

电工基础课程

电磁场理论讲义(初稿)

成都电讯工程学院

四大队一队编

1971年9月

第一章 靜电场

- 一、点电荷相互作用定律。
- 二、电场及电场强度。
- 三、点电荷的电场，叠加原理。
- 四、电场图形。
- 五、电介质中的电场，介质极化概念。
- 六、靜电场中的导体。
- 七、电通量和电通量定理。
- 八、电压与电位。
- 九、电位梯度。
- 十、电容的计算。
- 十一、电场能量。

第二章 恒定磁场

- 一、指南针
- 二、直流电流的磁场。
- 三、磁感应强度。
- 四、磁场对电流的作用力。
- 五、电流元的磁场。
- 六、磁线与磁通。
- 七、物质的磁化。
- 八、磁场强度。
- 九、磁压和全电流定律。
- 十、电感的计算。
- 十一、磁场能量。

第一章 静电场

自从劳动人民发现了正电荷和负电荷之后，进一步又发觉在电荷周围存在一种特殊形式的物质，叫做电场，並利用电场来为人民服务，这一章我们研究静电场的一些基本性质。

一、点电荷相互作用定律

伟大领袖毛主席教导我们，“认识的过程：第一步，是开始接触外界事物，属于感觉的阶段。第二步，是综合感觉的材料加以整理和改造，属于概念、判断和推理的阶段”。人们对于电荷、电荷之间的相互作用，即同性相斥和异性相吸等等现象感觉多了，对于这些感觉的材料加以整理和改造，逐步地判断和推理，于是得到了微小带电体之间的相互作用力的规律。（微小带电体又叫做点电荷，如果带电体本身的尺寸和它们之间的距离相比甚小，可以忽略不计，近似地认为带点体是一个“点”，这种情况的带电体可称为点电荷）。这个规律是这样：

在真空中，两个点电荷 q_1 及 q_2 之间的吸（或斥）力的大小(1)和 $q_1 q_2$ 的乘积成正比；(2)和它们间的距离的平方成反比。它们受力的方向在 $q_1 q_2$ 相联结的直线上。用数学计算式表达为：

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

式(1-1)中 f 表示力， r 表示两点电荷间的距离， $q_1 q_2$ 为两点电荷的电量， k 表示为一个比例常数。作用力的方向表示在图(1-1)中。

式(1-1)中的常数 k ，它的大小取决于式(1-1)中各个物理量

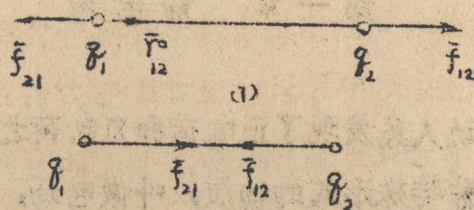


图 1-1

的单位，在实用制单位之下， q 用（库仑）作单位；距离 r 用（米），力 f 用（牛顿），在这种情况下，可以证明 k ：

$$k = 9 \times 10^9 \frac{[\text{牛顿}][\text{米}]}{[\text{库仑}]^2}$$

又为了今后在电工学中分析出来的公式中，避免有因子 4π ，使公式简单起见，又引入一个新的常数 ϵ_0 ，令

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \frac{[\text{牛顿}][\text{米}^2]}{[\text{库仑}]^2}$$

因此 ϵ_0 的数值为

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} = 8.85 \times 10^{-12} \frac{[\text{库仑}]^2}{[\text{牛顿}][\text{米}^2]} \\ &= 8.85 \times 10^{-12} \frac{[\text{法拉}]}{[\text{米}]} \end{aligned}$$

一般 ϵ_0 叫做真空中的介电系数。于是式 (1-1) 可表达为

$$f = \frac{q^1 q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1-2)$$

而且必须强调上面式中各量的单位是用实用制单位。

上述电荷之间的作用力常常把它叫作静电力或库仑力。微波管中阴极发射出来的电子注，由于库仑力的作用，电子注有发散现象，常常需要采取一定的措施，防止电子注的发散。

例1-1 计算氢原子中电子与原子核间的静电作用力与万有引力的比值。

解：氢原子中有一个电子，电子的电荷

$$q_1 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ (库仑)}, \text{ 它是负电荷}$$

