

电 工 原 理

朱自耕

小型水电站运行工人培训教材

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是“小型水电站运行工人培训教材”的一个分册。全书共十一章，内容包括：电场的基本概念，磁场及磁路基本概念，电磁感应现象及定律，简单及复杂直流电路的分析方法，单相及三相交流电路基本理论，非正弦电路及电路中的暂态过程的初步知识等。每章都附有小结、习题和习题答案。

本书可作为具有初中毕业文化程度的小型水电站发、供电运行工人培训用，也可供具有同等文化程度的有关人员自学参考。

本书教学参考学时为100学时，在使用中可根据实际情况增减。

小型水电站运行工人培训教材

电 工 原 理

朱 自 耕

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 10.625印张 282千字

1985年2月第一版 1985年2月北京第一次印刷

印数00001—25030册 定价2.10元

书号 15143·5565

前 言

近年来，我国小水电建设发展很快。为了提高小水电站和电网运行工人的技术和管理水平，充分发挥小水电的经济效益，巩固和扩大办电成果，迫切需要加强对职工进行技术培训。为此，我们组织成都科技大学的有关同志，编写了培训讲义。经多次使用并广泛征求读者意见，现修改编写成这套“小型水电站运行工人培训教材”，供各地举办技术培训班使用。全套教材共十一册：《电工数学基础》、《电工原理》、《电子技术及应用》、《电机原理和运行》、《电工仪表和测量》、《水电站电气一次部分》、《水电站电气二次部分》、《小型电力系统》、《水轮机》、《水轮机调节》、《水轮发电机组辅助设备及自动化》。本教材内容丰富，针对性较强，理论联系实际，凡小型水电站和35千伏及以下电网运行、维护、检修中应当掌握的主要知识，都作了较系统的讲述。对有关领域的新设备和新技术，也有简要的介绍。

本教材适用于培训具有初中毕业文化程度的小型水电站和电网的发、供电运行工人，也可作为具有同等文化程度的有关人员的自学参考书。各地可根据实际需要，选用其中有关分册，进行培训。培训班一般以半年为一期，总学时数控制在500学时左右。

《电工原理》一书由朱自耕同志编写，宋远智同志审阅，教学学时数约为100学时。

由于受经验和水平限制，书中存在的缺点和问题，恳请读者批评指正。

四川省地方电力公司

1982年12月

目 录

第一章 电荷及其电场	1
1-1 电荷及其本质	1
1-2 电场	4
1-3 电位与电位差	6
1-4 应用举例	11
第二章 电路的基本概念及定律	18
2-1 电流	18
2-2 欧姆定律及电阻的伏安特性	21
2-3 材料的电阻	24
2-4 电源	29
2-5 电功和电功率	35
2-6 电路及其中的功能关系	40
2-7 克希荷夫定律	43
第三章 简单直流电路的计算	52
3-1 电阻的串联	52
3-2 电阻的并联	55
3-3 电阻的混联	58
3-4 电路中电位的计算	64
第四章 复杂直流电路的计算	74
4-1 支路电流法	74
4-2 回路电流法	78
4-3 节点电位法	82
4-4 叠加原理	88
4-5 电流源及其与电压源之间的等效变换	90
4-6 二端网络定理	100

4-7	星形联接与三角形联接的等效变换	107
第五章	电容	120
5-1	电容器及其电容	120
5-2	电容器中的电流及电场能	123
5-3	电容器的串联与并联	128
第六章	磁场与磁路	135
6-1	磁体及其磁现象	135
6-2	磁场、磁感应强度及磁通	137
6-3	电流的磁场及磁场强度	140
6-4	电磁力	143
6-5	铁磁物质的磁化	146
6-6	磁路	150
第七章	电磁感应	165
7-1	电磁感应定律	165
7-2	自感	173
7-3	互感	179
7-4	涡流	187
第八章	正弦交流电路	194
8-1	正弦交流及其产生	194
8-2	正弦量的基本概念	198
8-3	同频率正弦量的表示法	203
8-4	在正弦电压下的电阻	211
8-5	在正弦电压下的电感	214
8-6	在正弦电压下的电容	218
8-7	r 、 L 、 C 串联电路	221
8-8	并联电路及并联补偿	229
8-9	符号法计算正弦电路	235
8-10	电路中的谐振	241
第九章	三相交流电路	257
9-1	对称三相交流电源及其联接	257

