



职工中等专业学校教材

电工基础

吴涛 主编

北京科学技术出版社

内 容 提 要

本书是根据原水利电力部所属职工中等专业学校发电厂及电力系统专业《电工基础教学大纲(试行)》编写的,可作为职工中等专业学校、函授中等专业学校电力类专业的《电工基础》教材。

全书分“电工理论基础”和“常用电工测量和电工仪表”两篇。第一篇占全书篇幅的百分之九十,分为八章,内容依次是:电路的基本概念和基本定律、直流电阻性电路的分析、电容元件和电感元件、正弦交流电路及其分析、三相正弦交流电路、非正弦交流电路、线性电路中的过渡过程、磁场和磁路。第二篇主要介绍常用的电工仪表的原理、特性和电工测量方法。

书中对电路的基本概念和基本分析方法的介绍较为详尽,选编的例题较多,章后有小结和习题,并附有部分习题答案,便于读者自学。

职工中等专业学校教材

电 工 基 础

吴 海 主 编

*

北京科学技术出版社出版

(北京西直门外南路19号)

北京科学技术出版社发行

河南省沁阳印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 42.5印张 1060千字

1989年3月第一版 1989年3月第一次印刷

印数0001—9500册 定价:10.95元

ISBN 7-5304-0278-1/Z·138

前 言

本书是根据原水利电力部所属职工中等专业学校发电厂及电力系统专业《电工基础教学大纲(试行)》编写的,可作为职工中等专业学校、函授中等专业学校电力类专业的《电工基础》教材。

全书分“电工理论基础”和“常用电工测量和电工仪表”两篇。第一篇占全书篇幅的百分之九十,着重阐述电路与磁路的基本概念、基本定律和基本分析方法。第二篇则从实用角度出发,介绍常用的电工仪表和电工测量方法。全书叙述较为详尽,并力图做到物理概念清晰。书中选编了较多的例题,章后有小结和习题,便于学生阅读或自学。

考虑到一些学生的需要,书中选编了供选学的内容并用“*”号标出。这些内容所占篇幅很少,而且跳过它们,并不影响全书的系统性。

本书由成都水力发电学校程亚伦编写第三、七两章,重庆电力学校余静容编写第五、六两章,其余各章由重庆电力学校吴涛编写。全书由吴涛主编,西安电力学校柴尊良主审。

编写过程中,得到编者所在学校有关领导的大力支持。重庆电力学校张步滋副教授审阅了大部份初稿,给予不少帮助。在此,编者向他们表示深切的谢意。

由于编者水平所限,加上全书编写时间又相当短促,错漏之处难免。随着教育改革的发展,人们思想认识的深化,对教材也会不断提出革新的要求。编者欢迎广大读者对本书提出批评意见。

编 者

一九八七年十一月

目 录

前 言

第一篇 电工理论基础

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路和电路模型	1
第二节 电路的物理量	4
第三节 电阻和欧姆定律	12
第四节 基尔霍夫定律	16
第五节 电压源与电流源的等效变换	25
第六节 电路中各点电位的计算	34
小结	37
习题	40
第二章 直流电阻性电路的分析	45
第一节 电阻的串联与并联	45
第二节 支路电流法	58
第三节 节点电位法	63
第四节 回路电流法	73
第五节 叠加定理	78
第六节 等效电源定理	84
第七节 电阻星形连接与三角形连接的等效互换	96
第八节 含受控源电路的分析简介	102
*第九节 双口网络简介	107
第十节 非线性电阻电路简介	120
小结	125
习题	120
第三章 电容元件和电感元件	141
第一节 电容元件	141
第二节 电磁感应	145
第三节 电感元件	151
第四节 互感线圈	156
小结	162

