

全国中等农业学校教材

电工学与电子学

陕西省农业机械化学校 主编

农业机械化专业用

农业出版社

前 言

本书系农业部教育司和全国中等农机校电气化专业教学研究会，按照农业部教育司一九八七年制定的全国中等农业机械化学学校非电专业教学大纲的要求组织编写的，供招收初中毕业生四年制非电专业学生使用。也可供各类性质的中等专业学校师生和从事电气技术工作的技术人员参考。

全书分电工学和电子学两大部分，共十四章。电工学部分的内容包括：直流电路、单相正弦交流电路、三相交流电路、磁路与变压器、交流电机、直流电机、低压电器和基本继电-接触控制线路及低压输配电与安全用电共八章。电子学部分的内容包括：半导体的基本知识、交流放大电路、正弦波振荡电路、脉冲数字电路、整流与稳压电路和可控硅及其应用共六章。

本书在编写中，对基本概念和基本理论的阐述，力求做到通俗易懂；对基本电路的分析，力求做到条理清晰，思路正确；重视理论联系实际；突出重点和难点的讨论；各章都进行小结，指出基本要点和基本要求；并附有思考题和练习题，促使读者深化理解，也便于读者复习和巩固。

本书由陕西省咸阳机器制造学校电气自动化专业王瑞麟副教授主审。参加审稿的有咸阳机器制造学校齐广禄、南京农业机械化学学校张绍璠、辽宁省农业工程学校刘贵恒及陕西省农业机械化学学校张镇函、段长流等同志。以上同志对全书提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

本书插图由陕西省农业机械化学学校制图教研组于健同志负责组织绘制与校对。对他们的辛勤合作，在此表示感谢。

本书由陕西省农业机械化学学校樊兴亚（主编）和李浩然、四川省农业机械化学学校张德炳（副主编）、黑龙江省农业机械化学学校吴纪元四位同志集体编写。具体分工如下：第一、二、三、四章由张德炳执笔；第五、六、七、八章由樊兴亚执笔；第九、十、十一章由李浩然执笔；第十二、十三、十四章由吴纪元执笔。全书修改定稿由主编负责。

本书的电路图和文字符号，按国家标准局颁布的新国标绘制和标注。为了便于读者学习，书中附有新旧国标对照表。

由于编者水平有限，书中错误和缺点在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

编者

1989年5月

目 录

前言

第一部分 电 工 学

第一章 直流电路	1
第一节 电路的组成及其基本物理量	2
第二节 电阻元件的伏安特性和电阻元件间的连接	9
第三节 电压源及电流源	14
第四节 电路的状态	18
第五节 克希荷夫定律	20
第六节 戴维南定理	25
第七节 电路中各点电位的计算	27
第八节 负载获得最大功率的条件	28
第二章 单相正弦交流电路	35
第一节 正弦交流 电动势的产生	35
第二节 正弦量的特征	37
第三节 正弦交流电的有效值	34
第四节 正弦量的旋转矢量表示法	45
第五节 单一参数的正弦交流电路	49
第六节 $R-L$ 串联的交流电路	59
第七节 $R-L-C$ 串联的交流电路	63
第八节 $R-L$ 和 C 并联的交流电路	70
第九节 功率因数的提高	73
第三章 三相交流电路	80
第一节 三相电源	81
第二节 三相负载的星形连接	85
第三节 三相负载的三角形连接	91
第四章 磁路与变压器	96
第一节 磁路及其基本物理量	97
第二节 铁磁性物质材料的磁性能	99
第三节 电磁铁	101
第四节 由铁芯线圈组成的正弦交流电路	102
第五节 单相变压器	105
第六节 三相变压器	111
第七节 自耦变压器与仪用变压器	113

第五章 交流电机	113
第一节 三相异步电动机的基本结构	113
第二节 三相异步电动机的转动原理	120
第三节 三相异步电动机工作情况的分析	124
第四节 三相异步电动机的起动	123
第五节 三相异步电动机的调速、反转与制动	132
第六节 三相异步电动机的铭牌与选择	134
第七节 单相异步电动机	138
第八节 同步发电机	141
第六章 直流电机	144
第一节 直流电机的构造	145
第二节 直流电机的工作原理	147
第三节 直流电机的电枢反应	150
第四节 直流电机的电枢电势与电磁转矩	151
第五节 直流电机的分类与额定值	153
第六节 并励直流发电机	154
第七节 并励直流电动机	157
第八节 串励直流电动机	159
第九节 直流电动机的起动、调速与反转	160
第七章 低压电器与基本继电-接触控制线路	165
第一节 常用低压控制电器	166
第二节 生产机械电器设备的基本继电-接触控制线路	177
第三节 应用举例	186
第八章 低压输配电与安全用电	192
第一节 低压输配电	192
第二节 安全用电	196

第二部分 电 子 学

第九章 半导体的基本知识	202
第一节 半导体的导电特性	202
第二节 PN结及其单向导电性	206
第三节 晶体二极管	208
第四节 晶体三极管	210
第十章 交流放大电路	222
第一节 放大电路的组成与基本原理	223
第二节 放大电路的图解分析法	228
第三节 放大电路的微变等效电路法	235
第四节 静态工作点的稳定	239
第五节 阻容耦合多级放大电路	242
第六节 放大电路中的负反馈	247
第七节 功率放大电路	255
第十一章 正弦波振荡电路	269

