

电工学

Electrotechnology

主编 高艳萍



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电工学

Electrotechnology

主 编 高艳萍

副主编 宋金岩 庞洪帅 郝立颖

参 编 蔡克卫 赵云丽 袁 帆



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以模块的形式,系统地介绍了电路基础、正弦交流电路、电气设备、常用电器及电气控制技术、供电与安全用电、半导体元件与基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路和模拟量与数字量的相互转换等相关知识。本着面向应用、面向发展的原则,着重培养和提高学生和技術人员的观察问题、分析问题和解决问题的能力。

本书可作为大专院校非电类各专业电工学课程教材,还可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工学/高艳萍主编. —北京:中国电力出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-5123-9408-7

I. ①电… II. ①高… III. ①电工学 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 118394 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:杨淑玲 责任印制:蔺义舟 责任校对:常燕昆

汇鑫印务有限公司印刷·各地新华书店经售

2016 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·23.25 印张·567 千字

定价:49.80 元(含习题册)

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书依据教育部电工学课程指导组拟定的非电类电工、电子技术系列课程教学基本要求，针对目前非电类电工学课程教学现状并结合编者多年教学和实践经验以及教学改革成果而编写。全书共分 11 个模块，分别为电路基础、正弦交流电路、电气设备、常用电器及电气控制技术、供电与安全用电、半导体元件与基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路和模拟量与数字量的相互转换。每小节配有填空练习，帮助学生理解电工电子基本概念和基本理论知识，每单元配有检测题，帮助学生检查知识点掌握情况，每模块配有习题，加强学生对电工电子知识的理解与应用能力。

本书由大连海洋大学高艳萍任主编，并负责全书统稿工作，宋金岩、庞洪帅和郝立颖任副主编，蔡克卫、赵云丽参加部分内容编写工作。具体分工：高艳萍编写第 1、9、10 模块，庞洪帅编写第 2、8 模块，郝立颖编写第 3 模块，蔡克卫编写第 4 模块，赵云丽编写第 5、11 模块，宋金岩编写第 6、7 模块。陕西理工学院的袁帆参与了本书的部分编写工作。本书在编写过程中参阅了许多同类图书与文献资料，在此对这些图书和文献作者表示感谢。

本书配有电子版习题答案和教学课件，供教师、学生和自学者参考使用，如有需要，来信请发邮箱：769020591@qq.com 或 315429517@qq.com。

由于编者水平、时间与经验有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第1模块 电路基础	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电源的电路模型	1
1.1.2 受控源的电路模型	2
1.2 电路的基本物理量	2
1.3 电源的工作状态	7
1.3.1 有载状态	7
1.3.2 开路状态	7
1.3.3 短路状态	8
1.4 基尔霍夫定律	9
1.4.1 基尔霍夫电流定律	10
1.4.2 基尔霍夫电压定律	11
1.5 电路中电位的计算	13
1.6 电路的等效变换	14
1.6.1 电阻的串联与并联	15
1.6.2 电阻星形-三角形联结等效变换	16
1.6.3 电源的等效变换	18
1.7 支路电流法	20
1.8 叠加定理	21
1.9 戴维南定理	23
1.10 电路的暂态分析	24
1.10.1 储能元件	24
1.10.2 储能元件的换路定律	26
1.10.3 RC电路的暂态分析	28
1.10.4 RL电路的暂态分析	30
检测题	32
第2模块 正弦交流电路	36
2.1 正弦电压与电流	36
2.1.1 频率、周期与角频率	36
2.1.2 幅值与有效值	37
2.1.3 相位与相位差	37
2.2 正弦量的相量表示法	39
2.3 单一参数的交流电路	41
2.3.1 电阻元件的交流电路	41
2.3.2 电感元件的交流电路	42
2.3.3 电容元件的交流电路	44
2.4 RLC串联交流电路	46
2.5 阻抗的串联与并联	49
2.5.1 阻抗的串联	49
2.5.2 阻抗的并联	50
2.6 电路中的谐振	51
2.6.1 串联谐振	51
2.6.2 并联谐振	52
2.7 功率因数的提高	54
2.8 非正弦周期电压和电流	56
2.9 三相交流电路	57
2.9.1 三相电源	57
2.9.2 三相负载及其联结方式	59
2.9.3 三相功率	63
检测题	64
第3模块 电气设备	67
3.1 磁路分析基础	67
3.1.1 磁场的基本物理量	67
3.1.2 物质的磁性能	68
3.1.3 磁路的分析方法	70
3.2 变压器	73
3.2.1 变压器的基本结构	74
3.2.2 变压器的工作原理	74
3.2.3 变压器的外特性	77
3.2.4 变压器的技术数据	77
3.2.5 变压器的损耗与效率	78
3.2.6 特殊变压器	79
3.2.7 变压器的绕组极性	81
3.3 电磁铁	82

