



龙 黄 易 编 著

电 工 学 自 学 读 本 (二)

直 流 电 路

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本書是電工學自學讀本小叢書的第二本，書中通俗地詳細地闡釋了電流現象及其產生的原因、歐姆定律、以及簡單直流電路的計算方法。

直 流 電 路

(電工學自學讀本之二)

編著者： 龙 寶 易
出版者： 人 民 郵 電 出 版 社

(北京東四六條12號)

(北京市書刊出版業登記證出字第048號)

印刷者： 北 京 市 印 刷 廠
發行者： 新 華 書 店

開本 787×1092 1/32

1959年8月北京第一版

印張2 頁數32

1959年8月北京第一次印刷

印刷字數 51,000字

印數 1—23,300冊

統一書號：15045·總1062-有185

定價：(9) 0.21 元

目 录

第一章 电流	1
§ 1.1. 概說	1
§ 1.2. 电流的产生	1
§ 1.3. 电流的方向和速度	5
§ 1.4. 电流的大小	6
§ 1.5. 电流密度	9
复習題	11
第二章 电压和电动势	11
§ 2.1. 电位差和电压	11
§ 2.2. 电动势的概念	13
§ 2.3. 电压和电动势的区别与关系	14
复習題	16
第三章 电阻	17
§ 3.1. 电阻和电阻率	17
§ 3.2. 导体电阻的计算	19
§ 3.3. 电导和电导率	21
§ 3.4. 电阻与温度的关系	22
§ 3.5. 电阻器	24
复習題	26
第四章 直流电路与欧姆定律	27
§ 4.1. 电路	27

§ 4.2. 一段电路的欧姆定律	30
§ 4.3. 全电路的欧姆定律	32
§ 4.4. 电阻的串联	34
§ 4.5. 电阻的并联	37
§ 4.6. 电阻的混联	42
§ 4.7. 电池的串联	45
§ 4.8. 电池的并联	47
§ 4.9. 电池的混联	49
复習題	51
第五章 电流的功和功率。电流的热效应	52
§ 5.1. 电流的功	52
§ 5.2. 电流的功率	54
§ 5.3. 直流电源的全功率和有效功率	56
§ 5.4. 电流的热效应。楞次-焦耳定律	59
§ 5.5. 电流热效应的应用	60
复習題	63

第一章 电 流

§ 1.1. 概 說

在第一分冊里，我們已經研究了靜電產生的原因和各種靜電現象，為我們進一步了解電工技術問題，打下了初步基礎。但是，靜電並不能為我們的日常工作和生活直接服務。我們平常所用到的一些電氣設備，如電燈、電馬達、電烙鐵、電報、電話等都是由於電荷的流動才發生作用的，因此是屬於“動電”的範圍。“動電”的功用很大，已成為我們現代生活中不可缺少的東西，所以下面我們將着重研究這種“動電”現象。本分冊僅限於討論有關電流的產生原因以及簡單直流電路的計算問題。

§ 1.2. 電流的產生

我們已經知道，能夠導電的物體叫做導體，各種金屬都具有導電性能。因此，都可以作為導體。根據電子學說的理論，任何物質的原子都是由一個原子核和圍繞原子核旋轉的一層或若干層電子構成的，而通常金屬的原子中都有幾層電子在旋轉。因此，通常金屬的每個原子中總會有一些電子圍繞在距原子核較遠的外層軌道上旋轉，因為距原子核較遠，它們與原子核間相互聯繫的力量就比較弱，所以很容易受外力作用而脫離該原子的束縛範圍而跑到各原子間的空隙中去；或者跑到其他的原子中去，再又與這個原子脫離，如此繼續進行下去。於是，在金屬中就有着大量電子在各原子間的空隙中不停地作漫無規則的運動，如圖 1.1 所示。但是由於整個金屬內的總電荷為零未變，故在正常狀態下，金屬仍為中性物體。脫離了金屬原子的範圍而在各原子間的空隙中運動着的電子稱為自由