电子的质量为

$$m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ (公斤)}$$

氢原子的原子核的电量为

$$q_2 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ (库仑)}, \text{ 它是正电荷。}$$

原子核的质量为

$$M = 1.67 \times 10^{-27} \text{ (公斤)}$$

电子与原子核的距离为

$$r = 0.529 \times 10^{-10} \text{ [米]}$$

电子本身的直径约为 4×10^{-15} 米，原子核的直径约为 10^{-14} 米。和它们距离比较起来，它们是很小，可认为是点电荷。所以电子与原子核之间的库仑力为

$$f_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12}} \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(0.529 \times 10^{-10})^2}$$

$$= 8.23 \times 10^{-8} \text{ (牛顿)}$$

电子与原子核间的万有引力为

$$f = G \frac{mM}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \cdot \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(0.529 \times 10^{-10})^2}$$

$$= 3.64 \times 10^{-47} \text{ (牛顿)}$$

由此库仑力与万有引力的比值为

$$\frac{f_e}{f_m} = 2.27 \times 10^{39}$$

可见库仑力比万有引力大得非常多，故在处理电子和原子核间的相互作用时，，只需考虑库仑作用力。

二、电场及电场强度

毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此人类总得不断地总结经验有所发现、有所发明，有所创造，有所前进。”

为什么电荷之间会存在这种相互作用力？这个问题上，曾经有两种不同的看法。第一种看法认为电荷间的作用力是不通过媒介直接作用的，是“超距”作用。第二种看法是认为电荷周围空间，有一种特殊物质叫做“场”，电荷间的相互作用是通过“场”传递的。毛主席教导我们：“真理的标准只能是社会的实践。”现代无线电波——运动的电磁场——存在、发现和应用，有力地证明了电场这种物质是客观存在的。因而否认了第一种主观唯心论的看法。

首先我们研究相对静止的电荷周围空间的电场——静电场。如微波管中的电子枪和各电极之间、示波管中使电子偏转的极板之间、静

电加速器、以及常见的电容器中都存在这种场。毛主席教导我们：“离开实践的认识是不可能。”对静电场的认识只能通过它的各种表现来观察它的特性。通常用静止电荷引入空间是否受力（因运动电荷还会受磁力的作用，故用静止电荷）来检验电场的存在。并且运用试验电荷在场中各处受力的大小及方向来表示电场的特性。（试验电荷的体积必须充分的小，借它定得的结果才能确实表示电场中每一点上的特性。同时试验电荷的电量还必须相当的小，这样可以尽量地避免对产生电场的带电体的带电情况发生影响。）现在把试验电荷 q 带入由电荷 Q 所产生的电场中，如图1-2所示。试验电荷 q 在场中各点将受到不同的、可是完全确定的力。例如图1-2中， q 在M点受到一个一定大小和方向的力 f_1 ，在N点也受到一定的力 f_2 ，而M和N点上 q 受的力 f_1 及 f_2 可能不同。

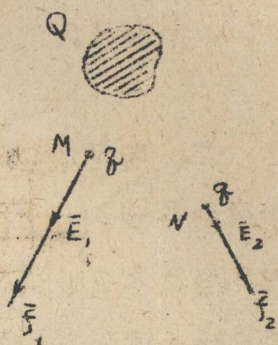


图 1-2

这说明带电体 Q 的空间内每一个地方电场的强弱程度和方向可能是不同的。我们引用电场强度矢量 E 来表示电场各点上的强弱程度和方向。电场强度的大小等于该点的试验电荷受的电场力 f 与试验电荷的电量 q 之比

$$E = \frac{f}{q} \quad (1-3)$$

（或者电场强度是单位正电荷在电场中某点受到的电场力）。电场强度的方向为试验电荷 q 受的电场力 f 的方向。这里有个问题，试验电荷的电性可以正，也可负，受力的方向就有正反两个方向。为

