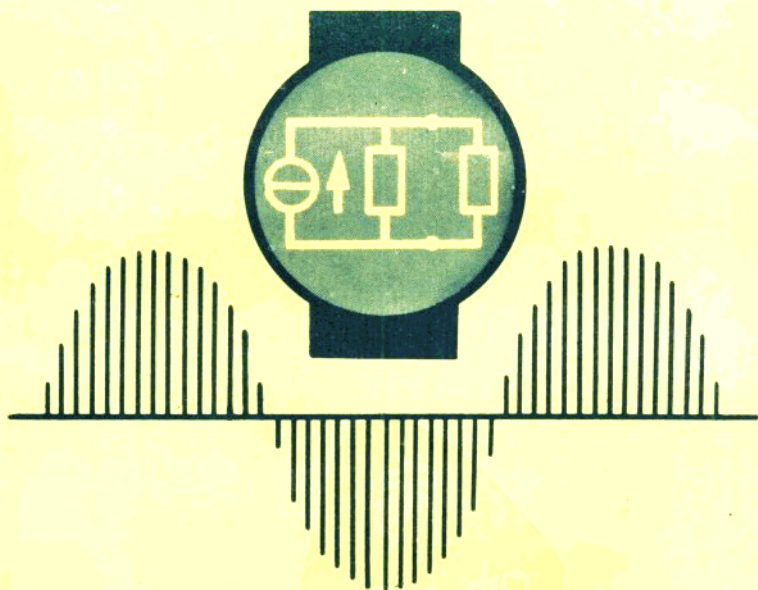


电工技术

DIANGONGJISHU



炮兵指挥学院

一九九七年六月

电 工 技 术

炮 兵 指 挥 学 院

前 言

根据教学需要，我们以地、高炮分队指挥专业电工课教学大纲为依据，以秦曾煌编写的《电工学》为参考，编写了本书。本书重点介绍了直流电路和正弦交流电路的基本概念、基本定律及一些分析方法；在此基础上，还重点介绍了地、高炮分队指挥专业所涉及到的各种电机的种类、结构、工作原理及运用。

为适应教材体系的要求，便于教学使用，本书将地、高炮分队指挥电工知识的内容合为一体，并按共性的内容合并，个性内容分列的方法进行编排。书中所用到的各种单位、符号和与电工教学内容密切相关的复数一并编入附录，供施训中按需选用。

本书由张伍银、刘治生、马新立、裴承山编写，李建新审阅，张伍银、刘治生校对。由于经验不足，时间仓促，在编写过程中难免有不当之处，我们全体编者恳请指正。

编 者

1997年5月

目 录

第一章 电路的基本概念与基本定律	1
1—1. 电路及电路模型	1
1—2. 电路的基本物理量	3
一、电流	3
二、电压与电动势	5
三、功率	9
1—3. 欧姆定律	10
1—4. 电路的有载工作状态、开路与短路	14
一、有载工作状态	14
二、开路	19
三、短路	19
1—5. 克希荷夫定律	22
一、克希荷夫电流定律	22
二、克希荷夫电压定律	24
1—6. 电路中电位的概念及计算	29
本章小结	32
习题	33
第二章 电路的分析方法	38
2—1. 电阻串并联连接的等效变换	38
一、电阻的串联	38
二、电阻的并联	39
2—2. 电压源与电流源及其等效变换	45
一、电压源	45

二、电流源	47
三、电压源与电流源的等效变换	48
2—3. 支路电流法	55
2—4. 节点电压法	60
2—5. 叠加原理	64
2—6. 戴维南定理与诺顿定理	69
一、戴维南定理	70
二、诺顿定理	72
2—7. 含受控电源电路的分析	75
本章小结	80
习题	80
第三章 正弦交流电路	88
3—1. 正弦电压与电流	88
一、频率与周期	89
二、幅值与有效值	90
三、初相位	92
3—2. 正弦量的相量表示法	96
3—3. 电阻元件的交流电路	104
3—4. 电感元件的交流电路	107
3—5. 电容元件的交流电路	115
3—6. 电阻、电感与电容元件串联的交流电路	120
3—7. 阻抗的串联与并联	131
一、阻抗的串联	131
二、阻抗的并联	133
3—8. 电路的谐振	137
一、串联谐振	138
二、并联谐振	143
本章小结	147

