

电 工 学

赵承荻 编

人 民 铁 道 出 版 社

内 容 简 介

本书主要内容包括：直流电路、磁和电磁、交流电路、变压器、直流电机、交流电动机、电器与控制电路、电子技术基础等。重点放在电工基础部分和电子技术的基础知识上，并结合铁路机车的电机、电器等实例予以说明。可作为技工学校、职工业余教学、徒工培训方面的教学用书，亦可供具有初中文化程度的工人或有关人员自学之用。

电 工 学

赵承荻 编

人民铁道出版社出版

责任编辑 张贵珍

封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：15.625 字数：353千

1980年2月第1版 1980年2月第1次印刷

印数：0001—40,000册 定价：1.25元

前 言

在加速实现四个现代化的进程中，电工基本知识的学习和应用已成为重要的一环。本书主要是为满足工厂企业广大工人学习电工知识而编写的，因而本书内容除介绍电工原理部分以外，还介绍了工厂企业中常用的一些电机、电器设备控制电路的工作原理。由于目前电子技术在国民经济各部门都得到了飞速的发展，因而本书也以一定的篇幅介绍了有关这方面的一些基本知识，为进一步学习打下初步基础。

本书在编写过程中力求理论结合实际，深入浅出，通俗易懂。可供具有初中文化程度的机电工人阅读；亦可作为技工学校、职工教育、徒工培训等方面的教学用书。

本书在编写过程中，得到了田心机车车辆工厂、永济电机工厂、长沙铁道学院、上海铁道学院、宝鸡、马角坝机务段等单位的大力支持，在此谨致以衷心的感谢。由于编者水平有限，书中缺点、错误和不足之处一定很多，欢迎广大读者给予批评指正。

编 者

于株洲田心铁路技术学校

一九七九年四月

目 录

第一章 直流电路	1
第一节 直流电路的概念	1
第二节 欧姆定律	17
第三节 电阻的联接	22
第四节 克希荷夫定律	30
第五节 等效电源定理	33
第六节 电功和电功率	37
第七节 电流的热效应, 导线和熔丝的选择	41
第八节 电容及其充放电	46
习题和思考题	56
第二章 磁和电磁	61
第一节 磁场的基本概念	61
第二节 磁场的基本物理量	67
第三节 铁磁材料的磁化及分类	73
第四节 磁场对电流的作用	81
第五节 电磁铁简介	85
第六节 磁路欧姆定律	86
第七节 电磁感应	89
第八节 自感与互感	96
习题和思考题	107
第三章 交流电路	113
第一节 交流电概述	113
第二节 正弦交流电动势的产生	114
第三节 正弦交流电的主要物理量	117

第四节	正弦交流电的矢量表示法	123
第五节	交流电路概述	127
第六节	纯电阻电路	128
第七节	纯电感电路	131
第八节	纯电容电路	135
第九节	电阻和电感串联电路	139
第十节	电阻和电容串联电路	147
第十一节	电阻、电感、电容串联电路	150
第十二节	电阻、电感与电容串并联电路	155
第十三节	集肤效应	159
第十四节	三相交流电源	160
第十五节	三相负载的联接	169
第十六节	三相交流电路的功率	179
	习题和思考题	180
第四章	变压器	185
第一节	变压器概述	185
第二节	变压器的工作原理	186
第三节	变压器的结构	192
第四节	变压器的外特性和电压变化率	200
第五节	变压器的极性和联接	201
第六节	特殊变压器	207
	习题和思考题	217
第五章	直流电机	220
第一节	直流电机的基本工作原理	220
第二节	直流电机的构造	223
第三节	直流电机的电枢绕组	229
第四节	直流电机的基本方程式	242
第五节	直流电机的激磁方式	246