了统一，大家用正的试验电荷受的电场力为标准，作为电场强度的方向。故电场强度矢量为

$$\vec{E} = \frac{\vec{f}}{q} \quad (1-4)$$

式(1-3)和(1-4)中电荷的单位用[库仑]，力用[牛顿]，则电场强度的单位为[牛]/[库]，而最常用的单位为[伏/米]，二者是等效的。

例1-2，如图1-3所示，有一电子，质量为 m ，电荷为 e ，以速度 v_0 垂直的进入均匀电场 $\vec{E}$ 中，电子将受到偏转。试描述电子的运动。

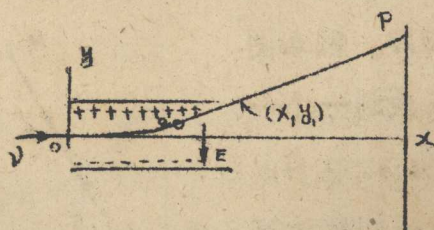


图 1-3

解：在 x 方向的运动方程为 $x = v_0 t$ (1)

在 y 方向上，电子受电场力的作用

$$f = eE = ma \quad \text{所以加速度 } a = \frac{eE}{m}$$

在 y 方向上的运动规律为

$$y = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{eE}{m} \right) t^2 \quad (2)$$

(1)及(2)两方程消去 t 便得到运动轨迹

$$y = \frac{eE}{2mv_0^2} x^2$$

这是一条抛物线。当电子 e 走出电场时便按直线运动，这直线在出射点 (x_1, y_1) 处与抛物线相切。

三、点电荷的电场、叠加原理。

为了再实践，求出点电荷的电场强度是非常必要的。由两点电荷的相互作用定律可以得到点电荷的电场强度为：

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{r}^0 \quad (1-5)$$

在图1-4中表示， $\vec{r}^0$ 为单位矢量， P 点为要确定电场强度的点称为观察点。 q 为产生电场的电荷， q_0 为试验电荷。

点电荷的电场强度与距离的平方反比的关系是一个很有价值的关系。事实上在一个有限体积内（域内）的带电体（或一带电体系），只要总电荷不为零。

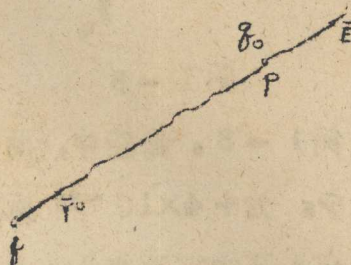


图 1-4

无论电荷分布如何复杂，它附近空间的电场如何复杂，而这个场在很远的地方总是按平方反比关系衰减下去。

实践证明，多个点电荷在空间一点上共同产生的电场强度等于它们分别孤立存在时产生的电场强度的叠加。因电场强度是个矢量，故叠加要用矢量加法。一般称为叠加原理。如图1-5所示。叠加原理用数学式表达如下：

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1^2} \vec{r}_1^0 + \frac{q_2}{r_2^2} \vec{r}_2^0 + \dots + \frac{q_n}{r_n^2} \vec{r}_n^0 \right)$$

(1-6)

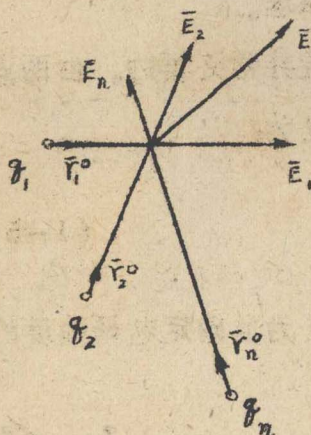


图 1-5

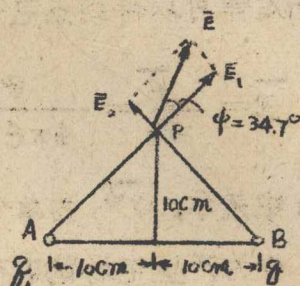


图 1-6

例1-3, 真空中, 两个点电荷 q_1 及 q_2 , q_1 为 $+6 \times 10^{-11}$ 库, q_2 为 $+4 \times 10^{-11}$ 库。 q_1 在A点, q_2 在B点, 相隔20厘米。在AB的垂直平分线上有一点P, 距AB线为10厘米(如图1-6所示)。求P点的电场强度。

