

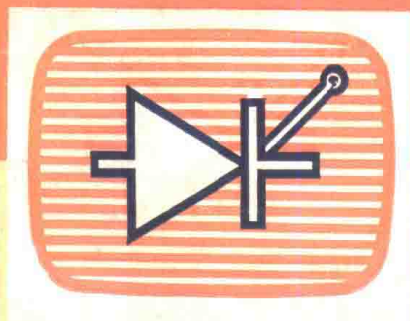
87.175
ZTT
2

东风4型



内燃机车

下册



株洲铁路机械学校编

毛 主 席 語 录

我们能够学会我们原来不懂的东西。我们不但善于破坏一个旧世界，我们还将善于建设一个新世界。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。劳动人民要知识化，知识分子要劳动化。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

前 言

《东风₄型内燃机车》下册为机车电传动部分。

在无产阶级文化大革命中胜利制造成功的东风₄型内燃机车,采用了先进的交——直流电传动方式,电传动装置成为机车重要组成部分。机车上除使用大量通用电机电器外,还使用着机车特有的牵引电机和牵引电器,并采用了各种半导体电子技术(包括整流、脉冲、开关电路、可控硅技术等)。因此需要比较广泛地用到电工知识。为此,我们在下册中由浅入深地编入了电工基础、电机电器、电传动原理、电路图及水阻试验等内容,以便于自学。在各部分中都试图从电工理论与东风₄型机车实际的结合上说明问题,以便弄清楚东风₄型机车电传动原理,更好地掌握它的特性,维护运用好东风₄型内燃机车,为祖国的社会主义革命和建设,为巩固无产阶级专政作出更大的贡献。

本书在编写过程中,承大连机车车辆工厂、田心机车车辆工厂、广州机务段、广州铁路司机学校等单位的多方面协助,在此致以谢意。

由于我们编写时间匆促、水平所限,错误一定不少,恳请批评指正。

株洲铁路机械学校

一九七七年八月

目 录

第 一 章 直流电路

第 一 节	电荷和电场	(1)
第 二 节	电位、电压和电流	(2)
第 三 节	电源和电动势	(5)
第 四 节	电路	(7)
第 五 节	电阻	(7)
第 六 节	欧姆定律	(9)
第 七 节	克希荷夫定律	(11)
第 八 节	电阻的联接和电源的联接	(14)
第 九 节	电功率和电能	(18)
第 十 节	万用电表的使用	(19)

第 二 章 电磁现象与磁路

第 一 节	电磁基本知识	(21)
第 二 节	铁磁物质和磁路	(23)
第 三 节	电磁力	(27)

第 三 章 电磁感应

第 一 节	电磁感应定律	(29)
第 二 节	自感和自感系数	(31)
第 三 节	涡流	(32)

第 四 章 交流电和交流电路

第 一 节	交流电的产生	(34)
第 二 节	交流电的周期、频率、相位	(35)
第 三 节	交流电的有效值与平均值	(37)
第 四 节	正弦交流电的表示法	(39)
第 五 节	正弦交流电路中的电阻、电感和电容	(41)
第 六 节	交流电路中的功率和负荷的功率因数 $\cos \phi$	(48)
第 七 节	三相交流电路	(49)

第 五 章 变压器和互感器

第 一 节	互感现象及变压器工作原理	(54)
-------	--------------	--------

第二节	三相变压器和自耦变压器	(57)
第三节	互感器	(59)

第六章 半导体电路基础

第一节	半导体材料导电特性及PN结	(62)
第二节	半导体二极管	(64)
第三节	整流电路	(68)
第四节	半导体三极管	(75)
第五节	半导体三极管的简易测试方法	(79)
第六节	脉冲变压器	(83)
第七节	单管逆变器(自激式间歇振荡器)	(86)
第八节	稳压二极管	(88)
第九节	单结晶体管	(90)
第十节	可控硅元件	(93)
第十一节	半导体电子器件在东风 ₄ 型机车上的应用	(96)

第七章 直流电机

第一节	直流电机的基本工作原理	(100)
第二节	直流电机的主要结构部件	(102)
第三节	直流电机的电枢绕组	(105)
第四节	直流电机的电动势和电磁转矩	(112)
第五节	直流电机的电枢反应	(114)
第六节	直流电机的换向	(115)
第七节	直流发电机的运行	(118)
第八节	直流电动机的运行	(122)
第九节	ZQDR-410牵引电动机	(126)
第十节	ZQF-80启动发电机	(142)

