

电 工 基 础

浙 江 大 学

电机系电工基础教研组编

一九七六年一月

前 言

毛主席指示我们：“教材要彻底改革，有的首先删繁就简。”我们在教育革命的实践中体会到，教材的改革是关系到学制的缩短，教学质量的提高的重要环节之一。如何编写好教材是我们的一项重要的革命任务。

自无产阶级文化大革命以来，我们在几年的教学实践中和到工厂参加生产劳动向工人师傅学习的基础上，在1973年重新编写了《电工基础》教材。我们在编写中力求以毛主席的《矛盾论》和《实践论》，以及毛主席在教学方法上一系列的教导为主导思想。在提出问题力求从实际出发，在分析问题时则从辩证唯物主义的观点出发，尽量避免陷入唯心主义形而上学的泥沼，使理论和实际相结合。在教材的安排上我们按认识规律编写，由浅入深，由特殊到一般再由一般到特殊。在练习题和实验方面，我们尽量选取联系实际的内容。但为了使学员能弄清概念，抓住事物的内部联系，和培养学员做科学实验能突出主要矛盾，排除次要因素的能力，在练习题和实验方面，我们仍选用了一些属于验证和探讨性的课题。在体系方面和过去不同的是把电工量计这部分内容和实验编在一起，使能较紧密地和实验相结合，另编一本《电工基础实验》。对于旧的教材，我们是以批判和继承的观点来处理的。

电工基础是有关电的方面各专业的基础知识。它着重在电磁方面基本概念，基本计算方法 and 基本实验方法的学习，和培养对电磁现象及其过程的初步分析能力和初步实验技能，以为学习专业作好准备。但在学习本课程时也需要有一定的数学和物理知识。本书系根据少而精的原则选编，多数专业所共同必需学习的内容（以电路和磁路为主）。对于不同的专业有不同的要求，尚需作些删减和增加一部分补充教材，或增加结合典型产品的实例，以满足教学上的需要。

在两年来的教学实践中，反映出《电工基础》教材尚有许多不足之处。因此，我们吸收了学员和教师的意见，集体讨论，集体编写，对教材内容作了修改和补充，希望有所改进。但由于我们对马列主义和毛泽东思想学习的水平较差，实践经验不够，缺点和错误在所难免。希同志们多提意见，得以不断地改进！让我们为教育革命事业团结起来，共同努力！

电工基础

目 录

第一章 直流电路	1
1-1 引言	1
1-2 电源和负载	1
1-3 电能和电功率	3
1-4 欧姆定律	4
1-5 非线性电阻	6
1-6 电阻的串联和并联	8
1-7 扩大的欧姆定律	10
1-8 不分支的直流电路	12
1-9 基尔霍夫定律	14
1-10 支路电流法	16
1-11 迭加原理	17
1-12 回路电流法	19
1-13 节点电位法	21
1-14 等效电路、二端网络	22
1-15 Y和 Δ 电路图的转换	23
1-16 等效电源定理	26
小 结	30
习 题	31
第二章 直流磁路	37
2-1 引言	37
2-2 磁场、磁力线、磁感应强度	37
2-3 磁通、磁通连续性	38
2-4 电流的磁场和磁场强度	39
2-5 铁磁物质的磁化现象	42
2-6 磁路	45
小 结	50
习 题	51
第三章 正弦交流电路	53
3-1 正弦交流电	53
3-2 正弦电动势的产生	54
3-3 正弦交流电矢量表示法	56

3—4	正弦电流的加减	58
3—5	正弦电流的有效值和平均值	60
3—6	正弦交流的复数表示, 符号法	63
3—7	交流的元件和参数	66
3—8	电阻电路	68
3—9	电感电路	69
3—10	电容电路	72
3—11	R-L电路	75
3—12	R-C电路	77
3—13	R-L-C串联电路	78
3—14	R-L-C并联电路	80
3—15	负载的串联和并联	82
3—16	一般负载的功率	85
3—17	功率因数的提高	91
3—18	最大功率的传输	93
3—19	复杂交流电路	94
3—20	串联谐振电路	98
3—21	并联谐振电路	104
3—22	互感电路	107
3—23	空心变压器	111
	小 结	115
	习 题	118
	第四章 三相交流电路	125
4—1	引言	125
4—2	三相交流电动势的产生	125
4—3	三相发电机绕组的联接	126
4—4	星形负载的对称三相电路	128
4—5	三角形负载的对称三相电路	130
4—6	对称三相电路的功率	133
4—7	不对称三相电路的计算	134
4—8	三相电路功率的测量	135
	小 结	137
	习 题	139
	第五章 非正弦电路	141
5—1	引言	141
5—2	周期性非正弦波分解为谐波	141
5—3	非正弦电压、电流的最大值、平均值和有效值	144

