



普通高等教育“十二五”规划教材

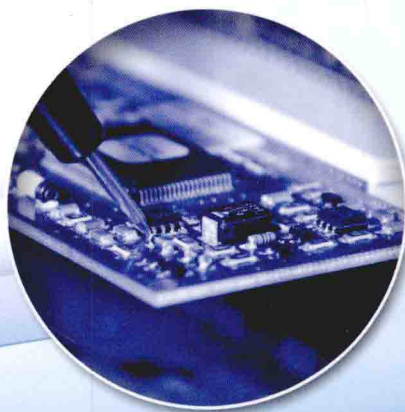
电工技术

(非电类)

Electrotechnology

第3版

张晓辉 © 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教

电 工 技 术

(非 电 类)

第 3 版

主 编 张晓辉
副主编 王 珺 钟嘉庆
参 编 王云静 董 杰 杨秋霞
主 审 荣雅君



机 械 工 业 出 版 社

本教材作者对高等院校电工电子系列课程内容和课程体系进行了研究和实践,针对普通高等院校非电类专业特点,编写了本教材。

本书主要包括:电路的基本概念与基本定律、电路的分析方法、电路的暂态分析、正弦交流电路、三相供电与用电、电动机械、电气控制与可编程序控制器、电路的计算机辅助分析,主要适用于本科机械设计、机械制造、机械电子工程、汽车与交通等机械工程学科的各个专业方向,也适用于材料、化工等其他非电类专业,同时也是上述学科及其他相关学科工程技术人员很好的实用参考书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册、下载。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术:非电类/张晓辉主编. —3版. —北京:机械工业出版社, 2015.1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-48381-6

I. ①电… II. ①张… III. ①电工技术—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第248310号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 徐 凡

版式设计:赵颖喆 责任校对:刘怡丹

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

北京华正印刷有限公司印刷

2015年1月第3版第1次印刷

184mm×260mm·13.75印张·334千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48381-6

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

在现代化机械设计与制造中，机器的品质与性能几乎无一例外地与电工学相关。机械学与电工学贯通交叉的程度往往代表着机械工程师的设计水平。与以往不同，当今的机械工程师对电工学掌握的程度，已经不再是仅仅停留在能够使用某些专用电气设备，或泛泛地了解一些电工学的一般常识的水平上了。一个优秀的机械工程师必须具备这样的条件：不仅能够向电气工程师提出具体的可实现的电气设计技术指标，而且也能够自行设计出基本满足工程需要的电气图。为了获得这样的综合素质，就需要有一本能够完成这种任务的电工学教科书，本书的编写意图就是以此为宗旨的。

本书自2009年编写第2版以来，已经历了5个年头。5年期间，科学技术不断发展，教育教学改革不断深入，教学手段日益更新，为了适应新的教改形式，在参考了新的“电工学教学基本要求”并征求了多方意见的基础上，对第2版进行了修订。本着重基础、重应用、降低深度的原则，尽量避免深奥的理论论述，力求使用浅显易懂的科普语言形象地解说重要的基本电路原理，使学习者在定性地了解电工原理的基础上，能够深入地加以定量的研究。本书共分8章，主要内容包括电路的基本概念与分析方法、电路的暂态分析、交流电路与三相电路的分析、电动机械、可编程序控制器及电路的计算机辅助分析。每章后均附有相应的习题，并附有部分习题参考答案，以使读者加深对教材内容的理解。目录中加*的内容可根据实际进行删减。

本书由燕山大学张晓辉主编，王珺、钟嘉庆副主编。参加本书编写的有：钟嘉庆（第1、4章），王云静（第2章），王珺（第3、6章），董杰（第5章），杨秋霞（第7章），张晓辉（第8章）。本书由燕山大学荣雅君教授主审并提出了修改意见。在本书的编写过程中，得到了燕山大学电力工程系全体同事的帮助，也得到兄弟院校同行的大力支持，在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 电路的基本概念与基本定律 1

