

● 高等院校教材 ●

DIANGONG YU DIANLU JICHU

电工与电路基础

● 张玘 潘孟春 主编

国防科技大学出版社

·高等院校教材·

电工与电路基础

主 编：张 玘 潘孟春

编 者：翁飞兵 李 季

陈棣湘 唐 莺 孟祥贵

国防科技大学出版社

·长沙·

内 容 简 介

全书共分九章:第一章基础知识;第二章工具知识;第三章是工具知识在电路暂态分析中的应用;第四章是工具知识基于复数模型在正弦交流电路中的拓展;第五章是工具知识在频域分析中的应用;第六章变压器,第七章、第八章交直流电机是工具知识的更深层次的应用,它们实际上是一类更为复杂的电路器件;第九章是技能知识篇。

本书内容简明,语言流畅,通俗易懂,例题、思考题丰富。本书主要作为少学时电工技术系列课程的教学用书,在实际施教时可视具体情况进行节选,同时也可作为相关的工程技术类人员学习电工、电路基本理论和基本技能的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电路基础/张玘,潘孟春主编. —长沙:国防科技大学出版社,2006.8

ISBN 7-81099-357-7

I.电… II.①张…②潘… III.①电工学②电路 IV.TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 081325 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:徐飞 责任校对:肖滨

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:20.5 字数:449千

2006年8月第1版第1次印刷 印数:1-5000册

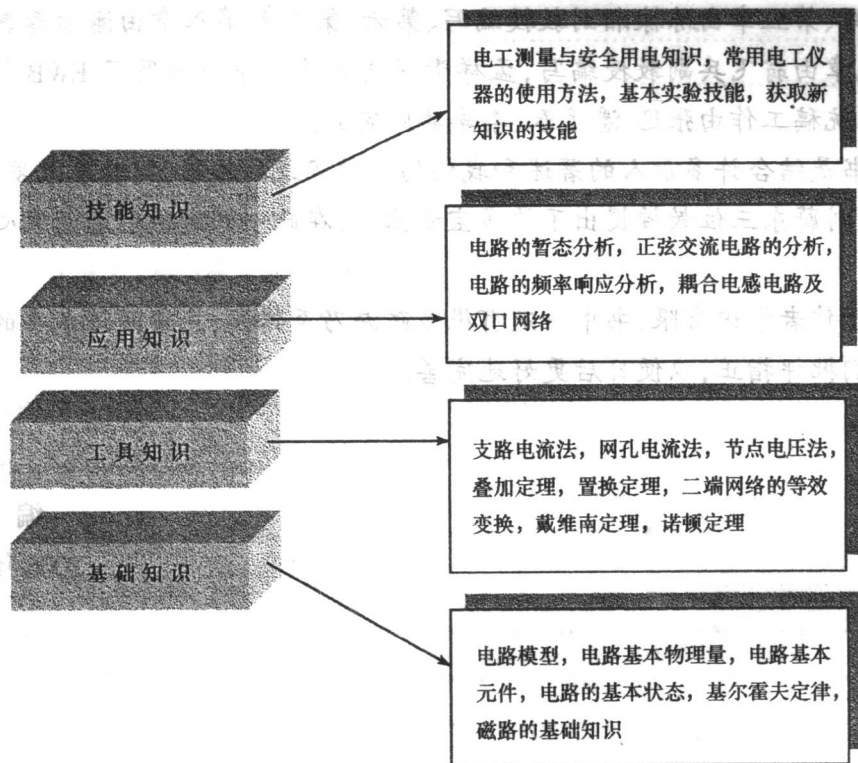
*

ISBN 7-81099-357-7/TM·9

定价:29.00元

前 言

在厚基础、宽口径的人才培养理念指导下,作为一门技术基础课几乎所有工科甚至文、理科专业都开设了电工技术系列课程,且学时少。针对这一特点我们将教学内容模块化,以共不同专业根据各自的需求进行选择。在教学中将主要知识点分为基础知识、工具知识、应用知识和技能知识四个模块,如图所示。各模块之间体现出层次性,注重各知识点的内在联系。实践证明,按照这种课程体系、优化内容后进行施教,能获得好的教学效果,学生容易整体把握。