5—4	线性非正弦电路的计算	146
5—5	非正弦电路的功率	150
5—6	简单滤波器	151
5—7	对称三相电路中的高次谐波	154
	小 结	157
	习 题	157
	第六章 线性电路的过渡过程	160
6—1	过渡过程	160
6—2	过渡过程的计算	162
6—3	R-L电路的过渡过程	164
6—4	R-C电路的过渡过程	169
6—5	R-L电路接通正弦电动势	174
6—6	R-C电路接通正弦电动势	176
6—7	R-L-C电路的短接	178
	小 结	183
	习 题	184

第一章 直流电路

1-1 引言

本章学习的主要内容是有关直流电路方面的一些基本规律和基本计算方法。这些规律和计算方法还可推广应用到以后各章所讲的其他方面。这些对于从事电气事业工作的人员是很重要的。我们要很好地掌握这些内容，就要很好地掌握一些基本概念。毛主席教导我们：“概念这种东西已经不是事物的现象，不是事物的各个片面，不是它的外部联系，而是抓着了事物的本质，事物的全体，事物的内部联系了。”如果我们对电路的基本概念模糊不清，那么我们就不能抓住电路的内部联系了。要很好地掌握这些基本概念，还必须到实践中去提高，把学到的理论去说明或解决实际问题。

毛主席又教导我们：“人们的认识，不论是对于自然界方面，对于社会方面，也都是一步一步地由低级向高级发展，即由浅入深，由片面到更多的方面。”在学习上我们也须遵循这一认识规律。因此本章内容的安排就从较简单的、个别的元件开始，到整个电路的组成，和到更多的方面。

1-2 电源和负载

手电筒的干电池和小灯泡，藉导体的连接，构成了一个简单的电路。电流便在这电路中流通，使小灯泡发光、发热。

电路中的电流有一定的方向和大小。电流的方向是正电荷流动的方向。电流的大小是用相当于每秒通过电路任何一个横截面的电量来衡量的。电流的单位，在实用上用安培，以“A”表示。1安培相当于每秒通过电路任何一个横截面的电量是1库仑时的电流。有时，用1安培作电流的单位嫌太大，可用它的千分之一做单位，叫做毫安，表以“mA”，或者用它的百万分之一做单位，叫做微安，表以“ μA ”。 $1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$ 。

我们应当注意到，构成的电路必须是一个闭合的路径，才有电流通过，并且在不分支的电路任何横截面上通过的电流的大小都是一样的。当电路任何地方开断，电流即停止。这些就是不分支电路的电流连续性原理。

电路中电流的大小和方向不随时间而变时，这种电流称为恒定电流，或直流电流。这电路就称为直流电路。在直流电路中的电流为I安时，经过t秒后，所通过的电量Q可以下式计算：

$$Q = It \quad (1-1)$$

电路中的电流I和这电路横截面积S的比值称为电流密度，表以“J”，

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

单位常用A/mm²。

设计各种电机、电器的线圈（绕组）时所用导线的粗细，常根据电流的大小来选定，因为电流通过导线使导线发热，温度升高。这温升和电流密度以及散热的情况有关。温升不能太高，一般在60℃到100℃之间，耐温较好的绝缘材料可以高些。通常小型的用电器的线圈，采用铜丝时，电流密度在2A/mm²左右。

象干电池一类能产生电能的装置叫做电源。电池和直流发电机用如图1—1所示的图形表示。消耗电能的，象小灯泡，叫做负载，用如图1—1中的长方形表示。电源和负载



图 1—1

以及它们之间的连接导体（或导线）叫做电路的元件。用图形表示时可作出如图1—2所示的手电筒的电路图。

现在简单地讨论一下在这电路中电源和负载的一些物理过程。

在电源中，一种非电的作用，如干电池中的化学作用，使不同号的电荷分别聚集在电源的两个电极上，一个成为正极，另一个成为负极。或者说电源中的非电的作用把正电荷自负极搬运到正电极。这样就使两个电极具有不同的电位。非电的作用所作的功就转变成成为电场的能量。非电作用的大小便以相当于搬运单位正电荷自负极到正极所作的功来衡量。这就叫做电源的电动势。在电源中电动势的方向便是自负极到正极的方向，也就是电位升高的方向。电动势的大小和方向不随时间而变的叫直流电动势，表以“E”。具有这种电动势的电源，这里如干电池，就叫做直流电源。

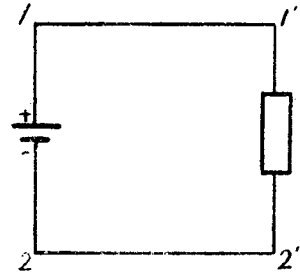


图 1—2

负载的端点1和2的电位分别表以 ϕ_1 和 ϕ_2 。如端点1的电位比端点2的电位为高，则端点1到端点2电位的差（电位差）就叫电位降落（或电压），表以 $U_{12} = \phi_1 - \phi_2$ 。电位降（电压）是以电场相当于搬运一个单位正电荷自点1到点2所作的功来衡量的。实用上所用的单位是伏特，表以“V”。1伏特相当于搬运1库仑的正电荷作功1焦耳时的电位差。有时用它的1千倍作单位，叫做千伏，表以“kV”。1kV=1000V。由于电动势也是以相当于搬运一个单位正电荷所作的功来衡量，所以单位也是伏特。

