合动能定理来分析.当解决的问题属于匀强电场且涉及运动时间等描述运动过程的物理量时,适合运用前一种思路分析;当问题只涉及位移、速率等动能定理公式中的物理量或非匀强电场情景时,适合运用后一种思路分析.

(二)课本第 44 页例题

如图所示,某装置中,多个横截面积相同的金属圆筒依次排列,其中心轴线在同一直线上,圆筒的长度依照一定的规律依次增加.序号为奇数的圆筒和交变电源的一个极相连,序号为偶数的圆筒和该电源的另一个极相连.



交变电源两极间电势差的变化规律如图所示.在$t=0$时,奇数圆筒相对偶数圆筒的电势差为正值,此时位于和偶数圆筒相连的金属圆板(序号为0)中央的一个电子,在圆板和圆筒1之间的电场中由静止开始加速,沿中心轴线冲进圆筒1.



为使电子运动到圆筒与圆筒之间各个间隙中都能恰好使静电力的方向跟运动方向相同而不断加速,圆筒长度的设计必须遵照一定的规律.若已知电子的质量为m、电子电荷量为e、电压的绝对值为u、周期为T,电子通过圆筒间隙的时间可以忽略不计.则金属圆筒的长度和它的序号之间有什么定量关系?第n个金属圆筒的长度应该是多少?

分析

由于金属导体内部的电场强度等于0,电子在各个金属圆筒内部都不受静电力的作用,它在圆筒内的运动是匀速直线运动,只是在相邻圆筒的间隙中才会被加速.

为使电子在所有相邻圆筒的间隙中都能受到向右的静电力,电子所到达间隙处的电场强度都必须向左.在同一间隙中,电场强度的方向是周期性变化的,每半个周期,电场强度的方向左右变化一次.如果电子匀速穿过每个圆筒运动的时间恰好等于交变电压的周期的一半,它就能踏准节奏,每到达一个间隙,恰好该间隙的电场强度方向向左.由于电子通过每一个间隙所增加的动能都等于eu,由此可知电子在各个圆筒内的动能和速度,而各个圆筒的长度应该等于电子在该圆筒中的速度大小与交变电压的半个周期的乘积.

解答

设电子进入第n个圆筒后的速度为v,根据动能定理有

$$neu=\frac{1}{2}mv^2$$

得

$$v=\sqrt{\frac{2neu}{m}}$$

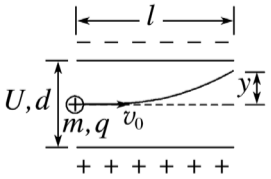
第n个圆筒的长度为

$$l=vt=\frac{vT}{2}=\frac{T}{2m}\sqrt{2neum}$$

圆筒长度跟圆筒序号的平方根$\sqrt{n}$成正比,第n个圆筒的长度是$\frac{T}{2m}\sqrt{2neum}$.

(三)带电粒子在匀强电场中的偏转

1.两个分运动



(1)沿初速度方向做匀速直线运动,$t=\frac{l}{v_0}$(如图).

(2)沿静电力方向做匀加速直线运动

①加速度:$a=\frac{F}{m}=\frac{qE}{m}=\frac{qU}{md}$.

②离开电场时的偏移量:$y=\frac{1}{2}at^2=\frac{qUl^2}{2mdv_0^2}$.

③离开电场时的偏转角:$\tan\theta=\frac{v_y}{v_0}=\frac{qUl}{mdv_0^2}$.

当带电粒子不能飞出电容器时,有$y=\frac{1}{2}at^2=\frac{qU}{2md}t^2,t=\sqrt{\frac{2mdy}{qU}}$.

2.两个结论

(1)不同的带电粒子从静止开始经过同一电场加速后再从同一偏转电场射出时,偏移量和偏转角总是相同的.

证明:在加速电场中有$qU_0=\frac{1}{2}mv_0^2$

在偏转电场偏移量$y=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2}\cdot\frac{qU_1}{md}\cdot\left(\frac{l}{v_0}\right)^2$

偏转角$\theta,\tan\theta=\frac{v_y}{v_0}=\frac{qU_1l}{mdv_0^2}$

得$y=\frac{U_1l^2}{4U_0d},\tan\theta=\frac{U_1l}{2U_0d}$

y、θ均与m、q无关.