1.1 电路与电路模型 1

1.1.1 电路 1

1.1.2 电路模型 2

1.1.3 电路的基本物理量 2

1.2 电路元件 3

1.2.1 无源元件 3

1.2.2 有源元件 5

1.2.3 受控电源 6

1.3 电压与电流的参考方向 7

1.3.1 电位 7

1.3.2 电压和电流的参考方向 8

1.4 欧姆定律 9

1.5 基尔霍夫定律 10

1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL) 10

1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL) 11

1.6 电源的工作状态及电源的等效

变换 13

1.6.1 电源工作状态 13

1.6.2 电压源与电流源的等效变换 14

1.7 电功率和能量 16

1.7.1 电功率 16

1.7.2 能量 18

1.7.3 额定值与实际值 18

习题 20

第2章 电路的分析方法 25

2.1 支路电流法 25

*2.2 网孔电流法 27

2.3 节点电压法 29

2.4 叠加原理 32

2.5 戴维南定理与诺顿定理 34

2.5.1 戴维南定理 35

2.5.2 诺顿定理 37

习题 39

第3章 电路的暂态分析 44

3.1 动态电路的方程及初始条件 44

3.2 RC 电路的暂态过程 46

3.2.1 RC 电路的零输入响应 46

3.2.2 RC 电路的零状态响应 49

3.2.3 RC 电路的全响应 51

3.3 一阶线性电路暂态分析的三要素法 53

3.4 微分电路与积分电路 55

3.4.1 微分电路 55

3.4.2 积分电路 56

3.5 RL 串联电路的暂态过程 57

习题 59

第4章 正弦交流电路 64

4.1 正弦量的三要素 65

4.1.1 频率与周期 65

4.1.2 幅值与有效值 65

4.1.3 初相位与相位差 66

4.2 正弦量的相量表示法 68

4.3 单一参数元件的交流电路 71

4.3.1 电阻元件的正弦交流电路 72

4.3.2 电感元件的正弦交流电路 73

4.3.3 电容元件的正弦交流电路 74

4.4 RLC 串联的交流电路 77

4.4.1 电压与电流关系 77

4.4.2 电压与电流的相量关系 78

4.4.3 功率计算及测量 79

4.5 正弦交流电路的计算 81

4.5.1 阻抗的串联与并联 82

4.5.2 正弦交流电路的计算 84

4.6 电路的谐振 85

4.6.1 串联谐振 85

4.6.2 频率特性 88

4.6.3 并联谐振	91	制动	150
4.7 功率因数的提高	93	6.4.1 三相异步电动机的起动	150
习题	95	6.4.2 三相异步电动机的调速	152
第5章 三相供电与用电	98	6.4.3 三相异步电动机的制动	154
5.1 三相电动势	98	6.5 单相异步电动机	155
5.2 三相电源的连接	99	6.5.1 电容分相式异步电动机	155
5.3 三相电路负载的连接	101	6.5.2 罩极式异步电动机	156
5.3.1 对称负载的星形联结电路	101	*6.6 控制电机	157
5.3.2 负载三角形联结的三相电路	104	6.6.1 交流伺服电动机	157
5.3.3 不对称三相电路计算	105	6.6.2 测速发电机	159
5.4 三相电路的功率及三相电量的 测量	108	6.6.3 步进电动机	160
5.4.1 三相功率	108	习题	162
5.4.2 三相功率的测量	110	第7章 电气控制与可编程序控制器	164
5.4.3 电能的测量	112	7.1 概述	164
5.5 发电、输电与安全用电	112	7.2 常用低压电器	165
5.5.1 发电、输电概述	112	7.2.1 电气元器件的分类	165
5.5.2 安全用电	114	7.2.2 常用低压电器	165
5.5.3 节约用电	117	7.2.3 电气图常用的图形符号及文字 符号	168
习题	118	7.3 异步电动机继电器接触器控制 电路	169
第6章 电动机械	122	7.3.1 起动、停止控制电路	169
6.1 磁路及其基本定律	122	7.3.2 正、反转控制电路	171
6.1.1 磁路基本概念	122	7.3.3 电动机制动控制电路	173
6.1.2 磁路基本定律及磁路计算	124	7.4 PLC 的结构和工作原理	175
6.1.3 交流铁心线圈	126	7.4.1 PLC 的主要功能、结构及各部分 作用	175
6.1.4 电磁铁	128	7.4.2 PLC 的工作原理	176
6.2 变压器	130	7.4.3 PLC 的主要技术指标	177
6.2.1 变压器的构造	130	7.4.4 PLC 的主要特点	178
6.2.2 变压器的工作原理	131	7.5 PLC 的程序设计基础	178
6.2.3 变压器的损耗与效率	134	7.5.1 PLC 的编程语言	178
6.2.4 三相变压器	135	7.5.2 PLC 的程序设计原则和方法	179
6.2.5 变压器绕组的极性	136	7.5.3 三菱 FX _{2N} 型 PLC 的编程元件	182
6.2.6 特殊变压器	137	7.5.4 三菱 FX _{2N} 型 PLC 的指令系统	185
6.3 三相异步电动机	139	7.6 PLC 应用举例	190
6.3.1 三相异步电动机的构造	139	7.6.1 三相异步电动机星形-三角形换接 起动、正反转、点动控制	191
6.3.2 三相异步电动机的工作原理	140	7.6.2 保持电路	193
6.3.3 转矩和机械特性	143		
6.3.4 三相异步电动机的铭牌数据	147		
6.4 三相异步电动机的起动、调速与			

7.6.3 延时断开电路	193	8.3.3 使用 PSPICE 仿真的一般步骤 ...	203
7.6.4 振荡电路	193	8.4 PSPICE 中的有关规定	204
习题	194	8.4.1 数字	204
第 8 章 电路的计算机辅助分析	196	8.4.2 比例因子	204
8.1 电路方程的建立和求解方法	196	8.4.3 单位	204
8.2 PSPICE 简介	198	8.4.4 分隔符	204
8.2.1 PSPICE 功能简介	199	8.4.5 表达式编写规则	204
8.2.2 PSPICE 中的电路描述	199	8.5 PSPICE 应用举例	205
8.3 PSPICE6.3 集成环境	201	部分习题参考答案	208
8.3.1 PSPICE 的主程序项 Schematics ...	202	参考文献	214
8.3.2 波形后处理程序 Probe	203		