第六节	直流电机的电枢反应	248
第七节	直流电动机的换向	250
第八节	改善直流电动机换向的措施	257
第九节	直流电动机的起动、反转、调速和制动	260
习题和思考题		270
第六章	交流电动机	272
第一节	三相异步电动机的工作原理	272
第二节	三相异步电动机的结构	282
第三节	三相异步电动机的定子绕组	286
第四节	三相异步电动机的运行原理	303
第五节	三相异步电动机的起动	315
第六节	三相异步电动机的调速和制动	327
第七节	交流微电机	333
习题和思考题		347
第七章	生产机械电气设备与线路	350
第一节	电动机控制电路中的常用电器	350
第二节	电气控制电路的基本环节	359
第三节	常用生产机械的电气线路	370
习题和思考题		376
第八章	电子技术概述	377
第一节	晶体二极管及单相整流电路	377
第二节	三相整流电路	399
第三节	晶体三极管	405
第四节	低频放大器	420
第五节	晶体管直流稳压电源	446
第六节	脉冲电路简介	459
第七节	可控硅技术简介	473
习题和思考题		491

第一章 直流电路

我们知道，目前在工农业生产中使用得最广泛的是交流电，但由于直流电有它的独特之处，所以在某些领域中也得到普遍应用，例如电解、电镀、电子仪器、自动控制设备等，在铁路的机车、车辆上也广泛采用直流电源。

直流电路比较简单，首先学习和掌握直流电路可为以后学习交流电路打下一定的基础，所以我们先学习和研究直流电路。

第一节 直流电路的概念

一、电 路

手电筒是一种最简单的用电设备，其电路如图 1—1 所示，它是由干电池（电源）、电珠（负载）、开关和金属外壳（作为联接导线用）等几部分组成。

当我们把图 1—1 电路中的开关合上，电珠就会发光，说明电路中有电流流通。电流通过的路径称为**电路**。最简单的电路由下列三个部分组成。

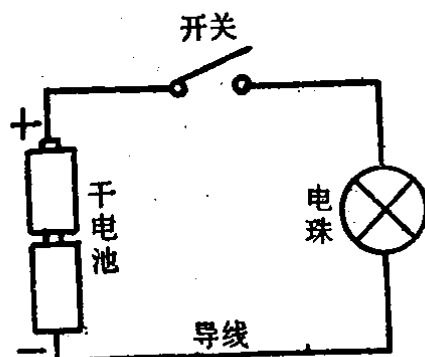


图 1—1 简单的直流电路

（一）电源

电源是电路中供给电能的设备。此电能是由不同形式的能量转换而成。例如干电池和蓄电池是把化学能转变为电

能；发电机是把机械能转变为电能；太阳能电池则是把太阳的热能转变为电能；而原子能发电站则是把原子能转变为电能。

（二）负载

负载通称用电设备，其作用是把电能转变为其它形式的能量。例如电珠、电灯、日光灯等把电能转变为光能，电炉是把电能转变为热能，而电动机则是把电能转变为机械能。

（三）联接导线

把电源和负载联成一个闭合的回路，使电流能流通的导线称为联接导线。

除此以外，在比较完整的电路中，还包括开关、控制设备、指示设备、保护装置和测量仪表等等，我们将在后面逐步介绍。

电路一般可将其分成内电路和外电路两部分：

内电路：电源内部的通路。

外电路：包括负载、联接导线、开关等设备组成的通路。

二、电流、电流强度及电流密度

（一）电流 要了解电流的本质，必须首先从物质内部的结构进行分析。

自然界中的各种物质都是由分子组成的；而分子是由原子组成的；原子则是由原子核和电子所组成。

原子核带正电荷，电子带负电荷，电子有规律地分层分布在原子核周围，绕原子核旋转。图 1—2 所示为铝原子结构示意图。在通常情况下，电子所带的负电荷量和原子核所带的正电荷量相等，故整个原子不显电性。

