



普通高等教育“十二五”规划教材

电路与模拟电子技术 (第三版)

杨家树 吴雪芬 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

主要内容

电路与模拟电子技术 (第三版)

主编 杨家树 吴雪芬

参编 于海平 陈德伟



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TU710
125-3

普通高等教育“十二五”规划教材

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。

本书主要从电路的基本概念进入,向电路的基本分析方法和基本定理展开,主要从电路与电路分析正弦交流电路、电路的过渡过程、常用半导体器件、放大电路基础、功率放大电路、集成运算放大器基础、负反馈放大器、集成运算放大器的应用、正弦波振荡器及直流稳压电源等方面进行了介绍。每章后面均有本章小结和习题,还有部分习题参考答案。

本书电路原理所选例题均来自于实践应用和实验,指导性强,适合作为普通高等院校理工科专业的电路理论课教材,也可供从事电工电子相关专业的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子技术 / 杨家树, 吴雪芬主编. —3 版. —北京: 中国电力出版社, 2015.1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-6575-9

I. ①电… II. ①杨… ②吴… III. ①电路理论—高等学校—教材②模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM13②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 236896 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 2 月第一版

2015 年 1 月第三版 2015 年 1 月北京第十一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 449 千字

定价 37.00 元

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

本书自 2003 年第一版出版以来，已经经历了 10 年，在此期间电工技术与电子技术飞速发展，对本课程的教学实践产生了巨大的影响，而随着教学内容和教学体系改革不断深入，对本教材也提出了进一步修订、不断完善的要求。本教材第三版在第二版的基础上对教材内容做了较大的改动，在基本保留第二版结构体系的前提下，参考热心读者的反馈意见，根据本教材对主要章节都进行了幅度较大的修改，主要工作如下：

（1）完善知识体系与结构。在相对紧促的学时限制下，尽可能满足相关专业人才培养对于电路原理与模拟电子技术的知识需求，并具有比较完整的系统性。在这个前提下重新编写了第 1 章的内容，从电路基本概念进入，以两类约束为主线，向电路的基本分析方法和电路基本定理展开，层层深入建立相对比较完整的电路理论基础。

（2）理论教学与工程实践紧密联系，对教材中涉及的元器件、集成电路，尽可能采用目前工程实践中的主流型号品种，不再延续使用老旧型号的资料。所引用元器件的参数都查阅了相关数据手册和各种参考资料，力求准确、实用。

（3）在模拟电路部分，针对基本电路原理的分析，坚持必要适度的理论分析推导，所选例题紧密围绕工作原理，思路明确，同时尽量结合实践应用，增加了一些典型电路参数的实验测量原理与方法。

（4）针对全书各章中存在的表达不够准确、文字不够严谨之处进行了全面认真地斟酌研究，进行了较大篇幅的修改，涉及的定理、定律尽量采用国内知名教材的表述。

（5）对前版中插图不够规范的问题，重画了本书的全部插图，重新修改了书中大部分数学表达式，并进行了认真核对，尽最大努力消除插图及公式不够严谨给读者带来的困惑。

本教材第三版主编杨家树、吴雪芬，第 1、2、3 章由于海平编写，第 4、9、10 章由陈德伟编写，第 5 章由吴雪芬编写，第 6、7、8、11 章由杨家树编写。全书由杨家树统稿并进行了修改补充，顾开祥、丁冉、王浩、许磊、赵燕燕、沈京为本书插图修改做了大量的工作，在此深表感谢。

电路与电子技术在不断发展，知识的更新速度如此之快，而教学改革对教材不断提出新的要求，尽管我们做出了很大的努力来使这本教材适应这些变化，尽量满足读者的要求，但限于编者水平，肯定还存在种种不足，在感谢使用本书的教师和学生一如既往的热情鼓励的同时，更希望得到大家的批评指正。

编者

2014 年 12 月

目 录

前言

第1章 电路与电路分析	1
1.1 电路及其组成	1
1.2 电路的基本物理量	3
1.3 电路的3种工作状态	6
1.4 无源电路元件	8
1.5 有源电路元件	13
1.6 基尔霍夫定律	17
1.7 电路的基本分析方法	21
本章小结	31
习题一	32
第2章 正弦交流电路	37
2.1 正弦交流电	37
2.2 正弦交流电的相量表示法	41
2.3 正弦交流电路中的元件	45
2.4 阻抗的串联和并联	52
2.5 交流电路的功率及功率因数	57
2.6 正弦交流电路的谐振	59
2.7 三相交流电路	63
本章小结	71
习题二	72
第3章 电路的过渡过程	76
3.1 换路定则和电路的初始状态	76
3.2 一阶RC电路的过渡过程	78
3.3 微分电路和积分电路	84
3.4 RL电路中的过渡过程	86
本章小结	88
习题三	89
第4章 常用半导体器件	92
4.1 半导体的基本知识	92
4.2 半导体二极管	95
4.3 特殊二极管	99
4.4 双极型三极管	101