3.4 三相异步交流电动机	84	4.2.2 两地控制电路	127
3.4.1 三相异步交流电动机的 基本结构	84	4.3 笼型异步电动机正反转控制 电路	128
3.4.2 三相异步交流电动机的 工作原理	87	4.3.1 互锁原理	128
3.4.3 三相异步交流电动机的 电路分析	89	4.3.2 笼型电动机正反转工作原理	128
3.4.4 三相异步交流电动机的 铭牌数据	90	4.4 行程控制	129
3.4.5 三相异步交流电动机的转矩 与机械特性	92	4.5 时间控制	131
3.4.6 三相异步交流电动机的起动	96	4.6 应用举例	133
3.4.7 三相异步交流电动机的调速	98	4.7 可编程控制器 (PLC)	136
3.4.8 三相异步交流电动机的制动	99	4.7.1 硬件系统	136
3.5 单相异步交流电动机	101	4.7.2 内部资源	141
3.5.1 单相异步交流电动机的结构	101	4.7.3 PLC 寻址方式	144
3.5.2 单相异步交流电动机的磁场	103	4.8 PLC 程序设计	146
3.5.3 常用的单相异步交流电动机	104	4.8.1 程序结构	146
3.6 直流电动机	106	4.8.2 编程语言	146
3.6.1 直流电动机的结构	106	4.8.3 指令系统	148
3.6.2 直流电动机的工作原理	107	4.8.4 举例说明	162
3.6.3 直流电动机的分类	108	检测题	165
3.7 控制电机	109	第5模块 供电与安全用电	167
3.7.1 伺服电动机	110	5.1 工业企业用电	167
3.7.2 步进电机	112	5.1.1 发电、输电系统概述	167
检测题	115	5.1.2 工业企业供配电	169
第4模块 常用电器及电气控制技术 ..	119	5.2 安全用电	171
4.1 常用低压电器	119	5.2.1 触电的种类与危害	171
4.1.1 低压电器的分类	119	5.2.2 安全用电措施	173
4.1.2 组合开关	120	5.2.3 触电的急救措施	176
4.1.3 熔断器	120	5.2.4 电气设备的防火防爆	176
4.1.4 低压断路器	122	5.3 节约用电	176
4.1.5 接触器	123	检测题	177
4.1.6 继电器	125	第6模块 半导体元件与基本放大 电路	178
4.1.7 按钮	126	6.1 半导体元件的导电特性	178
4.2 笼型异步电动机直接起动控制 电路	126	6.1.1 本征半导体	178
4.2.1 自锁原理	126	6.1.2 杂质半导体	178
		6.1.3 PN 结	179
		6.2 半导体二极管	181
		6.2.1 基本结构和类型	181
		6.2.2 伏安特性	181

6.2.3 主要参数	182	7.1.2 电压传输特性和主要参数	224
* 6.2.4 特种二极管	183	7.1.3 理想运算放大器及其分析 依据	225
6.3 稳压二极管	185	7.2 放大电路中的负反馈	226
6.4 双极型晶体管	186	7.2.1 反馈的基本概念	226
6.4.1 基本结构和类型	186	7.2.2 反馈的判断	227
6.4.2 工作原理	186	7.2.3 负反馈对放大电路工作性能的 影响	228
6.4.3 特性曲线	190	7.2.4 分立元件放大电路中的负 反馈	229
6.4.4 主要参数	191	7.3 集成运放在信号运算方面的 应用	231
6.4.5 晶体管的微变等效电路模型	192	7.3.1 比例运算	231
6.5 共射放大电路的组成	194	7.3.2 加法运算	232
6.5.1 放大电路概述	194	7.3.3 减法运算	233
6.5.2 共射放大电路的组成	194	7.3.4 积分运算	234
6.5.3 放大电路的主要性能指标	195	7.3.5 微分运算	234
6.5.4 放大电路的工作原理	196	7.4 运算放大器在信号处理方面的 应用	235
6.6 共射放大电路的分析	197	* 7.4.1 有源滤波器	235
6.6.1 静态分析	197	7.4.2 电压比较器	238
6.6.2 动态分析	199	7.5 运算放大器在波形产生方面的 应用	240
6.7 晶体管的基本放大电路	200	7.5.1 RC 正弦波振荡电路	240
6.7.1 分压偏置放大电路	200	7.5.2 矩形波发生器	241
6.7.2 共集放大电路	203	7.6 使用运算放大器应注意的 问题	243
* 6.7.3 共基放大电路	205	7.6.1 选择元件	243
6.7.4 多级放大电路	207	7.6.2 调零和消振	243
6.8 差分放大电路	209	7.6.3 保护	243
6.8.1 静态分析	209	检测题	244
6.8.2 动态分析	210	第8模块 直流稳压电源	247
6.9 功率放大电路	211	8.1 整流电路	247
6.9.1 功率放大电路的概述	211	8.1.1 单相半波整流电路	247
6.9.2 互补对称放大电路	212	8.1.2 单相桥式整流电路	248
6.10 场效应晶体管及其放大电路 ..	214	8.2 滤波电路	249
6.10.1 基本类型和结构	214	8.2.1 电容滤波电路	250
6.10.2 工作原理	215	8.2.2 电感滤波电路	251
6.10.3 特性曲线	216		
6.10.4 主要参数	217		
6.10.5 场效应晶体管的放大电路	217		
检测题	220		
第7模块 集成运算放大器	223		
7.1 集成运算放大器简介	223		
7.1.1 集成运放的组成	223		