当直流电源的两个电极不和负载相连接时（即开路）非电的作用和两电极间电场的作用相平衡，电荷不再搬移。电动势E便等于两电极的开路电压U₀。但当两电极和负载相连接时，两电极的电位差使电流自电位较高的电极（正极）通过负载流到低电位的电极

(负极), 把电能转变为其他能量, 两电极间的电场位能就减少。旧的平衡受到破坏, 非电的作用又把电荷搬运起来。但因电流通过电源内部, 在电源中也消耗一部分能量转变为热能。所以在新的平衡下, 非电的作用转变而生的电能, 便等于外部负载所消耗的能量加上电源内部所消耗的能量。电动势 E 是相当于搬运一单位正电荷所作的功转变的电能, 电压 U 也是相当于电场搬运一单位正电荷所消耗的电能, 已如上述。可见搬运一个单位正电荷通过电路时, 电源所产生的电能应等于负载所消耗的电能及电源内部所消耗的电能的总和, 也就是电动势 E 应等于接在电源两极外部负载的电压 U_R 加上电源内部的电压 U_n 。以式表示,

$$E = U_R + U_n \quad (1-3)$$

1-3 电能和电功率

电能可以从别种能量, 如机械能、化学能, 热能、光能等转变得来, 也可以转变为别种形态的能量。这是电能的重要优点之一。但当电源把别种能量转变为电能, 和当负载消耗电能而转变为其他形态的能量时, 转变的电能应如何计算呢?

电源转变出的电能, 我们叫做电源产生的电能。一般直流电源产生的电能可以从它的电动势和所搬运的电荷来计算。电动势 E 伏搬运一库仑的电荷做功 E 焦耳。那么当搬运 Q 库仑时, 所作的功也就是所产生的电能, 即

$$W_E = EQ \text{ 焦耳} \quad (1-4)$$

在直流电路中, 负载所消耗的电能可从所加的电压和搬运的电荷来计算。设负载端电压为 U 伏, 即表示搬运一库仑所耗用的电能。如搬运 Q 库仑时, 负载耗用的电能便是

$$W_R = UQ \text{ 焦耳} \quad (1-5)$$

在实用上, 电量 Q 常用电流 I 来代替, 因电流比较容易测量。由于 $Q = It$, t 表时间, 单位是秒。于是上面二个式子便成为:

$$W_E = EIt \quad (1-6)$$

$$W_R = UI t \quad (1-7)$$

通常我们设计和制造发电机和各种用电设备常以单位时间 (1 秒) 产生或消耗的电能为依据。单位时间产生或消耗的电能叫做电功率, 以 P 表示。于是自上二式可得:

$$P_E = \frac{W_E}{t} = EI \quad (1-8)$$

$$P_R = \frac{W_R}{t} = UI \quad (1-9)$$

当电压 (或电动势) 为 1 伏特, 电流为 1 安培时, 电功率就是 1 单位, 叫做 1 瓦特, 以 W 表示。1 瓦特的 1 千倍叫做千瓦 (瓩), 表以 kW 。如以电功率 1 瓩, 发电 (或用电) 1 小时的电能作为单位, 这单位被称为瓩一小时, 通称为度。

发电机或电动机, 以及其它电气设备, 它们的电压、电流和功率都有规定的大小, 常称为额定值。当这些设备在额定值运行时, 称为满载。如果超过额定值, 就称为过载, 电气设备就不安全。如果低于额定值运行, 虽然安全, 但设备没有得到充分利用。

例 1—1 一盏电灯，额定电压220伏，额定功率40瓦。如果用直流发电机以额定电压供电，问通过灯泡的电流多少？如每日节约用电半小时，一年可节约多少电能？

解：通过的电流 $I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} = 0.18$ 安

一年节约的电能 $W_R = Pt = 40 \times 0.5 \times 60 \times 60 \times 365 = 26.28 \times 10^6$ 焦尔

或 $W_R = \frac{40}{1000} \times 0.5 \times 365 = 7.3$ 度

1—4 欧姆定律

毛主席教导我们：“认识的真正任务在于经过感觉而到达思维，即到达于逐步了解客观事物的内部矛盾，了解它的规律性，……。”

自前面两节的分析，可以知道直流电路的电能和功率可以由电压和电流来计算。但是电压和电流之间有没有内在连系，或规律性呢？实践证明在直流电路中，负载两端的电压和通过它的电流成正比。这一关系叫做欧姆定律。用式表示：

$$\frac{U}{I} = R \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1-10)$$

式中 R 表示比值。

对同一负载，这比值的大小有一定的数值。负载不同，比值也不同。这就说明各种负载的内在情况各不相同。可见这比值表示着负载的一种物理属性，是客观存在的。当加以一定的电压于负载，电流并不会无限地通过它，而是受到限制的。这比值我们就称它为电阻。

