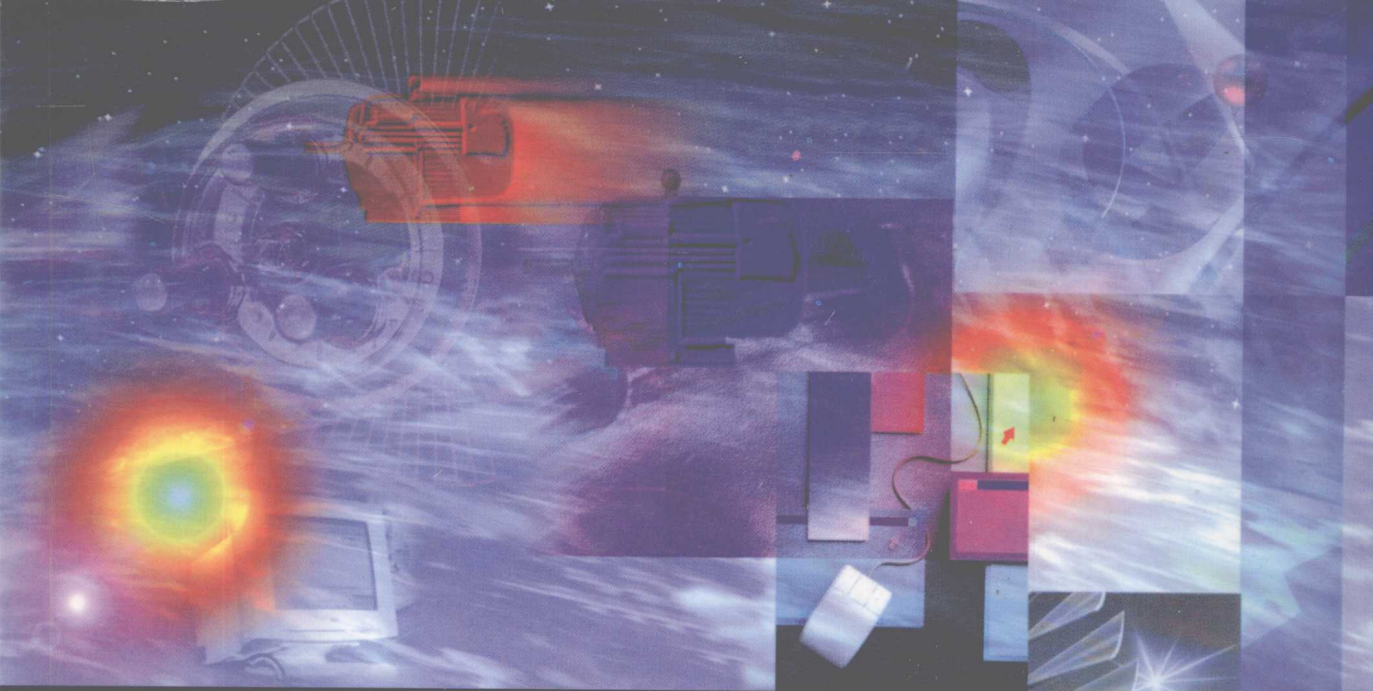
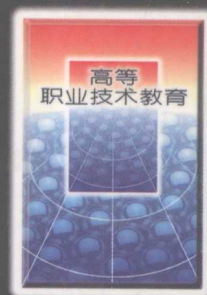




高等职业技术教育机电类专业规划教材



电工基础

陕西工业职业技术学院 王兆奇 主 编
常州机械工业学校 田明义 副主编

高等职业技术教育机电类专业规划教材

电 工 基 础

主 编 王兆奇
副主编 田明义
参 编 蒋湘若 戴一平
 张国勋 马连奎
主 审 吴兴云



机械工业出版社

本书是根据机械工业机电类高等职业技术教育教材建设协作组会议精神编写的。

全书共九章,论述了电路的基本概念和基本定律、线性网络的基本定理和分析方法、正弦交流电路基本概念和相量分析法、三相电路、非正弦周期电流电路、电路的瞬态分析及磁路与铁心线圈电路。

本书可供高等职业技术教育电气类各专业及中等专业学校同类专业使用,亦可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工基础/王兆奇主编. —北京:机械工业出版社,2000.8

高等职业技术教育机电类专业规划教材

ISBN 7-111-08048-3

I. 电… II. 王… III. 电工-理论-高等教育:技术教育-教材
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 08190 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王小东 贡克勤 版式设计:冉晓华 责任校对:吴美英

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

高等教育出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/16·14 印张·337 千字

0 001—6000 册

定价:19.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

本教材是根据机械工业机电类高等职业技术教育教材建设协作组会议精神编写的,可供高等职业技术学院电气类各专业教学使用。

本书共分九章,内容包括电路的基本概念和基本定律、直流电路和交流电路的一般分析方法、非正弦周期电流电路、电路的过渡过程、磁路及铁心线圈电路等。

本书从高职教育的培养目标出发,力图做到基本概念清楚,注重理论联系实际,精选有助于建立概念、掌握方法、联系实际应用的例题和习题;各章目的要求明确,语言力求简练流畅;本书各章配有较多的思考题和练习题,书后附有答案,以便自学。

本书由陕西工业职业技术学院王兆奇主编,并编写第四、五章;常州机械工业学校田明义任副主编,并编写第二、三章;北京仪器仪表工业学校蒋湘若编写第一章;浙江机械工业学校戴一平编写第六、七章;邢台职业技术学院张国勋编写第八章;陕西工业职业技术学院马连奎编写第九章。本书由上海电机技术高等专科学校吴兴云任主审。