4.5 场效应管	109
本章小结	113
习题四	115
第 5 章 放大电路基础	118
5.1 放大电路的组成和基本原理	118
5.2 图解分析法	120
5.3 工程估算法	126
5.4 射极输出器	134
5.5 共基电路及放大电路 3 种组态的比较	136
5.6 场效应管放大电路	140
5.7 多级放大电路	144
5.8 放大器参数的测量	151
本章小结	152
习题五	153
第 6 章 功率放大电路	159
6.1 概述	159
6.2 互补对称式功率放大电路	162
6.3 集成功率放大器	170
本章小结	174
习题六	175
第 7 章 集成运算放大器基础	177
7.1 概述	177
7.2 集成运放中的偏置电路	178
7.3 差动放大电路	180
7.4 集成运放的主要技术指标	185
7.5 典型集成运放的介绍	187
本章小结	190
习题七	190
第 8 章 负反馈放大器	193
8.1 反馈的基本概念与分类	193
8.2 反馈放大器的一般表达式	198
8.3 负反馈对放大器性能的影响	202
8.4 深度负反馈条件下的近似估算法	207
本章小结	213
习题八	214
第 9 章 集成运算放大器的应用	218
9.1 理想运算放大器	218
9.2 基本运算电路	220
9.3 积分和微分运算	226

9.4 有源滤波器	228
9.5 电压比较器	232
9.6 集成运放的应用实例	236
9.7 集成运放的应用注意事项	238
本章小结	239
习题九	240
第 10 章 正弦波振荡器	245
10.1 概述	245
10.2 LC 正弦波振荡器	247
10.3 RC 正弦波振荡器	252
10.4 石英晶体振荡器	255
本章小结	257
习题十	258
第 11 章 直流稳压电源	261
11.1 整流滤波电路	261
11.2 硅稳压管稳压电路	269
11.3 串联调整型稳压电路	271
11.4 集成三端稳压器	273
11.5 开关型稳压电路	276
本章小结	279
习题十一	280
部分习题参考答案	283
参考文献	287

第1章 电路与电路分析

【本章提要】 电路是电工、电子技术中的主要研究对象，内容非常丰富。本章首先对什么是电路、描绘电路的基本物理量及电路的基本定律、定理进行研究，再进一步研究直流电路的分析方法。学习直流电路不但为交流电路的分析打下理论基础，而且也以后学专业课程提供电路理论基础。

1.1 电路及其组成

电路是电流通过的路径，它是各种电气器件（电气器件包括发电机、电池、电动机、电灯、集成电路、控制电器等）为了完成某一功能而按一定方式连接起来组成的总体。电路功能不同，电路模型就不同，它们通常都由电源（信号源）、中间环节和负载三部分组成，电力系统电路示意图如图 1-1 所示。



图 1-1 电力系统电路示意图

其中电源是提供电能的装置，它将其他形式的能量转换为电能，如发电机、电池、话筒等；负载是取用电能的装置，它将电能转换为其他形式的能，如电动机、电灯、扬声器等；中间环节是传输、分配、控制电能的装置，如传输线、变压器、放大器、开关等。

一个完整的电路，电源（信号源）、中间环节和负载三部分是缺一不可的。按工作任务划分，电路的功能有两类：第一类是进行能量转换、传输和分配，如电力系统（见图 1-1）；第二类是信号的传输与处理，如扩音系统（见图 1-2）。

有时这两类电路在结构上并无区别，如指挥交通的红绿灯电路是传递信号的，街道上的照明灯是转换能量的。但它们的电路结构相同。



图 1-2 扩音系统

电路分析的研究对象并不是实际电路，而是它们的数学模型，即电路模型。电路模型是由理想化的电路元件相互连接构成的。理想化的电路元件（简称电路元件）是从实际器件的电磁特性抽象出来的数学模型，实际电路在运行过程中的表现相当复杂，如：制作一个电阻器是要利用它对电流呈现阻力的性质，然而当电流通过时还会产生磁场。要在数学上精确描述这些现象相当困难。为了用数学的方法从理论上判断电路的主要性能，必须对实际器件在一定条件下，忽略其次要性质，按其主要性质加以理想化，从而得到一系列理想化元件。常用的三种基本理想化元件分别为理想电阻、电感和电容元件。其中，理想电阻元件只消耗电能，如电烙铁、灯泡、电炉等，可以用理想电阻来反映其消耗电能的这一主要特征，理想电

