

“十二五”普通高等教育
电气信息类规划教材

电工基础(双语版)

王逸隆 主 编 高德欣 副主编

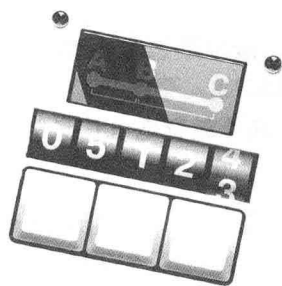


化学工业出版社

“十二五”普通高等教育
电气信息类规划教材

电工基础(双语版)

王逸隆 主 编 高德欣 副主编
姜学勤 马彩青 参 编



化学工业出版社
· 北京 ·

本书从最基本的科学定律(欧姆定律、基尔霍夫定律)入手,导入了电路分析的常用分析方法和分析工具。本书首先介绍电路的基本组成及基本概念和参量,然后结合基尔霍夫定律,辅以适量例题及习题介绍支路电流法、结点电压法、电源模型及等效变换、叠加定理和戴维南定理。暂态响应分析以一阶电路为主,详细分析其三种响应模式。交流电路分析以电容和电感的交流特性为基础,分析了RLC串并联电路的正弦稳态响应及其功率计算方法,还对三相电路原理、三相异步电动机的原理及控制做了详细介绍。本书注重理论与实践相结合,采取中英文对照的方式,强化学生的专业英文能力,为后续课程学习及深造打下良好基础。

本书可作为高等院校电子信息类、电气类、计算机类等相关专业师生的中英文双语教学用书,也可作为从事电子技术、电气工程、通信工程领域的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工基础(双语版)/王逸隆主编. —北京:化学工业出版社, 2013. 12

“十二五”普通高等教育电气信息类规划教材

ISBN 978-7-122-19068-0

I. ①电… II. ①王… III. ①电工学-双语教学-高等学校-教材-汉、英 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第278167号

责任编辑:郝英华

文字编辑:吴开亮

责任校对:边涛

装帧设计:杨北

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张16¼ 字数421千字 2013年12月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

“电工技术基础”是高等院校电子信息类、电气类、计算机类等相关专业的技术基础课，它的主要任务是为学生学习专业知识和从事工程技术工作打好电工技术的理论基础，并使其受到必要的基本技能的训练。为此，编者在本书中对基本理论、基本定律、基本概念及基本分析方法都作了详细阐述，并通过实例、例题和习题来说明理论的实际应用，以此来加深学生对理论的掌握和理解，并使之了解电工技术的发展与生产发展之间的密切关系。

近年来，随着科学技术的迅猛发展，新知识也急剧膨胀。高等院校的教学观念也做出了相应调整：学习者要由被动学习转化到主动学习，教学者要做学习过程的引导者、促进者、支持者。为了适应这个变革和满足在校生以及校外自学者的需要，本书作为一门基础的双语课程教学用书，特对传统内容进行了精选，保证了必需的常用知识，删去了一些不常用的和陈旧的知识。全书共7章，主要包括电路的基本概念和基本定律、电路分析的方法、电路的暂态分析、正弦交流电路、三相电路、变压器与电动机、继电接触器控制系统。

考虑到与普通物理课的分工，本书对传统电工技术基础的内容做了相应删减，避免了不必要的重复。但有些内容如欧姆定律、磁路的基本概念等，虽然已在普通物理课程中讲过，但是为了加强理论的系统性和满足电工技术的要求，仍列入本书中并被扩展。

本书内容详尽，表述浅显易懂，有利于学生自学使用，教师在讲授时也可灵活安排，一般应视专业的需要、学时的多少和学生的实际水平而决定所授内容的取舍。有些内容可以让学生通过自学掌握，不必全在课堂讲授。学生通过大量的练习巩固基础知识，拓宽思路，能更好地掌握电工技术的基础知识和提高分析问题和解决问题的能力。

本书配套的电子课件可免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要，请发送邮件至 cipedu@163.com 索取。

由于编者能力有限，书中有些内容难免不够妥善，希望读者批评指正，以便今后修订提高。

编 者
2013 年 11 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路的组成及作用	1
1.1.1 电路的组成及其模型	1
1.1.2 电流、电压及其参考方向	2
1.1.3 电位	3
1.2 电路的工作状态	5
1.2.1 额定值与实际值	5
1.2.2 电路的工作状态	5
1.2.3 最大功率传输	8
1.3 电路的基本元件	9
1.3.1 无源元件	9
1.3.2 独立电源 (元件)	12
1.3.3 受控电源	14
1.4 基尔霍夫定律及应用	15
1.4.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)	15
1.4.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)	17
1.4.3 基尔霍夫定律的基本应用	18
第 2 章 电路分析的方法	21
2.1 支路电流法	21
2.2 结点电压法	23
2.3 电阻的串并联分析	23
2.3.1 等效变换的概念	23
2.3.2 电阻的串并联	24
2.4 电源的两种模型及其等效变换	26
2.4.1 电压源模型	26
2.4.2 电流源模型	27
2.4.3 电源两种模型之间的等效变换	27
2.5 叠加定理	30
2.6 戴维南定理与诺顿定理	32
2.6.1 戴维南定理	32
2.6.2 诺顿定理	34
第 3 章 电路的暂态分析	37
3.1 暂态过程及换路定则	37
3.1.1 暂态过程	37
3.1.2 换路定则及初始值的确定	37
3.1.3 一阶线性微分方程	40
3.2 RC 电路的响应	41
3.2.1 RC 电路的零输入响应	41
3.2.2 RC 电路的零状态响应	42
3.2.3 RC 电路的全响应	45
3.3 一阶线性电路暂态分析的三要素法	45
3.4 RL 电路的响应	47
3.4.1 RL 电路的零输入响应	47
3.4.2 RL 电路的零状态响应	48
3.4.3 RL 电路的全响应	48
第 4 章 正弦交流电路	51
4.1 正弦交流电路的基本概念	51
4.1.1 正弦量的三要素	51
4.1.2 正弦量的相量表示法	53
4.2 单元件的正弦交流电路	55
4.2.1 电阻元件的正弦交流电路	55
4.2.2 电感元件的正弦交流电路	56
4.2.3 电容元件的正弦交流电路	58
4.3 电路定律的相量形式	60
4.4 简单正弦交流电路的分析	61
4.4.1 正弦交流电路的阻抗	61
4.4.2 正弦交流电路的功率	64
4.4.3 功率因数的提高	65
第 5 章 三相电路	67
5.1 三相电压	67
5.2 负载星形连接的三相电路	69
5.3 负载三角形连接的三相电路	72
5.4 三相功率	74
第 6 章 变压器与电动机	76
6.1 磁路的分析方法	76
6.2 变压器	77
6.2.1 变压器的工作原理	78
6.2.2 变压器的运行特性	80
6.2.3 特殊变压器	81
6.3 三相异步电动机	82
6.3.1 三相异步电动机的构造	82
6.3.2 三相异步电动机的工作原理	83
6.3.3 三相异步电动机的机械特性	86
6.3.4 三相异步电动机的运行特性	88
6.3.5 三相异步电动机的使用	92
第 7 章 继电接触器控制系统	94
7.1 常用低压电器	94
7.1.1 刀开关和熔断器	94
7.1.2 自动开关	96
7.1.3 交流接触器	96
7.1.4 热继电器和时间继电器	98