习题	163
第四章 正弦交流电路及其分析	166
第一节 正弦交流电动势的产生	166
第二节 正弦量的三要素	171
第三节 正弦交流电的有效值	174
第四节 复数	177
第五节 用相量表示正弦量	186
第六节 基尔霍夫定律的相量形式	191
第七节 正弦交流电路中的电阻元件	199
第八节 正弦交流电路中的电感元件	204
第九节 正弦交流电路中的电容元件	211
第十节 复数阻抗及复数导纳	216
第十一节 用相量法分析正弦交流电路概述	226
第十二节 电阻、电感、电容串联的正弦交流电路	232
第十三节 电阻、电感、电容并联的正弦交流电路	250
第十四节 简单正弦交流电路计算举例	256
第十五节 复杂正弦交流电路的分析计算	264
第十六节 正弦交流电路中的功率	271
第十七节 串联谐振	281
第十八节 电阻和电感串联后再与电容并联的正弦交流电路、并联谐振	290
第十九节 功率因数的提高	296
第二十节 具有互感的正弦交流电路	300
第二十一节 正弦交流电路中的实际电路部件	309
小结	316
习题	320
第五章 三相正弦交流电路	333
第一节 对称三相正弦交流电源	333
第二节 三相电路的连接	336
第三节 对称三相电路	346
第四节 $Y-Y$ 不对称三相电路	354
第五节 三相电路中的功率	365
第六节 对称分量法简介	371
小结	386
习题	389
第六章 非正弦交流电路	394
第一节 周期性非正弦电压、电流的谐波分析	395
第二节 周期性非正弦量的有效值、平均值和功率	404
第三节 线性非正弦交流电路的计算	413

第四节 对称三相非正弦交流电路中的高次谐波	421
小结	431
习题	433
第七章 线性电路中的过渡过程	438
第一节 电路的过渡过程及产生的原因	438
第二节 换路定律及电路的初始值	440
第三节 电容通过电阻放电的过渡过程	444
第四节 RC 串联电路接通直流电源的过渡过程	449
第五节 RL 串联电路的过渡过程	458
第六节 直流电源作用下一阶线性电路的过渡过程	465
第七节 RL 串联电路接通正弦电源的过渡过程	471
第八节 RC 串联电路接通正弦电源的过渡过程	475
第九节 微分电路与积分电路	479
第十节 运算法的数学基础	482
*第十一节 运算法简介	489
小结	500
习题	502
第八章 磁场和磁路	507
第一节 磁场及其基本物理量	507
第二节 磁场的基本定律	515
第三节 铁磁物质的磁性质	521
第四节 磁路及其基本定律	527
第五节 恒定磁通磁路的计算	534
第六节 交流铁心线圈的铁心损失	542
第七节 交流铁心线圈中的电压、电流和磁通	545
第八节 交流铁心线圈的等效电路	555
第九节 电磁铁	561
小结	568
习题	570

第二篇 常用电工测量和电工仪表

第九章 电工测量和指示仪表的一般知识	573
第一节 电工测量和测量方法	573
第二节 指示仪表的误差与准确度	574
第三节 指示仪表的分类、技术要求和表面标记	577
第四节 测量误差及其粗略估计	581
小结	588
习题	589

第十章 直流电流、电压和电阻的测量.....	601
第一节 磁电系电流表、电压表.....	591
第二节 磁电系检流计简介.....	598
第三节 欧姆表.....	598
第四节 直流单臂电桥.....	600
第五节 直流双臂电桥.....	602
第六节 兆欧表.....	605
第七节 伏安法测电阻.....	608
小结.....	610
习题.....	611
第十一章 交流电压和电流的测量.....	612
第一节 整流系仪表.....	612
第二节 万用表简介.....	614
第三节 电磁系电流表和电压表.....	615
第四节 钳形电流表简介.....	619
第五节 电动系电流表和电压表.....	620
第六节 电压表和电流表的选择.....	625
小结.....	630
习题.....	630
第十二章 正弦交流电路功率、电能及其他参数的测量.....	633
第一节 电动系功率表.....	633
第二节 三相电路有功功率的测量.....	635
第三节 三相电路无功功率的测量.....	638
第四节 单相感应系电度表.....	640
第五节 三相电度表简介.....	646
第六节 电动系单相相位表.....	644
第七节 交流电桥简介.....	650
小结.....	654
习题.....	656
部分习题答案.....	658
主要参考书目.....	672