8.2.3 复式滤波电路	251
8.3 直流稳压电源	252
8.3.1 稳压二极管稳压电路	252
8.3.2 集成稳压电路	252
8.4 晶闸管可控整流电路	253
8.4.1 晶闸管	253
8.4.2 可控整流电路	255
检测题	256
第9模块 门电路与组合逻辑电路	258
9.1 基本逻辑运算	258
9.1.1 逻辑与	258
9.1.2 逻辑或	259
9.1.3 逻辑非	259
9.1.4 组合逻辑运算	259
9.2 TTL 门电路	261
9.2.1 TTL 与非门电路	261
9.2.2 TTL 三态与非门电路	262
* 9.2.3 TTL 或非门	262
* 9.2.4 TTL 与或非门	263
* 9.2.5 TTL 异或门	263
9.3 CMOS 逻辑门电路	264
9.3.1 CMOS 非门电路	264
9.3.2 CMOS 与非门电路	264
9.3.3 CMOS 或非门电路	265
9.4 组合逻辑电路的分析与设计	265
9.4.1 逻辑函数	265
9.4.2 组合逻辑电路的分析	267
9.4.3 组合逻辑电路的设计	268
9.5 加法器	270
9.5.1 半加器	270
9.5.2 全加器	270
9.6 编码器	271
9.6.1 二十进制编码器	272
9.6.2 优先编码器	273
9.7 译码器	274
9.7.1 二进制译码器	274
9.7.2 二十进制显示译码器	275
检测题	277

第10模块 触发器与时序逻辑电路	281
10.1 双稳态触发器	281
10.1.1 RS 触发器	281
10.1.2 主从型 JK 触发器	283
10.1.3 维持阻塞型 D 触发器	285
10.2 寄存器	286
10.2.1 数码寄存器	286
10.2.2 移位寄存器	287
10.3 计数器	288
10.3.1 四位二进制同步加法计数器	288
10.3.2 四位二进制异步加法计数器	289
10.3.3 同步十进制加法计数器	290
10.4 555 集成定时器	292
10.4.1 555 集成定时器工作原理	292
10.4.2 单稳态触发器	293
10.4.3 无稳态触发器	294
检测题	295
第11模块 模拟量与数字量的相互转换	299
11.1 D/A 转换器	299
11.1.1 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	299
11.1.2 集成 D/A 转换器介绍	301
11.1.3 D/A 转换器的主要技术指标	302
11.2 A/D 转换器	303
11.2.1 逐次逼近型 A/D 转换器	303
11.2.2 集成 A/D 转换器介绍	305
11.2.3 A/D 转换器的主要技术指标	306
11.3 应用举例	306
检测题	309
附录	310
附录 A 半导体分立器件型号命名方法	310
附录 B 常用半导体分立器件参数与型号	311
附录 C 电阻器的标称阻值标示方法	312
参考文献	314

第1模块 电路基础

【内容提要】 本模块在学习电路模型、电路的基本物理量、电源的工作状态、基尔霍夫定律和电路中电位的计算等电路基本概念和基本定律的基础上，提出电阻的等效变换、电源的等效变换、支路电流法、节点电压法、叠加定理和戴维南定理等电路分析方法，并以 RC 电路和 RL 电路为例介绍了电路的暂态分析，这些电路基础知识是学好电工学的基础。

1.1 电路和电路模型

电路是为完成某种功能而设计为电流提供通路的电系统。电系统与人们的工作和生活息息相关，例如工业企业或民用供电系统和收音机、电视机等信号系统。供电系统的作用是实现电能的传输和转换，信号系统的作用是实现信号的传递和处理，虽然两种电路的作用不同，但是它们都由电源（或信号源）、负载和中间环节组成。由于电路中的电压和电流是电源（或信号源）产生的，所以将电源（或信号源）形象地称为激励，激励推动电路工作产生的电压和电流称为响应，所谓电路分析，就是已知电源（或信号源）的电压和电流的前提下，讨论电路中激励与响应之间的关系。

生活中常用的手电筒是一个简单的实际电路，如图 1.1-1 所示，该电路由干电池、小灯泡、开关和导线组成。

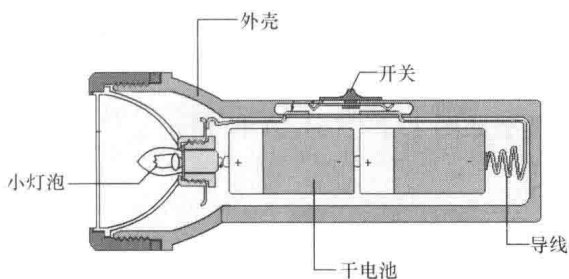


图 1.1-1 手电筒实际电路

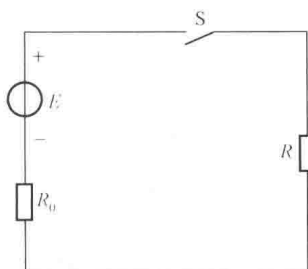


图 1.1-2 手电筒的电路模型

在一定的条件下，用理想电路元件来模拟实际电路部件和器件，将实际电路主要的电磁性质反映出来称为电路建模。图 1.1-2 所示为手电筒的电路模型。电珠是电阻元件，其参数为电阻 R ；干电池是电源，其参数为电动势 E 和内电阻（简称内阻） R_0 。连接导线是连接干电池与电珠的中间环节（还包括开关）。今后教材中分析的都是电路模型，简称电路。在电路图中，各种电路元器件用规定的图形符号表示。

1.1.1 电源的电路模型

实际的电源是一种可以将非电能转换为电能的器件，例如电池能将化学能或光能转化为电能，发电机能将机械能转化为电能，电压源和电流源是实际电源的两种电路模型如图

1.1-3 所示。

电压源的端电压随时间周期性变化且在一个周期内的平均值为零的电压源,称为交流电压源,常用小写字母 u_s 表示。端电压保持恒定值不变的电压源,称为直流电压源或恒定电压源,常用大写字母 U_s 表示,当直流电压源为电池时用大写字母 E 表示。电流源的电流随时间周期性变化且在一个周期内的平均值为零时称为交流电流源,常用小写字母 i_s 表示,电流源的电流保持恒定值不变时称为直流电流源或恒流源,常用大写字母 I_s 表示。