容元件只储存电能,如各种电容器,可以用理想电容来反映其储存电能的特征;理想电感元件只储存磁能,如各种电感线圈,可以用理想电感来反映其储存磁能的特征。用规定的符号代表元件而连接成的图形称为电路图。如图 1-3

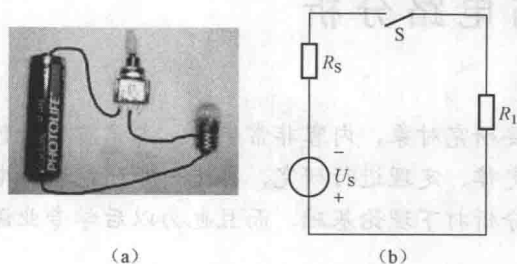


图 1-3 手电筒实际电路与电路模型

(a) 实际电路; (b) 电路图

(a) 所示是手电筒的实际电路,其电路元件有干电池、灯泡、导线和开关。它的电路图如图 1-3 (b) 所示(该电路图是一个最简单的电路图),实际电路中的干电池用理想电压源 U_S 和内阻 R_S 表示,灯泡用电阻 R_L 表示,导线电阻忽略不计。

本书中所讨论的电路和元件,均指理想电路模型和理想化电路元件。应该指出,实际电路用

电路模型来近似表示是有条件的。一种电路模型只有在一定条件下才适用的,条件变了电路模型也要做相应的改变。如图 1-4 所示电感线圈的几种电路模型。

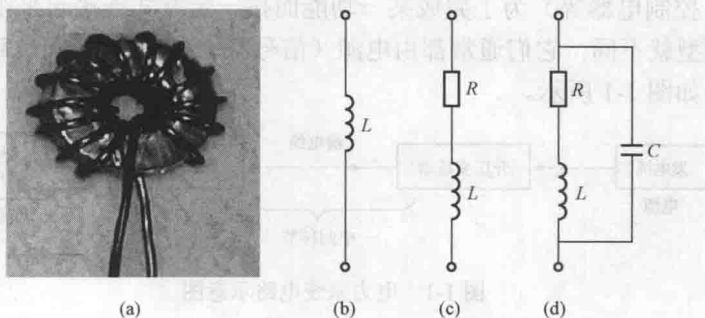


图 1-4 电感线圈的几种电路模型

(a) 实际电感线圈; (b) 线圈图形符号; (c) 低频交流电路; (d) 高频交流电路

理想元件是抽象的模型,没有体积的大小,其特性集中表现在空间的一个点上,称为集总参数元件。由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。在集总参数电路中,任何时刻该电路任何地方的电流、电压都是与其空间位置无关的确定值。本书只对集总参数电路进行分析。若实际电路的尺寸远小于其工作频率所对应的波长,就说它满足集总参数化条件,可以用集总参数电路作为其模型。

例如,我国电力系统照明用电的工作频率为 $f=50\text{ Hz}$,电磁波的传播速度 $v=3\times 10^5\text{ km/s}$,则

$$\text{周期} \quad T=1/f=1/50\text{ s}=0.02\text{ s}$$

$$\text{波长} \quad \lambda=vT=3\times 10^5\times 0.02=6000\text{ (km)}$$

对于大多数用电设备来说,其尺寸与之相比可忽略不计,采用集总参数电路模型是适合的。而对于远距离的通信线路和电力输电线路则不满足上述条件,就不能用集总参数电路模型来分析。又如在微波电路中,信号的波长 $\lambda=0.1\sim 10\text{ cm}$,此时波长与元件尺寸属同一数量级,信号在电路中传输时间不能忽略。

若描述电路特性的所有方程都是线性代数或微积分方程,则称这类电路是线性电路;否则为非线性电路。非线性电路在工程中应用更为普遍,线性电路常常仅是非线性电路的近似

模型,但线性电路理论是分析非线性电路的基础。本书主要讨论线性电路。

若组成电路的所有元件的参数值都是不随时间变化的电路,则称为非时变电路。若电路中至少有一个元件的参数是随时间而变化的,则称为时变电路。非时变电路是最基本的电路模型,是研究时变电路的基础。本书主要讨论集总参数电路中的线性时不变电路。

1.2 电路的基本物理量

为了定量地描述电路的性能,电路中引入了一些物理量作为电路变量。通常分为基本变量和复合变量两类。电流、电压由于易测量而常被选为基本变量。复合变量包括功率和能量等。一般,它们都是时间 t 的函数。

