

电 工 基 础

(上 册)

吴 一 主编



空军第二航空学院

电 工 基 础

上册

主编 吴一

空军第二航空学院

电 工 基 础
上 册

吴 一 主 编

*

空军第二航空学院 出版
空军第二航空学院印刷厂 印刷

*

787×1092毫米 16开本 印张:23 字数:254800
1993年2月第一版 1993年2月第一次印刷

前 言

本书是根据我院现行中专电工基础课教学大纲编写的。结合近几年的教学实践，在编写中，一方面注意了教材的学科体系，另一方面注意突出中专教学层次的特点。教材内容的选取以专业教学需要够用为度。力求突出重点，加强理论联系实际，用物理概念阐明问题。在教材体系的安排上注意了与数学和物理知识的衔接。为了使学员对重要内容和结论容易掌握和理解，书中配有较多的例题，每章后面有小结。在文字的叙述上，力求做到通俗易懂。

全书分为上、下两册。上册由吴一同志主编，并负责编写第一章到第六章；赵梅同志负责编写第七章。下册由陈明文同志主编，并负责编写第八章到第十二章以及附录；张旻同志负责编写第十三章到第十五章。程宝柱同志担任本书的主审。

在本书编写过程中，广泛征求了教研室同志的意见，得到了很多有益的启示，在此表示感谢。由于编者水平有限，书中错漏和不妥之处难免，请读者批评指正。

编 者

1993年2月

目 录

第一章 静电场

§ 1—1 电荷 库仑定律	(1)
§ 1—2 电场 电场强度	(3)
§ 1—3 电位 电位差	(6)
§ 1—4 带电粒子在匀强电场中的运动	(9)
§ 1—5 静电场中的导体	(11)
§ 1—6 静电场中的电介质	(14)
小结	(16)
习题	(17)

第二章 电路的基本概念和基本定律

§ 2—1 电路的组成和作用	(20)
§ 2—2 电路的基本变量	(20)
§ 2—3 电阻 电阻元件	(22)
§ 2—4 电源	(26)
§ 2—5 基尔霍夫定律	(29)
§ 2—6 电功率 电能	(33)
§ 2—7 电气设备的额定值	(36)
小结	(37)
习题	(38)

第三章 直流电路的分析和计算 (一)

§ 3—1 电阻的串联和并联	(42)
§ 3—2 电阻混联电路	(47)
§ 3—3 电位的分析和计算	(52)
§ 3—4 惠斯登电桥	(53)
§ 3—5 电压源与电流源的等效变换	(55)
§ 3—6 叠加定理	(59)
§ 3—7 戴维南定理	(62)
小结	(66)
习题	(67)

第四章 直流电路的分析和计算 (二)

§ 4—1 支路电流法	(77)
-------------------	------

§ 4—2 网孔电流法	(79)
§ 4—3 节点电压法	(81)
小结	(83)
习题	(85)
第五章 磁场 电磁感应	(88)
§ 5—1 磁场的概念	(88)
§ 5—2 磁感应强度 磁通量	(91)
§ 5—3 磁场对电流的作用	(93)
§ 5—4 磁场对运动电荷的作用	(95)
§ 5—5 磁性材料的磁性能	(98)
§ 5—6 磁路及其基本定律	(102)
§ 5—7 电磁感应	(106)
§ 5—8 涡电流	(112)
小结	(114)
习题	(115)
第六章 电感元件和电容元件	(121)
§ 6—1 电感元件	(121)
§ 6—2 耦合电感元件	(124)
§ 6—3 电容元件	(130)
小结	(135)
习题	(135)
第七章 正弦交流电的基本概念	(140)
§ 7—1 正弦交流电的三要素	(140)
§ 7—2 正弦交流电的表示方法	(146)
§ 7—3 同频率正弦电之间的相位关系	(149)
§ 7—4 同频率正弦电的合成	(152)
§ 7—5 纯电阻正弦电路	(156)
§ 7—6 纯电容正弦电路	(159)
§ 7—7 纯电感正弦电路	(164)
小结	(168)
习题	(170)
习题答案	(171)