在编写过程中,陕西工业职业技术学院方维奇校阅了全书,李梅、贺天柱提出了许多宝贵建议,在此表示感谢。

编写本书时,查阅和参考了众多书籍,得到了许多教益和启示,在此向参考书籍的作者致以诚挚的谢意。

由于水平有限,书中难免会有不足甚至错误之处,恳请读者提出宝贵意见,以便修改。

编者

2000年2月于咸阳

目 录

前言			
第一章 电路的基本概念和基本定律	1		
第一节 电路与电路模型	1		
第二节 电路的基本物理量	2		
第三节 欧姆定律	6		
第四节 基尔霍夫定律	8		
第五节 电功率	13		
第六节 电压源与电流源	16		
习 题	21		
第二章 线性电阻电路	24		
第一节 线性电阻的串联	24		
第二节 线性电阻的并联	26		
第三节 线性电阻的混联	28		
第四节 电阻星形联结与三角形联结的 等效变换	31		
第五节 两种电源模型的等效变换	33		
第六节 电源的工作状态	35		
第七节 电位的计算	38		
习 题	41		
第三章 线性网络的基本分析方法和定 理	44		
第一节 支路电流法	44		
第二节 网孔电流法	46		
第三节 节点电压法	49		
第四节 叠加原理	53		
第五节 戴维南定理	55		
第六节 含受控源电路的分析	59		
第七节 非线性电阻电路的分析	61		
习 题	63		
第四章 正弦交流电路的基本概念 和基本定律	66		
第一节 正弦量	66		
第二节 正弦量的相量表示法	71		
第三节 电感元件与电容元件	75		
第四节 电阻元件的交流电路	78		
第五节 电感元件的交流电路	80		
第六节 电容元件的交流电路	83		
第七节 相量形式的基尔霍夫定律	85		
第八节 相量形式的欧姆定律	88		
习 题	92		
第五章 正弦交流电路的相量 分析法	95		
第一节 复阻抗的串联与并联	95		
第二节 相量图解法	99		
第三节 一般交流电路的分析	103		
第四节 交流电路的功率	105		
第五节 功率因数的提高	109		
第六节 谐振电路	112		
第七节 含互感的交流电路	115		
习 题	120		
第六章 三相电路	126		
第一节 对称三相正弦量及其特点	126		
第二节 三相电源和负载的联接	128		
第三节 三相电路中的电压与电流	130		
第四节 对称三相电路的计算	133		
第五节 不对称三相电路的分析	136		
第六节 对称三相电路中的功率	139		
习 题	140		
第七章 非正弦周期电流电路	143		
第一节 非正弦周期电流的产生	143		
第二节 周期量与正弦量的关系	145		
第三节 具有对称性的周期波	148		
第四节 非正弦周期电流电路的计算	152		
第五节 非正弦周期电流电路的有效值 和平均功率	155		
习 题	158		
第八章 电路的暂态分析	160		
第一节 电路的过渡过程	160		
第二节 电压和电流初始值的计算	161		
第三节 零输入响应	166		
第四节 零状态响应	172		
第五节 全响应及其分解	179		
第六节 一阶线性电路暂态分析的三要 素法	182		

第七节 LC 电路中的自由振荡	186	第四节 磁路与磁路定律	199
习 题	188	第五节 直流磁路的计算	202
第九章 磁路和铁心线圈电路	192	第六节 交流磁路的特点	205
第一节 磁路的基本物理量及其相互 关系	192	第七节 铁心线圈的电路模型	209
第二节 安培环路定律	194	习 题	210
第三节 铁磁材料的磁性能	195	附录 部分习题答案	212
		参考文献	216

第一章 电路的基本概念和基本定律

电工基础是一门专业基础课，它是为学习后续专业课打基础的。

本章主要讨论电压和电流的参考方向、欧姆定律以及基尔霍夫定律等，并介绍几个基本电路元件。这些内容都是分析与计算电路的基础，也是全书的基础。为便于读者学习，本章仅就直流电路进行讨论。

第一节 电路与电路模型

一、电路的组成

电路是电流的通路，它是由一些电气设备和元器件按一定的方式联接而成的。在电力系统、自动控制、计算机等技术领域中，人们广泛使用各种电路来完成多种多样的任务。例如，可以提供电能的供电电路、信号放大电路、测量所用的仪表电路以及存储信息的存储电路等。

电路中可以供给电能、电信号的设备或器件叫做电源，使用电能的设备或器件称为负载。手电筒电路就是一个简单的实用电路，如图 1-1 所示。这个电路是由一个电源（电池）、一个负载（小灯泡）、一个开关和联接导线（金属外壳）所组成。此外，电路中还可能包括控制与保护设备等。

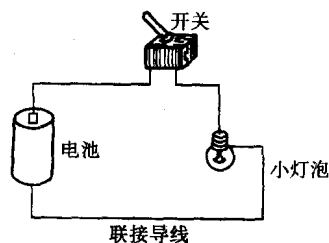


图 1-1

为了画电路图时方便，人们用一些图形符号来代表各种电气设备和元器件，联接起来后就成为原理电路图。图 1-2 是图 1-1 的原理电路图，它清晰地表明了各器件之间的联接关系，与实际电路的形状、大小、相对位置无关。