第一节	自激振荡的建立与条件	269
第二节	LC振荡电路	272
第三节	RC振荡电路	275
第十二章	脉冲数字电路	281
第一节	脉冲波形和基本脉冲波形的变换电路	281
第二节	基本逻辑门电路	285
*第三节	组合逻辑门电路	292
第四节	双稳态触发器	295
第五节	计数器	300
第六节	编码、译码器与显示器	305
第七节	脉冲信号的产生与变换	308
第十三章	整流与稳压电路	315
第一节	单相整流电路	316
第二节	三相整流电路	320
第三节	倍压整流电路	323
第四节	滤波电路	325
第五节	稳压电路	326
第十四章	可控硅及其应用	332
第一节	可控硅的基本结构与工作原理	332
第二节	可控整流电路	334
第三节	可控硅的保护	337
第四节	可控硅的触发电路	338
第五节	可控硅的应用举例	342
附录		347
附表 1	电气线路图中部分常用的文字符号 (新旧国标对照)	347
附表 2	控制电路中常用的图形符号 (新旧国标对照)	348
附表 3	国产半导体器件型号命名法	349
附表 4	几种常用半导体器件的主要参数	350
附表 5	3 CT系列可控硅管的参数	353
附表 6	BT33系列单结晶体管的参数	353
主要参考文献		354

第一部分 电 工 学

电工学部分主要讨论交直流电路、交直流电机、变压器和电力拖动自动控制基本线路等三方面的基础知识。一、二、三章电路基础理论部分是关键，它指导着整个课程的学习与深入，务必踏实认真地掌握每一个基本概念、定律、定理以及对电路的分析与计算。交直流电机与变压器部分，要求熟悉结构，掌握基本原理与使用方法。控制部分，要求掌握基本控制环节，能分析常见的生产机械控制线路。在学习中，始终应以理论结合实践为指针，边学习边实践，加强实践技能的训练，有效地发展学生的智力，培养学生分析和解决问题的能力。

第一章 直流电路

电路，简单地说是电流所通过的路径。

电路的作用是使电能和其它形式的能相互转换并对电能实现传递和分配。电路的另一个作用是能够把输入信号进行“加工处理”，变成合乎需要的输出。

电路按通过的电流种类，分直流电路和交流电路。直流电的电流强度大小、方向不随时间变化，电流强度与时间的函数关系如图 1-1 a。大小和方向均随时间变化的电流，称为交变电流，简称交流电。如图 1-1 b。

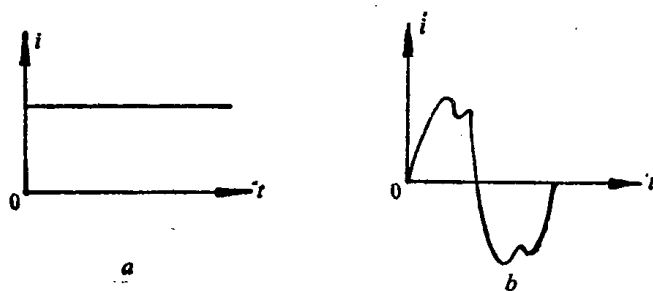


图 1-1 两种电流的电流强度与时间关系

本章在初中《物理》电学部分有关内容的基础上，讨论电路的基本分析方法。它所介绍的有关电路的基本概念、基本定律、计算方法以及等效变换的概念，都具有普遍性，并且贯穿于本书第一部分的各章。

本章的主要内容有电路的组成与基本物理量；电路的状态与额定值；电路的基本定律——克希荷夫定律；支路电流法；电源的简化与等效变换；有源二端网络的等效变换；电位的计算等。

第一节 电路的组成及其基本物理量

一、电路的基本组成部分 日常生活和生产中的用电常识告诉我们，要用电，就离不开电路；要使电灯发光照明、电炉发热、电动机转动等等，都必须用导线将电源和用电设备连接起来，组成电路。随着科学技术的发展，电的应用越来越广泛，电路的形式也是多种多样的。但是，不管电路的具体形式如何变化，也不管有多么复杂，电路的最基本组成是相同的。例如，图 1-2 a 是一轮式拖拉机前大灯的电路。由图可见，从蓄电池的负极用导线依次连接总保险器、电流表、钥匙总开关、分路保险器、变光开关到前大灯。蓄电池的正极用导线和发动机体相连(叫做搭铁)，将总开关合上，电流便从蓄电池正极流出，经机体进入灯头，通过灯丝、变光开关、分路保险器、总开关及电流表、总保险器回到蓄电池负极，成为完整的回路。

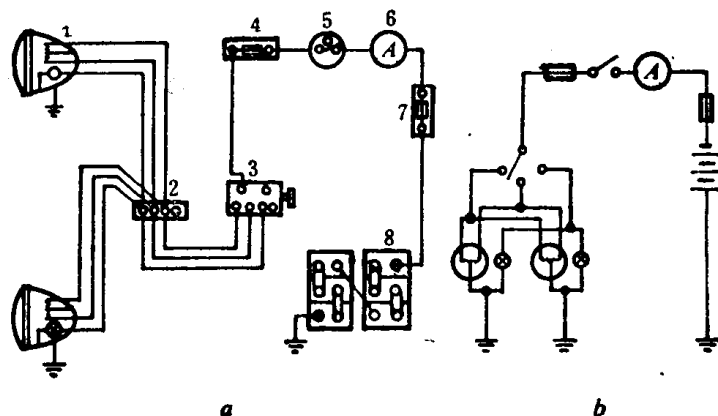


图 1-2 轮式拖拉机前大灯电路

a—线路连接图 b—电路原理图

1. 前大灯 2. 接线板 3. 变光灯开关 4. 分路保险器
5. 钥匙总开关 6. 电流表 7. 总保险器 8. 蓄电池

概括起来，电路的基本组成有三：

电源：电源的本质是将其它形式的能量转换为电能。例如干电池将化学能转换为电能，发电机将机械能转换为电能等等。

负载：用电设备叫负载，它将电能转换成其它形式的能量。例如图 1-2 中前大灯的灯泡就是负载，它将电能转换为光能。其它用电设备，如电动机将电能转换为机械能，电阻炉将电能转换为热能等等。在直流电路中，负载主要是电阻性负载，它的基本性质是当电流流过时呈现阻力(即电阻)，并将电能转换为热能。