通过实验我们知道：同性电荷互相排斥，异性电荷互相

吸引。所以绕原子核高速旋转的电子，一方面受到原子核的吸引，另一方面又因其在高速旋转时的离心力而有脱离原子核吸引的趋势。在金属原子中，外层电子受原子核的吸引力较弱，它容易脱离原子核的吸引而在金属中自由运动，这些电子称自由电子。当在一定的外加条件作用下（例如用毛皮摩擦电木棒；发电机的电磁感应现象；利用干电池、蓄电池中的化学反应而组成电源等），就可以使金属中的这些自由电子按照一定的规则运动。

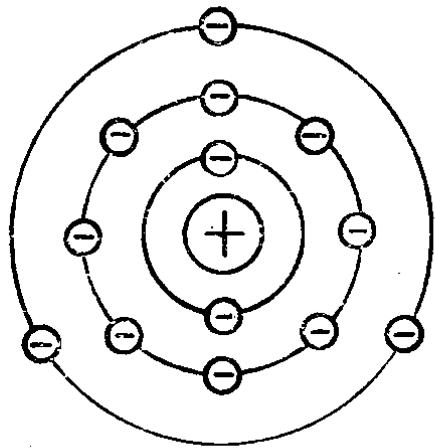


图 1—2 铝原子结构示意图

当我们把用电设备通过导线接在电源两端时，由于电源的作用，就可以使导线和用电设备（也包括电源内部）中的自由电子或离子（在某些化学溶液中）沿一定的方向运动，因而就形成了电流。所以**电流**就是电子或离子按照一定方向的运动。

由上分析可知：要产生电流必须具备两个条件，一是必须有一个金属导体（或导电的液体或气体）所组成的闭合通路，另外必须有电源供电。

（二）电流的方向

我们规定正电荷的移动方向为电流的方向。

这种规定的电流方向，正好与金属导体中自由电子移动的方向相反，但这与相等数量的负电荷向相反的方向移动效果完全一样，这对我们后面讨论的问题并无影响，所以今后讲的电流方向均指正电荷移动的方向。

（三）电流强度 为了表示电流的大小，我们采用了电

流强度这个物理量。**电流强度**的定义是：单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流强度简称电流，用符号“ I ”表示，即

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

式中 Q ——电荷量，库伦（1库伦相当于 6.25×10^{18} 个电子的电量）；

t ——时间，秒；

I ——电流，安培（简称安）。

若在1秒钟内流过导体横截面的电量是1库伦，则导体内的电流强度就是1安，用“A”表示。根据实际需要，电流单位亦可用千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）表示。

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

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

$$\begin{aligned} 1 \text{ 微安 } (\mu A) &= \frac{1}{1000} \text{ 毫安 (mA)} = 10^{-3} \text{ 毫安 (mA)} \\ &= 10^{-6} \text{ 安 (A)} \end{aligned}$$

手电筒中电珠的电流约0.15~0.3安，晶体管收音机中的电流约几到几十毫安，东风₄型内燃机车上用的每一台ZQDR-410型牵引电动机电流为800安，韶山1型电力机车上用的每一台ZQ-650-1型牵引电动机的电流为500安。

（四）电流密度 从实践中我们知道，电流通过导线时，会使导线发热，故对于大小不同的电流就必须选择不同横截面积的导线。例如上面提到的晶体管收音机由于电流很小，只需用很细的导线（横截面积为0.1毫米²左右），而电力机车上的牵引电动机电流很大，就要用很粗的导线（横截面积

为100毫米²左右)。据此，我们又引入电流密度这一物理量。

电流密度：流过导体中的电流 I 与导体横截面积 S 之比值。即

$$J = \frac{I}{S} \quad (1-2)$$

式中 J —— 电流密度，安/毫米²；

I —— 电流，安；

S —— 导体横截面积，毫米²。

测量电路中电流的仪表叫电流表。电流表必须串联接在电路中。使用直流电流表时，还必须注意电流表的极性和电源的极性，如图1—3所示。不能接反，否则表针将向反方向偏转，而有可能使表针碰弯。

