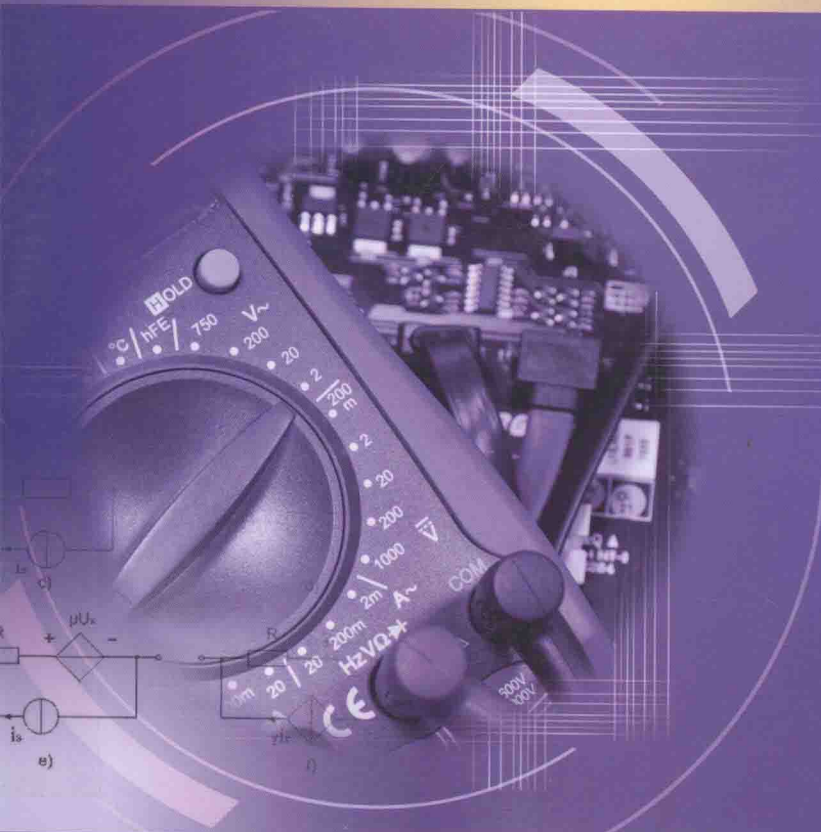




普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

电工与电子技术

赵承滨 主编



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

电工与电子技术

主 编 赵承滨
副主编 董翠莲 冯晓艳 宋婀娜
参 编 刘 睿 房俊杰 艾延宝 季庆浮
主 审 郭明良



机械工业出版社

本书分为四篇——电路原理、电机及控制、模拟电子技术和数字电子技术，共14章（全一册）。电路原理篇除了电学基本概念外，主要研究三类电路：直流稳态、直流暂态和交流电路；电机及控制篇主要研究变压器、交流电动机和继电器-接触器控制；模拟电子技术篇主要包括元器件（半导体二极管和晶体管）和三类电路：基本放大电路、运放反馈和直流电源；数字电子技术篇包括三部分：逻辑运算、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路。

本书力求简洁与精炼、实用与前瞻，强调知识的基础性、逻辑性与连贯性，注重系统性与先进性。本书可作为高等学校非电类专业电工与电子技术课程教材，也可供工程技术人员和社会读者阅读。

图书在版编目（CIP）数据

电工与电子技术/赵承滨主编. —北京：机械工业出版社，2016.1
普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材
ISBN 978-7-111-51828-0

I. ①电… II. ①赵… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第300620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：徐凡 责任编辑：徐凡 版式设计：霍永明
责任校对：佟瑞鑫 封面设计：张静 责任印制：李洋
三河市国英印务有限公司印刷
2016年1月第1版第1次印刷
184mm×260mm·16.75印张·410千字
标准书号：ISBN 978-7-111-51828-0
定价：35.00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

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

前 言

本书是依据教育部指导委员会颁布的课程教学基本要求编写的。全书分为四篇——电路原理、电机及控制、模拟电子技术和数字电子技术。电路原理篇除了介绍电学相关概念外，主要研究三类主要电路：直流稳态电路、直流暂态电路和交流电路；电机及控制篇分为变压器、交流电动机和继电器-接触器控制三部分；模拟电子技术篇首先介绍元器件，主要包括半导体二极管和晶体管，然后研究三类电路：基本放大电路、运放反馈和直流电源；数字电子技术篇包括三部分：逻辑运算、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路。

本书的编写，在注重基础讲求实用的原则下，充分吸收了众多最新教材和最新的网络相关资源中的新知识、新元件和新技术，并较好地处理了教材的实用性和先进性之间的关系，而且编纂的内容符合国内各类高校应用型本科学生的培养目标。相对于其他教材，本书具有以下特点：

1. 内容精炼，言简意赅。本书根据本科非电类专业学生培养要求和应用型高校的实际情况，精简内容：一方面，考虑到理论学时所限，整合内容近似的章节（如正弦交流电路、三相电路和安全用电）；另一方面，删去应用不多的章节（如 PLC、正弦波振荡电路等）。因此，本书大大地缩小了章节数量，由上、下册改为全一册，更适合当代精简理论学时的学习要求。

2. 弱化理论，讲求实用。对于非电专业的学生来讲，电学相关理论不仅理论性强、难于理解，而且实际中直接应用得并不多，因此本书适当删减或弱化了相关的理论分析内容（如电动机机械特性分析、二极管等效电路分析等）。与此同时，适当增加了部分工程实际中可能遇到的知识（如固态继电器，以及洗衣机和风扇电机等），更加注重实用性。