二、电路模型

实际电路都是由一些像电池、电阻器、电容器等实际器件组成的。人们使用某种器件，就是想要利用它的某一主要电磁特性。例如，使用电池，就是要利用它正、负极之间能保持一定电压这一性质；使用电阻器，就是要利用它能将电能转化为热能或光能的性质。但是，实际器件的电磁性能往往不是单一的。比如，一个电池总有一定的内阻，工作时它要消耗一些电能；当电流通过实际电阻器时还会产生磁场，因而有微小的电感。各种电磁现象交织起来，往往给电路的分析和计算造成一些困难。

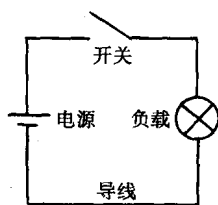


图 1-2

为了便于对实际电路进行分析和用数学描述，可以对实际元器件进行科学的抽象，即在一定的条件下突出其主要的电磁特性，忽略其次要性能，把它近似地看成一个理想元件。例如，忽略内阻后，电池就可以看成电压恒定的理想电压源；忽略微小电感时，电阻器就可看成一个理想电阻元件。实际的电路元器件经过理想化以后，便成为只有某种单一电磁性能的元件，它是实际器件的近似，称为理想电路元件，今后常简称为电路元件。

电阻、电容等理想元件是通过两个端钮与外部相联接的，称为二端元件。可以用具有两个引出端钮的方框符号来表示抽象的二端元件。具有 N 个引出端钮的元件称为 N 端元件，如晶体管是三端元件，变压器是四端元件。

任何一个实际电路都可以用一些电路元件的组合来表示，这样得到的电路就称为实际电路的电路模型。图 1-3 就是图 1-1 的电路模型。在建立电路模型时，应使其特性尽可能与实际情况接近。同一实际电路在不同条件下可能会有不同的电路模型。电路模型是实际电路的一种近似，所要求的近似程度越高，电路模型就越复杂。

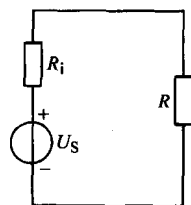


图 1-3

三、电路、网络 and 系统

今后所分析的都是由理想元件组成的电路模型，简称电路。较复杂的电路呈现网状，因而常称为网络。由若干个电路单元组成以实现某种功能的有机整体称为系统，如电力系统、计算机系统等。

电路中反映信息特征的电流、电压称为电信号，简称信号。电路的输入信号称为激励，而输出信号称为响应。

练习与思考

1-1-1 什么是电路元件？什么是电路模型？本课程的研究对象是什么？

1-1-2 试举出一个电路实例，说明它由哪些电路元件组成，并画出其电路模型。

第二节 电路的基本物理量

一、电流

电荷的定向移动形成了电流。电流的实际方向习惯上是指正电荷运动的方向，电流的大小则用电流强度来表示。所谓电流强度，是指单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流强度又常被简称为电流。这样，“电流”一词既可以指电荷定向移动这一物理现象，又可以指电流强度这个物理量。电流是电路的基本物理量之一。

工程中常见的电流有两种：一种是大小和方向都不随时间变化的电流，称为直流电流，简称直流 (DC)，用 I 表示；另一种是大小和方向均随时间周期性变化的电流，称为周期电流。当周期电流在一个周期内的平均值为零时，这样的电流称为交变电流，简称交流 (AC)，用 i 表示。

图 1-4 给出了几种常见电流的波形，根据上述定义，图 a 为直流，图 b、c 均为交流。

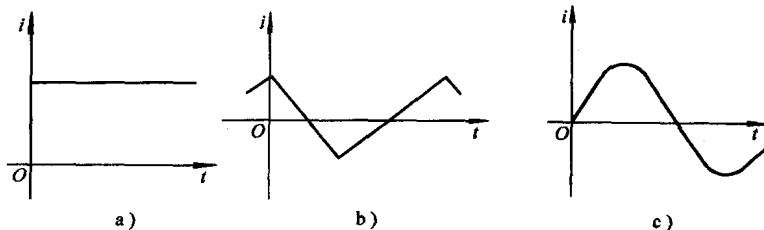


图 1-4

对于直流, 若在时间 t 内通过导体横截面的电荷量为 Q , 则电流为

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

对于交流, 若在时间 dt 内通过导体横截面的电量为 dq , 则电流瞬时值为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

在国际单位制 (SI) 中, 电流的单位是安培, 简称安 (A)。1 秒钟 (s) 内通过导体截面的电量为 1 库仑 (C) 时, 电流就是 1A。大电流以千安 (kA) 来计量, 微弱电流以毫安 (mA)、微安 (μ A) 为单位。按词冠定义, 有

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} \quad 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A} \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

表 1-1 给出了常用的 SI 词冠。

表 1-1 常用的 SI 词冠

因 数	词 头 名 称		符 号	因 数	词 头 名 称		符 号
	原文 (法)	中文			原文 (法)	中文	
10^9	giga	吉	G	10^{-2}	centi	厘	c
10^6	méga	兆	M	10^{-3}	milli	毫	m
10^3	kilo	千	k	10^{-6}	micro	微	μ
10^2	hecto	百	h	10^{-9}	nano	纳	n
10^1	déca	十	da	10^{-12}	pico	皮	p

在图 1-5a 的简单电路中, 判断电流的实际流向并不困难。但是, 当电路较为复杂时, 有些电流的实际方向在计算前是很难立即判定的。图 1-5b 是一个电桥电路, 当电桥处于不平衡状态时, 检流计 G 中电流的实际方向究竟是从 a 流向 b, 还是从 b 流向 a, 只有通过计算才能确定。为了分析与计算电路的需要, 可任选其中一个方向

