



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电路基础

程隆贵 主编
姚 伟 王俊伟 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电路基础

主 编	程隆贵	
副主编	姚 伟	王俊伟
编 写	朱卫萍	贺 芳
主 审	王玉彬	林春英 于洲春



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。全书共分十章,内容包括电路的基本概念与基本定律、电路元件和二端网络的等效、电路分析方法、正弦交流电路、耦合电感与双口网络、三相交流电路、非正弦周期性交流电路、线性动态电路的时域分析、线性动态电路的复频域分析、磁路与铁心线圈。

为了体现教学的简明和实用,书中各节都配有例题和思考题,各章均有小结、习题及实训内容。为了体现教学的趣味性,各章选编了较好的科普知识。本书最后配有习题参考答案。

本书可作为高职高专、成人大专等高校电气类专业教材用书,也可作为各种电类职工和广大农村电气工人的培训教材,同时也是科技人员、技术工人从事技术考核和技能鉴定的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/程隆贵主编. —北京:中国电力出版社,
2006

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-4551-7

I. 电... II. 程... III. 电路理论—高等学校:
技术学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 089496 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 423 千字

印数 0001—3000 册 定价 25.60 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力职业教育规划教材，作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本教材是参照教育部高教司最新组织制定的该课程教学基本要求，并结合我国高职高专教育的现状和发展趋势，按照“三教统筹、综合发展”和坚持以就业为导向、以能力为本位的思路编写。可作为目前高等职业技术学院，高等专科学校和成人高等学校电气、机电一体化和电子类各专业开设的“电工基础”、“电路与磁路”、“电路”、“电路理论”和“电路基础”等课程的教材，也可作为电气类技术工人岗位培训、农村劳动力转移培训和农村实用技术培训的教材，亦可供有关工程技术人员参考。

《电路基础》课程是高等职业技术学院、高等专科学校和成人高等学校电气、机电一体化和电子类各专业重要的技术基础课程。其作用和任务是：通过本课程的教学，使学生获得必备的电工技术基础理论、基本知识和基本技能，初步具备知识综合和应用的能力，为学习后续课程和从事专业技术工作打下一定的基础。因此本教材的编写具有如下特点：

(1) 教材结构采用模块化。本教材由电路的基本概念与基本定律、电路元件和二端网络的等效、直流电路、正弦交流电路、耦合电感与双口网络、三相交流电路、非正弦周期性交流电路、线性动态电路的时域分析、线性动态电路的复频域分析和磁路与铁心线圈等十个模块组成。各模块教学目标明确，具有较强的针对性和可组合性。

(2) 教材内容注重实用性。本教材强调基础理论教学要以“必需、够用”为度，根据技术领域和职业岗位群的需要确定教学内容，力求做到基本概念清楚，理论能应用于实际，并注意新技术的应用，不强调学科理论体系的完整性，但强调教材内容的可读性。

(3) 教材内容的兼顾性。由于高等职业技术学院和成人高等学校的部分生源是中等职业学校毕业生和有实践经验的人员，使高等专科学校、高等职业学校及成人高等学校生源的文化基础和实践能力存在一定的差异。还有电气类技术工人岗位培训、农村劳动力转移培训和农村实用技术培训对教材的内容需求不尽相同。因此，教材内容的编写应兼顾不同的读者对知识点的需要，坚决遵照“宽、浅、用、新、能、活”的“六字原则”。

(4) 教材内容深、广度的选择性。由于高职高专电气、机电一体化和电子类专业电工技术课程的教学基本要求有一定的差异,因此教材的编写力求同时满足这些专业的不同需要,各校可根据专业教学的需要进行选择。教材中标有“*”的内容,可供对电工技术课程有较高要求的专业选用。教材中没有标“*”的内容,亦可根据不同对象进行筛选,配套习题具有很强的适用性。

(5) 文字叙述简明扼要。为了强调以掌握概念、强化应用、训练技能和培养能力为教学重点,对定律、定理等一般只作必要的说明,尽量减少数理论证,适量增加例题、思考题与习题,以利加强理论的应用和能力的培养。各章后的科普常识将以精炼的语言介绍与所学内容相适应的实际知识和尽可能地介绍新材料、新工艺、新技术。

书中第一、八、十章由程隆贵编写,第二、六章由王俊伟编写,第三章由贺芳编写,第四、五章由姚伟编写,第七、九章由朱卫萍编写。全书由程隆贵主编统稿,姚伟、王俊伟任副主编。本书由王玉彬、林春英、于洲春担任主审。他们并提出了许多宝贵意见,在此深表感谢。