1.2.1 电流

大量电荷的定向运动形成电流。为了衡量电流的强弱,规定了电流强度这一物理量。电流强度在数值上是指在外电场的作用下,单位时间内通过导体横截面电荷量的代数和。图 1-5 表示一段圆柱金属导体,在 dt 时间内,通过导体截面积 S 的电量为 dq ,则电流强度为

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

式 (1-1) 中 i 为电流强度(简称电流),它是时间的函数。

在国际单位制中,电荷量的单位是库仑(C),时间的单位是秒(s),电流的单位是安培(A),简称安。计算大电流时用千安(kA)做单位,计算小电流时用毫安(mA)和微安(μ A)做单位。它们的关系是

$$1\text{kA}=10^3\text{A}$$

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

电流不但有强弱,而且有方向,通常规定电流的方向为正电荷的运动方向。电子的运动方向与电流的方向相反,如图 1-5 所示。

在通常情况下,电流是随着时间变化的。若电流强度的大小和方向均不随时间变化而变化,即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$,则这种电流为恒定电流,简称直流。直流常用大写字母 I 来表示。因此,式 (1-1) 可写成

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

式中 Q ——时间 t 内通过截面积 S 的电量。

由于在分析复杂电路时难以事先判断支路中电流的实际方向,因此引入参考方向的概念。参考方向就是在分析电路时先假定一个支路的电流方向。当电流的实际方向与参考方向一致时,电流为正值;反之,电流为负值,如图 1-6 所示。

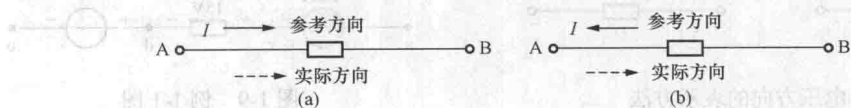


图 1-6 电流的实际方向与参考方向

(a) $I > 0$; (b) $I < 0$

参考方向常用电路图中导线上或者导线旁的箭头来标出,也可以用双下标表示,如 I_{AB} ,表示电流的参考方向由 A 指向 B。

1.2.2 电压、电位与电动势

要在电路中形成电流,电路必须闭合,同时要有电场力的作用。图 1-7 中, a 和 b 是电源

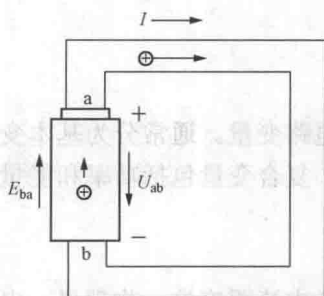


图 1-7 电压与电动势

的两个电极,其中 a 带正电, b 带负电, a、b 两极间就形成电场,其方向由 a 指向 b,如果将 a、b 两极用导体连接起来,则在外电路(电源两极以外的电路)中,电场力将正电荷通过导体由正极 a 移动到负极 b,即电场力对正电荷做了功。用电压来度量这种电场力对电荷做功的能力,记做 U_{ab} 。电压总是相对两点之间而言的,所以用双下标表示,如果正电荷顺电场方向由 a 移动到 b,那么 $U_{ab} > 0$;反之, $U_{ab} < 0$ 。在电源内部(称内电路),外力将正电荷由 b 移动到 a,即外力对正电荷做了功,用电动势来度量这种外力对电荷做功的能力,记做 E_{ba} ,其方向由负极指向正极。如果电流流过电源内部没有能量损耗,这样的电源称为理想电源。理想电源的端电压用字母 U_S 表示,数值上等于电源电动势 E_{ba} 。

电压也叫电位差,可表示成 $U_{ab} = V_a - V_b$ 。式中 V_a 称为 a 点的电位, V_b 称为 b 点的电位。在分析电路时常常设电路中某一点的电位为零(该点称为零参考点),这样电路中其他各点与零参考点之间的电压就是各点的电位。由于零参考点是任意规定的,所以电位是个相对量,它与参考点的选择有关,而电压是个绝对量,与参考点的选择无关。

电位参考点的选择,虽然从理论上说可以任意选择,但在不同的情况下有着不同的选择习惯。在电器中,如果电路中有接地点,通常选择接地点为参考点,用符号“ $\perp$ ”表示,在电子电路中,常取若干导线交汇点或机壳作为参考点,用符号“ --- ”表示。

在国际单位制中,电压、电位和电动势的单位都是伏特(V),简称伏。为了方便计算,还可以用毫伏(mV)、微伏(μV)和千伏(kV)做为单位,它们的关系是

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

电压是标量,为了便于分析,也给电压和电动势规定了方向。在外电路中,电压的方向规定为由高电位指向低电位,即电压降落的方向;在内电路中,电动势的方向规定为由低电位指向高电位,即电位升高的方向。在电路中经常用箭头法或极性法表示电压方向,如图 1-8 所示。