电子。金属中自由电子的数目很多，它們作漫無規則的运动的速

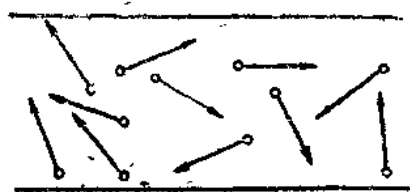


圖 1.1 金属中自由电子的运动

也很大，平均每秒钟大約要跑 1000 公里。金属中虽然有着这样多而又跑得这样快的自由电子，但在沒有外电场作用的情况下，仍不可能产生电流，因为它们的运动

是漫無規則的，因而使它們的作用互相抵消了。

假使在金属导体的兩端加上一个电压 U_{ab} （也就是电位差，这在第一分冊內已有說明），則金属內就有某一电场 E 出現。在这一外电场的影响下，所有的自由电子都將受到一个电场力的作用，因而在其本身騷动的同时，都要向着和电场相反的方向流动。也就是說，金属中的全部自由电子，除仍繼續其原有的漫無規則的运动外，同时又都要朝着同一方向流动。这样，从总的效果来看，在金属导体內就有了大量的自由电子向着一定的方向（逆电场的方向）流动，形成一自由电子流，如圖 1.2 所示。金属导体內这种定向的有規則的自由电子流，我們称它为传导电流。

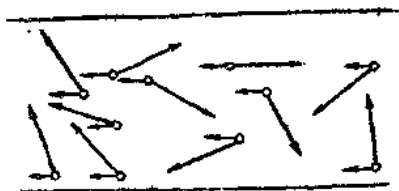


圖 1.2 金属中的自由电子流

具有自由电子且因此能导电的物体，称为第一类导体。第一类导体內的电流都属于传导电流。传导电流是电流的最基本的形式，也是电工学中的重点研究对象，普通我們談到的电流多半是指传导电流，这一点是应首先弄清楚的。

各种金属及其合金都属于第一类导体。在第一类导体內，自由电子的数目愈多，导电的性能就愈好。銀、銅、鋁、鉄等都具有較

多的自由电子，因此是良好的导体。但因銀的价格太貴，不便大量采用，所以在电工技术和电气通信上都普遍应用銅、鋁、鉄等作为导体。

除了傳导电流之外，在电信方面还会遇到离子电流、發射电流和位移电流，因为它们都不是我們在这里重点研究的对象，所以仅簡單地將其叙述如下。

离子电流。由于失去或者得到了电子因而帶电的原子，叫做离子。失去了一部分电子的原子或分子，由于負电荷减少，故呈現正电性，因而叫做正离子（陽离子）；而获得了額外电子的原子，由于負电荷增加，故呈現負电性，因而叫做負离子（陰离子）。由于电场力的作用，正負离子产生相向而有規則的流动，就形成离子电流。

例如，在金屬导体中，当某些原子內的部分电子脫离原子的范围而跑入原子間的空隙中成为自由电子时，这些原子就变成了正离子。与此相反，当部分自由电子进入到另外的一些中性原子时，則將使这些原子变成負离子。第一类导体中虽然也有正負离子，但因不能自由活动，故不能产生离子的流动，而只能产生自由电子的流动。因此，这一类导体中的电流只能是傳导电流，而不可能有离子电流。离子电流通常是發生在所謂第二类导体和气体中。

酸（如硫酸、鹽酸）、鹽（如食鹽、硫酸銅）、鹼（如氫氧化鉀、氫氧化鈉）三类物質属于电解質，其水溶液称为电解液，也就是所謂第二类导体，它們的特征即在于离子的导电性。

發射电流和位移电流。在正常状态下，金屬导体中的自由电子与正离子之間存在有相互联系的力量，所以这些电子并不能脫离导体本身，而只能在导体內作不規則的运动。但在特殊情况下，例如在高溫度时或在光的作用下，由于自由电子的运动加速，它們就有可能擺脫正离子的約束力，而从金屬表面發射出来。用加热的办法

