

高等学校试用教材

电 工 学

(冶金地质矿业类专业用)

上 册

中国矿业学院编

丁 钟 旦 主 编

高等教育出版社

前 言

本书是1977年10月教育部召开的高等学校工科基础课教材座谈会上确定编写的冶金、地质、矿业类专业电工学课程的试用教材,内容包括电路、电机、电子技术三部分。为了适应我国社会主义现代化要求和满足自动控制、电子技术方面飞速发展的需要,电路部分增加了网络理论、非正弦和过渡过程等内容。电机部分作了一定的简化,较多地增加了电子技术的内容,其中适当反映了场效应管、集成电路、数字技术和程序控制等新技术。

为了加强基础理论,在电路和电子技术部分加强了有关内容。为了便于教学和培养分析问题的能力,教材中尽可能编写了较多数量的例题和实例,每章都编有小结和习题,并附有习题答案。为了扩大知识面,作为学习后续课程及实际工作的参考,编写内容略为广泛,这部分冠以“*”号,可不列为教学计划内容。由于冶金、地质、矿业类专业要求差别较大,重点也各不一致,教学时宜根据不同专业的教学实际,恰当取舍内容,不能强求一律。

本书编写工作,上册由中国矿业学院电工教研室负责,第一、三、四章由丁钟旦、第二章由王纪春、第五、六、七、八、九章由刘惠鹏、第十章由戴鸿仪四同志分别编写。下册由东北工学院电工学教研室负责,第十一、十五章由邹笃镭、第十二章由孙骆生、第十三、十六、十七章由吴铁坚、第十四章由裴新才四位同志分别编写。丁钟旦、孙骆生二同志分别为上、下册主编。全书由中南矿冶学院电工学教研室负责主审,由王翰森、曾式梅、刘学勤、赵阜南、杨欣荣和黄芳草同志参加审稿。根据审稿会议要求和主审单位安排,最后由刘学勤、杨欣荣二同志复审。

参加本书审稿会的有中南矿冶学院、北京钢铁学院、广东矿冶学院、阜新矿业学院、山西矿业学院、武汉地质学院、成都地质学院、湖南大学、湘潭大学、湖北建筑工业学院等有关单位。他们对本书的编写工作提出了许多宝贵的修改意见，我们在此表示衷心感谢。

由于我们思想水平不高，业务理论知识有限，书中缺点错误一定不少，希望读者给予批评指正，以便修改提高。

编 者

一九七八年十月

目 录

第一章 直流电路	1
第一节 电路的基本定律	1
一、电路的组成和基本物理量	1
二、电路的基本定律	3
第二节 电路中的电位分析计算	11
第三节 复杂电路的计算	14
一、支路电流法	14
二、应用迭加原理解复杂电路	16
三、回路电流法	17
四、节点法	18
五、等效电源定理	21
*六、星形和三角形连结的等效变换(三端网络)	28
七、四端网络	30
第四节 最大功率传输问题	32
第五节 电气设备的额定值	34
第六节 电桥电路	37
*第七节 直流电位差计原理	39
小 结	40
习 题	43
第二章 正弦交流电路	50
(一) 正弦交流电的特征和表示方法	50
第一节 什么是交流电	50
第二节 正弦交流电的产生	52
第三节 交流电的周期和频率	54
第四节 初相位及相位差	55
第五节 交流电的有效值	57
第六节 正弦量的矢量表示法和复数表示法	60
小 结	64
(二) 单相交流电路	65

第七节 纯电阻电路	65
第八节 纯电感电路	68
第九节 纯电容电路	73
第十节 串联交流电路	78
第十一节 并联交流电路	90
第十二节 功率因数的提高	96
小 结	98
(三) 三相交流电路	99
第十三节 三相交流电动势的产生	100
第十四节 三相电路中电源的联接	101
第十五节 三相电路中负载的联接	104
第十六节 三相电路的功率	110
小 结	112
习 题	113
第三章 非正弦周期电流电路	119
第一节 非正弦周期量的存在和分解简介	119
第二节 非正弦周期量的有效值和平均值	127
*第三节 非正弦周期电流电路的计算	132
*第四节 非正弦波的一些其他知识	136
小 结	140
习 题	141
第四章 过渡过程	144
第一节 过渡过程的产生和换路定律	144
第二节 电阻电容串联电路中的过渡过程	147
*第三节 电阻电感串联电路中的过渡过程	155
第四节 电容器通过电阻电感振荡放电	160
*第五节 用极点和零点分析过渡过程	165
小 结	176
习 题	177
第五章 磁路和变压器	180
第一节 铁磁性材料及其磁性能	180