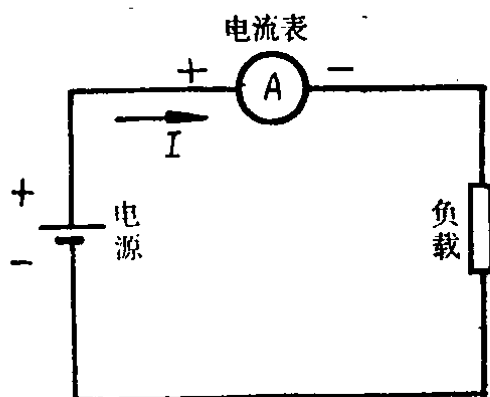


图 1—3 电流表的接法

三、电位、电压和电动势

(一) 电位

我们知道：水总是由高处往低处自由流动，这是由于高处的水位高，低处的水位低，水由高水位流向低水位。与此相似，带电的物体具有电位，我们规定带正电荷的物体具有高电位（正电位），带负电荷的物体具有低电位（负电位）。电路中每一点都有一定的电位，就好比从山上流下来的水，每一点都有一定的水位一样。水位可以以海平面作为起点（参考点），看作零水位，其它各点水的位置比海平面高多少，就说它的水位是多少。同样，电位也有一个起点（参考

点) 作为零电位, 通常我们把大地作为零电位点, 而把电路中其它各点的电位与大地比较, 看是高还是低。在电子线路中则往往把金属底板、机壳或某些公共点作为零电位点。

电位用“ φ ”表示, 单位是伏特 (简称伏), 用字母“V”表示。

我们知道, 水位的高低是与用哪一点作为参考点 (零水位) 有关系的。例如长江从唐古拉山东流入海, 如以海平面为零水位, 则长江中各点的水位都比海平面高。而如以长江发源地水位为零水位, 则长江各处的水位都为低水位。同样电路中任意点的电位高低也与参考点 (零电位) 的选择有关。例如有两个电源, 一个是 3 伏, 一个是 6 伏, 把它们顺向串接, 若将 A 点接地 (作为零电位), 如图 1—4 (a) 所示, 则 B 点电位就比 A 点高 3 伏 (可用 +3V 表示), C 点电位比 A 点高 9 伏 (可用 +9V 表示)。如果我们将 B 点接地 (作为零电位), 如图 1—4 (b) 所示, 则 A 点电位比 B 点低 3 伏 (可用 -3V 表示), C 点电位比 B 点高 6 伏 (可用 +6V 表示)。故当参考点改变时, 各点的电位也随之发生变化。

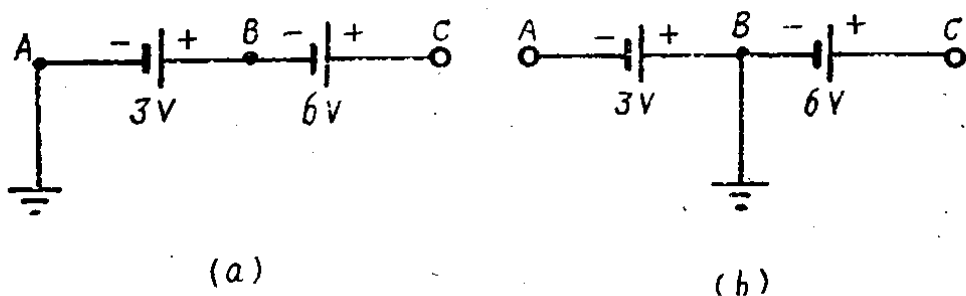


图 1—4 电位的参考点
(a) A 点为零电位; (b) B 点为零电位。

(二) 电压 (电位差)