习题	148
第四章 三相电路	156
4—1. 三相电压	156
4—2. 负载星形联接的三相电路	160
4—3. 负载三角形联接的三相电路	169
4—4. 三相功率	171
本章小结	173
习题	174
第五章 变压器	176
5—1. 铁心变压器的构造和分类	176
5—2. 变压器的工作原理	180
5—3. 变压器的功率和效率	185
5—4. 电磁铁和继电器	186
本章小结	188
习题	188
第六章 直流电机	190
6—1. 直流电机的结构及工作原理	190
6—2. 直流发电机	195
6—3. 并励电动机的机械特性	202
6—4. 并励电动机的起动与反转	205
6—5. 并励(他励)电动机的调速	207
本章小结	210
习题	212
第七章 异步电动机	213
7—1. 三相异步电动机的结构及工作原理	213
7—2. 三相异步电动机的使用	221
7—3. 单相异步电动机	230
本章小结	233

习题	234
第八章 控制电机	236
8—1. 伺服电动机	236
8—2. 调速发电机	245
8—3. 自整角机	250
本章小结	256
习题	256
第九章 安全用电与电工测量仪表	258
9—1. 安全用电	258
9—2. 电工测量仪表	265
习题	289
附录	292
附录一 国际单位制 (SI)、静电单位制 (CGSE) 和电 磁单位制 (CGSM) 之间的关系	292
附录二 国际单位制 (SI) 的词头	293
附录三 常用导电材料的电阻率和电阻温度系数	293
附录四 复数	294

第一章 电路的基本概念 与基本定律

本章主要讨论电路的基本物理量、电路的基本定律、电路的工作状态以及电流电压的参考方向等，这些内容都是分析与计算电路的基础。其中有些内容虽然已在物理课中学过，但为了加强理论的系统性，仍列入本章中，以便使读者对这些内容的理解能进一步巩固和加深，并能充分地应用和扩展这些知识。

1—1. 电路及电路模型

电在日常生活、工农业生产、科研以及国防等各个方面都有广泛的应用。在通信、自动控制、计算机、电力等各个电子技术领域中，使用许多电路来完成各种各样的任务。电路是电流的通路，它是为了某种需要由某些电工设备或元件按一定的方式组合起来的。电路的作用大致可分为：1. 提供能量，例如供电电路；2. 传送处理信号，例如电话线路，放大电路；3. 测量电量，例如万用表电路（用来测量电压、电流和电阻等）；4. 存贮信息，例如计算机的存贮器电路，存放数据程序。

各种实际电路都是由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、电源等元器件所组成。我们日常生活中用的手电筒电路就是一个最简单的电路，它由干电池、灯泡、手电筒壳（联接导体）组成。干电池是一种电源，在其正负极间保持一定电压，向电路提供电能；灯泡实质上是一个电阻器，由电阻丝制成，电流流过时能发热到白炽状态而发光，是用电部件，称为负载；联接导体可

使电流构成通路。

人们设计制作某种部件是要利用它的主要物理性质,譬如说,制作一个电阻器是要利用它的电阻,即对电流呈现阻力的性质;制作一个电源是要利用它正负极间能保持一定电压的性质;制作联接导体是要利用它的优良导电性能,使电流顺利流过。但是,事实上,不可能制造出只表现出其主要物理性质的部件,也就是说不可能制造出理想的部件。譬如说,一个实际的电阻器,有电流流过时还会产生磁场,因而还兼有电感的性质;一个实际电源总有内阻,因而在使用时不可能总保持一定的电压;联接导体总有一点电阻,甚至还有电感。这样往往给分析电路带来困难。为了便于对实际电路进行分析和用数学描述,将实际元件理想化(模型化),即在一定条件下,突出其主要的电磁性质,忽略其次要因素,把它近似地看作理想电路元件。譬如,灯泡的电感是极其微小的,把它看作一个理想电阻元件是完全可以的;一个新的干电池,内阻和灯泡电阻相比可以忽略不计,把它看作一个电压恒定的理想电压源也是完全可以的;在联接导体很短的情况下,它的电阻完全可以忽略不计,可看作为理想导体。由一些理想电路元件所组成的电路,称之为实际电路的电路模型。电路模型是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。在理想电路元件(今后理想两字常略去不写)中主要有电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件等。这些元件分别由相应的参数来表征,电阻元件参数为电阻 R ,电感元件参数为电感 L ,电容元件参数为电容 C ,电源元件参数为电动势 E 。

