

中等专业学校教材

电工基础

西安电力学校 陈正岳 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是水利电力部所属中等专业学校电力类专业的统编教材。全书共分九章，即：电路的基本概念和基尔霍夫定律、电阻电路、正弦交流电路、三相正弦交流电路、非正弦交流电路、动态电路的全响应、网络图论及矩阵形式的网络方程、均匀传输线的正弦稳态、磁路与铁心线圈。

为了体现教学的实用性，全书各节都配有例题和思考题；章后均有复习提要 and 习题；书后附有部分习题答案。

本书除作为中等专业学校教材外，也可作为自学者的参考书；部分章节内容可供电视大学、职工大学的有关专业的学员及有关工程技术人员参考。

中等专业学校教材

电工基础

西安电力学校 陈正岳 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 25印张 568千字

1987年11月第一版 1987年11月北京第一次印刷

印数00001—44120册

ISBN 7-120-00008-X/TM·3

15143·6475 定 价：2.90元

前 言

1980年,水利电力部(原电力工业部)教育司正式颁发了中等专业学校四年制和两年半制的“发电厂及电力系统”专业教学计划和有关课程的教学大纲。在此之前,出版过由张洪让主编的第一轮《电工基础》教材。经过几年的教学实践,“电工基础课程组”于1984年召开了由水利电力部所属二十二所电力、水电学校参加的执行教学大纲情况经验交流会。在交流经验的基础上,经过充分讨论,提出了“对执行原教学大纲中电工理论基础部分的教学安排建议”,并决定组织编写第二轮《电工基础》教材。本教材就是以部颁《电工基础》课程教学大纲为基础、以“建议”为依据进行编写的。

本教材的编写体系及取材的深度和广度,既考虑到近代电路理论的发展,又根据多年来的教学经验,注意保持中专的教学特色。本教材共分九章,除强调了电路模型概念、加强和充实了基本的和传统的内容外,还增加了“网络拓扑及矩阵分析”的内容。

为了帮助读者掌握和巩固基本概念,提高独立思考能力和分析计算能力,每节之后都精选了例题并提出了一些与中心内容相联系的思考题;每章之后,选择了一定数量的综合性习题。此外,章后还附有复习提要,以利读者进行复习和自学。

国务院于1984年2月27日发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》,确定了以国际单位制(SI)单位为基础的我国法定计量单位。根据规定,本教材采用法定计量单位。

本书初稿的第一至四章由陈正岳编写;第五章和第八章由沈传墉编写;第六、七、九章由葛云龙编写。全书由陈正岳主编、张洪让主审。

目前,正处在教育体制改革的前夕,教材改革是教育改革的重要组成部分。由于主编水平所限,书中不妥之处一定不少,恳请使用本教材的老师、同学和广大读者批评指正,以便进一步修改。

主编

1986年10月

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和基尔霍夫定律	1
第一节 引言.....	1
第二节 电路及电路模型.....	1
第三节 电流和电压.....	5
第四节 电功率和电能.....	12
第五节 基尔霍夫定律.....	14
第六节 电阻元件.....	17
第七节 电容元件.....	22
第八节 电感元件.....	27
第九节 电压源和电流源.....	31
复习提要	37
习 题	38
第二章 电阻电路	45
第一节 电阻的串联和并联.....	45
第二节 电阻的星形联接与三角形联接的等效变换.....	51
第三节 独立源的等效变换.....	55
第四节 支路法 (branch method)	61
第五节 网孔法 (mesh method)	65
第六节 节点法 (node method)	70
第七节 叠加原理 (superposition principle)	77
第八节 替代定理 (substitution theorem)	80
第九节 戴维南定理及诺顿定理.....	83
第十节 受控源及含受控源电路的分析简介.....	88
第十一节 双口网络的 A 参数.....	94
第十二节 非线性电阻电路的图解法.....	99
复习提要	103
习 题	105
第三章 正弦交流电路	114
第一节 正弦量的基本概念	114
第二节 交流量的有效值	118
第三节 正弦量的相量表示法	120

第四节	正弦交流电路中的电阻、电容、电感元件	126
第五节	RLC 串联电路	132
第六节	RLC 并联电路	137
第七节	复阻抗与复导纳的等效互换	141
第八节	正弦交流电路的功率	145
第九节	正弦交流电路的相量分析法	152
第十节	具有互感的正弦交流电路	158
第十一节	电路的谐振	167
复习提要		174
习 题		176
第四章	三相正弦交流电路	189
第一节	对称三相正弦电压源	189
第二节	三相电源和负载的联接	188
第三节	三相电路中的相电压与线电压、相电流与线电流	190
第四节	对称三相电路的计算	196
第五节	不对称星形负载三相电路的计算	202
第六节	三相电路的功率	206
第七节	不对称三相制的对称分量	208
复习提要		216
习 题		218
第五章	非正弦交流电路	222
第一节	非正弦周期函数分解为傅里叶级数	222
第二节	周期性非正弦量的有效值及平均值	227
第三节	非正弦交流电路的计算	230
第四节	非正弦交流电路的功率	233
第五节	非正弦对称三相电路	235
复习提要		241
习 题		242
第六章	动态电路的全响应	245
第一节	初始条件与换路定律	245
第二节	RC 电路的全响应	248
第三节	全响应的两种分解	256
第四节	RL 电路的全响应	261
第五节	一阶电路分析的三要素法	270
第六节	RLC 串联电路的零输入响应	273
第七节	运算法 (operational method)	281
复习提要		296