7.1.5 按钮和行程开关	99
7.2 电气系统的基本控制环节	100
7.2.1 点动和长动控制	100
7.2.2 电动机的正反转控制	102
7.3 应用举例	103
7.3.1 笼型电动机能耗制动的控制 线路	104
7.3.2 加热炉自动上料控制线路	104
习题	106
部分习题参考答案	120
常见术语中英对照	122

Chapter 1 Basic concepts and laws of the electronic circuit

1.1 The circuit composition and role	125
1.1.1 Compositions of electronic circuit and model	125
1.1.2 The current, the voltage and their reference directions	126
1.1.3 Electric potential	128
1.2 Electrical circuit operating modes	130
1.2.1 The rated value and the actual value	130
1.2.2 The operation mode of the circuit	131
1.2.3 Maximum power transmission	134
1.3 Basic circuit components	136
1.3.1 Passive components	136
1.3.2 Independent power supply (components)	139
1.3.3 Dependent power sources	141
1.4 Kirchhoff's law and applications	143
1.4.1 Kirchhoff's current law (KCL)	143
1.4.2 Kirchhoff's voltage law (KVL)	145
1.4.3 Basic applications of Kirchhoff's law	146

Chapter 2 The circuit analysis methods

2.1 Branch current method	149
2.2 Node-voltage method	151
2.3 The series connection and the parallel connection of resistors	152
2.3.1 The concept of equivalent transformation	152
2.3.2 The resistors series connection and	

parallel connection	152
2.4 The power source models and equivalent transformation	155
2.4.1 Voltage source model	155
2.4.2 Current source model	156
2.4.3 The power source models and transformations	156
2.5 The superposition theory	160
2.6 The Thevenin theorem and the Nortons theorem	162
2.6.1 The Thevenin theorem	162
2.6.2 Nortons theorem	164

Chapter 3 The transient state analysis

3.1 The transient process and the switching theory	168
3.1.1 The transient process	168
3.1.2 The switching rule and the initial value determination	169
3.1.3 The first order linear differential equation	172
3.2 RC circuit responses	173
3.2.1 The zero-input response of the RC circuit	173
3.2.2 RC circuit zero state response	175
3.2.3 RC circuit complete response	177
3.3 The three-element method of the first order linear circuit transient response analysis	178
3.4 RL circuit transient response	180
3.4.1 RL circuit zero input response	180
3.4.2 RL circuit zero state response	181
3.4.3 RL circuit complete response	181

Chapter 4 The sinusoidal alternating current (AC) circuit

4.1 Basic concepts of the sinusoidal alternating current (AC) circuit	184
4.1.1 Three elements of the sinusoidal quantity	184
4.1.2 The phasor representation method of the sine function	187
4.2 Single-component sinusoidal AC circuit	189
4.2.1 The sinusoidal AC circuit for the resistor	190
4.2.2 The sinusoidal AC circuit for the inductor	191

4. 2. 3	The sinusoidal AC circuit for the capacitor	193	6. 3. 2	The three-phase asynchronous motor fundamentals	223
4. 3	The phasor form of the circuit laws	195	6. 3. 3	The mechanical characteristics of the three-phase asynchronous motor	227
4. 4	The analysis of the simple sinusoidal AC circuit	196	6. 3. 4	The operation characteristics of the three-phase asynchronous motor	229
4. 4. 1	The impedance of the sinusoidal AC circuit	197	6. 3. 5	Three-phase asynchronous motor's usage	234
4. 4. 2	Power of the sinusoidal AC circuit	199			
4. 4. 3	The enhancement of the power factor	201	Chapter 7	The relay contact device control system	237
Chapter 5	Three-phase circuit	203	7. 1	The ordinary low-voltage control apparatus	237
5. 1	Three -phase voltage	203	7. 1. 1	The knife switch and the fuse ...	237
5. 2	Three-phase circuit with the star connection load	206	7. 1. 2	Automatic switch	239
5. 3	The load triangular connection of the three-phase circuit	210	7. 1. 3	The AC contactor	240
5. 4	Three-phase circuit power	212	7. 1. 4	Thermorelay and time relay	242
Chapter 6	The transformer and electric motor	214	7. 1. 5	Buttons and the position switches	244
6. 1	The analysis method of the magnetic circuit	214	7. 2	Basic control units of the electrical system	245
6. 2	The transformer	216	7. 2. 1	Point start and long dynamic control	245
6. 2. 1	The operation fundamental of the transformer	216	7. 2. 2	The motor control and reversing	246
6. 2. 2	The transformer's operating character	220	7. 3	Applicable instances	249
6. 2. 3	Special transformers	221	7. 3. 1	The dynamic braking control circuit for caged type motor	249
6. 3	Three-phase asynchronous electrical motor	222	7. 3. 2	The heat furnace automatic material loading control circuit ...	249
6. 3. 1	The structure of the three-phase asynchronous electrical motor structure	223	参考文献		251