第一章 静电场

本章主要讨论静止电荷产生的电场——静电场的各种特性，以及导体和电介质在静电场中的电学性质。这些内容是研究电磁现象的重要基础，也是学习后面各章的准备。

§ 1—1 电荷 库仑定律

一、电荷

人类对电的认识，是从静电开始的。在很早的时候，人们就发现用毛皮摩擦过的琥珀，具有吸引轻小物体的本领。后来发现这种现象并不是琥珀所独有的。事实上，两种不同质料的物体，经摩擦后都能吸引羽毛、纸屑等轻小物体。如图 1—1 所示。

物体有了这种吸引轻小物体的性质，就说它带了电，或有了电荷。带电的物体叫带电体。

实验证明，物体所带的电荷只有两种，一种称为正电荷，以“+”号表示，如质子带的电荷就是正电荷。另一种称为负电荷，以“-”号表示，如电子带的就是负电荷。

物体所带电荷的量值叫做电量。常用字母 Q 或 q 表示。电量的单位为库仑，用符号 C 表示。例如，质子带的电量为 $1.602 \times 10^{-19} C$ ，电子带的电量为 $-1.602 \times 10^{-19} C$ 。

到目前为止的所有实验表明，电子和质子是自然界具有的最小电量的粒子，所有带电体所带电量总是电子或质子所带电量的整数倍。

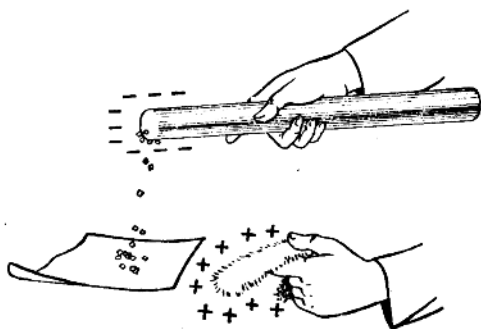


图 1—1 用毛皮摩擦过的胶木棒可吸引纸屑

二、电荷守恒定律

下面根据物质的电结构来说明物体摩擦后带电的原因以及电荷守恒定律。我们知道，组成物质的原子是由带正电的原子核和带负电的核外电子构成的，在正常状态下，物体每个足够大的体积内部都存在着等量的正电荷和负电荷，对外呈现为电中性，即不带电。当两物体由于摩擦作用，使一个物体失去部分电子而带正电时，则参与这种作用的另一物体必然获得部分电子而带负电。并且这两个物体所带正、负电量的代数和为零。

大量的实验表明：若把参与相互作用的几个物体看作一个系统，而这个系统与外界没有电荷交换，那么不管在系统中发生什么样的变化，整个系统电量的代数和始终保持不变。这个结论叫做电荷守恒定律。它是物理学中的一条基本定律。无论在宏观过程中，还是在微观过程中，它都是正确的。

三、库仑定律

电荷与电荷之间有相互作用力。同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。如图 1—2 所示。

电荷之间作用力的定量研究，最早是由法国科学家库仑在 1785 年通过实验总结出来的。库仑实验的结果指出：在真空中，两个点电荷间的作用力跟它们的电量的乘积成正比，跟它们之间的距离的平方成反比，作用力的方向在它们的连线上。这就是库仑定律。其数学表达式为

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

式中 K 为比例系数，在国际单位制中，其值由实验测得为 $K = 9 \times 10^9$ 牛顿·米²/库仑²。这个数值相当于两个各带 1 库仑电量的点电荷相距 1 米时，它们之间的作用力。

上式中当 q_1 和 q_2 是同种电荷时， F 为正，表示排斥力；当 q_1 和 q_2 是异种电荷时， F 为负，表示吸引力。公式 (1—1) 只适用于真空中点电荷相互作用的情况。所谓“点电荷”是带电体的理想模型。在具体问题中，只要带电体本身的大小，相对于带电体之间的距离为很小时，带电体就可以看作为点电荷。

〔例 1—1〕两个点电荷在真空中的距离是 1×10^{-2} 米，其电量分别为 2×10^{-8} 库仑和 -3×10^{-8} 库仑，求它们的相互作用力 F ，并说明 F 是引力还是斥力。