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

本章提要 电路是电工技术和电子技术的基础。本章以直流电路为分析对象，主要介绍电路和电路模型的概念、电路元件、电压和电流的参考方向、电位的概念与计算、电源的工作状态等，重点讨论欧姆定律、基尔霍夫定律等电路计算的基本定理，这些内容都是分析与计算电路的基础，所得结论不仅适用于直流电路，也同样适用于交流电路。

1.1 电路与电路模型

1.1.1 电路

电路是电流的通路，它是由若干个电气设备或元器件按一定的方式组合起来的。电路也称为电网络，简称网络。

电路的结构形式是多种多样的，根据它的功用主要分为两类：一类是用以实现电能的生产、传输、转换和分配，其中最典型的例子是电力供电设备与各用电设备组成的电力系统，如图 1-1a 所示。发电机是电源，是供应电能的设备，在发电厂内可把热能、水的势能或核能转换为电能。电灯、电动机、电炉等都是负载，是取用电能的设备，它们分别把电能转换为光能、机械能、热能等。变压器和输电线是中间环节，是连接电源和负载的部分，它起传输和分配电能的作用。

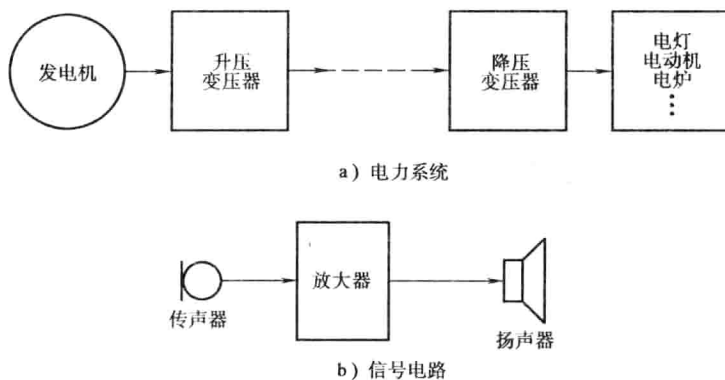


图 1-1 电路示意图

另一类用于电信号的产生、传递和处理，常见的例子如扩音机，其信号电路如图 1-1b 所示。先由传声器将语言或音乐信息转换为相应的电压和电流等电信号，而后通过电路传递到扬声器，将电信号还原为语言或音乐。由于传声器输出的电信号比较微弱，不足以驱动扬声器发音，因此中间还要用放大器来放大。信号的这种转换和放大称为信号的处理。

通常，将由非电能或非电信号转换为电能或电信号的供电设备和器件称为电源（或信号源）。将用电设备和器件称为负载。一个完整的电路总是由电源、负载以及连接导线、开关等电气设备或器件组成。

不论电能的传输和转换，或者信号的传递和处理，在实际电路中，电压和电流是在电源的作用下产生的，因此，电源又称为激励。由激励在电路中产生的电压和电流称为响应。有时，根据激励和响应之间的因果关系，将激励称为输入，响应称为输出。所谓电路分析，就

是在已知电路的结构和元件参数的条件下，讨论电路的激励与响应之间的关系。

1.1.2 电路模型

电气设备和器件种类繁多，实际电路都是由一些按需要起不同作用的实际电气设备或器件，如发电机、变压器、电动机、晶体管以及各种电阻器和电容器等所组成。即便是很简单的电气设备，在工作时所发生的物理现象也是很复杂的。例如，一个实际的绕线式电阻器，电流通过时，除了对电流呈现阻力外，还会产生微弱的磁场，因而兼有电感的性质，但电感微小，可忽略不计。直接使用实际器件组成的接线图来进行电路分析和研究往往是困难的，甚至是不可能的。

各种电气设备和器件在工作时所产生的物理现象虽然很复杂，但这些复杂的物理现象是由一些基本的物理现象综合而成的。于是在电路理论中提出了用各种电路模型对实际电路进行分析和数学描述，以进行电路分析的方法。

将实际电路抽象为电路模型，就是将实际元件理想化（或称模型化），即在一定条件下突出其主要的电磁性质，忽略其次要因素，将他近似地看做理想电路元件。由一些理想电路元件所组成的电路模型是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。理想电路元件（简称为电路元件）是组成电路模型的最小单元，其中主要有电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件等，它们分别由相应的参数来表征。

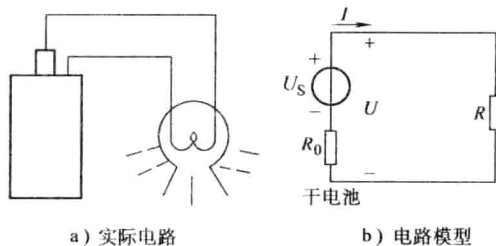


图 1-2 实际电路与电路模型

实际电气装置或器件在一定的条件下都可以用各种电路模型的综合近似描述。图 1-2a

所示为含有一个电源即干电池、一个负载即电灯和两根连接导线的简单电路，其电路模型如图 1-2b 所示。

该图中的电阻元件 R 作为电灯电路模型，干电池用电压源 U_s 和电阻元件 R_0 的串联组合作为模型，连接导线用理想导线（其电阻忽略不计）表示。

今后的电路分析都是指电路模型，简称电路。在电路图中，各种电路元件用规定的图形符号表示。电路的分类方式有很多种，按电源来分，电源本身的电流通路为内电路，电源以外的电流通路为外电路；按电流方向变化来分，当电流的方向不随时间变化时，为直流电路，当电流的方向随时间变化时，称为交流电路。