解: PA(或PB)的距离 = $\sqrt{(0.1)^2 + (0.1)^2} = \sqrt{0.02}$ 米

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{(PA)^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{6 \times 10^{-11}}{(\sqrt{0.02})^2} = 27 \text{ 伏/米}$$

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{(PB)^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4 \times 10^{-11}}{(\sqrt{0.02})^2} = 18 \text{ 伏/米}$$

E_1 及 E_2 的方向在1-6图中表示, 可看到它们互成 90° 角, 所以合成电场强度为

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sqrt{(27)^2 + (18)^2} = 32.4 \text{ 伏/米。}$$

E 的方向，与 AP 的直线成一角度为

$$\varphi = \arctg \frac{18}{27} = 34.7^\circ$$

既然一个一个点电荷的电场可以用矢量叠加的办法来求得，那末，任何成堆的电荷，只要电荷分布情况知道，我们就可以利用微积分的办法来确定电场。

例 1-4，有一条“无限长”直导线，上面均匀地带了电荷，每单位长度上的电量有 τ 库/米（一般叫做电荷线密度）。试求与导线相距为 a 的地方上 P 点的电场强度如图 1-7。

解：首先用微分方法，把无限长带电直导线分成无限多个点电荷每一个无限小段 dl 的电量为

$$dq = \tau dl$$

而 dq 在 P 点产生的电场强度为：

$$dE = \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

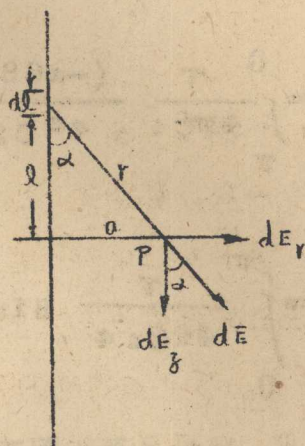


图 1-7

其次用积分方法，把每一点电荷在 P 点产生的电场强度矢量叠加起来。考虑到矢量叠加，先把 dE 分两个分量。

dE 的垂直分量 dE_z 由于对称关系，所有垂直分量相加时互相抵消，因此总的垂直分量

$$E_z = 0$$

• 9 •

$$dE \text{ 的水平分量 } dE_r = \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin\alpha$$

所有水平分量相加起来，要用积分，即

$$E_r = \int dE_r = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin\alpha$$

用变量代换的方法， $r = a \csc\alpha$ $l = a \cot\alpha$ ，
 $dl = -a \csc^2\alpha d\alpha$

当 $l = -\infty$ 时， $\alpha = \pi$ ； $l = \infty$ 时， $\alpha = 0$ ，所以

$$E_r = \int_{\pi}^0 \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \frac{(-a \csc^2\alpha)}{a^2 \csc^2\alpha} (\sin\alpha) d\alpha =$$

$$= \int_0^{\pi} \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\alpha d\alpha = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 a}$$

可见，电场只有径向方向，而且大小与距离 r 成反比。

例 1-5，两条“无限长”细直导线，都均匀带电，一条每单位长度上的电量为 $(+\tau \text{ 库/米})$ ，另一条为 $(-\tau \text{ 库/米})$ ，两条带电导线相隔 $2a$ ，如图 1-8 所示。求 xy 平面内任一点 P 的电场强度。

解：利用 1-4 例中得到的结果，又按叠加原理，求得：

$$\vec{E}_1 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r_1} (\vec{r}_1^0)$$

$$\overline{E}_2 = \frac{-\tau}{2\pi\epsilon_0 r_2} (r_2^0)$$

$$\text{所以 } \overline{E}_1 + \overline{E}_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{\overline{r}_1^0}{r_1} - \frac{\overline{r}_2^0}{r_2} \right)$$

特别指出：在 x 轴上电场强度 $\overline{E}_1$ 及 $\overline{E}_2$ 是同方向（或相反方向），所以总的电场强度可以直接相加

$$\overline{E} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{a+z} + \frac{1}{a-z} \right)$$