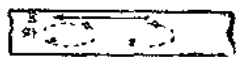
使电子發射的現象称为热电子發射；而在光的作用下所产生的电子發射現象則称为光电子發射。

如果在电子發射的空間，存在有某一外電場 $E_{外}$ 时，則在这一電場力的作用下，从金屬导体表面發射出来的电子即將發生定向的（逆電場方向）有規則的流动，也就是說产生了电流。这种电流，我們就称为發射电流。如电信上常用的电子管中的电流，就是一种热电子發射电流。

除了上述各种电流以外，在电介質（絕緣体）中，也可以产生电流。我們已經知道，电介質原子內的所有电子和原子核之間，有着强大的吸引力，把它們牢固地联系起来，故除某些特殊情况（如气体的离化或絕緣的破坏）外，在正常状态下，电介質中既沒有自由电子，也沒有活动离子。因此，在外電場的作用下，电介質內既不能产生傳导电流，也不能产生离子电流。但是，在外電場的作用下，所有原子中的电子，虽不能跑出原子系統的范围，不过却仍可逆着外電場 $E_{外}$ 的方向移动少許，也就是說，將把电子的軌道拉長，使电子和原子核之間發生了相对的位移，如圖 1.3 所示。电介質中这种电子逆電場方向而位移的現象，我們称之为电介質中的位移电流。



(甲)



乙

圖 1.3 电介質中的位移
电流

我們称之为电介質中的位移电流。

位移电流和傳导电流、离子电流、發射电流是不同的，它是电介質原子內的电子所發生的相对位移，这时电子并不能跑出原子系統的范围。

位移电流的延續時間很短，因为在原子中，电子的位移很快，当电子移动后，就会产生一种企图使原子恢复原来状态的內電場力，当电子移动到一定程度后，这种內電場力將与外電場力达到平衡，这时原子中电子的移动就要停止，因而位移电流也就沒有了。为了要延續电介質中的位移电流，就必須在电介質上外加一交变电

場。所謂交变电場就是電場的大小及方向都是随时改变的。随着電場的这种改变，电介質原子中电子的位移也將随之变化不止，形成往返的振动，如图 1.3 (甲) (乙) 所示。这种振动是随时随刻跟着電場的变化而变化的，因而在电介質中就能維持連續不断的交变位移电流。从这里我們可以看出，电容器的电介質內之所以能通过交流电而不能通过直流电，就是由于位移电流的这种特性造成的。

交变电場要由交变电压（交流电压）来产生，这些有关交流电的問題，在本叢書的“交流电”分冊里介紹，這本書只限于討論直流电的問題。

§ 1.3. 电流的方向和速度

从前面几节的說明里，我們已經知道，电子或其他負电荷（如負离子）的运动方向是和電場的方向相反的，而正电荷（如正离子）的运动方向則和電場的方向相同。習慣上所說的电流方向都指的是正电荷运动的方向，而不是电子或其他負电荷运动的方向，恰好与电子的流动方向相反，这虽然不方便，但是因为早在电子学說出現以前，就已經这样假定下来了，于是就一直这样沿用下来了。由于電場的方向总是从高电位指向低电位，因此可以說，电流的方向是从高电位（陽極）流向低电位（陰極），永远是和電場的方向相同的，这也就是說，电流的方向总是与正电荷运动的方向一致，而与电子或負电荷运动的方向相反，如图 1.4 所示。

由于导体內的电流是随着電場的出現而立即出現的，又因電場在导体內傳播的速度接近于光速，所以电流也以同样的速度即每秒約 30 万公里的速度在导体內傳播。这个速度在一秒鐘內可繞行地球七週半。若以每小时行駛 30 公里的汽車去比較，要經過一年另五十一天多的時間才能把电流在一秒鐘內所傳动的距离走完。由此可見，导体中电流的速度是快得惊人的。