1.1.3 电路的基本物理量

1. 电流

电流为单位时间内通过导体横截面的电荷量。国家标准规定，不随时间变化的物理量用大写字母表示，随时间变化的物理量用小写字母表示。因此，在直流电路中电流用 I 表示，它与电荷量 Q 、时间 t 的关系为

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

随时间变化的电流用小写的 i 表示，它等于电荷量 q 对时间 t 的变化率，即

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

在国际单位制中, 电流的单位是 A (安), $1\text{A} = 1\text{C/s}$ (库/秒)。根据实际的需要, 电流的大小可以用 A (安)、mA (毫安) 和 μA (微安) 度量, 它们之间的关系为 $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$, $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ 。

2. 电压

电压是描述电场力对电荷做功大小的物理量, 即为单位电荷 q 在正向移动中所释放的电能 W 。直流电压用大写的 U 表示

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-3)$$

随时间变化的电压用小写的 u 表示, 即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-4)$$

在国际单位制中, 电压的单位是 V (伏), $1\text{V} = 1\text{J/C}$ (焦耳/库仑)。根据实际的需要, 电压的大小还可以用 kV (千伏)、mV (毫伏) 和 μV (微伏) 等度量, 它们之间的关系为 $1\text{kV} = 10^3\text{V}$, $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$, $1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$ 。

3. 电动势

电动势是描述外力对电荷做功大小的物理量, 电源中的外力对单位电荷量所作的功称为电动势。直流电动势用大写的 E 表示, 交流电动势用小写的 e 表示。电动势的单位与电压单位相同。

思 考 题

电路一般由哪几部分组成? 它们分别在电路中起什么作用?

1.2 电路元件

理想电路元件 (以下简称电路元件) 具有单一的物理特性和严格的数学定义。电路元件分为无源元件和有源元件两类。

1.2.1 无源元件

电路分析中常见的无源元件包括电阻元件、电感元件和电容元件, 其中电阻元件表征实际器件消耗电能的物理特性, 称为耗能元件; 电感元件、电容元件表征实际器件储存磁场能量、电场能量的物理特性, 称为储能元件。

1. 电阻元件

电气设备中, 常用电阻元件 (简称电阻) 来表征将电能转换成热能、光能等其他形式能量的特性, 例如电炉、电灯等都可以用电阻来代替, 其图形符号如图 1-3a 所示。电阻元件分为线性电阻元件和非线性电阻元件。本书仅介绍线性电阻元件, 其伏安特性如图 1-3b 所示, 是通过坐标原点的一条斜线, 斜线与电流轴正方向夹角的正切就是电阻 R , 即电阻值等于该电阻两端的电压值与流过该电阻的电流值的比值。

$$R = \frac{U_R}{I_R} \quad (1-5)$$

在国际单位制中, 电阻的单位是 Ω (欧姆)。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 1Ω 。根据实际的需要, 电阻的单位可以分别用 $k\Omega$ (千欧) 或 $M\Omega$ (兆欧) 来度量, 它们之间的关系是 $1k\Omega = 10^3\Omega$, $1M\Omega = 10^6\Omega$ 。电阻的倒数称为电导, 用符号 G 表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-6)$$

电导的单位是 S (西门子)。

2. 电感元件

当电路中有线圈存在时, 电流通过线圈就会产生比较集中的磁场, 电感是用来表征产生磁场、储存磁场能特性的电路元件。当通过电流为 i_L 时, 将产生磁通 Φ , 它通过每匝线圈。如果线圈有 N 匝, 则电感 (或自感) 的定义为

$$L = \frac{N\Phi}{i_L} \quad (1-7)$$

电感的单位是 H (亨 [利]) 或 mH (毫亨)。

对于含有电感元件的电路, 当通过电感线圈的磁通 Φ 或者电流 i_L 发生改变时, 根据法拉第电磁感应定律, 电感上会出现电动势来抵抗电流的改变, 如图 1-4 所示。感应电动势 e_L 的值为

$$e_L = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-8)$$

式中, N 为电感线圈的匝数。

图 1-4 中电感两端的电压

$$u_L = -e_L = N \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-9)$$

如果电感线圈中通过恒定电流, 则电感两端电压 $u_L = 0$, 所以此时电感元件可视为短路。

3. 电容元件

电容器是由两块金属薄板及其中间隔有的绝缘介质组成。当电容器的两个极板间加上电压时, 两个极板上就聚集起上下等量的异性电荷, 如图 1-5 所示, 介质内出现较强的电场, 储存电场能量。绝大多数电容器都是线性的, 其定义为

$$C = \frac{q}{u_C} \quad (1-10)$$

电容的单位是 F (法 [拉])。由于法拉这个单位太大, 工程上多采用 μF (微法) 或 pF (皮法), $1\mu F = 10^{-6}F$, $1pF = 10^{-12}F$ 。