第一篇 电工理论基础

第一章 电路的基本概念和基本定律

电能容易实现和其他形式能量的相互转化,容易被输送和分配,容易被控制、测量和调整。由于电能具有这些特点,它极其广泛地应用于现代工农业生产和日常生活。为了产生和应用电能,就得构成电流流通的路径即电路。

研究电路,首先要弄清楚电路中的物理量——电流、电压、电位、电动势、电功率等的意义,探讨物理量之间应遵循的约束关系即电路的基本定律。本章除了着重讨论电路的物理量及电路的基本定律之外,还要引入电路理论的两个极为重要的基本概念:电压、电流的参考方向和等效变换。

本章所阐述的基本概念与电路的基本定律同全书后面各章均有密切的联系,并且也只有通过后面一些章节的学习才能不断扩大和加深对本章主要内容的理解,所以读者应对本章给予必要的重视,使《电工基础》这门电工技术入门课程的学习有一个良好的开端。

第一节 电路和电路模型

一、电路

电路对大家来说并不陌生,在生产实际和日常生活中都会遇到各种形式的电路,物理学课程中也讨论过某些简单的电路。

我们所说的电路,指的是各种电工设备和器件按照一定方式连接起来的总体,它提供了电流流通的路径。电路也叫**电网络**,两个名称原则上可以通用。

实际应用中的电路种类很多,形式和结构也各不相同,但它们的作用可以归结为两个。

电路的第一个重要作用是**进行电能的传输、分配并实现与其他形式能量的相互转换**。典型的例子是电力系统。发电厂的发电机把机械能转换为电能,通过变压器、输电线等输送给用户,在那里又通过电动机把电能转换为机械能,通过白炽灯把电能转换为光能、热能等等。这样就构成一个极为复杂的电路。我们把能将其其他形式能量转换为电能**的设备或器件称为电源**,而把能将其电能转换成其他形式能量的设备或器件称为**负载**。

电路的另一重要作用是**进行电信号的变换、传输和处理**。常见的例子如扩音机。话筒把语言或音乐的声音信号转换为相对应的电信号,而后通过电路传递到扬声器,再把电信号还原为语言或音乐。由于话筒输出的电信号比较微弱,不足以推动扬声器发出声

音，因此中间要用到电子管或晶体管放大电路，将微弱的电信号进行放大。放大是信号处理的一种方式。

二、电路模型

为了能对实际电路进行定量的分析和计算，我们必须把其中的部件加以近似化、理想化，进行科学的抽象和概括，得出性能可以用数学严格定义的有限几个模型元件，并用这些模型元件按一定的规则进行组合来代表实际电路部件的外部性能。

模型元件简称元件，它们在理论上具有某种确定的电磁性能。例如，电阻元件 R 是表征消耗电能理想电路元件，当电流通过它时将发生电能转换为热能的不可逆过程。至于我们后面要讨论的电感元件 L 是表征储存磁场能量理想电路元件，电容元件 C 是表征储存电场能量的理想电路元件，等等。模型元件只是实际电路部件一定条件下的近似或理想化，并非实际部件本身。用以表征实际电路部件外部性能的理想电路元件及其组合来代替实际部件，从而构成与实际电路相对应的物理模型，即**电路模型**。由于每一理想电路元件的性能都有精确的数学定义，对电路模型我们便可以进行数学分析和计算。实际上研究电路的过程，就是一个从实际电路抽象出电路模型，运用数学方法去求解，然后再对数学解答给予物理解释，赋予物理意义的过程。

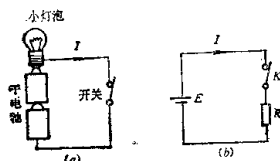


图 1-1 手电筒电路及电路图
(a) 手电筒电路； (b) 手电筒电路的电路模型

实际部件用理想化的模型元件及其组合表之后，就可以画出由理想元件组成的电路图。例如，图1-1(a)的手电筒电路可以画成如图1-1(b)所示的电路图示其中，小灯泡用电阻元件 R 表示；新的干电池，它的内电阻与小灯泡的电阻相比很小，可以忽略不计，因而可以用电动势为 E 、没有内阻的电源元件表示；至于连接导体，因为长度很短，其电阻完全可以略去不计，因而看做是理想导体。