第八章 同步电机

第一节	同步电机的构造	(147)
第二节	同步电机的电枢绕组及电势	(149)
第三节	同步电机的电枢反应	(153)
第四节	同步发电机的运行特性	(156)
第五节	TQFR-3000主发电机	(158)
第六节	TQL-45励磁机	(169)
第七节	东风 ₄ 型机车应用电机的总述	(174)

第九章 电器

第一节	概述	(180)
第二节	接触器	(185)

第 三 节	组合电器	(193)
第 四 节	继电器	(202)
第 五 节	辅助电器	(215)
第 六 节	电气仪表	(221)
第 七 节	制动电阻	(226)
第 八 节	东风 ₄ 型机车电器的总体布置	(229)
第 九 节	蓄电池	(233)

第 十 章 东风₄型内燃机车电传动原理

第 一 节	概述	(238)
第 二 节	东风 ₄ 型内燃机车同步发电机的理想特性	(243)
第 三 节	同步牵引发发电机的自然外特性和理想外特性	(244)
第 四 节	同步牵引发发电机恒功率调节装置	(249)
第 五 节	磁场削弱	(251)
第 六 节	电阻制动	(255)

第十一章 东风₄型内燃机车电路图

第 一 节	电路图的一般知识	(261)
第 二 节	柴油机的启动电路	(273)
第 三 节	柴油机启动后的辅助电路	(279)
第 四 节	机车走车电路	(285)
第 五 节	电阻制动电路	(300)
第 六 节	机车保护电路	(302)
第 七 节	电器动作检查	(309)
第 八 节	予热锅炉控制电路	(311)

第十二章 水阻试验

第 一 节	试验前的准备工作	(313)
第 二 节	柴油机启动及空转	(316)
第 三 节	调整牵引发发电机外特性	(316)
第 四 节	保护系统试验	(319)
第 五 节	电阻制动试验	(319)
第 六 节	各部分温度、温升及压力	(320)

第 三 节	组合电器	(193)
第 四 节	继电器	(202)
第 五 节	辅助电器	(215)
第 六 节	电气仪表	(221)
第 七 节	制动电阻	(226)
第 八 节	东风 ₄ 型机车电器的总体布置	(229)
第 九 节	蓄电池	(233)

第 十 章 东风₄型内燃机车电传动原理

第 一 节	概述	(238)
第 二 节	东风 ₄ 型内燃机车同步发电机的理想特性	(243)
第 三 节	同步牵引发电机的自然外特性和理想外特性	(244)
第 四 节	同步牵引发电机恒功率调节装置	(249)
第 五 节	磁场削弱	(251)
第 六 节	电阻制动	(255)

第十一章 东风₄型内燃机车电路图

第 一 节	电路图的一般知识	(261)
第 二 节	柴油机的启动电路	(273)
第 三 节	柴油机启动后的辅助电路	(279)
第 四 节	机车走车电路	(285)
第 五 节	电阻制动电路	(300)
第 六 节	机车保护电路	(302)
第 七 节	电器动作检查	(309)
第 八 节	予热锅炉控制电路	(311)

第十二章 水阻试验

第 一 节	试验前的准备工作	(313)
第 二 节	柴油机启动及空转	(316)
第 三 节	调整牵引发电机外特性	(316)
第 四 节	保护系统试验	(319)
第 五 节	电阻制动试验	(319)
第 六 节	各部分温度、温升及压力	(320)

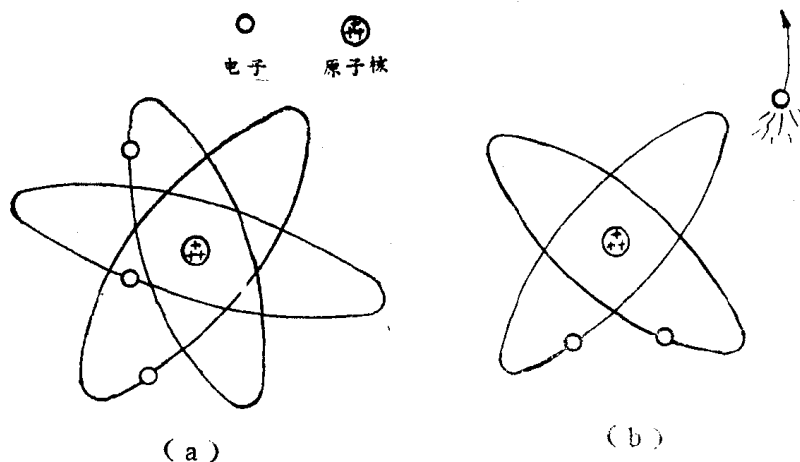


图 1—1—2

原子的电结构 (a)电子围绕原子核运动 (b)原子失去电子后带正电

物体失去电子后，便带有正电荷。获得多余的电子的，便带有负电荷。例如，用摩擦的方法就能使电荷发生转移，而使物体带电。我们用 Q （或 q ）表示电荷所带的电量。衡量电量大小的单位叫做库仑。一库仑约等于 6.24×10^{18} 个电子所带的电量。