限于编者水平,书中错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006年6月

目 录

前言

第一章 电路的基本概念与基本定律	1
第一节 电路与电路模型	1
第二节 电路的基本物理量	3
第三节 基尔霍夫定律	7
科普知识一	10
本章小结	11
习题	12
实训一 基尔霍夫定律的验证	13
第二章 电路元件和二端网络的等效	15
第一节 电阻元件及其串并联	15
第二节 电感元件	21
第三节 电容元件及其串并联	24
第四节 电阻的Y形连接和 Δ 形连接及其等效变换	29
第五节 独立电源及其等效变换	33
第六节 受控源及含受控源的简单电路分析	39
第七节 电路的工作状态和电位分析	42
科普知识二	44
本章小结	46
习题	48
实训二 电位、电压的测定	50
第三章 线性电路的一般分析方法和定理	52
第一节 支路法	52
第二节 网孔法	54
第三节 结点法	57
第四节 叠加定理	61
第五节 等效电源定理	63
第六节 最大功率传输定理	66
第七节 图论的基本知识	67
第八节 割集分析法	68
科普知识三	71
本章小结	71
习题	72
实训三 叠加原理的验证	76

实训四 戴维南定理的验证	77
第四章 正弦交流电路	80
第一节 正弦量的基本概念	80
第二节 正弦量的相量表示法	84
第三节 正弦交流电路中的 R 、 L 、 C 元件	88
第四节 RLC 串并联电路	93
第五节 正弦交流电路中的功率	99
第六节 功率因数的提高	101
第七节 复功率及最大功率的传输	103
第八节 复杂正弦交流电路的计算	105
第九节 串联谐振电路	109
第十节 并联谐振电路	112
科普知识四	114
本章小结	116
习题	118
实训五 用三表法测量电感线圈参数	121
实训六 正弦稳态交流电路的功率因数提高	122
第五章 耦合电感与双口网络	125
第一节 耦合电感元件	125
第二节 具有互感的正弦交流电路	129
第三节 空心变压器	132
第四节 理想变压器	134
第五节 双口网络	136
科普知识五	138
本章小结	138
习题	139
实训七 互感电路观测	141
第六章 三相正弦交流电路	144
第一节 对称三相电源及其连接方式	144
第二节 三相负载的连接	147
第三节 对称三相电路的分析	150
第四节 简单不对称三相电路的分析	154
第五节 三相电路的功率	157
第六节 不对称三相的对称分量法	160
科普知识六	165
本章小结	166
习题	168
实训八 三相负载作星形连接交流电路电压、电流的测量	170
实训九 三相负载作三角形连接交流电路电压、电流的测量	172
第七章 非正弦周期性交流电路	174
第一节 非正弦周期量的产生和分解	174

第二节 非正弦周期量的有效值和平均值	179
第三节 非正弦周期电流电路的平均功率	181
第四节 非正弦周期电流电路的计算	183
第五节 对称三相电路中的高次谐波	186
科普知识七	189
本章小结	191
习题	192
实训十 三相电路功率的测量	193
第八章 线性动态电路的时域分析	196
第一节 电路的暂态过程	196
第二节 换路定则与电路的初始值	197
第三节 一阶电路的零输入响应	200
第四节 一阶电路的零状态响应	204
第五节 一阶电路的全响应及三要素法	208
第六节 二阶电路的零输入响应	215
科普知识八	221
本章小结	222
习题	223
实训十一 RC 一阶电路的响应测试	225
第九章 线性动态电路的复频域分析	228
第一节 拉普拉斯变换	228
第二节 拉普拉斯反变换	230
第三节 R 、 L 、 C 元件的运算电路	233
第四节 线性动态电路的复频域分析	235
科普知识九	238
本章小结	239
习题	239
实训十二 二阶动态电路响应的研究	240
第十章 磁路与铁心线圈	242
第一节 磁场	242
第二节 铁磁物质的磁化	244
第三节 磁路的基本定律及其应用	247
第四节 交流铁心线圈	252
第五节 电磁铁	256
科普知识十	258
本章小结	259
习题	260
实训十三 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	261
习题答案	263
参考文献	269

电路的基本概念与基本定律

电路理论是把电路模型作为研究的对象，以此来介绍分析与计算电路的方法。本章主要讨论电路模型的概念，电路中电流、电压的参考方向，二端元件吸收、发出功率的计算方法及其性质的判断以及集总参数电路的基本定律——基尔霍夫定律的概念及应用等。这些内容都是分析与计算电路的基础。