习 题	298
第七章 网络图论及矩阵形式的网络方程	303
第一节 矩阵的一些基本知识	303
第二节 一般支路及网络的支路方程	307
第三节 网络拓扑图及关联矩阵	310
第四节 节点法	314
第五节 图的一些基本知识	318
第六节 回路法	321
第七节 割集法	328
复习提要	332
习 题	334
第八章 均匀传输线的正弦稳态	336
第一节 均匀线方程	336
第二节 均匀线方程的正弦稳态解	338
第三节 均匀线的行波	343
第四节 均匀线的副参数	346
第五节 无反射线	348
复习提要	350
习 题	351
第九章 磁路与铁心线圈	353
第一节 磁场	353
第二节 铁磁物质的磁化	356
第三节 磁路及磁路的基本定律	359
第四节 恒定磁通磁路的计算	362
第五节 交流铁心线圈中的电压、电流和磁通	368
第六节 磁滞与涡流的影响	372
第七节 交流铁心线圈的等效电路	375
第八节 串联铁磁谐振	378
第九节 电磁铁的电磁吸力	380
复习提要	382
习 题	383
部分习题答案	386

第一章 电路的基本概念和基尔霍夫定律

第一节 引言

《电工基础》是电类专业的一门重要的基础理论课。本课程的教学任务，是使同学掌握电路和磁路的基本理论知识、分析计算的基本方法和初步的实验技能，为学习后续有关课程及今后从事电方面的实际工作打下理论基础。

对各种电气设备和电子器件内部所发生的物理过程的研究，以及对电能或电信号在电路传输过程的研究，根据条件的不同，有两种分析方法：一种是电磁场理论的方法，另一种是电路理论的方法。电磁场理论是在三维空间中研究各种电磁现象的，如电荷的分布、电流密度的分布、电磁波的传播及电能辐射，等等。而电路理论则是在空间的特定条件下，研究电能或电信号从一个器件向另一个器件的传输过程，它只涉及各部分的电压、电流及功率等。本书的绝大部分内容属于电路理论。

电路理论在许多技术领域中得到广泛应用，已发展成为具有丰富内容的一门学科。电路理论主要包括电路分析和电路综合两个分支。电路分析的核心内容，是在已知电路的结构形式和元件性质的条件下，研究和计算电路的输入（input，又称激励excitation）与输出（output，又称响应response）之间的关系。所谓“激励”是指以电压或电流形式向电路输入的能量或信号；所谓“响应”是指经过电路传输和处理后的输出信号。通常把电路中的所有电源都称为输入或激励，而把电路中引起的各处的电压和电流都称为输出或响应。电路综合的核心内容，是根据给定的输入和输出条件，设计电路的结构形式并计算电路元件的参数。本书的内容只涉及电路分析的基本部分。

人们应用电能和处理电信号，都是通过不同形式的电路来实现的，而电路理论是建立在模型（model）的基础上的。因此，我们先从电路及电路模型讲起。

第二节 电路及电路模型

一、电路

为了实现一定的目的，将有关的电气设备或部件按照一定方式联接起来所构成的电流的通路，叫做电路（circuit）或网络（network），如图1-1(a)所示。

实际应用中的电路，虽然种类繁多、结构形式各不相同，但其主要功能：一是传输、分配和使用电能，由发电厂、输电线路、变电站和用户等所构成的电力系统，就是这方面的典型例子；二是传递、变换、贮存和处理电信号，使之成为所需要的输出量，例如，自动控制、广播通信和电子计算机技术等都体现了电路的这种功能。不管其功能如何，随着电流的流通，电路中总是进行着电能与其他形式能量的相互转换。

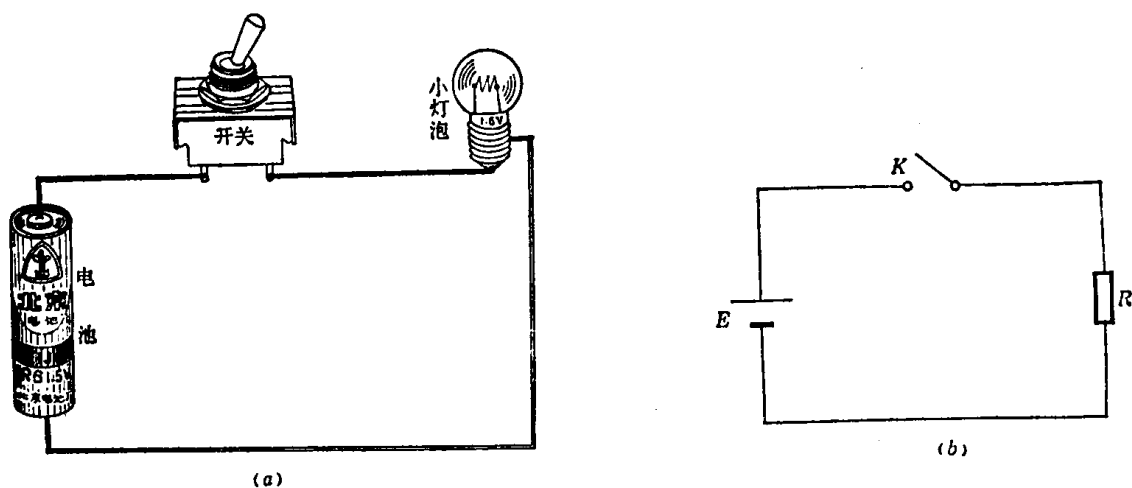


图 1-1 电路及电路图
(a) 电路; (b) 电路图

从各种电气设备或部件在电路中的功用来说, 一个电路一般包括以下三部分:

1. 电源设备

产生电能或电信号的设备称为电源设备, 又称激励源。常用的电源设备有两种类型: 一类是把别种形式的能量(如化学能、热能、太阳能、原子能等)通过一定方式转换为电能, 如电池、发电机等; 另一类是把一种波形的信号转换为另一种波形的信号, 如各种信号发生器。通常把前一类电源设备叫做电源(source), 后一种电源设备叫做信号源。

2. 负载设备

负载设备是用电设备的总称, 简称负载(load), 它将接受的电能转换为其他形式的能。例如, 电灯将电能转换为光能和热能, 电动机将电能转换为机械能, 等等。

3. 中间设备

包括传输电能或信号用的联接导线; 控制电路通、断用的开关设备; 对电路进行测量、保护用的设备, 等等。

二、电路模型

自然科学的各个分支都有自己的模型理论, 在模型的基础上, 运用数学工具进行研究。例如, 几何学中的点、线、面, 经典力学中的质点、刚体等, 都是从实际设备中抽象出来的模型。

任何实际电路都是由实际设备或部件组成的。例如常见的收音机电路, 是由电阻器、电容器、电感线圈、晶体管、变压器和电源等实际部件组成的。这些实际设备或部件的电磁性能一般是比较复杂的, 不便于用数学方法进行分析。例如, 实际的电阻器对电流具有电阻性质, 通过电流时将电能转换为热能(此过程是不可逆的), 而电流又同时产生磁场, 将电能转换为磁场能储存于磁场之中(此过程是可逆的)。因此, 对电路进行理论研究和分析时, 总是根据实际设备或部件在一定条件下的主要电磁性能, 由数学定义一些理想电路元件, 来模拟各种实际设备或部件的电磁性能。

理想电路元件简称元件(element), 是用于设计和分析电路的基本模型。有些实际

设备比较简单，在一定条件下可由一种元件模拟其电磁性能，构成它的模型；有些实际设备比较复杂，则由几种元件的组合构成它的模型。元件或元件的组合就构成了实际设备和实际电路的所谓“数学模型”，并用统一规定的元件图形符号画出电路模型图，简称电路图。例如，图1-1(a)的实际电路，可画成图1-1(b)所示的电路图。

总之，电路理论及其分析方法，就是从实际中建立电路模型，并通过数学手段对电路模型进行分析，从中得出有用的结论，再回到物理实际中去。

电路理论中，引用的基本电路元件有：反映消耗电能的电阻元件、反映储存电场能量的电容元件、反映储存磁场能量的电感元件，以及反映向电路提供电能或电信号的电压源和电流源。上述元件都具有两个端钮，称为二端元件。其中电阻元件、电容元件和电感元件又叫无源二端元件；电压源和电流源又叫有源二端元件。本章主要介绍这些元件。此外，还有受控源、耦合电感等元件，因为它们不止有两个端钮，故称为多端元件，这些元件将在后面有关章节里介绍。

三、有关电路的几个名词

为了便于以后的讲述，先以图1-2所示电路为例介绍几个经常用到的有关电路的名词。

1. 串联和并联

把几个二端元件的端钮依次联成一串，中间没有分支，这些二端元件的联接方式叫做串联 (series connection)。把几个二端元件的端钮分别接在电路的两点之间，这些二端元件的联接方式叫做并联 (parallel connection)。如图1-2中的元件1、2、3和4、5、6分别为串联，元件7、8为并联。

2. 支路和节点

组成电路的每一个二端元件叫做一个支路 (branch)。两个及两个以上支路的联接点叫做节点 (node)。例如图1-2中的元件1、2、3、……8分别为支路， a 、 b 、 c …… f 分别为节点。有时为了分析和计算电路方便，也可以把几个串联的元件看作一个支路，把三个及三个以上支路的联接点看作节点。如图1-2中，元件1、2、3总起来看作一个支路，元件4、5、6看作一个支路，元件7和8分别作为支路； b 、 e 看作节点， a 、 c 、 d 、 f 不再看作节点。

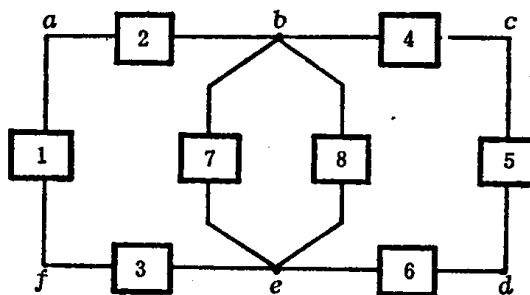


图 1-2 电路示例

3. 回路和网孔

电路中，由几个支路所构成的任一闭合路径叫回路 (loop)。内部不存在支路的回路叫网孔 (mesh)。图1-2所示电路共有六个回路 (读者自己找一找)，而其中的 $abefa$ (元件1、2、7、3)、 beb (元件7、8) 和 $bcdeb$ (元件4、5、6、8) 三个回路内部都不存在支路，因此它们是网孔。可见，网孔是一种特殊的回路。