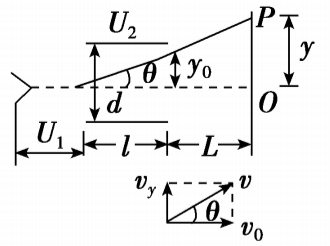
(2)粒子经电场偏转后射出,速度的反向延长线与初速度延长线的交点O为粒子水平位移的中点,即O到偏转电场边缘的距离为偏转极板长度的一半.

3.功能关系

当讨论带电粒子的末速度v时也可以从能量的角度进行求解:$qU_y=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$,其中$U_y=\frac{U}{d}y$,指初、末位置间的电势差.

4.计算粒子打到屏上的位置离屏位置中心的方法

芝士不鱼
闲鱼·禁止外传



(1) $y = y_0 + L\tan\theta$ (L为屏到偏转电场的水平距离);

(2) $y = \left(\frac{l}{2} + L\right)\tan\theta$ (l为电场宽度);

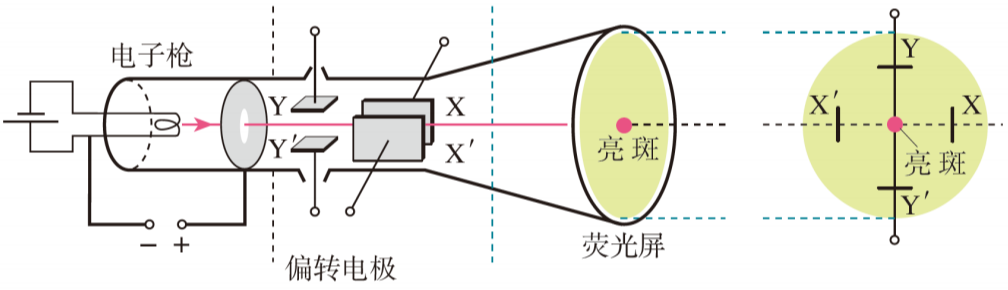
(3) $y = y_0 + v_y \cdot \frac{L}{v_0}$;

(4)根据三角形相似有 $\frac{y}{y_0} = \frac{\frac{l}{2} + L}{\frac{l}{2}}$.

(四)示波管

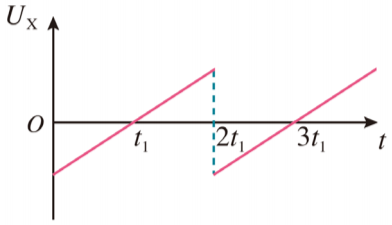
1.原理

示波器是一种可以用来观察电信号随时间变化的情况的电子仪器.示波器的核心部件是示波管,下图是它的原理图.



甲　示波管的结构　　乙　荧光屏（从右向左看）

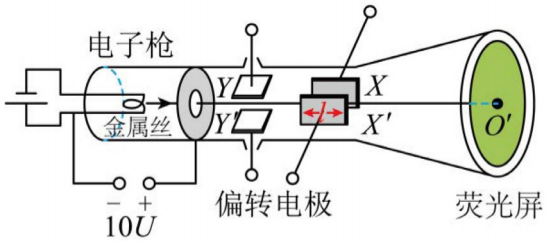
它由电子枪、偏转电极和荧光屏组成,管内抽成真空.电子枪的作用是产生高速飞行的一束电子.如果在偏转电极XX'之间和偏转电极YY'之间都没有加电压,电子束从电子枪射出后沿直线运动,打在荧光屏中心,在那里产生一个亮斑.示波管的YY'偏转电极上加的是待测的信号电压.XX'偏转电极通常接入仪器自身产生的锯齿形电压(如下图所示),叫作扫描电压.如果信号电压是周期性的,并且扫描电压与信号电压的周期相同,那么,就可以在荧光屏上得到待测信号在一个周期内随时间变化的稳定图像了.



2.例题(2023 年 1 月浙江选考)

如图所示,示波管由电子枪竖直方向偏转电极YY'、水平方向偏转电极XX'和荧光屏组成.电极XX'的长度为l、间距为d、极板间电压为U,YY'极板间电压为零,电子枪加速电压为$10U$.电子刚离开金属丝的速度为零,从电子枪射出后沿OO'方向进入偏转电极.已知电子电荷量为e,质量为m,则电子(　　).