第一节 电路与电路模型

一、电路的作用和组成

电路是由若干个电气设备或器件按一定的方式连接起来而构成的电流通路。

当今社会，具有各种各样功能的电路已经遍及各个领域。电路的不断更新不仅促进了电力、电信工业的发展，也促使了各行各业及人文生化等各种事业的日新月异。

电路的类型是多种多样的，不同的电路其作用也是各不相同的。但就其基本功能而言，可分为两大类：一类是电能的产生、传输与转换电路；另一类是电信号的产生、传递和处理电路。

电力系统是产生、传输与转换电能的最典型的例子，图 1-1 展示了简单电力系统的基本结构概貌。

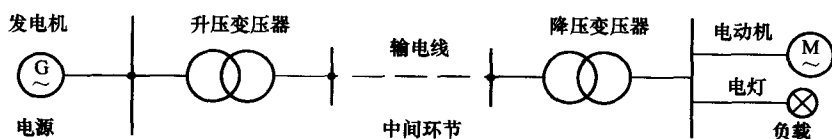


图 1-1 简单电力系统示意图

系统中的发电机是电源。电源是产生电能的装置，它把其他形式的能转换为电能。发电厂中的发电机都是将机械能转换为电能。各类电池是小型电源，它将化学能转换为电能。

电动机、电灯等是负载。负载是消耗电能的装置，它将电能转换为其他形式的能。电动机将电能转换为机械能，电灯将电能转换为光能。

变压器、输电线路等是中间环节。中间环节是用来传输、分配和控制电能的设备。

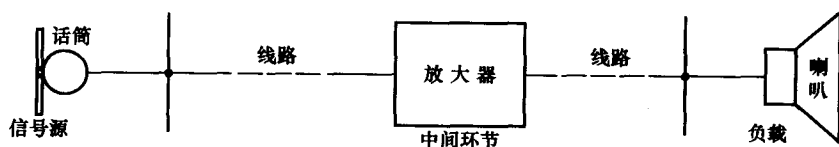


图 1-2 扩音机框图

图 1-2 是扩音机的框图，说明了电信号的产生、传递和处理的过程。话筒是信号源，它把语言和音乐（也可称为信息）转换为电信号。线路、放大器等是中间环节，对电信号进行传递、控制和处理。喇叭是负载，它将电信号转换成语言和音乐。常见的例子如电视机、

微机、手机等等。

无论是简单电路还是复杂电路（又称网络）都是由电源（信号源）、负载和中间环节等三部分组成。

二、电路模型

应该指出，本书所讲的电路都是指电路模型，而不是指实际电路。实际电路是由实际的电路器件和实际的连接导线组成的。而实际的器件，即使是那些最简单的元件，其物理过程也是十分复杂的，很难用一个简单的数学表达式来表达它的性能。例如，电阻元件的特性是服从欧姆定律的。但是一个实际的电阻元件，其性质并不完全是由欧姆定律决定的，它的端钮电压、电流关系还与其电感效应有关，甚至与其电容效应有关；此外，其端钮电压、电流关系还与温度有关等。因此很难用一个简单的数学表达式来表达。为了简化分析，我们必须抓住其主要性质，忽略其次要性质，使之能用一个尽可能简单的数学式来表达。在电路分析中，一个电阻元件，其性质常常就只用欧姆定律来表征。这样，经过简化的元件称为理想元件或元件模型。本书所涉及的理想元件有电阻元件、电压源元件、电流源元件、电容元件、电感元件和耦合电感元件等，每种元件都将有自己的数学形式的定义。实际的连接导线也是很复杂的，它不但有电阻，也有电感和电容效应，但在多数情况下可以看成是一个既无电感、电容，又无电阻的导线，即理想导线。由理想元件和理想导线组成的电路称为实际电路的电路模型，简称电路。电路分析中，各种理想元件采用统一的图形符号来表示。

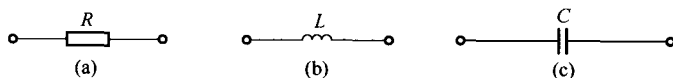


图 1-3 基本元件

图 1-3 (a)、(b)、(c) 分别为电路的三种基本元件，电阻、电感和电容的图形符号。每种元件都只能表征实际电路的一种特性，如电阻元件是一种只表示消耗电能（电能转变为其他形式能量）的元件、电感元件是反映电路元件周围存在磁场并储存磁场能量的元件、电容元件是反映电路及其附近存在着电场而且可以储存电场能量的元件。在一定条件下，用这些元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件，作为它的模型，这个过程叫建模。建模的准确性直接关系到理论与实际的差别。本书不讨论电路的具体建模过程，着重介绍已知电路模型的分析计算方法。

电路理论中引用的元件主要有电阻、电容、电感、理想电压源、理想电流源，这些元件都具有两个端钮，称为二端元件。这些元件又称为集总参数元件，由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路。