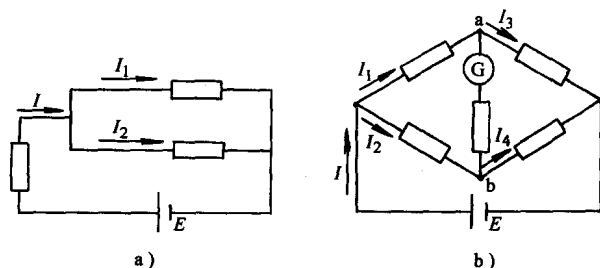


图 1-5

作为电流的参考方向, 也称为正方向, 并用箭头标明。所选的电流参考方向不一定与电流的实际方向一致。当电流实际方向与参考方向一致时, 则电流为正值; 如果两者相反, 则电流为负值。这样, 在分析电路之前, 可以先任意假设电流的参考方向, 而不必考虑它的实际方向。只要根据电路的基本定律计算得到结果后, 若所得电流为正值, 则说明其实际方向与参考方向一致; 若电流为负值, 则其实际方向与参考方向相反。

参考方向是分析计算电路时的重要概念。如果不预先规定参考方向, 讨论电流的值就是不确定的。

例 1-1 图 1-6a 中的方框表示任意元件。已知通过该元件的电流为 0.5A, 电流的实际流向是由 a 到 b。如分别采用图 b、c 两种不同参考方向时, 试求电流 I_1 和 I_2 。

解 图 b 中, I_1 的参考方向与电流的实际方向相同, 所以为正, 即

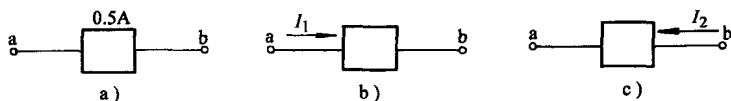


图 1-6

$$I_1 = 0.5\text{A}$$

图 c 中, 因 I_2 的参考方向与电流的实际方向相反, 所以为负, 即

$$I_2 = -0.5\text{A}$$

显然, 这两种参考方向下的电流值相差一个“-”号, 即

$$I_1 = -I_2$$

电流的参考方向除用箭头表示外, 还可以用双下标表示。图 b 中的电流还可写成 I_{ab} , 图 c 中的电流可写成 I_{ba} 。显然

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

二、电压与电动势

电路中用到的另一个基本物理量是电压, 也就是电位差, 用 U 表示。电荷在电路中流动时, 一定有能量交换发生。电荷在电路的某处(电源)获得电能, 而在另一处(如电阻)失去电能。这种电能的获得或失去是和其它形式能量相互转化的结果。

电路中 a、b 两点之间的电压表明单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量, 即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

式中的 dq 是由 a 点转移到 b 点的电量, dW 是转移电荷 dq 的过程中能量的变化量。如果正电荷由 a 转移到 b 时获得能量, 则 a 点为低电位端, b 点为高电位端; 反之, 如果正电荷由 a 转移到 b 时失去能量, 则 a 点为高电位端, b 点为低电位端。正电荷在电路中转移时, 电能的得或失体现为电位的升高或降落。

按电压随时间变化的情况, 可分为直流电压与交流电压。如果电压的大小和极性都不随时间变化, 这样的电压就是直流电压, 用 U 表示。如果电压的大小和极性均随时间周期性地变化, 但在一周期内平均值为零, 则这样的电压称为交流电压, 用 u 表示。

在 SI 中, 电压的单位是伏特, 简称伏 (V)。当电场力将 1C 的电量从一点转移到另一点所做的功为 1J 时, 这两点间的电压就是 1V。计量高电压时则以千伏 (kV) 为单位; 计量微小电压时以毫伏 (mV) 和微伏 (μV) 为单位。

电压的实际方向是从正极指向负极, 也就是说, 电压的正方向就是电位降的方向。如同需要为电流规定参考方向一样, 也需要为电压规定参考极性或参考方向, 即在元件或电路两端用“+”、“-”符号分别标定正、负极性, 而由正极指向负极的方向就是电压的参考方向(用箭头表示), 如图 1-7 所示。当电压

U 为正值时, 该电压的真实极性与所标的极性相同, 即实际方向与参考方向一致; 当 U 为负值时则相反。显然, U 的正、负值只有在标明参考方向后才有意义。

电压的参考方向也可以用双下标表示: U_{ab} 表示由 a 到 b 是电位降的方向。参考方向是任意选定的, 实际方向是客观存在的, 因而一定有 $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

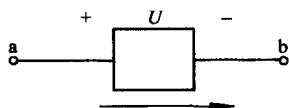


图 1-7

例 1-2 图 1-8a 所示元件的端电压为 5V, 已知正电荷由 b 移到 a 时获得能量, 试标出电压的实际极性。在图 b、c 所选参考方向下, U_1 、 U_2 的值各是多少?