9-2	对称三相负载	264
9-3	对称三相电路的功率	269
9-4	对称三相电路的计算	273
9-5	不对称三相电路的计算	277
第十章	非正弦周期性电流电路	291
10-1	谐波分析	292
10-2	平均值、有效值及平均功率	298
10-3	非正弦周期性电流电路的计算	301
第十一章	电路中的暂态过程	309
11-1	暂态过程的产生及换路定律	309
11-2	RC 电路在直流电压下的接通与短接	310
11-3	RL 电路在直流电压下的接通与短接	316
11-4	微分电路与积分电路	321
习题答案		328

第一章 电荷及其电场

电，作为一种形式的能量，为我们愈来愈广泛地利用。因为电能具有如下优点：

（1）变换容易：电能很容易从其它形式的能量变换而来，又能很容易地变换为其他形式的能量；

（2）传输简单：电能可以简单而经济地通过输电线传送到一切用电的地方；

（3）控制方便：利用电能可以通过有线电或无线电进行自动控制和远距离控制。

电与磁是电磁现象的两个方面，它们相互依存、相互转化。电在一定的条件下转化为磁；磁又在一定的条件下转化为电。它们是不可分割的。只不过在一些场合中电的现象表现为主要的方面，我们忽略其磁的现象而只研究电；而在另一些场合中磁的现象表现为主要的方面，则忽略其电的现象而只研究磁；有时候电与磁之间的相互转化成为主要的，就着重研究它们之间的相互转化。

1-1 电荷及其本质

一、摩擦起电

摩擦起电是人们生活和生产中常见的现象。梳头时梳子和头发多次摩擦后，可以发现梳子与头发彼此吸引，而头发之间则相互排斥。梳子与头发接触时还会产生微小的火花及啪啪的响声。很多物体经过摩擦后，都会产生吸引轻微物体的现象。物体吸引轻微物体的现象，称为带电。经过摩擦使物体带上电荷的现象，叫摩擦起电。因为电荷有两种，正电荷与负电荷，电荷之间存在

着同性相排斥、异性相吸引的作用力。上述现象表明，两物体相互摩擦，会使两者分别带上不同性质的电荷。

摩擦使物体带电的程度，有时是十分强烈的。生产塑料薄膜时，因摩擦带的电触及时可能使人受到强烈的电击；云层因为空气对流摩擦而带的电，可以产生巨大的惊雷。

为了衡量物体带电的程度或带电荷的多少，引入一个物理量——电量。在国际单位制中，电量的单位称为库仑，简称库，用C表示。

二、物质的电结构

为什么两种物体相互摩擦会在两个物体上分别出现性质不同的电荷呢？这得从物质的结构谈起。

物质是由分子构成的。分子是能够保持物质原有性质的最小微粒。分子由原子组成。例如一个水分子就是由两个氢原子和一个氧原子组成（图1-1）。原子又由原子核和在围绕原子核的

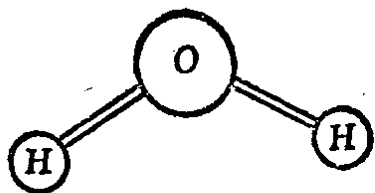


图 1-1 水分子的结构示意图

不同轨道上不停地旋转的电子组成。

而原子核包含质子和中子。图 1-2 表示氢原子和氧原子结构的示意图。电子带一个单元的负电荷，而质子带一个单元的正电荷，中子不带电。一个单元电荷约为 1.6×10^{-9}