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

1.1 电路的组成及作用

1.1.1 电路的组成及其模型

(1) 电路的组成

电路是电流的通路，它是根据不同需要由某些电工设备或元件按一定方式组合而成的，包括电源或信号源、中间环节和负载。

电能或电信号的发生器（信号源）即电源。如图 1.1.1(a) 所示电力系统。

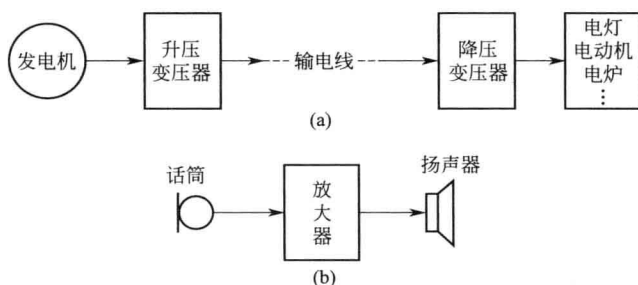


图 1.1.1 电路示意图

发电机是电源，是供应电能的，它可以将热能、水能或核能等转换为电能。电池也是常用的电源，可将化学能或光能转化为电能。电压和电流是在电源的作用下产生的，因此，电源又称为激励源，也称输入。

用电设备称为负载，如电灯、电炉、电动机和电磁铁等用电器取用电能是负载，它们分别将电能转换成光能、热能、机械能和磁场能等。由激励在电路中（包括负载）各处产生的电流和电压称为响应，也称为输出。

(2) 电路的作用

电路的构成形式多种多样，其作用可归纳为以下两大类。

- ① 电能的传输和转换，如图 1.1.1(a) 所示的电力系统。
- ② 信号的传递和处理，如图 1.1.1(b) 所示的收音机电路。

(3) 电路模型

电路理论讨论的电路不是实际电路而是它们的电路模型。为了便于对实际电路进行分析和用数学描述，将实际电路元件理想化（或称模型化），用理想电路元件（电阻、电感、电容等）及其组合模拟替代实际电路中的器件，则这些由理想电路元件组成的电路即为实际电路的电路模型。在电路模型中，各理想元件的端子用“理想导线”（其电阻为零）连接起来。

用理想电路元件及其组合模拟替代实际器件即为建模。电路模型要把给定工作条件下的主要物理现象及功能反映出来。例如白炽灯，当其通有电流时，除主要具有消耗电能的性质（电阻性）外，还产生磁场，即也具有电感性，但电感微小到可忽略不计，因此白炽灯的模型可以是一电阻元件。又如一个线圈，在直流情况下的模型可以是一电阻元件，在低频情况

下其模型要用电阻和电感的串联组合代替。可见,在不同的条件下,同一实际器件可能要用不同的电路模型。

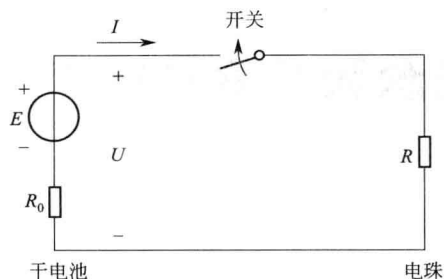


图 1.1.2 实际电路与电路模型示例

模型选取得恰当,电路的分析计算结果就与实际情况接近,反之误差会很大甚至出现矛盾的结果。本书不讨论建模问题。本书所说的电路一般均指实际电路的电路模型,电路元件也是理想电路元件的简称。

一个简单的实际手电筒电路的电路元件有干电池、电珠、开关和筒体,电路模型如图 1.1.2 所示。干电池是电源元件,用电动势 E 和内电阻 (简称内阻) R_0 的串联来表示;电珠是电阻元件,用参数 R 表示;筒体和开关是中间环节,连接干电池与电珠,

开关闭合时其电阻忽略不计,认为是一无电阻的理想导体。

1.1.2 电流、电压及其参考方向

电路中的物理量主要有电流 $i(I)$ 、电压 $u(U)$ 、电动势 $e(E)$ 、功率 $p(P)$ 、电能量 $w(W)$ 、电荷 $q(Q)$ 、磁通 Φ 和磁链 Ψ 。在分析电路时,要用电压或电流的正方向导出电路方程,但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,故需要指定其参考方向。

(1) 电流

电流是电荷有规则地定向运动形成的,在数值上电流等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \left(i = \frac{dq}{dt} \right)$$

若电流 i 不随时间变化,则称为直流电流,常用大写字母 I 表示。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的实际方向,它是客观存在的。但电流的实际方向往往是未知的或变动的,故在分析计算电路时,先任意选定 (假定) 某一方向为电流的正方向,这一方向即电流的参考方向,从而电流就可看成代数量。当电流的参考方向与其实际方向相同时,电流为正值,即 $i > 0$; 反之电流为负值,即 $i < 0$ 。如图 1.1.3 所示。