作为电专业的入门课程，《电工基础》研究的电路，主要是象图1-1(b)所示的那种由理想电路元件组成的抽象了的电路。研究过程中会讨论到各有关理想电路元件是如何抽象出来的，以及它们各自的性能，当然，也会涉及如何在一定的条件下用适当的电路模型来表示实际的电路部件。按照课程的分工，实际的电机、变压器和电子器件，如何在一定的条件下用理想电路元件的组合表示，要分别由后续的《电机学》和《电子技术基础》两门课程去讨论。

今后我们遇到的电路的结构可能比较复杂。为了讨论方便，我们将电路中由元件组成的一段没有分支的电路称为**支路**。图1-2(a)所示电路有六条支路， E_1 和 R_1 、 E_2 和 R_2 、 E_3 和 R_3 为三条有源支路， R_4 、 R_5 、 R_6 各构成一条支路，这三条支路是无源支路。

三条和三条以上支路连接在一起的点叫做节点。图 1-2(a) 所示电路有 A 、 B 、 C 、 D 四个节点。

在电路中，任何一条闭合的路径叫做回路。图 1-2(a) 所示电路共有七个回路： $AA'BBCA$ 、 $BB'DDCB$ 、 $ACDD'F'A$ 、 $AA'B B'DD'F'A$ 、 $AA'B B'DCA$ 、 $AA'BCDD'F'A$ 、 $ACBB'DD'F'A$ 。平面电路中没有被支路穿过的回路，叫做网孔。所谓平面电路是指可以画在一个平面上而不出现任何支路相互交叉的电路。图 1-2(a) 电路是平面电路，它有三个网孔，即 $AA'BBCA$ 、 $BB'DDCB$ 、 $ACDD'F'A$ 。可见网孔是回路的一种特例。而非平面电路则是无论怎样将电路画在平面上都会出现支路交叉，图 1-2(b) 电路为非平面电路。对非平面电路，网孔的概念是不适用的。

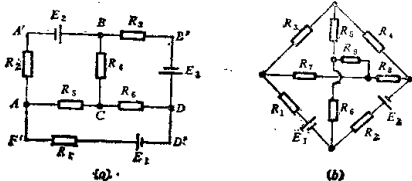


图 1-2 平面电路与非平面电路

(a) 平面电路；(b) 非平面电路

【练习与思考】

1-1-1 指出图 1-3 所示电路的支路、节点和网孔的数目。

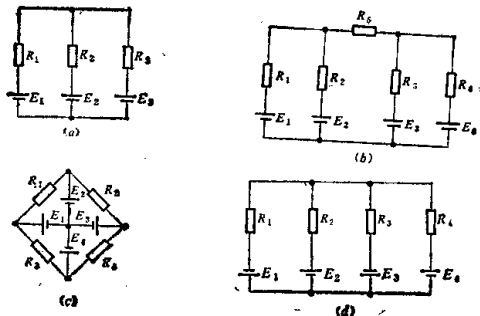


图 1-3 练习与思考 1-1-1 图

第二节 电路的物理量

我们研究电路，首先要弄清楚电路的物理量。电路的物理量主要是电流、电压、电位、电动势和电功率。

一、电流和电流的参考方向

电荷有规则的运动就形成电流。电流是客观存在的一种物理现象。人们通过电流的热效应、磁效应、化学效应等都可以觉察到它的存在。

电流的大小或强弱用电流强度来衡量。电流强度 i 在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。

电流强度通常简称为电流。因此，“电流”这个词不仅代表一种物理现象，而且也代表一个物理量。

在国际单位制（SI）中，电流的单位是安培，简称安（A）。当每秒均匀通过导体某横截面的电量为1库仑（C）时，电流大小为1安（A）。

电流不但有大小，而且每一时刻都有确定的方向。习惯上规定，电流的方向（实际方向）为正电荷运动的方向或负电荷运动的方向。

大小和方向都不随时间改变的电流，称为恒定电流，简称直流，用大写字母 I 表示。大小和方向随时间周期性变化的电流叫做交变电流，简称交流，用小写字母 i 表示。本书对其他恒定的量同样以大写字母表示，小写字母则表示随时间变动、是时间 t 函数的变化量。许多电工装置上，用“DC”表示直流，用“AC”表示交流。