库。在通常状态下，原子核中的质子数和核外的电子数相等。也就是说它们所带的正、负电荷的总数相等，因此对外显中性，不带电。例如氢原子的原子核通常只有一个质子，没有中子，核外也只有一个电子（图1-2a）。氧原子的原子核一般由 8 个质子和 8 个中子构成，核外也有 8 个电子（图1-2b）。

当给原子以能量时，例如加热、光照或摩擦等，原子最外层轨道上的电子就可能脱离原来的原子，而附到另外的原子上去。这些丢失了电子的原子，便因其正电荷过剩而对外显示出带正电；而那些获得了电子的原子，便因负电荷过剩而对外显示出带负电。两种物体互相摩擦，其中一种物体因其原子容易丢失电子

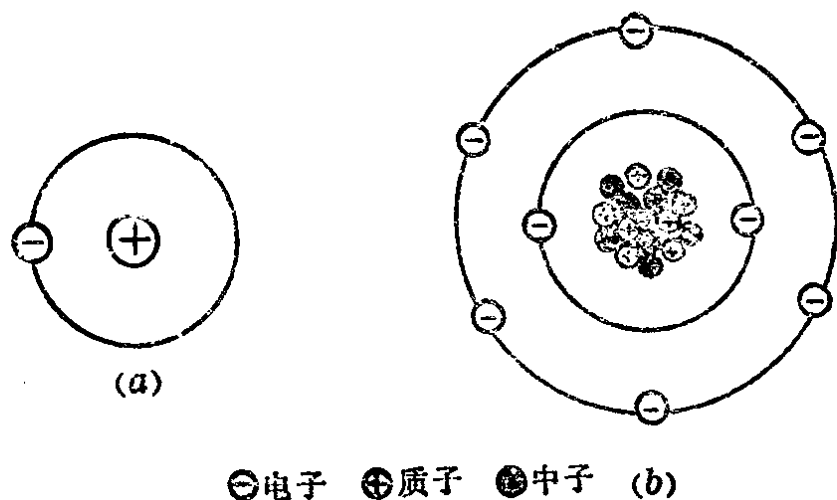


图 1-2 氢和氧的原子结构
(a) 氢原子; (b) 氧原子

而带正电荷，而另一种物体则因其原子获得了这些电子而带负电荷。这就是摩擦起电的实质。

可见物体的带电，只不过是物体的正、负电荷互相分离的结果。如果一个物体带上了一定的正电荷，则必有另一个物体带上了等量的负电荷。

三、电离与复合

物质的正、负电荷互相分离而带电的现象，称为电离。带电荷的物质微粒叫做离子。带正电荷的微粒，如失去电子的原子或原子团叫正离子；而带负电荷的微粒，如获得电子的原子或原子团叫负离子。电子就是最小的负离子。如上节所述，使物质电离是要供给能量的。所以电离是一个吸收能量的过程。

附在其他原子上的过剩电子遇到失去了电子的原子时，又可能被该原子俘获而重新结合成中性原子，这样等量的正、负电荷又同时消失。这种正、负离子相互结合而产生电荷中和的现象称为复合。电荷在复合的过程中，又会将它们在电离过程中所吸收的能量重新释放出来。所以复合是一个释放能量的过程。前面谈到的轻微火花、啪啪的响声以及巨大的雷电，都是正、负电荷在其复合过程中释放能量的表现。

以上分析可以看出，电荷不能创生，也不能消灭，只能由一

个物体转移到另一个物体，这就是电荷守恒定律。

1-2 电 场

一、电荷周围的电场

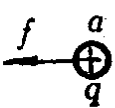
电荷之间存在着同性相排斥异性相吸引的相互作用力，称为电力。这种电力作用的空间，称为电场。也就是说，电荷周围总是存在着电场，电荷与它的电场是不可分割的。