当电容元件上的电荷 q 或电压 u_C 发生变化时, 则在电路中引起电流

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \quad (1-11)$$

如果在电容元件两端加恒定电压, 电流 i_C 为零, 所以此时电容元件可视为开路。

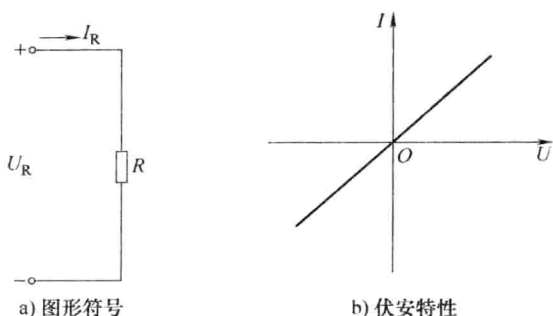


图 1-3 线性电阻元件

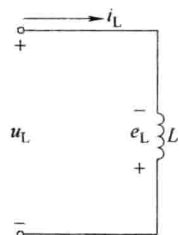


图 1-4 电感元件

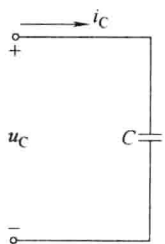


图 1-5 电容元件

1.2.2 有源元件

电路理论中,有源元件分为两类:一类以电压源形式表示;一类以电流源形式表示。

1. 电压源

理想电压源是指电源两端的电压 U_S 恒定不变,其发出的电流由外电路决定,这种理想电压源又称为恒压源,其符号如图 1-6a 所示。而实际电压源在工作中具有发热效应,因此在电路模型中用恒压源 U_S 和内阻 R_0 串联形式表示,称为电压源,如图 1-6b 所示。

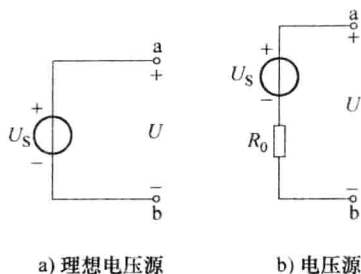


图 1-6 理想电压源与电压源图形符号

当理想电压源与负载连接时,如图 1-7a 所示,其中的电流 I 则是任意的,由负载电阻 R_L 及电压 U 本身确定,它的外特性曲线是与横轴平行的一条直线,如图 1-8 所示。当电压源与负载连接时,如图 1-7b 所示, R_L 是负载电阻, I 是负载电流,此时

$$U = U_S - R_0 I \quad (1-12)$$

由此可做出电压源的外特性曲线,如图 1-8 所示。随着输出电流 I 增加,输出电压 U 呈减小的趋势。

由于理想电压源的电压为恒定的,因此与理想电压源并联的支路上的任意元件,其两端的电压都是理想电压源的电压值。例如,图 1-9 所示电路中,无论 R 的电阻值为多少,二端口的电压 U 恒等于 U_S 。

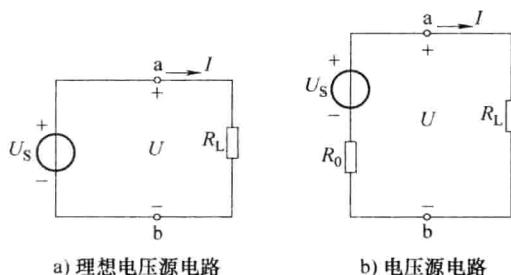


图 1-7 理想电压源与电压源电路

2. 电流源

理想电流源是指电源支路的电流 I_S 恒定不变,其两端电压由外电路决定,这种

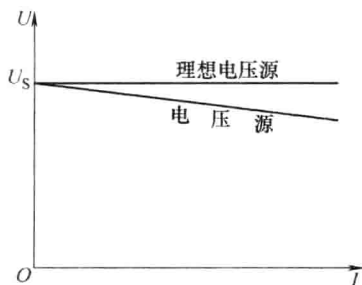


图 1-8 电压源和理想电压源的外特性曲线

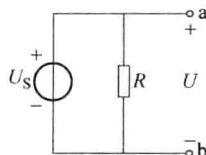


图 1-9 理想电压源并联电路

理想电流源又称为恒流源,其符号如图 1-10a 所示。而实际电流源在工作中同样具有发热效应,在电路模型中用恒流源 I_S 和内阻 R_0 并联形式表示,称为电流源,如图 1-10b 所示。

当理想电流源与负载连接时,如图 1-11a 所示,其中负载两端的电压 U 是任意的,由负载电阻 R_L 及恒流源 I_S 本身确定,它的外特性曲线将是与横轴垂直的一条直线,如图 1-12 所示。当电流源与负载连接时,如图 1-11b 所示, R_L 是负载电阻, U 是负载两端的电压,