芝士不鱼
闲鱼·禁止外传



A.在XX'极板间的加速度大小为$\frac{eU}{m}$

B.打在荧光屏时，动能大小为$11eU$

C.在XX'极板间受到电场力冲量大小为$\sqrt{2meU}$

D.打在荧光屏时,其速度方向与OO'连线夹角α的正切$\tan\alpha=\frac{l}{20d}$

由牛顿第二定律可得,在XX'极板间的加速度大小为

$$a_x=\frac{eE}{m}=\frac{eU}{md}$$

A错误.

电子在电极XX'间运动时,有

$$v_x=a_xt$$

$$t=\frac{l}{d}$$

电子离开电极XX'时的动能为

$$E_k=\frac{1}{2}m\left(v_0^2+v_x^2\right)=eU\left(10+\frac{l^2}{2d^2}\right)$$

电子离开电极XX'后做匀速直线运动,所以打在荧光屏时,动能大小为$eU\left(10+\frac{l^2}{2d^2}\right)$,$B$错误.

在XX'极板间受到电场力的冲量大小

$$I_x=mv_x=\frac{l}{d}\sqrt{\frac{meU}{20}}$$

C错误.

打在荧光屏时,其速度方向与OO'连线夹角α的正切为

$$\tan\alpha=\frac{v_x}{v_0}=\frac{l}{20d}$$

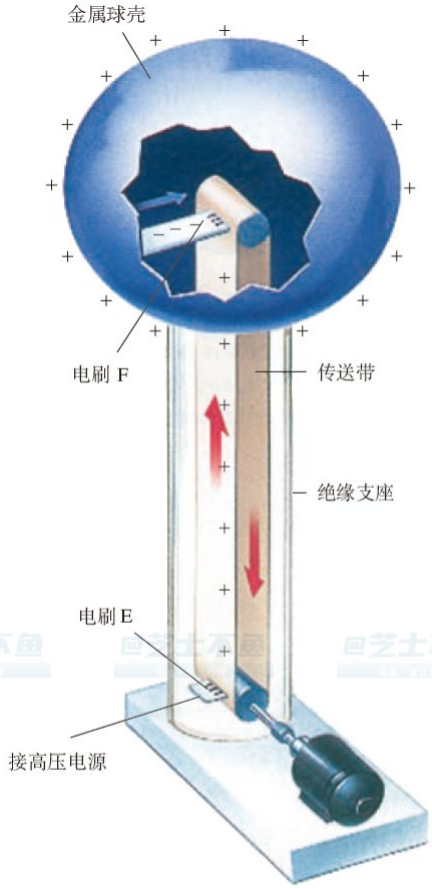
D正确.故选D.

(五)范德格拉夫静电加速器

范德格拉夫静电加速器由两部分组成,一部分是产生高电压的装置,叫作范德格拉夫起电机.另一部分是利用高电压加速带电粒子的加速管.起电机部分的示意图如图所示.金属球壳固定在绝缘支柱顶端,绝缘材料制成的传送带套在两个转轮上,由电动机带动循环运转.E和F是两排金属针(叫作电刷).当电刷E与几万伏的直流高压电源的正极接通时,E与大地之间就有几万伏的电势差.由于尖端放电,正电荷被喷射到传送带上,并被传送带带着向上运动.当正电荷到达电刷F附近时,F上被感应出异号电荷.由于尖端放电,F上的负电荷与传送带上的正电荷中和,从而使传送带失去电荷,而F上剩下了正电荷.由于导体带电电荷只能存在于外表面,所以,F上的正电荷立即传到金属壳的外表面.这样,由于传送带的运送,

正电荷不断从直流电源传到球壳的外表面,从而在金属壳与大地之间形成高电压.由于电晕放电、局部尖端放电和漏电等现象,球壳与大地间的电压不能无限制提高.目前可达数百万伏.

带电粒子的加速是在加速管中进行的.加速管安装在起电机的绝缘支柱里面,管内抽成真空.管顶有离子发生装置,即粒子源,底部是靶.粒子源产生的正离子在强电场的作用下,经过加速可以获得很大的动能.由于粒子加速运动的轨迹是直线,这类加速器是一种直线加速器.