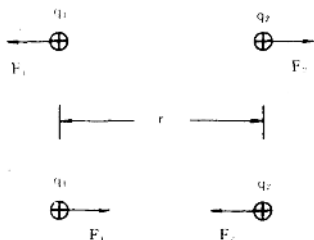


图 1—2 电荷之间的作用力

〔解〕 已知 $q_1 = 2 \times 10^{-8} \text{C}$, $q_2 = -3 \times 10^{-8} \text{C}$, $r = 1 \times 10^{-2} \text{m}$, 由式 (1-1) 得

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-8} \times (-3 \times 10^{-8})}{(1 \times 10^{-2})^2} = -5.4 \times 10^{-2} \text{N}$$

计算结果 F 为负值, 说明 q_1 和 q_2 之间的作用力为吸引力。

§ 1-2 电场 电场强度

一、电场

上一节讨论了点电荷间的相互作用力。那么, 这种相互作用又是怎样得以实现的呢? 近代物理学的发展告诉我们: 凡是有电荷的地方, 四周就存在着电场, 即任何电荷都在自己周围的空间激发电场。而电场的基本性质是, 它对于处在其中的任何其它电荷都有作用力。因此, 电荷与电荷之间是通过电场发生相互作用的。例如, 在图 1-2 中, q_1 和 q_2 都在自己周围的空间激发一个电场, q_2 所受的力 F_2 是 q_1 的场施加给它的, 而 q_1 所受的力 F_1 是 q_2 的场施加给它。电场对电荷的作用力叫做电场力。

如果带电体相对于观察者来说是静止的, 那么在它周围存在的电场就叫做静电场。

静电场有两个重要的性质。

(1) 处于电场中的任何带电体, 都要受到该处电场所施加的电场力作用。

(2) 带电体在电场力作用下移动时, 电场力要对它做功, 这说明电场具有能量。同时, 也反映了电场的物质属性。

下面, 我们将从力和能这两方面, 分别引出描述电场性质的两个重要物理量——电场强度和电位。

二、电场强度

为了定量描述电场的强弱, 我们引入一试验电荷 q_0 ^①, 将它放入电场中, 观察它在电场中的受力情况。实验表明: 在电场中任一给定点处, 试验电荷所受的电场力 F 是和试验电荷的电量 q_0 成正比的。由此可知, 在电场中任一给定点处, 比值 F/q_0 与试验电荷的电量无关, 它只反映了该点电场本身的性质。电场中不同点处, 这个比值一般是不同的。比值大的点处, 电场强, 反之, 电场弱。我们把这个比值定义为电场强度, 简称场强, 用符号 E 来表示。

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1-2)$$

① 试验电荷是带电量很小的点电荷, 把它放入电场中时, 不致于影响原来的电场。

电场强度是一个矢量，我们把正电荷在某点所受电场力的方向规定为该点电场强度的方向。

从式(1-2)可知，电场中某点的电场强度在数值上等于单位电荷在该点所受到的电场力的大小。

电场强度的大小和方向是由电场本身所决定的，与是否有试验电荷以及试验电荷的电量多少无关。引入试验电荷，只是为了量度某点的电场强度。

在国际单位制中，场强的单位为牛顿/库仑或伏特/米。

如果知道了电场中某点的场强 E ，那么电荷 q 在该点所受的电场力就是

$$F = qE \quad (1-3)$$

根据公式(1-1)和(1-2)可以推知，单独一个点电荷 Q 在真空中形成的电场中，在距离 Q 为 r 远的某点处的场强 E 的大小为：

$$E = K \frac{Q}{r^2} \quad (1-4)$$

〔例 1-2〕在点电荷 Q 的电场中某一点 a ，放一电量 $q = 1 \times 10^{-8}$ 库仑的点电荷，两电荷间距离为 1×10^{-1} 米， q 在 a 点受到的电场力为 9×10^{-3} 牛顿。问：①电荷 Q 在 a 点处产生的场强 E 多大？② Q 所带的电量为多少？

〔解〕①根据公式(1-3)，电荷 Q 在 a 点处产生的场强为

$$E = \frac{F}{q} = \frac{9 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-8}} = 9 \times 10^5 \text{ 牛顿 / 库仑}$$