观察图 1—5 可知, 如打开水阀, 水就向低处流动, 即从高水位 (A 点) 流向低水位 (B 点)。所以水位差是形成

水流的原因。

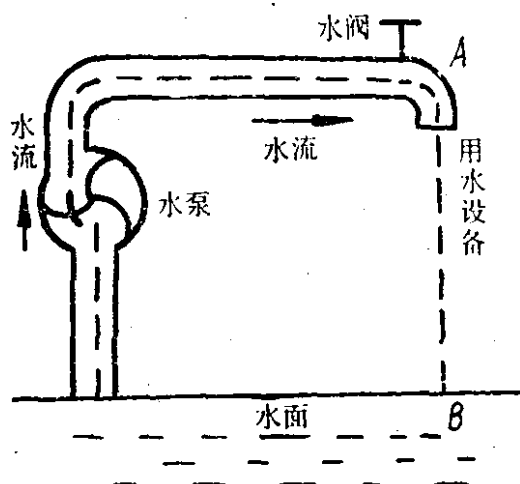


图 1-5 水流循环图

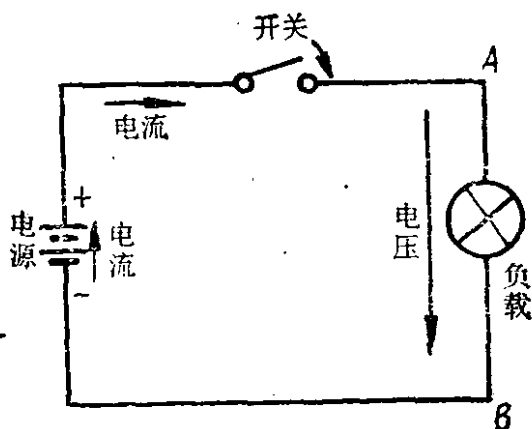


图 1-6 电流循环图

同样，由图 1-6 可知，合上开关，电流就从高电位（A点）流向低电位（B点），从而形成电流。所以电位差是形成电流的原因。

电路中任意两点之间的电位差称为**电压**，其数值等于单位正电荷在电场力的作用下从一点移到另一点时所作的功，即

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

式中 W ——电场力移动电荷所做的功，焦耳；

Q ——电荷所带的电量，库伦；

U ——电压，伏特（简称伏）。

根据实际需要，电压的单位亦可用千伏（kV）、毫伏（mV）和微伏（ μV ）表示。

$$1 \text{ 千伏 (kV)} = 10^3 \text{ 伏 (V)}$$

$$1 \text{ 毫伏 (mV)} = \frac{1}{1000} \text{ 伏 (V)} = 10^{-3} \text{ 伏 (V)}$$

$$1 \text{ 微伏 } (\mu V) = 10^{-3} \text{ 毫伏 (mV)} = 10^{-6} \text{ 伏 (V)}$$

应该注意：电路中任意两点的电位差（即电压）只与这

两点本身在电路中的位置有关，而与参考点的选择无关。例如，在图 1—4 中， C 、 A 两点的电压 U_{CA} ，当以 A 点为参考点时，则

$$U_{CA} = \varphi_C - \varphi_A = (6 + 3) - 0 = 9 \text{ 伏}$$

当以 B 点为参考点时，则

$$U_{CA} = \varphi_C - \varphi_A = 6 - (-3) = 9 \text{ 伏}$$

测量电路中任意两点间电压的仪表叫电压表。电压表必须并接（跨接）在被测的两点之间，如图 1—7 所示是用电压表 V 测量负载 R 两端（即 A 和 B 两点）之间的电压。使用直流电压表时，必须注意电压表的极性与电源的极性相一致，即电压表的正端接高电位的点，负端接低电位的点。