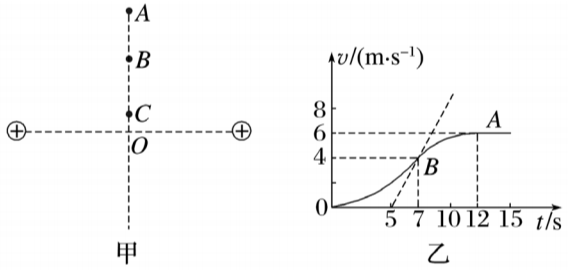
十四、电场中的图像问题

(一)$v-t$图像

根据$v-t$图像的速度变化、斜率变化(即加速度大小的变化),可确定电荷所受静电力的方向与静电力的大小变化情况,进而确定电场的方向、电势的高低及电势能的变化.

例题(2023·重庆市八中检测)

(多选)两个等量同种点电荷固定于光滑水平面上,其连线的中垂线(在水平面内)上有A、B、C三点,如图甲所示,一个电荷量为$2\times10^{-5}C$、质量为$1\,g$的小物块从C点由静止释放,其运动的$v-t$图像如图乙所示,其中B点处为整条图线的切线斜率最大的位置(图中标出了该切线).则下列说法正确的是(　　)



A.小物块带正电

B.A、B两点间的电势差$U_{AB}=-500\ V$

C.小物块由C点到A点电势能先减小再增大

D.B点为中垂线上电场强度最大的点,电场强度$E=100\ V/m$

根据物块运动的$v-t$图像可知,小物块带正电,A正确;

从$v-t$图像可知,A、B两点的速度分别为$v_A=6\ m/s$、$v_B=4\ m/s$,再根据动能定理得

$$qU_{AB}=\frac{1}{2}mv_B^2-\frac{1}{2}mv_A^2$$

解得$U_{AB}=-500\ V$,B正确;

从$v-t$图像可知,由C到A的过程中,物块的速度一直增大,故静电力对物块一直做正功,电势能一直减小,C错误;

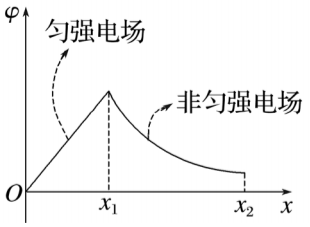
带电粒子在B点的加速度最大,为$a_m=2\ m/s^2$,所受的静电力最大为$F_m=ma_m=0.002\ N$,则电场强度最大值为$E_m=\frac{F_m}{q}=100\ \mathrm{N/C}=100\ V/m$,$D$正确.

(二)$\varphi-x$图像

1.图像斜率的意义

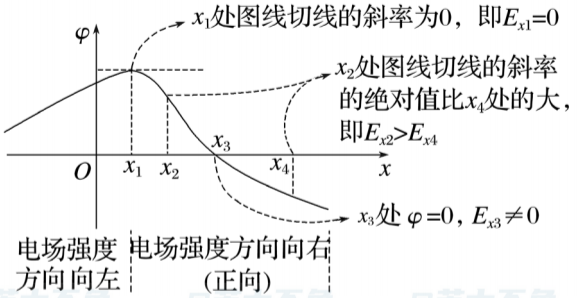
在$\varphi-x$图像中,有$E=\frac{d\varphi}{dx}$.电场强度的大小等于$\varphi-x$图线的切线斜率的绝对值,如果图线是曲线,电场为非匀强电场;如果图线是倾斜的直线,电场为匀强电场.切线的斜率为零时沿x轴方向电场强度为零.

芝士不鱼
闲鱼·禁止外传



2.图像中可提取的信息

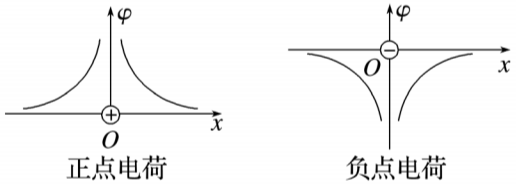
在$\varphi-x$图像中可以直接判断各点电势的高低,并可根据电势大小关系确定电场强度的方向,进而可以判断电荷在电场中的受力方向.