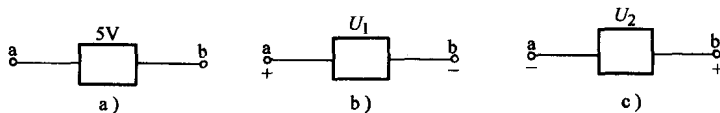


图 1-8

解 正电荷由 b 移到 a 获得能量, 说明 b 点为低电位端, 是负极; a 点为高电位端, 是正极。

图 b 中所标参考方向与实际方向一致, 所以

$$U_1 = 5V$$

图 c 中所标的参考方向与实际方向相反, 故

$$U_2 = -5V$$

显然 $U_1 = -U_2$ 。

电流参考方向与电压参考方向的选择本是相互独立的。但为了方便起见, 一般常取两者一致, 即电流参考方向由电压的“+”极端指向“-”极端。电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向。一般情况下, 电压和电流都选为关联参考方向。

在电源内部, 电源力将单位正电荷由负极移到正极所做的功定义为电源的电动势, 用符号 E 来表示, 单位与电压一样。规定电动势的方向由负极指向正极。显然, 在电源两端, 表示电压方向的箭头与表示电动势方向的箭头正好相反。如果电流流过电源内部没有能量损耗, 这样的电源称为理想电源。理想电压源的端电压用 U_S 来表示, 其数值就等于电动势 E 。

练习与思考

1-2-1 在图 1-9 中, 已知直流电流表的读数是 3A, 电流的实际方向如何? 若选电流的参考方向由 b 指向 a, 试问 $I = ?$

1-2-2 图 1-10a 中, 已知 $U_{ab} = -5V$, a、b 两点中哪一点的电位高? 在图 b 中, 已知 $U_1 = -6V$, $U_2 = 4V$, 问 U_{ab} 是多少伏?

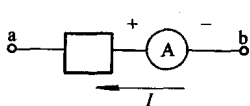


图 1-9

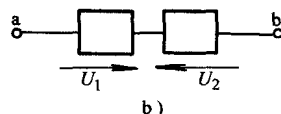
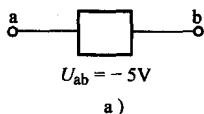


图 1-10

1-2-3 各电压的参考极性和各电流的参考方向如图 1-11 所示。已知 $U_1 = 10V$, $U_2 = 7.5V$, $U_3 = -2.5V$, $U_4 = 2.5V$, $U_5 = -5V$, $U_6 = 7.5V$; $I_1 = -6.25A$, $I_2 = -3.75A$, $I_3 = 2.5A$, $I_4 = 2.5A$, $I_5 = -1.25A$, $I_6 = 3.75A$, 试确定各电压的实际极性和各电流的实际方向。

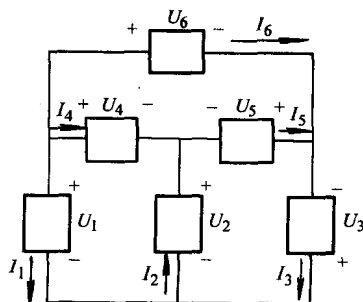


图 1-11

第三节 欧姆定律

一、电阻元件

电阻元件是一种最常见的电路元件，如碳膜电阻、线绕电阻、钨丝灯泡等都可看作是电阻元件。电阻元件具有阻碍电流通过的作用，电流通过电阻时，必然要消耗能量。

电阻元件的特性可以用其端钮处的电压、电流关系来表示，这种关系可通过实验获得，称为伏安特性，简称为 VAR。电路元件的伏安特性还可以画在 $U-I$ 坐标平面上。

由于电阻元件总要消耗能量，其电压、电流的实际方向总是一致的。在选取电压与电流为关联参考方向时，电阻元件的伏安特性就是通过坐标原点而位于一、三象限的曲线，电流与电压呈现某种代数关系。

图 1-12a 给出了两种电阻元件的伏安特性，其中一条是直线，说明电压 U 与电流 I 之间是线性关系，这种电阻称为线性电阻，其电路符号如图 b 所示；另一条则是曲线，说明电压与电流不成正比，这种电阻称为非线性电阻，其电路符号如图 c 所示。

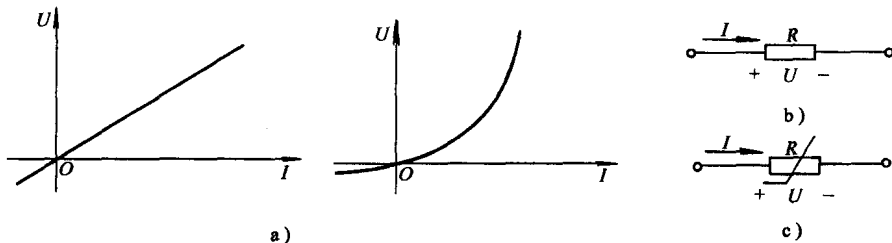


图 1-12

严格地说，线性电阻是不存在的。但是，在一定的电流范围内，只要电阻元件的伏安特性接近于过原点的直线，就可以把它看作线性电阻，由此而造成的误差并不明显。若无特别说明，今后谈到电阻元件时总是指线性电阻元件。至于非线性电阻元件，本书将在第三章予以讨论。

二、欧姆定律

电阻元件两端的电压与通过它的电流成正比，这一结论就是欧姆定律。它是分析电路的基本定律之一。在图 1-12b 的关联参考方向下，欧姆定律可用下式表示

$$U = RI \quad (1-4)$$

式中， R 是该元件的电阻。

在 SI 单位制中，电阻的单位是欧姆 (Ω)。当电阻元件两端的电压是 1V，通过它的电流是 1A 时，该元件的电阻就是 1Ω 。计量大电阻则要用千欧 ($k\Omega$) 或兆欧 ($M\Omega$) 作单位。