此时

$$I = I_S - \frac{U}{R_0} \quad (1-13)$$

由此可做出电流源的外特性曲线, 如图 1-12 所示。随着输出电压 U 的增加, 输出电流 I 呈减小的趋势。

由于理想电流源的电流为恒定的, 因此与理想电流源串联的支路上的任意元件, 其中流过的电流都是理想电流源的电流值。例如, 图 1-13 所示电路中, 无论 R 的电阻值为多少, 该支路中的电流 I 恒等于 I_S 。

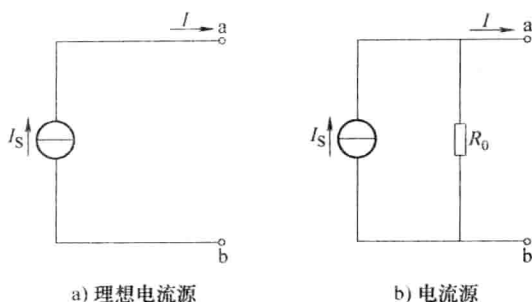


图 1-10 电流源与理想电流源图形符号

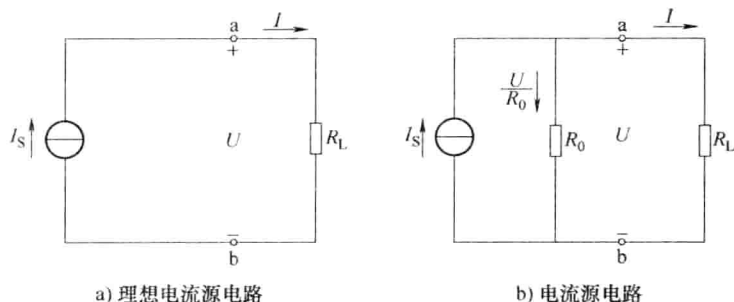


图 1-11 理想电流源电路与电流源电路

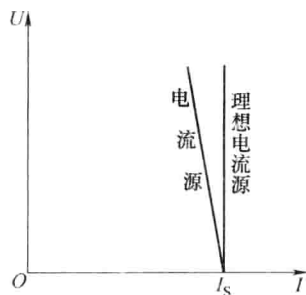


图 1-12 电流源的外特性

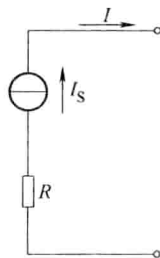


图 1-13 理想电流源串联电路

1.2.3 受控电源

上面讨论的电压源和电流源, 都是独立电源。所谓独立电源, 就是电压源的电压或电流源的电流不受外电路的控制而独立存在。此外, 在电子电路中还会遇到另一种类型的电源: 电压源的电压或电流源的电流, 是受电路中其他部分的电流或电压控制的, 这种电源称为受控电源。当控制的电压或电流消失或等于零时, 受控电源的电压或电流也将为零。

根据受控电源是电压源还是电流源, 以及受电压控制还是受电流控制, 受控电源可分为电压控制电压源 VCVS、电流控制电压源 CCVS、电压控制电流源 VCCS 和电流控制电流源 CCCS 共 4 种类型。4 种理想受控电源的模型如图 1-14 所示。

所谓理想受控电源, 就是它的控制端 (输入端) 和受控端 (输出端) 都是理想的。在

控制端，对电压控制的受控电源，其输入端电阻为无穷大；对电流控制的受控电源，其输入端电阻为零。这样，控制端消耗的功率为零。在受控端，对受控电压源，其输出端电阻为零，输出电压恒定；对受控电流源，其输出端电阻为无穷大，输出电流恒定。

如果受控电源的电压或电流和控制它们的电压或电流之间有正比的关系，则这种控制作用是线性的，图 1-14 中的系数 μ 、 r 、 g 及 β 都是常数。这里 μ 和 β 是没有量纲的纯数， r 具有电阻的量纲， g 具有电导的量纲。在电路图中，受控电源用菱形表示，以便与独立电源的图形符号相区别。

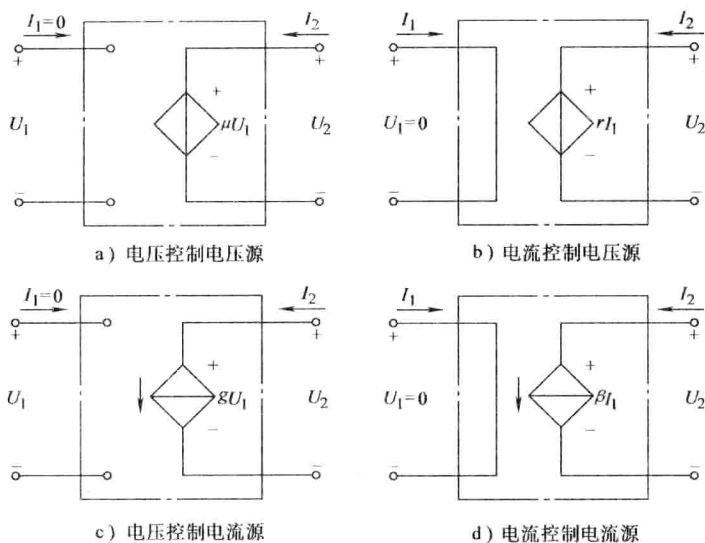


图 1-14 受控电源

思 考 题

1. 电感元件中通过恒定电流时是否可视作短路？是否此时电感 L 为零？电容元件两端施加恒定电压时，是否可看作开路？是否此时电容 C 为无穷大？
2. 某负载为一可变电阻器，由电压一定的蓄电池供电，当负载电阻增加时，该负载是增大了还是减小了？
3. 电流源外接电阻越大，其端电压越高，是否正确？