②由公式(1-4)，电荷 Q 所带的电量为

$$Q = \frac{Er^2}{K} = \frac{9 \times 10^5 \times (1 \times 10^{-1})^2}{9 \times 10^9} = 1 \times 10^{-6} \text{ 库仑}$$

三、电力线

为了形象地描绘电场的分布，下面介绍用电力线来图示电场的方法。

如果在电场中作出许多曲线，使这些曲线上每一点的切线方向和该点场强方向一致，那么，这样作出的曲线，叫做电力线。图 1-4 表示电场中的一条电力线。图 1-3 是几种点电荷的电场中电力线的形状。

用电力线描绘电场时，电力线在某点的切线方向为该点的电场方向。电力线的疏密

表示电场的强弱。电力线密集处表示电场强，反之，表示电场弱。

在电场的某一区域里，若各点的场强大小和方向都相同，那么这个区域里的电场叫作匀强电场。匀强电场的电力线是疏密程度均匀，且互相平行的直线。如图 1-5 所示。

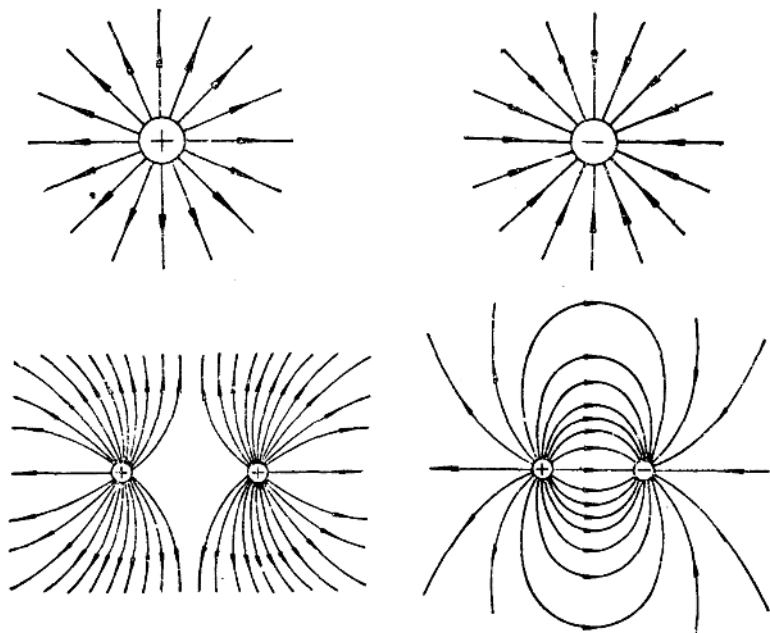


图 1-3 点电荷的电力线

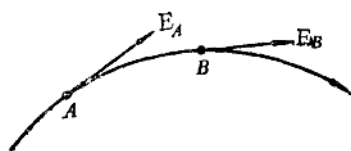


图 1-4 电力线与电场方向的关系

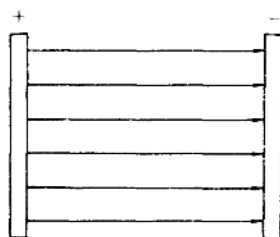


图 1-5 匀强电场的电力线

从以上各图可以看出静电场电力线的特点：

①电力线起自正电荷，止于负电荷，不形成闭合曲线；②任何两条电力线都不相交。

§ 1—3 电位 电位差

一、电位能

前面，我们从电荷在电场中受到力的作用出发，研究了电场的性质。下面，再从能的角度来研究电场的性质。

我们知道，物体在重力场中具有重力势能。同样，电荷在电场中具有电势能，或称为电位能。和重力势能一样，电位能的大小只有相对的意义。要确定电荷在电场中某一点的电位能必须选择一个电位能为零的参考点。参考点的选择是任意的，处理问题时怎样方便就怎样选取。