电阻 R 用图 1—3 的图形来表示。 U 的矢表示电压降落的方向。不用矢表示时，可用双下标，如 U_{12} 表示 1 端的电位与 2 端电位的差，即 $U_{12} = \phi_1 - \phi_2$ 。电流的方向是从电位高的一端流向低的一端，也用矢表示如图。

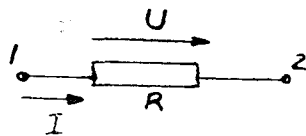


图 1—3

各种用电器具（负载）都有一定的电阻。一个负载有时也简单地用一个电阻表示。

欧姆定律是电路的一个基本定律。知道式（1—10）中任何二量便可计算其余一个量。我们常用欧姆定律来测量线圈和各种负载的电阻。将线圈通入一定的电流，用伏特表测出两端的电压，用安培表测出通过的电流，便可自式（1—10）算出电阻的值。

当 1 伏特的电压加在一个电阻的两端，通过的电流等于 1 安培时，这电阻便定作电阻的单位，叫做 1 欧姆，用 Ω 表示，一千欧姆叫做千欧（表以 $k\Omega$ ），一百万欧姆叫做兆欧（表以 $M\Omega$ ）。

由实验可知导线的电阻和它的长度 l 成正比，和它的横截面积 S 成反比。以式表示：

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-11)$$

式中 ρ 叫做电阻系数，表示不同材料有不同的电阻。工程上常用的一些导体，在常温（ 20°C ）时的电阻系数如下表：

导体	电阻系数 ρ $\frac{\text{欧}\cdot\text{毫米}^2}{\text{米}}$ (20°C)	平均温度系数 ($0^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{C}$)
银	0.016	0.0036
铜	0.0172	0.00393
铝	0.0283	0.004
黄铜	0.07	0.002
镍	0.072	0.0061
铁	0.1~0.2	0.0062
锡	0.114	0.00438
锰铜(铜、锰、镍合金)	0.44	0.000006
康铜(铜、镍合金)	0.49	0.000005

电阻系数也就是长1米，横截面积1毫米²的导线的欧姆数。自表中可见铜的电阻系数接近于银，数值较小，在电工方面应用很大。在解放前帝国主义者胡说我国无铜。但在解放后，我国已发现丰富的铜矿资源，产量也大增。为了大幅度满足工农业电气化的需要，节约用铜还是有很大的意义的。在广大农村，有些供电线采用多股铝线。在电机制造方面，也有以铝线代替铜线的产品成批生产，以满足日益增长的需要。这是因为铝的电阻系数比较接近铜的电阻系数。电阻系数大的导线如锰铜和康铜则常用于制造各种电阻器。

为方便起见，有时用电阻的倒数来作计算。电阻的倒数叫做电导，以G表示，即

$$G = \frac{1}{R}, \text{ 或 } R = \frac{1}{G} \quad (1-12)$$

电导的单位叫做莫。电导1莫就是电阻1欧。电导0.5莫就是电阻2欧。导线的电导和它的长度 l 及横截面积 S 的关系是：

$$G = \gamma \frac{S}{l} \quad (1-13)$$

式中 γ 叫做电导系数，它也电阻系数 ρ 的倒数。

例1—2：有一个线圈，通以电流，测得两端的电压得6.8伏，通过的电流20毫安，求电阻。

解：

$$\text{线圈电阻 } R = \frac{U}{I} = \frac{6.8}{0.02} = 340 \text{ 欧}$$

例1—2：有一个小电灯泡，电阻20欧，通过的电流为0.30安，求所加的电压。

解：

$$\text{所加的电压 } U = IR = 0.30 \times 20 = 6.0 \text{ 伏。}$$

1-5 非线性电阻

各种负载元件（电阻）是不是都服从欧姆定律？由于事物范围的极其广大，和发展的无限性，回答是否定的。我们要知道欧姆定律是有局限性的，只有在一定的条件下才成立。由于受到温度、形变、杂质成分等等的影响，严格地说，加于电阻元件的电压和通过的电流的比值（电阻）不是一成不变的。也就是说完全遵循欧姆定律的电阻元件是没有的。但在某些情况下，例如在平常的室温中的金属导线，欧姆定律还是适用的。

能遵循欧姆定律的电阻叫做线性电阻。如以所加的电压作纵坐标，通过的电流作横坐标，作出表示它的电压和电流关系（伏-安特性）的图形是一根通过原点的直线，如图1-4。一般的金属线如铜线，在平常的温度（室温）范围内，基本上就说是线性电阻。