实验证明，电荷与电荷之间有相互作用力。同性电荷相互排斥；异性电荷相互吸引。而且它们之间的距离愈近作用力愈大。两个物体并没有直接接触，它们之间的相互作用力是从哪里来的呢？

在寒冷的冬天，如果屋子里有个火炉，我们会感觉到暖烘烘的。我们虽然没有直接接触炉火，也会感觉到炉火的热，这是因为炉火的周围存在着热场。我们虽然看不到热场，但是通过温度能感觉到它的存在。

和这种情况相似，在带电体周围存在着电场，电荷在电场中就会受到力的作用，这种力叫做电场力。电荷相互之间的作用就是通过电场来实现的。我们虽然看不到电场，但是我们能从电荷之间的相互作用力证实电场是一种客观存在，它是一种特殊的物质。

第二节 电位、电压和电流

1、电 位

在讲电荷受电场力的作用将会产生什么情形之前，让我们先来看看地面上的物体在重力作用下的情形吧。

举高的石碇在重力作用下下落的时候，具有很大的能量，能够把堤坝打紧（即能够作功），水坝上的水从高处流下时也很具有大的能量，能够冲动水轮发电机发电。就是说，高处的物体在重力作用下落下时便能够做功。人们把这种由地面位置高低所决定的做功的本领叫做重力势能，物体越高，势能越大，根据功能原理，重力使物体落下对物

体做功时，物体由高处落到低处，重力所作的功等于物体减少的势能。外力反抗物体的重力做功时，使物体由低处移到高处，外力所作的功等于物体增加的势能。这里我们取物体在地面上的势能等于零。

和这种情况相似，电荷在电场力作用下移动也能够做功，如使灯丝发亮，使电炉发热等。因此处在电场中的电荷也具有能量，我们把电场中的电荷所具有的电能量叫做电势能。在图 1—2—1 所示的电场中，设试

验电荷 $+q$ 在接地负板处的电势能为 0（与地面上的物体的重力势能为 0 一样）

当我们将 $+q$ 从负板移到电场中的 A 点，这时外力反抗电场力做功。外力反抗电场力所做的功等于电荷 $+q$ 增加的电势能，也就是等于电荷 $+q$ 在 A 点的电势能，用 W 表示。现在改变试验电荷 q 的大小，则由于它所受的电场力改变，外力

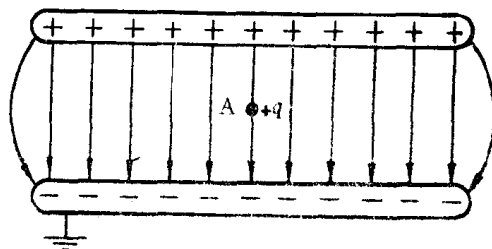


图 1—2—1 电场中某点的电位

反抗电场力所作的功也改变，则它的电势能也跟着改变，当 q 取不同的数值时，如取 $2q$ 、 $3q$ …… nq ，则电势能将变为 $2W$ 、 $3W$ 、 nW 。故对电场中任一点来说，放在该点的电荷的电势能跟它的电量之比，总是一个恒量，这个比值（即单位正电荷所具有的电势能）就反映了电场在那一点的性质，它只与这一点在电场中的位置有关，而与是否放置电荷及放置于那一点的电荷的大小无关。我们就把电场的这种性质叫做电位。电场中任一点的电位就是单位正电荷在该点所具有的电势能。或者说外力反抗电场力将单位正电荷从参考点（参考点的电位规定为 0）移到该点所作的功。即：