电荷在电场中某点的电位能在数值上等于把电荷从这一点移到参考点处电场力所作的功。如图 1—6 所示，将一电荷 q_0 放入匀强电场 E 中，设 W_a 和 W_0 分别表示点 a 和 0 的电位能，且设 $W_0=0$ ，即选 0 点为参考点，则电荷 q_0 在 a 点的电位能为

$$W_a = A_{a0} = Fl_{a0} = q_0 El_{a0} \quad (1-5)$$

在国际单位制中，电位能的单位是焦耳，用符号 J 表示。

二、电位

由式 (1—5) 可以看出，电位能 W_a 与 q_0 的大小成正比，因此， W_a 不能直接描述 a 点处电场的性质。但比值 W_a/q_0 却与 q_0 无关，它只决定于电场本身以及 a 点在电场中的位置。显然，对于电场中的不同点，这个比值一般是不同的，它可以反映电场中各点在能量方面的性质。我们把这个比值叫做电位，用 φ 表示。即

$$\varphi_a = \frac{W_a}{q_0} \quad (1-6)$$

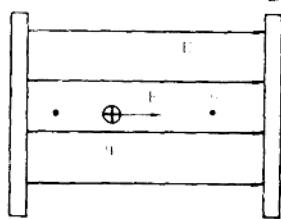


图 1—6 电场力移动电荷做功

上式表明，电场中某点 a 的电位，在数值上等于单位正电荷在该点所具有的电位能。根据式 (1—5)，电位的定义还可以这样叙述：电场中某点 a 的电位，在数值上等于把单位正电荷从该点移到参考点 0 处，电场力所作的功。即

$$\varphi_a = \frac{A_{ao}}{q_o} \quad (1-7)$$

在国际单位制中，电位的单位是伏特，用符号 V 表示。

电位只有大小，没有方向，因此是标量。

电位与电位能一样，也只有相对的意义。只有选定了零电位点以后，才能确定电场中其它各点的电位值。电场中电位为零的位置也就是电荷在该点的电位能为零的位置。在同一问题中，电位能和电位的参考点的选取是一致的。

三、电位差

电场中，任意两点间的电位之差叫做电位差。也叫做电压。用 U 表示。设电场中 a 点的电位为 φ_a ，B 点的电位为 φ_b ，则 a、b 两点间的电位差为

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-8)$$

根据电位的定义，a 和 b 点的电位分别为

$$\varphi_a = \frac{W_a}{q_o} \quad \varphi_b = \frac{W_b}{q_o}$$

将它们代入式 (1-8) 可得

$$U_{ab} = \frac{W_a - W_b}{q_o} = \frac{A_{ab}}{q_o} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 指出，a、b 两点间的电位差等于单位正电荷从 a 点移到 b 点时，电场力所作的功。

若将 (1-9) 与 (1-7) 相比较，不难看出，电场中某点 a 的电位，就等于该点与参考点 o 之间的电位差，即 $\varphi_a = U_{ao}$ 。

电位差的单位也是伏特。

〔例 1-3〕如图 1-7 所示， $U_{ab} = 3V$ ， $U_{bc} = 2V$ ，求①取 c 点为参考点，计算 a、b 两点的电位值，并比较 a、b、c 三点的电位高低；②取 a 点为参考点，计算 b、c 两点的电位值，再比较 a、b、c 三点电位的高低。

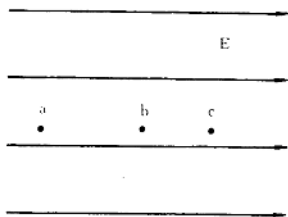


图 1-7 例 1-3 附图

③计算上面两种情况下的电压 U_{ac} 。

〔解〕①取 c 点为参考点, 即 $\varphi_c = 0$

因为 $U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c$

所以 $\varphi_b = U_{bc} + \varphi_c = 2 + 0 = 2V$

又因为 $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$

所以 $\varphi_a = U_{ab} + \varphi_b = 3 + 2 = 5V$

由计算结果可得出 $\varphi_a > \varphi_b > \varphi_c$

②取 a 点为参考点, 即 $\varphi_a = 0$

因为 $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$

所以 $\varphi_b = \varphi_a - U_{ab} = 0 - 3 = -3V$

又因为 $U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c$

所以 $\varphi_c = \varphi_b - U_{bc} = -3 - 2 = -5V$

由计算结果可得出 $\varphi_a > \varphi_b > \varphi_c$

③ $\varphi_c = 0$ 时, $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = 5 - 0 = 5V$