中间环节：主要是指连接导线和控制电路通断的开关电器，它们将电源及负载连起来，构成电流通路。此外，中间环节还包括有关的保障安全用电的保护电器(如熔断器等)。

所有电路从本质上来说，都是由以上三个部分组成的。因此，电源、负载、中间环节

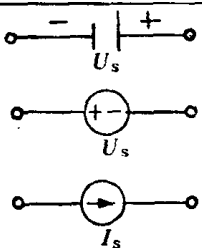
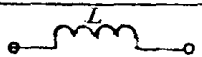
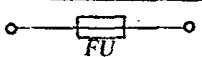
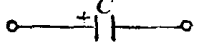
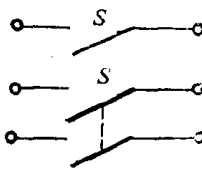
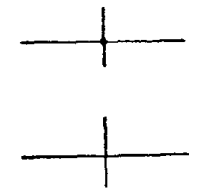
总称为组成电路的“三要素”。

二、电路图 在科学和工程技术中，电路是用图形来表达，叫电路图。工程上用的电路图分为原理接线图和装配图两种。原理接线图表示线路的接法，用一些简略图形代替各种电器。例如图 1-2 b。装配图除了表示电路的实际接法外，还要画出有关部分的装置和结构。电工照装配图接线、安装和检修。

实际元器件在一定条件下加以理想化、近似化，忽略它的次要性质，用一个理想元件表征其主要性质。譬如说，灯泡有电流流过时会产生磁场，兼有电感性质，但以电阻性质为主，而电感极其微小，是很次要的性质，把它看成一个理想的电阻元件是完全可以的；一个新的电池，它的电阻和负载电阻相比可以忽略不计，把它看作一个电压恒定的电源也是完全可以的；在连接导线较短的情况下，它的电阻完全可以忽略不计，导线各点的电位是等电位。

如果应用理想化的实际元件，来画出的原理接线图，叫电路原理图。图 1-2 b 中，负载电阻用一个小矩形来代表；电源则用一长一短(粗线条)的两根平行线来代表，这种符号习惯上用于代表干电池(蓄电池)。表 1-1 中各图是常用理想元件的电路符号。

表 1-1 常用(理想)元件符号

元件名称	符 号	说 明
电 源		“+” “-” 号表示电源正负极 U_s 表示恒压源 I_s 表示恒流源
电 阻		固定电阻
电 感		
熔断器		又称保险丝
电 容		固定电容, 极性电容用 “+” 号标注
开 关		单刀开关 双刀开关
导 线		相交线 不相交线

三、电路中的基本物理量 既然电路的作用是进行电能与其它形式能量之间的相互转换，就必须用一些物理量来表示电路的状态及电路各部分之间能量转换的相互关系，以便

分析计算。这些物理量主要是电流、电位、电压、电动势和电功率。对这些物理量，要求在正确理解和掌握概念的基础上，着重于在电路中，特别是在实用电路中的应用与计算；同时，有关物理量还有一个正方向(参考方向)问题，这是一个新概念，也是一个十分重要的概念，学习中应认真领会，切实掌握好。

(一) 电流

1. “电流” 有两个涵义：一是电流表示一种物理现象：电荷有规则的运动就形成电流。在同一导体内负电荷的运动效果与等量正电荷在相反方向上的运动效果相同。二是电流的大小用电流强度表示。电流强度是指单位时间内通过导体横截面的电荷量。如果电流的大小和方向都不随时间变化，则称为恒定电流，简称直流。假设在 t 时间内通过导体横截面的电量为 q ，这时直流电流强度规定用大写字母 I 表示，则

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

电流强度简称电流。

电流的单位是安培，简称安(A)，是指在1秒钟内通过导体横截面的电量为1库仑，则此导体中的电流为1安培。根据不同的负载情况，电流大小的差别很大。动力用电机的电流达到几十安甚至上百安，而三极管电子电路中的电流则常常只有百分之几、甚至千分之几安。对于较小的电流用毫安(mA)或微安(μ A)作单位，它们的关系是：

$$1(\text{A}) = 10^3(\text{mA}) = 10^6(\mu\text{A})$$

2. 电流的真实方向和正方向 在电路中形成电流的电荷可能是正电荷(正离子)，也可能是负电荷(电子或负离子)。于是电流就有一个方向问题，而且在物理学中有关电流方向的规定是普遍适用的，即习惯上总是把正电荷运动的方向作为电流的方向。如图1-3，一段金属导体中的自由电子在电场力的作用下由B向A运动，其效果与等量正电荷自A向B运动是相同的。我们就说，导体中电流的方向是从A到B，这就是电流的真实方向或实际方向。