3. 讲求先进，紧跟时代。本书广泛学习了国内外最新教材，尤其是最新的网络资源，引入了许多先进的技术及元器件的内容（如数字钳形电流表、白光高亮度 LED 以及正在普及的 LED 灯具、蓝光激光二极管及蓝光光碟等）。

4. 理论与实际紧密结合。本书在讲解理论的同时，适当增加了“应用注意事项”和“设计应遵循的原则”等内容。这样，一方面能提高学习兴趣，更重要的是能使所学的课程内容在工程实际中真正用得上。

5. 基础与系统并重。教材强调对基本知识点的覆盖，降低知识点的难度与深度，有利于学生学习和掌握，同时也强调电工电子技术的整体性与系统性，使学生树立起大系统、大工程的观念。

赵承滨任本书的主编，负责全书的整体规划与统稿工作，董翠莲、冯晓艳、宋婀娜任副主编，参加编写工作的有刘睿、房俊杰、艾延宝和季庆浮。其中，电路的相关概念和电学基本物理量以及直流稳态电路由董翠莲编写，暂态电路和单相交流电路由刘睿编写，三相交流电路、安全用电和变压器由房俊杰编写，交流电动机、继电器-接触器控制系统和半导体二极管由赵承滨编写，晶体管及其应用、基本放大电路和直流稳压电源由季庆浮编写，集成运算放大器与反馈由艾延宝编写，数字电路与逻辑运算、门电路和组合逻辑电路由冯晓艳编写，触发器和时序逻辑电路由宋婀娜编写。全书由郭明良教授主审。在教材的编写过程中，郭明良教授还提出了许多宝贵的意见，在此向他表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中难免会有疏漏和不足之处，希望广大读者予以批评指正。

作 者

目 录

前言

第1篇 电路原理

第1章 电路的相关概念和电学基本

物理量 1

1.1 电路的概念、组成与作用 1

1.1.1 电路的概念与组成 1

1.1.2 电路的作用 1

1.1.3 电路模型 2

1.2 电压、电流及其参考方向 2

1.2.1 电流及其参考方向 2

1.2.2 电压及其参考方向 3

1.2.3 电路的功和功率 4

1.3 电阻元件的串并联及等效变换 5

1.3.1 电阻元件 5

1.3.2 电阻的串联及等效 6

1.3.3 电阻的并联及等效 7

1.3.4 电阻电路的星-角变换 8

1.4 电压源与电流源 10

1.4.1 电压源模型 10

1.4.2 电流源模型 11

1.4.3 电压源与电流源的等效变换 12

1.4.4 受控电源 12

1.4.5 电源的工作状态 13

1.5 电位的概念和相关计算 14

习题 16

第2章 直流稳态电路 19

2.1 基尔霍夫定律 19

2.1.1 基尔霍夫电流定律 19

2.1.2 基尔霍夫电压定律 20

2.2 支路电流法 21

2.3 节点电压法 23

2.4 叠加定理 24

2.5 戴维南定理和诺顿定理 26

2.5.1 戴维南定理 26

2.5.2 诺顿定理 27

习题 28

第3章 直流暂态电路 30

3.1 电阻、电容和电感元件 30

3.2 换路定则 32

3.3 RC电路的响应 34

3.3.1 RC电路的零输入响应 34

3.3.2 RC电路的零状态响应 36

3.3.3 RC电路的全响应 37

3.4 三要素法 37

3.5 微分电路与积分电路 39

3.6 RL电路的响应 40

习题 43

第4章 正弦交流电路 47

4.1 正弦交流量及其表示方法 47

4.1.1 正弦量及其三要素 47

4.1.2 正弦量的相量表示法 50

4.2 R、L、C元件的交流电路 53

4.3 复阻抗及其相关计算 58

4.4 交流功率计算及功率因数的提高 61

4.5 RLC串、并联交流电路的分析与
计算 64

4.6 三相交流电路 70

4.6.1 三相电源产生及其特点 71

4.6.2 三相交流电路中负载的连接 73

4.6.3 三相交流电路的功率 78

4.7 安全用电 80

4.7.1 触电事故 81

4.7.2 触电方式 82

4.7.3 工作接地、保护接地和保护
接零 82

4.7.4 系统分类 84

4.7.5 跨步电压 86

4.7.6 静电防护 87

4.7.7 电器的防火和防爆 87

4.7.8 剩余电流断路器 88

4.7.9 常用知识	89	习题	90
------------------	----	----------	----

第2篇 电机及控制

第5章 变压器	95	6.3.2 三相异步电动机的调速	118
5.1 磁路与磁路的欧姆定律	95	6.3.3 三相异步电动机的制动	119
5.1.1 磁路及磁性材料的磁性能	95	6.4 三相异步电动机的铭牌数据以及	
5.1.2 磁路的欧姆定律	97	电动机的选择与维护	120
5.2 变压器的基本结构和原理	97	6.4.1 三相异步电动机的分类	120
5.2.1 变压器的基本结构	97	6.4.2 三相异步电动机的铭牌数据及	
5.2.2 变压器的工作原理	99	主要技术参数	120
5.2.3 变压器的损耗和效率	104	6.4.3 三相异步电动机的选择原则和	
5.3 变压器的额定值	104	步骤	121
5.4 变压器绕组的极性	105	6.4.4 三相异步电动机的维护保养	121
5.5 特殊用途变压器	106	6.5 单相异步电动机简介	123
5.5.1 自耦变压器	106	习题	124
5.5.2 仪用互感器	106	第7章 继电器-接触器控制系统	126
习题	108	7.1 常用的低压电器元件	126
第6章 交流电动机	110	7.1.1 开关电器	126
6.1 三相异步电动机的结构和工作原理 ..	110	7.1.2 按钮与熔断器	129
6.1.1 三相异步电动机的结构	110	7.1.3 接触器与继电器	130
6.1.2 三相异步电动机的旋转原理	111	7.2 电动机常用起动电路	134
6.2 三相异步电动机的转矩和机械特性 ..	114	7.2.1 点动控制电路	134
6.2.1 三相异步电动机电路的分析	114	7.2.2 直接起动控制电路	134
6.2.2 三相异步电动机机械特性的		7.2.3 正、反转控制电路	134
分析	115	7.2.4 减压起动电路	135
6.3 三相异步电动机的起动、调速与		7.3 电气控制电路的设计步骤和设计时	
制动	117	应遵循的原则	136
6.3.1 三相异步电动机的起动	117	习题	136