同样,在未知电位高低时,电压同电流一样,使用参考方向来分析。

【例 1-1】图 1-9 中各元件上电压均为已知,则

(1) 取 $V_a = 0$, 求各点的电位; (2) 取 $V_b = 0$, 求各点的电位。

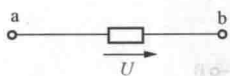


图 1-8 电压方向的表示方法

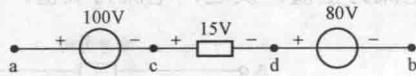


图 1-9 例 1-1 图

解 (1) 取 $V_a = 0$, 由图可知

$$U_{ac} = V_a - V_c \quad V_c = V_a - U_{ac} = 0 - 100 = -100(\text{V})$$

$$U_{cd} = V_c - V_d \quad V_d = V_c - U_{cd} = (-100) - 15 = -115(\text{V})$$

$$U_{bd} = V_b - V_d \quad V_b = U_{bd} + V_d = 80 + (-115) = -35(\text{V})$$

$$U_{ab} = V_a - V_b = 0 - (-35) = 35(\text{V})$$

(2) 取 $V_d = 0$ ，再由图可知

$$U_{cd} = V_c - V_d \quad V_c = U_{cd} + V_d = 15\text{V}$$

$$U_{ac} = V_a - V_c \quad V_a = U_{ac} + V_c = 100 + 15 = 115(\text{V})$$

$$U_{bd} = V_b - V_d \quad V_b = U_{bd} + V_d = 80 + 0 = 80(\text{V})$$

$$U_{ab} = V_a - V_b = 115 - 80 = 35(\text{V})$$

从以上分析可知，参考点不同，各点电位不同，但两点之间的电压不变。根据以上特点，电路中常用一种简化的习惯画法即极性数值法来简化有一端接地的电压源，如图 1-10 所示。

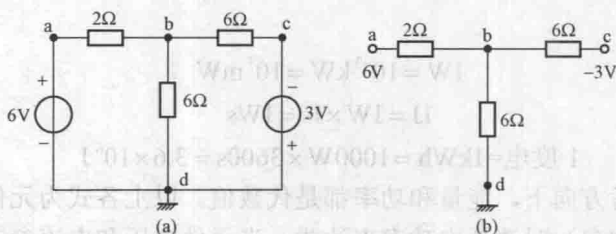


图 1-10 电路图

(a) 电路图；(b) 简化图

1.2.3 关联参考方向

电路中的电流与电压的参考方向是任意选定的，两者之间独立无关。但是，在分析电路时，有时要同时考虑电压和电流的参考方向，例如在说明元件的端口特性，或者考虑一个元件或一个电路端口的功率时，需要考虑二者的相对关系。为了方便起见，对于同一元件或同一个电路端口，习惯上采用“关联”参考方向。如果指定流过元件的电流的参考方向是从标以电压正极性的一端指向负极性的一端，即两者的参考方向一致，则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向，如图 1-11 (a) 所示；反之称为非关联参考方向，如图 1-11 (b) 所示。一般情况下，同一个元件的电压和电流的参考方向选为关联方向，可以只选取一个量的参考方向，另一个量为默认关联方向，可以不标注。

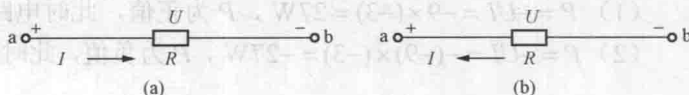


图 1-11 电压和电流的参考方向

(a) 关联参考方向；(b) 非关联参考方向

1.2.4 功率和能量

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，电源供出的电能量等于负载消耗或者吸收电能的总和。功和能量用字母 W 表示。

负载消耗或吸收的电能量即电场力移动电荷 Q 所做的功。由电压、电流定义，可表示为

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

其中, 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。

$$p = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u i dt = ui$$

若电压、电流都是恒定值时, 以上两式分别为

$$W = UI\tau = P\tau$$

$$P = \frac{W}{\tau} = UI$$

在国际单位制中, 能量的单位是焦耳 (J), 功率的单位是瓦特 (W)。另外, 电功率的单位也常用千瓦 (kW) 和毫瓦 (mW) 表示, 电能常用千瓦时 (kWh) 表示, 1kWh 就是 1 度电。

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

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

$$1\text{度电} = 1\text{kWh} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6\text{J}$$

在电压、电流参考方向下, 能量和功率都是代数值。以上各式为元件电压和电流参考方向一致 (即关联参考方向) 时消耗电功率表达式, 当元件电压和电流参考方向相反时 (即参考方向非关联), 计算元件消耗的电功率要在表达式前加 “-” 号, 即

$$P = -UI$$

【例 1-2】 有一只 220V 60W 的电灯, 接在 220V 的电源上, 试求电灯的电阻和电灯在 220V 电压下工作时的电流。如果每晚用 3h, 问一个月消耗电能多少?