必须说明：网孔只对平面电路有效。所谓平面电路，是指可以画在平面上而不出现任何支路相互交叉的电路。如图1-3中的 (a) 为非平面电路，(b) 则为平面电路。但要注意，有时电路图中的支路交叉是由于作图所造成的，如果改变电路的画法就可消除支路

交叉, 这种电路仍属于平面电路。如图1-3 (b) 改画成图 (c) 的形式, 就无交叉支路了。而图 (a) 所示电路, 无论怎样画在平面上都不能消除交叉支路。

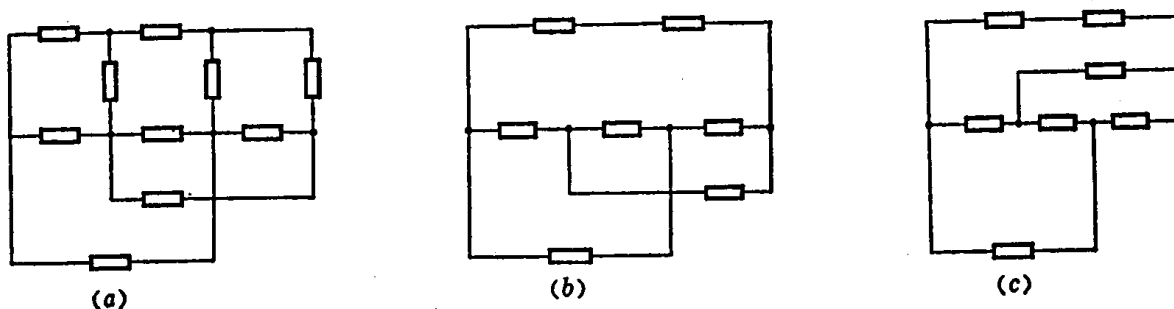


图 1-3 平面电路与非平面电路
(a) 非平面电路; (b)、(c) 平面电路

4. 支路电流和支路电压

每一个支路有两个端钮, 流过支路端钮的电流叫支路电流, 支路端钮间的电压叫支路电压。

5. 端口和等效网络

端口是指电路中与外电路相联接的一对端钮, 且流入其中一个端钮的电流与流出另一端钮的电流是同一电流。

在电路分析中, 可以把电路的某一部分作为一个整体看待, 当这个整体只有一个端口 (即两个端钮) 时, 就叫做单口网络或二端网络。每一个二端元件就是一个最简单的二端网络。同理, 具有两个端口的网络叫做双口网络。此外, 还有多口网络。

若有两个 n 端网络 N_1 、 N_2 , 在它们对应的端口上接入任意相同的外电路时, 其端口的电压、电流分别相等, 就称 N_1 和 N_2 对外部电路是等效网络。图1-4 (a)、(b) 为等效二端网络。

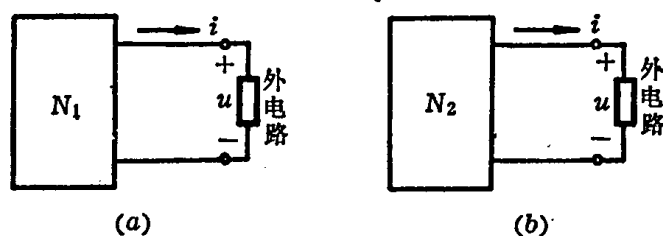


图 1-4 等效二端网络

在电路分析中, 运用等效 (equivalent) 的概念可以把一个结构复杂的网络用一个结构简化的网络替代, 以简化电路的计算。

思 考 题

1-2-1 指出图1-5所示电路的支路、节点、回路和网孔。

1-2-2 对图1-6所示电路, 如果只研究支路5的情况, 试画出除支路5以外的其余部分所构成的二端网络。

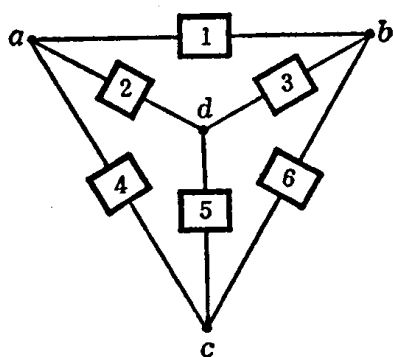


图 1-5 思考题1-2-1图

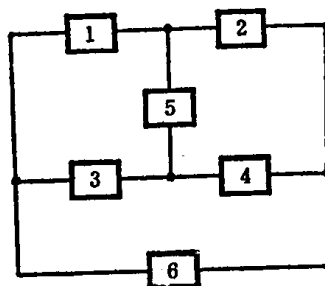


图 1-6 思考题1-2-2图

第三节 电 流 和 电 压

在任何一个物理系统中，为了定量地说明其工作状态或特性，都需要首先定义出它自己的物理量。电流和电压是电路的两个基本物理量。因为在分析和计算电路过程中，电流或电压可取不同的数值或不同的时间函数，所以又把电流、电压这两个物理量称为电路的基本变量。考虑到电机学中对电压与电动势相互区别的需要，本节在主要介绍电流和电压的同时，还简要地介绍电动势的概念。