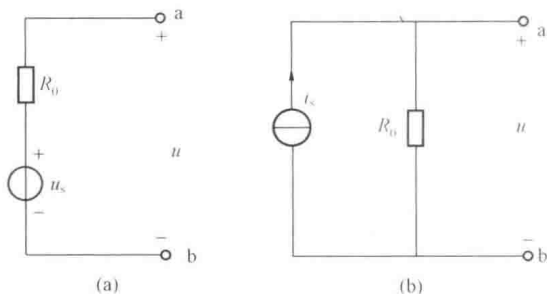


图 1.1-3 电压源和电流源电路模型

1.1.2 受控源的电路模型

在电路分析时常遇到另一种类型的电源,电压源的电压或电流源的电流由电路中其他支路或元件的电流或电压控制,这种电源称为受控电压源或受控电流源(统称受控源),也称非独立电压源或非独立电流源(统称非独立电源)。受控源实际电路是晶体管、场效应晶体管和运算放大器等电子器件,受控源能表示出这些电子器件的内在特性。

非独立电源的电压或电流受其他支路电压或电流的约束,描述了电路中支路或元件电压和电流之间的关系,由于控制量是电压或电流两种物理量,所以受控电压源分为电压控制电压源(VCVS)和电流控制电压源(CCVS)两种类型如图 1.1-4 (a)、(b) 所示,受控电流源也分为电压控制电流源(VCCS)和电流控制电流源(CCCS)两种类型如图 1.1-4 (c)、(d) 所示。

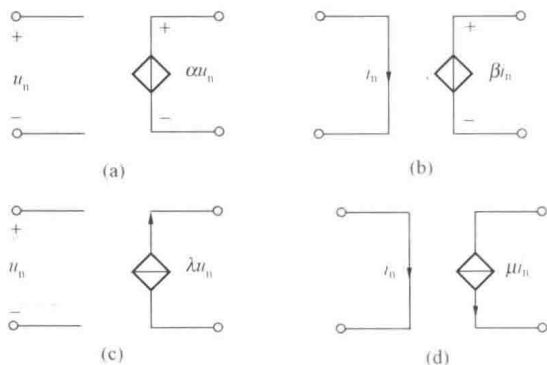


图 1.1-4 受控电压源和受控电流源电路模型
(a) VCVS; (b) CCVS; (c) VCCS; (d) CCCS

【填空练习】

1. 电路的作用: ①实现电能的(); ②实现信号的()。
2. 电路的组成部分分别为: ①(); ②(); ③()。

1.2 电路的基本物理量

图 1.1-2 所示是简单的直流电阻电路。当开关 S 闭合时电路中有电流通过,电阻 R 上将产生电压,它们是电路的基本物理量。电路分析时涉及的物理量还有电位、电动势、电功率和电能等。

电荷运动引起电的流动即电流,单位时间内通过导体横截面的电荷量 q 定义为电流,电流的计算公式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2-1)$$

当电流的大小和方向不随时间变化时,称为直流电流,用大写字母 I 表示;按国际单位

制电荷的单位为库仑 (C)，时间的单位为秒 (s)，电流的单位为安培 (A)。

正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向称为电流的方向，当分析较为复杂的直流电路时，往往很难判断某支路中电流的实际方向，虽然图 1.2-1 所示电路中电阻 R 的电流方向是判断不出来的，但是从图上可以看出电阻 R 流过电流的方向只有两种可能（除电流为零外），即从 a 端流向 b 端，或者从 b 端流向 a 端。如果能先假定某一个方向作为电流的方向，然后以假定方向为参考计算出电流值，电流值的正或负将是判断电流实际方向的依据。当电流大于零（正值）时，实际方向与假定的电流方向相同；当电流小于零（负值）时，实际方向与假定的电流方向相反。在分析计算直流电路时，任意假定的电流方向称为电流的参考方向。电流的参考方向用箭头表示，如图 1.2-2(a)或(b)所示。图 1.2-1 所示电路电阻 $R=2.5\text{k}\Omega$ 时，按照图 1.2-2(a)参考方向测得电流为 0.35mA ，说明电流实际方向与参考方向相同，即从 a 端流向 b 端；按照图 1.2-2(b)参考方向测得电流却是一 0.35mA ，说明电流实际方向与参考方向相反，电流实际方向仍然是从 a 端流向 b 端。电流参考方向是假定的，而已知直流电路中某一支路电流的实际方向却是客观存在的。

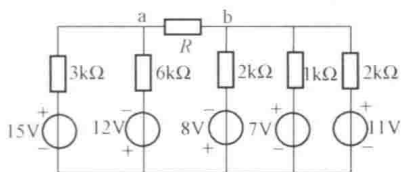


图 1.2-1 电流参考方向



图 1.2-2 电流参考方向表示方法

对于方向和大小均随时间变化的正弦交流电流，如果电流的实际方向与参考方向相同则为正值，即所谓正弦交流电的正半周；如果电流的实际方向与参考方向相反则为负值，即所谓正弦交流电的负半周。可见引入电流参考方向的概念，可以方便地表示出不同时刻交流电流的实际方向。