处于静止状态下的电荷叫静电荷，静电荷周围的电场称为静电场。

场，是用来描写空间的相互作用力的物理概念；电场就是用来描写电荷与电荷之间的相互作用力的物理概念。

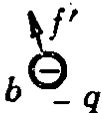
二、电场强度

设有一个具有正电荷 Q 的带电体，则在它的周围存在着电场。如在其电场中的一点 a 放入另一个正电荷 q （如图1-3），它将受到该电场的作用力 f 。由于 Q 与 q 之间同性相排斥， f 的方向将是离开 Q 的方向。显然，该电场力 f 的大小与电荷 q 成正比：



$$f = E_a q \quad (1-1)$$

式中比例常数



$$E_a = \frac{f}{q} \quad (1-2)$$

图 1-3 电场力

表示单位正电荷在 a 点受到的电场力，称为该电场在 a 点的电场强度。

如果在该电场的 b 点放入一个负电荷 $-q$ ，则它将受到朝向 Q 的电场力 f' ：

$$f' = E_b (-q)$$

则 b 点的电场强度：

$$E_b = -\frac{f'}{q}$$

可见电场强度是一个矢量，它的量值等于单位正电荷在该点

所受到的电场力，它的方向为正电荷在该点所受到的电场力的方向，或负电荷在该点所受到的电场力的反方向。

三、电力线

我们常用电力线来形象地表示电场。表示的方法是：用电力线的方向表示电场强度的方向，用电力线的稀密表示电场强度的大小。按照这个原则，几种情况的电场如图1-4所示。

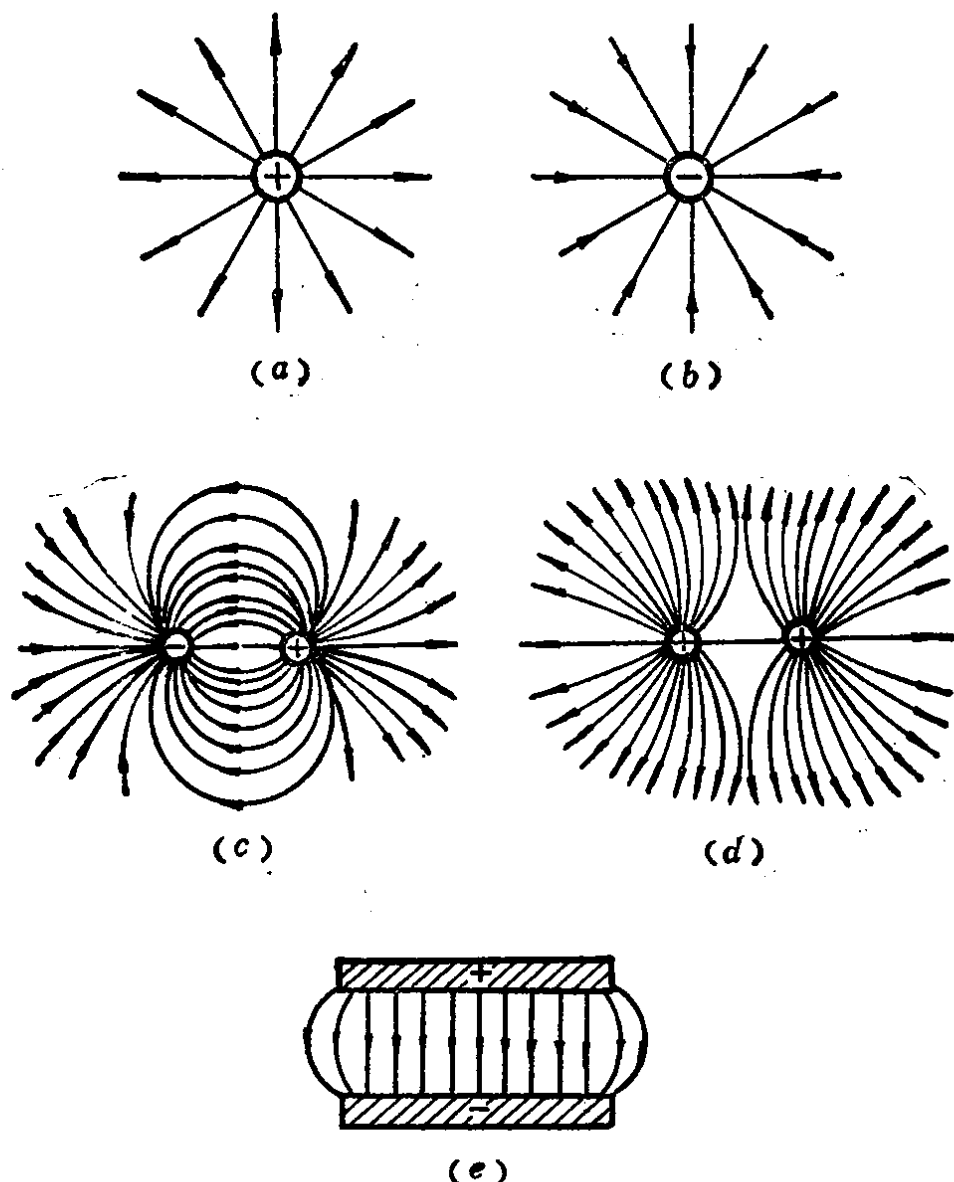


图 1-4 几种情况的电力线

(a)孤立正点电荷；(b)孤立负点电荷；(c)两异性点电荷；(d)两同性点电荷；(e)平行板带电体

由图可见，孤立带电质点的电场，随着距离的增加其电场强度迅速减小。而平行板带电体的电场，当两板的距离远小于极板的尺寸时，两板间各点电场强度的大小和方向都是相同的，这种

电场称为均匀电场。

由图可以看出，电力线有以下规律：

- (1) 电力线总是从正电荷开始到负电荷终止；
- (2) 电力线不会相交；
- (3) 电力线总是垂直于带电导体表面的。

1-3 电 位 与 电 位 差