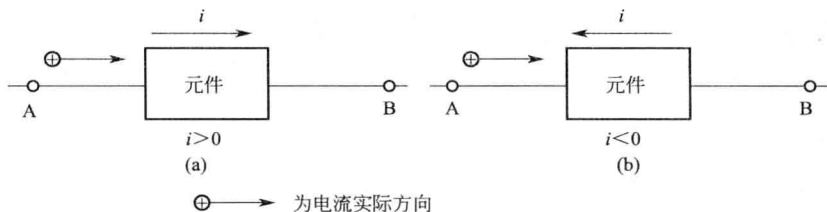


图 1.1.3 电流的参考方向

电流的参考方向可以用箭标表示,如图 1.1.3 所示;也可用双下标表示,如图 1.1.3(a) 中,按所选电流参考方向可写作 i_{AB} ,表示电流参考方向由 A 指向 B;在图 1.1.3(b) 中,按所选电流参考方向可写作 i_{BA} 。对同一段电路, $i_{AB} = -i_{BA}$ 、 $i_{BA} = -i_{AB}$ 。在国际单位制中,电流的基本单位是安 [培] (A),计量微小电流时也用毫安 (mA) 或微安 (μA) 作单位。 $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$, $1\mu A = 10^{-6}\text{A}$ 。

(2) 电压和电动势

电压是两点间电势差 (电位差), $U_{ab} = V_a - V_b$ 。a、b 两点的电位分别用 V_a 、 V_b 表示。电压体现电场力推动单位正电荷做功的能力。电压 u_{ab} 数值上等于电场力推动单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功。为方便分析计算,习惯上规定电压的实际方向为由高电位端 (正极

性端)指向低电位端(负极性端),即电位降低的方向。

电源电动势(以后“电源”二字常略去)体现电源力推动单位正电荷做功的能力,用 e 表示任意形式的电动势, E 表示直流电动势。电动势的实际方向规定为由电源低电位端(负极性端)指向其高电位端(正极性端),即电位升高的方向。

与电流一样,也要假定电压的参考方向(电动势的实际方向一般都给出)。电压指定了参考方向后,电压值即成代数值。如图1.1.4所示。

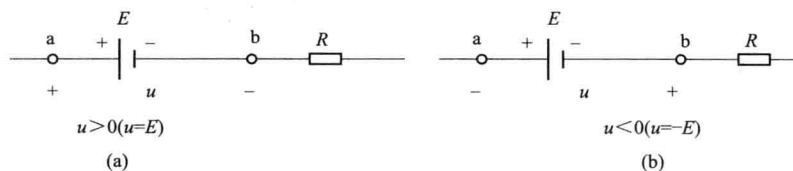


图 1.1.4 电压的参考方向

通过一个元件的电流和其两端的电压的参考方向都可以随意规定。当两者参考方向一致时,称电流电压参考方向关联,否则称为非关联。电压和电动势的国际单位是“伏特”(V)。还可用千伏(kV)、毫伏(mV)或微伏(μ V)做单位。

1.1.3 电位

在分析电子电路时,常用电位这个概念。例如二极管,只有当它的阳极电位高于阴极电位时,管子才导通,否则截止。分析三极管的工作状态,也常要分析各个极的电位高低。

两点间的电压表明了两点间电位的相对高低和相差多少,但不表明各点的电位是多少。要计算电路中某点的电位,就要先设立参考点。参考点的电位称参考电位,通常设其为零,其他各点电位与它比较,比它高的为正电位,比它低的为负电位。电路中各点电位就是各点到参考点之间的电压,故电位计算即电压计算。

参考点在电路图中标以“接地”(⊥)符号。所谓“接地”,并非真正与大地相接。下面以图1.1.5为例介绍。

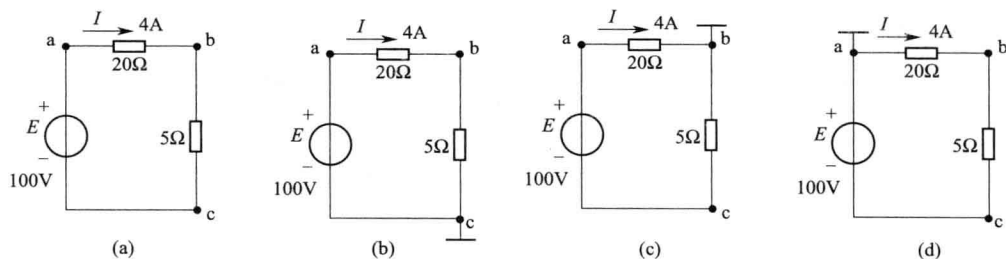


图 1.1.5 电位计算电路举例

在图1.1.5(a)中,由于无参考点,电位 V_a 、 V_b 、 V_c 无法确定。

图1.1.5(b)中选c为参考点,则 $V_c=0$,同时可得

$$V_a = U_{ac} = V_a - V_c = E = +100(\text{V}), V_b = U_{bc} = V_b - V_c = 5 \times 4 = +20(\text{V})$$

图1.1.5(d)中选a为参考点,则 $V_a=0$,而

$$V_b = U_{ba} = -4 \times 20 = -80(\text{V}), V_c = U_{ca} = -100(\text{V})$$

由以上结果可以看出:电路中各点的电位随参考点选择的不同而改变,其高低是相对的;而任意两点间的电压是不变的,与参考点无关,是绝对的。

图1.1.5(b)和(d)还可简化为图1.1.6(a)和(b)表示。电源的另一端标以电位值,

使电路图得以简化。

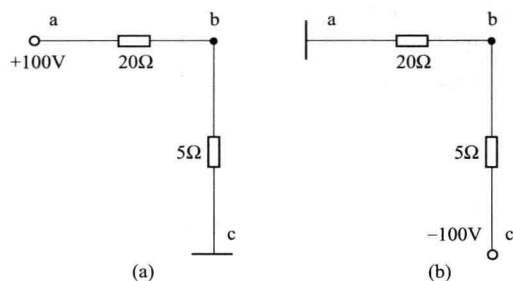


图 1.1.6 直流电源的简化电位表示

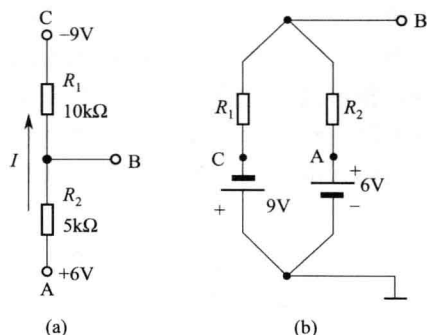


图 1.1.7 例 1.1.1 的电路

【例 1.1.1】 计算图 1.1.7 所示电路中 B 点的电位 V_B 。

【解】 将图 1.1.7(a) 的电路进行处理, 即可得图 1.1.7(b) 以方便计算。

$$U_{AB} = V_A - V_B = \frac{V_A - V_C}{R_1 + R_2} \times R_2 = \frac{6 - (-9)}{5 + 10} \times 5 = 5(\text{V})$$