但是我们要知道当电流通过金属导线时，导线的温度要升高，电阻也要升高。电流越大，电阻也增大。它的伏-安特性将如图1-5中所示的曲线1。

碳的情况则相反，开始时近似线性，当电流增大，它的电阻反而下降。它的伏-安特性如图1-5的曲线2。绝缘体和半导体也有类似的情况。

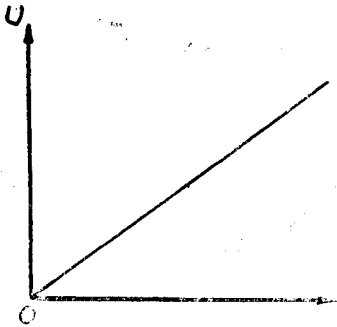


图1-4

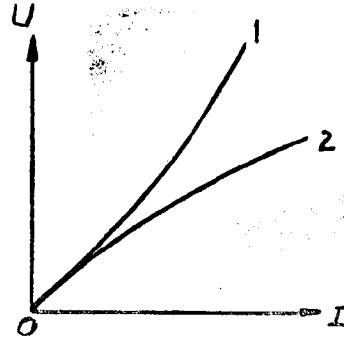


图1-5

其他还有许多负载元件，它们的伏-安特性与直线相差较大。如半导体整流器，它的伏-安特性如图1-6。在某一方向加以电压，通过的电流较大；在另一方向加以电压，电流就很小。又如热敏电阻的伏-安特性如图1-7，稳压管的如图1-8。至于图1-9

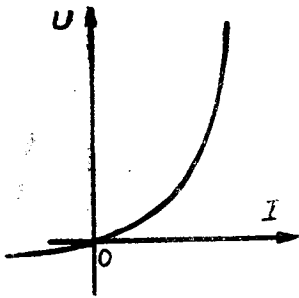


图1-6

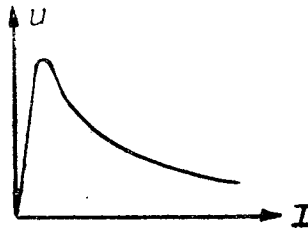


图1-7

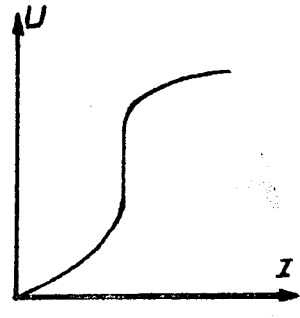


图1-8

所示的是3AK7型号的晶体三极管的输出特性曲线。这种晶体管有三个电极，即射极e，集极c，和基极b。图示特性曲线表明通过集极c的电流 I_c 和射极与集极间的电压， U_{ec} 的关系曲线。但基极电流 I_b 不同，曲线也不同。

凡伏-安特性不是直线的电阻统称为非线性电阻。非线性电阻的伏-安特性曲线，总的来说是非线性的，但如限定在某一较小的范围内的一段曲线，则近似于一直线。

非线性电阻既不遵循欧姆定律，它的电阻又是如何算法呢？这时要分别两种情况。一种是只对某一工作点求电压和电流的关系。如图1-10所示的曲线上一点P作为工作点，它的电压为 U_P ，电流为 I_P ，比值 $U_P/I_P = R_P$ ， R_P 叫做静电阻。还有一种情况是在工作点左右求电压的变化 dU 和电流的变化 dI 的比 $\frac{dU}{dI} = R_d$ ， R_d 叫做动电阻。

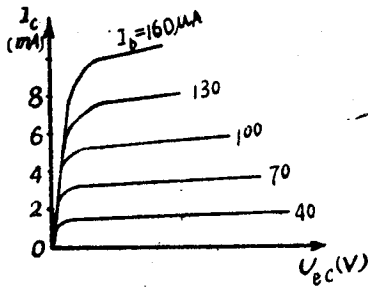


图1-9

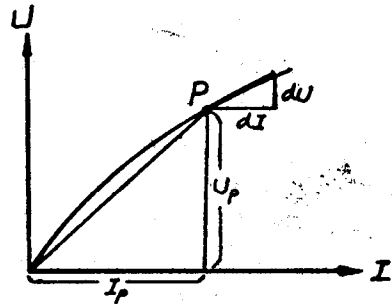


图1-10

非线性电阻的应用很广泛。例如砂砾陶可用来保护高压设备，以免受过电压的损害。辉光放电管可用作电压稳定器。半导体元件广泛地应用在电子电路中。有些金属丝（如康铜丝）的电阻随外加的应力而变，可用来测应力的大小，制成应变仪。有些金属，如水银、铝、锡等，电阻随温度降低而降低。当接近绝对零度时电阻等于零而变成超导体。超导体应用也不少，是近代物理的新发展。

一般金属导线的电阻随温度变化的性质可利用来测温度，例如测电机绕组的温升。导线电阻随温度的变化可用下式表示：

$$R = R_0 + R_0 \alpha (\theta - \theta_0) \quad (1-14)$$

表中 α 是电阻温度系数。在 $0^\circ \sim 100^\circ \text{C}$ 间铜的平均温度系数取 0.004 ($= \frac{1}{250}$) 已够准确。