第二节	磁路的基本定律及磁路计算	188
第三节	变压器	193
*第四节	控制系统中几种常用的电磁元件	209
小 结		218
习题和思考题		221
第六章	电动机	224
第一节	概述	224
第二节	直流电动机	225
第三节	异步电动机	239
*第四节	同步电动机	260
小 结		265
习题和思考题		266
第七章	电动机的使用	269
第一节	正确认识和使用铭牌	269
第二节	电动机的起动	274
第三节	电动机的调速	278
第四节	电动机的制动	282
第五节	典型传动系统的运行	285
*第六节	电动机的检查和监视	288
*第七节	电动机的选择	289
小 结		293
习题和思考题		294
*第八章	发电机	295
第一节	概述	295
第二节	直流发电机	296
第三节	交流同步发电机	300
小 结		306
习题和思考题		307
*第九章	控制用电机	308
第一节	交磁电机放大机	309
第二节	单相异步电动机	312

第三节	伺服电动机	316
第四节	测速发电机	319
第五节	自整角机	321
第六节	步进电动机	323
第七节	电磁调速异步电动机	324
小 结		327
	习题和思考题	327
* 第十章	继电接触控制	329
第一节	几种常用的控制电器	329
第二节	鼠笼式异步电动机的控制	336
第三节	绕线式异步电动机的控制	345
第四节	电气控制电路中的常用环节	348
第五节	小型发电站的控制线路	355
小 结		358
	习题和思考题	358

第一章 直流电路

第一节 电路的基本定律

一、电路的组成和基本物理量

电路是指电工设备组成的、电流藉以通过的集合体。它起的作用是将其它形式的能量转换成为电能，将电能(有时是电讯号)进行传输和分配，以及将电能转换成为其他形式的能量。

电路一般由三个基本部分组成：

1. 电源 它是将其他形式能量转换成电能的设备。如发电机、蓄电池、光电池等，也包括象声电变换的话筒、热电变换的热电偶等等弱电设备。

2. 负载 它是将电能转化为其他形式的能量的设备，是取用电能的，也称受电器。如电动机、电灯和电炉就分别是电能转换为机械能、电能转换为光能以及电能转换为热能的受电器，负载还包括电声转换的扬声器(喇叭)等等弱电设备。

3. 连接部分 包括导线、开关、熔断器等，是把电能由电源传送到负载的媒介，其中开关和熔断器则起控制、分配电能和保护电路的作用。

电源、负载和导线等都是构成电路的元件，但在研究电路时，并不去注意这些元件的结构和形状，而是加以科学抽象，将它们用电路符号来代表，并构成电路图来进行研究，例如，通过导线将灯泡与电源接通的电路，就可

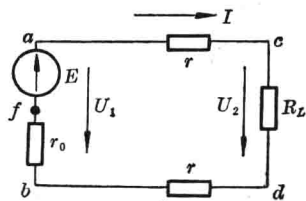


图 1-1 用电路符号代表电路元件的电路图

用电路符号表示于图 1-1。其中 R_L 代表灯泡, $\mathcal{E}$ 代表电源电动势, r_0 代表电源内阻, r 代表导线电阻。图中一般还有开关(刀闸)和熔断器,但在着重研究电路的电压电流关系时,开关和熔断器常常不画。

图 1-1 所示电流流通的物理过程为:由于电源电动势的存在,使电源 ab 两端电位不等,存在电位差。当电路接通时,在电位差作用下,将有电流从高电位的 a 端经过负载流向低电位的 b 端,又在电动势的作用下,从 b 端经过电源内部流向 a 端。电流的大小与电动势的大小有关,也与负载电阻 R_L 、导线电阻 r 和电源内阻 r_0 的大小有关。