$$V_B = V_A - U_{AB} = 6 - 5 = 1(\text{V})$$

【例 1.1.2】 在图 1.1.8 电路中, 已知 $E_1 = 6\text{V}$ 、 $E_2 = 4\text{V}$ 、 $R_1 = 4\Omega$ 、 $R_2 = R_3 = 2\Omega$ 。求开关 S 闭合和断开两种情况下 A 点的电位 V_A 。

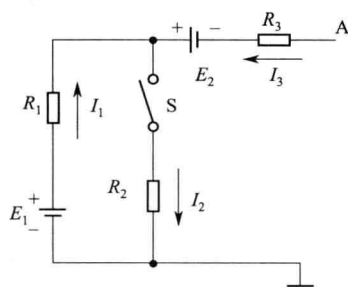


图 1.1.8 例 1.1.2 的电路

【解】 ① 在 S 闭合时

$$I_1 = I_2 = \frac{E_1}{R_1 + R_2} = \frac{6}{4 + 2} = 1(\text{A}), I_3 = 0$$

$$\text{故 } V_A = R_3 I_3 - E_2 + I_2 R_2 = 0 - 4 + 2 \times 1 = -2(\text{V})$$

$$\text{或 } V_A = R_3 I_3 - E_2 - I_1 R_1 + E_1 = 0 - 4 - 4 \times 1 + 6 = -2(\text{V})$$

② 在 S 断开时

电路不形成回路, $I_3 = I_1 = 0$

$$\text{故 } V_A = R_3 I_3 - E_2 - I_1 R_1 + E_1 = -E_2 + E_1 = -4 + 6 = 2(\text{V})$$

【练习与思考】

1.1.1 如图 1.1.9 所示电路, ①零电位参考点在哪里, 画电路表示出来。②当电位 R_P 的触点向下滑动时, A、B 两点的电位是增高了还是降低了?

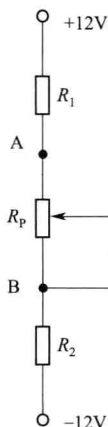


图 1.1.9 练习与思考 1.1.1 的图

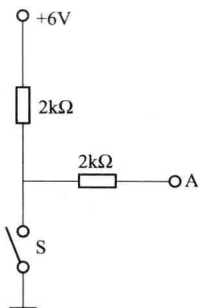


图 1.1.10 练习与思考 1.1.2 的图

1.1.2 计算图 1.1.10 所示电路在开关 S 断开和闭合时 A 点的电位 V_A 。

1.2 电路的工作状态

1.2.1 额定值与实际值

各种电器设备的电压、电流及功率等都有一个额定值。例如，一盏白炽灯标有电压 220V、功率 60W，这就是它的额定值。额定值是制造厂为了使产品能在给定的工作条件下正常运行而规定的正常允许值。额定电流、额定电压和额定功率分别用 I_N 、 U_N 和 P_N 表示。

额定值是在全面考虑使用的经济性、可靠性、安全性及寿命，特别是工作温度允许值等因素，使产品能在给定的工作条件下正常运行而对产品规定的正常允许值，使用时应遵循而不允许偏离过多。大多数电气设备，如电机、变压器等，其寿命与绝缘材料的耐热性能及绝缘强度有关。当电流超过额定值过多时，绝缘材料将因发热过多而遭损坏；当所加电压超过额定值过多时，绝缘材料可能被击穿。反之，若所加电压和电流远低于其额定值，不仅设备不能正常合理地工作，而且也不能充分利用设备的能力。例如，线圈额定电压 380V 的电磁铁，若接上 220V 的电压，则电磁铁将不能正常吸引衔铁或工件。又如，电灯、电阻器，其寿命与导体熔点关系很大，当电压过高或电流过大时，其灯丝或电阻丝将被烧毁。

使用时，因电源或负载的因素，电压、电流和功率的实际值不一定等于它们的额定值。例如，额定值为 220V、40W 的电灯接在额定电压为 220V 的电源上，但当电源电压因经常波动稍低于或稍高于 220V 时，加在电灯上的电压就不是 220V，实际功率也不是 40W 了。

又如一台直流发电机，标有额定值 10kW、230V，实际使用时一般不允许所接负载功率超过 10kW，实际供出的功率值可能低于 10kW。

在一定电压下和额定功率范围内，电源输出的功率和电流决定于负载的大小，就是负载需要多少功率就供多少，电源通常不一定工作在额定工作状态；对电动机也是这样，它的实际功率和电流决定于其轴上所带机械负载的大小，通常也不一定处于满载状态，但一般不应超过额定值。电源设备工作于额定状态时称满载运行。

考虑客观因素，使用时，允许某些电气设备或元件的实际电压、电流和功率等在其额定值上下有一定幅度的波动，例如 $\pm 1\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 或短时过载。