解 流过电灯的电流

$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{220} = 0.273(\text{A})$$

电灯的电阻

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.273} = 806(\Omega)$$

一个月用电

$$W = UIt = Pt = 0.06 \times 3 \times 30 = 5.4(\text{kWh})$$

【例 1-3】 在图 1-12 中, 若已计算出 (1) $U=9\text{V}$, $I=-3\text{A}$; (2) $U=-9\text{V}$, $I=-3\text{A}$ 。试说明在这两种情况下, 电路是产生还是消耗电功率。

解 由于 U 和 I 所取方向相反, 则电功率:

(1) $P = -UI = -9 \times (-3) = 27\text{W}$, P 为正值, 此时电路吸收电功率。

(2) $P = -UI = -(-9) \times (-3) = -27\text{W}$, P 为负值, 此时电路产生电功率。



图 1-12 例 1-3 图

1.3 电路的 3 种工作状态

1.3.1 电路的有载工作状态

将图 1-13 (a) 的开关合上, 电源就向负载供电, 电路处在有载工作状态。有载工作时的电路具有以下特点

$$U = IR$$

$$U = U_s - IR_0$$

$$P = IU$$

1.3.2 电路的空载工作状态

在图 1-13 (a) 中, 将开关打开, 电源与负载断开, 这时电路处在空载状态 (也称开路状态), 处在空载状态时的电路具有以下特点

$$I = 0$$

$$U = 0$$

$$U_0 = U_s$$

$$P = 0$$

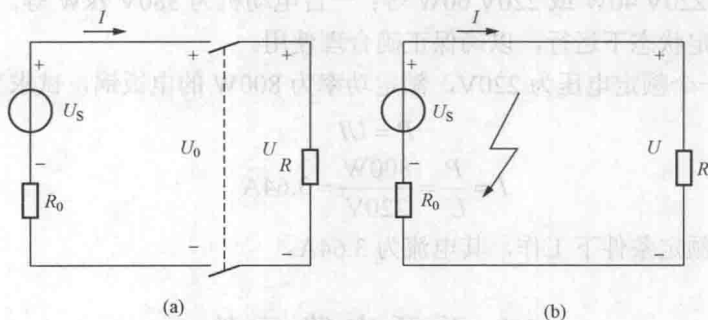


图 1-13 电路的工作状态

(a) 空载状态; (b) 有载状态

1.3.3 电路的短路状态

在图 1-13 (b) 所示的电路中, 当电源两端被电阻为零的导线短接时, 电路就处于短路工作状态, 短路工作时的电路具有以下特点

$$U = 0$$

$$I = I_s = \frac{U_s}{R_0}$$

$$P = P_0 = I^2 R_0$$

其中, I_s 称为短路电流。

如果电源内阻很小, 则当电源短路时, 其短路电流将大大超过额定电流, 以致电源和短路电流所经过的线路烧坏, 这是十分危险的。为防止短路事故的发生, 通常在电源的输出端接上熔断器, 当电路短路时, 熔断器中的熔丝可快速切断电源, 避免出现重大事故。

【例 1-4】 某电池组的电动势 $E=24\text{V}$, 内阻 $R_0=0.1\Omega$, 正常使用时的负载电阻为 $R=1.9\Omega$, 求额定工作电流 I 及当负载电阻被短路时的电流 I_s 。

解

正常使用时

$$I = \frac{E}{R + R_0} = \frac{24}{1.9 + 0.1} = 12(\text{A})$$

短路时

$$I_s = \frac{E}{R_0} = \frac{24}{0.1} = 240(\text{A})$$

1.3.4 电气设备的额定值

电气设备一般均由导体、绝缘材料等组成,当电气设备通过电流时,导体就要发热,于是电气设备的温度升高。如果所加电压太高或通过的电流太大,就有可能使绝缘材料老化并击穿,从而导致电气设备损坏。反之,如果所加电压或通过的电流比额定值小很多,则不仅不能达到合理的工作状态(如电压太低、电灯亮度不够、电动机转速不高等),也不能充分利用电气设备的工作能力。