以上表明,电路中的物理过程需用电动势、电压、电流来描述。关于电动势、电压、电流的严格定义已于物理中介绍,这里不再重复。但为了正确使用这些物理量,现将它们的方向和注意事项,分述于下:

1. 电流 I 它代表正电荷的定向流动(或电子的相反方向流动),它的方向在负载内是从高电位到低电位,负载这时吸收功率;在电源内则从低电位到高电位,电源这时是发出电功率。电流的单位是安。

2. 电动势 $\mathcal{E}$ 电动势 $\mathcal{E}$ 的方向是从低电位指向高电位,表示的是电位升,并用箭头表示在电路图上,见图 1-1 中的 $\mathcal{E}$ 。它的方向是力图驱使正电荷流动的方向,在电源发出电功率时,它的方向和它所产生的电流方向一致。如果流经电源的电流和电动势方向相反,例如蓄电池的充电状态,电源则吸收电功率,属于负载状态。

3. 电压 U 它的方向规定为从高电位到低电位,也用箭头表示在电路图上,但这表示的是电位降,也称电压降,见图 1-1 中的 U_1 和 U_2 ,前者称电源端电压,后者称负载端电压。

电动势和电压的单位都是伏。

当用下标表示电动势和电压的方向时，应注意它们和所标两点的电位之间的关系：

E_{ab} 表示从 a 点到 b 点的电位升， $E_{ab} = \varphi_b - \varphi_a$

E_{ba} 表示从 b 点到 a 点的电位升， $E_{ba} = \varphi_a - \varphi_b$

U_{ab} 表示从 a 点到 b 点的电位降， $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$

U_{ba} 表示从 b 点到 a 点的电位降， $U_{ba} = \varphi_b - \varphi_a$

因此，

$$E_{ab} = -E_{ba} = -U_{ab} = U_{ba} \quad (1-1)$$

在分析计算电路时，将常常用到这种关系，有时也可以不用下标。例如

$$E = U$$

就是用电动势或电位升以及电压降表示的同一个电位差，见图 1-2。

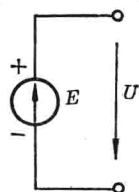


图 1-2 以电位升和电压降表示的同一个电位差

此外，还有电阻，单位为欧。它表示电阻元件对电流的阻碍作用。对于材料均匀截面也均匀的导线来说

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S}$$

式中 l 为导线长度， S 为截面积。 ρ 是材料的电阻系数， γ 是材料的电导系数，电阻系数与电导系数互为倒数。电阻的符号见图 1-1 中的 R_L 、 r 、 r_0 等。

二、电路的基本定律

电路的基本定律有欧姆定律和克希荷夫定律，前者阐明电阻上电压和电流的相互关系，后者阐明完整的电路，尤其是复杂电路中的电压和电流的相互关系，此外迭加原理也是一个极为普遍的重要原理，广泛用于直流、交流正弦、非正弦电路和过渡过程中，用来简化电路的分析计算。在分析、推导和引出一些电路理论时，

也常常要使用它,现分别介绍于下:

1. 欧姆定律 设图 1-3 中 a, b 两端间,接有电阻 R , R 上的电压 U 和电流 I 的方向如图 1-3 所示, 欧姆定律阐明了它们间的关系, 数学表示式是