为了方便分析，有时也用电导来表征电阻元件的特性。电导就是电阻的倒数，用 G 表示，即

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

它的单位是西门子 (S)。引入电导后，欧姆定律还可写成

$$I = GU \quad (1-5)$$

式 (1-4)、式 (1-5) 是在关联参考方向下欧姆定律的表达式。由于电阻电流的实际

方向总是从高电位端流向低电位端，在非关联参考方向下，欧姆定律应写为

$$U = -RI \quad \text{或} \quad I = -GU \quad (1-6)$$

例 1-3 计算图 1-13 所示的电路的 U_{ao} 、 U_{bo} 和 U_{co} ，已知 $I_1 = 2A$ 、 $I_2 = -3A$ 、 $I_3 = -1A$ ； $R_1 = 5\Omega$ ， $R_2 = 3\Omega$ ， $R_3 = 2\Omega$ 。

解 R_1 、 R_2 的电压与电流是关联参考方向，故用式 (1-4) 计算电压。

$$U_{ao} = R_1 I_1 = (5 \times 2) V = 10V$$

$$U_{bo} = R_2 I_2 = [3 \times (-3)] V = -9V$$

R_3 的电压与电流是非关联参考方向，要用式 (1-6) 计算电压。

$$U_{co} = -R_3 I_3 = [-2 \times (-1)] V = 2V$$

应该注意的是，在运用欧姆定律计算电路时，不同情况下出现的负号有不同的意义。在上例中，计算 U_{bo} 时，计算结果中的“-”号是因为 I_2 本身是负值所致；计算 U_{co} 时，中括号前的“-”号则是因为 U_{co} 与 I_3 为非关联参考方向而出现的。在以后的电路计算中，必须首先选定参考方向，然后再列电路方程。电路方程中的正负号要有明确的意义，注意不要混淆上述两种情况。

三、开路和短路

一般地说，在电阻元件两端加一电压，其中便有电流通过；反之，给电阻通以电流，它两端会产生电压。但是，当电阻为零或无穷大时，情况就有所不同了。由式 (1-4) 可知，当电压有限时，无限大电阻中的电流恒等于零，其伏安特性如图 1-14a 所示，它就是 U 轴。

给电阻值是零的电阻中通以有限大小的电流，则电阻两端的电压恒为零，其伏安特性如图 1-14b 所示，即就是 I 轴。

一个二端元件，当通过它的电流恒等于零时，就说它处于开路状态；相反地，当元件两端的电压恒等于零时，就说它处于短路状态。

开路和短路可能发生在任一元件或一段电路中。电路中两点间用一根电阻值可以忽略的导线联接时就形成短路。若无特别说明，电路图中的联接导线都看作是电阻为零的短路线。

今后常常根据伏安特性来分析元件在电路中所起的作用。如有两个元件，即使不知道各自的内部结构，但只要它们的伏安特性完全相同，就称这两个元件是等效的。等效这一概念也可以推广应用于两段电路以至两个网络。

例 1-4 图 1-15a 中，电阻 $R = 5\Omega$ ；图 b 是一个二端元件，其伏安特性如图 c 所示。图 a、b 中两个元件是否等效？

解 虽然不知道图 b 中是何元件，但由图 c 的伏安特性可得

$$\frac{U}{I} = 5\Omega$$

可见，其外部特性表现为 5Ω 的电阻，与图 a 中的 R 等效。

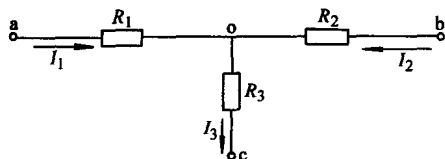


图 1-13

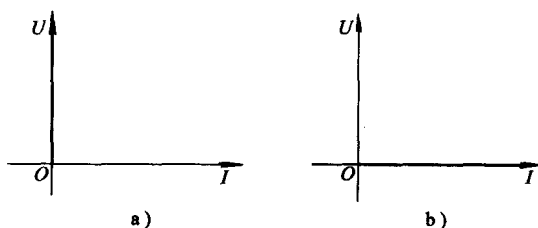


图 1-14

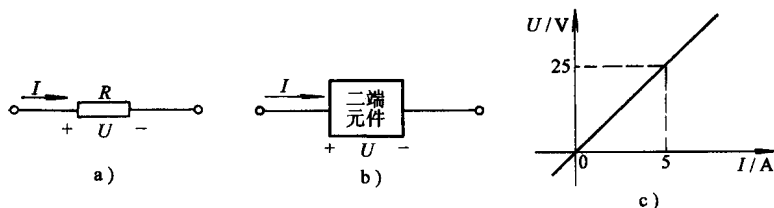


图 1-15

练习与思考

1-3-1 图 1-16 中的直线能否代表线性电阻元件的伏安特性？为什么？

1-3-2 同一电压作用于线性电阻 R_1 和非线性电阻 R_2 ，如图 1-17a 所示。已知这两个电阻元件的伏安特性如图 b 所示，问在 U 大于、等于和小于 U_P 三种情况下，电流 I_1 与 I_2 的大小关系如何？