今后我们分析的电路均是指电路模型,而不是指实际的电路。在电路图中,各种电路元件用规定的图形符号表示。

无论电路起什么作用,都要通过电流、电压、功率来实现,所以在分析与计算电路之前,首先讨论一下电路的几个基本物理量。

1—2. 电路的基本物理量

一、电流

我们知道，电子和质子都是带电粒子，电子带负电荷，质子带正电荷，所带电荷多少叫电量，在国际单位制（SI）中，电量的单位是库仑（国际代号 C）， 6.24×10^{18} 个电子所具有的电量等于 1 库仑。我们用符号 q 或 Q 表示电量。然而在分析电路时，我们更为关心的是带电粒子有秩序的移动而形成的电流。

我们把单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度，用以衡量电流的大小。电流强度简称电流，用符号 i 表示，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

习惯上把正电荷运动的方向或者负电荷运动的相反方向规定为电流的方向。

如果电流的大小和方向不随时间变化，则这种电流叫做恒电流，简称直流（简写成 dc 或 DC）。它的强度用符号 I 表示，并且 $I = \frac{q}{t}$ 。如果电流的大小和方向都随时间变，则称之为交流电流，简称交流（简写成 ac 或 AC）。在国际单位制中，电流的单位是安培（中文代号为安，国际代号为 A）。当 1S 内通过导体横截面的电荷量为 1C 时，则电流为 1A。在计量微小的电流时，以毫安（mA）或微安（ μA ）为单位。 $1mA = 10^{-3}A$ ， $1\mu A = 10^{-6}A$ 。

上面已经提到正电荷运动的方向就是电流的方向，但在实际问题中，电流的真实方向往往在电路图中难以标出。例如，交流电路中的电流，方向随时间变化，很难用一个固定的箭头来表示真实方向。即使在直流电路中，在求解复杂电路时，也往往难以事先判断电流的真实方向。为了解决这个问题，我们引用参考方向这一概念。参考方向可以任意选定，在电路图中用箭标表示。我

们规定，如果电流的真实方向与参考方向一致，电流为正值；如果二者相反，电流为负值。因此，在参考方向选定之后，电流之值才有正负之分。如图 1—1 所示。

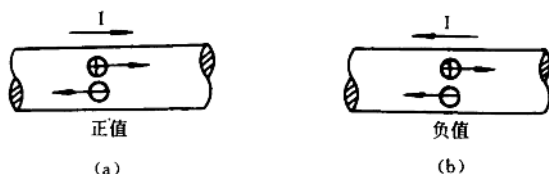


图 1—1 电流的参考方向

本书中电路图上所标电流方向都是参考方向。电流的参考方向又叫电流的正方向（有些教材上这样表述）。

电流的参考方向除用箭标表示外，还可用双下标表示，如图 1—2 中的 I_{ab} 即表示参考方向是由 a 指向 b 的电流。如果参考方向选定为由 b 指向 a，则为 I_{ba} 。两者之间相差一个负号，即

$$I_{ab} = -I_{ba}$$

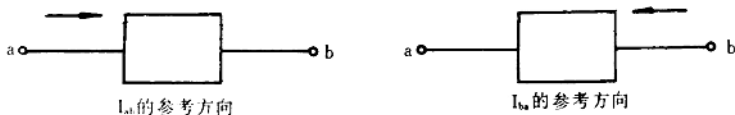


图 1—2 电流的参考方向

参考方向并不是一个抽象的概念。当我们用磁电式电流表测量电路中的未知电流时，事实上就为未知电流选定了—个参考方向。我们知道，电流表有两个端钮，一个标有“+”号，另一个标有“-”号，如图 1—3 (a) 所示。当电流由“+”端流入电流

表时，指针正向偏转（顺时针方向），电流为正值；当电流由“—”端流入电流表时，指针反向偏转，电流为负值。这就是说，当我们把电流表接入电路时，实际上就确定了被测电流的参考方向是由电表的“+”端经过电流表指向电表的“—”端的，如图 1—3 (b) (c) 所示。如果把电流表反接，就意味着为未知电流选定了另一个相反的参考方向。在测量时，如果电表指针正向（顺时针方向）偏转，电流为正值，说明电流的真实方向与参考方向一致，如图 1—3 (b) 所示；如果指针反向偏转，电流为负值，说明电流的真实方向与参考方向相反，如图 1—3 (c) 所示。