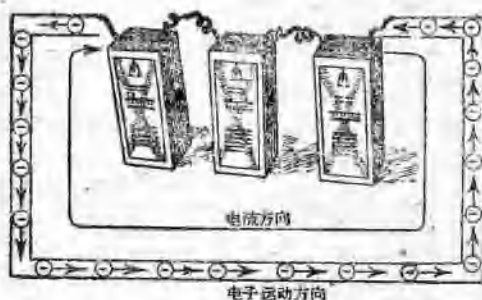


圖 1.4 电流的方向

但是，电流的速度并不等于是个别电子或离子移动的速度，要說到每个电子或离子定向移动的速度，倒反而是很慢的，慢得一秒钟只能走几分之一毫米（公厘）远。这一点可能会使人产生怀疑，因为电流既然是由电子或离子的定向运动所形成的，为什么电流的速度那样快，而电子或离子的速度又这样慢呢？

我們可以这样来理解，因为对于获得电流而言，只要每一个电子在自己的一小段途徑上有一定方向的运动就足够了，完全不必要电子从导体的一端运动到另一端。所以尽管电子移动速度很慢，但毫不影响电流的传播速度。通常我們所說的电流速度，是指它的传播速度，而不是个别电子或离子的移动速度。所以当我們說到电流的速度时，毫無疑問就指的是上述每秒 30 万公里的传播速度，这一点是應該弄清楚的。

§ 1.4. 电流的大小

在导体中，电場强度愈大，則作用在导体中电荷上的力愈大，因而电荷移动的速度也愈大，于是在單位時間（如一秒钟，一分钟）内通过导体横截面的电荷数量（电量）就愈多，这就表现为电

流愈大；反之，若电场强度愈小，则作用在导体中电荷上的力愈小，因而电荷移动的速度也愈小，于是在单位时间内通过导体横截面的电荷数量愈少，这就表现为电流愈小。由此可见，电流是有大小的，其大小的程度决定于单位时间内通过导体横截面的电量的大小；而引起电流大小变化的原因，则是电场强度的变化。

电流的大小又叫做电流强度或电流量，通常为简便起见，就直接称为电流。但读者必须明了，这里的所谓电流，与前面所谈电流的一般定义相较，又有了进一步的意义。那就是说，这里的电流，不但表示电荷的流动，同时还表示出电流的大小。下面我们就将通用这一名称。从这个意义上来说，可重新得出电流的定义如下：电流(电流量)就是在单位时间内流过导体横截面的电荷数量(电量)。

通常我们都用字母“ I ”来代表电流，“ q ”代表电量，“ t ”代表时间。因此，若电荷沿导体均匀运动(直流电)，在时间 t 内流过的电量为 q ，则根据上述定义，电流 I 可用下面的公式求得：

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.1)$$

在实用单位制中，电流的单位为安培，或简称安(A)；电量的单位为库仑，或简称库；时间的单位为秒。所谓一安培，就是表示当每秒内流过导体横截面的电量为一库时的电流的大小。我们已知道，一库的电量等于 $6,300,000,000,000,000$ (即 6.3×10^{18})个电子所带的电荷。因此，一安培也就是在一秒钟内有 6.3×10^{18} 个电子通过导体横截面时的电流。这些关系可表之如下：

$$1 \text{ 安} = \frac{1 \text{ 库}}{1 \text{ 秒}} = \frac{6.3 \times 10^{18} \text{ 电子电荷}}{1 \text{ 秒}}$$

如果用电子电荷来表示电量的大小，计算起来未免太不方便，因此在实用上总是以库为单位来表示电量的。而公式(1.1)也正是以这样的单位为基础，故在引用公式(1.1)时，必须用库为电量(q)