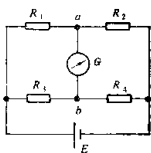


图 1-4 电桥电路

在直流电路中，我们不难判断和用箭头标明如图 1-1(b) 所示的那种简单电路各处电流的方向。然而，交流电路中的电流，方向不断随时间变化，很难用一个固定的箭头来表示。即使是直流电路，电路的结构较为复杂时，也往往难以事先判断各处电流的实际方向。例如，图 1-4 所示的电桥电路，当电桥不平衡时，检流计中的电流是从 a 至 b ，还是从 b 至 a ，必须经过计算或实测才能确定。

为了解决上述困难，我们引入参考方向这一重要概念。对于电流这一类具有两个可能的方向的物理量，可以任意选定其中一个方向作为参考方向，在电路图中用一实线箭头来表示。所选的电流参考方向并不一定和电流的实际方向一致，而是以它作为决定电流正负的标准，即规定：当电流实际方向与其参考方向一致时，则电流为正值，反之，当电流实际方向与其参考方向相反时，电流为负值，如图 1-5 所示。电流的参考方向

又叫电流的正方向。

引入参考方向概念后, 我们进行电路的研究时, 可以任意假设各处电流的参考方向而不必先判断它的实际方向。只要根据所设的参考方向进行分析计算, 得出的结果为正值, 说明电流的实际方向与所设的参考方向相

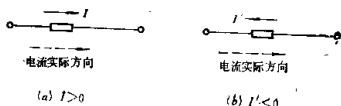


图 1-5 电流的参考方向

同, 否则说明电流的实际方向与所设的参考方向相反。选择了电流的参考方向之后, 一个正弦交流电流才可以写出如 $i(t) = \sqrt{2} \sin 100\pi t$ A 这样一个解析式, 而且我们可以根据各个时刻 $i(t)$ 数值的正负, 结合参考方向, 确定该时刻电流的实际方向。

应当强调指出, 今后在电路图中用实线箭头标明的都是电流的参考方向, 需要说明实际方向时我们用虚线箭头来表示。凡是要求一个未知电流, 都应事先设它的参考方向。脱离了参考方向, 电流的正负毫无意义。参考方向的设定具有任意性, 如果两个人在计算同一个未知电流时所设参考方向相反, 他们计算所得结果仅差一个负号。这一点, 初学者应予以充分注意。

现在我们讨论到的电流, 已是在一定参考方向下的代数量。它是单位时间内沿参考方向通过导体横截面的电量。如果从 t 到 $(t + dt)$ 的时间间隔内, 沿参考方向流过导体横截面的电量已经从 q 增加到 $(q + dq)$, 则电流

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

直流的情形, 任何相同的时间间隔 t 内沿参考方向通过导体横截面的电量 Q 都相同, 电流

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

定义式 (1-1a) 和 (1-1b) 在给定参考方向下, 数值表示了电流的大小, 符号表达

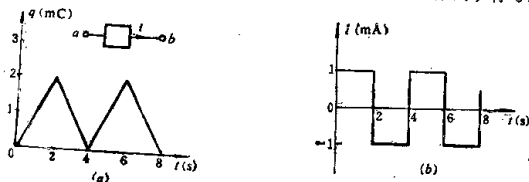


图 1-6 例 1-2-1 图

了电流的方向。

例1-2-1 图1-6(a)表示由a至b通过一个二端元件的电荷量 q 随时间的变化曲线。求通过该二端元件电流 i 的变化曲线。

解 设电流 i 的参考方向如图1-6(a)所示。

(1) t 为(0s, 2s)时, $\Delta t = 2\text{s}$, $\Delta q = 2\text{mC}$

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{2}{2} = 1\text{mA}$$

(2) t 为(2s, 4s)时, $\Delta t = 2\text{s}$, $\Delta q = -2\text{mC}$

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{-2}{2} = -1\text{mA}, \text{这段时间内正电荷从} b \text{流至} a, \text{所以电流为负值。}$$