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-2-1)$$

从能量的角度来看，电场中的电位概念和地球引力范围内高度概念相似。通过图 1—2—2 我们可作如下比较：

从 A $\rightarrow$ B：

地面上的物体 m 从 A $\rightarrow$ B，外力反抗重力 P 做功，增加势能，高度升高。

电场中的电荷 $+q$ 从 A $\rightarrow$ B，外力反抗电场力 F 做功，增加电势能，电位提高。

从 B $\rightarrow$ A：

地面上的物体 m 从 B $\rightarrow$ A，重力 P 做功，减少势能，高度降低。

电场中的电荷 $+q$ 从 B $\rightarrow$ A，电场力 F 做功，减小电势能，电位降低。

零电位的选择：一般都选取大地的电位为零电位，比大地的电位高为正电位，比大地的电位低为负电位。

静电场中，离正电荷越近的地方电位越高，离负电荷越近的地方电位越低。

在电场力的作用下，正电荷从电位高的地方向电位低的地方移动，负电荷从电位低的地方向电位高的地方移动。

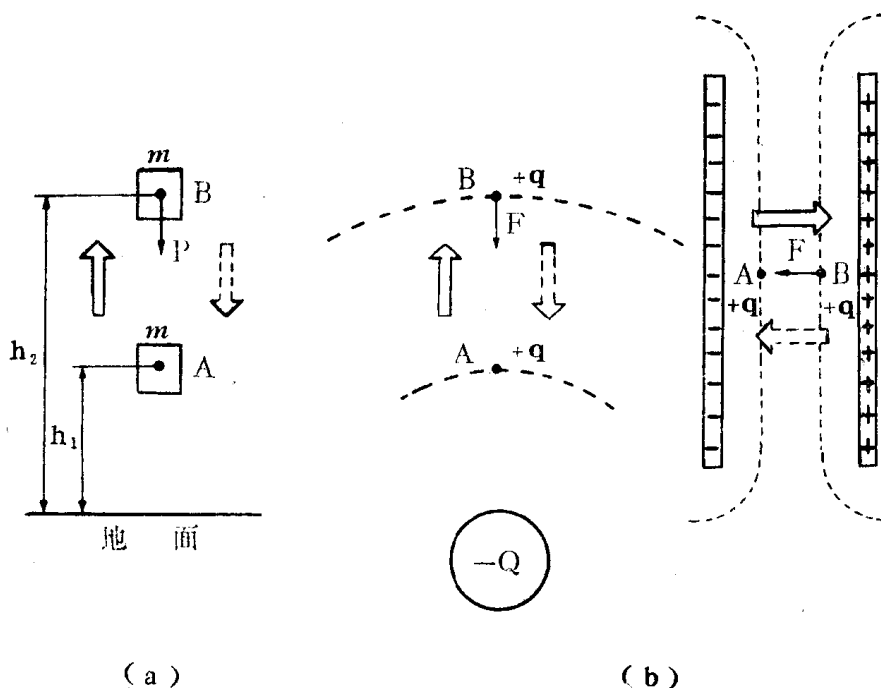


图 1—2—2 电势能与重力势能比较

2、电位差（电压）

河流的上游水位高，下游水位低，上下游之间存在一个水位差，就有水压驱使水流从上往下流；同样的道理，当一个蓄电池还有电时，则用电压表去量它的正负极之间时，电压表便有指示，用导线把小电珠接到电池的两极，小电珠便发亮，我们就说有电流流过小电珠。那么什么是电压呢？电场内两点之间电位的差别叫做电位差，也就是电压。电池正极电位高，负极电位低，正负极之间存在一个电位差（即存在一个电压），驱使电荷移动而形成电流。

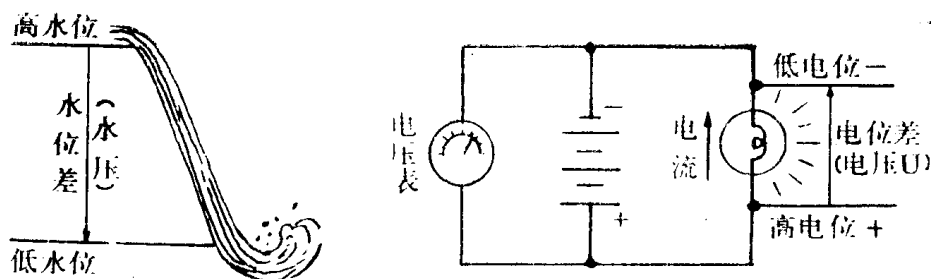


图 1—2—3 电压与水压比较

电压的单位是伏特，简称伏，以 V 表示。

单位正电荷在电场力作用下从一点移动到另一点所做的功如果是 1 焦耳，则这两点之间的电位差（电压）即为 1 伏特。

电压的大单位有千伏(KV), $1\text{KV}=1000\text{V}$;