因此,对于实际的电气设备,为了发挥最佳的技术经济效能,制造厂家对它的性能、使用条件等都用一些技术数据加以规定,这些技术数据称为电气设备的额定值,如额定电压、额定电流、额定功率等。这些额定值一般都标注在设备的铭牌上或产品说明书中。例如,一盏白炽灯的规格有 220V 40W 或 220V 60W 等;一台电动机为 380V 7kW 等。电气设备均应在额定状态或接近额定状态下运行,以确保正确合理使用。

【例 1-5】 有一个额定电压为 220V,额定功率为 800W 的电饭锅,试求其工作电流。

解 因为

$$P = UI$$

所以

$$I = \frac{P}{U} = \frac{800\text{W}}{220\text{V}} = 3.64\text{A}$$

即该电饭锅在额定条件下工作,其电流为 3.64A。

1.4 无源电路元件

电路元件是组成电路模型的最小单元,元件本身就是一个最简单的电路模型。电路元件按与外部连接的端子数目可分为二端、三端、四端元件等。电阻元件、电感元件和电容元件都是二端元件。电路元件的特性是由它端子上的电压、电流关系来表征的,通常称为伏安特性,记为 var ,可以用数学关系式表示,也可以描述成电压、电流的关系曲线,即伏安特性曲线。

1.4.1 电阻元件

在任何时刻,能用 $u-i$ 坐标平面上的一条曲线表示其外部特性的元件称为电阻元件。电阻元件按其伏安特性曲线是否通过原点的直线可分为线性电阻元件和非线性电阻元件;按其特性曲线是否随时间变化,又可分为时变电阻元件和非时变电阻元件。

在通常的应用条件下,工程实际中遇到的大部分电阻器可以用线性非时变电阻元件作为其模型。本书中主要讨论线性非时变电阻。线性非时变电阻元件就是我们常说的电阻元件,简称电阻。其符号用 R 表示,如图 1-14 (a) 所示,电压、电流在关联参考方向时,其伏安特性曲线如图 1-14 (b) 所示。该特性曲线的数学描述为欧姆定律,式中 R 的数值为该直线的斜率,是一个与电压电流无关的量,简称电阻。式 (1-4) 表明在一定电压下电阻 R 的增大将使电流减小。可见 R 是表征电阻元件阻碍电流能力大小

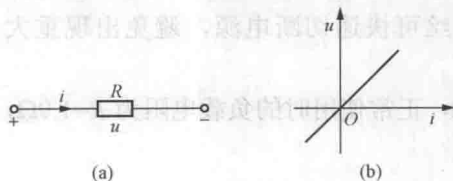


图 1-14 电阻元件

(a) 图形符号; (b) 伏安特性曲线

小的参数。电阻的单位为欧[姆](Ω), $1\Omega = 1\text{V/A}$ 。

$$u = Ri$$

(1-4)

式(1-4)也可以用另一种形式表示

$$i = Gu \quad (1-5)$$

式(1-5)中, G 称为电阻元件的电导, 即 $G = 1/R$, 电导的单位是西[门子](S), $1\text{S} = 1\text{A/V}$ 。注意, 当电阻端电压和电流采用非关联参考方向时

$$u = -Ri$$

当电阻元件的电阻值为无限大或电导值为无限小时, 其伏安特性曲线与 u 轴重合, 此时电阻元件相当于断开的导线, 称为开路; 当电阻元件的电阻值为无限小或电导值为无限大时, 其伏安特性曲线与 i 轴重合, 此时电阻元件相当于一理想导线, 称为短路。

当电阻元件电压、电流在关联参考方向时, 电阻元件的功率可表示为

$$P = ui = i^2 R = u^2 G \quad (1-6)$$

式(1-6)表明电流通过电阻时要消耗能量。电阻元件是一种耗能元件, 它将吸收的全部电能转换为其他形式的能量。

作为理想元件, 电阻元件上的电压、电流可以不受限制地满足欧姆定律。但作为实际的电阻器如灯泡、电炉等, 对电压、电流或功率都有一定的限制。过大的电压或者电流会使器件过热而损坏。因此, 在电子设备的设计中, 必须考虑器件的额定电流、额定电压和额定功率以及器件的散热问题。市售的各类电阻, 除表明其电阻值外, 还表明其功率大小, 通常标有 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ W 和 2W 等。在选用电阻时除了选择其电阻值外, 还必须考虑其功率大小。

【例 1-6】 图 1-15 中, 已知电阻两端瞬时电压 $u = 4\text{V}$, 且 $R = 2\Omega$ 。求该瞬时流经电阻的电流 i 和电阻吸收的功率 P 。