电荷的分离引起电场力做功即产生了电压，将单位正电荷由 a 点移至 b 点电场力所做的功定义为 a 、 b 两点间的电压 u ，计算公式为

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1.2-2)$$

将单位正电荷分别由 a 点或 b 点移至某一参考点电场力所做的功定义为 a 点或 b 点的电位用 V_a 或 V_b 表示， a 、 b 两点间的电压 u_{ab} 等于 a 、 b 两点间的电位差，即

$$u_{ab} = V_a - V_b$$

当电压的大小和方向不随时间变化时，称为直流电压，用大写字母 U 表示；按国际单位制若电荷的单位为库仑 (C)，功的单位为焦耳 (J)，则电压的单位为伏特 (V)。和电

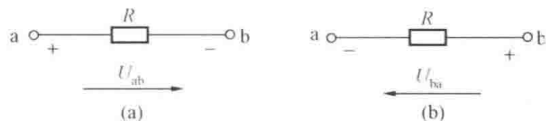


图 1.2-3 电压参考方向表示方法

流一样，电路中任意两点之间的电压也可假定参考方向或参考极性。在表达两点之间的电压时，用正极性 (+) 表示高电位，负极性 (-) 表示低电位，而正极指向负极的方向就是电压的参考方向。指定电压的参考方向后，电压也将有正负值之分，图 1.2-1 所示电路中电阻 R 的端电压的实际方向为 a 端指向 b 端 (a 端为高电位， b 端为低电位)，如果假定 a 端为高电位， b 端为低电位，如图 1.2-3(a)所示，那么 $U_{ab} > 0$ ；如果假定 b 端为高电位， a 端为低

电位, 如图 1.2-3(b)所示, 则 $U_{ba} < 0$ 。

对于方向和大小均随时间变化的正弦交流电压, 引入电压参考方向的概念后, 便可方便地表示出不同时刻电压的实际方向, 确定电压随时间变化的规律。电压参考方向可用正负极表示, 也可用箭头表示, 还可用双下标表示 (图 1.2-3)。

同一个元件的电流或电压的参考方向虽然是任意假定的, 但是电流和电压的参考方向存在必然的联系, 如果流过某一元件电流的参考方向是从电压参考极性的正极性端指向负极性端, 那么两者的参考方向是一致的, 这种电流和电压参考方向的选择称为关联参考方向, 由于电阻元件的电流总是从高电位端流向低电位端如图 1.2-4(a)所示, 所以电流和电压参考方向是关联的; 当两者不一致时, 称为非关联参考方向, 电源向负载供电时, 流过电源的电流总是从低电位端流向高电位端, 所以电流和电压参考方向是非关联的, 如图 1.2-4(b)所示。在电路分析时电流或电压的参考方向一般根据电路元件的性质 (负载或电源) 科学地选择。

对于线性电阻元件电压和电流在关联参考方向条件下, 欧姆定律的表达式为

$$I = \frac{U}{R} \text{ 或 } U = IR$$

当电压和电流为非关联参考方向时, 欧姆定律的表达式则为

$$I = -\frac{U}{R} \text{ 或 } U = -IR$$

【例 1.2-1】 在图 1.2-5 所示电路中, 已知 $U = -12\text{V}$, 求电流 I 。

解: 在图 1.2-5(a)中, U 和 I 为非关联参考方向。

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{-12}{8}\text{A} = 1.5\text{A}$$

在图 1.2-5 (b) 中, U 和 I 为关联参考方向

$$I = \frac{U}{R} = \frac{-12}{8}\text{A} = -1.5\text{A}$$

以上计算中公式本身的正、负号与物理量本身的正、负号是各自独立的, 既不能混淆也不能漏掉。

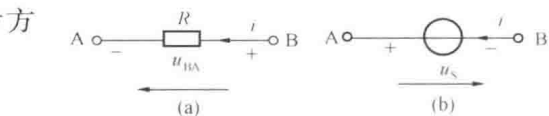


图 1.2-4 关联或非关联参考方向

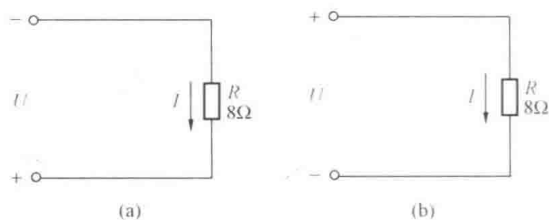


图 1.2-5 例 1.2-1 电路

电压和电流是有用的物理量, 而电力系统有效的输出却是功率和能量, 实际电气设备对功率是有限制的, 过载会使设备损坏而不能正常工作, 因此, 在电路分析中还经常计算功率和能量。

单位时间所做的功定义为功率 (p), 数学上的描述为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.2-3)$$

当时间的单位为秒 (s), 功的单位为焦耳 (J) 时, 功率的单位为瓦特 (W)。

电功率与电压和电流有着密切的关系。例如电阻元件, 当正电荷电压的正极性端经元件移到电压的负极性端时, 电场力对电荷做功, 此时电阻元件吸收能量; 对于电源元件, 当正

