

TM13-4,  
2862

高等学校适用教材

# 电 路 原 理

主 编	徐国凯	毕卫红	
副主编	李素琴	孙桂岚	
编 者	徐国凯	毕卫红	李素琴
	孙桂岚	藏春华	刘秀贤
	张彩荣	张文汉	
主 审	刘玉峰		
副主审	王德志		

本书是根据国家教委1995年8月制定的全国高校“电路课程教学基本要求”和教学大纲并结合作者多年的教学经验编写的。本书主要内容有：电阻电路的基本定律、定理及分析方法，正弦电路分析，三相电路、非正弦周期电流电路，动态电路的时域分析和复频域分析、网络图论和网络方程，双端口网络及非线性电路，磁路与铁心线圈。

本书可作为高等学校工业自动化、电子工程、通信工程、电子检测及仪表等电类专业教材，还可作为电类技术人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电路原理/徐国凯主编. —北京：机械工业出版社，1997.3  
高等学校适用教材

ISBN 7-111-05293-5

I. 电… II. 徐… III. 电路理论-高等学校-教材  
IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 12455 号

出版人：马九荣（北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037）  
责任编辑：张一萍 版式设计：霍永明 责任校对：樊中英  
封面设计：姚毅 责任印制：路琳

北京市房山区印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
1996年12月第1版第1次印刷

787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub> · 16.125印张 · 355千字

0 001 6 500 册

定价：19.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

## 前 言

根据国家教委 1995 年 8 月制定的全国高校“电路课程教学基本要求”和教学大纲，结合作者多年的电路教学经验，编写了这本教材——电路原理。

电路原理是一门电类专业非常重要的技术基础课，主要内容是应用基本定律、定理或分析方法对已知电路进行分析，求出电路在特定激励下的响应。为此，本书侧重于基本理论的论述，对基本概念，基本定律和定理、基本分析方法都作了尽可能详尽的阐述，并通过实例、例题来说明理论的实际应用，以达到理论联系实际的目的。

本书在详细论述基本理论的同时，对电路理论传统的内容和新内容的协调给予了充分的注意。为了使读者能在系统地掌握线性电路理论的同时，了解非线性电路的分析方法，本书将非线性电路的分析集中在一章里专门论述；为避免课程间的重复，将理想运算放大器仅作为二端口元件介绍，删去其组成运算电路的分析；传输线内容仅极个别的专业应用，故将其删去。书中有 \* 号部分是供给不同专业选用加宽加深的內容。

本书内容安排：第一、二章为直流电路，讲述基本元件及特性、基本定律、定理及分析法；第三、四章为正弦电路；介绍一般正弦电路和三相电路的分析；第五章为非正弦周期电流电路；第六章为动态电路时域分析，介绍一阶、二阶电路在各种激励下的响应；第七~九章、十章内容依次为动态

电路的复频域分析、网络图论和网络方程、二端口网络和非线性电路；第十一章为磁路与铁心线圈。

本书由徐国凯、毕卫红主编，刘玉峰主审，徐国凯编写大纲、协调编写工作并执笔编写了第一、二章；毕卫红编写了第八、九、十章，并负责统稿及审校全文；李素琴编写了第三章，孙桂岚编写了第四章，藏春华编写了第五章，刘秀贤编写了第十一章，张彩荣编写了第六章，张文汉编写了第七章。在本书的编写过程中，一直得到刘长林教授的关心和指导，并亲自复审本书校样，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥甚至错误之处，敬请读者提出意见，以便今后修订提高。

编 者

1996年2月

# 目 录

## 前言

第一章	电路模型和电路定律 .....	1
第一节	电路和电路模型 .....	1
第二节	电流、电压及其参考方向 .....	3
第三节	功率 .....	6
第四节	电阻元件 .....	8
第五节	电容元件 .....	11
第六节	电感元件 .....	13
第七节	电压源和电流源 .....	17
第八节	受控源 .....	21
第九节	基尔霍夫定律 .....	23
习题一	.....	29
第二章	电阻电路的分析 .....	32
第一节	电阻的串联、并联和串并联 .....	32
第二节	实际电源模型的等效变换 .....	38
第三节	电阻三角形联结与星形联结的等效变换 .....	41
第四节	支路电流法 .....	45
第五节	网孔电流法和回路电流法 .....	50
第六节	节点电压法 .....	58
第七节	替代定理 .....	64
第八节	叠加定理 .....	66
第九节	等效电源定理 .....	70
习题二	.....	78
第三章	正弦稳态分析 .....	84