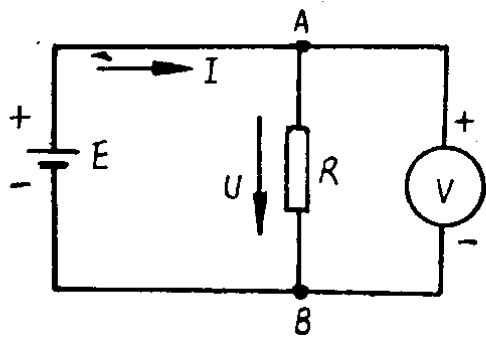


图 1—7 电压表的接法
 V ——电压表； E ——电源，
 R ——电阻。

（三）电动势

继续观察图 1—5，要维持水流能继续不断地从高水位流向低水位，就必须有一个在水路中能把水从低水位提到高水位的装置（水泵）。故水泵是用来维持水路中具有一定水压（水位差）的装置。

同样从图 1—6 知道，要维持电流能继续不断地从高电位流向低电位，就必须有一个在电路中能保持 A 、 B 两点间有一定电位差的装置（电源）。电源的效能就是将其它形式的能量（机械能、化学能、太阳能、原子能等）转换成电能，从而使电源两端具有一定的电压（电位差）。我们把：当电源没有与用电设备相联时（即空载时），电源两端的电压称为电源的**电动势**（简称电势）。其数值等于电源力（即

电源使它内部的正负电荷分离而集聚在电源的两端，从而使两端具有一定电位差的能力）把单位正电荷从负极（低电位端）移动到正极（高电位端）所做的功，即

$$E = \frac{W_0}{Q} \quad (1-4)$$

式中 W_0 —— 电源力把电荷从电源负极移到正极所做的功，焦耳；

Q —— 电荷所带的电量，库伦；

E —— 电动势，伏特。

下面我们来研究电流、电压、电动势的方向问题，参看图 1—6。

1. 外电路中：电流从高电位流向低电位，即从正极流向负极，因为电流是由电位差（电压）产生的，所以电压的方向也是从正极指向负极。

2. 在内电路中：电流在电源力的作用下从低电位被拉到高电位，即电流从负极流向正极。电动势的方向也是从负极指向正极。

这样电流在整个电路中完成一个循环，正好象水流在水路中完成一个循环一样。

四、电 阻

（一）导体的电阻、电阻率

在电场力的作用下，金属导体中的自由电子可以沿一定的方面移动，所以金属具有导电的性能。但是，另一方面，自由电子在金属导体内定向移动时，又会与导体中的原子相碰撞，即遇到一定的阻力，导体对于通过它的电流所呈现的阻力称为导体的**电阻**，用符号“ R ”或“ r ”表示。电阻的单位是欧姆（简称欧），用字母“ Ω ”表示，根据需要电阻

亦可用千欧 ($k\Omega$) 或兆欧 ($M\Omega$) 表示。

$$1 \text{ 千欧}(k\Omega) = 1000 \text{ 欧}(\Omega) = 10^3 \text{ 欧}(\Omega)$$

$$1 \text{ 兆欧}(M\Omega) = 1000 \text{ 千欧}(k\Omega) = 10^3 \text{ 千欧}(k\Omega) \\ = 10^6 \text{ 欧}(\Omega)$$