本书根据科学技术的发展对传统电工技术和电路分析基础内容进行了梳理,突出概念、突出应用,以适应于各专业电工技术系列课程的教学需要。全书共分九章,第一章属于基础知识包括基本概念、基本模型、基本定律;第二章属于工具知识是人们基于基本知识总结出来的一些基本分析方法包括支路、网孔、节点等分析方法以及戴维南等定律;第三章是工具知识在电路暂态分析的应用;第四章是正弦电路分析,它是工具知识基于复数模型在正弦交流电路中的拓展;第五章是工具知识在频域分析中的应用;第六章变压器、第七章第八章交直流电机是工具知识的更加深层次的应用,它们实际上是一类更为复杂的电路器件;第九章是技能知识篇,它告诉学生到底怎样去体会电包括怎样测电、怎样评估电;怎样用电(电路基本规律和安全用电)。因为“新”本身具有时效性。为了使学生加深对知识的理解和增加学习兴趣,在许多章节编排了 EWB 电路仿真内容。实际应用本教材时后面四章可视专业节选。

本书第一、二章由张玘教授编写、第三章由李季讲师编写、第四章由唐莺讲师编写、第五章由陈棣湘副教授编写、第六、第七和第八章由潘孟春教授编写、第九章由翁飞兵副教授编写,孟祥贵同志为许多章节编写了 EWB 仿真案例,全书统稿工作由张玘、潘孟春、李季共同完成。

本书是结合许多前人的著述和我们的教学实践的结果,同时承蒙罗飞路、谢克彬、刘蔚东三位教授提出了许多宝贵意见,在此一并对他们表示衷心的感谢!

由于作者学识有限,书中一定有很多疏漏乃至错误,恳请阅读本书的教师和同学们批评指正,以便日后更好地完善。

编者

2006年7月

目 录

第一章 电路基本概念和电路定律

1.1 电路模型	(1)
1.2 电路的基本物理量	(2)
1.2.1 电流	(2)
1.2.2 电压	(3)
1.2.3 功率	(5)
1.3 电路基本元件	(6)
1.3.1 电阻元件	(7)
1.3.2 电容元件	(8)
1.3.3 电感元件	(10)
1.3.4 电压源	(11)
1.3.5 电流源	(12)
1.3.6 受控源	(15)
1.4 基尔霍夫定律	(16)
1.4.1 基尔霍夫电流定律	(18)
1.4.2 基尔霍夫电压定律	(19)
1.5 电路的基本状态	(22)
习题及思考题	(24)

第二章 电路的分析方法

2.1 支路电流法	(31)
2.2 网孔电流法	(34)
2.3 节点电压法	(39)
2.4 叠加定理	(43)
2.4.1 线性系统及其性质	(43)
2.4.2 叠加定理	(44)

2.5	置换定理	(46)
2.6	二端网络的等效变换	(48)
2.7	戴维南定理与诺顿定理	(52)
2.7.1	戴维南定理	(52)
2.7.2	诺顿定理	(55)
2.8	含受控源电路的分析方法	(57)
2.9	最大功率传递定理	(60)
2.10	非线性电阻电路分析	(62)
	习题及思考题	(66)

第三章 电路的暂态分析

3.1	换路定则与电路初始状态的确定	(77)
3.2	一阶电路的零输入响应	(80)
3.2.1	RC 电路的零输入响应	(80)
3.2.2	RL 电路的零输入响应	(85)
3.3	一阶电路的零状态响应	(87)
3.3.1	RC 电路的零状态响应	(87)
3.3.2	RL 电路的零状态响应	(92)
3.4	一阶电路的全响应	(94)
3.5	三要素法	(98)
3.6	阶跃函数与阶跃响应	(103)
3.7	脉冲激励下 RC 电路的响应	(106)
3.7.1	微分电路	(106)
3.7.2	积分电路	(108)
3.8	二阶电路的零输入响应	(109)
	习题及思考题	(115)