描写电场中各点的性质的物理量，除了电场强度外，还有电位。因为电场具有电场力也具有能量，电场强度是从电场力的角度来描写各点的性质；而电位和电位差则是从能量的角度来描写各点的性质。

一、电位

电场具有能量，在电场中的一切电荷都具有一定的电位能，所以在电场中也有位的概念，称为电位。电场中，各点电位有高低，为了比较电场中各点电位的高低，必须先取一点作为参考，设它的电位为零。在工程中，常以大地为电位参考点。如图1-5所示为平行板带电体的电场。我们将极板 o 接地，其电位 $V_o = 0$ ，电位能 $W_o = 0$ 。设一个正电荷 q 处于该电场中的 a 点，则它所具有的位能 W_a 等于该电荷 q 从 a 点移到极板 o 处电场力所作的功 A_{ao} ，即

$$W_a = A_{ao}$$

显然，这个电位能 W_a 与电荷 q 成正比，即

$$W_a = A_{ao} = V_a q \quad (1-3)$$

式中的比例常数

$$V_a = \frac{W_a}{q} = \frac{A_{ao}}{q} \quad (1-4)$$

为单位正电荷在 a 点所具有的电位能，也就是单位正电荷由 a 点移到电位参考点 o 电场力所作的功，称为 a 点的电位。

若 $W_a = A_{ao} > 0$ ，即正电荷 q 由 a 到 o 时是电场力作功，则

$V_a > 0$;

若 $W_a = A_{ao} < 0$ ，即正电荷 q 由 a 到 o 时是外力反抗电场力作功，则 $V_a < 0$ 。

在国际单位制中，电位的单位是伏特，简称伏，用 V 表示，或用千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)为单位。

1 千伏 = 1000 伏

1 毫伏 = 10^{-3} 伏

1 微伏 = 10^{-3} 毫伏 = 10^{-6} 伏

必须指出，如图 1-5 中，电荷 q 由 a 经 b 移到 o 与由 a 经 c 移到 o ，电场力所作的功相等，都等于它在 a 点的位能 W_{ao} 。也就是说，在静电场中，电荷由一点移到另一点，电场力所作的功只决定于起点和终点的位置，而与电荷经过的路径无关。正因为如此，静电场中各点才有确定的电位，静电场也才有电位的概念。