电压的较小单位有毫伏(mV), $1\text{mV}=\frac{1}{1000}\text{V}$ 。

3、电 流

电荷的有规则的定向运动,就形成了电流。

如上所述,如果电场中的两点之间存在着电位差,就能驱使电荷移动而形成电流,反之如果两点之间没有电位差就不会出现电流。图1-2-4所示的就是在电场力的作用下,导线中的自由电子有规则的定向运动所形成的电流。不过,长期以来,人们习惯规定以正电荷运动的方向作为电流的方向,所以在AB导线中,电子运动的方向是由A向B,电流的方向则是由B向A。

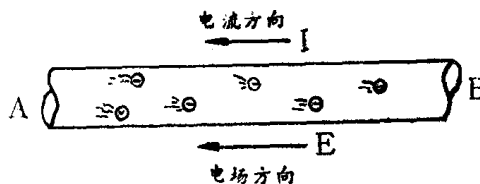


图1-2-4

在电场力作用下,自由电子有规则的定向运动形成电流

我们用每秒钟通过导线某一截面的电量的多少来衡量电流的强弱,叫做**电流强度**(简称**电流**),用符号I表示。如果用符号Q表示通过导线某一截面的电量,t表示通过电量Q所用的时间,则得:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2-2)$$

电流的单位是安培(简称安),用符号A表示。如果每秒钟有1库仑的电量通过导线的某一截面,这时的电流就是1安培,即: $1\text{安培} = \frac{1\text{库仑}}{1\text{秒}}$; 电流很小时,常用毫安(mA)或微安(μA)做单位(毫表示千分之一,微表示百万分之一)。

$$1\text{毫安}(\text{mA}) = \frac{1}{1000}\text{安}(\text{A}) = 10^{-3}\text{安}(\text{A})$$

$$1\text{微安}(\mu\text{A}) = \frac{1}{1000000}\text{安}(\text{A}) = 10^{-6}\text{安}(\text{A})$$

电流很大时,常以千安(KA)为单位。

$$1\text{千安}(\text{KA}) = 1000\text{安}(\text{A}) = 10^3\text{安}(\text{A})$$

第三节 电源和电动势

当我们把电灯或电烙铁接到某一个适当的电源(干电池、蓄电池、发电机等)上去的时候,电灯就会发光,电烙铁就会发热,说明它们中间有电流流过。前面已经讲过,电流是由电位差(即电压)引起的。这就是说,电源的两极之间存在着电位差。那么,

电源两极之间的电位差是怎样产生的呢？

在各种不同的电源中，产生电位差的原因是不同的。例如，在电池中是由于电池内部电解液和极板之间的化学作用；在发电机中是电磁感应作用；在热电偶中是两种不同金属连接处的热电效应等等。但是它们都具有一个共同点，就是能把电源内部导体中所存在的正、负电荷分别向两极推动，使得一个极具有一定量的正电荷，另一个极具有一定量的负电荷，于是两极之间就形成了电场，出现了一定的电位差。我们把电源内部这种推动电荷移动的作用力，统称为电源力。

电源力既然能使电荷移动，就说明它能够做功。电源力将单位正电荷从电源负极移到正极所做的功，就叫做电源的电动势，用符号 E 来表示。即：

$$E = \frac{A_{BA}}{Q} \quad (1-3-1)$$

式中 A_{BA} 代表电源力将电荷 Q 从负极移到正极所做的功。所以电动势是衡量电源力作功能力的一个物理量。这和用电压来衡量电场力作功的能力是类似的。它们的区别是，电场力能够在外电路（即电源以外的电路）中把正电荷从高电位点（正极）移向低电位点（负极）。而电源力却能把电源内部的正电荷从低电位点（负极）移向高电位点（正极）。