当实际电路中电流或电压的最高工作频率所对应的电磁波波长 λ 远大于电路最大几何尺寸 d 时，电路器件的端电流和端电压具有确定的单值，称这种电路为集总参数电路。如我国电力系统的频率为 50Hz，对应的波长为 6000km，工作在这一频率下的电路，相当大的范围内都可以当作集总参数电路。当 λ 不能满足远大于 d 时，应当按分布参数电路处理，如实际中两平行导线的电阻、电感和电容都是沿线分布的，本书不予讨论。

电能的传输和转换，或者信号的传递和处理，都要通过电流、电压和电功率来实现，因此，要对电路进行分析和计算，应先讨论电路的这几个基本物理量。

思考题

- 1-1-1 电路理论研究的对象是什么?
- 1-1-2 什么叫电路? 电路的作用是什么? 电路由哪几部分组成?
- 1-1-3 什么是实际电路的电路模型?
- 1-1-4 实际电路与电路模型有何不同?

第二节 电路的基本物理量

电路的基本物理量有电流、电压和电功率。

一、电流及其参考方向

电流是电荷的定向移动形成的。

它是电路分析中的一个重要物理量，其大小用电流强度表示，电流强度的定义是单位时间内通过导体横截面的电荷量。或者说，电流*i*的大小就是电荷量*q*对时间*t*的变化率，即

$$i = \frac{dq}{dt} \tag{1-1}$$

当电流*i*=常数（也就是任何时刻通过导体横截面的电荷量是恒定的），称为恒定电流，简称直流电流，常用*I*表示。式（1-1）可写为

$$I = \frac{q}{t} \tag{1-2}$$

大写字母*I*表示直流电流；小写字母*i*既可表示直流电流也可表示随时间*t*变化的交流电流，是表示电流的一般符号。

在国际单位制中，电流的单位为A（安培）。1A的电流就是每1s（秒）通过导体横截面的电荷量为1C（库仑）。此外，电流单位还常用kA（千安）、mA（毫安）和μA（微安）等表示。它们之间的关系是

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

表 1-1 SI 单位换算

因数	10 ⁹	10 ⁶	10 ³	10 ²	10 ¹	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻¹²
名称	吉	兆	千	百	十	分	厘	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	h	da	d	c	m	μ	n	p

电流在电路中流动是有方向的，习惯上规定正电荷移动的方向为电流的正方向，并称为电流的实际方向。

往往在计算稍为复杂的电路时，电流的方向就很难断定。因此，在分析计算电路时，常可任意选定（标明）电流的方向，称为参考方向，用箭头表示。如图 1-4（a）所示，二端元件中电流*i*的流向为a到b，是*i*的参考方向。而电流*i*的实际流向，即实际方向是否也为a到b，在图 1-4（a）中是看不出来的，应由*i*的参考方向和*i*的数值是正还是负来进行判断才能得到。

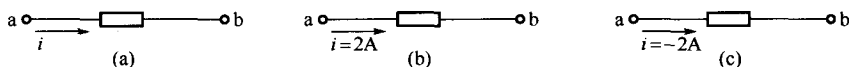


图 1-4 电流方向

当电流 i 的实际方向与参考方向相同, i 为正值; 当电流 i 的实际方向与参考方向相反, i 为负值。由此可知, 图 1-4 (b) 中电流 i 的实际方向 (真实流向) 为 a 到 b, 图 1-4 (c) 中电流 i 的实际方向为 b 到 a, 图 1-4 (a) 中电流 i 的实际方向无法得知, 因为缺少电流数值正负这个条件。

应当指出, 在电路分析计算中, 没有规定参考方向的电流数值的含义是不完整、不正确的。为了确切地表示电流, 必须标明其参考方向。在电路中能看到的电流方向是 i 的参考方向, 而 i 的实际方向应由 i 的参考方向和 i 的数值是正还是负来判断得知。

【例 1-1】 已知图 1-5 (a) 中电流 i 的方向为 a 到 b, 试标明它的参考方向, 并说明图 1-5 (b) 中电流 i 的实际方向。

解 (1) 图 1-5 (a) 中电流 i 的参考方向由 a 指向 b, 如图 1-6 所示。

(2) 图 1-5 (b) 中电流 i 的实际方向为由 b 流向 a。

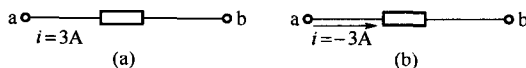


图 1-5 例 1-1 电路图

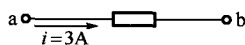


图 1-6 例 1-1 电路图

二、电压、电位、电动势及其参考极性

1. 电压及其参考极性

电压是电路分析中又一个重要物理量。

众所周知, 水从高处流向低处会做功。水电厂就是利用水坝高处的水经过水轮机时, 推动叶轮转动而做功发电的。反之, 人们若将坝下的水搬运至坝上, 就必须克服水的重力而做功, 这样, 所做的功便转变为水增加的势能。