的單位，用秒为時間(t)的單位，用安为电流(I)的單位。

在电工技术中，有时还会碰到比一安培还要小很多的电流，故为了計算的方便，有必要采用比安培更小的單位。通常用到的較小电流單位有毫安培（簡称毫安）和微安培（簡称微安）兩種。一毫安(mA)等于千分之一安，一微安(μA)等于百万分之一安，它們的关系是：

$$1 \text{ 毫安} = \frac{1}{1000} \text{ 安} = 10^{-3} \text{ 安};$$

$$1 \text{ 微安} = \frac{1}{1000000} \text{ 安} = 10^{-6} \text{ 安};$$

$$1 \text{ 安} = 1000 \text{ 毫安} = 10^3 \text{ 毫安};$$

$$1 \text{ 安} = 1000000 \text{ 微安} = 10^6 \text{ 微安}.$$

在电力工業上，电流可高达几十、几百、几千甚至几万安，故称为强电流技术；而电信电路中的电流則往往只有若干毫安或微安，故电信技术属于弱电流技术。

若已知导体中的电流，也可以求出在時間 t 內通过导体横截面

的电量 q ，这只須把公式 (1.1) 用代数的方法（見第一分冊）加以变换即得，

$$q = It, \quad (1.2)$$

式中 q ——电量，單位是庫；

I ——电流，單位是安；

t ——時間，單位是秒。

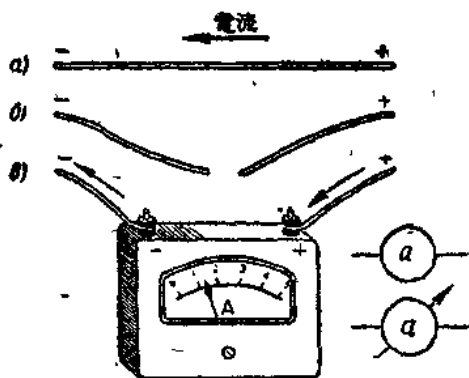


圖 1.5 安培表的接法和符号

測量电流大小所用的仪器为安培表（測量比較大的电流用）

毫安表（測量比較弱的電流用）或電流計（測量更小的電流用）。如果需要測量某段導線的電流，應將該段導線斷開，在斷開處接入安培表，如圖 1.5 所示。儀表所能測的電流應比被測的電流大。例如不能接一個 200 毫安的毫安表去測若干安培的電流，因為這樣會把儀表損壞。

例題 1.1 若在某一電報機中，於 5 分鐘內保持電流不變，而通過的電量為 4.5 庫，求電流 I 等於若干毫安。

解：這裡：

$$t = 5 \text{ 分} = 5 \times 60 \text{ 秒} = 300 \text{ 秒},$$

$$q = 4.5 \text{ 庫}.$$

把這些數值代入公式(1.1)中，即得：

$$I = \frac{q}{t} = \frac{4.5 \text{ 庫}}{300 \text{ 秒}} = 0.015 \text{ 安} = 0.015 \times 1000 \text{ 毫安} = 15 \text{ 毫安}.$$

例題 1.2 在表示電池的容量時，常採用安培小時（簡稱安時）作為單位，一個安培小時等於一安的電流在一小時內通過導體橫截面的電量。求一安時等於多少庫。

解：根據題意：因 1 小時等於 60 分，一分等於 60 秒，故

$$t = 60 \times 60 \text{ 秒} = 3600 \text{ 秒},$$

而

$$I = 1 \text{ 安}.$$

把上列數據代入公式(1.2)中，就可得出一安的電流在一小時(3600 秒)內通過導體橫截面的電量(庫)：

$$q = It = 1 \text{ 安} \times 3600 \text{ 秒} = 3600 \text{ 庫}.$$

按照上述定義，一個安時的電量等於：

$$1 \text{ 安時} = 3600 \text{ 庫}.$$

1.5. 電 流 密 度

在電工方面，我們不僅需要知道導體內的電流大小，而且常常還要知道電流密度。

导体單位横截面积 (1 米²、1 厘米² 或 1 毫米² 等) 上所通过的电流称为电流密度, 一般用字母 j 来代表。如果仍用 I 来代表电流, A 代表导体的横截面积, 則可得电流密度 j 如下:

$$j = \frac{I}{A}。 \quad (1.3)$$

电流的單位是安培, 导体横截面积的單位可以是平方米(米²)、平方厘米(厘米²)或平方毫米(毫米²)等, 則相应的电流密度的單位就是 $\frac{\text{安}}{\text{米}^2}$, $\frac{\text{安}}{\text{厘米}^2}$ 或 $\frac{\text{安}}{\text{毫米}^2}$ 。

一般电綫都是圆柱形的, 也就是說, 不論在任何地点把它剪断来看, 其横截面总是一个一般大小的圓形。在算术中, 我們就已經知道, 圓的面积 $A = \pi r^2$, 式中的 π 为圓周率, 它等于 3.14159..., 通常只要取兩位小数就够了, 于是就成了 3.14; 而 r 則代表圓的半徑。电綫的綫徑多用直徑(d)来表示, 而直徑为半徑的兩倍 ($d = 2r$), 半徑等于直徑之半 ($r = \frac{d}{2}$), 故圓的面积也可写成 $A = \pi r^2 = \pi (\frac{d}{2})^2 = \frac{\pi d^2}{4}$ 。这样一来, 对于圆柱形的电綫來說, 电流密度就可写成下列的形式。

$$j = \frac{I}{A} = \frac{I}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4I}{3.14 d^2} = 1.27 \frac{I}{d^2}。 \quad (1.4)$$

例題 1.3 在直徑 $d = 4$ 毫米的电綫中, 有电流 $I = 16$ 安的电流通过, 求电綫中的电流密度。

解: 引用公式(1.4),

$$j = 1.27 \frac{I}{d^2} = 1.27 \times \frac{16 \text{ 安}}{(4 \text{ 毫米})^2} = 1.27 \frac{\text{安}}{\text{毫米}^2}。$$

复 習 題

1. 何謂第一类导体？何謂第二类导体？
2. 什么是传导电流？金属导体内的传导电流是如何产生的？
3. 什么是离子电流？
4. 什么是发射电流和位移电流？
5. 習慣上对电流的方向是如何规定的？金属导体内传导电流的方向和自由电子流动的方向有何不同？
6. 金属导体内个别电子移动的速度和电流的速度是一回事嗎？为什么？
7. 何謂电流？在实际应用中，电流有那几种單位？
8. 何謂电流密度？它的單位是什么？
9. 若通过一电灯的电流 $I=0.2$ 安，经过时间 $t=1.5$ 小时，求通过电灯的电量是多少？
10. 在直径为 5 毫米的裸銅綫中，可以容許的最大电流为 150 安，求可容許的最大电流密度是多少？

第二章 电压和电动势

§ 2.1. 电位差和电压

我們已經知道电場是使电荷移动，因而产生电流的原动力。正电荷沿着电場力的方向移动，也就是从电位高的地方向电位低的地方移动，兩点之間电位的差別，叫做电位差，电位差的大小用單位正电荷移动时所做的功来表示。由此可見，有电場的存在，就有电位差存在，因而才能产生电荷的移动或电流。