$$U = IR \quad (1-2)$$

应该注意, 上式中电压正方向和电流正方向是一致的, 见图 1-3a。

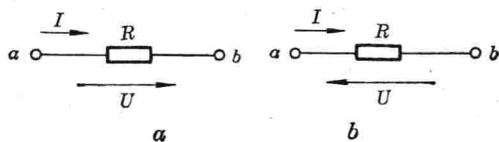


图 1-3 欧姆定律的应用

如果电压正方向和电流正方向相反, 见图 1-3b, 欧姆定律的表示式就应改为

$$U = -IR$$

欧姆定律用于闭合电路时, 作为一般形式, 公式应表示为

$$I = \frac{\sum E}{\sum R} \quad (1-3)$$

其中, $\sum E$ 表示闭合电路中含有多个电动势时, 它们的代数 sum。其中 E 的正方向与 I 的正方向一致时为正, 不一致时为负。

将公式(1-3)应用于图 1-1 的电路时, 得

$$I = \frac{E}{R + 2r + r_0}$$

电源端电压 U_1 可表示为

$$U_1 = I(R_L + 2r)$$

如表示为与电源电动势的关系, 则为

$$U_1 = E - Ir_0 \quad (1-4)$$

由上式看出, 电流愈大, 端电压愈下降, 可见, 电源端电压将随负载电流的增大而降低。电灯并联过多时亮度变暗, 就是这个端电压

下降过多引起的。电源端电压随负载电流而变化的特性称电源的外特性, (1-4)就是电源的外特性公式。

如果导线电阻和电源内阻小得可以忽略不计, 见图 1-4, 这时, 公式就表示为

$$I = \frac{E}{R} = \frac{U}{R}$$

其中 $E = U$ 。

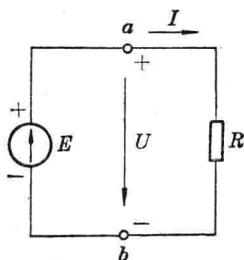


图 1-4 r 和 r_0 忽略时的闭合电路

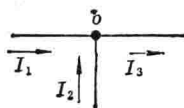


图 1-5 克希荷夫电流定律

2. 克希荷夫定律 克希荷夫定律包括有克希荷夫电流定律 (以前称克希荷夫第一定律) 和克希荷夫电压定律 (以前称克希荷夫第二定律), 分别介绍于下:

(1) 克希荷夫电流定律, 它阐明联结于同一节点的各支路电流间的关系。即对于同一节点, 各支路电流的代数和等于零。

$$\sum I = 0 \quad (1-5)$$

这里所谓支路就是没有分支的一段电路, 所谓节点就是指的三条以上支路的汇合点, 见图 1-5, 图中各支路电流的关系, 即可按(1-5)式列成

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

这是因为根据电流连续性原理, 即电路中任何一点 (包括节点在内) 都不可能发生电荷的堆积, 因此, 同一时间内流入该节点的总电荷恒等于流出该节点的总电荷, 或说成是对同一节点来说, 电流

代数和恒为零。并规定取流入节点的电流为正，流出节点的电流为负。

(2)克希荷夫电压定律,它阐明电路的任一回路中各部分电压间的关系。即按回路方向(见图 1-6 中虚线箭头所示)绕行一周,电压降的代数和为零。

$$\sum U = 0 \quad (1-6)$$

这是因为,根据电位单值性原理,即电路中任一点的电位只能有一个值,按回路方向在回路中绕行一周,通过回路中各段的电位升高和降低,回到原来开始点时,得到的电位值应和原来的电位一致。也就是说,在这一闭合回路中,绕行一周时,电位升的总和应与电位降的总和相等。或都按电压降来考虑,则可说成是电压降的代数和为零。这里应规定电压降与回路方向一致的为正,相反的为负。以图 1-6 为例,由 a 点出发,按回路方向 $abcd a$ 绕行一周,应得

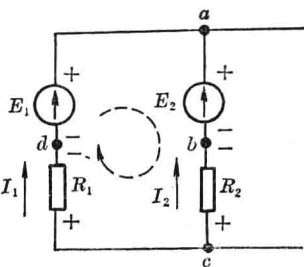


图 1-6 克希荷夫电压定律

$$\begin{aligned} \sum U &= U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} \\ &= (E_2) + (-I_2 R_2) + (I_1 R_1) + (-E_1) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{即} \quad E_2 - E_1 + I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0 \quad (1-7)$$

克希荷夫电压定律除都按电压降来说明外,有时也按回路中电动势和电阻电压降来说明,即在闭合回路中,电势的代数和等于各段电阻上电压降的代数和,

$$\sum E = \sum IR \quad (1-8)$$

其中,电势方向与回路方向一致的为正,相反的为负;电流通过电阻造成的电压降方向(由高电位指向低电位)与回路方向一致的

为正,相反的为负。仍以图 1-6 为例,可得

$$\Sigma E = -E_2 + E_1 = \Sigma IR = -I_2 R_2 + I_1 R_1$$

整理后得

$$E_2 - E_1 + I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0 \quad (1-9)$$

结果与(1-7)式所示一致,可见这两说法是一致的。但使用时,以 $\Sigma U = 0$ 较为直接、单一和方便。

例 1-1 图 1-7 是一晶体三极管电路,如果已知两个支路的电流分别是:发射极电流 $I_e = 4.68$ 毫安,集电极电流 $I_c = 4.62$ 毫安,三个电流的方向如图所示,问基极电流 I_b 应是多少?