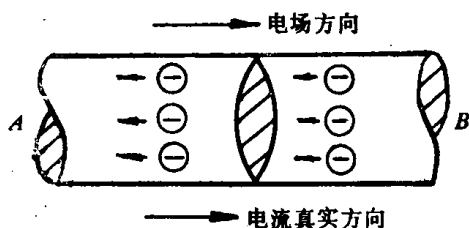


图 1-3 电流的真实方向

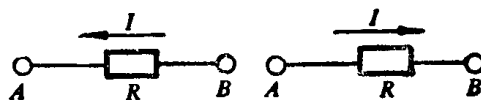


图 1-4 电流两种可能的实际方向

在实际电路的任何一段导体中，电流的真实方向都有两种可能，如图1-4，即可能从A流向B，也可能从B流向A。在简单电路中，电流的真实方向能够很容易地通过电源或电压极性确定下来。但是，在比较复杂的电路中，一段电路里电流的真实方向往往很难预先确定。另外还有一种情况，在大量使用的交流电路中，电流的大小和方向都是随时间变化的。这时电流方向应如何表示呢？为此，根据分析与计算电路的需要，引入电流参考方向的概念，参考方向又叫假定正方向，简称正方向。

所谓正方向，就是在一段电路里，在电流的两种可能的真实方向中，任意选择一个作为标准，或者说作为参考。当实际的电流方向与它相同时，是正值；相反时就是负值。在

图 1-5 中, 实线箭头是选定的正方向, 虚线箭头表示这段电路中电流的真实方向。其中 *a* 图表示的电流真实方向与正方向一致, I 是正值; *b* 图表示的是二者相反情况, 电流 I 是负值。

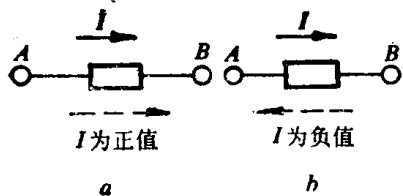


图 1-5 电流的正方向

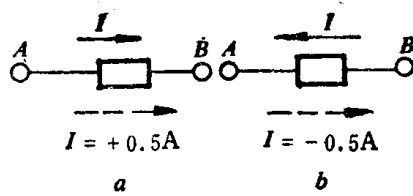


图 1-6 电流正、负值的讨论

在同一段电路中, 同一电流, 例如其大小为 0.5 A , 可以因选取的正方向不同, 可能是正值, 如图 1-6 *a*; 或为负值, 如图 *b*。但是, 它们实际上是同一电流。

从上述分析应明确如下结论: 电流的正方向与它的真实方向是两个不同的概念, 不能混淆。在今后电路的学习中应掌握: 第一, 电流的真实方向是一种客观存在, 不能任意选择, 电流的正方向则是分析、计算电路的一种方法和手段, 实质上是用来确定电流真实方向的方法和手段。第二, 一个直流电路确定之后, 电路中各部份电流的真实方向也就全部确定了, 它不受正方向的影响。但是, 在规定了正方向之后, 电流是一个代数量: 可正、可负。可见, 某一个电流是正还是负, 都是相对于某一确定的正方向来说的。否则, 正或负就没有意义了。例如某一段电路, 在选定正方向条件下, 按选定正方向计算电路, 得到电流值为 $I = -1\text{ A}$ 。根据电流为负值可知, 电流的真实方向与所设正方向相反。第三, 一段电路里电流的正方向虽是可以任意选定, 总是尽量使正方向与真实方向相一致(特别在简单电路中); 尤其重要的是, 电流的正方向一经确定, 在整个分析与计算过程中就必须以此为准, 不允许再更改了。今后各章在电路分析与计算中, 电路原理图上所标注的电流方向都是正方向, 如有例外应作特殊说明。

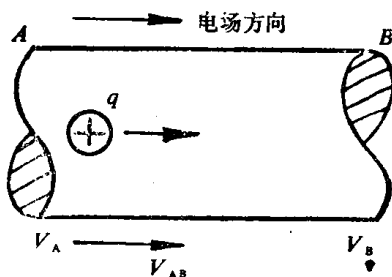


图 1-7 电压的概念

1. 电压 在一段电路中, 如果是电场力移动电荷形成电流, 在这个过程中, 电场力推动电荷运动做功。为了表示电场力对电荷做功的本领, 我们引入了“电压”这个物理量。

以图 1-7 为例, 在 *A*、*B* 间一段电路内的电场为均匀电场, 设电量为 q 的正电荷从 *A* 运动到 *B*, 电场力所做的功是 A , 则 *A*、*B* 两点之间的电压用 U_{AB} 表示

$$U_{AB} = \frac{A}{q} \quad (1-2)$$

从数值上看, *A*、*B* 之间的电压就是电场力把单位正电荷从 *A* 移动至 *B* 时所做的功。在国际单位制(SI制)中, 电荷单位是库仑(C), 功的单位是焦耳(J), 则电压的单位是伏特(V)。即把 1 库仑电荷量, 从一点移动到另一点, 电场力所做的功为 1 焦耳时, 这两点间的电压就是 1 伏。作为辅助单位有千伏(kV)及毫伏(mV)、微伏(μV)。

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

$$1(\text{mV}) = 10^{-3}(\text{V})$$

2. 电位 电位在物理学中称为电势，它表示电场中某一点性质的物理量，而且是相对于确定的参考点来说的。

电场中某点 A 的电位在数值上等于电场力将单位正电荷自该点沿任意路径移动到参考点所做的功。 A 点电位用 V_A 表示。将电位与电压的概念进行比较，可以看出，电场中某点的电位就是该点到参考点之间的电压。电位的单位也是伏特。例如在图1-8 a 的电路中，以 d 点为参考点，该点电位为零， a 、 b 、 c 各点电位为 $V_a = U_{ad} = 9(\text{V})$ 、 $V_b = U_{bd} = -6(\text{V})$ 、 $V_c = U_{cd} = 3(\text{V})$ 。