第四章 正弦交流电路

4.1	正弦量的基本概念	(126)
4.1.1	正弦量的三要素	(126)
4.1.2	相位差	(128)
4.1.3	有效值	(129)

4.2	正弦量的相量表示	(130)
4.2.1	复数复习	(130)
4.2.2	利用相量表示正弦量	(131)
4.2.3	相量图	(133)
4.3	元件约束和基尔霍夫定律的相量形式	(135)
4.3.1	基本元件伏安关系的相量形式	(135)
4.3.2	基尔霍夫定律的相量形式	(141)
4.4	阻抗与导纳	(144)
4.4.1	阻抗和导纳	(144)
4.4.2	RLC 串联电路	(147)
4.4.3	阻抗的串联与并联	(151)
4.5	正弦交流电路的相量分析	(154)
4.6	正弦交流电路的功率	(157)
4.6.1	功率	(157)
4.6.2	功率因数的提高	(162)
4.7	三相电路	(165)
4.7.1	三相电源	(166)
4.7.2	三相电源的连接	(167)
4.7.3	三相电路的计算	(169)
4.7.4	三相电路的功率	(176)
	习题及思考题	(179)

第五章 电路的频率响应

5.1	正弦交流电路的频率特性	(189)
5.1.1	RC 串联电路的频率特性	(189)
5.1.2	谐振电路	(195)
5.2	非正弦周期信号电路	(200)
5.2.1	周期信号的傅里叶级数	(200)
5.2.2	非正弦周期信号	(203)
5.2.3	非正弦周期信号电路的谐波分析法	(205)
	习题及思考题	(207)

第六章 磁耦合器件和双口网络

6.1 互感	(212)
6.2 含有耦合电感电路的计算	(216)
6.3 变压器	(219)
6.3.1 空心变压器	(220)
6.3.2 理想变压器	(222)
6.3.3 变压器的电路模型	(224)
6.4 双口网络的伏安关系	(227)
6.4.1 双口网络的流控型和压控型伏安关系	(228)
6.4.2 双口网络的混合型伏安关系	(236)
6.4.3 双口网络的传输型伏安关系	(240)
6.5 双口网络各组参数的关系	(242)
习题及思考题	(244)

第七章 交流电机

7.1 三相异步电动机的构造	(255)
7.2 三相异步电动机的工作原理	(257)
7.3 三相异步电动机的转矩与机械特性	(261)
7.4 三相异步电动机的基本参数	(264)
7.5 三相异步电动机的起动	(268)
7.6 三相异步电动机的调速	(269)
7.7 三相异步电动机的制动	(270)
7.8 同步电机和单相异步电机	(272)
7.7.1 同步电机	(272)
7.7.2 单相异步电动机	(273)
习题及思考题	(275)

第八章 直流电机

8.1 直流电机基本结构和工作原理	(277)
8.1.1 直流电机的基本结构	(277)
8.1.2 直流电机的基本工作原理	(280)

8.1.3 直流电机的分类·····	(282)
8.2 直流电动机的机械特性·····	(283)
8.2.1 基本平衡方程式·····	(283)
8.2.2 他励直流电动机的机械特性·····	(285)
8.3 他励(并励)直流电动机的调速·····	(289)
习题及思考题·····	(292)

第九章 电工测量与安全用电

9.1 电工仪表·····	(295)
9.1.1 电工仪表的分类·····	(295)
9.1.2 电工仪表的误差和准确度·····	(297)
9.2 电流、电压、功率和电能的测量·····	(298)
9.2.1 电流的测量·····	(298)
9.2.2 电压的测量·····	(299)
9.2.3 功率的测量·····	(300)
9.2.4 电能的测量·····	(303)
9.3 电阻、电容、电感的测量·····	(304)
9.4 非电量的电测法·····	(306)
9.4.1 应变电阻传感器·····	(307)
9.4.2 热电传感器·····	(309)
9.5 安全用电常识·····	(310)
9.5.1 触电事故及其预防措施·····	(310)
9.5.2 静电防护与电气防火·····	(313)
习题及思考题·····	(313)
参考文献·····	(316)