【例 1.2.1】 有一额定值为 5W、500 Ω 的电阻器，问其额定电流为多少？在使用时电压不得超过多大数值？

【解】 $P_N = U_N I_N = I_N^2 R$,

故 $I_N = \sqrt{\frac{P_N}{R}} = \sqrt{\frac{5}{500}} = 0.1(\text{A})$

使用时电压不得超过 $U_N = R I_N = 500 \times 0.1 = 50(\text{V})$

也可用 $U_N = \sqrt{P_N R}$ 计算。

1.2.2 电路的工作状态

本节以最简单的直流电路为例，分别讨论电源电路的三种工作状态：有载、开路和短路工作状态时的电流、电压和功率。

1.2.2.1 电源有载工作状态

如图 1.2.1 所示，当开关 S 闭合，将负载电阻与直流电源接通，这就是电源的有载工作状态。电源有载工作时的电流、电压和功率讨论如下。

(1) 电压与电流

$$\text{由欧姆定律可得电路中的电流 } I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (1.2.1)$$

式中, R_0 是电源内阻。负载两端的电压, 也即电源端电压

$$U = RI$$

由以上两式可得

$$U = E - R_0 I \quad (1.2.2)$$

由式(1.2.2)可见, 电源端电压小于电源电动势, 两者差为电流 I 流过内阻 R_0 所产生的电压降 $R_0 I$ 。电流 I 越大, U 下降得越多。表示电源端电压 U 与输出电流 I 之间关系的曲线称为电源的外特性曲线, 如图 1.2.2 所示, 其斜率与 R_0 有关。内阻 R_0 一般很小, 当 $R_0 \ll R$ 时, 则

$$U \approx E$$

上式说明当电流(负载)变动时, 电源的端电压变动不大, 这表明电源内阻小时带负载能力强。

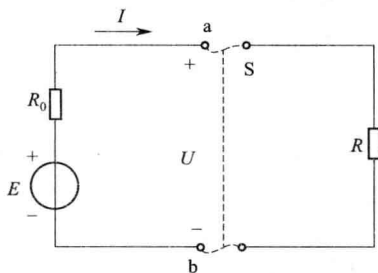


图 1.2.1 电源有载工作

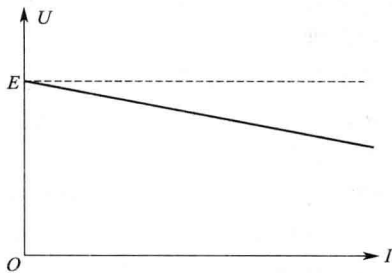


图 1.2.2 电源的外特性曲线

(2) 功率及功率平衡

将式(1.2.2)两边乘以电流 I , 可得功率平衡式

$$UI = EI - R_0 I^2, \quad P = P_E - \Delta P$$

式中, $P_E = EI$ 是电源产生的功率; $\Delta P = R_0 I^2$ 是电源内阻上损耗的功率; 而 $P = UI$ 是电源输出的功率, 也即电阻 R 上消耗的功率。

在国际单位制中, 功率的单位是瓦 [特] (W) 或千瓦 (kW)。1s 内转换 1J 的能量, 则功率为 1W。

【例 1.2.2】 在图 1.2.1 中, $E = 223\text{V}$ 、 $R_0 = 0.6\Omega$ 、 $R = 44\Omega$, 判断功率平衡。

【解】

$$I = \frac{E}{R_0 + R} = \frac{223}{0.6 + 44} = 5(\text{A})$$

$$U = E - R_0 I = 223 - 0.6 \times 5 = 220(\text{V}) \quad \text{或} \quad U = RI = 44 \times 5 = 220(\text{V})$$

$$P_E = EI = 223 \times 5 = 1115(\text{W})$$

$$\Delta P = R_0 I^2 = 0.6 \times 5^2 = 15(\text{W})$$

$$P = UI = 220 \times 5 = 1100(\text{W}) \quad \text{或} \quad P = RI^2 = 44 \times 5^2 = 1100(\text{W})$$

$$P_E = P + \Delta P = 1115(\text{W})$$

可见, 在一个电路中, 电源产生的功率与负载取用的功率及内阻上消耗的功率是平衡的。

(3) 电源与负载的判别

分析电路时, 要判断哪个电路元件是电源(或起电源作用), 哪个是负载(或起负载的作用), 有以下两种方法。

其一，根据电压和电流的实际方向判断。

① 元件的 u 、 i 实际方向相反，电流从“+”流出，则发出功率，是电源。

② 元件的 u 、 i 实际方向相同，电流从“+”流入，则取用功率，是负载。

其二，由 $p=ui$ 及 u 、 i 参考方向来判别。

① u 、 i 参考方向一致（关联）时， $p=ui$ 表示（计算）吸收功率。

$p=ui>0$ 负载（元件吸收正功率）

$p=ui<0$ 电源（元件吸收负功率，即发出功率）

② u 、 i 参考方向相反（非关联）时， $p=ui$ 表示（计算）发出功率。

$p=ui>0$ 电源（元件实际发出功率）

$p=ui<0$ 负载（元件实际发出负功率，即吸收功率）

1.2.2.2 电源开路

如图 1.2.3 所示，开关 S 断开，电源就处于开路（空载）状态。开路时，外电路的电阻对电源而言等于无穷大，因此电路中的电流为零。这时电源的端电压（称为开路电压或空载电压 U_0 ）等于电源电动势，电源不输出功率（电能）。

电源开路时的电气特征可用下列各式表示。

$$I=0, U=U_0=E, P=0$$

若电路中某段电路的电流为零，但并未直接断开，在分析和计算其他部分的电流时，可将该段电路看做开路。

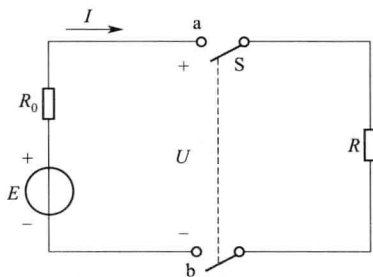


图 1.2.3 电源开路状态

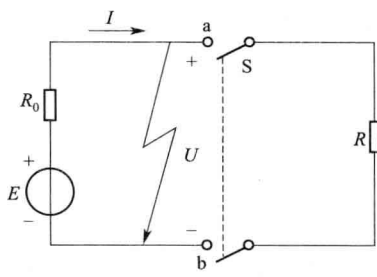


图 1.2.4 电源短路状态

1.2.2.3 电源短路

如图 1.2.4 所示电路中，当电源的两端由于某种原因（绝缘老化或操作失误）连接在一起时，电源被短接，处于短路状态。电源短路时，外电路的电阻可视为零，电流有捷径可通，不流过负载（即使开关 S 是闭合的），此电流称为短路电流 I_S 。由于在电流的回路中仅有很小的电源内阻 R_0 ，所以这时的电流很大，有可能使电源遭受机械（电磁力很大）与热的损伤或毁坏。此时电源产生的电能全部消耗在内阻上。