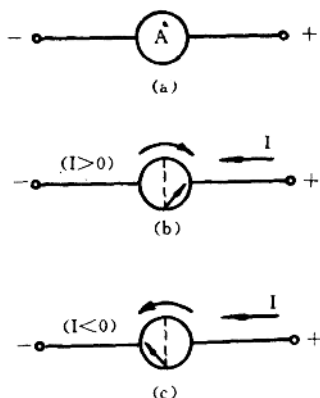


图 1—3 用电流表说明电流参考方向

电路分析中用到的另一个重要的基本物理量——电压与电动势。

二、电压与电动势

在图 1—4 中，a 和 b 是电源的两个电极，a 带正电，b 带负电，

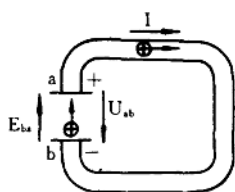


图 1—4 电荷的回路

因此在电极 a、b 之间产生电场，其方向由 a 指向 b。如果用导体（联线和负载）将 a 和 b 联接起来，则在此电场作用下，正电荷就要从电极 a 经联接导体流向 b（其实是联接导体中的自由电子在电场的作用下从 b 流向 a，两者是等效的）。这就是电场力对电荷做了功。为了衡量电场力对电荷做功的能力，引入电压这一物理量。a、b 两点间的电压 U_{ab} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功，也就是单位正电荷从 a 点（高电位）移到 b 点（低电位）所失去的电能。

在电场内两点间的电压也常称为两点间的电位差，即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-2)$$

式中 V_a 为 a 点的电位， V_b 为 b 点的电位。

正电荷在电场的作用下，从高电位向低电位移动。这样，电极 a 因正电荷的减少而使电位逐渐降低，电极 b 因正电荷的增多而使电位逐渐升高，其结果是 a 和 b 两电极的电位差逐渐减小到等于零。与此同时，联接导体中的电流也相应地减小到等于零。

为了维持电流不断地在联接导体中流通，并保持恒定，则必须使 a、b 间的电压 U_{ab} 保持恒定，也就是要使电极 b 上所增加的正电荷经过另一路径流向电极 a。但由于电场力的作用，电极 b 上的正电荷不能逆电场而上，因此必须要有另一种力能克服电场力而使电极 b 上的正电荷流向电极 a。电源就能产生这种力，我们称它为电源力。例如在发电机中，当导体在磁场中运动时，导体内便出现这种电源力；在电池中，电源力存在于电极与电解液的接触处。我们用电动势这个物理量衡量电源力对电荷做功的能力。电

源的电动势 E ，在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端 b 经电源内部（也是导体）移到高电位端 a 所做的功，也就是单位正电荷从 b 点（低电位）移到 a 点（高电位）所获得的电能。在电源力的作用下，电源不断地把其他形式的能量转换为电能。

电压和电动势都是标量，但在分析电路时，和电流一样，我们也说它们具有方向。电压的方向规定为由高电位端指向低电位端，即为电位降低的方向。电源电动势的方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端，即为电位升高的方向。

和电流一样，在电路图上所标的电压和电动势的方向也都是参考方向（也用箭标或双下标表示）^①。它们是正值还是负值，视选定的参考方向而定，如图 1—5 所示。例如，电压 U 的参考方向与实际方向一致，故 U 为正值；而电压 U' 的参考方向与实际方向相反，故 U' 为负值。

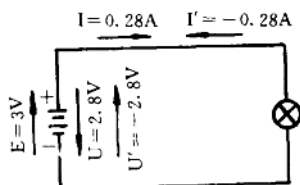


图 1—5 电压和电流的参考方向

在国际单位制中，电压的单位是伏特（V）。当电场力把 1C 的电荷量从一点移动另一点所做的功为 1J（焦耳）时，则该两点间的电压为 1V。计算微小的电压时，则以毫伏（mV）或微伏