(3) 明显可见, $i(t)$ 变动的周期为4s, 所以可画出 $i(t)$ 的变化曲线, 如图1-6(b)所示。

二、电压

电压总是与电路中的两点相联系的。电路中任意两点 a 、 b 之间的电压, 表明了电场力把单位正电荷由 a 点移到 b 点时所做的功。在电路中, 设正电荷 dq 由 a 点移到 b 点电场力所做的功为 dA , 则 a 、 b 两点间的电压

$$u_{ab} = \frac{dA}{dq} \quad (1-2a)$$

电压的实际方向规定为电场力推动正电荷做正功的方向。

按电压随时间变化的情形, 电压分为直流电压与交变电压。大小和方向都不随时间而变动的电压称为恒定电压或直流电压, 大小和方向都随时间周期性变化的电压称为交流电压。在直流的情况下, 电场力将正电荷 Q 由 a 点移至 b 点所做的功为 A_{ab} , 于是

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{Q} \quad (1-2b)$$

可见, 电压从能量方面表示了电场的作功能力。

在国际单位制中, 电压的单位是伏特, 简称伏(V)。当电场力把1库仑(C)电荷从一点移至另一点所做的功为1焦耳(J)时, 则两点间电压的大小为1伏特(V)。

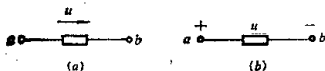


图 1-7 电压的参考方向

电压也有必要指定它的参考方向。电压的参考方向本书用实线箭头或双下标表示。若 $u_{ab} > 0$, 则表示正电荷由 a 点移至 b 点电场力是做正功的, 即电压的实际方向和 a 点至 b

点的参考方向相同；反之，若 $u_{ab} < 0$ ，则表明电压的实际方向和其参考方向相反。有些教科书对电压采用参考极性的表示方法，用一对“+”“-”号表示，由参考极性的“+”极指向“-”极的方向即我们所说的电压参考方向，如图1-7所示。

电路中 a 、 b 两点的电压应与所选择的路径无关。若 a 、 b 两点间沿第一条路径的电压 U_{ab1} 大于沿第二条路径的电压 U_{ab2} 且都大于零，则可以让单位正电荷沿第一条路径由 a 点至 b 点电场力做较多的功，而外力将单位正电荷沿第二条路径由 b 点移回 a 点做较少的功，这明显违背了能量守恒定律，是不可能的。因此， U_{ab1} 一定等于 U_{ab2} ，我们可以沿任何一条路径来计算电路两点间的电压。

因为电路两点间只有确定的一个电压，我们不难由参考方向的概念去理解 $U_{ab} = -U_{ba}$ 这一关系式。

三、电位

由于电压是对电路中的两点而言的，因此为了说明比较复杂电路的工作状况，就常常得一一说明电路中每两点间的电压，十分繁琐。我们可以在电路中任意选取一点作为参考点，把其他各点到参考点的电压称为各点的电位，本书用符号 φ 表示。电子电路常利用电位来说明工作状况。显然，电路中一点的电位就是自该点将单位正电荷移至参考点时电场力所做的功。电位的单位也是伏特。

根据电位的定义，电位参考点的电位应为零。所以参考点是人为设定的电位为零的点，在电路图中常用接地符号来表示，如图1-8中的 o 点。如果不选参考点，就无法确定电路中各点电位的具体数值。一个电路只能选一个参考点。因为电压与路径无关，参考点一经选定，各点的电位便是唯一的了。

如果将电位参考点记为 o ，电路中任意两点 a 、 b 间的电压可沿着路径 $a \rightarrow o \rightarrow b$ 计算，有 $U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo}$ ，即

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-3)$$

可见，电压就是电位差。

电路之中有任意两点 a 和 b ，如果 $\varphi_a > \varphi_b$ ，自 a 点至 b 点电位下降了，由式(1-3)不难得出 $U_{ab} > 0$ ；反之，如果 $\varphi_a < \varphi_b$ ，自 a 点至 b 点实际上电位上升了，则 $U_{ab} < 0$ 。这表明，电压的实际方向就是电位降的方向，电压是指沿着它参考方向上的电位降。例如，若 $U_{ab} = 3V$ ， $U_{ba} = -4V$ ，就可以知道沿 a 点至 b 点电位降了 $3V$ ，而沿 m 点至 n 点电位降了 $(-4)V$ ，或者说自 m 点至 n 点电位升了 $4V$ 。从电位这一角度，我们进一步加深了对电压的认识。