第一章 电路基本概念和电路定律

本书研究的对象是电路模型。电路是由各种电路元件构成的,其组成千差万别,但各电压和电流在电路中是受共同规律支配的,即受到两种规律的约束:一是来自电路中连接方式的约束,称为基尔霍夫定律的约束;二是来自元件本身伏安特性的约束。本章在引入电路模型的概念的基础上,先介绍电路中的几个基本物理量,然后介绍几种基本电路元件的特性与基尔霍夫定律,最后将电路的几种常见状态作一简单介绍。

1.1 电路模型

电路是电流的通路,它是为了某种需要由电工设备或元件按照一定方式组合起来的。

电路中,产生电能的元件称为电源。电路中吸收电能并将电能转换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,称为中间环节,其作用是传输电能和电信号。中间环节中还常接有开关等一些装置和设备,以实现电路的控制、测量和保护。

根据电路连接的目的和功能,电路可分为力能电路和信号电路两大类:以传输和分配电能,并将电能转换为非电能为目的的电路称为力能电路,俗称“强电”系统;以传递和处理信号为目的的电路称为信号电路,俗称“弱电”系统。

实际电路都是由电阻器、电容器、线圈、变压器、电源等部件组成的。在设计制作某种部件时,利用的是它的主要物理特性。例如,制造一个电阻时主要利用的是它对电流呈现阻力的性质。但在实际中,不可能制作只表现其主要物理性质的部件。一个实际电阻器在有电流通过时会产生一个磁场,即也具有电感的性质(通电直导线)。如果我们在分析问题,把部件中所有可能出现的情况都考虑进去,将使电路分析变得十分困难。因此就必须在一定条件下对实际部件进行理想化,忽略它的次要性质,用一个足以表征其主要性质的模型来代替。对于一个实际电阻器,它的电感量是很小的,因此把它看作一个理想电阻元件是完全可以的。

那么,实际部件在什么条件下可以理想化为一个便于分析的模型呢?这就是集总假设问题。在实际中,电能的消耗、磁场和电场的储能这些现象常会同时交叉发生在同一部

件中。像刚才我们提到的实际电阻元件,它就是能量的消耗和磁场的储能并存。所谓理想化就是指,假定这些现象可以分别研究,即假定电场的储能、磁场的储能、电能的消耗分别集中在 C 、 L 、 R 三种元件中,三种现象可以分开研究而不是混为一谈。这样的元件称为集总参数元件,简称集总元件,这样的假设称为集总假设。电路理论以集总假设为基本前提,一切分析方法均以此为基础。

那么集总假设的条件是什么呢?对于集总元件连接成的电路,不论其连接方式如何,只要电路尺寸远小于电路的最高工作频率所对应的波长,都称之为集总电路。

例如,电力用频率(工频)为 50Hz ,对应的波长为 6000km ($\lambda = \frac{3 \times 10^8}{f}$),显然在电路分析时均可把研究的电路作为集总电路来对待。

1.2 电路的基本物理量

电压、电流等是描述电路中能量转换关系或信号传递和处理过程的基本物理量。在分析电路之前要弄清它们的概念及其参考方向等问题。

1.2.1 电 流

电荷的定向运动形成电流,习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

物理中把单位时间内通过导体横截面积的电量定义为电流强度,用以衡量电流的大小。电工技术中常把电流强度简称为电流。因此“电流”不仅指电路中一种特定物理现象,而且是描述电路的一个基本物理量。