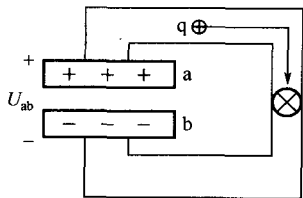


图 1-7 极板间的电压

电荷在电场中运动也要做功。图 1-7 所示为两块带电的极板 a 和 b, a 极板带正电, b 极板带负电, 因此在 a、b 两极板之间存在电场, 其方向由 a 指向 b。若用连接线和灯泡将 a、b 两极板连接起来, 则在电场力的作用下, 正电荷就会从 a 极板经连接线和灯泡移动到 b 极板 (实际上是自由电子由 b 极板移动到 a 极板), 如同水在重力作用下移动而做功一样, 正电荷在电场力的作用下移动时也要做功, 它所释放的能量就是灯泡发热发光的能源。为了

衡量电场力对电荷做功的能力, 引入电压这一物理量。

单位正电荷在电场力作用下由 a 点经任意路径移至 b 点时所释放的能量称之为 a、b 两点间的电压, 用 u_{ab} 表示, 即

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中 dw 、 dq 为定值时, 称为直流电压 U_{ab} 。

在国际单位制中, 电压的单位是 V (伏特), 1V 就是 1C 的电荷量释放了 1J 的能量。工程上电压的单位也常用 kV (千伏)、mV (毫伏) 和 μV (微伏)。

应用式 (1-3) 时, 正电荷的电荷量用正值, 负电荷的电荷量用负值; 电荷失去的能量用正值, 电荷获得的能量用负值。

【例 1-2】 有 3C 的负电荷由电路的 a 点移至 b 点时减少了 36J 的能量, 试求 a、b 两点间电压 U_{ab} 。

解 由式 (1-3) 得

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} = \frac{36}{-3} = -12(\text{V})$$

若正电荷由 a 点移至 b 点时释放 (失去) 能量, 则 a 点为高电位点, b 点为低电位点。反之, 若正电荷由 a 点移至 b 点时获得 (吸收) 能量, 则 a 点为低电位点, b 点为高电位点。习惯上规定: 由高电位点到低电位点的指向为电压的实际方向。因此, 电压也可称为电位降或电压降。

在电路的分析计算中, 也需要选取电压的参考方向。电压的参考方向可以用实线箭头表示, 如图 1-8 (a) 所示, 也可以用正 (+)、负 (-) 极性表示, 如图 1-8 (b) 所示。电压的参考极性 (方向) 可任意选取 (标明), 同电流一样, 电压的实际极性 (方向) 应由电压的参考极性 (方向) 和电压数值的正负断定。当电压的实际

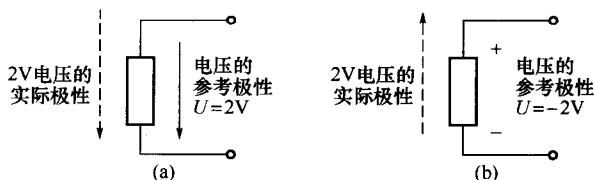


图 1-8 电压的极性

极性 (方向) 与参考极性 (方向) 一致时, 电压为正值, 如图 1-8 (a) 所示; 反之, 电压为负值, 如图 1-8 (b) 所示。

电压的参考方向还可以用双下角标来表示, U_{ab} 表示电压的参考方向由 a 点指向 b 点, U_{ba} 表示电压的参考方向由 b 点指向 a 点。若 $U_{ab}=2\text{V}$, 则 $U_{ba}=-2\text{V}$ 。可见

$$U_{ab} = -U_{ba} \quad (1-4)$$

电路中电流的参考方向可以任意选取, 电压的参考方向也可任意选取。当在一个元件上将电流和电压的参考方向取得一致, 称为关联参考方向; 取得相反, 称为非关联参考方向。对于负载上的电流和电压的参考方向, 常取关联参考方向。

2. 电位

在电路中, 两点之间的电压也称为两点之间的电位差, 即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-5)$$

式中: V_a 为 a 点的电位; V_b 为 b 点的电位。

电路中某点的电位就是该点对参考点 (零电位点) 的电压。若取电路中的 O 点为参考点, 则 a 点的电位 $V_a = U_{ao}$ 。b 点的电位 $V_b = U_{bo}$ 。

参考点的电位为零。某点的电位为正值, 表示该点电位高于参考点电位。某点电位为负值, 表示该点电位低于参考点。参考点在电路中以接地符号 “ $\perp$ ” 标明。

【例 1-3】 图 1-9 所示二端元件中, 若 $U=-8\text{V}$, 试问 a、b 两点哪点电位高?