导体的电阻与哪些因素有关系呢？可以用下列实验说明：

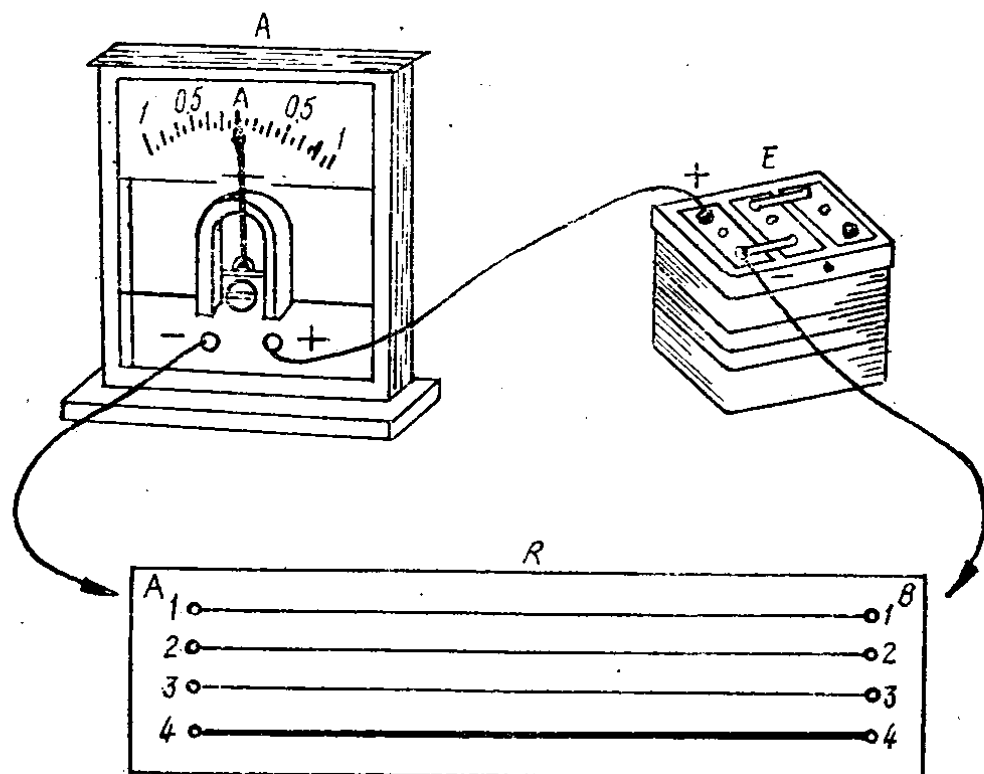


图 1—8 导体电阻大小的实验

- 1 —— 铜，长 1 米，截面 0.059 毫米^2 ；
- 2 —— 铁，长 1 米，截面 0.059 毫米^2 ；
- 3 —— 镍铬，长 1 米，截面 0.059 毫米^2 ；
- 4 —— 镍铬，长 1 米，截面 0.137 毫米^2 。

按图 1—8 所示将电池 E 与电流表 A 串接起来，两个接线端（正端和负端）分别与电阻板 R 上的不同导线相接，由于电源的电动势 E 一定，所以加在 A 、 B 两个端点上的电压是一定的。

1. 电源负端与 B 点的 1 相连，正端从 A 点的 1 开始慢

慢向 B 点滑动，则可看到电流表的指针偏转的角度慢慢加大，说明电路中的电流慢慢增加，亦即导体对电流的阻碍作用（电阻）慢慢减小。结论：导体的长度越短则导体的电阻越小。

2. 电源的负端与 B 点的 3 相连，正端与 A 点的 3 相连，记下电流表读数，随后再分别与 A 点和 B 点的 4 相连，记下读数，可以看出 3 点的读数大，4 点的读数小。结论：导体的截面积越大，电阻越小。

3. 电源负端与 B 点的 1 相连，正端与 A 点的 1 相连，记下电流表读数，随后分别与 A 和 B 端的 2 相连，记下电流表读数，再与 3 相连，记下读数。可以看出与 1 相连时（即铜导线）电流最大，即电阻最小；与 2 相连时（铁导线）电流次之，即电阻较大；与 3 相连时（镍铬导线）电流最小，即电阻最大。结论：当导体的长度和截面积相同时，导体的电阻与导体本身的材料有关。

综合以上实验得出如下公式，即

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

式中 R —— 导体的电阻，欧；

l —— 导体的长度，米；

S —— 导体的截面积，毫米²；

ρ —— 导体的电阻率，欧·毫米²/米。

导体的电阻率 ρ 是指长度为 1 米、截面积为 1 毫米² 的导体在温度为 20°C 时所具有的电阻值。一些常用的金属材料的电阻率如表 1—1 所示。

由表 1—1 可见：

1. 制造导电材料时，电阻越小越好，则可用铜、铝，有的重要部件可以用银，或在铜的表面镀银。如各种电机、