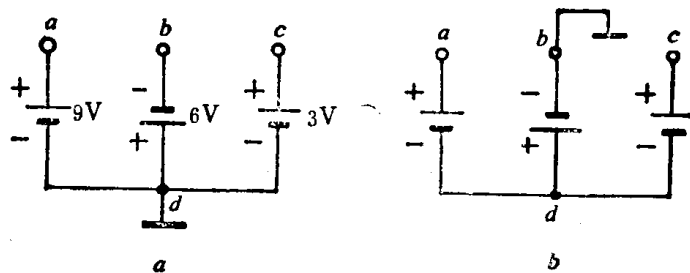


图 1-8 电路中各点对参考点的电位

对于电位这个概念来说，参考点是至关重要的。第一，电位是一个相对的物理量，不确定参考点，讨论电位就没有意义。第二，在同一电路中，当选定不同的参考点时，同一点的电位是不同的。例如在图1-8 b 中，选 b 点为参考点时，所得各点电位为 $V_b = 0(\text{V})$ 、 $V_a = U_{ab} = 15(\text{V})$ 、 $V_c = U_{cb} = 9(\text{V})$ 、 $V_d = U_{db} = 6(\text{V})$ 。那么，应该如何确定参考点呢？原则上说，可以任意选定。在物理学中，选择无限远处或大地作为参考点。而在电工学中，如果所研究的电路里有接地点，通常就选择接地点为参考点，用符号 $\perp$ 表示。例如在电力系统中，一般以接地点为参考点。在电子电路中常取若干导线交汇点或者机壳作为电位参考点，并标以符号 $\perp$ 。在一般的原理性电路中，可选取多条导线汇集的公共点作为参考点。必须注意，在研究同一电路或同一系统电路的问题时，参考点一经选定，其余各点的电位就可确定，参考点也就不能再更改了。

3. 电压的正方向 在实际电路中，仅仅知道两点间的电压数值是不够的，还必须知道这两点中哪一点电位高，哪一点电位低。例如，直流电动机，绕组两端的高、低电位要求不同，电动机的转动方向可能是不同的。

电压与电位都是描述电场力对电荷做功能力的物理量，都与能量相联系。根据不同电路的不同情况，正电荷自某点移动到另一点可能产生电能，也可能消耗电能。正是根据两种不同的情况，需要引入电压正方向的概念。电压的正方向又叫电压的极性。

在电工学中规定，在一段电路上，电压的实际方向是由高电位点指向低电位点，也就是说，沿着电压的实际方向，电位是逐点降低的。正电荷沿着这个方向运动，将消耗电能，并转换为其它形式的能量。

在分析计算电路问题时，如同需要为电流规定正方向一样，也需要为电压规定一个正方向。例如，当某一段电路电压的实际方向难以确定时，或者该段电压的极性是随时间不断变化时，我们就可以任意规定该段电压的正方向。如图1-9中，规定 A 点为高电位点，标以“+”号， B 点相对于 A 点是低电位点，标以“-”号，即这段电路电压的正方向是从 A 点指向 B 点。当电压的实际方向与事先假定的正方向一致时，为正值；不一致时就是负值。

这表明引入了正方向之后，电压是一个代数量。

电压的正方向根据习惯，可以用三种方法表示：

用“+”、“-”符号分别表示假定的高电位端和低电位端。

用箭头的指向来表示，它由假定的高电位端指向低电位端。

用双下标字母表示，如图1-9中，可在电压符号 U 的下脚加双下标 AB ，即用 U_{AB} 表示，第一个下标字母 A 表示假定的高电位点，第二个下标字母表示假定的低电位点。

这三种方法所代表的意义相同，可以互相通用，实际使用时可任选一种。

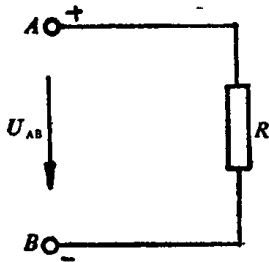


图 1-9 电压的正方向

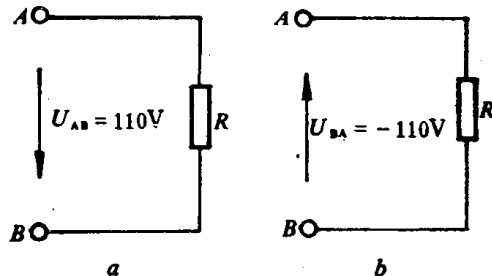


图 1-10 电压的正值与负值

同一段电路的电压相对于不同的正方向可能是正值，也可能是负值。如图1-10中， a 图中规定电压正方向是从 A 指向 B ，且得 $U_{AB} = +110(V)$ ，电压的这个正值表明该段电压的实际方向与图示正方向一致： A 点确实为高电位点， B 点确实为低电位点。对于这段电路，若选取相反方向为正方向，如 b 图，则 U_{BA} 必定等于 $-110V$ ，表明这段电压的实际方向与规定的正方向刚好相反。

由上述可知，电压正方向与实际方向是两个不同的概念。在分析与计算电路时引入正方向，借助于规定的正方向及电压的正值或负值，能够很容易地确定出这一段电路电压的实际方向。