解 由图中所示电压的参考极性,

$$U = U_{ab} = V_a - V_b = -8\text{V} \quad \text{说明 } V_a < V_b, \text{ 即 b 点电位高。}$$

【例 1-4】 在图 1-10 所示的部分电路中, 试求 a、b 两点的电位和电压 U_{ab} 。

$$\text{解 } V_a = U_{ao} = 3(\text{V}) \quad V_b = U_{bo} = -1(\text{V}) \quad U_{ab} = V_a - V_b = 3 - (-1) = 4(\text{V})。$$

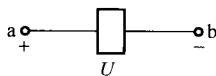


图 1-9 例 1-3 电路

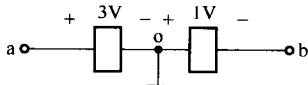
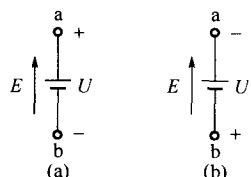


图 1-10 例 1-4 电路

3. 电动势

如上所述, 电场力总是将正电荷从高电位端 (正极) 推向低电位端 (负极), 形成电流。一个电路要维持电流的连续性, 其中应有能把其他形式的能量转换为电能的电源。电压是电场力做功, 将电能转换成其他形式的能。电源是电源力做功, 电源力把正电荷从电源的低电位端经电源的内部移到高电位端, 将其他形式的能转换成电能。这样一来就维持了一个电路中电流的连续性。用电动势来衡量电源力对电荷做功的能力, 用 e 或 E 表示。 e 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到高电位端所做的功。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。显然, 在国际单位制中电动势的单位也是 V (伏特)。

同样可以任意指定电动势的参考方向 (或参考极性), 由其数值的正、负来确定实际方向。电动势 e 与其端电压 u 的关系为: 参考极性 (或方向) 相反时, $u = e$; 参考极性 (方向) 相同时, $u = -e$ 。



【例 1-5】 如图 1-11 所示的理想干电池, 现用电压表测得 ab 端电压为 1.5V, 试求图 1-11 (a)、(b) 所示的电压和电动势的数值。

解 理想干电池的图形符号, 给出了端电压的实际极性, 长线为正, 短线为负。

$$(a) \quad U = 1.5\text{V}, E = U = 1.5\text{V};$$

$$(b) \quad U = -1.5\text{V}, E = -U = 1.5\text{V}。$$

图 1-11 例 1-5 电路

三、电功率和电能

电功率简称功率, 是电路分析计算中一个基本物理量。一个二端元件的功率情况, 有吸收功率和发出功率之分。它所吸收或发出的功率定义为单位时间内二端元件吸收或发出的电能量。用 p 或 P 表示。大写字母 P 表示不随时间变化的功率, 如直流电路的功率, 小写字母 p 即可表示不随时间变化又可表示随时间变化的功率, 即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明电功率是传送或转换电能的速率, 在国际单位制中 dw 的单位是 J, dt 的单位是 s, p 的单位是 W (瓦特)。常用功率的单位有 kW (千瓦)、MW (兆瓦) 和 mW (毫瓦)。

功率 p 的计算, 常不用式 (1-6) 计算, 而是通过其端钮的电压和电流来求出。将式 (1-6) 分式上下同乘以 dq , 得计算公式为

$$p = \frac{dw dq}{dt dq} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui$$

当设如图 1-12 (a) 所示 u 与 i 为关联参考方向时, 则

$$p = ui \quad (1-7)$$

当设如图 1-12 (b) 所示 u 与 i 为非关联参考方向时, 则

$$p = -ui \quad (1-8)$$

一个二端元件是吸收功率还是发出功率, 就看由式 (1-7) 和式 (1-8) 计算得 p 的值是正还是负。若 $p > 0$, 则二端元件吸收功率, 属负载; 若 $p < 0$, 则二端元件发出功率, 属电源。对于一个完整的电路

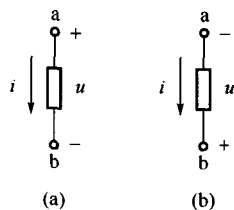


图 1-12 功率计算

而言,发出功率的和与吸收功率的和总是相等的,叫作电路的功率平衡。

【例 1-6】 求图 1-13 所示各二端元件的功率,并说明其性质。

解 (a) $p = ui = 3 \times 1 = 3\text{W}$ (吸收功率,属负载)