电荷从电压的负极性端经电源元件运动到电压的正极性端时, 电场力做负功, 电源元件向外释放电能。

电压与电流参考方向关联时的功率可以直接根据式(1.2-1)和式(1.2-2)定义的电压和电流推导出, 即

$$p = \frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{d\omega}{dq} \right) \left(\frac{dq}{dt} \right)$$

$$p = ui \quad (1.2-4)$$

式中, p 为元件功率; u 为电压; i 为电流。

式(1.2-4)表示任意电路元件的功率等于元件流过的电流和元件端电压的乘积如图1.2-6(a)所示; 当 p 大于零时, 表明该电路元件吸收或消耗功率; 当 p 小于零时, 表明该电路元件是发出或释放功率。若电流和电压参考方向非关联, 如图1.2-6(b)所示, 功率的计算式为

$$p = -ui$$

当 p 小于零时, 表明该电路元件是发出或释放功率; 当 p 大于零时, 表明该电路元件吸收或消耗功率。

通过以上分析可以知道, 无论电压与电流的参考方向是否关联, 元件的作用取决于发出还是吸收功率, 发出或释放功率的为电源, 吸收或消耗功率的为负载。

图1.2-6(a)所示电路电压和电流的参考方向是关联的, 如果 $i = -5\text{A}$, $u = 10\text{V}$, 那么

$$p = ui = 10\text{V} \times (-5)\text{A} = -50\text{W}$$

由于 $p < 0$, 所以框内电路发出或释放功率为 50W 。

如图1.2-6(b)所示电压和电流的参考方向是非关联的,

如果 $i = 5\text{A}$, $u = -10\text{V}$, 那么

$$p = -ui = -(-10\text{V}) \times 5\text{A} = 50\text{W}$$

由于 $p > 0$, 所以框内电路吸收或消耗功率为 50W 。

在 $t_0 \sim t$ 一段时间内电路元件吸收或释放的电能为

$$\omega(t) = \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau \quad (1.2-5)$$

由于 u 、 i 都是代数量, 能量 ω 和功率 p 一样也是代数量。当 $\omega > 0$ 时, 元件吸收电能; 当 $\omega < 0$ 时, 元件释放电能。

【例 1.2-2】 在图1.2-7所示电路中, 五个元件代表电源或负载。电流和电压的参考方向如图所示, 万用表测量各元件的电压和电流分别为

$$I_1 = -4\text{A}, \quad I_5 = 6\text{A}, \quad I_3 = 10\text{A}$$

$$U_1 = 140\text{V}, \quad U_2 = -80\text{V}, \quad U_3 = 60\text{V}, \quad U_4 = 30\text{V}, \quad U_5 = -90\text{V}$$

(1) 试标出各电流的实际方向和各电压的实际极性。

(2) 判断哪些元件是电源, 哪些元件是负载。

(3) 计算各元件的功率, 电源发出的功率和负载取用的功率是否平衡?

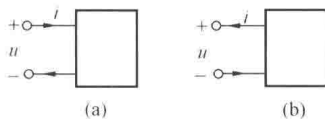


图 1.2-6 功率的计算

(a) $p = ui$; (b) $p = -ui$

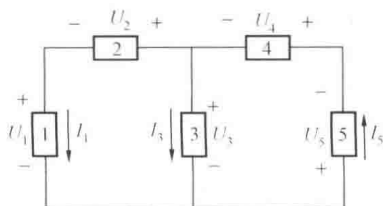


图 1.2-7 例 1.2-2 电路

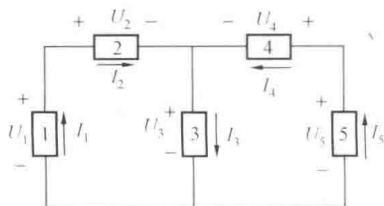


图 1.2-8 例 1.2-2 电流和电压实际方向

解：(1) 五个元件中电流和电压的实际方向可根据实验测量结果和已知参考方向确定：测量结果为正值时，实际方向与参考方向相同；测量结果为负值时，说明实际方向与参考方向相反。图 1.2-8 标出了各电流的实际方向和各电压的实际极性。

(2) 电压与电流实际方向相同的元件吸收电能为负载，电压与电流实际方向相反的元件释放电能为电源。

由此可知元件 1、5 为电源，2、3、4 为负载。

(3) 因为图 1.2-7 电路中各元件电压、电流为关联参考方向，故吸收的功率分别为

$$P_1 = U_1 I_1 = 140\text{V} \times (-4)\text{A} = -560\text{W}$$

$$P_2 = U_2 I_2 = (-80)\text{V} \times (-4)\text{A} = 320\text{W}$$

$$P_3 = U_3 I_3 = 60\text{V} \times 10\text{A} = 600\text{W}$$

$$P_4 = U_4 I_4 = 30\text{V} \times 6\text{A} = 180\text{W}$$

$$P_5 = U_5 I_5 = (-90)\text{V} \times 6\text{A} = -540\text{W}$$

电源发出的功率

$$\Sigma P_{\text{发}} = \Sigma P_1 + P_5 = 560\text{W} + 540\text{W} = 1100\text{W}$$

负载吸收的功率

$$\Sigma P_{\text{吸}} = \Sigma P_3 + P_2 + P_4 = 600\text{W} + 320\text{W} + 180\text{W} = 1100\text{W}$$

$$\Sigma P_{\text{吸}} = \Sigma P_{\text{发}}$$

【填空练习】

1. 电压或电流参考方向是()的，由于在直流电路中电压或电流的实际方向有()可能，所以当电压或电流的实际方向与参考方向相同时，其值()；当电压或电流的实际方向与参考方向相反时，其值()。

2. 根据电路中元件电压或电流的实际方向判别该元件是电源还是负载的方法为：当电压和电流实际方向相同时，该元件()功率，在电路中起()作用；当电压和电流实际方向相反时，该元件()功率，在电路中起()作用。