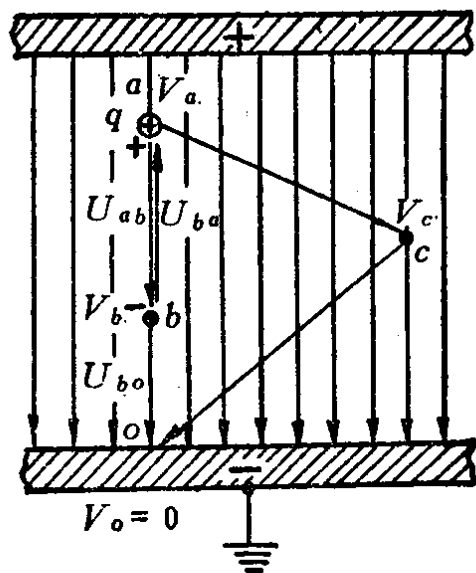


图 1-5 电位与电位差

二、电位差

设电场中 a 点的电位为 V_a ， b 点的电位为 V_b (图 1-5)， a 、 b 两点电位之差

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-5)$$

称为由 a 到 b 的电位差，又叫电位降或电压。电压的单位也是伏。

反过来，由 b 到 a 的电压

$$U_{ba} = V_b - V_a = -U_{ab} \quad (1-6)$$

若 $V_a > V_b$ ，则 $U_{ab} > 0$ ， $U_{ba} < 0$ 。表示正电荷由 a 到 b 是电场力作功，由 b 到 a 是外力反抗电场力作功。例如： $V_a = 10V$ ， $V_b = 6V$ ，则 $U_{ab} = 10 - 6 = 4V$ ，而 $U_{ba} = 6 - 10 = -4V$ 。

必须注意，这里 a 、 b 两点间的电压绝对值是 $4V$ ，方向为由 a 到 b 。这是电压的实际方向，即由高电位到低电位的方向，所以又叫电位降。而电压 U_{ab} ，它的下标“ ab ”是指由 a 到 b 的电压，如图 1-5 中由 a 到 b 的箭头所示。这个方向是计算方向，即这里是计算由 a 到 b 的电压。或者更严格地说，是在计算中所取定的正方向，又叫参考方向。这个方向算正，相反的方向为负。这里 a 、 b 间电压的实际方向与参考方向一致，所以 $U_{ab}=4V$ ，即由 a 到 b 电位降落 $4V$ 。同样电压 U_{ba} 表示计算的正方向或参考方向是由 b 到 a ，如图 1-5 中由 b 到 a 的箭头所示。而 a 、 b 间电压的实际方向与之相反，因此 $U_{ba}=-4V$ ，表示由 b 到 a 电位降落 $-4V$ ，即电位升高 $4V$ 。

在图中表示由 a 到 b 的电压参考方向，可以用双下标 U_{ab} ，也可以用由 a 到 b 的箭头，或用 +、- 号的由“+”到“-”的方向来表示，如图 1-5 所示。

设一个正电荷 q 由 a 移到 b ，电场力所作的功为 A_{ab} ，由 b 移到 o ，电场力所作的功为 A_{bo} 。显然，该电荷由 a 移到 o 电场力所作的功

$$A_{ao} = A_{ab} + A_{bo}$$

即
$$A_{ab} = A_{ao} - A_{bo}$$

根据式 (1-4) 和 (1-5)

$$U_{ab} = V_a - V_b = \frac{A_{ao}}{q} - \frac{A_{bo}}{q} = \frac{A_{ao} - A_{bo}}{q} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-7)$$

即由 a 到 b 的电压，也就是单位正电荷由 a 移到 b 电场力所作的功。

由这个定义，某点的电位也就是从该点到参考点的电压，即

$$V_a = \frac{A_{ao}}{q} = U_{ao}, \quad V_b = \frac{A_{bo}}{q} = U_{bo} \quad (1-8)$$

因此，电压是对两点而言的，电位则是对一点而言的，而实际上是对该点与参考点而言的。可见，每一点的电位是相对的，随参考点的选择不同而异；而每两点之间的电压则是绝对的，与参考