电流强度用字母 i 或 I 表示。一般不随时间变化的物理量用大写字母表示,而随时间变化的物理量用小写字母表示。随时间变化的电流定义为

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

不随时间变化的电流叫做恒定电流,也称为直流电流。直流电流的定义为

$$I = \frac{Q}{T} \quad (1-2-2)$$

式中 Q 为时间 T 内通过导体横截面积的电量。

在国际单位制中,时间的单位为秒(s),电量的单位为库仑(Q),电流的单位为安培(A),简称安。电流的辅助单位有毫安(mA)、微安(μA)等。

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

电流是有方向的,习惯上把正电荷运动的方向作为电流方向。在简单电路中,电流的实际方向可以预先判断,计算不会遇到困难。但在复杂的电路或交流电路中,电流的方向

往往是无法预知或不确定的。为解决这个问题,这里引入参考方向的概念。

图 1-1 表示一个复杂电路中的一个任意的已知元件。电流的实际方向是从 a 到 b 还是从 b 到 a ,无法预先判定。为了便于研究,可在电路分析时事先任意假定一个正电荷运动的方向,这个假定方向称为电流的参考方向或电流的正方向。电流的参考方向在电路图中用箭头表示。图 1-1 中所示的电流的参考方向是由 a 端流向 b 端。

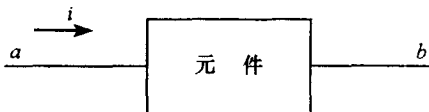


图 1-1 电流的参考方向

假定了电流的参考方向后,即可以此为依据对电路进行求解。若解得电流值为正,说明电流的实际方向与参考方向一致;反之,则说明电流的实际方向与参考方向相反。如果在电路中没有标明参考方向,那么计算出的电流正、负没有任何意义。因此进行电路分析之前必须标明电流的参考方向,至于电流的实际方向则不必标出。

例 1-1 在图 1-1 中,

- (1) 已知 $i = -1\text{A}$, 试指出电流的实际方向;
- (2) 已知 $i = 2\sin\left(100\pi t + \frac{3}{2}\pi\right)\text{A}$, 试指出 $t = 2\text{s}$ 时 i 的实际方向。

解:(1) i 为负值,表示电流的实际方向与图中所标的参考方向相反,故电流的实际方向是由 b 指向 a 。

(2) 当 $t = 2\text{s}$ 时,可求出该瞬时电流的值为:

$$i = 2\sin\left(200\pi + \frac{3}{2}\pi\right)\text{A} = -2\text{A}$$

故电流的实际方向亦与参考方向相反,即由 b 指向 a 。

1.2.2 电 压

由物理学可知,电位即电场中某点的电势,它在数值上等于电场力把单位正电荷从某点移动至无穷远处所做的功。电场无穷远处的电位被认定为零,作为衡量电场中各点电位的参考点。工程上常选与大地相连的部件(如机壳等)作为参考点,没有与大地相连的部件的电路,常选许多元件的公共结点作参考点,并称为“地”。在电路分析中,可选电路中一点作为各结点的参考点。参考点用接地符号“ \perp ”标出。

电压也是描述电场力移动电荷做功的物理量,它在数值上等于电场力把单位正电荷从一点移到另一点所做的功。

电压用字母 u 表示, a 、 b 两点间电压记作 u_{ab} ,下标 a 、 b 表示电压方向从 a 到 b 。电

压、电位的单位都是伏特,简称伏(V),辅助单位有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等。

$$1\text{V} = 10^{-3}\text{kV} = 10^3\text{mV} = 10^6\mu\text{V}$$

根据电压和电位的定义可知, a 、 b 两点间的电压等于 a 、 b 两点间的电位之差,即

$$u_{ab} = u_a - u_b$$

若 b 以为参考点, a 、 b 两点间的电压等于 a 点的电位。

例 1-2 在图 1-2(a)所示电路中,已知 $U_{s1} = 6\text{V}$, $U_{s2} = 3\text{V}$,求 U_{bc} 。

解:

$$U_c = 0\text{V}$$

$$U_a = 6\text{V}$$

$$U_b = 6 + 3 = 9\text{V}$$

$$U_{bc} = U_b - U_c = 9\text{V}$$

若 b 以为参考点,如图 1-1(b)所示,则各节点电位分别为

$$U_b = 0\text{V}$$

$$U_a = -3\text{V}$$

$$U_c = -(3 + 6) = -9\text{V}$$

$$U_{bc} = U_b - U_c = 9\text{V}$$

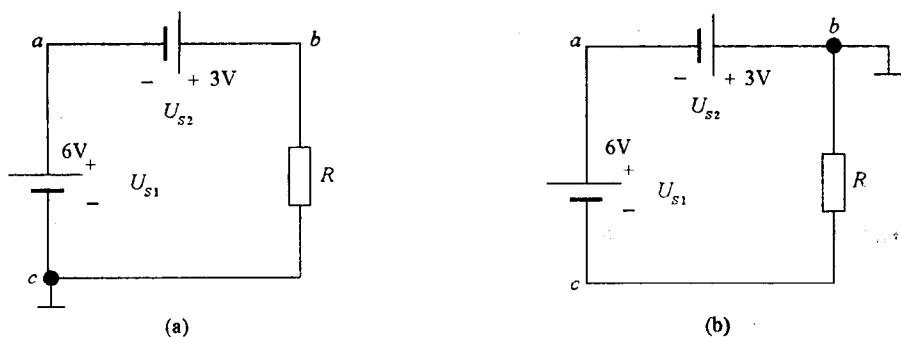


图 1-2 例 1-2 电路图

由例 1-2 可以看出:

- (1) 若 $U_b > U_c$, 则 $U_{bc} > 0$, 反之则 $U_{bc} < 0$ 。电压的方向为电位降低的方向。
- (2) 电路中各点的电位值是相对值, 是相对于参考点而言的。参考点改变, 各点的电位值将随之改变, 但无论参考点如何改变, 各点间的电位相对高低即电位差并不改变, 因此两点间的电压值是绝对的。
- (3) 电位值和电压值与计算时所选的路径无关。

前面已经指出, 电流和电压的参考方向都是可以任意假定的。在分析电路时, 为了方

便起见,习惯上对无源元件(电阻、电容、电感等)选取的电流参考方向与电压的参考方向一致。即若已选定电压的参考方向,则电流的参考方向约定为由“+”端流向“-”端(由高电位流向低电位);反之,若已选定了电流的参考方向,则电压的参考方向也约定与电流的流向一致。这样选定电流、电压的参考方向称为关联参考方向。若对某元件选取的电流参考方向与电压的参考方向相反,则称为非关联参考方向。在采用关联参考方向时,电路图中电压的参考方向和电流的参考方向标出一个即可。如无特殊说明,本书对无源元件一般采用关联参考方向,对有源元件则采用非关联参考方向。

1.2.3 功率

1. 电路的功和功率

电路接通后同时进行着电能与非电能的转换。根据能量守恒定律,电源提供的电能等于负载消耗或吸收电能的总和。功和能用字母“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。由电压、电流的定义,可表示为

$$W = \int_0^t u dq = \int_0^t u \cdot i dt \quad (1-2-3)$$

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

$$p = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u \cdot i dt = u \cdot i \quad (1-2-4)$$

若电流、电压都是恒定值时,以上两式分别为

$$W = U\tau \quad (1-2-5)$$

和

$$P = \frac{W}{\tau} = UI \quad (1-2-6)$$

功率的单位为瓦特,简称瓦(W),辅助单位有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。

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

功的单位为焦耳(J)

$$1J = 1W \times 1s = 1Ws$$

工程上常用“度”作为电能的单位

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

在电压、电流参考方向采用关联(一致)参考方向时,功和功率也是代数量。以上各式为元件电压、电流参考方向一致时消耗功率的表达式;当元件电压、电流参考方向相反(非关联参考方向)时,计算元件消耗的功率要在表达式前加负号“-”,即

$$p = -UI \quad (1-2-7)$$

以上两种情况,若结果均为 $p > 0$,说明元件是耗能的,在电路中的作用为负载;若 $p < 0$,即元件消耗的电能负,说明元件产生电能,为电源。

例 1-3 某电路中元件 A 的电压、电流参考方向如图 1-3 所示。若 $U = 5V, I = -2A$,试判断元件 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相反,则又如何?