R_0 和 θ_0 表示作为比较的基准电阻和温度的值，常以 15°C 为基准。实验时先测电机（或其他电器）的绕组在室温 θ_1 时的电阻 R_1 。于是有

$$R_1 = R_{15} + R_{15} \cdot \frac{1}{250} (\theta_1 - 15)$$

电流通过绕组后，经一定时间，温度升高，设为 θ_2 再测电阻得

$$R_2 = R_{15} + R_{15} \cdot \frac{1}{250} (\theta_2 - 15)$$

从这 2 式求比值得：

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{\theta_2 + 235}{\theta_1 + 235} \quad (1-15)$$

现在 R_1 、 R_2 、和 θ_1 已知，就可求出 θ_2 ，从而计算温升 $\theta_1 - \theta_2$ 。

关于含有非线性电阻的电路计算问题要按具体情况进行分析。以下只限于分析和计算线性电路。线性电路指只含线性元件的电路。

1-6 电阻的串联和并联

根据欧姆定律，我们就可以对只含一个电阻的电路问题进行计算。但有时会遇到这样的问题：有一个电阻 R_1 要求通过电流 I ，可是加上已知的电压 U ，电流就太大，这时需要再接上一个电阻 R_2 ，要问 R_2 的值应有多大。例如要扩大伏特表的量程时，就要遇到这样的问题（参见例 1-4）

一个电阻 R_1 的一端和另一个电阻 R_2 的一端依次连接成串如图 1-11(a)，叫做串联。串联电路特点是：(1) 通过各电阻的电流都一样，(2) 各电阻上的电压按电阻的大小作比例分配。

如图 1-11(a) 所示的两个电阻串联的电路，设外加电压为 U ，通过的电流为 I ，各电阻的电压分别为 U_1 和 U_2 。据欧姆定律应有：

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = I$$

电压是对单位电荷所作的功。可见推动单位电荷经过 R_1 和 R_2 所作的功 U_1 和 U_2 相加应等于 U ，即

$$U = U_1 + U_2 = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

因此如果有一个电阻 $R = R_1 + R_2$ ，用 R 代替 R_1 和 R_2 如图 1-11(b)，在同样的电压 U 作用下应得同样的电流 I 。这个电阻 R 叫做串联电阻 R_1 和 R_2 的等效电阻。可见串联电阻的等效电阻等于它们的总和，即

$$R = R_1 + R_2 \quad (1-16)$$

二个以上的串联电阻的等效电阻也同样计算。

通过这些讨论，读者当能解决上面提出的问题了。

现在又有这样的问题：在一段电路中需要通过电流 I ，而在这电路中有一个电阻 R_1

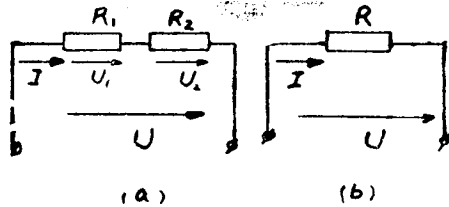


图 1-11

只能通过电流 I_1 ($< I$)，这时应并联一个电阻 R_2 如图 1—12(a)， R_2 应如何计算？例如要扩大安培表的量程时，就有这样的问题（参见下例 1—5）。

并联电路的特点是：(1) 加于各电阻的电压都相同，(2) 通过各阻的电流按电导的大小成正比分配（或按电阻成反比分配）。

如图 1—12(a) 的并联电路：

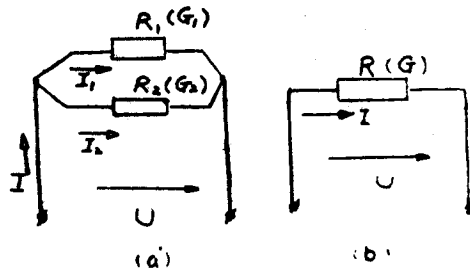


图 1—12

$$\frac{I_1}{G_1} = \frac{I_2}{G_2} = U \quad \text{或} \quad I_1 R_1 = I_2 R_2 = U \quad (1-17)$$

电流分成两路，好象水在有分支的水管中稳定流动一样，由实践经验知道电流有连续性，即

$$I = I_1 + I_2 = G_1 U + G_2 U = (G_1 + G_2) U. \quad (1-18)$$

可见若有一个电阻 R （它的电导为 $G = \frac{1}{R}$ ）用来代替二个并联的电阻 R_1 和 R_2 如图 1—12(b)，在同样电流 I 的流通下应有同样的电压 U ，即

$$I = GU = \frac{U}{R} \quad (1-19)$$

这个电阻 R 叫做并联电阻 R_1 和 R_2 的等效电阻，或 R 的倒数叫等效电导，即

$$G = G_1 + G_2 \quad (1-20)$$

或
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-21)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-22)$$