第3篇 模拟电子技术

第8章 半导体、二极管、晶体管		8.4.1 稳压管	143
及其应用	138	8.4.2 肖特基二极管	145
8.1 半导体基本知识	138	8.4.3 广泛应用的光电子器件	146
8.1.1 本征半导体	138	8.5 晶体管	148
8.1.2 P型半导体和N型半导体	138	8.5.1 晶体管的分类、结构及参数	149
8.2 PN结及其单向导电性	139	8.5.2 晶体管的电流放大作用及原理 ..	149
8.3 半导体二极管	141	8.5.3 晶体管的共射极特性曲线	151
8.3.1 二极管的分类与结构	141	8.5.4 晶体管的主要参数	153
8.3.2 二极管的伏安特性曲线	141	8.5.5 光敏晶体管	154
8.3.3 二极管的主要参数	142	习题	155
8.3.4 二极管的应用	142	第9章 基本放大电路	158
8.4 特殊的二极管	143	9.1 基本放大电路的组成、分类、性能	

指标及分析方法	158	10.4.1 反馈的概念及基本方程式	183
9.2 共发射极放大电路的分析方法	159	10.4.2 反馈的组态及判断方法	185
9.2.1 放大电路的静态分析	159	10.4.3 负反馈放大电路的四种类型	187
9.2.2 放大电路的动态分析	161	10.4.4 负反馈对放大电路性能的影响	190
9.3 静态工作点的稳定	168	10.5 深度负反馈条件下的近似计算	196
9.3.1 温度对静态工作点的影响	168	10.6 负反馈放大电路的稳定问题	197
9.3.2 基极分压式发射极偏置晶体管放大电路	169	习题	201
9.4 共集电极放大电路——射极输出器	172	第 11 章 直流稳压电源	206
9.4.1 静态分析	172	11.1 整流电路	206
9.4.2 动态分析	172	11.1.1 单相半波整流电路	206
9.4.3 共集电极放大电路的特点和应用	173	11.1.2 单相桥式整流电路	208
习题	174	11.2 滤波电路	210
第 10 章 集成运算放大器与反馈	177	11.2.1 电容滤波电路	210
10.1 运放的结构与参数	177	11.2.2 电感滤波电路	211
10.1.1 结构框图	177	11.3 稳压电路	211
10.1.2 主要参数	178	11.3.1 并联型稳压电路	212
10.2 理想运放及分析依据	179	11.3.2 串联反馈型稳压电路	212
10.3 集成运放的应用	180	11.4 常用集成稳压器及其应用	215
10.3.1 运算电路	180	11.4.1 W7800 三端稳压器	215
10.3.2 信号处理电路	182	11.4.2 W117 三端稳压器	215
10.4 反馈放大电路	183	11.4.3 三端稳压器的应用	216
		习题	217
		第 4 篇 数字电子技术	
第 12 章 数字电路与逻辑运算	220	14.1.2 RS 触发器	238
12.1 数字电路及其特点	220	14.1.3 JK 触发器	239
12.2 逻辑代数	221	14.1.4 D 触发器	240
12.3 逻辑函数及其化简	222	14.1.5 T 触发器	241
习题	223	14.1.6 触发器的相互转换	241
第 13 章 门电路和组合逻辑电路	225	14.2 典型的时序逻辑电路	243
13.1 常见的逻辑门电路	225	14.2.1 寄存器	243
13.2 组合逻辑电路分析与设计	226	14.2.2 计数器	246
13.2.1 组合逻辑电路的分析	226	14.3 555 定时器及其应用	251
13.2.2 组合逻辑电路的设计	226	14.3.1 555 定时器的结构与工作原理	251
13.3 典型组合逻辑电路	228	14.3.2 用 555 定时器构成施密特触发器	252
13.3.1 半加器与全加器	228	14.3.3 用 555 定时器构成单稳态触发器	253
13.3.2 编码器	230	14.3.4 用 555 定时器构成多谐振荡器	254
13.3.3 译码器和数字显示	231	习题	257
习题	235	参考文献	259
第 14 章 触发器和时序逻辑电路	237		
14.1 双稳态触发器	237		
14.1.1 触发器概述	237		

第 1 篇 电路原理

第 1 章 电路的相关概念和电学基本物理量

1.1 电路的概念、组成与作用

1.1.1 电路的概念与组成

通俗地讲，电路即电流的通路。它是为了某种需要由一些电工设备或元器件按一定方式组合起来的。组成电路的电气设备或元器件统称为电路元件。常见的电气设备有发电机、变压器、电动机、电热炉等；常见的电工元器件有电阻、电容、电感等。

电路中产生电能的元件称为电源，在电源的内部，局外力将非电能（机械能、化学能、原子能等）转换为电能。电路中吸收电能并将电能转变为既定的非电能或电信号（电压、电流）的元件称为负载。连接电源和负载的导线、开关等一些装置和设备，以实现电路的控制、测量和保护的部分，称为中间环节，其作用是传输电能和电信号。