3. 根据电路中元件电压或电流的参考方向判别该元件是电源还是负载的方法为：当电压和电流参考方向关联时，该元件吸收功率 $p = ()\text{W}$ ，当 $p > 0$ 时，元件()功率为负载，当 $p < 0$ 时，元件()功率为电源；当电压和电流参考方向非关联时，该元件释放功率 $p = ()\text{W}$ ，当 $p > 0$ 时，元件()功率为负载，当 $p < 0$ 时，元件()功率为电源。

1.3 电源的工作状态

改变图 1.1-2 所示电路的工作条件, 电路的工作状态会发生变化使电源处于有载、开路和短路三种状态。

1.3.1 有载状态

图 1.3-1 所示电路中, 开关 S 闭合时电路中电源与负载接通形成闭合回路, 此时负载 R 中有电流流过, 电路中有电能的传输与转换, 电源处于有载运行状态, 此时电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (1.3-1)$$

负载两端的电压为

$$\begin{aligned} U &= RI \\ U &= E - R_0 I \end{aligned} \quad (1.3-2)$$

由式 (1.3-2) 可知, 电路接通状态时, 负载的端电压 U 总是小于电源的电动势 E , 这是由于电流通过电源内阻产生了电压降 $R_0 I$, 内阻压降等于 E 和 U 两者之差。电源内阻一般很小, 当 $R_0 \ll R$ 时, 可认为

$$U \approx E$$

在这种情况下, 电路中电流的变化对电源输出电压的影响不大, 表明电路中电压源带负载能力较强。

将式 (1.3-2) 两边同乘以 I , 得到方程式为

$$UI = EI - R_0 I^2 \quad (1.3-3)$$

设 $P = UI$ 为电源输出功率, $P_E = EI$ 为电源产生功率, $\Delta P = R_0 I^2$ 为电源内阻损耗的功率。式 (1.3-3) 表示的是电路功率的平衡式

$$P = P_E - \Delta P$$

所以任何一个电路在接通状态时, 电源产生的功率与负载取用的功率及内阻损耗功率总是平衡的, 即所谓的功率平衡, 电源给负载供电时, 负载通常是并联在电源两端, 如果电源输出电压不变, 随着并联负载个数的增加, 负载从电源取用的电流和功率也会随之增加, 虽然电源输出的功率和电流取决于负载的大小, 但是在电路分析与设计时应综合考虑电气设备的额定值。额定值是生产商为了保证电气设备安全可靠地运行规定的电压 U_N 、电流 I_N 和功率 P_N 的允许值, 一般标于电气设备的铭牌上, 额定值能反映出电气设备运行的安全性和能力。电气设备工作时的实际值不一定等于其额定值, 例如电源, 它的任务是给负载供电, 负载需要的电流和功率通常是变化的, 所以电源工作时的实际值不一定都等于其额定值, 但是不能超过额定值, 例如电动机运转时的实际电流和功率取决于电机轴上所带负载的大小, 随着所带负载变化时, 电动机的电流和功率也会随之变化, 当 $I = I_N$, $P = P_N$ 时, 电动机处于额定工作状态, 当 $I < I_N$, $P < P_N$ 时, 电动机处于欠载 (轻载) 工作状态, 这种情况是不经济的, 当 $I > I_N$, $P > P_N$ 时, 电动机处于过载 (超载) 工作状态, 这种情况是不允许的。一般电流和功率等参数只要接近且不超过额定值范围电气设备工作都是安全的。

1.3.2 开路状态

当开关 S 打开时, 图 1.3-2 所示电路没能构成闭合路径, 外接电阻相当于无穷大, 电路

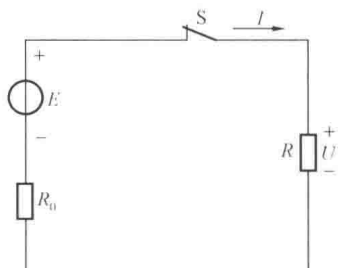


图 1.3-1 电源有载状态

中电流为零, 电源没有输出电流和功率而处于开路状态 (空载状态)。电源开路状态时电路具有如下特征

$$\begin{cases} I = 0 \\ U = U_0 = E \\ P = 0 \end{cases}$$

电路中某处断开时开路处的电流等于 0, 开路处电压应视具体电路而定。

1.3.3 短路状态

当电源两端由于特殊原因直接连在一起时如图 1.3-3 所示, 电流直接通过短路线返回电源, 不再流过负载, 此时电源被短接处于短路状态, 在这种状态下由于电流回路中只有电源内阻 R_0 , 电流必然很大, 故称短路电流 I_{sc} , 这时电源所发出的功率全部消耗在电阻 R_0 上, 短路电流 I_{sc} 能使电源过热而烧毁。

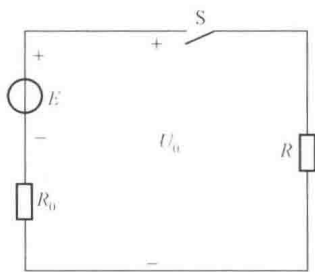


图 1.3-2 电源开路状态

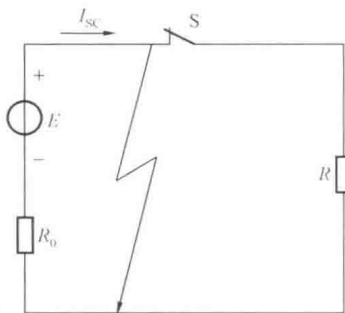


图 1.3-3 电源短路状态

电源短路时外电路的电阻为零, 电源的端电压也为零, 此时电源的电动势全部降在内阻 R_0 上, 电源短路状态时电路具有如下特征

$$\begin{cases} U = 0 \\ I = I_{sc} = \frac{E}{R_0} \\ P_E = \Delta P = R_0 I^2, P = 0 \end{cases}$$