电源短路时，因为外电路的电阻为零，所以电源的端电压亦为零，电源电动势全部降在内阻上。

电源短路时的电气特征可用下列各式表示。

$$U=0, I=I_S=\frac{E}{R_0}, P_E=\Delta P=R_0 I_S^2, P=0$$

短路也可发生在电路的负载端或其他处。

短路通常是一种严重事故，特别是电源短路应该尽力预防。绝缘损坏、接线不慎或意外事故往往是引发短路的原因，因而经常检查电气设备和线路的绝缘情况是一项很重要的安全措施；此外，为了防止和减轻短路事故所引起的后果，通常在电路中接入熔断器或自动断路器。

器,以便发生短路时,能迅速将故障电路自动切除。但是,有时为了某种需要,可以将电路中的某一段短路(常称为短接)或进行某种短路实验。

若电路中某两点间的电压为零但并未直接连在一起,在分析计算其他部分的电压时可将该两点视为短路。

【例 1.2.3】 测得电源的开路电压为 12V,短路电流为 30A,试求该电源的电动势和内阻。

【解】 电源的电动势 $E=U_0=12\text{V}$

$$\text{电源的内阻} \quad R_0 = \frac{E}{I_s} = \frac{U_0}{I_s} = \frac{12}{30} = 0.4(\Omega)$$

这是由电源的开路电压和短路电流计算其电动势和内阻的一种方法(常称为开路短路法)。

1.2.3 最大功率传输

如图 1.2.1 所示,以直流电路为例,当电源处于有载工作状态时,外接负载电阻 R 的大小经常变动,则

$$I = \frac{E}{R_0 + R}$$

电流 I 大小亦变动,那么输出给负载的功率就变动。

$$P = I^2 R$$

电源一定(E 、 R_0 一般不变),负载 R 变化,当负载 R 上获得最大功率时,就是电源的最大功率传输。

下面来分析 R 等于何值时,能获得最大功率。

$$P = I^2 R = \frac{E^2}{(R_0 + R)^2} R$$

R 变化时,最大功率发生在 $\frac{dP}{dR} = 0$ 的条件下。这时有 $R = R_0$, 则

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4R_0}$$

当满足 $R = R_0$ 的条件时,负载电阻 R 将获得最大功率,此时称负载(电阻)与电源(内阻)匹配。

【例 1.2.4】 图 1.2.1 的电源外接可调电阻 R ,当 R 等于多少时,它可以从电源获得最大功率?求此最大功率。已知电源电动势 $E = 4\text{V}$,内阻 $R_0 = 20\Omega$ 。

【解】 当 $R = R_0 = 20\Omega$ 时, R 上获得最大功率。此最大功率

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4R_0} = \frac{4^2}{4 \times 20} = 0.2(\text{W})$$

【练习与思考】

1.2.1 试计算图 1.2.5 所示电路在开关 S 闭合和断开时的 U_{ab} 和 U_{cd} 。

1.2.2 如图 1.2.6 所示,用“伏安法”测量某直流线圈的电阻 R ,电压表读数为 220V,电流表读数为 0.7A。如果测量时误将电流表当做电压表并接在电源上,试问后果如何?已知电流表量程为 1A,内阻为 0.4Ω 。

1.2.3 如图 1.2.7 所示电路。① $R_0 \approx 0\Omega$,当 S 闭合时, I_1 是否被分去一些?②若 R_0 不能忽略,当 S 闭合时,60W 电灯中的电流 I_1 是否会变动?③在 220V 电压下工作时,60W 和 100W 的电灯哪个的灯丝电阻大?④如果 100W 电灯两端碰触(短路),当 S 闭合时,后果如何?100W 电灯的灯丝是否被烧毁?⑤设电源的额定功率为 125kW、端电压为 220V,当只接上一只 220V、60W 的电灯时,电灯会不会被烧毁?

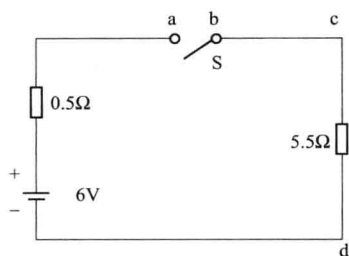


图 1.2.5 练习与思考 1.2.1 的图

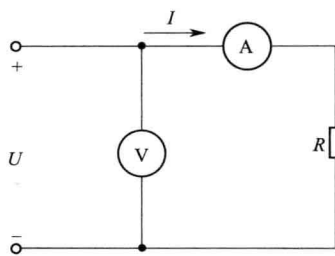


图 1.2.6 练习与思考 1.2.2 的图

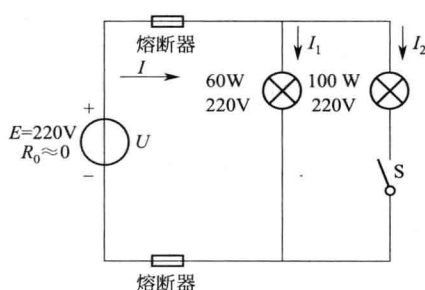


图 1.2.7 练习与思考 1.2.3 的图

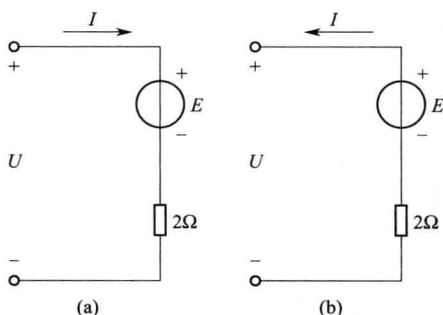


图 1.2.8 练习与思考 1.2.4 的图

1.2.4 图 1.2.8 是一电池电路，1 图 1.2.8(a) 中 $U=3\text{V}$ 、 $E=5\text{V}$ ，该电池是作电源（供电）还是作负载（充电）用？2 图 1.2.8(b) 中 $U=5\text{V}$ 、 $E=3\text{V}$ ，电池又作什么用？