1.1.2 电路的作用

电路的结构形式及其所完成的任务是多种多样的，最典型的例子是电力系统，其电路示意如图 1-1a 所示。它的作用是实现电能的传输和转换。

电路的另一种作用是传递和处理信号，常见的例子如扩音机，其电路示意如图 1-1b 所示。先由传声器把语言或音乐（通常称为信号）转换为相应的电压和电流，它们就是电信号。然后通过电路传递到扬声器，把电信号还原为语言或音乐。由于由传声器输出的电信号比较微弱，不足以驱动扬声器发声，因此中间还需要用放大器来放大。信号的这种转换和放大，称为信号的处理。

信号传递和处理的例子还有很多，如收音机和电视机，它们的接收天线（信号源）把载有音

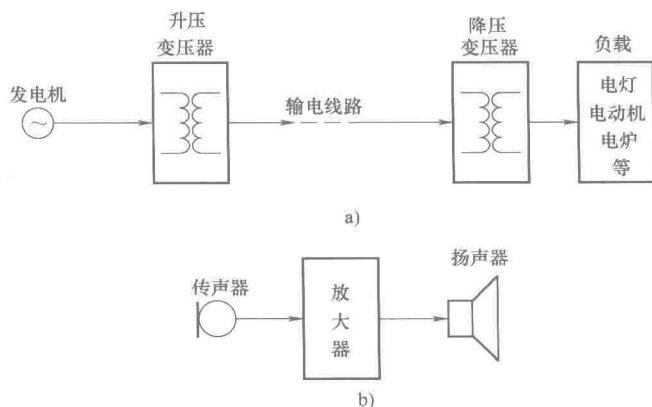


图 1-1 电路的作用
a) 电力系统 b) 扩音机

乐、语言、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号，然后通过电路把信号传递和处理（调谐、变频、检波、放大等），送到扬声器和显像管（负载），还原为原始信息。

1.1.3 电路模型

实际电路都是由一些按需要起不同作用的实际电路元器件所组成，例如发电机、变压器、电动机、电池、晶体管以及各种电阻器和电容器等，它们在工作过程中所表现出的电磁性能和能量转换过程往往比较复杂，这将给电路分析带来许多困难。例如一个最简单的白炽灯，它除具有消耗电能的性质（电阻性）外，当通有电流时还会产生磁场，就是它还具有电感性。但电感非常微小，可忽略不计，于是可认为白炽灯是一电阻元件。因此为了便于电路分析，常将实际电路中的元器件用具有某一性能的理想电路元件或它们的组合表示，并称之为电路元件模型。

理想电路元件（以下简称电路元件）分为两大类：有源元件和无源元件。基本有源元件有电压源和电流源，它们反映了电路的能源形式和对电路的作用；基本无源元件有电阻元件 R 、电感元件 L 和电容元件 C ，它们分别反映将电能转变成其他某一种形式能量的性能。电路元件的图形符号如图 1-2 所示。

由电路元件模型组成的电路称为电路模型。图 1-3 所示为一最简单的电路模型。 U_s 为给负载供电的电压源， R 为电阻元件，其功能是将电能转换为热能，它可能是一只白炽灯，也可能是一只电炉或其他任何一个耗电设备。本教材电路分析中所涉及的电路都是电路模型。

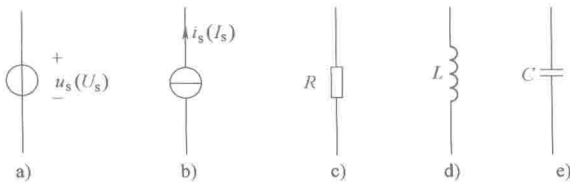


图 1-2 电路元件的图形符号

a) 电压源 b) 电流源 c) 电阻 d) 电感 e) 电容

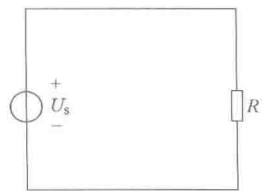


图 1-3 最简单的电路模型

1.2 电压、电流及其参考方向

电流、电压、功率等是描述电路中能量转换关系或信号传递和处理的基本物理量。在分析电路前要弄清楚它们的概念及其参考方向问题。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷的定向移动形成电流。单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流，用以衡量电流的大小。电流用 $i(t)$ 或 i 表示

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

大小和方向随时间而变化的电流称为交变电流，简称交流（Alternating Current, AC 或

ac), 交流电流一般用小写字母 $i(t)$ 表示。大小和方向都不随时间改变的电流, 称为恒定电流或直流电流 (Direct Current, DC 或 dc), 直流电流一般用大写字母 I 表示。

在国际单位制中, 电荷 $q(t)$ 的单位是 C (库仑)、时间 t 的单位是 s (秒)、电流 $i(t)$ 的单位是 A (安培)。

电流的方向是客观存在的, 习惯上把正电荷移动的方向规定为电流的方向, 为了与以后常用的参考方向相区别, 又把正电荷移动的方向称为电流的实际方向。

对结构比较复杂的直流电路, 可能无法直接判断各电流的实际方向。在交流电路中, 电流的大小和方向随时间时刻在变化, 也无法准确得知其实际方向。这就

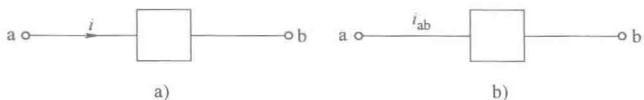


图 1-4 电流的参考方向

给电流的计算带来不便。为此, 在分析和计算电路时, 可以先任意选定某一方向作为电流的方向, 并把这个方向称为电流的参考方向或正方向。图 1-4 所示为电流参考方向的两种表示方法: 用箭头表示, 如图 1-4a 所示; 用带双下标的字母表示, 如图 1-4b 所示, 其中 i_{ab} 表示电流 i 的参考方向由 a 指向 b。