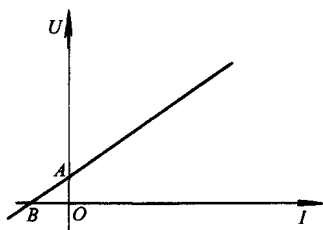


图 1-16

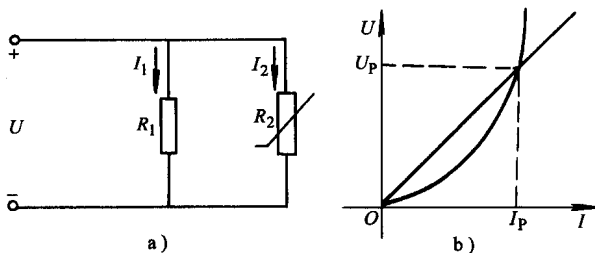


图 1-17

1-3-3 已知 R_1 和 R_2 的伏安特性如图 1-18 所示。试比较哪个电阻大一些？当电阻的阻值增大时，伏安特性的斜率是增大还是减小？

1-3-4 求图 1-19 中各电阻的端电压 U_{ab} 。

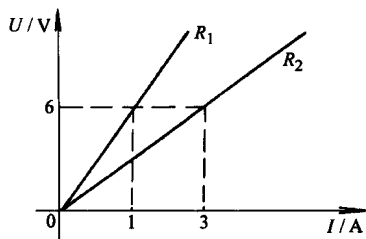


图 1-18

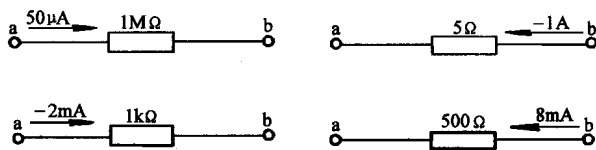


图 1-19

第四节 基尔霍夫定律

分析和计算电路所需的基本定律，除了欧姆定律以外，还有基尔霍夫定律。基尔霍夫定律涉及两个方面，一个是电流定律，另一个是电压定律；前者应用于节点；后者应用于回路。

在图 1-20 的电路中，方框代表任意元件。首先介绍几个术语。

(1) 支路：电路中的每一分支叫做支路，一条支路只流过一个电流，称为支路电流。图

1-20 的电路共有三条支路, 即 $abcd$ 、 ad 和 $afed$ 。

(2) 节点: 电路中三条或三条以上的支路相联接的点叫做节点。图 1-20 的电路共有两个节点, 即节点 a 与节点 d 。

(3) 回路与网孔: 电路中的任一闭合路径称为回路。当回路内不含任何支路时, 这样的回路就叫做网孔。在图 1-20 的电路中, $abcd$ 和 $afed$ 两个回路都是网孔, 而回路 $abcdefa$ 则不是网孔。

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law) 简称 KCL, 它是用来确定联接到同一节点上的各支路电流间关系的。由于电流的连续性, 电路中任何一点均不能堆积电荷, 因而任一瞬时流入某一节点的电流之和应该等于从该节点流出的电流之和。

在图 1-20 所示电路中, 对节点 a 可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3$$

上式左端为流入节点 a 的电流之和, 右端为流出节点 a 的电流。

若将上式改写成

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

即

$$\sum I = 0 \quad (1-7)$$

式 (1-7) 是基尔霍夫电流定律的数学表达式。它可以表述为: 在任一瞬时, 任一节点上电流的代数和恒等于零。如果规定参考方向流出节点的电流取 “+” 号, 则流入节点者就取 “-” 号。

例 1-5 图 1-21 画出了某电路中一个节点 M 。已知 $I_1 = 2A$, $I_2 = -3A$, $I_3 = -2A$, 求电流 I_4 。

解 规定流出节点的电流为正, 根据 KCL 得

$$-I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0 \quad (1)$$

代入各电流数值, 得

$$\begin{aligned} [-2 + (-3) - (-2)]A - I_4 &= 0 \\ I_4 &= -3A \end{aligned} \quad (2)$$

请注意本例各计算式中的正、负号: 式 (1) 中各电流前的正、负号, 是由电流按参考方向是流入还是流出节点 M 来确定; 式 (2) 小括号内的 “-” 号则表示电流本身是负值。计算结果 I_4 是负值, 这说明该支路电流的实际方向是从节点 M 流出的。