^① 有些书上，电压的参考方向，不用箭头而用参考极性“+”、“-”表示。在本书中，“+”和“-”表示电压的实际极性。

(μV) 为单位。计量高电压时, 则以千伏 (KV) 为单位。

电动势的单位也是伏特。

综上所述, 在分析电路时, 我们既要为通过元件的电流选定参考方向, 又要为元件两端的电压选定参考方向, 彼此原是可以独立无关地任意选定的。但为了方便起见, 我们采用相关联的参考方向: 电流与电压降的参考方向一致。如图 1-6 (a) 所示。这样, 在电路图上就只需标出电流的参考方向或者电压的参考方向中任何一个就可以了 (今后如没有特殊说明, 电流、电压的参考方向均采用相关联的参考方向), 如图 1-6 (b) (c) 所示。

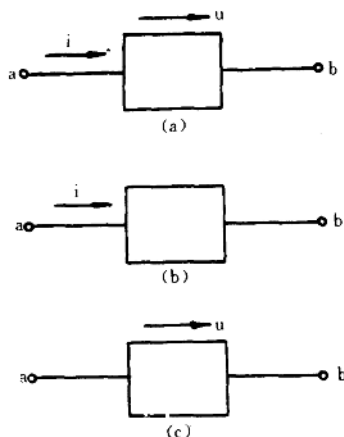


图 1-6 电流、电压相关联的参考方向

下面, 我们再谈一下电路分析中常用到的另一个基本物理量——功率。

三、功率

功率用符号 p 或者 P 表示。设图 1—6 (a) 所示方框为电路的一部分，它可能是电阻，也可能是电源，也可能是若干元件的组合。我们采用关联的电压、电流参考方向，如图 1—6 (a) 所示。设在 dt 时间内由 a 点转移到 b 点的正电量为 dq ，且由 a 到 b 为电压降，其值为 u ，则可知在转移过程中 dq 失去的电能为

$$dw = u \cdot dq$$

电荷失去电能意味着这段电路需要从外部提供能量，也就是说这段电路要吸收电能。因此单位时间内吸收的电能，即吸收的电功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-3a)$$

在直流情况下

$$P = U \cdot I \quad (1-3b)$$

因此，采用相关联参考方向，我们可以用 (1—3) 式计算某元件或某段电路吸收的功率。若 $P > 0$ ，表示确为吸收功率；若 $P < 0$ ，表示实为产生功率。

如采用非相关联参考方向，则计算吸收功率的公式应为

$$p = -ui \quad (1-4a)$$

$$\text{或 } P = -UI \quad (1-4b)$$

同样，若 $P > 0$ ，表示确为吸收功率；若 $P < 0$ ，表示实为产生功率。

根据参考方向是否为相关联的，可选用相应的公式计算功率。不论用哪一公式，都是按吸收功率来计算的。因此，若算得的功率为正值，均表示确为吸收功率；若算得的功率为负值，均表示实为产生功率。

在国际单位制中，功率的单位为瓦特 (W)。1S 内转换 1J 的

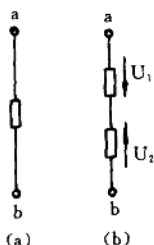


图 1—7 练习与思考 1—2—1

和 1—2—2 的图

能量，则功率为 1W。在计量微小功率时，以毫瓦 (mW) 为单位，计量大功率时，则以千瓦 (kW) 为单位。

【练习与思考】

1—2—1. 在图 1—7 (a) 中， $U_{ab} = -5V$ ，试问 a、b 两点哪点电位高？

1—2—2. 在图 1—7 (b) 中， $U_1 = -6V$ ， $U_2 = 4V$ ，试问 U_{ab} 等于多少伏？

1—3. 欧姆定律

通常流过电阻的电流与电阻两端的电压成正比，这就是欧姆定律。它是电路的基本定律之一。对图 1—8 (a) 所示的电路，欧姆定律可用下式表示：

$$\frac{U}{I} = R \quad (1-5)$$

式中 R 即为该段电路的电阻。

由式 (1—5) 可见，当所加电压 U 一定时，电阻 R 愈大，则电流 I 愈小。显然，电阻具有对电流起阻碍作用的物理性质。

在国际单位制中，电阻的单位是欧姆 (Ω)。当电路两端的电压为 1V、通过的电流为 1A 时，则该段电路的电阻为 1 Ω 。计量高电阻时，则以千欧 (K Ω) 或兆欧 (M Ω) 为单位。

根据在电路图所选电压和电流的参考方向的不同，在欧姆定律的表示式中可带有正号或负号。当电压和电流的参考方向一致时 [图 1—8 (a)]，则得出式 (1—5)，即