$\varphi_a = 0$ 时, $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = 0 - (-5) = 5V$

通过上面例题可以看出: (1) 不论参考点怎样选取, 顺着电场方向 (或电力线方向), 电位逐点降低; (2) 参考点改变时, 各点电位值也要随之改变, 但任意两点间的电压值是不变的。 (3) 比参考点电位高的电位为正值, 比参考点电位低的电位为负值。

四、匀强电场中电位差与电场强度的关系

场强是跟电场对电荷的作用力相联系的, 电位差是跟电场力移动电荷作功相联系的。正象力和功有联系一样, 场强和电位差也是有联系的。下面, 我们来研究匀强电场中场强和电位差的关系。

前面提到, 沿场强的方向电位越来越低。从图 1—8 可以看到, 除沿场强方向 ab 外, 沿其它方向, 如 ad 、 ac , 电位也都降低。那么, 场强的方向又有什么特殊性呢? 从图中可以看出, 虽然电位沿 ab 、 ad 、 ac 的方向都要降低, 但是沿 ab 方向降低得最快。可见, 场强的方向是指向电位降低最快的方向。

我们再来研究场强和电位差的数量关系。当把电荷 q_0 从 a 点移到 b 点时, 电场力所作的功可写成

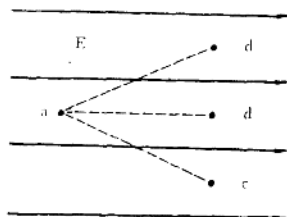


图 1—8 场强的方向指向电位降低最快的方向

$$A_{ab} = Fl_{ab} = q_0 El_{ab}$$

而由式 (1—9) 可得

$$A_{ab} = q_0 U_{ab}$$

比较上面二式，可以得出

$$U_{ab} = EL_{ab} \quad (1-10)$$

这就是说，在匀强电场中，沿场强方向的两点间的电位差等于场强和这两点间距离的乘积。

由上式可以得到场强的另一个单位：伏特/米。伏特/米和牛顿/库仑是相等的。

〔例 1—4〕如图 1—9 所示，金属板 A、B 相距 3 厘米，用电压为 60 伏特的电池组使它们带电后，问它们间的匀强电场的场强 E 多大？方向如何？

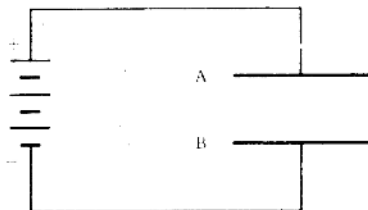


图 1—9 例 1—4 附图

〔解〕：金属板之间的电位差，就是电池组的电压 ($U_{AB}=60V$)，由公式 (1—10) 可计算出场强 E 。

$$E = \frac{U_{AB}}{L_{AB}} = \frac{60}{3 \times 10^{-2}} = 2 \times 10^3 V/m$$

因为 A 板电位高，B 板电位低，所以场强 E 的方向由 A 板指向 B 板。

§ 1—4 带电粒子在匀强电场中的运动

带电粒子在电场中要受到电场力的作用，使其速度的大小和方向都可能发生变化。在现代科学实验和技术设备中，常常根据这个道理，利用电场来改变或控制带电粒子的运动。这种应用大致可分成两种情况：一是利用电场来使带电粒子加速；二是利用电场来使带电粒子的运动轨迹发生偏转。

一、带电粒子在匀强电场中的加速

设有一场强为 E 的匀强电场。带有电量 $+q$ 的粒子，其质量为 m ，以初速度 v_0 进入电场（不计重力作用），且 v_0 与 E 同方向。这时作用在带电粒子上的力为 $F=qE$ ，由于力的大小和方向都不变，所以粒子作匀加速运动。