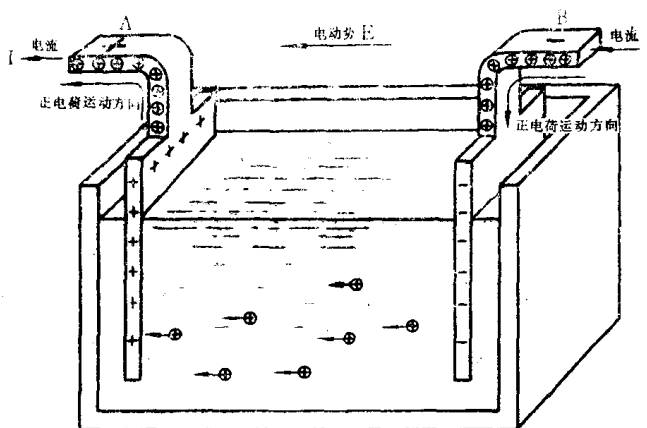


图 1—3—1 电源的电动势

拿图 1—3—1 所示的蓄电池来说，在它内部电源力的作用下，正极板 A 上堆积了大量的正电荷，负极板 B 上堆积了大量的负电荷。由于正极板 A 的电位高于负极板 B 的电位，所以在两极之间接入负载时，正电荷就在电场力的作用下，从正极经负载流向负极。这时两极板上的电荷会不会减少呢？不会的。因为当正电荷在电场力的作用下从正极经负载向负极移动时，在电源内部正电荷在电源力的作用下，将会源源不断地从负极补充到正极上去，这样就保持了两极间的电位差不变，从而维持了电流持续不断地通过负载。由此可见，在电源内部电流是从负极（低电位端）流向正极（高电位端）。而在电源外部的电路中，电流是从正极（高电位端）通过负载流向负极（低电位端）。

第四节 电 路

图 1—4—1 是一个最简单的电路。电路就是电流所流经的路径，它是由电源、负载（负荷）、连接导线和开关三个基本部分所组成的。如图 1—4—1 所示。当电路接通时，灯泡就会发光，这表明电路中通过了电流。蓄电池是这个电路的电源，在它内部电源力的作用下，可以使电源的两极保持一定的电位差（电压），使得电路中的电流源源不断。蓄电池内部的电源力来自蓄电池内部的化学能，这种化学能是蓄电池在充电时由电能转换而来的。当蓄电池的两极接上负载时，它就处于放电状态，又将化学能转换为电能输送给负载。又如：机车上的几个发电机，是把柴油机的机械能转换为电能供给负载的。所以说，电源是把其它形式的能量，转换为电能的设备。

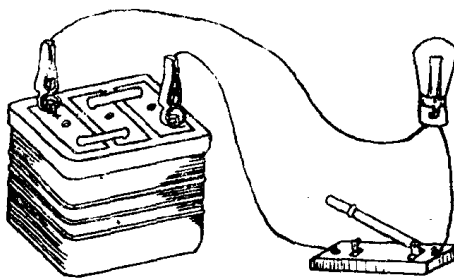


图 1—4—1

由电源、负载、连接导线和开关组成的最简单电路

电灯是这个电路的负载，负载是电路中消耗电能的设备，电能就是把电能转换为光能（以及热能）的一种负载，其它如电炉、电烙铁、电动机等，也都是电路的负载，它们分别把电能转换为热能和机械能等多种不同形式的能量。

导线和开关是电源和负载之间必不可少的连接和控制部分，只有将开关合上把电路接通时，才能有电流通过负载，有时候，在电路中还接上各种测量仪表，使得我们能够了解电路的工作情况。

电路有直流电路和交流电路两大类，所谓直流电路，就是其中的电流、电压、电动势等物理量的大小和方向都不随时间变化的电路。

第五节 电 阻

1、导体、绝缘体与半导体

我们知道，象铜、铝或铁这样的一些物质是很容易导电的，我们把它叫做导体。而象玻璃、云母、陶瓷之类的物质，就很不容易导电，被称为绝缘体。这是什么道理呢？因为在导体中存在着不少与原子核的联系很松弛的电子，它们很容易摆脱原子核的束缚而在原子之间自由运动，因此被为“自由电子”。各种金属内部都在不同的程度上存在着大量的自由电子，它们在外电场电压作用下，能够很快地使电荷量从一处移到另一处，所以金属是导体。相反地，在绝缘体内部自由电子都很少，所以不能导电，因而可以用

来做隔电（绝缘）的材料。但是要指出，绝缘体并不是绝对不导电的，只是它的导电能力与导体相比差得非常悬殊而已，但在高电压的情况下，绝缘体能遭到破坏而失去绝缘作用，变成导体了，这称为“击穿”。

特别使人关心是，象硅和锗这些物质，它们的导电能力介于导体和绝缘体之前，称为“半导体”。半导体有很多特殊的性能，尤其是当在纯硅、纯锗中间，掺入适量的其它杂质之后，其导电能力将会成百万倍的增加。例如适当掺有象铟、铝、镓或硼等这样的杂质之后就形成了P型半导体，而掺入了锑、磷或钾等杂质之后，即成为N型半导体。利用P型及N型半导体制成的各种晶体管，是电子设备的基本元件之一。