一、电流

近代物理学的发展已使我们对带电现象的本质有了深入的了解。物质是由分子、原子组成的，而原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成。原子核中有质子和中子，中子不带电，质子带正电。物质内部固有地存在着电子和质子这两类基本电荷是形成物体带电或产生电流的内在根据。物体所带电荷数量的多少叫做电量，用符号 q 表示。在法定单位制中，电量的单位为库仑，简称库，代号为 C 。每一个电子所带的电量和每一个质子所带的电量相等，为 $1.602 \times 10^{-19} C$ ，即 $1C$ 约等于 6.24×10^{18} 个电子所带的电量。

带电体（电荷）周围空间存在着一种特殊形态的物质，叫做电场（electric field）。电场对置于其中的电荷有力的作用，这种力叫做电场力或库仑力。在电场力的作用下，电荷有秩序地流动这一物理现象叫做电流（current）。金属导体中的电流，是由其内部的自由电子在电场力作用下定向移动形成的；被电离的气体和电解液中的电流，是由正、负离子在电场力作用下彼此沿相反方向移动形成的。自由电子或离子在导电媒质中所形成的电流，叫传导电流。

衡量电流大小的量叫做电流强度，它等于单位时间内通过导体某横截面的电量。电流强度简称电流，用符号 i 表示。因此，“电流”这个词既表示一种物理现象，又是一个物理量。如在极短时间 dt 内，通过导体某横截面的电量为 dq ，则流过该导体电流的大小

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

并规定：正电荷流动的方向（即负电荷流动的反方向）为电流的方向（俗称电流的“实际方向”）。

图1-7是一段导体中电流的示意图，自由电子在电场力的作用下从**b**端向**a**端流动，其效果与等量的正电荷从**a**端向**b**端流动是一样的。因此，电流的方向是从**a**端到**b**端，如图中虚线箭头所示。

大小和方向都随时间变化的电流，称为交变电流，简称交流(alternating current)，记作AC；大小变化、方向不变的电流，称为脉动电流；大小和方向不随时间变化的电流，称为恒定电流，简称直流(direct current)，记作DC，用大写字母*I*表示。对于直流，(1-1)式可写成

$$I = \frac{q}{t}$$

式中，*q*是在*t*时间内通过导体横截面的电量。

在法定单位制中，电量的单位为库、时间的单位为秒(代号为s)，电流的单位为安培，(Ampere)，简称安，符号为A。安是法定单位制中的基本单位之一。

在实际应用中，有时嫌基本单位及其导出单位太大或太小，使用不便。为此，在国际单位制中规定了十六个词头(简称SI词头)加在单位的前面，以构成十进倍数和分数单位。常用的SI词头有八个，如表1-1所列。例如：

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}$$

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$$

$$1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

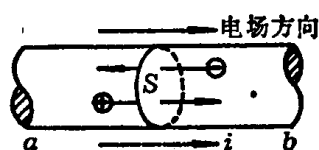


图 1-7 电流的示意图

表1-1

用于构成十进倍数和分数的部分词头

所表示的因数	词 头 名 称		词头符号
	原 文 (法)	中 文	
10^{12}	téra	太 [拉]	T
10^9	giga	吉 [咖]	G
10^6	méga	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^{-3}	mili	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{-12}	pico	皮 [可]	p

[]内的字，是在不致混淆的情况下可省略的字。

例1-1 图1-7中，在0.001s(秒)时间内，有 $5 \times 10^{-4}\text{C}$ (库)的负电荷从右向左通过横截面S，同时有 $5 \times 10^{-4}\text{C}$ 的正电荷从左向右通过S。试决定通过S的电流的大小和方向。

解 正、负电荷的流动都形成电流，而且向相反方向流动的正、负电荷的效应是相同的。这里，相当于有 $5 \times 10^{-4} + 5 \times 10^{-4} = 10^{-3}\text{C}$ 的正电荷从左向右通过横截面S。所以，电流的大小

$$i = \frac{0.001}{0.001} = 1\text{A}$$

电流的方向规定为正电荷流动的方向，即从 a 到 b 。

二、电压

电荷在流动过程中，要发生能量的转换。例如，正电荷在电场力作用下流动时，电场力对正电荷做了功，正电荷所具有的能量（称电位能）减少，其能量的减少值就等于电场力所做的功；如正电荷逆着它所受电场力的方向流动，就需要外力（非电场力）克服电场力做功，而正电荷的电位能增加。可以证明，单位电荷在电场中从一点移到另一点时，其电位能的改变量只与电荷的起点和终点的位置有关，而与电荷移动的路径无关。根据上述事实，引用电压 (voltage) 这一物理量来衡量电场力移动电荷做功的能力。电压用符号 u 表示，其定义如下：如电荷 dq 在电场中从 a 点移到 b 点，其电位能的改变量为 dw ，则 a 、 b 两点间电压的大小

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

并规定：如正电荷从 a 点移到 b 点时其电位能减少（即正电荷在 a 点时所具有的电位能大于它在 b 点时所具有的电位能），则电压的方向从 a 到 b 。

大小和方向都随时间变化的电压，称为交变电压；大小和方向不随时间变化的电压，称为恒定电压或直流电压，用大写字母 U 表示。

在法定单位制中，能量的单位为焦耳（简称焦，符号为 J ）、电量的单位为库，电压的单位为伏特 (Volt)，简称伏，符号为 V 。在实用中，根据不同需要，电压还用千伏 (kV)、毫伏 (mV) 等作单位。