带电粒子加速器就是利用这一原理使带电粒子加速的。

二、带电粒子在匀强电场中的偏转

如图 1—10 所示，在一对平行金属板两端接上电压为 U 的电池组，在它们之间建立起匀强电场，场强 $E=U/d$ 。设有一些带电量为 q 的粒子以初速度 v_0 进入电场， v_0 与 E 方向垂直。带电粒子在电场中受到一个垂直于 v_0 方向的电场力 $F=qE=qU/d$ 的作用，它们在电场内的运动与物体在重力场中的平抛运动相似。

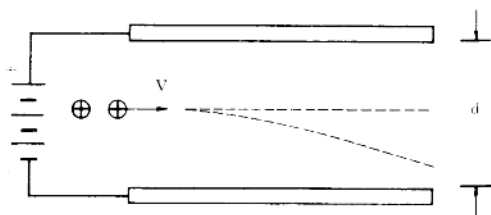


图 1—10 带电粒子在匀强电场中的偏转

带电粒子离开电场后，将在偏离原来运动方向某一角度的方向上做匀速直线运动。

电子射线管就是利用上述原理制成的。电子射线管又称为示波管，它是电子示波器的主要部件，雷达、电视等仪器设备中也都使用它。

下面结合电子射线管的结构示意图，简要介绍一下它的工作原理。如图 1—11 所示，在抽成高度真空的玻璃泡内装有电极，图中 K 是热阴极（利用金属丝炽热时发射电子）， A 为有一小孔的阳极，从阴极 K 发射出的热电子，被阴、阳两极间的电场所加速，当穿过阳极小孔后，就成为一束很窄的快速电子束。这种获得快速电子束的部件叫做电子枪。电子束沿直线射到右端的荧光屏 D 上，会出现一个光点，如图 1—12 (a)。若在水平偏转板 C_1 两端加上电压，电子束通过时便会产生一定的偏移，使荧光屏上的光点偏离原来的位置。如果这电压是迅速交变的，则屏上光点也将在水平方向迅速来回运动，形成一条亮线，如图 1—12 (b) 所示。若同时在垂直偏转板 C_2 两端也加上交变电压，则光点既在水平方向振动，又在垂直方向振动，荧光屏上将出现合成振动图象，如图 1—12 (c)，此图象的具体形状和加在 C_1 、 C_2 上的电压情况有关。因此，可借助于荧光屏上的波形情况，来分析加在偏转板 C_1 、 C_2 上电压的性质；也可在 C_1 、 C_2 上加已知电压，使光点在荧光屏上描绘出我们所要观察的振动合成图形成来。

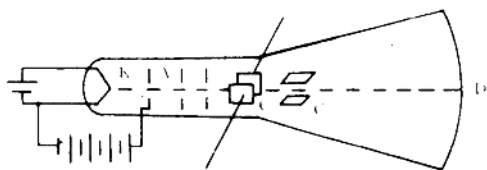


图 1—11 电子射线管构造示意图

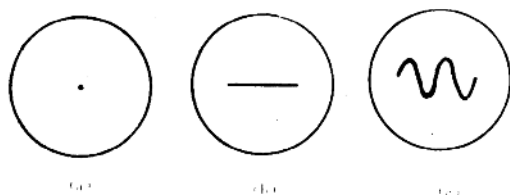


图 1—12 荧光屏上的图形

§ 1—5 静电场中的导体

一、静电感应

金属是最常见的导体，本节讨论金属导体在电场中的性质。

从物质结构看，导体的特征是在其内部有大量可移动的自由电荷。对于金属导体来说，这种自由电荷就是电子。正常情况下（导体不带电或不受外电场影响），由于金属内部含有等量的正、负电荷，所以导体对外不显电性。

当把一块原来不带电的金属导体 A 放入电场中，如图 1—13 所示，导体中的自由电子将在电场力的作用下作定向运动，结果在导体的两个端面上出现等量异性电荷。这种在外电场作用下，引起导体中电荷重新分布而呈现出的带电现象，叫做静电感应现象。

二、静电平衡与静电平衡条件

由于静电感应，在导体 A 的两个端面上出现的等量异性电荷，将在导体内部产生一附加电场 E' ，其方向与外电场 E 方向相反，如图 1—13 所示。这样，导体内部的场强就是 E 和 E' 这两个场强的迭加。开始时， $E' < E$ ，随着感应电荷的不断增多， E' 不断