点的选择无关。

图 1-5 表示两个平行板带电体之间的均匀电场，如一个正电荷 q 从 a 点沿电场力方向移到另一点 b ，电场力所作的功为 A_{ab} ，则

$$A_{ab} = fl$$

式中 f —— 电荷 q 所受到的电场力；

l —— a 、 b 两点间的距离。

根据式 (1-1) $f = Eq$

式中 E —— 两极板间的电场强度。

代入上式得

$$A_{ab} = Eq l$$

则

$$E = \frac{A_{ab}}{ql} = \frac{U_{ab}}{l} \quad (1-9)$$

可见，电场强度也可以说是在电场力方向单位长度上的电压。因此在国际单位制中，电场强度的单位为：伏/米 (V/m)。

[例 1-1] 两节干电池 E_1 和 E_2 两端的电压 $U_{ab} = U_{bc} = 1.5V$ ，它们之间的联接如图 1-6a 所示。试分别求当 a 、 b 或 c 点接地时各点的电位。

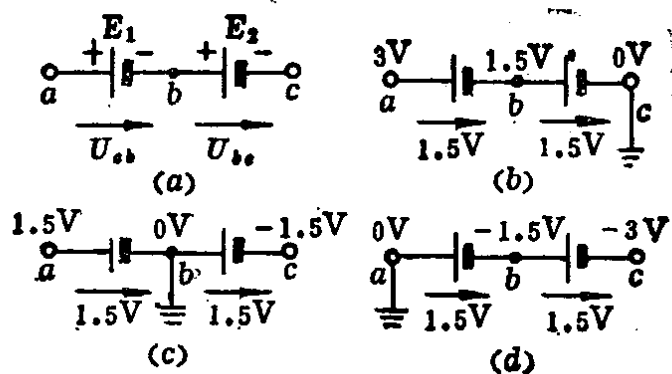


图 1-6 例1-1图

[解] (1) 当 c 点接地时 (图 1-6b)，即 $V_c = 0$ ，

则

$$V_b = U_{bc} = 1.5V$$

$$V_a = U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} = 1.5 + 1.5 = 3V$$

(2) 当 b 点接地时 (图1-6c), 即 $V_b = 0$,
 则 $V_a = U_{ab} = 1.5\text{V}$

$$V_c = U_{cb} = -U_{bc} = -1.5\text{V}$$

(3) 当 a 点接地时 (图1-6d), 即 $V_a = 0$,
 则 $V_b = U_{ba} = -U_{ab} = -1.5\text{V}$

$$V_c = U_{ca} = -U_{ac} = -3\text{V}$$

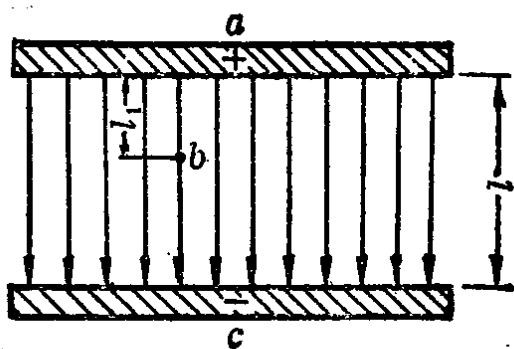


图 1-7 例1-2图

[例 1-2] 如图 1-7 所示, 两平行板带电体之间的电压 $U_{ac} = 200\text{V}$, 两板间的距离 $l = 50\text{mm}$, 其中一点 b 与 a 极板距离 $l_1 = 20\text{mm}$ 。求极板 a 或 c 分别接地时 a, b, c 三者的电位及它们彼此间的电压。