由于接线不慎或线路绝缘磨损, 短路还可能会发生在电路任意位置或负载端, 电源短路通常是一种事故, 应尽量避免这样事故发生。为了防止短路事故, 多采取在实际电路中接入熔断器或自动断路器等短路保护措施, 一旦发生短路能迅速将故障电路与电源自动断开。有时需要将电路中某一部分或某一元件两端短接, 这与短路事故是完全不同的, 短接后两端电压为零, 短接处电流应视具体电路而定。

【例 1.3-1】 电路如图 1.3-4 所示, 设电压表的内阻为无穷大, 电流表的内阻为零。当开关 S 处于位置 1 时, 电压表的读数为 20 V; 当 S 处于位置 2 时, 电流表的读数为 10 mA。当 S 处于位置 3 时, 电压表和电流表的读数各为多少?

解: 当开关 S 处于位置 1 时, 电压表读数为 20 V, 可知该电源开路电压, 即该电源电动势 $E = 20 \text{ V}$ 。

当开关 S 处于位置 2 时, 电流表读数为 10 mA, 可知 $I = \frac{E}{R_0 + 2} = \frac{20}{R_0 + 2} = 10 \text{ mA}$, 电

源内阻 $R_0 = 0\Omega$ 。

当开关 S 处于位置 3 时，等效电路如图 1.3-5 所示。电压表和电流表的读数分别为

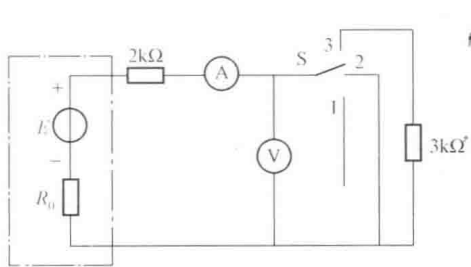


图 1.3-4 例 1.3-1 电路

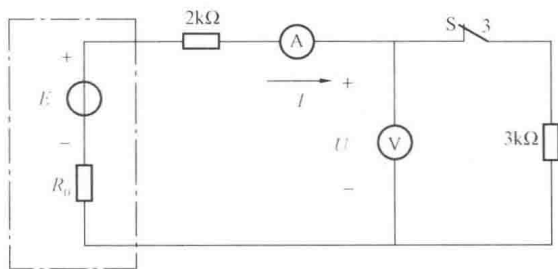


图 1.3-5 例 1.3-1 等效电路

$$I = \frac{E}{R_0 + 2 + 3} = \frac{20}{5} \text{mA} = 4 \text{mA}$$

$$U = E - I(R_0 + 2) = 20\text{V} - 4 \times (0 + 2)\text{V} = 12\text{V}$$

电压表读数为 12V，电流表的读数为 4mA。

【填空练习】

1. 电路中电源电动势 E ，内阻 R_0 ，当电路的工作条件发生变化时，电源分别处于（ ）、（ ）和（ ）三种状态，电源开路时， $I = ()$ ， $U = ()$ ， $P = ()$ ；电路中某处断开时的特征为开路处的电流等于（ ），该处电压（ ）；电源短路时 $I = ()$ ， $U = ()$ ， $P = ()$ ；为防止电源短路事故发生可在电源端串联（ ），起（ ）保护作用，电路中某处短路时的特征为短路处的电压等于（ ），该处电流（ ）。
2. 额定值能反映电气设备的（ ）；电气设备工作时的实际值不一定等于其额定值，电气设备实际运行分为（ ）、（ ）和（ ）三种状态。

1.4 基尔霍夫定律

实际电路总能建立起与之对应的电路模型，图 1.4-1 所示电路是由集总元件组成的电路模型，对于每一个集总元件来说电压与电流的关系体现了集总元件本身所具有的特性，这种关系称为元件的特性约束或电压与电流的关系（VCR）。在电路中每一个元件之间是相互连接的，元件之间在平面或空间上构成了特有的几何关系，为描述电路的几何关系引出下面几个常用的概念，电路中一个二端元件或若干个二端元件依次串联且流经相同电流的电路分支，称为支路。图 1.4-1 所示的电路中共有 6 条支路。电路中三个或三个以上支路的连接点，称为节点。图 1.4-1 所示的电路中①、②、③和④均为节点，该电路共有 4 个节点。电路中由若干个支路构成的闭合路径，称为回路。图 1.4-1 所示的电路中共有 6 个回路（请读者自行找出）。对于平面电路，其内部不含任何支路的回路称网孔。图 1.4-1 电路中共有三个网孔。电路元件之间的几何约束关系也称为拓扑关系，这类约束关系体现在电路的基本定律——基尔霍夫定律（Kirchhoff's Laws），基尔霍夫定律是分

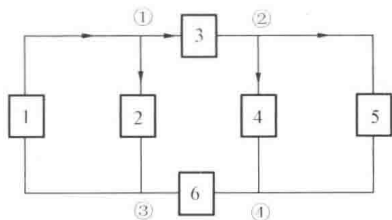


图 1.4-1 支路节点和回路