KCL 不仅适用于节点, 也可以推广到电路中任一假设的闭合面。例如, 图 1-22 所示的闭合面包围的是一个三角形电路, 其中有三个节点。应用 KCL 可以列出

$$\text{节点 A} \quad -I_A - I_{CA} + I_{AB} = 0$$

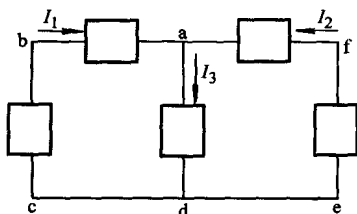


图 1-20

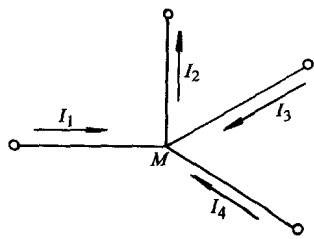


图 1-21

$$\text{节点 B} \quad -I_B - I_{AB} + I_{BC} = 0$$

$$\text{节点 C} \quad -I_C - I_{BC} + I_{CA} = 0$$

将以上三式相加, 得

$$-I_A - I_B - I_C = 0$$

可见, 在任一瞬时, 通过任一闭合面的电流的代数和也恒等于零。这个假想的闭合面也叫做广义节点。

例 1-6 图 1-23 中两部分电路 A 与 B 之间只用一条导线相联接, 试求流过该导线的电流。

解 作一个闭合面 S 包围电路 B, 则根据 KCL 可知 $I=0$ 。可见, 电流只能在闭合的电路内流动。

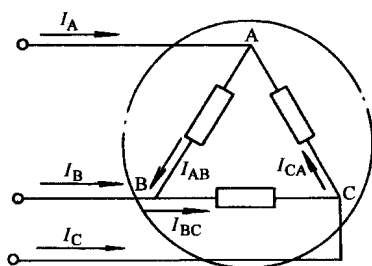


图 1-22

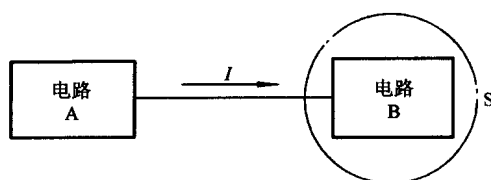


图 1-23

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law) 简称为 KVL, 它是用来确定回路中各个电压之间关系的。如果从回路中任意一点出发, 按顺时针方向或逆时针方向沿回路绕行一周, 则在这个方向上的电位升之和等于电位降之和。它反映了一个回路中各个电压间互相约束的关系。

在图 1-24 中, 选定各回路的绕行方向为顺时针方向, 根据电压的参考极性可以列出

$$\text{回路 1} \quad U_4 = U_1 + U_2$$

$$\text{回路 2} \quad U_2 + U_6 = U_3$$

$$\text{回路 3} \quad U_1 + U_3 = U_5$$

各式左边是电位降, 右边是电位升。以上三式可改写成

$$-U_1 - U_2 + U_4 = 0$$

$$U_2 - U_3 + U_6 = 0$$

$$U_1 + U_3 - U_5 = 0$$

即对每个回路均有

$$\sum U = 0 \quad (1-8)$$

式 (1-8) 就是基尔霍夫电压定律的数学表达式。它可以表述为: 在任一瞬时, 沿电路的任一回路绕行方向, 回路中各段电压的代数和恒等于零。求代数时, 若规定电压的参考方向与回路绕行方向一致时取正号, 反之则取负号。

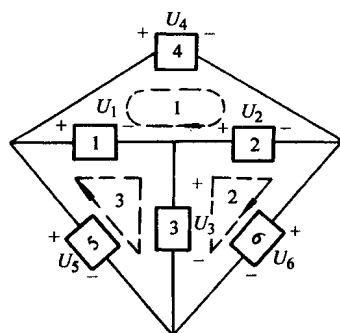


图 1-24

KVL 不仅适用于闭合回路,也可用于假想回路。例如,图 1-25 是某电路中的一部分。我们可以假想在 A 与 B 之间存在一条支路,从而构成一个假想回路 ABOA。按顺时针方向可以列出电压方程

$$U_{AB} + U_{BO} - U_{AO} = 0$$

所以

$$U_{AB} = U_{AO} - U_{BO}$$

例 1-7 某电路中的一个闭合回路 ABCDA 如图 1-26 所示,方框代表任意元件。已知 $U_{AB} = 5\text{V}$, $U_{BC} = -4\text{V}$, $U_{AD} = -3\text{V}$, 试求 U_{DC} 和 U_{AC} 。

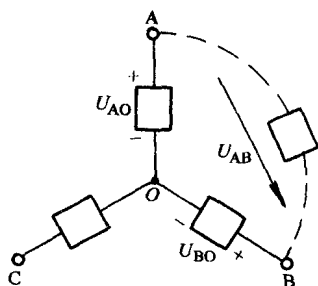


图 1-25

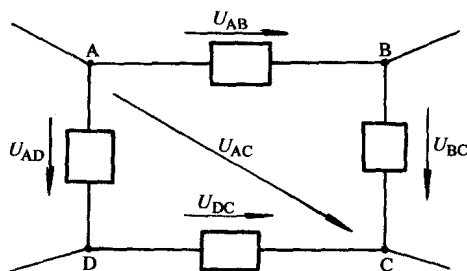


图 1-26

解 根据 KVL 可以列出

$$U_{AB} + U_{BC} - U_{DC} - U_{AD} = 0$$

$$[5 + (-4)]\text{V} - U_{DC} - (-3)\text{V} = 0$$

$$U_{DC} = 4\text{V}$$

$$U_{AC} - U_{DC} - U_{AD} = 0$$

$$U_{AC} = U_{AD} + U_{DC} = [(-3) + 4]\text{V} = 1\text{V}$$

综上所述,根据 KCL 列写的节点电流方程仅与该节点所联接的支路电流及其参考方向有关,而与支路中元件的性质无关;根据 KVL 列写的回路电压方程仅与绕行方向、回路中各个电压及其参考极性有关,也与回路中元件的性质无关。

本节虽然是以直流电路为例引出基尔霍夫定律,但它具有普遍性。也就是说,式 (1-7) 与式 (1-8) 不仅适用于由各种不同元件构成的直流电路,同样也适用于交流电路。

三、两类约束

上一节讨论了电阻元件,它是电路中常用元件之一,其电压与电流之间的制约关系由欧姆定律来描述。除电阻元件外,以后介绍其它元件时,也都要给出各元件电压与电流间的约束关系。

这一节讨论了基尔霍夫定律,它描述了电路各部分之间的电流、电压应遵从的约束,这是一种基于电路结构的约束,与电路元件的性质无关。

由此可见,电路中的电压、电流受到两类约束:一类是元件自身的特性,它与电路结构无关,是元件电压与电流之间应遵从的规律;另一类是来自电路联接结构的约束,用基尔霍夫定律来描述,它与元件的性质无关,是电路作为一个整体所必须遵从的规律。这两类约束