由于参考方向是人为任意选定的, 可能与实际方向相同, 也可能与实际方向相反, 因此用电流的正、负值加以区别。当参考方向与实际方向相同时, 电流取值为正, 即 $i > 0$; 当参考方向与实际方向相反时, 电流取值为负, 即 $i < 0$ 。或者, 按照选定的参考

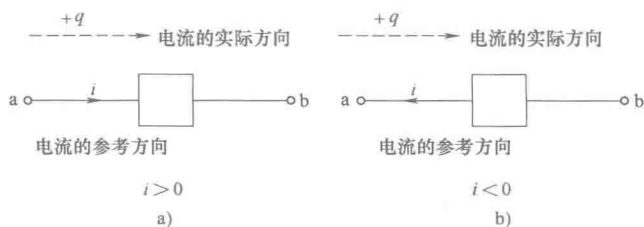


图 1-5 参考方向与实际方向

方向对电路进行分析计算: 当计算结果 $i > 0$ 时, 表示参考方向与实际方向相同; 当计算结果 $i < 0$ 时, 表示参考方向与实际方向相反, 如图 1-5 所示。

1.2.2 电压及其参考方向

电压是用来描述电场力对电荷做功能力的物理量。如果电场力将单位正电荷 dq 从电场的高电位点 a 经过电路移动到低电位点 b 所做的功是 dw , 则 a、b 两点之间的电压为

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

如果电压的大小或方向随时间变化, 则称为交流电压 (Alternating Voltage, AV 或 av), 用 u 或 $u(t)$ 表示; 如果电压的大小和方向都不随时间变化, 则称为恒定电压或直流电压 (Direct Voltage, DV 或 dv), 用大写字母 U 表示。

在国际单位制中, 功的单位是 J (焦耳)、电荷的单位是 C (库仑)、电压的单位是 V (伏特)。

电压是个标量, 为了表示电场力对电荷做功的方向, 习惯上将由高电位指向低电位的方向规定为电压的方向, 并称为电压的实际方向。

与电流的参考方向一样, 在分析计算电路以前, 要先给电压任意选定一个方向, 并把这

个方向称作电压的参考方向。图 1-6 所示为电压参考方向的三种表示方法：用符号“+”表示参考高电位，用“-”表示参考低电位，如图 1-6a 所示；用箭头所指方向表示电位降落方向，如图 1-6b 所示；用带双下标的字母表示，如图 1-6c 所示，其中 u_{ab} 表示 a 点是参考高电位点，b 点是参考低电位点。当参考方向与实际方向相同时，电压取值为正值，即 $u > 0$ ；当参考方向与实际方向相反时，电压取负值，即 $u < 0$ ，如图 1-7 所示。

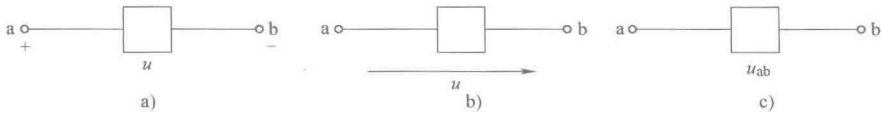


图 1-6 电压的参考方向

显然，假设了参考方向之后，电流和电压都变成了代数量。由于电压和电流的参考方向都是任意指定的，对于同一电路元件，电压与电流参考方向的关系有两种可能性：当电流参考方向与电压的参考方向一致时，称电流与电压为关联参考方向；当电流参考方向与电压的参考方向不一致时，称电流与电压为非关联参考方向，如图 1-8 所示。