解 图 1-15 所示的电路中, 电压、电流采用非关联参考方向, 即

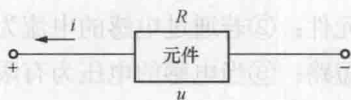


图 1-15 例 1-6 的电路

$$u = -Ri$$

$$\text{得 } i = -\frac{u}{R} = -\frac{4}{2}\text{A} = -2\text{A}$$

该元件瞬时吸收功率为

$$p = -ui = -4(-2\text{A}) = 8\text{W}$$

1.4.2 电感元件

实际电感器通常由绕在磁性材料上的线圈构成。当线圈流过电流时即在其线圈内外建立磁场并产生磁通 Φ (单位为韦伯, Wb), 电感线圈示意图如图 1-16 所示。如果线圈紧绕, 且有 N 匝, 则各线匝磁通的总和称为磁链 $\psi (\psi = N\Phi)$ 。可见电感器是一种建立磁场、存储磁场能量的器件。电感元件是实际电感器的理想化模型, 其电路符号如图 1-17 (a) 所示。它的定义: 一个二端元件, 如果在任一时刻, 它所交链的磁链与其电流之间的关系可以用一条曲线来确定, 则此二端元件称为电感元件, 简称电感。该曲线称为电感元件在 t 时刻的韦安特性曲线。

与电阻元件类似, 若电感元件的 $\psi-i$ 平面上的曲线为通过原点的直线, 则称为线性电感; 否则为非线性电感。若曲线不随时间而变化, 则称为非时变电感, 否则为时变电感。本课程中的电感元件均指线性非时变电感。其 $\psi-i$ 曲线如图 1-17 (b) 所示, 关系式可写成

$$\psi = Li \quad (1-7)$$

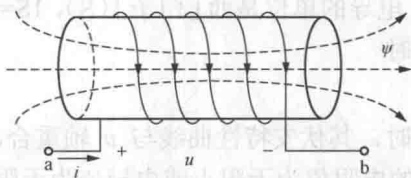


图 1-16 电感线圈示意图

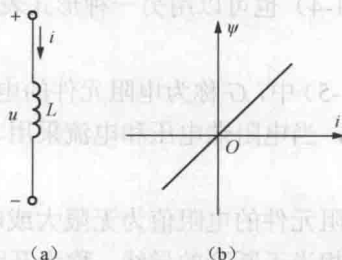


图 1-17 电感元件

(a) 图形符号; (b) ψ - i 曲线

式 (1-7) 中, L 称为电感元件的电感系数, 简称电感。电感值的单位为亨利 (H)。当电感值较小时, 可以用毫亨 (mH) 或微亨 (μ H) 表示。

当变化的电流通过电感线圈时, 在其周围产生变化的磁通, 根据法拉第电磁感应定律, 该变化的磁通在线圈两端引起感应电压。感应电压的大小等于磁链的变化率。若电感元件两端的电压 u 与 i 采用图 1-17 (a) 所示的关联参考方向, 得到电感元件伏安关系的微分形式为

$$u_L = \frac{d\psi_L}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 表明: ①任何时刻, 电感元件两端的电压与该时刻的电流变化率成正比, 而与该时刻元件中电流的大小无关, 由于电感电流与电压的这种动态关系, 电感元件又称为动态元件; ②若通过电感的电流为直流, 无论其值的大小如何, 都有 $u=0$, 即电感对直流相当于短路; ③当电感的电压为有限值时, 电感的电流不能跃变, 若 i 发生跃变, 则有 $L \frac{di}{dt} = \infty$ 。电感这一特性是分析动态电路的重要依据。

将式 (1-8) 等号两边积分并整理, 可得到电流 i 由电压 u_L 表示的函数, 即

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u_L dt + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt \quad (1-9)$$

式 (1-9) 中, $i(0)$ 为计时时刻 $t=0$ 时的电流值, 又称为初始值。式 (1-9) 说明了电感元件在某一时刻的电流值不仅取决于 $(0, t)$ 区间的电压值, 而且与电流的初始值有关。因此, 电感元件有记忆功能, 是一种记忆元件。

当两端电压与电流取关联参考方向时, 电感元件的瞬时吸收功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}$$

若电流 i 由零增加到 I 值, 电感元件吸收的电能为

$$W = \int_0^I Li di = \frac{1}{2} LI^2$$

若电流 i 由 I 减小到零值时, 则电感元件吸收的电能为

$$W' = \int_I^0 Li di = -\frac{1}{2} LI^2$$

吸收的电能为负, 意味着放出能量。因此当电流增加时, 电感元件从电路中吸收电能, 将其转化为磁场能储存起来; 当电流减小时, 释放磁场能量转化为电能送还给电路。电感元