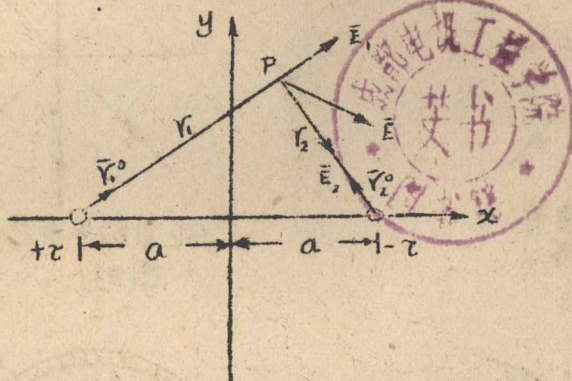


图 1—8

四、 电场图形

电荷分布不同，电场也不一样，为了清楚地把电场情况显示出来，常常利用电力线概念。

在电场中作出一些线，使线上每点的切线与该点电场强度矢量有一致的方向，並在线下用箭头表明线上各点电场强度的一般方向。

如图1-9所示。这样作成的线叫做电力线。

为了使电力线不仅表示电场强度的方向，而且表明电场强度的大小。可以使单位横切面上力线的数目与 E 的大小成正比。于是力线稠密的地方 E 大，稀疏地方 E 小。

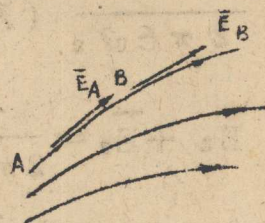
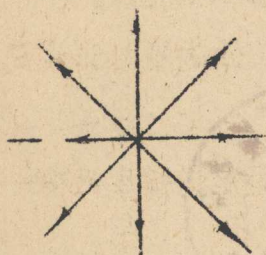
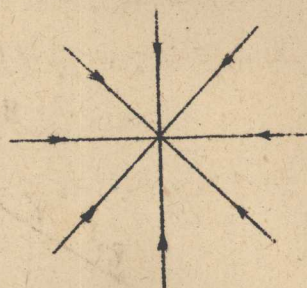