解:(1) 因为 $U、I$ 参考方向一致,根据式(1-2-6),其消耗的功率为

$$p = UI = 5 \times (-2) = -10W < 0$$

故元件 A 为电源。

(2) 若电流参考方向与图中所设相反,则根据式(1-2-7)

$$p = UI = -5 \times (-2) = 10W > 0$$

故元件 A 为负载。

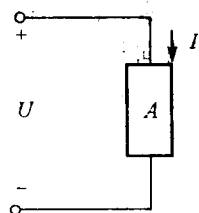


图 1-3 例 1-3 电路图

2. 额定值

实际的电路元件或电器设备都只能在规定的电压、电流和功率的条件下才能正常工作,发挥出最佳的效能,这个规定值称为额定值。

电器设备常用的额定值有额定电压、额定电流和额定功率。有的电器设备还不止这三个额定值,例如电机还有额定转速、额定转矩等;但也有的电器设备只有一个或两个额定值即可,例如电灯泡通常只标出它的额定电压和额定功率,一般电阻器只标出它的电阻值和额定功率,电容器则只标出它的电容值和额定电压等等。

在选定电器设备或实际元件时,应尽可能使它们工作在额定值或接近额定值的状态下。例如一般白炽灯的额定电压是 220V,楼内的路灯因深夜电压超过它的额定值而用不了多久,若将它误接到 380V 的电源上,它将立即烧毁。若电器设备在低于额定值较多的情况下工作,往往会形成“大马拉小车”的局面,造成设备浪费。这是每个从事电气工程的科技人员必备的知识。

1.3 电路基本元件

电路是由电路元件连接而成的,而理想元件是可以精确定义的,也就是说元件的电压和电流可以用数学公式来定义,这种关系称为伏安关系,即 VAR(volt ampere relation)。组成电路最基本的元件有电阻、电容、电感,电压源等,从本节开始对这几件及其伏安特性进行讨论。

1.3.1 电阻元件

电阻元件是实际电阻器的理想化模型。常用的实际电阻器有：金属膜电阻器、碳膜电阻器、线绕电阻器以及电炉、白炽灯等等。其中无感金属膜电阻器是最接近理想电阻元件的实际电阻器。上述其他各种实际电阻器件在直流和低频交流电路中应用时可作为电阻元件对待，但在高频电路或脉冲电路中应用时，它们的电感效应将不可忽略。

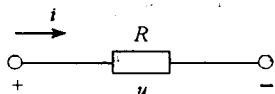


图 1-4 电阻元件的符号

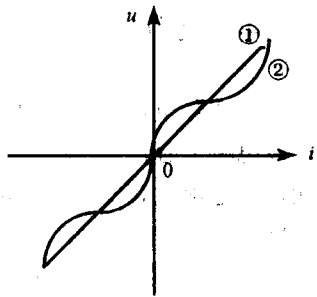


图 1-5 电阻元件的伏安特性曲线

电阻元件的符号如图 1-4 所示。当电流 i 通过电阻元件 R 时， R 两端将产生电压 u ，电流 i 与电压 u 之间的关系曲线称为电阻元件的伏安特性曲线，如图 1-5 所示。如果这条曲线是通过坐标原点的一条直线（如图 1-5 中曲线①所示），则称为线性电阻元件，简称电阻元件。如果不是直线（如图 1-5 中曲线②所示），则称为非线性电阻元件。

线性电阻元件的端电压 u 与通过它的电流 i 成正比，服从欧姆定律。当 u 、 i 的参考方向为一致参考方向（如图 1-4 中所示的那样）时，它的约束方程用下式表示

$$u = Ri \quad (1-3-1)$$

或

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-3-2)$$

式中 R 是一个正值常数，称为电阻。电阻的单位为欧姆，用 Ω 表示，阻值较大的电阻常用千欧（ $k\Omega$ ）、兆欧（ $M\Omega$ ）为单位。

$$1M\Omega = 10^3 k\Omega = 10^6 \Omega$$

在式(1-3-2)中，令 $G = \frac{1}{R}$ ，则有

$$i = Gu \quad (1-3-3)$$

或

$$G = \frac{i}{u} \quad (1-3-4)$$