1.3 电压与电流的参考方向

1.3.1 电位

电路的工作状态可以通过电路中各节点的电位反映。分析电路时也经常要用到节点电位的概念。电气设备的调试和检修的一个主要方法就是测量各点的电位值，看其是否符合设计要求。

计算电位时，必须选定电路中某一点（只能选定一点）作为参考点，它的电位称为参

考电位, 通常设参考电位为零, 则参考点又称为零电位点, 习惯上就叫做“地”, 用符号“ $\perp$ ”表示。例如, 图 1-15 中, 选定 b 点为参考点。

电路中某一点的电位等于该点与参考点之间的电压。参考点选定以后, 电路中其他各点的电位都同它比较, 比它高的为正, 比它低的为负, 正数值愈大则电位愈高, 负数值愈大则电位愈低。所选定的参考点不同, 电路中各点电位的数值也不同。电位的表示符号为 V_a , 下角标 a 表示此电位为 a 点相对地的电位。

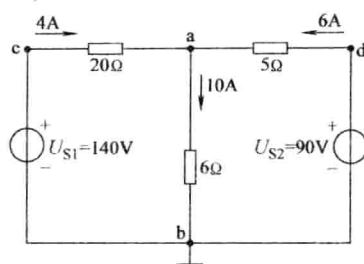


图 1-15 电位的概念

两点间的电压就是两点的电位差。它说明某一点的电位高, 另一点的电位低, 以及两点的电位相差多少。电压的表示符号为 U_{ab} , 下角标 ab 表示此电压为 a 点相对 b 点的电位差。参考点选得不同, 电路中各点的电位值随着改变, 但是任意两点间的电压值是不变的。所以各点电位的高低是相对的, 而两点间的电压值是绝对的。

1.3.2 电压和电流的参考方向

在电路分析中, 当涉及某个元件或部分电路的电流或电压时, 有必要指定电流或电压的参考方向。这是因为电流或电压的实际方向可能是未知的, 也可能是随时间变动的。所以在电路图上用箭标或“+”、“-”来标出它们的方向或极性, 才能正确列出电路方程。对于电压和电流的方向, 有实际方向和参考方向之分, 要加以区别。

电流的方向是客观存在的。但在分析较为复杂的直流电路时, 往往难于事先判断某支路中电流的实际方向; 对交流讲其方向随时间而变, 在电路图上也无法用一个箭标来表示它的实际方向。为此, 在分析与计算电路时, 常可任意选定某一方向作为电流的参考方向, 在电路图中用箭头表示。所选的电流的参考方向并不一定与电流的实际方向一致。当电流的实际方向与其参考方向一致时, 则电流为正值 (见图 1-16a); 反之当电流的实际方向与其参考方向相反时, 则电流为负值 (见图 1-16b)。图中, 虚线箭头表示电流的实际方向, 实线箭头表示电流的参考方向。显然, 在参考方向选定之后电流之值才有正负之分。

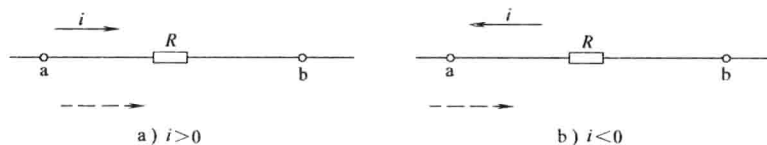


图 1-16 电流的参考方向

同理, 对电路中两点之间的电压和电源的电动势也可以指定参考方向或参考极性。电压的参考方向规定为由高电位 (“+” 极性) 端指向低电位 (“-” 极性) 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 (“-” 极性) 端指向高电位 (“+” 极性) 端, 即为电位升高的方向。

在电路图上所标的电流、电压和电动势的方向, 一般都是参考方向, 而不是实际方向。当实际方向与参考方向相同时, 其值为正, 否则为负。它们是正值还是负值, 视选择的参考方向而定。

电压的参考方向除用极性“+”、“-”表示外,也可用双下标表示。例如 a、b 两点之间的电压 U_{ab} , 它的参考极性是由 a 指向 b, 也就是说 a 点的参考极性为“+”, b 点的参考极性为“-”。如果参考方向选为由 b 指向 a, 则为 U_{ba} , $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

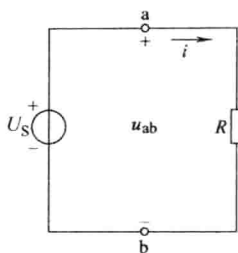


图 1-17 电压的参考方向

顺便指出,在标定电路中无源元件(如电阻、电感、电容等元件)的电压和电流参考方向时,两者常采用一致的参考方向,称为关联方向。如图 1-17 中电阻元件上电位降落的参考方向与元件电流的参考方向一致。

思考题

有一元件接于某电路的 a、b 两点之间,已知 $U_{ab} = -5V$, 请问 a、b 两点哪点电位高?