例1-2-2 图1-8电路中，已知 $U_1 = -1V$ ， $U_2 = 4V$ ， $U_3 = 7V$ ， $U_4 = -7V$ ， $U_5 = -3V$ ， $U_6 = -18V$ ，求 φ_a 、 φ_m 和 φ_n 。

解 $\varphi_a = U_2 = 4V$

$\varphi_m = -U_6 = +3V$

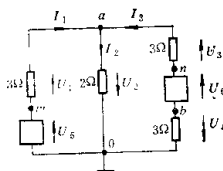


图 1-8 例 1-2-2 图

$$\varphi_n = U_{n0} = -U_5 + U_4 = -(-18) + (-7) = 11 \text{ V}$$

上面计算 U_{n0} 实际上是沿路径 $n \rightarrow b \rightarrow 0$ 进行的，因为 U_5 的参考方向与 $n \rightarrow b$ 计算电压的参考方向相反，或理解为由 n 至 b 是电位升了 U_5 ，即电位降了 $(-U_5)$ ，所以 U_5 项前有负号。因为 U_4 参考方向与 $b \rightarrow 0$ 方向一致，所以 U_4 项前为正号。很明显，文字符号项各项前的正负号是由参考方向之间的

关系决定的。至于每一项自身数值的正负号，则是由其自身参考方向与实际方向是否一致决定的。这两套正负号结合在一起，圆满解决了电路中物理量的大小关系和方向关系。对此，大家要给予充分的重视，务必不要混淆了这两套符号。

四、电动势

一个电路要维持持续的电流，其中应有能把其他形式的能量转换为电能的电源。在电源内部，电源力（非电场力）把正电荷从低电位端（负极）移到高电位端（正极）做功来实现这种能量的转换。

我们用电动势这个物理量来衡量电源力对电荷做功的能力。电源的电动势在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端经电源的内部移向高电位端所做的功，用符号 e 或 E 表示。因此，电动势的实际方向是电源的低电位端指向高电位端的方向，即电位升的方向。很明显，在国际单位制中电动势的单位也是伏。

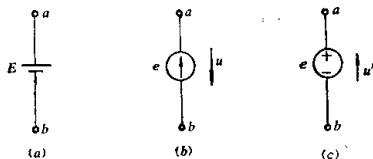


图 1-9 电动势的表示

同样可以任意指定电动势的参考方向（或参考极性）。如果电流流经电源的内部没有能量损耗，这样的电源是一种理想的电源，其电路符号及电动势的表示见图 1-9。图 1-9 (a) 的符号只表示直流电源，长线代表“+”极，短线代表“-”极。图 1-9 (b)、(c) 两图标出的则是电动势的参考方向或参考极性，当旁边标以大写字

母 E 时用来表示直流电源, 标以小写字母 e 时则表示交流电源。

应当特别注意, 对图 1-9 所示电源来说, 电动势的实际方向正好和它两端电压的实际方向相反, 电动势是指电源两端沿参考方向电位升, 而电压是指沿参考方向电位降, 它们的物理意义不同, 却都反映电源外部端钮有相同的电位差这一事实, 它们的绝对值即大小相等。如果选择 u 和 e 的参考方向相反, 见图 1-9 (b), 当 $e > 0$ 时, a 点电位比 b 点高, $u > 0$; 当 $e < 0$ 时, b 点电位比 a 点高, $u < 0$ 。这说明 u 和 e 总是同号的, 于是可写出一个既表示大小关系又表示方向关系的表达式

$$u = e \quad (1-1a)$$

如果选择 u' 和 e 参考方向一致, 见图 1-9 (c), 同样可以推出与这种参考方向选择配套的既表示大小关系又表示方向关系的表达式

$$u' = -e \quad (1-1b)$$

前面我们讨论了电流、电压和电动势, 它们都需选定参考方向。参考方向的指定又都具有随意性。不过, 直流电路中, 凡可以知道它们实际方向的时候, 尽量选它们的参考方向与实际方向一致, 这样, 它们的数值便都是正值。而且对二端元件, 常常选其端钮上的电压和电流参考方向一致, 叫**关联参考方向**, 此时, 可以只标明其中的一个。