2、导线的电阻、电阻率

导体内的带电质点在运动的过程中不断地互相碰撞，并且还与导体的分子相碰撞，因此导体对于它所通过的电流呈现有一定的阻力，这种阻力称为电阻。拿一根普通的导线来说，由于其长度，截面积以及导体本身的材料不同，就具有不同的电阻。电阻小说明电流容易通过，反之，电阻大电流就不容易通过，所以导体的电阻是用加在导体两端的电压和通过导体的电流的比值来表示的。

电阻的单位是欧姆（简称欧），用符号 Ω 表示。如果在导体两端加上1伏的电压，通过导体的电流是1安，那么，这个导体的电阻就是1欧姆，即： $1\text{ 欧姆}(\Omega) = \frac{1\text{ 伏特}(V)}{1\text{ 安倍}(A)}$ 。

此外还有千欧（ $K\Omega$ ）和兆欧（ $M\Omega$ ）。

1千欧（ $K\Omega$ ）=1000欧姆（ Ω ）= 10^3 欧姆（ Ω ）

1兆欧（ $M\Omega$ ）=1000千欧（ $K\Omega$ ）=1000,000欧姆（ Ω ）= 10^6 欧姆（ Ω ）

导体电阻的大小，主要由两个因素来确定，一是导体材料的导电性能的好坏，二是与导体的尺寸大小有关。实验证明，同一材料的导体，其电阻与导体的长度成正比，与导体的横截面积成反比。用公式表示为：

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-5-1)$$

式中：R代表导体电阻（单位是欧姆）；

l代表导体长度（单位是米）；

S代表导体的横截面积（单位是平方毫米）；

ρ 是由导体材料的导电性能所确定的常数，叫做电阻率（又称电阻系数）。单位为欧· $\frac{\text{毫米}^2}{\text{米}}$ 。

下表中列出了一些常用导电材料的电阻率（20℃时的电阻率）。

表1—5—1

常用导电材料的电阻率

材 名 料 称	碳	银	铜	铝	低碳 钢	锰 铜	康 铜	镍 铬 铁	铝 铬 铁	铂
电阻率	10.0	0.0165	0.0175	0.0283	0.13	0.42	0.44	1.0	1.2	0.106

电阻在电路中应用很普遍，我们常见的电灯、电炉、电烙铁等都是电阻元件，机车上常用的有线绕电阻、金属膜电阻、变阻器（电位器）等。

实践证明，各种导电材料的电阻值都和温度有关。银、铜、铝等金属导体的电阻值随温度的升高而增大，但碳的电阻值却随温度的上升而减少。

第六节 欧 姆 定 律

我们已经知道，当电阻的两端有电位差（电压）时在电阻中就有电流通过。那么电流的大小和电压的高低有什么关系呢？

我们先做一个简单的实验，把电池组、电阻、伏特表和安培表按图1—6—1所画的实验线路连接起来。

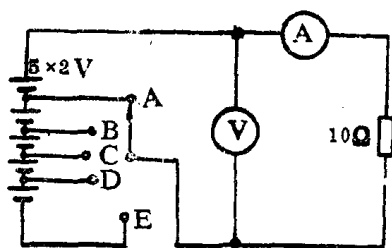


图1—6—1

在固定电阻中测量电压与电流关系的实验电路

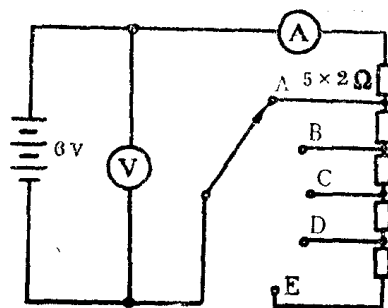


图1—6—2

在固定电压下测量电流与电阻关系的实验电路

图中连接导线的一端可以经过转换开关在A、B、C、D、E各点上移动，以便用来调节电源电压为2伏、4伏、6伏、8伏到10伏，保持电路的电阻不变，改变电压的数值，观察电源的变化，把测量所得的电压、电流数据列入表1—6—1中，分析这些数据，可以看出，在电阻不变时，电流随电压成正比例地增加。