1.4 欧姆定律

线性电阻元件是这样的理想元件:在电压和电流取关联参考方向下,在任何时刻电阻值等于该电阻两端的电压与流过该电阻的电流的比值,即有

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-14)$$

这就是欧姆定律,它是分析电路的基本定律之一。

由式(1-14)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。

显然,欧姆定律还可表示为

$$I = GU \quad (1-15)$$

根据电路图所选电压和电流参考方向的不同,在欧姆定律的表达式中可带有正号或负号。当电压与电流的参考方向一致,即为关联参考方向时,则得

$$U = RI \quad (1-16)$$

当两者的参考方向选得相反,即为非关联参考方向时,则得

$$U = -RI \quad (1-17)$$

例 1-1 应用欧姆定律,对图 1-18 所示的各电路列出式子,并求电阻 R 。

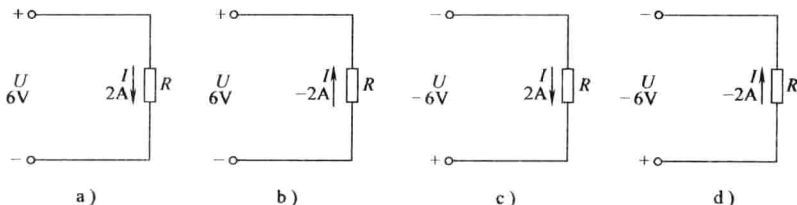


图 1-18 例 1-1 的电路

解 这里应注意,一个式子中有两套正负号。表达式中的正负号是根据电压和电流的参考方向得出的,而电压和电流本身还有正值和负值之分。

图 1-18a:
$$R = \frac{U}{I} = \frac{6}{2} \Omega = 3 \Omega$$

图 1-18b:
$$R = -\frac{U}{I} = -\frac{6}{-2} \Omega = 3 \Omega$$

图 1-18c:
$$R = -\frac{U}{I} = -\frac{-6}{2} \Omega = 3 \Omega$$

图 1-18d:
$$R = \frac{U}{I} = \frac{-6}{-2} \Omega = 3 \Omega$$

1.5 基尔霍夫定律

分析电路的基本定律，除了欧姆定律之外，还有基尔霍夫定律，它也是电路理论中最基本的定律之一。基尔霍夫定律有两条：基尔霍夫电流定律（简称 KCL）和基尔霍夫电压定律（简称 KVL）。基尔霍夫电流定律应用于节点，电压定律应用于回路。

为了说明基尔霍夫定律，现以图 1-19 电路为例介绍支路、节点和回路等概念。

电路中没有分支的一段电路称为支路。图 1-19 电路中有 6 条支路。例如 be 是其中的一条支路，bad 也是一条支路。每一条支路流过一个电流，称为支路电流。

在电路中三条或三条以上的支路相连接的点称为节点。在图 1-19 所示的电路中共有 4 个节点 b、d、e 和 f。

由一条或多条支路所组成的闭合路径称为回路。

图 1-19 中共有 7 个回路。例如 abeda、abcfeda 都为回路。

没有被支路穿过的回路称为网孔。显然，网孔是回路的一种特例，上述 7 个回路中只有三个是网孔，abeda、bcfed、defhgd。

1.5.1 基尔霍夫电流定律（KCL）

基尔霍夫电流定律用来确定连接在同一节点上的各支路电流之间的关系。由于电流的连续性，电路中任何一点（包括节点在内）均不能堆积电荷，因此，在任一瞬时，流入电路中任一节点的各支路电流之和等于从该节点流出的各支路电流之和。基尔霍夫电流定律是电流连续性原理的反映。

例如，图 1-20 电路中，对于节点 a，在图示的各支路电流参考方向下，可写出

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-18)$$

式(1-18)是基尔霍夫电流定律的数学表达式，常称为节点电流方程。如把流入节点的支路电流取正号，流出节点的支路电流取负号，则上式可改写为

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \text{ 或 } \sum I = 0 \quad (1-19)$$

可见，在任意瞬时，与任一节点关联的支路电流的代数数和等于零。由此可见，基尔霍夫电流定律与各支路中元件无关。

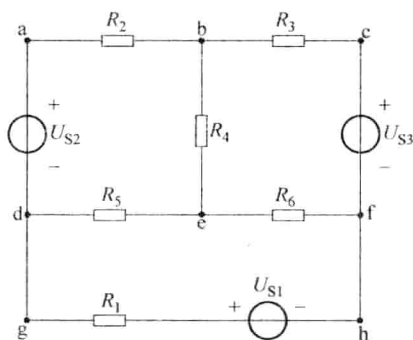


图 1-19 电路举例