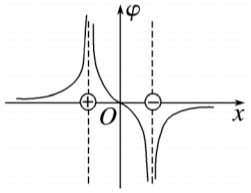
3.电场中常见的$\varphi-x$图像

(1)点电荷的$\varphi-x$图像

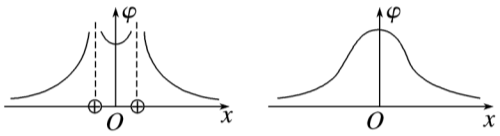
取无限远处电势为零.



(2)两个等量异种点电荷连线上的$\varphi-x$图像

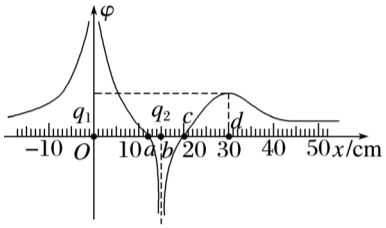


(3)两个等量同种点电荷的$\varphi-x$图像



例题(2023·贵州贵阳市一中高三检测 多选)

如图所示,在x轴上的O点$(x=0)$和b点$(x=15)$分别固定放置两点电荷q_1、q_2,其静电场的电势φ在x轴上分布如图所示,取无穷远处的电势为零,下列说法正确的是(　　)



A.a、c两点的电场强度相同

B.q_1所带电荷量是q_2所带电荷量的 4 倍

C.将一负电荷从a点移到c点,静电力做功为零

D.将一负电荷从c点移到d点,电势能增大

$\varphi-x$图像的斜率的绝对值表示电场强度的大小,斜率的正负表示电场强度的方向,由题图可知,a、c两

点电势相等,但电场强度大小和方向均不同,故A错误;由题图可知,题图中d点图像斜率为零,表明该点的合电场强度为零,而d点到两点电荷q_1、q_2的距离之比为2:1,根据点电荷电场强度公式$E=\frac{kq}{r^2}$可得,q_1、q_2电荷量之比为4:1,故B正确;a、c两点电势相等,电势差为零,负电荷从a点移到c点,静电力做功为零,故C正确;c、d间电场方向向左,负电荷从c点移到d点,静电力做正功,电势能减小,故D错误.答案为 BC.

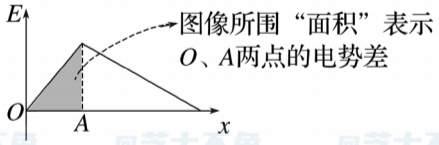
(三)$E-x$图像(电场方向与x轴平行)

1.静电场在x轴上的电场强度E随x的变化关系

若规定x轴正方向为电场强度E的正方向,则$E>0$,电场强度E沿x轴正方向;$E<0$,电场强度E沿x轴负方向.

2.与x轴所围图形面积含义

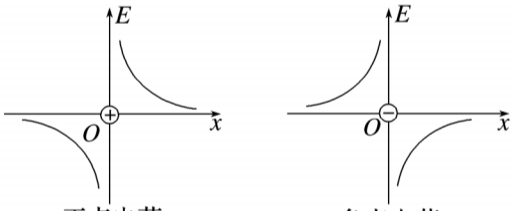
$E-x$图像与x轴所围图形面积含义表示电势差,两点的电势高低根据电场方向判定.在与粒子运动相结合的题目中,可进一步确定粒子的电性、动能变化、电势能变化等情况.



3.电场中常见的$E-x$图像

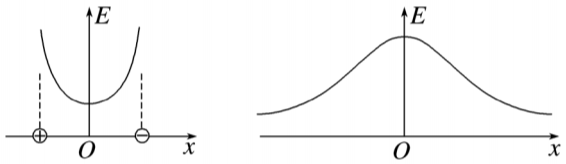
(1)点电荷的$E-x$图像

正点电荷及负点电荷的电场强度E随坐标x变化关系的图像大致如图所示.