如果沒有了电位差，电流也就不复存在。現在，我們試以传导电流为例來說明这一問題。

当金属导体的兩端加上一個电位差 U 时，則导体的一端將出

現多余（或过剩）电子而帶負电性（負極或陰極），而另一端則將缺少电子而帶正电性（正極或陽極），导体內就要受到一个外電場 E_e 的作用。这个外電場是由于外加在导体兩端的电位差所引起的电荷不平衡（一端电子过剩，一端缺少电子）而产生的，它的方向是从正極指向負極。在这一外電場的影响下，导体內的自由电子將开始由負極流向正極（由低电位流向高电位，但習慣上則当作是正电荷由正極流向負極）。这时，如果沒有外力来繼續維持原有的电位差，正極（原来缺少电子的一端）的电子將逐漸增多，而負極（原来电子过剩的一端）的电子則將逐漸减少，于是导体兩端的电位差也將逐漸减小而趋于平衡。最后，当导体兩端的电位差减小到等于零时，电子將保持不动，傳导电流即將消失。

由此可見，如果沒有外力来維持一定的电位差，电流很快就会停止。要使电流繼續存在，就必须保持电位差，以使导体內部繼續不断地受到外電場的作用。

电压就是指兩点之間电位差而言，在靜电学中，因为是从电位的观念导出电位差的，故習慣于用电位差这一术语，但在研究“动电”現象时，習慣上引用电压一詞更普遍确切一些，因此下面我們就通用电压这一名称。

电压的單位也就是电位差的單位，在实用單位制中，用的是伏特，或簡称伏(V)。有时也把1000伏写作1千伏(KV)，在表示高电压时，常引用千伏为單位。对于很低的电压，也和电流相似，可以用毫伏(mV) ($1 \text{ 毫伏} = \frac{1}{10^3} \text{ 伏}$)或微伏(μV) ($1 \text{ 微伏} = \frac{1}{10^6} \text{ 伏}$)为單位来表示，并用一种叫做伏特表的仪器来測量。測量电压时，將伏特表接出的导綫，直接接到需要測量其間电压的兩点上，如图2.1所示。接伏特表时应遵照仪表端子上的正負号来接，并且仪器所能測的电压，应比被測的电压大，否則容易損坏仪表。

2.2 电动势的概念

我們已經知道，导体兩端有了电压，导体中就会有电流流过。电压愈大，則电流愈大；电压愈小，則电流也愈小。如果沒有了电压，那么电流也就沒有了。要經常保持导体中的电流，就必须設法使导体兩端能繼續維持一定的电压。但是，要怎样才能經常保持一定的电压呢？一般，使用所謂“电动势源就可以产生这种电压。

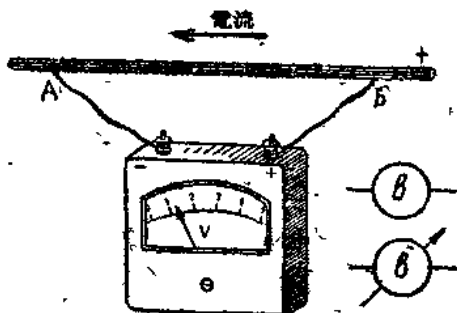


圖 2.1 伏特表的接法和符号

作为电动势源的有原电池、蓄電池、發电机，或其他某些設備，所有这些电动势源通常都叫做电源或电能之源。

在电工技术上，和水泵的作用相类似，电源就好像是一个“电荷泵”，它能够繼續不断地供給电荷，使負極的电子过剩，而正極的电子不足，从而使兩極間經常維持一定的电压，迫使电子繼續流动。这种由电源内部所产生的能够引起和維持电压而推动电流的势力^①叫作电动势。因此，尽管电压和电动势都是产生电流的原因，但严格地說起来，它們的含义是有所不同的。电压是指表面上任何两个物体或兩点之間的电位差，有了这样的电位差，电荷就会發生流动；而电动势則是在电源内部所产生的足以引起和維持一定的电压，从而推动电流的一种势力。电动势是引起电压的內在原因，而电压却只是一种表面現象。

上面是从一般性的概念來說明电动势和电压的区别，这样的說

① 这里引用“势力”一詞是从一般說語的口語来体会的，和物理上的“力”的概念没有关系，实际上电动势并不是一种“力”，两者不可混为一談。