例 1-2 0.2C 的电荷从 a 点移到 b 的过程中，其电位能的改变量为 10J ，试求下列四种情况下 a 、 b 间电压的大小和方向：（1）电荷为正、且电位能增加；（2）电荷为负、且电位能增加；（3）电荷为正、且电位能减少；（4）电荷为负、且电位能减少。

解 根据 (1-2) 式， a 、 b 间电压的大小

$$|u| = \frac{10}{0.2} = 50\text{V}$$

（1）电荷为正、电位能增加时，电压的方向从 b 到 a ；

（2）电荷为负、电位能增加时，电压的方向从 a 到 b ；

（3）电荷为正、电位能减少时，电压的方向从 a 到 b ；

（4）电荷为负、电位能减少时，电压的方向从 b 到 a 。

三、电流、电压的参考方向

电路中的每一个电流或电压，只有两个可能的方向。例如图1-7中，电流的方向或是从 a 到 b 、或是从 b 到 a 。电压也是如此。在电路分析中，有时不能预先判定某些电流或电压的方向；在交流电路中，电流或电压的方向又随时间反复不断地改变。为了分析和计算上的需要，我们都是任选其中一个方向作为电流或电压的参考方向，并规定：若所选的电流或电压的参考方向与其方向一致，则电流或电压为正值；若所选的电流或电压的参考方向与其方向相反，则电流或电压为负值。这样，就可以把电流或电压的大小和方向用一个有正、负的代数量同时表达出来了。也就是，引入参考方向之后，电流、电压都是对应于

所选参考方向而言的代数量。在图1-8所示一段电路中，已知电流的大小为1A、方向从a到b，如虚线箭头所示。若选取电流的参考方向从a到b，如图(a)中实线箭头所示，则 $i = 1\text{A}$ ；若选取电流的参考方向从b到a，如图(b)中实线箭头所示，则 $i' = -1\text{A}$ 。

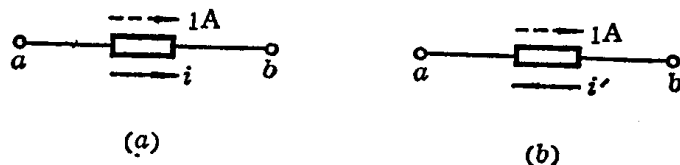


图 1-8 电流的参考方向
(a) $i = 1\text{A}$; (b) $i' = -1\text{A}$

本书电路图中，电流、电压的参考方向用实线箭头表示；若需要表明它们的方向，则用虚线箭头表示。在电路图中，电压的参考方向还可用“+”、“-”参考极性表示，由“+”极性指向“-”极性的方向为电压的参考方向。在计算中，电流、电压的参考方向常用双下标表示，例如 i_{ab} 、 u_{ab} 表示其参考方向从a到b。对同一支路，习惯上选取电流和电压的参考方向一致，叫做关联参考方向。

必须强调：今后如不加说明，电流、电压都是对应于所选参考方向而言的代数量。电流、电压在某一瞬间的值叫瞬时值，用小写字母表示，如 i 、 u 等。表达瞬时值随时间变化规律的数学式叫解析式，用符号 $i(t)$ 、 $u(t)$ 或 i 、 u 等表示。表达瞬时值随时间变化规律的图象，叫波形。

参考方向是电路理论中的一个重要概念，下面提出应注意的几点：

(1) 电流、电压的方向是按规定客观存在的，而参考方向则是根据计算需要任意选择的。参考方向一经选定后，在整个分析和计算过程中就必须以此为根据，不能随意变动。

(2) 同一电流（或电压），若参考方向选择不同，其结果是：瞬时值大小相等而异号，即 $i_{ab} = -i_{ba}$ ；解析式也是异号，即 $i_{ab}(t) = -i_{ba}(t)$ ，其波形则是对 t 轴相反的。由此可见，电流、电压值的正、负，只有结合其参考方向才有意义。

(3) 所有电路元件上的电流与电压的关系以及由此而得出的基本公式和结论，都是在一定参考方向的前提下得出来的。因此，在应用这些公式和结论时，必须注意参考方向的选择。

例 1-3 某电压的解析式为 $u_{ab}(t) = 10\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\text{V}$ ，其中 T 为常数。(1)试求 $t=0$ 、 $\frac{T}{8}$ 、 $\frac{T}{4}$ 、 $\frac{T}{2}$ 、 $\frac{3}{4}T$ 、 T 时的瞬时值 u_{ab} ，并说明上述各瞬时电压的方向；(2)画出 $u_{ab}(t)$ 的波形。