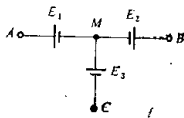


图 1-10 例 1-2-3 图

例 1-2-3 图 1-10 电路, 已知 $E_1 = 1\text{V}$, $E_2 = 2\text{V}$, $E_3 = 3\text{V}$, 求 U_{AB} , U_{BC} 。

解

$$U_{AB} = U_{AM} + U_{MB} = E_1 + (-E_2) = 1 + (-2) = -1\text{V}$$

$$U_{BC} = U_{BM} + U_{MC} = E_2 + E_3 = 2 + 3 = 5\text{V}$$

在计算 U_{AB} 和 U_{BC} 的过程中, 我们仍然要注意两套符号规则。此外, 还要注意电压和电动势的关系。



图 1-11 一个任意的二端网络

五、电功率和电能

我们研究电路, 不仅关心电路中的电压和电流, 而且关心伴随电流、电压的电能和电功率。

图 1-11 表示一个只有两端钮和外电路相连接的任意的网络, 简称为**二端网络**。通过它的电流为 i , 它的端电压为 u , 电流电压取关联的参考方向。若 dt 时间内, 由 a 至 b 移动的正电荷为 dq , 根据电压的定义, dq 失去的电能即二端网络吸收或消耗的电能

$$dA = u dq$$

因此单位时间内消耗的电能, 即吸收的电功率为

$$p = \frac{dA}{dt} = u \frac{dq}{dt}$$

又

$$i = \frac{dq}{dt}$$

所以

$$p = u i \quad (1-5a)$$

直流情况下

$$P = U I \quad (1-5b)$$

国际单位制中，电流的单位为安培（A），电压单位为伏特（V），功率单位为瓦特，简称瓦（W）。

图1-11所示的二端网络，其端钮的电压、电流取关联的参考方向。当同时有 $u > 0$ 和 $i > 0$ 时， a 端的电位比 b 端的电位高，电流又确实从高电位的 a 端流到低电位的 b 端，正电荷通过二端网络时失去了电能（或者说二端网络是消耗电能的）；而当同时有 $u < 0$ 和 $i < 0$ 时， b 端电位比 a 端高，电流确实从高电位的 b 端流到低电位的 a 端，二端网络此时也是消耗电能的。这意味着，对电压和电流取关联参考方向的两端网络，根据 $p = u i$ 计算电功率，若 $p > 0$ ，则说明该二端网络是消耗或吸收电功率的。同理， $p < 0$ ，则说明该二端网络是产生或输出电功率的。

如果电压和电流不取关联参考方向，则根据 $p = u i$ 计算所得 p 的正负反映的意义和上述情况正好相反，有兴趣的读者可自行推导。

根据能量守恒定律，在一个电路中，产生的电功率应该等于消耗的电功率。这个关系常称为功率平衡关系。

已知电功率，就可以求出一般情形下从 t_0 到 t_1 时间内网络吸收的电能为

$$A = \int_{t_0}^{t_1} p dt \quad (1-6a)$$

直流时则有

$$A = P (t_1 - t_0) \quad (1-6b)$$

国际单位制中，电能单位是焦耳（J）。

$$1 \text{ J [焦耳]} = 1 \text{ W [瓦]} \times 1 \text{ s [秒]}$$

工程上电能也常用千瓦时（kWh）作单位（俗称度）。

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

日常我们说了多少“度”电，就是指的消耗了多少千瓦小时的电能。

最后说明一下有关辅助单位的问题。国际单位制中的单位如安、伏、瓦等，在实际应用中，有时嫌小，如计量电力系统的高电压、大功率；有时又嫌太大，如计算电子线路中的电流。所以常在这些单位前面加上词头，形成毫安（mA），千伏（kV），兆瓦（MW）一类辅助单位。这些词头示于表1-1。因为常用，必须记住。