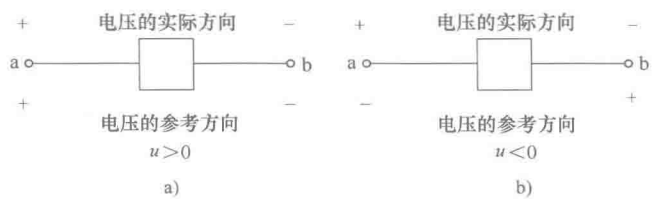


图 1-7 参考方向与实际方向

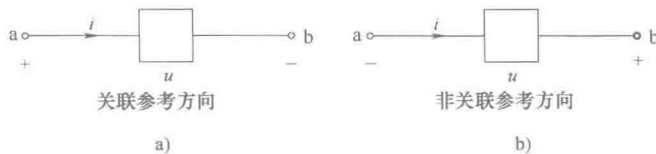


图 1-8 关联参考方向与非关联参考方向

例 1-1 在图 1-9 所示电路中，说明哪几种情况属于关联参考方向，哪几种情况属于非关联参考方向？

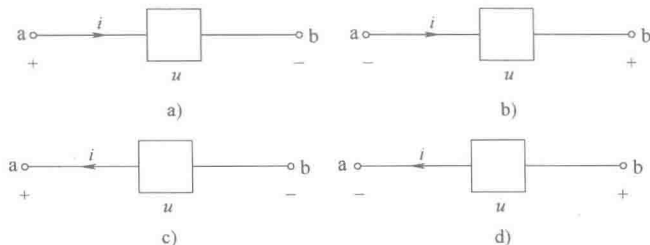


图 1-9 例 1-1 图

解：图 1-9a、d 为关联参考方向；图 1-9b、c 为非关联参考方向。

1.2.3 电路的功和功率

电路接通后同时进行着电能和非电能的转换。根据能量守恒定律，电源供出的能量等于

负载消耗或吸收能量的总和。能量用字母 W 表示。

负载消耗或吸收的电能即电场力移动电荷 q 所做的功。其由电压和电流的定义可表示为

$$W = \int_0^q u dq = \int_0^\tau u i dt \quad (1-3)$$

式中, τ 为电流通过负载的时间。

功率即电流做功的速率, 用字母 p 表示

$$p = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1-4)$$

当电压、电流都是恒定值时, 以上两式分别为

$$W = UI\tau \quad (1-5)$$

$$P = \frac{W}{\tau} = UI \quad (1-6)$$

功率的单位为瓦特 (W), 简称瓦。辅助单位有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW) 等

$$1\text{W} = 10^{-3}\text{kW} = 10^3\text{mW}$$

功的单位为焦耳 (J), 简称焦

$$1\text{J} = 1\text{W} \times 1\text{s} = 1\text{W} \cdot \text{s}$$

工程上常用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 作为电能的单位

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

在电压、电流参考方向下, 功和功率也是代数量。以上是当电路元件的电压、电流参考方向一致时消耗电功率的表达式; 当电路元件电压、电流参考方向不一致时, 计算电路元件消耗的电功率要在表达式前加“-”号, 即

$$P = -UI \quad (1-7)$$

以上两种情况, 若结果为 $P > 0$, 说明该电路元件是吸收功率的, 为负载; 若 $P < 0$, 即元件消耗的电能负, 说明该电路元件实际上产生电能, 为电源。

例 1-2 某电路元件 A 的电压、电流参考方向如图 1-10 所示。若 $U = 5\text{V}$, $I = -2\text{A}$, 试判断该电路元件 A 在电路中的作用是电源还是负载? 若电流参考方向与图中所设相反, 又如何?

解: (1) 因为 U 、 I 参考方向一致, 根据 (1-6) 式, 其消耗的电功率为

$$P = UI = 5 \times (-2)\text{W} = -10\text{W} < 0$$

故该电路元件 A 为电源。

(2) 若电流参考方向与图中所设相反, 则根据式 (1-7) 可得

$$P = -UI = -5 \times (-2)\text{W} = 10\text{W} > 0$$

故该电路元件 A 为负载。

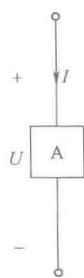


图 1-10 例 1-2 图

1.3 电阻元件的串并联及等效变换

1.3.1 电阻元件

电阻元件是反映电路中实际元器件消耗电能这一物理性能的一种理想元件。它有两个端

钮与外电路相连接, 这样的元件又可以称其为二端元件。

在讨论各种理想元件的性能时, 重要的是要确定其端电压与电流之间的关系, 这种关系称为元件约束, 简称 VCR。欧姆定律反映了任一时刻电阻元件的这种约束关系。在电压与电流的关联参考方向下, 欧姆定律表达式为

$$u = Ri \quad (1-8)$$

式中, R 为电阻元件的电阻值, 单位为欧姆 (Ω), 简称欧。常用单位还有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$) 等。

若电阻 R 值与其工作电压或电流无关, 是一个常数, 那么这样的电阻元件称为线性电阻元件。线性电阻元件在电路中的图形符号如图 1-11a 所示。在 $u-i$ 坐标平面上画出的电阻元件电压与电流的关系曲线称为该元件的伏安特性曲线, 简称伏安特性。线性电阻元件的伏安特性是一条通过原点的直线, 如图 1-11b 所示。

应用欧姆定律时要注意电压和电流的参考方向, 在电阻元件的电压及电流参考方向选择不一致时, 欧姆定律应表示成

$$u = -Ri \quad (1-9)$$

电阻 R 的倒数称为电导, 用 G 表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-10)$$

电导的单位为西门子 (S), 简称西。

同一个电阻元件, 既可以用电阻 R 表示, 也可以用电导 G 表示。引用电导后, 欧姆定律可表达为

$$i = uG \quad (1-11)$$

如果电阻元件的电阻值不是一个常数, 也就是说, 它的数值会随着其工作电压或电流的变化而变化, 那么这样的电阻元件称为非线性电阻元件。它的伏安特性就不再是一条通过原点的直线。图 1-12 所示是某二极管的伏安特性曲线, 二极管是非线性电阻元件。

在后面的叙述中, 若无特殊说明, 一般所说的电阻元件均指线性电阻元件, 简称电阻。

图 1-11b 所示为伏安特性说明, 在关联参考方向下, 电阻上的电压和电流值总是同号的。由式 (1-4) 可知

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-12)$$

其功率 p 总是正值, 即电阻总是在消耗功率, 所以, 电阻是耗能元件。在应用此式时, 一定要注意, i 必须是流过 R 的电流, u 必须是电阻 R 两端的电压。

1.3.2 电阻的串联及等效

如果将两个或更多个电阻一个接一个的顺序相连, 并且在这些电阻中通过同一电流, 则

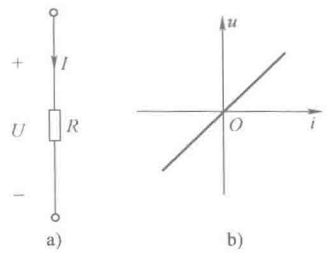


图 1-11 电阻元件及其伏安特性曲线

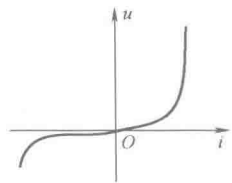


图 1-12 二极管的伏安特性曲线

这种连接法就称为电阻的串联。如图 1-13a 所示为两个电阻的串联。

两个电阻的串联，可以用一个等效电阻 R_{eq} 来代替，如图 1-13b 所示，等效的条件是在同一电压 U 的作用下电流 I 保持不变。等效电阻等于各个串联电阻之和，即