解 (1)将 $t=0$ 、 $\frac{T}{8}$ 、 $\frac{T}{4}$ 、 $\frac{T}{2}$ 、 $\frac{3}{4}T$ 、 T 分别代入解析式，得

$$u_{ab}(0) = 0$$

$$u_{ab}(T/8) = 10\sin\pi/4 = 7.07\text{V}, \text{ 方向从 } a \text{ 到 } b$$

$$u_{ab}(T/4) = 10\sin\pi/2 = 10\text{V}, \text{ 方向从 } a \text{ 到 } b$$

$$u_{ab}(T/2) = 10\sin\pi = 0$$

$$u_{ab}(3T/4) = 10\sin 3\pi/2 = -10V, \text{ 方向从 } b \text{ 到 } a$$

$$u_{ab}(T) = 10\sin 2\pi = 0$$

(2) 电压 $u_{ab}(t)$ 的波形如图1-9所示。

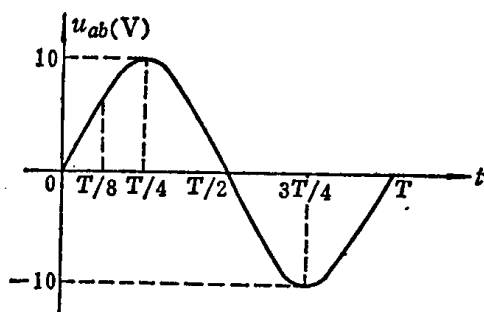


图 1-9 例1-3图

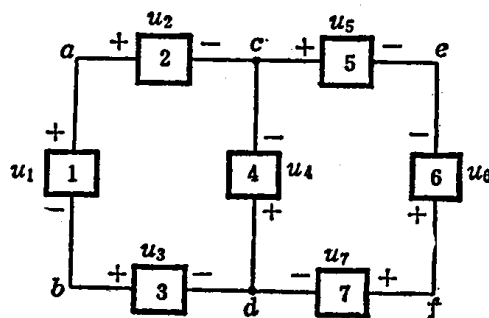


图 1-10 例1-4图

例 1-4 图1-10中方框代表二端元件，已知 $u_2 = -4V$ 、 $u_3 = -5V$ 、 $u_5 = -7V$ 、 $u_6 = 2V$ 、 $u_7 = 4V$ 。试求电压 u_1 和 u_4 。

解 可以根据电压的定义及电压只与两点的位置有关、与电荷移动的路径无关的性质来计算 u_1 和 u_4 。

(1) 设想单位正电荷从 d 点移到 f 点、 e 点、 c 点，其电位能的改变量应等于该单位正电荷从 d 点直接移到 c 点时电位能的改变量。所以有

$$\begin{aligned} u_4 &= u_{dc} = u_{df} + u_{fe} + u_{ec} \\ &= -u_7 + u_6 - u_5 = -(4) + (2) - (-7) = 5V \end{aligned}$$

(2) 同理

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{ab} = u_{ac} + u_{cd} + u_{db} \\ &= u_2 - u_4 - u_3 = (-4) - 5 - (-5) = -4V \end{aligned}$$

四、电位

分析电子线路时，常应用电位 (potential) 这一物理量。在电路中，任选一点作为参考点，则其他各点到参考点之间的电压叫做各点的电位。可见，电位就是电压。电位用符号 φ 表示，若选取 o 点为参考点，则 a 点的电位

$$\varphi_a = u_{ao} \quad (1-3)$$

因为参考点的电位就是从参考点到参考点的电压，即参考点的电位为零，所以参考点又叫零电位点。电位的单位与电压相同，也是伏 (V)。

在电路中，如已知 a 、 b 两点的电位 φ_a 、 φ_b ，则由

$$\varphi_a = u_{ao}$$

$$\varphi_b = u_{bo}$$

得到 a 、 b 两点间的电压

$$u_{ab} = u_{ao} + u_{ob} = u_{ao} - u_{bo} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-4)$$

由此可见，两点间的电压等于该两点的电位之差，因此电压又叫电位差 (potential difference)。

rence)。若 $\varphi_a > \varphi_b$ ，即 a 点电位高于 b 点电位，则 $u_{ab} > 0$ 。这表明电压的方向是从高电位指向低电位的，即电位降落的方向，故电压又叫电位降（俗称电压降）。

电位也是代数量。在一个电路中，选择不同的参考点，各点的电位都相应地改变，但由于各点的电位增加或减少同一数值，因而任意两点间的电压仍保持不变。也就是说，电位与参考点的选择有关，而电压与参考点的选择无关。分析一个电路时，只能选择一个参考点，参考点一经选定后，在整个计算过程中不能再行变动。至于选择哪一点为参考点，要看对分析和计算电路方便而定。在电子电路中，常选各有关部分的公共线（一般接底盘或机壳）为参考点，并用符号“ $\perp$ ”表示。

例 1-5 在图1-10所示的电路中：（1）以 d 点为参考点；（2）以 b 点为参考点，分别计算 a 、 c 、 e 、 f 各点的电位及电压 u_{ae} 和 u_{af} 。