解 这里晶体管可以认为是扩大了节点,流入它的电流应该等于流出它的电流,根据图中标定的方向,应有

$$I_c + I_b - I_e = 0$$

因此

$$I_b = I_e - I_c = 4.68 - 4.62 = 0.06 \text{ mA}$$

基极电流 I_b 是 0.06 毫安。

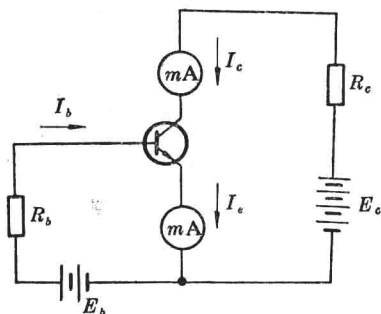


图 1-7 例 1-1 的图

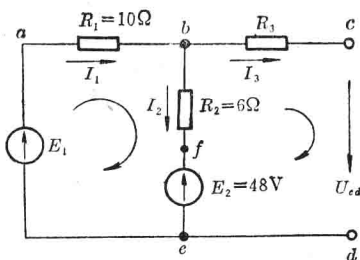


图 1-8 例 1-2 的图

例 1-2 图 1-8 所示为某复杂电路的一部分,已知 $I_2 = 2$ 安, $I_3 = 2$ 安, $U_{cd} = 24$ 伏, $E_2 = 48$ 伏,求 E_1 、 I_1 及 R_3 。

解 根据克希荷夫电流定律,在节点 b 得下列方程,并从而求得 I_1 为

$$I_1 = I_2 + I_3 = 2 + 2 = 4 \text{ A}$$

图中 $bcdefb$ 回路,由于 cd 电位差已知,所以可用克希荷夫电压定律列出回路中各部分电压的关系,并从而求得 R_3 。如采用 $\Sigma E = \Sigma IR$ 形式,则得

$$E_2 = -I_2 R_2 + I_3 R_3 + U_{cd}$$

$$48 = 2 \times 6 + 2 \times R_3 + 24$$

$$R_3 = \frac{48 - 24 + 12}{2} = \frac{36}{2} = 18\Omega$$

如采用 $\Sigma U = 0$, 则得

$$-E_2 - I_2 R_2 + I_3 R_3 + U_{cd} = 0$$

$$-48 - 2 \times 6 + 2 \times R_3 + 24 = 0$$

$$R_3 = \frac{48 + 12 - 24}{2} = \frac{36}{2} = 18\Omega$$

可见运用这两种形式结果是一致的, 这就使我们可以更放心地使用后一形式。

图中 $abfea$ 回路, 用克希荷夫电压定律列出回路中各部分电压的关系, 从而求得 E_1 。

现采用 $\Sigma U = 0$ 形式, 则得

$$-E_1 + I_1 R_1 + I_2 R_2 + E_2 = 0$$

$$E_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + E_2 = 4 \times 10 + 2 \times 6 + 48 = 100\text{V}$$

例 1-3 图 1-9 中所示是某一电路的局部, 已知 $I = 1$ 毫安, $R_1 = 3$ 千欧, $U_{ad} = 8$ 伏, $E_1 = 4$ 伏, 试求 R_2 。

解 图中表示的虽非完整电路, 但可认为 $abcd a$ 是假想回路, 回路中各段电压, 仍然遵循克希荷夫电压定律, 按照虚线所示回路方向, 采用 $\Sigma U = 0$ 形式列出电压方程式, 得

$$I R_1 + E_1 + I R_2 - U_{ad} = 0$$

$$0.001 \times 3 \times 10^3 + 4 + 0.001 \times R_2 - 8 = 0$$

$$R_2 = \frac{8 - 0.001 \times 3 \times 10^3 - 4}{0.001} = 1 \times 10^3 \Omega$$