二个以上的电阻并联也可用同样方法计算等效电导 G （等于各电导总和）从而计算等效电阻 R ($= \frac{1}{G}$)，

自式(1—17)和式(1—18)可以求得下面两个有用的分流式子：

$$I_1 = I \cdot \frac{G_1}{G_1 + G_2} = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-23)$$

$$I_2 = I \cdot \frac{G_2}{G_1 + G_2} = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1-24)$$

上面两式，读者可以自己推证，作为练习。

通过这些分析，读者也当能解决所提出的问题了。

例1—4 设有一个伏特表，最大能测量5伏电压（即量程为5伏），内阻有5千欧。现在要改为测50伏的量程，要串联附加电阻多大？

解：原伏特表量程5伏，内阻5千欧，可见能通过伏特表的最大电流是

$$\frac{5}{5 \times 10^3} = 1 \times 10^{-3} \text{安}$$

现在要扩大量程为50伏，应有45伏降落在附加电阻R上。所以

$$R = \frac{45}{1 \times 10^{-3}} = 45 \text{k}\Omega$$

例1—5 现有一个毫安表，量程是1毫安，内阻是70欧。现在要扩大量程到100毫安，求分流电阻。

解：原来1mA的毫安表，满度时两端电压

$$U = I_1 R_1 = 1 \times 10^{-3} \times 70 = 70 \times 10^{-3} \text{伏}$$

现在要测 $I = 100$ 毫安的电流时，并联的电阻应分流

$$I_2 = I - I_1 = 100 - 1 = 99 \text{mA}$$

两端的电压仍为 70×10^{-3} 伏，故知分流电阻应为

$$R = \frac{70 \times 10^{-3}}{99 \times 10^{-3}} = 0.707 \text{欧}。$$

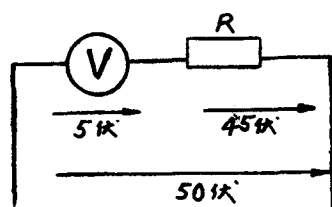


图1—13

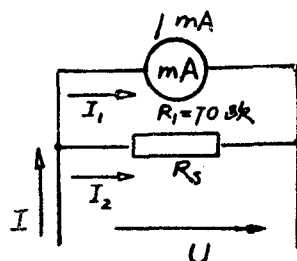


图1—14

1—7 扩大的欧姆定理

前面所讲的欧姆定律用来确定在电路中一个电阻或等效电阻的端电压和通过的电流的关系。但在一段含有电源的电路中，端电压和通过的电流的关系又是怎样呢？

在§1—1 已讨论过，当电源开路时，它的端电压等于它的电动势E。当有电流通过电源时，它的两个电极的端电压就不等于电动势，而是减少了。由式(1—3)，这时它的端电压 U_R 应加上内部电压 U_n 才等于电动势E。根据实验得知当电流I不太大时， U_n 与I是成比例的，比值就是电源的内电阻，表以“ R_n ”，故 $U_n = IR_n$ 。

为了分析的方便，我们常将电源的电动势E和内阻 R_n 分别用电动势元件和内电阻元件串联的图形来表示，如图1—15(b)所示。这样分开后，电动势元件就不再包含电阻了。我们称它为定势源。

现在来分析图1—15电源两端电压和电流的关系。设电流I从1端流向2端。我们从图(b)来看，1端到2端，电流在 R_n 上造成的电位差是降落的，而电动势造

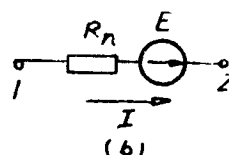
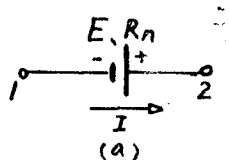


图1—15

成的电位差则为升高。当电路中两点间的电位差有降落和升高两种情况时，要计算这两点间的电位差，可应用代数的方法，将各段电位差按照升或降标以正号或负号。但这时应定出沿电路那一个方向是标以“+”号的方向（也称为正方向或参考方向），在电路图中以矢号表示，或在字母加双下标。譬如要计算电位降（电压），就应沿电路任选一个方向作为正方向。沿这一方向，凡电位是降落的标以“+”号，是升高的标以“-”号。现在来计算图1—15(b) 1, 2 两点间的电压。设以自1到2为电压的正方向，即得

$$U_{12} = IR_n + (-E) = IR_n - E \quad (1-25)$$

式中 IR_n 是电位降，标以“+”号（式中未写出），电动势 E 是电位升，则标以“-”号（在括号里）。现在计算 U_{21} ，这里电压正方向定为自2端到1端。自图1—14(b)，可见

$$U_{21} = E + (-IR_n) = E - IR_n \quad (1-26)$$

比较上面两个式子，可见：

$$U_{12} = -U_{21}$$

含有电源的一段不分支的电路两端的电压和通过的电流的关系，如式(1—25)或式(1—26)，有时叫做扩大的欧姆定律。这定律就说明了含源支路的端电压和通过的电流的线性关系，这里 E 和 R_n 应为定值。