4. 电压与电位 电路中某点的电位就是该点到参考点之间的电压。电路中两点之间的电压就是这两点的电位之差。因此，电压又叫电位差。电压(电位差)与参考点的选择无关。

(三) 电动势

1. 电动势的概念 电动势是表示电源性质的物理量。

在图 1-11 一个完整电路中，在电源以外的部分电路，正电荷总是从电源正极流出，最后流回电源的负极，就是从高电位点流向低电位点，这是电场力推动正电荷做功的结果。为了要在电路里保持持续的电流，就必须使正电荷从电源负极、经过电源内部，移动到电源正极。由于电源内部，存在着某种非电场力，例如电池内部因化学作用而产生的化学力，发电机内部因电磁感应作用而产生的电磁力等等。这些非电场力又叫局外力或电源力，它能够把正电荷自电源的负极移动到正极。在这个过程中，局外力所做的功转换为电能。为了表征电源内部局外力对正电荷做功的能力，或者说，电源将其它形式能量转换为电能的本领，我们引入了电动势的概念。在图 1-11，电源内部局外力将电量为 q 的正电荷由负极移到正极所做的功为 $A_{外}$ ，则电源电动势用 E 表示为：

$$E = \frac{A_{外}}{q} \quad (1-3)$$

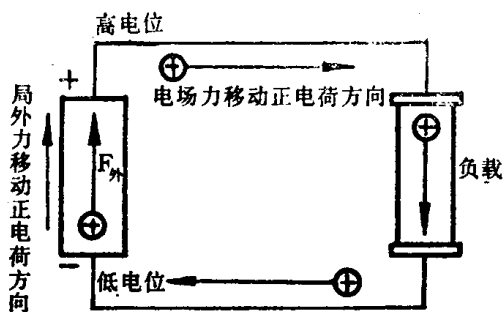


图 1-11 电源的作用

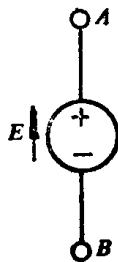


图 1-12 电动势的真实方向

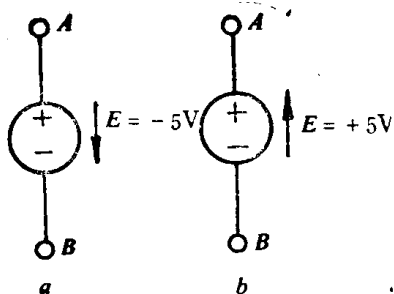


图 1-13 电动势的正方向

从上式可知，电动势在数值上等于局外力把单位正电荷从负极经电源内部移动到正极时所做的功。根据这个定义，电动势的单位自然也是伏特。

2. 电动势的正方向 因为电动势的作用是使正电荷自低电位点移动到高电位点，使正电荷的电位能增加，所以规定电动势的真实方向是指电位升高的方向，刚好与电压的真实方向相反。图 1-12 所表示的是一般直流电源的符号，其正、负极分别用 +、- 标出，其电动势的真实方向也就确定了。

作为分析与计算电路的一种方法，同样也可以为电动势规定一个正方向。如图 1-13 电源的电动势数值是 5V，正、负极也已标出。但在 a 图中取电动势正方向如箭头所示：从 A 指向 B，则 $E = -5\text{V}$ ，表明电动势的实际方向与假定方向相反。在 b 图中，取正方向从 B 指向 A，即与实际方向相同，则 $E = +5\text{V}$ 。由此可见，在规定的正方向之下，电动势也是一个代数量。

3. 电动势与电压的关系 电动势与电压是两个不同的物理概念，但都可以用来表示电源正、负极之间的电位差。且从电源对外部电路所表现的客观效果来看，既可以用正、负极间电动势来表示，也可用其间的电压来表示。

在图 1-14 的电路中，对于某一确定的参考点，正极 A 的电位是 U_A ，负极 B 的电位是 U_B ，则在图示的正方向与真实方向相同的条件下，电动势 E 是正值，电压 U_{AB} 也是正值，故 $E = U_{AB}$ 。但是从电路来看， E 与 U_{AB} 的正方向刚好相反，这是因为它们的物理意义不同：电动势的正方向表示电位升，电压的正方向表示电位降。因此在图示的正方向之下， E 与 U_{AB} 反映的是同一客观事实：即 A 点的电位比 B 点的电位高。

正因为如此，在很多情况下，常常用一个与电源电动势大小相等、方向相反的电压来等效表示电动势对外电路的作用效果。

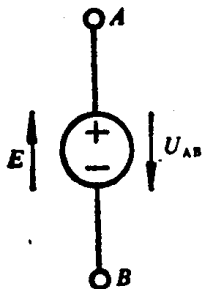


图 1-14 电动势与电压的关系

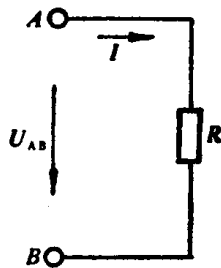


图 1-15 电功率的计算

(四) 电功率 使用电路的目的就是为了进行电能与其它形式能量之间的交换，所以电路的分析与计算中经常用到另一个物理量——功率。

1. 电功率 在图 1-15 中, 正电荷 q 从电路中 A 点移到 B 点, 根据电压的定义很容易得到电场力所做的功 $W = U_{AB} \cdot q$ 。因为 $q = I \cdot t$, 所以也可以写作 $W = U_{AB} \cdot I \cdot t$ 。

单位时间里电场力所做的功就是电功率, 用 P 表示, 即

$$P = \frac{W}{t} = U_{AB} \cdot I \quad (1-4)$$

在国际单位制中, 电压的单位是伏特, 电流的单位是安培, 则电功率的单位是瓦特, 简称瓦(W)。1 瓦功率等于每秒消耗(或产生)1 焦耳的功。除用瓦之外, 也可用千瓦(kW)或毫瓦(mW)作单位, 关系是

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W} \quad 1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

2. 电功(电能) 除了电功率之外, 有时还要计算一段时间内电路所消耗(或产生)的电能, 用 W 表示

$$W = P \cdot t \quad (1-5)$$

在工程上, 电能的单位用千瓦小时表示。千瓦小时又叫“度”。通常所说的 1 度电可以这样理解: 就是额定功率是 1 kW 的电器, 在额定状态下工作一小时所消耗的电能。