(b) $p = -ui = -3 \times 2 = -6\text{W}$ (发出功率,属电源)

(c) $p = -ui = -(-3) \times 2 = 6\text{W}$ (吸收功率,属负载)

(d) $p = ui = 3 \times (-2) = -6\text{W}$ (发出功率,属电源)

(e) $p = -ui = -3 \times (-2) = 6\text{W}$ (吸收功率,属负载)

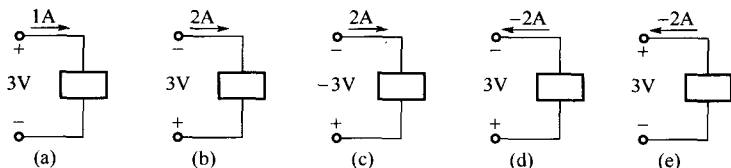


图 1-13 例 1-6 电路

电能也是电路分析中一个重要的物理量,其大小应为电功率对时间的累加,即

$$w = \int p(\tau) d\tau \quad (1-9)$$

若一个电路元件吸收的功率 P 为常数,则该元件在时间 t 内吸收的电能为

$$W = Pt \quad (1-10)$$

由 $P = UI$ 得

$$W = UIt \quad (1-11)$$

电能的单位是 J, $1\text{J} = 1\text{W} \times 1\text{s}$, 也就是功率为 1W 的用电器在 1s 内消耗(吸收) 1J 电能。在电力电路中,常用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦·时)作为电能的单位,表示 kW 的用电设备使用 1h 所消耗的电能。

思 考 题

1-2-1 电压、电位、电位差、电动势有何区别与关系。

1-2-2 参考方向是否可以不标明? 标明参考方向后能否在计算时又更改?

1-2-3 当元件电流、电压选择关联参考方向时,什么情况下元件吸收功率? 什么情况下元件发出功率? 什么情况下元件属于电源? 什么情况下元件属于负载?

1-2-4 有两个电源,一个电源发出的电能为 $200\text{kW} \cdot \text{h}$, 另一个电源发出的电能为 $800\text{kW} \cdot \text{h}$ 。是否可以认为前一个电源的功率小,后一个电源的功率大?

第三节 基尔霍夫定律

一、有关电路的几个名词

在电路分析中,为了说理简明,常用一些电路的专用名词或称术语。现以图 1-13 为例,介绍几个与电路的连接状况有关的名词。

(1) 支路: 每个二端元件称为一条支路。图 1-13 (a) 中有 5 个元件,所以有 5 条支路。

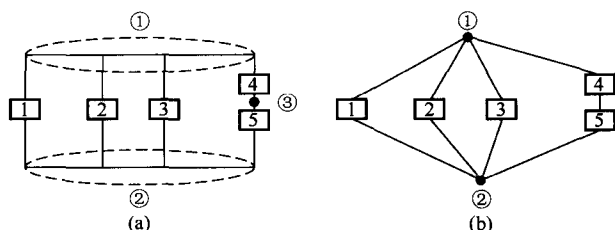


图 1-14 电路名词

点。在这样定义下，图 1-14 所示电路有 4 条支路，即由元件 1、2、3 及 4、5 形成的支路和两个节点，即节点①和②。由于电路中的连接线都是理想的。所以图 1-14 (a) 的上面部分和下面部分应分别为一个节点。图 1-14 (b) 和图 1-14 (a) 是同一电路的两种不同的画法。

(3) 回路：电路中由支路组成的闭合路径称为回路。图 1-14 中有 6 个回路。

(4) 网孔：网孔是平面网络中一种特殊的回路，是一种其内部不含有支路的回路。应该指出，只有平面网络中才有网孔这一概念。图 1-14 中有 3 个网孔。所谓平面网络是指可以画在一个平面而不出现有支路相交叉情况的电路。

基尔霍夫定律是电路的基本定律，是德国科学家基尔霍夫在 1845 年提出的。它指出了电路的两个基本规律。分别称为基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

二、基尔霍夫电流定律 (简称 KCL)

基尔霍夫第一定律即基尔霍夫电流定律 (KCL)，它反映电路中任一节点的各支路电流的关系。其内容为：在任何时刻，流入同一节点的各支路电流的代数和等于零。其数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-12)$$

应该注意各电流前的符号，如果流入节点的电流取“+”号，则流出节点的电流取“-”号，反之亦然。

图 1-15 所示为电路的一个节点，支路电流 i_1 和 i_2 流入节点， i_3 和 i_4 从节点流出。由 KCL 可知，在任何时刻，流入节点电流的总和等于从节点流出的电流的总和，用数学式表示为