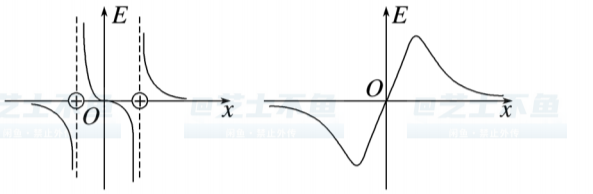
正点电荷　　负点电荷

(2)两个等量异种点电荷的$E-x$图像



两点电荷连线上　　两点电荷连线的中垂线上

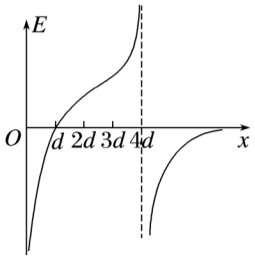
(3)两个等量正点电荷的$E-x$图像



两正点电荷连线上　　两正点电荷连线的中垂线上

例题

x轴上固定着两个点电荷A、B,两点电荷分别位于$x_A=0$,$x_B=4d$处,两者所在区域为真空,在两者连线上某点的电场强度E与该点位置的关系如图所示.选取 x 轴正方向为电场强度的正方向,无限远处电势为零.以下说法正确的是(　　)



A.点电荷A、B分别带正电和负电
B.A、B所带电荷量的绝对值之比为1:3
C.$x=d$处电势最高且为零
D.将电子从$x=5d$处无初速度释放,其电势能一直减小
若点电荷A、B带异种电荷,则在x轴上$0\sim4d$区间的电场方向唯一不变化,即水平向右或水平向左,故 A 错误;由题图可知在$x=d$处电场强度为零,即$\frac{kQ_A}{d^2}=\frac{kQ_B}{9d^2}$,解得$\frac{Q_A}{Q_B}=\frac{1}{9}$,故 B 错误;$0\sim d$区间,电场方向沿$x$轴负方向,$d\sim4d$区间电场方向沿$x$轴正方向,可知$0\sim4d$区间,从$x=d$处沿两侧电势降低,无限远处电势为零,故$x=d$处电势大于零;$x\geq4d$的区域内,电场方向指向$x$轴负方向,所以沿$x$轴负方向电势逐渐降低,无限远处电势为零,故$x\geq4d$的区域内的电势都小于零.所以$x=d$处电势最高且大于零,故 C 错误;$x\geq5d$的区域内电场方向沿$x$轴负方向,所以电子释放后受水平向右的力,静电力一直做正功,电势能一直减小,故 D 正确.答案为 D.

(四)E_p-x图像、E_k-x图像

1.E_p-x图像

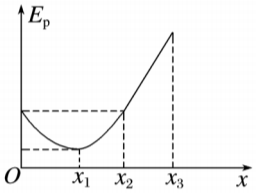
由静电力做功与电势能变化关系$F_{电}x=E_{p1}-E_{p2}=-\Delta E_p$知$E_p-x$图像的切线斜率$k=\frac{dE_p}{dx}$,其绝对值等于静电力大小,正负代表静电力的方向.

2.E_k-x图像

当带电体只有静电力做功,由动能定理$F_{电}x=E_k-E_{k_0}=\Delta E_k$知$E_k-x$图像的切线斜率$k=\frac{dE_k}{dx}$,斜率表示静电力.

例题(2023·北京北师大实验中学高三检测)

一带负电的粒子只在静电力作用下沿x轴正方向运动,其电势能E_p随位移x变化的关系如图所示,其中$0\sim x_2$段是关于直线$x=x_1$对称的曲线,$x_2\sim x_3$段是直线,则下列说法正确的是(　　)



A.x_1处电场强度最小，但不为零
B.粒子在$0\sim x_2$段做匀变速运动,$x_2\sim x_3$段做匀速直线运动
C.若x_1、x_3处电势为φ_1、φ_3,则$\varphi_1<\varphi_3$
D.$x_2\sim x_3$段的电场强度大小、方向均不变
E_p-x图像的斜率表示粒子所受静电力F,根据$F=qE$可知x_1处电场强度最小且为零,选项 A 错误;粒子在$0\sim x_2$段切线的斜率发生变化,静电力发生变化,所以加速度也在变化,做变速运动,$x_2\sim x_3$段斜率不变,所以做匀变速直线运动,选项B错误;带负电的粒子从x_1到x_3的过程中电势能增加,说明电势降低,即$\varphi_1>\varphi_3$,选项 C 错误;$x_2\sim x_3$段斜率不变,所以这段电场强度大小、方向均不变,选项 D 正确.答案为 D.