[解] 因为平行板间的电场是均匀的, 且

$$E = \frac{U_{ac}}{l} = \frac{200}{50 \times 10^{-3}} = 4000\text{V/m}$$

电压与参考点的选择无关,

$$U_{ab} = El_1 = 4000 \times 20 \times 10^{-3} = 80\text{V}$$

$$U_{bc} = U_{ac} - U_{ab} = 200 - 80 = 120\text{V}$$

当极板 c 接地时:

$$V_c = 0$$

则 $V_b = U_{bc} = 120\text{V}$

$$V_a = U_{ac} = 200\text{V}$$

当极板 a 接地时:

$$V_a = 0,$$

因为 $U_{ab} = V_a - V_b$, $U_{ac} = V_a - V_c$

则 $V_b = V_a - U_{ab} = 0 - 80 = -80\text{V}$

$$V_c = V_a - U_{ac} = 0 - 200 = -200\text{V}$$

1-4 应用举例

下面举几个应用电场概念的例子。

一、电场的屏蔽

配电盘、电子仪器及其他电气设备，总是用金属板或金属网作外壳。这不仅是因为机械强度方面的要求，而主要是由于电场屏蔽方面的需要。

金属是容易导电的，也就是说电荷在金属中容易自由运动。如果在电场中放入一块金属板，则在电场的作用下，金属内的负电荷逆电场方向移向右侧，而在左侧呈现出过剩的正电荷（如图1-8a）。

这种因外电场的作用而使原来不带电的金属内出现电荷的现象，称为静电感应。由图可见，由于金属板内出现电荷后，它右面的电力线便终止于其右侧的负电荷，而左面的电力线又从其左侧的正电荷开始。因此在金属板内部的电场总是为零的。如果将该金属板接地（图1-8b），

在电场力的作用下，左侧的正电荷流入大地。这样，在金属板的左面便没有电场。如果在电场中放入一个空心金属盒（图1-8c），则在盒内同样没有电场存在。可见金属板可以隔离电场。金属板

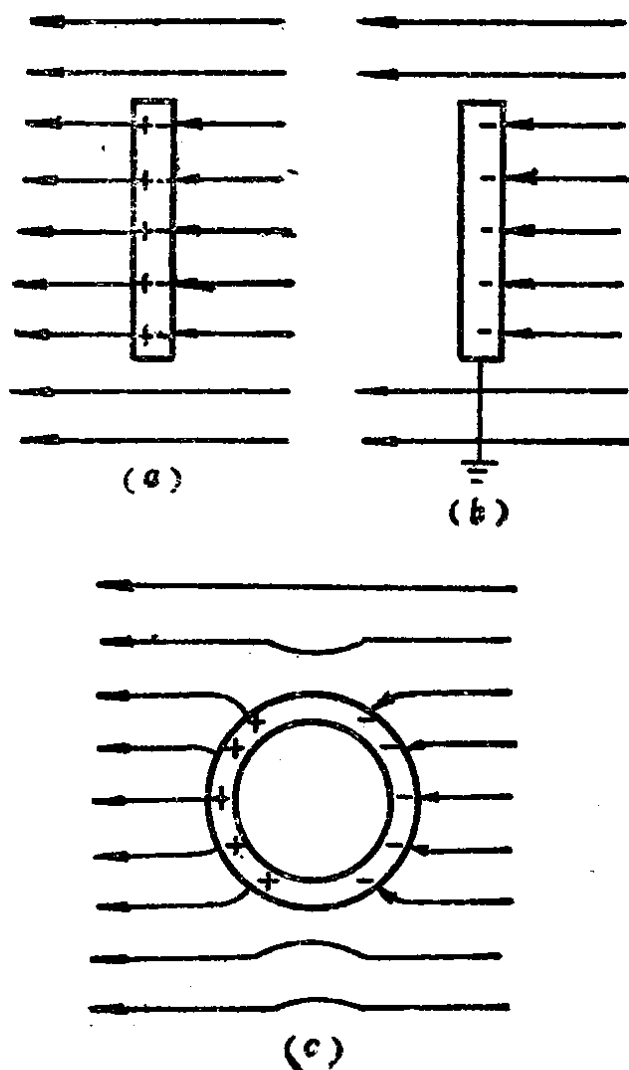


图 1-8 静电感应现象

(a) 金属板；(b) 接地金属板；(c) 空心金属盒