3. 功率的正值和负值 在一段电路中, 电功率大小完全取决于电流和电压。对于一段只有电阻元件的电路来说它总是从电源吸收电功率的, 从电阻上的功率公式看出: $P = I^2 R$ 。不管电流是正值还是负值, P 总是正值。但是当我们用功率的一般适用公式 $P = UI$ 来计算这段电阻电路功率时, 却可能得到正值, 也可能得到负值。显然, 功率计算中, 电流和电压的正方向决定着功率的正值或负值。

在介绍电压、电流的正方向时曾经指出, 它们的正方向可以自由选取, 即二者并无必然的联系。但是为了分析研究方便, 一般情况下, 总是采用彼此关联的正方向。如图 1-16, 在同一电路中, 电流正方向与电压正方向选取一致时, 称为关联正方向; 否则, 就是非关联的。在今后计算电路时, 同一电路中的电流和电压均取关联正方向。在这种条件下, 如果计算出的功率是正值, 则表示这段电路是吸收(或消耗)电功率; 如果计算出的功率是负值, 则表明该段电路是输出(或产生)电功率。

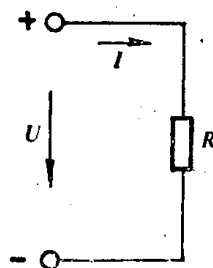


图 1-16 关联正方向

在电工技术中经常说到负载大小, 其含义是指负载所取用的电功率大小而言, 由 $P = UI$ 公式可知, 当电源电压保持恒定时, 负载的大小可用电路从电源取用的电流 I 的大小来衡量。如果负载是由许多电阻性用电器并联, 当并联数目增多时, 则电路从电源取用的电流和功率都将增大, 但电路总电阻却减小。由此可见, 在电源电压不变的条件下, 电路电阻的减小就是负载增大, 电路电阻增大就是负载减小。

第二节 电阻元件的伏安特性和电阻元件间的连接

一、电阻元件的伏安特性 在直流负载电路中, 构成电路的元件, 主要是电阻元件。

电阻元件的重要特征是对运动电荷呈现阻力, 它具有阻碍电流流动的性质。电阻元件对运动电荷呈现的这种阻力称电阻, 用 R 表示。它是电路分析中一个很重要的参数。

电阻元件或任一段导体的电阻值与它本身的材料性质及几何尺寸有关, 还与它的温度

有关。

电阻元件的阻值还可由另一个参数——电导 G 来表示，它的大小反映元件导电能力的强弱。电导与电阻的关系是

$$G = \frac{1}{R}$$

电导的单位是西门子，简称“西”(S)。

电阻元件对电流呈现阻力，因而电流通过时要消耗电能并转换为热能，所以一般将电阻元件称为耗能元件。利用这个特性，可以制成各种电热器，如电阻炉、电烙铁、白炽灯等等。但是在电器设备中，甚至在传输导线中，由于存在一定的电阻，也要导致发热，这种电流热效应造成了能量损失，有时还会损坏设备，应尽量减少。

电阻消耗的功率是

$$P = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

在一段由电阻元件组成的电路中，电阻元件上通过的电流 I 与元件两端电压 U 之间的关系，可由欧姆定律确定：

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

欧姆定律也可以用电压(U)和电流(I)的关系曲线来表示(图 1-17)，即电阻元件的伏安特性曲线。这是一条通过原点 O 的直线，其斜率即为它的电阻 R 。我们将具有这种伏安特性曲线的元件称为线性电阻元件，全部由线性元件组成的电路叫线性电路，即电路的电阻不随电流和电压的变化而发生变化。这类电阻，例如康铜、锰铜电阻、电子电路中常用的碳膜电阻、金属膜电阻等。

与上述情况相对应的是，有些元件的电压与电流不是简单的正比关系，表现在伏安特性上就不是直线而是曲线。例如光敏电阻、热敏电阻、晶体管等，如图 1-18 半导体二极管的伏安特性曲线。这类元件叫非线性元件，由非线性元件组成的电路叫非线性电路。

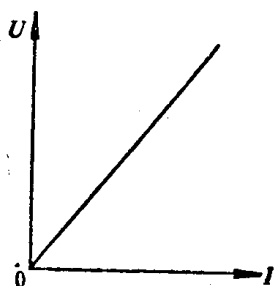


图 1-17 线性电阻伏安特性

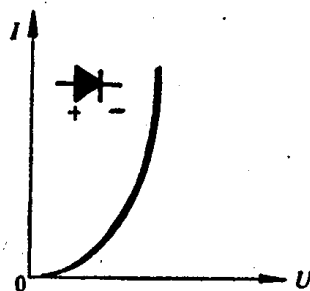


图 1-18 非线性元件伏安特性

有些金属的合金材料，当它们的温度降低时，其阻值会突然大幅度下降，甚至变为零。具有这种性质的物体叫超导体。当材料处于超导状态时，由于电阻为零，所以超导体不会有热损耗。近来许多国家对超导材料的研究已取得很大进展，超导新材料的产生和常温下实现超导，将使电工技术和电子技术发生新的飞跃。

显然，欧姆定律只适用于线性电阻元件，而不适用于非线性元件。本教材的电工学部分主要讨论线性元件及线性电路的分析与计算。

二、电阻元件间的连接 为了满足不同的需要,电路元件有不同的连接方式。就电阻元件来说,主要有串联和并联两种。例如,为了扩大仪表的量程,对电压表而言,采用与表头串联一个具有确定阻值的电阻;而对电流表则采用与表头并联的具有确定阻值的电阻。在物理课程中已经介绍过电阻串、并联的有关知识。我们在这里主要介绍“等效”的概念——无源二端网络的等效化简及分压、分流的概念。