解 （1）以 d 点为参考点，即 $\varphi_d = 0$

$$\varphi_a = u_{ad} = u_1 + u_3 = (-4) + (-5) = -9V$$

$$\varphi_c = u_{cd} = -u_4 = -5V$$

$$\varphi_e = u_{ed} = -u_6 + u_7 = -2 + 4 = 2V$$

$$\varphi_f = u_{fd} = u_7 = 4V$$

$$u_{ae} = \varphi_a - \varphi_e = (-9) - 2 = -11V$$

$$u_{af} = \varphi_a - \varphi_f = (-9) - 4 = -13V$$

（2）以 b 点为参考点，即 $\varphi_b = 0$

$$\varphi_a = u_{ab} = u_1 = -4V$$

$$\varphi_c = u_{cb} = -u_4 - u_3 = -5 - (-5) = 0$$

$$\varphi_e = u_{eb} = -u_6 + u_7 - u_3 = -2 + 4 - (-5) = 7V$$

$$\varphi_f = u_{fb} = u_7 - u_3 = 4 - (-5) = 9V$$

$$u_{ae} = \varphi_a - \varphi_e = (-4) - 7 = -11V$$

$$u_{af} = \varphi_a - \varphi_f = (-4) - 9 = -13V$$

五、电动势

如上所述，电场力总是使正电荷从高电位移向低电位的。要维持电路中的电流持续不断，就必须有一种非电场力将正电荷从低电位移到高电位，这个任务是由电源来完成的。

在电源内部，由于其他形式能量的作用，产生一种对电荷的作用力，叫做电源力，正电荷在其作用下从低电位移向高电位。不同电源中，电源力的来源有所不同。例如，电池中的电源力是由电解液与极板间的化学作用产生的；发电机的电源力则是由电磁作用产生的。一个具有电源力的二端元件，由于电源力对电荷的作用使其两个端钮间所产生的电位差，叫做电动势（electromotive force），用符号 e （直流用 E ）表示；并规定：电动势的方向由低电位端到高电位端。也就是说，电动势的方向从负极到正极，即电位升的方向。

在图1-11中，若端钮 a 为正极（即高电位）、端钮 b 为负极（低电位），则电动势的大小

$$e = \varphi_a - \varphi_b = u_{ab} \quad (1-5)$$

c 的方向由 b 到 a 。(1-5)式表明,在电源的端钮断开情况下(即没有接入负载),其电动势的量值等于端钮间的电压。电动势的单位与电压相同,也是伏(V)。电源的符号如图1-12所示,其中图(b)为电池的符号,长线为“+”极,短线为“-”极。

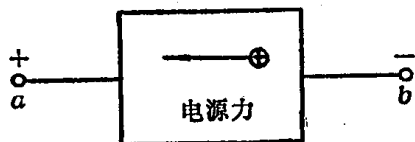


图 1-11 电源力示意图

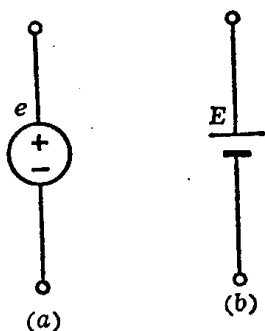


图 1-12 电源电动势的符号
(a)一般符号; (b)电池符号

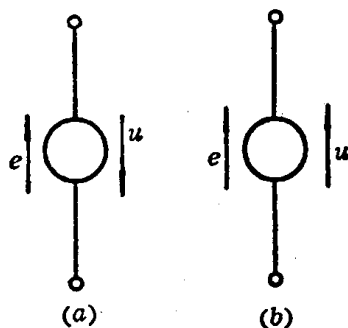


图 1-13 电源的电动势与电压的关系
(a) $u=e$; (b) $u=-e$

对一个电源设备来说,因为它的电动势的方向规定从低电位到高电位,即电位升的方向,而它的电压的方向规定从高电位到低电位,即电位降的方向,所以,当采用参考方向表示它的电动势和电压时,若选择电动势和电压的参考方向相反,如图1-13(a)所示,则有

$$e=u$$

若选择电动势和电压的参考方向相同,如图1-13(b)所示,则有

$$e=-u$$

电源的电动势和电压的物理意义是不同的,前者相当于电源力将单位正电荷从其负极通过电源内部移到正极所做的功,而后者相当于电场力将单位正电荷从高电位通过电源外部移到低电位所做的功。但就对外部效果而言,一个支路具有方向从 b 到 a 的几伏电动势,与具有方向从 a 到 b 的几伏电压,是没有区别的。电路理论研究的主要对象是电路的电压和电流,而对电流究竟是由电场力对电荷的作用形成的还是由电源力对电荷的作用形成的,则无关重要。因此,在近代电路理论中只引用电压而不引用电动势。这里简要介绍电动势,只是为了某些专业课的需要。

思 考 题

1-3-1 一秒时间内从 a 到 b 通过某导体的电量为 $2 \times 10^{-3} \text{C}$ 。(1)若通过的为正电荷,求 i_{ab} 和 i_{ba} ; (2)若通过的为负电荷,求 i_{ab} 和 i_{ba} 。

1-3-2 $5 \times 10^{-2} \text{C}$ 正电荷,在电场中从 a 点移到 b 点时,其电位能减少1 J。试决定 a 、 b 间电压的大小和方向;若电场不变,将该正电荷从 b 点移到 a 点,其电位能是增加还是减少? a 、 b 间电压的大小和方向是否改变?

1-3-3 某电路中有 a 、 b 、 c 、 d 四点,以 d 点为参考点时各点的电位为: $\varphi_a=5\text{V}$ 、 $\varphi_b=-1\text{V}$ 、 $\varphi_c=-2\text{V}$ 。若改以 c 点为参考点,试求 a 、 b 、 d 点的电位。

1-3-4 在图1-14所示各图中,已知电源的电动势 $e=10\text{V}$,求电源两端的电压 u_{ab} 。