在电路中电流也有选定正方向的必要。沿某一方向流动的电流定为正的，反方向流动时便是负的。定了正方向后，从电流的正负，也就可以知道电流的实际方向了。在图1—15的计算中，电流的方向是当作已知的。电路图中表示电流的矢号就代表实际方向。以后作电路图时，图中电流矢号则定为它的正方向。电流实际方向已知时，正方向应当选定与实际方向一致。电阻上电压的正方向一般选定与电流的正方向一致。

在图1—15(b)的电路中，如果电流的正方向定为自2到1（与图中原来矢号相反），电动势的方向不变， R_n 的电压的正方向与电流 I 的正方向一致，于是自2到1的电压便是

$$U_{21} = E + IR_n$$

由于电压和电流的正方向可以任意选定，故如实际数字计算得负值，就表示实际的方向与选定的正方向相反。

例1—6 求图1—16所示通有电流 I 的一段电路的电压 U_{14} 。

解： 电流的正方向如图中矢号所示。

$$\begin{aligned} U_{14} &= U_{12} + U_{23} + U_{34} \\ &= IR_1 + (E_1 + IR_n) + IR_2 \end{aligned}$$

例1—7 如图1—17所示是一个晶体三极管测试电路。（晶体三极管的性能和应用，以后在电子学课学习，这里只注意它的外部电路的计算。）设图中伏特计的读数是0.25伏，求电流 I_B 。

解： 伏特计两端的电压自负端（b点）到正端应为负值。

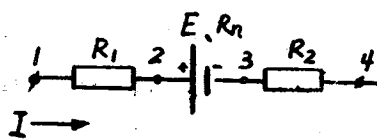


图1—16

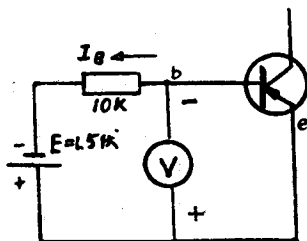


图1—17

$$U_{be} = I_B \times 10 \times 10^3 - E$$

$$= I_B \times 10 \times 10^3 - 1.5 = -0.25$$

$$\therefore I_B = \frac{-0.25 + 1.5}{10^4} = 1.25 \times 10^{-4} \text{安} = 125 \text{微安}。$$

1-8 不分支的直流回路

前面讨论的欧姆定律和扩大的欧姆定律只是限于一段不分支的电路的电压和电流的关系，还不能够反映整个电路的规律性。现在我们来讨论一个由几个元件组成的不分支的直流闭合电路中电压和电流的关系。

一个不分支的闭合电路有时也叫做一个回路。由于电流的连续性，电路中的电流各处都一样。根据欧姆定律和扩大的欧姆定律，各段电路的电压和电流的关系都可求出。如图1-18所示的发电机对蓄电池充电的电路，各段电路元件的电压是：

$$U_{12} = IR_1, \quad U_{23} = E_2 + IR_{n2},$$

$$U_{34} = IR_2, \quad U_{41} = -E_1 + IR_{n1}。$$

电路中各段电压已知，就可求各点电位。求

出各点电位，就可以看出整个电路的电位分布。例如在分析晶体管电路时常要用到。计算时需要在电路中选取一个基准点，因为电位的值是相对的。这好比求山的高度，需要指定是以山脚为准，还是以海平面为准一样。现以图1-18为例，设选定点4为基准，作为零电位（常作为接地点）。于是求得其他各点电位如下：

$$\phi_4 = 0; \quad \phi_1 - \phi_4 = U_{14} = E_1 - IR_{n1}, \quad \therefore \phi_1 = E_1 - IR_{n1};$$

$$\phi_1 - \phi_2 = U_{12} = IR_1, \quad \therefore \phi_2 = \phi_1 - IR_1 = E_1 - IR_{n1} - IR_1;$$

$$\phi_3 - \phi_4 = U_{34} = IR_2, \quad \therefore \phi_3 = IR_2。$$

电路中两点间的电压相当于电场把一单位电荷从一点移到另一点所作的功。一单位电荷沿整个电路绕过一周所作的功，应等于移过各段电路所作的功相加起来所得的和，即

$$U_{12} + U_{23} + U_{34} + U_{41} = (\phi_1 - \phi_2) + (\phi_2 - \phi_3) + (\phi_3 - \phi_4) + (\phi_4 - \phi_1) = 0 \quad (1-27)$$

上式表明对单位电荷所作的功的总和等于0。可见在电路中某些部分是电位降，电场力作功，消耗电能，而某些部分是电位升，非电力做功，产生电能。上式就是说明了电位降和电位升的平衡，也就是电能的消耗和电能的产生平衡。这在1-1节，我们已有初步的讨论。

我们把各段电路的电压和电流的关系式代入上式得：

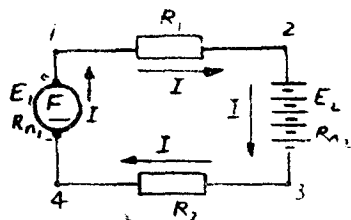


图1-18