1.2.5 一个电热器从 220V 的电源取用的功率是 1000W，如将它接到 110V 的电源上，它取用的功率是多少？

1.2.6 额定电流 100A 的电源，只接了 60A 的用电负载，还有 40A 的电流流到哪里去了？

1.2.7 一台直流发电机，其铭牌上标有 P_N 、 U_N 、 I_N 。试问发电机的空载运行、轻载运行、满载运行和过载运行指什么情况？负载的大小一般又指什么而言？

1.3 电路的基本元件

1.3.1 无源元件

电路元件是电路最基本的组成单元，可分为无源元件和有源元件。电路元件按与外部连接的端口数又可分为二端、三端、四端元件等。还可分为线性元件和非线性元件，时不变元件和时变元件等。

无源元件主要有电阻元件、电感元件、电容元件，它们都是理想元件。所谓理想，就是突出元件的主要电磁性质，而忽略次要因素。

电阻元件具有消耗电能的性质（电阻性），其他电磁性质均可忽略不计；电感元件突出其中通过电流产生磁场而储存磁场能量的性质（电感性）；对电容元件，突出其加上电压要产生电场而储存电场能量的性质（电容性）。电阻元件是耗能元件，后两者为储能元件。下面分别讨论它们的电压、电流及功率和能量的情况。

(1) 电阻元件

如图 1.3.1(a) 所示, 设电阻 R 上的 u 、 i 参考方向关联, 根据欧姆定律, 得

$$u = iR \quad (1.3.1)$$

如将上式两边乘以 i 并积分, 则得

$$\int_0^t ui \, dt = \int_0^t Ri^2 \, dt$$

上式表示电能全部消耗在电阻上, 转换为其他形式的能量 (热能)。

电阻上电压和电流的关系即电阻元件伏安特性, 如图 1.3.1(b) 所示。线性电阻元件的参数 R 是一正实常数, 它的伏安特性是通过原点的一条直线, 直线的斜率与元件的电阻 R 有关。

非线性电阻元件的伏安特性不是一

条通过原点的直线。二极管就是一个典型的非线性电阻元件。由于电阻器的制作材料的电阻率与温度有关, (实际) 电阻器通过电流后因发热会使温度改变, 因此严格说, 电阻器带有非线性因素。

但是在一定条件下, 许多实际部件, 如金属膜电阻器、线绕电阻器等, 它们的伏安特性近似为一条直线, 所以可用线性电阻元件作为它们的理想模型。

(2) 电感元件

如图 1.3.2 所示单匝和密绕 N 匝线圈中, 当通过它的电流 i 变化时, i 所产生的磁通也发生变化, 则在线圈两端就要产生感应电动势 e_L 。图中所示 e_L 与 Φ 的参考方向符合右手螺旋法则 (关系) 时, 有

$$e_L = -\frac{d\Phi}{dt}$$

单匝线圈

$$e_L = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}$$

N 匝线圈

(1.3.2)

式中, e_L 的单位为伏 (V); 时间的单位是秒 (s); 磁通的单位是伏·秒 (V·s), 通常称为韦伯 (Wb); $\Psi = N\Phi$ 称为磁链。当线圈中没有铁磁物质 (称为线性电感) 时, Ψ (或 Φ) 与 i 成正比关系, 即

$$\Psi = N\Phi = Li$$

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i}$$

式中, L 称为线圈的电感, 也称自感, 是电感元件的参数。当线圈无铁磁物质时, L 为常数, 单位是亨利 (H) 或毫亨 (mH)。将 $\Psi = Li$ 代入 $e_L = -\frac{d\Psi}{dt}$ 则得

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (1.3.3)$$

式(1.3.2) 和式(1.3.3) 不仅表示了感应电动势的大小, 且也可确定它的实际方向。当

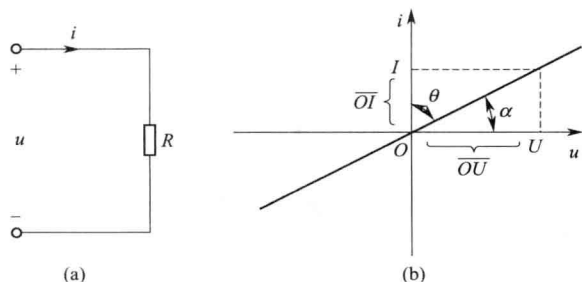


图 1.3.1 电阻元件及其伏安特性曲线

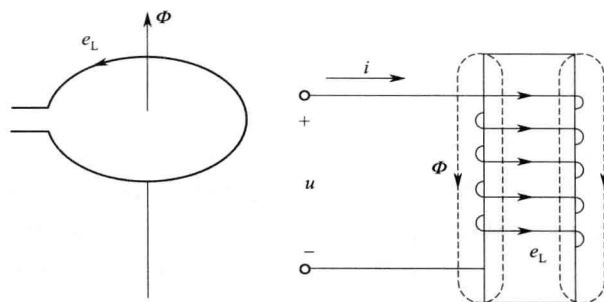


图 1.3.2 电感线圈