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad (1-13)$$

两个串联电阻上的电压分别为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= R_1 I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ U_2 &= R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

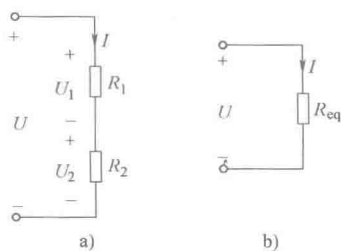


图 1-13 电阻的串联

可见，串联电阻上电压的分配与电阻值成正比。电阻串联的应用很多。例如，在负载的额定电压低于电源电压的情况下，通常需要与负载串联一个电阻，以降低一部分电压；有时为了限制负载中通过过大的电流，也可以与负载串联一个限流电阻；如果需要调节电路中的电流时，一般也可以在电路中串联一个变阻器来进行调节；另外，改变串联电阻的大小以得到不同的输出电压，这也是常见的。

例 1-3 在图 1-14 所示电路中，要将一个满刻度偏转电流为 $50\mu\text{A}$ 、电阻 $R_g = 2\text{k}\Omega$ 的表头，制成量程为 30V 的直流电压表，应串联多大的附加电阻 R_f ？

解：满刻度时，表头电压应为

$$u_g = R_g i = 2 \times 10^3 \times 50 \times 10^{-6} \text{V} = 0.1 \text{V}$$

附加电阻电压

$$u_f = (30 - 0.1) \text{V} = 29.9 \text{V}$$

由式 (1-14) 可得

$$29.9 \text{V} = \frac{R_f}{R_g + R_f} \times 30 \text{V}$$

附加电阻

$$R_f = 598 \text{k}\Omega$$

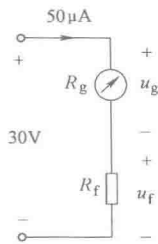


图 1-14 例 1-3 图

1.3.3 电阻的并联及等效

如果将两个或多个电阻连接在两个公共的点之间，则这样的连接法就称为电阻的并联。在各个并联电阻上受到同一电压的控制。图 1-15a 所示是两个电阻的并联电路。

两个并联电阻也可以用一个电阻 R_{eq} 来等效，如图 1-15b 所示。等效电阻的倒数等于各个并联电阻的倒数之和，即

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-15)$$

两个并联电阻上的电流分别为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = \frac{R_{eq} I}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = \frac{R_{eq} I}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

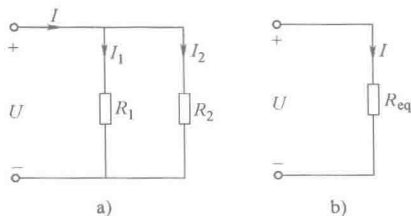


图 1-15 电阻的并联

可见, 并联电阻上电流的分配与电阻值成反比。负载并联运用时, 它们处于同一电压之下, 任何一个负载的工作情况基本不受其他负载的影响。并联的负载电阻越多, 则总电阻越小, 电路中总电流和总功率也就越大。但是每个负载的电流和功率都没有变动(严格地讲, 基本上不变)。有时为了某种需要, 可将电路中的某一段与电阻或变阻器并联, 以起到分流或调节电流的作用。

例 1-4 如图 1-16 所示, 要将一个满刻度偏转电流为 $50\mu\text{A}$ 、电阻 $R_g = 2\text{k}\Omega$ 的表头, 制成量程为 10mA 的直流电流表, 应并联多大的分流电阻?

解: 由题意可知 $I_1 = 50\mu\text{A}$, $I = 10\text{mA}$, $R_g = 2\text{k}\Omega$ 。由式 (1-16) 可得

$$I_1 = \frac{R_2}{R_g + R_2} I$$

$$50\mu\text{A} = \frac{R_2}{2 \times 10^3 + R_2} \times 10 \times 10^{-3} \mu\text{A}$$

分流电阻 $R_2 = 10.05\Omega$

例 1-5 如图 1-17a 所示电路, 已知 $R_1 = 3\Omega$, $R_2 = 6\Omega$, $R_3 = 6\Omega$, $R_4 = 12\Omega$, $R_5 = 10\Omega$ 。求 ab 端的等效电阻 R_{ab} 。

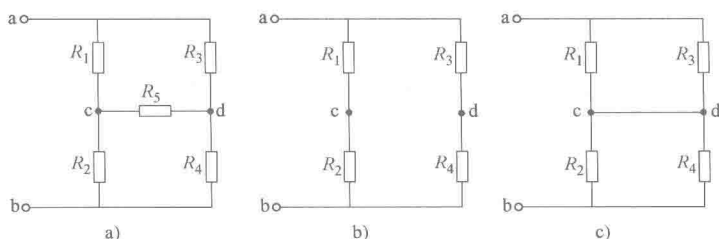


图 1-17 例 1-5 图

解: 图 1-17a 所示电路为电桥电路, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 称为桥臂, R_5 称为桥。当 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 时, 电桥达到平衡, 此时流过桥 (R_5) 的电流等于零; 桥两端 (c 、 d 两点间) 的电压为零。求解 ab 端的等效电阻 R_{ab} 时, 根据电桥平衡的特点有两种方法:

方法 1: 根据流过桥 (R_5) 的电流等于零这一特点, 可将 R_5 断开, 如图 1-17b 所示。则

$$R_{ab} = (R_1 + R_2) // (R_3 + R_4) = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{9 \times 18}{3 + 6 + 6 + 12} \Omega = 6\Omega$$