在固定电阻中，电压与电流的关系

表1—6—1

位 置	U (伏)	I (安)	R (欧)
A	2	0.2	10
B	4	0.4	10
C	6	0.6	10
D	8	0.8	10
E	10	1.0	10

我们再按图 1—6—2 的实验电路接线，保持电路的电压不变，改变电阻的数值，观察电流的变化。将所得的电阻、电流数据列入表 1—6—2 中。

在固定电压下，电流与电阻的关系

表1—6—2

位 置	U (伏)	I (安)	R (欧)
A	6	3	2
B	6	1.5	4
C	6	1	6
D	6	0.75	8
E	6	0.6	10

通过以上的实验，我们可得到一个重要的结论：

在电阻电路中，电流的大小与电阻两端电压的高低成正比，而与电阻的阻值大小成反比。

这就是欧姆定律。它是电路中一个很重要的基本定律。我们用符号 U 表示电压，I 表示电流，R 表示电阻，那么欧姆定律可以用一个简单的公式表示出来，

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-6-1)$$

为了帮助记忆，欧姆定律的三个量的相互关系可用图 1—6—3 来表示。计算时，用手指遮住要求的量，剩下的就是运算的公式。

例：东风₄型机车上的空转继电器的线圈跨在两台电动机的等电位点上，该线

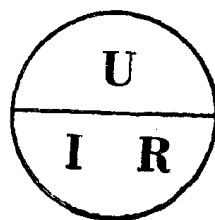


图 1—6—3

欧姆定律图示

圈电阻为 4.4 欧姆，当两台电机均未空转时，线圈中无电流通过，当一台电机发生空转时，则线圈两端电位便不相等了，有一电位差，当这一电位差达到 2 V 时，空转继电器便动作。计算空转继电器的动作电流为多少安培。

解：根据欧姆定律 $I = \frac{U}{R} = \frac{2}{4.4} = 0.45$ (安培)

答：空转继电器动作电流为 0.45 安培。

第七节 克希荷夫定律

在生产实践中，一些比较复杂的电路单用欧姆定律来分析很不方便，因此，我们来看一看比较复杂的电路情况。我们把没有分支的电路叫做支路，把三条或三条以上支路相汇合的交点叫做节点，把电路中任一闭合的路径叫做回路。

1、克希荷夫第一定律

下面我们按图 1—7—1 来做一个实践，它是由一个电源和两个负载组成的电路，它有两个节点 (b、e) 和三条支路 (ab、be、cf)。克希荷夫第一定律证明了连接在同一节点上的几条支路中电流间的关系。在各支路中分别接入安培表来量各支路中的电流。如果电源的电动势 $E = 30$ 伏，负载电阻 $R_2 = 30$ 欧， $R_3 = 10$ 欧，那么 $I_1 = 4$ 安， $I_2 = 1$ 安、 $I_3 = 3$ 安，根据安培表的极性可以判断各支路电流的实际方向，如图中所标示的。根据各支路电流的实际方向可以看出，电流 I_1 是流入节点 b 的，而电流 I_2 和 I_3 是从节点 b 流出的。从所测得的数据可以看出 $I_1 = I_2 + I_3$ ，

从这里得到结论：

流入节点的电流等于从该节点流出的电流。

这就是克希荷夫第一定律，又称节点电流定律。

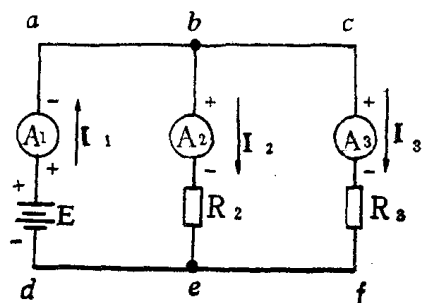


图 1—7—1 分析节点上电流关系的电路

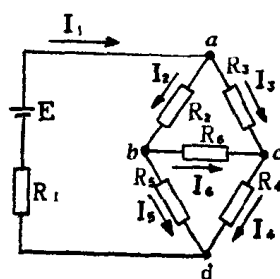


图 1—7—2 桥式电路

上式可以变换成 $I_1 - I_2 - I_3 = 0$

上式证明，如果把流入节点 b 的电流 I_1 看作是正的，那么从节点 b 流出的电流 I_2 及 I_3 就应该是负的。这样就可把克希荷夫第一定律用一个普遍的公式表达出来，把它叙述为：

在电路的任一节点上，流入(或流出)节点的电流的代数和恒等于零。写作：

$$\sum I = 0 \quad (1-7-1)$$

此式中符号 Σ 是“和”的意思，“代数和”就是说明相加的各项之中有正数也有负数。