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4 \quad (1-13)$$

若把所有电流项移至等号左边，则有

$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$$

按照基尔霍夫电流定律列写的节点电流关系式，称为 KCL 方程。

在电路分析中，应以选定的电流参考方向来列写 KCL 方程，方程中各电流前的“+”、“-”符号也由参考方向是流入还是流出节点来确定。

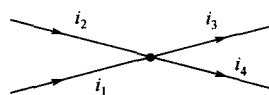


图 1-15 节点电流

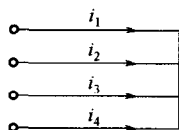


图 1-16 例 1-7 图

【例 1-7】在图 1-15 中，已知 $i_1 = 3\text{A}$ ， $i_2 = -2\text{A}$ ， $i_3 = 1\text{A}$ ，试求 i_4 。

解 对节点列出 KCL 方程为

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$$

$$i_4 = -i_1 - i_2 - i_3 = -3 - (-2) - 1 = -2\text{A}$$

i_4 为负值，表明其实际方向与参考方向相反。

KCL 适用于电路的节点, 也可推广应用于电路中的任一假设闭面。如对图 1-16 所示的闭合面 S (也称为广义节点) 可列写 KCL 方程为

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

KCL 体现了电路的一个重要的规则: 电流具有连续性。

三、基尔霍夫电压定律 (简称 KVL)

基尔霍夫第二定律又称为基尔霍夫电压定律 (KVL), 它反映电路的任一回路中各支路电压之间互相关系的规律。它的内容是: 对于任一电路中的任一回路, 在任一时刻, 沿着该回路的所有支路的电压降之和恒等于零, 数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-14)$$

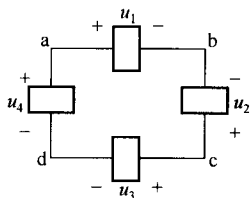


图 1-18 回路电压

图 1-18 所示为电路中的一个回路, 如果从 a 点出发, 沿 $a-b-c-d-a$ 绕行时, 电位有时降低, 有时升高, 但绕行一周, 回到出发点 a , 电位的数值不会改变, 也就是说, 沿回路绕行一周, 电压降的总和等于电压升的总和, 即

$$u_1 + u_3 = u_2 + u_4 \quad (1-15)$$

若把所有的电压项都移至等号左边, 则有

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 = 0$$

列写式 (1-14) 时, 先要选取回路的绕行方向, 各段电压降的方向与绕行方向一致的, 该电压前取 “+” 号; 相反的取 “-” 号。按照基尔霍夫电压定律列写的电压关系式, 称为 KVL 方程。应该指出, 要以参考方向来列写 KVL 方程。方程中各电压前的 “+”、“-” 符号也由参考方向与绕行的方向是否一致来判断。

【例 1-8】 在图 1-18 所示电路中, 已知 $u_1 = 1\text{V}$, $u_2 = -5\text{V}$, $u_3 = 6\text{V}$, 试求 u_4 。

解 将已知数据代入 KVL 方程得

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 = 1 - (-5) + 6 - u_4 = 0$$

所以 $u_4 = 12\text{V}$

【例 1-9】 在图 1-19 所示的电路中, 已知 $u_1 = 8\text{V}$, $u_3 = 6\text{V}$, $u_5 = -4\text{V}$, 试求 u_2 和 u_4 。

解 对回路 $abda$ 列写 KVL 方程为

$$u_2 + u_3 - u_1 = 0$$

所以 $u_2 = 2\text{V}$

再对回路 $abcda$ 列写 KVL 方程, 为

$$u_2 + u_4 + u_5 - u_1 = 0$$

所以 $u_4 = 10\text{V}$

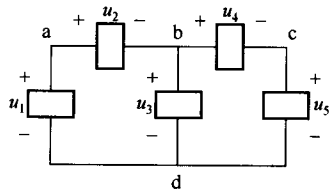


图 1-19 例 1-9 图

也可以对回路 $bcdb$ 列写 KVL 方程来求出 u_4 。

KVL 体现了电路的另一个重要规则: 电路中任意两点间电压与所取路径无关。

【例 1-10】 图 1-20 所示为电路中的一条含源支路, 试求 u 。

解 将含源支路分成 ab 和 bc 两段, 电压 u 应为两段电压的代数和, 即

$$u = u_{ab} + u_{bc} = E - Ri$$

若将例 1-10 中所求得的结果写成

$$i = \frac{E - u}{R} \quad (1-16)$$

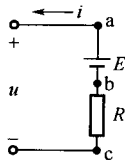


图 1-20

例 1-10 图 则称式 (1-16) 为含源支路欧姆定律。