方法 2: 根据桥两端 (c 、 d 两点间) 的电压为零这一特点, 可将 R_5 短接, 如图 1-17c 所示。则

$$R_{ab} = (R_1 // R_3) + (R_2 // R_4) = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} = \left(\frac{3 \times 6}{3 + 6} + \frac{6 \times 12}{6 + 12} \right) \Omega = 6\Omega$$

1.3.4 电阻电路的星-角变换

电阻的串、并联是电阻的最简单连接方式。电桥电路是一种特殊的连接方式, 电桥平衡

时, 电路计算还是简单的, 当电桥不平衡时, 仅仅依靠电阻的串、并联化简就显得束手无策。利用电路的星形联结与三角形联结之间的等效变换可以轻松分析电桥不平衡时的电阻电路。

图 1-18a 所示电路中, 三个电阻的三个端子连接在一起, 另三个端子与外电路相连, 这种连接方式叫做星形 (Y) 联结。图 1-18b 所示电路中, 三个电阻顺序连接成一个三角形后, 其连接点引出三条端线与外电路相连, 这种连接方式叫做三角形 (Δ) 联结。

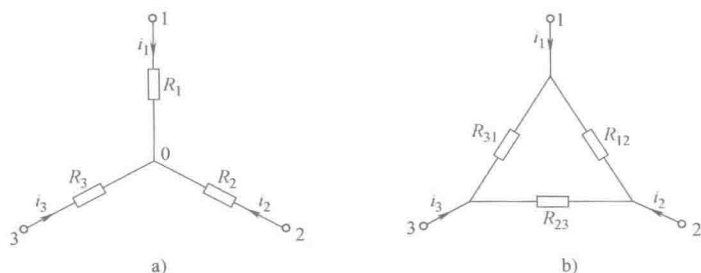


图 1-18 Y 联结和 Δ 联结的等效变换

a) Y 联结 b) Δ 联结

电阻的星形和三角形联结可以等效变换, 等效变换的条件是在相同的端口电压作用下, 端口电流对应相等。由此可以推导出等效变换时参数的换算公式。

将 $Y \rightarrow \Delta$ 时, 有

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} \\ R_{23} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} \\ R_{31} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

显然, 当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$ 时, $R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta} = 3R_Y$ 。

将 $\Delta \rightarrow Y$ 时, 有

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 &= \frac{R_{23} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 &= \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

同理, 当 $R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta}$ 时, $R_1 = R_2 = R_3 = R_Y = \frac{1}{3}R_{\Delta}$ 。

例 1-6 求图 1-19a 所示桥形电路的总电阻 $R_{①②}$ 。

解: 将连接点 ①、③、④ 内的 Δ 联结电路用等效 Y 联结电路代替, 得到图 1-19b 所示电路, 其中

$$R_2 = \frac{14 \times 21}{14 + 14 + 21} \Omega = 6 \Omega$$

$$R_3 = \frac{14 \times 14}{14 + 14 + 21} \Omega = 4 \Omega$$

$$R_4 = \frac{14 \times 21}{14 + 14 + 21} \Omega = 6 \Omega$$

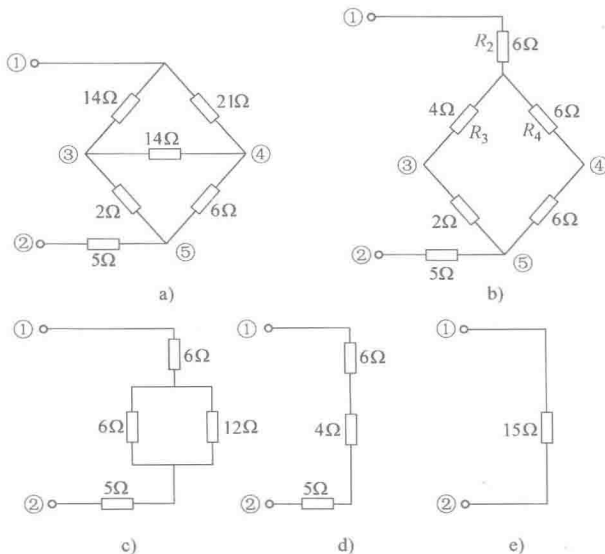


图 1-19 例 1-6 图

然后用串、并联的方法，得到图 1-19c、d、e 所示电路，从而求得

$$R_{①②} = 15 \Omega$$

另一种方法是用 Δ 联结电路来代替连接点 ①、④、⑤ 内的 Y 联结电路。

1.4 电压源与电流源

电源是能将其他形式能量转换成电能的装置，称之为有源元件。实际电源有电池、发电机、信号源等。电压源和电流源是从实际电源抽象得到的电路模型，它们都是二端有源元件。

1.4.1 电压源模型

电压源是理想电压源的简称。理想电压源两端的电压值是一个定值 U_s 或者一定的时间函数 $u_s(t)$ ，与流过它的电流无关；而流过的电流由所连接的外电路决定。理想电压源在电路中的图形符号如图 1-20a 所示。

当 $u_s(t)$ 为恒定值时，这种电压源称为恒定电压源或直流电压源，用 U_s 表示。图 1-20b 是直流电压源的伏安特性曲线，它不随时间改变而改变。当 $u_s(t)$ 随时间改变时，这条平行于电流轴的直线也将随之平移其位置。

通常电压源的电压和通过电压源的电流的参考方向取

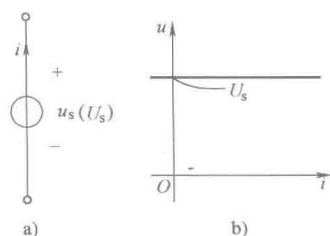


图 1-20 理想电压源及其伏安特性曲线