图 1-9

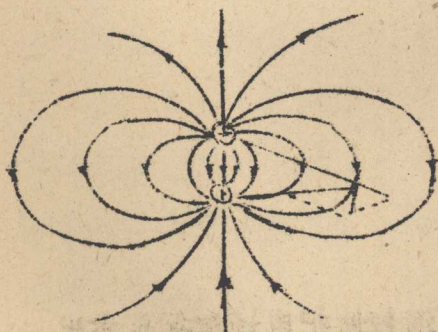
按上述规则划出的一些电场的图形如下：



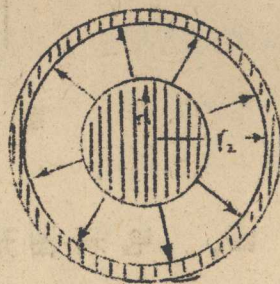
(1) 正的点电荷电场图形。



(2) 负的点电荷电场图形。

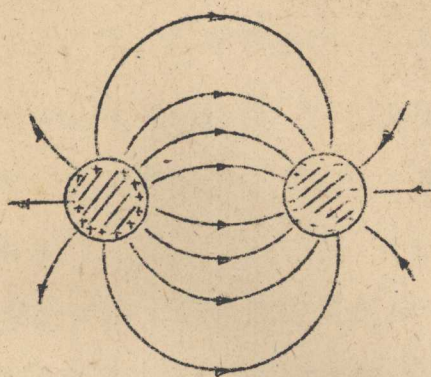


(3) 偶极子的电场图形。

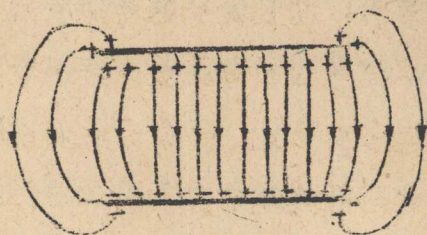


(4) 同轴线电场图形。

图 1-10



(6) 双线输电线电场图



(7) 平板电容器电场图

图 1-10

从这些电场的电力线图形可以总结电力线有二条性质：

(1) 电力线自正电荷发出，终止於负电荷。永远不能形成闭合曲线。

(2) 两条电力线不可能相交。说明每一点的电场强度只有一个确定的方向。

应该指出，划电力线的目的是使电场形象化，能使电场分布一目了然，並非电场中真有这些实在的线。

五、电介质中的电场，介质极化概念

上面所讲的电场都处在真空介质中，若把真空介质内的电荷及其电场全部沉浸到电介质（如纯水，玻璃，云母，陶瓷等等）中去，结果将怎样呢？

实验表明，由于电介质的反作用，使得电介质中每点的电场强度比原来在真空中时的电场强度小 ϵ 倍。若真空中的电场为 E_0 ，介质中的电场为 E ，则 $E/E_0 = 1/\epsilon$ 。例如点电荷的电场：

$$\text{在真空中 } E_0 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \text{ 在介质中则 } E = \frac{E_0}{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \right).$$

一般把 ϵ_0 叫做真空介质的介电系数； ϵ 叫做电介质相对于真空介质的相对电介系数；而 $\epsilon\epsilon_0$ 叫做电介质的介电系数。 ϵ 可以实验确定，如表1—1内表示各种电介质的相对介电系数。

为什么电介质内的电场要减小呢？

毛主席教导我们：“唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用。”

首先看一下电介质本身的性质，一般来说电介质的分子，它的原子核和电子之间的引力相当大，以致彼此互相束缚着。如图1—11(1)所示，在电介质未进入电场时，原子核的正电和运行的负电子，从电性能上讲，正负电的中心互相重合，二者相中和，不显电性。当电解质进入电场时，原子核及电子在电场力作用下，二者可

电 介 质	相对介电系数
空 气	1.00054
水	78
氧化铝陶瓷	8-9
云 母	6-8
橡 胶	6.9
聚苯乙烯	2.6
7070 玻璃	4~4.5
石英玻璃	3.2-4.2
变压器油	2.2-2.5

表1—1

在分子的范围内，作反向而微小的位移，正负两电的中心不再重合，中性状态被破坏，而形成如图 1—11(2) 所示的情景叫做电偶极子。当一个整块电介质插入电场后，如图 1—12，每个分子在外电场的作用下，都形成一个个偶极子沿着电场方向排列起来，于是在介质的两个端面上分别出现正电荷和负电荷，

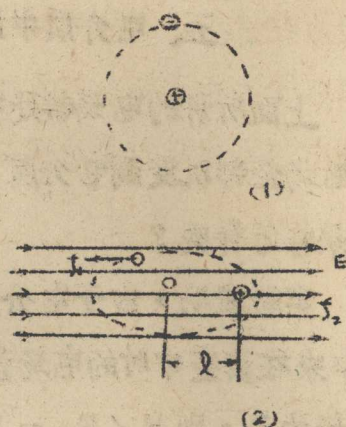


图 1—11

这些电荷叫做束缚电荷，这一现象叫做极化。外电场愈大，每个分子的正、负电荷中心距离也愈大，电介质表面所出现束缚电荷也愈多，极化程度也愈大。而在介质中间，沿电场方向，相邻两分子的正负电荷互相衔接，互相中和。所以在电介质极化后只有在介质两端出现正负电荷，而这正和负的束缚电荷又产生一个附加电场 $E_{\text{附}}$ ， $E_{\text{附}}$ 的方向总是与外电场相反，所以合成电场就减弱了。或者也可以这样认为，束缚电荷 q' ，总是与产生外电场的电荷 q_0 的性质相反，因而抵消了一部份电荷，产生介质的电场的总电荷 ($q = q_0 - q'$) 减少了，故电场也减弱了。

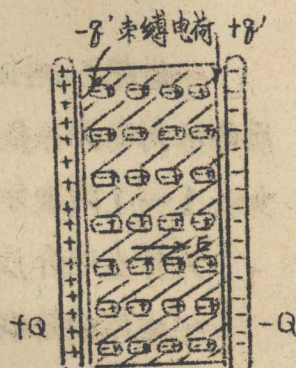


图 1—12

实践证明，电介质中的电场与真空中的电场不同的情况可以用介电常数 ϵ ϵ_0 来反映。

六、电场中的导体

金属导体与电介质完全不同，金属导体内的电子与原子核之间的