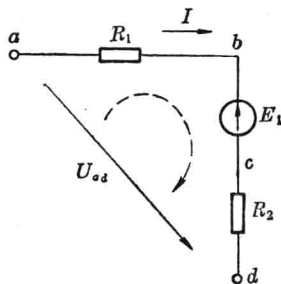


图 1-9 例 1-3 的图

结果得 R_2 为 1 千欧。

实际上 U_{ac} 和 U_{ab} , U_{bc} 之间的关系, 可写成下式

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} - U_{ad} = 0$$

即

$$U_{ad} = U_{ab} + U_{bc} + U_{cd}$$

这就是总电压等于分电压之和的关系。所以克希荷夫电压定律是总电压与分电压之间关系的根据。

3. 迭加原理 迭加原理可以这样说明, 当电路中有多个电源时, 电路中的电流可以认为是各个电源单独作用于电路产生的分电流相迭加的结果。以图 1-10 为例

$$I = I' + I''$$

E_1 、 E_2 单独作用于 R 上的电流为

$$I' = \frac{E_1}{R}, \quad I'' = -\frac{E_2}{R}$$

代入上式, 得

$$I = \frac{E_1}{R} - \frac{E_2}{R} = \frac{E_1 - E_2}{R}$$

这和应用多电势闭合电路的欧姆定律得出的公式是一致的。

$$I = \frac{\sum E}{R} = \frac{E_1 - E_2}{R}$$

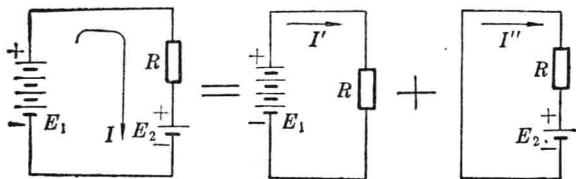


图 1-10 迭加原理应用于闭合电路

这个电路由于简单, 实际上没有必要应用迭加原理来运算。但迭加原理应用于含源支路的电压电流关系上却是十分简便而准确的。含源支路是指支路中除电阻外还包含电源。以图 1-11 为

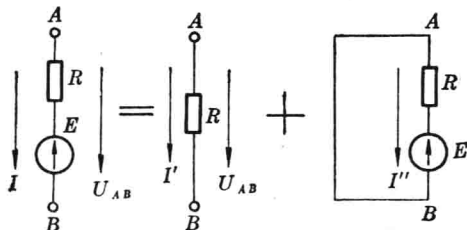


图 1-11 迭加原理应用于含源支路

例, 支路电流可由 AB 端之间的电压 U_{AB} 和电势 E 分别作用于电阻上产生的电流 I' 和 I'' 迭加而得

$$I = I' + I''$$

其中

$$I' = \frac{U_{AB}}{R}, \quad I'' = -\frac{E}{R}$$

代入上式, 得

$$I = \frac{U_{AB}}{R} - \frac{E}{R} = \frac{U_{AB} - E}{R} \quad (1-10)$$

例 1-4 图 1-12 所示各含源支路, 电压、电势和电流的正方向均已标定, 用迭加原理写出电压电流关系式。

解 (1) 图中 a 的电流表达式为

$$I = \frac{E + U}{R}$$

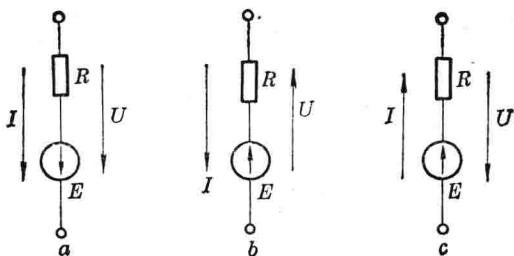


图 1-12 例 1-4 的图

(2) 图中 b 的电流表达式为

$$I = \frac{-E - U}{R} = -\frac{E + U}{R}$$

(3) 图中 c 的电流表达式为

$$I = \frac{E - U}{R}$$

这种含源支路的电流电压关系也叫含源支路欧姆定律。

最后, 需要指出的是, 迭加原理只能应用于线性电路, 就是说电路中的电阻元件的参数是常数, 电阻上的电压电流关系是线性的。