(一) 电阻串联电路的等效简化及分压作用 几个电阻依次首尾相接,中间没有分岔,这种连接叫串联。其重要特点是在电源作用下,串联电路中的电流处处相等。

对于多个电阻串联来说,可以用一个等效电阻来代替,如图 1-19,串联电阻 $R_1 \cdots \cdots R_n$ 的等效电阻为 R

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 + \cdots + R_n \\ &= \sum_{i=1}^n R_i \end{aligned} \quad (1-7)$$

这个对应的等效电路如图 1-19 b。

“等效”是一个相对的概念,它总是相对于电路的某一部份来说是等效的,而相对于电路的其它部份则并不等效。从图 1-19a 到 b,电源的端电压 U 及给出的电流 I 是不变的,电源输出的功率也不变。所以这种变换是相对于电源来说的。

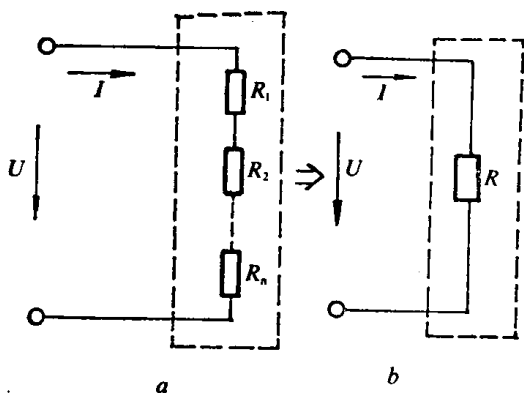


图 1-19 串联电阻的等效简化

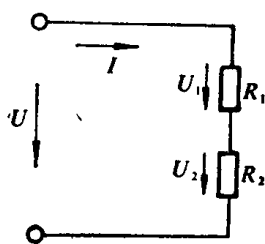


图 1-20 串联电阻的分压作用

串联电阻的分压作用,以图 1-20 两个电阻串联为例。

根据欧姆定律可得知:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{R_1 + R_2} \\ U_1 &= I R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ U_2 &= I R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{aligned}$$

通过分析可知:

第一,因 $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 和 $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 均小于 1,故 U_1 、 U_2 均小于 U ;

第二, U_1 和 U_2 分别与阻值 R_1 、 R_2 成正比,即串联电路中阻值较大的电阻元件两端承受较高电压,这就是串联电阻的电压分配作用。其分压公式是

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

第三, 各个电阻上消耗的功率与电阻值大小成正比, 且等效电阻消耗的功率等于各个串联电阻消耗功率的总和, 即

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1-8)$$

$$P = P_1 + P_2 \quad (1-9)$$

串联电阻分压在实际电路中有着广泛的应用, 除了前面提到过的电压表扩大量程之外, 还有电子电路中的信号分压、衰减网络、直流电动机串联电阻起动等。

例1-1: 图 1-21 的电路, 为某一电子电路中的分压电路。图中 $R_1 = R_3 = 550$ 欧。 $R_2 = 330$ 欧, 并为一可变电阻 (又叫电位器)。通过调节 R_2 滑动触头位置, 可以控制输出端电压 U_o 的大小。如当输入端电压 $U_i = 12$ 伏时, 求输出端电压的变动范围。

解: 当调节电位器 R_2 的滑动触点到最下端时, 电阻 R_2 全部和 R_1 串联。根据分压公式, 此时输出电压为

$$U_o = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U_i = \frac{550}{1430} \times 12 = 4.6 \text{ V}$$

调节电位器 R_2 的滑动触点到最上端时, 输出电压为

$$U'_o = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U_i = \frac{550 + 330}{1430} \times 12 = 7.38 \text{ V}$$

由计算可知, 图 1-21 分压器输出电压的变化范围是 $4.6 \text{ V} - 7.38 \text{ V}$ 。

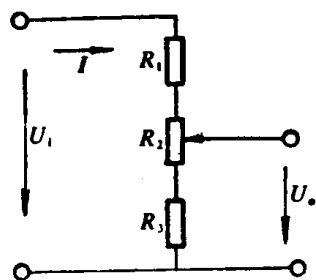


图 1-21 分压电路

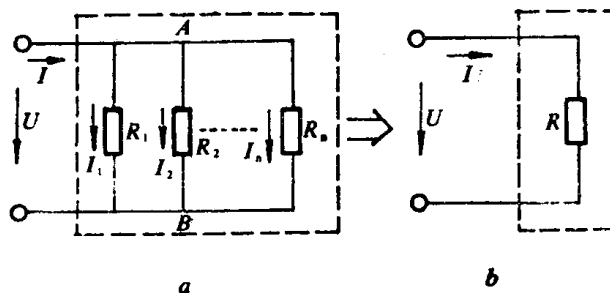


图 1-22 并联电阻的等效简化

(二) 电阻并联电路的等效简化及分流作用

几个电阻首端、尾端分别连接在一起, 这种连接方式叫并联。因为并联电阻的两端形成两个连接点 (叫节点) A 、 B , 它们处于同一电压 U 作用之下, 这是并联电路的一个重要特点。如图 1-22 a 为 $R_1 \cdots R_n$ 个电阻的并联。

图 1-22 中 b 图虚线方框中电阻 R 为 a 图中虚线方框内的等效电阻。从物理课程中已知

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1-10)$$

同样, 这种等效变换是对虚线方框以外的电路来说的, 对于被变换的这部份电路中的每个电阻和总电阻则是不等效的。

以图 1-23 两个电阻并联的电路为例来说明并联电阻的分流作用。从图中可知等效电阻