## VI

第一节	周期量	84
第二节	正弦电流	87
第三节	正弦量的相量表示法	90
第四节	电阻、电感和电容的电压、电流的相量关系	97
第五节	基尔霍夫定律的相量形式	103
第六节	电阻、电感、电容串联电路和复阻抗	104
第七节	电阻、电感、电容并联电路和复导纳	108
第八节	等效阻抗和等效导纳	112
第九节	阻抗的串联、并联和串并联	115
第十节	复杂正弦电流电路的分析	120
第十一节	正弦电流电路中的功率	125
第十二节	串联谐振电路	136
第十三节	并联谐振电路	143
第十四节	耦合电感	145
第十五节	含耦合电感的正弦电流电路	152
习题三		161
<b>第四章</b>	<b>三相电路</b>	<b>172</b>
第一节	三相电路基本概念	172
第二节	对称三相电路的计算	180
第三节	不对称三相电路的概念	184
第四节	三相电路中的功率	188
习题四		194
<b>第五章</b>	<b>非正弦周期电流电路</b>	<b>197</b>
第一节	非正弦周期电流	197
第二节	周期函数分解为傅里叶级数	199
第三节	周期函数的波形与傅里叶系数的关系	203
第四节	有效值和平均功率	205
第五节	非正弦周期电流电路的计算	208
第六节	傅里叶级数的指数形式	213

第七节	傅里叶积分和傅里叶变换 .....	216
习题五	.....	221
<b>第六章</b>	<b>动态电路的时域分析</b> .....	<b>224</b>
第一节	动态电路及其方程 .....	224
第二节	动态电路的初始条件 .....	226
第三节	一阶电路的零输入响应 .....	231
第四节	一阶电路的零态响应 .....	239
第五节	一阶电路的全响应 .....	248
第六节	求一阶电路全响应的三要素法 .....	252
第七节	一阶电路的阶跃响应 .....	258
第八节	一阶电路的冲击响应 .....	264
第九节	卷积积分 .....	276
第十节	RLC 串联电路的零输入响应 .....	281
习题六	.....	290
<b>第七章</b>	<b>动态电路的复频域分析</b> .....	<b>298</b>
第一节	拉普拉斯变换 .....	298
第二节	拉普拉斯变换的基本性质 .....	301
第三节	拉普拉斯反变换和部分分式法 .....	307
第四节	复频域中的电路定律和电路模型 .....	313
第五节	分析线性电路暂态过程的复频域法 .....	<u>317</u>
第六节	网络函数 .....	324
习题七	.....	329
<b>第八章</b>	<b>网络图论和网络方程</b> .....	<b>333</b>
第一节	网络图论简介 .....	333
第二节	关联矩阵 .....	339
第三节	基本割集矩阵 .....	343
第四节	基本回路矩阵 .....	345
第五节	支路电压电流关系的矩阵形式 .....	348
第六节	节点分析法 .....	355

第七节	改进的节点分析法 .....	361
* 第八节	回路分析法 .....	363
* 第九节	割集分析法 .....	366
第十节	网络的状态方程 .....	369
第十一节	特勒根定理 .....	375
第十二节	互易定理 .....	378
习题八	.....	384
<b>第九章</b>	<b>二端口网络</b> .....	<b>390</b>
第一节	二端口网络的概念 .....	390
第二节	二端口网络的导纳矩阵和阻抗矩阵 .....	391
第三节	二端口网络的传输矩阵和混合参数矩阵 .....	398
第四节	二端口网络的等效电路 .....	406
* 第五节	有载二端口网络 .....	408
第六节	二端口网络的级联 .....	413
第七节	运算放大器 .....	416
第八节	理想变压器 .....	419
第九节	回转器 .....	421
习题九	.....	424
<b>第十章</b>	<b>非线性电路</b> .....	<b>429</b>
第一节	非线性电路元件 .....	429
第二节	非线性电阻电路的图解法 .....	435
第三节	小信号分析法 .....	436
第四节	折线法 .....	443
第五节	非线性电阻电路的数值解法与友网络 .....	447
第六节	非线性电路的状态方程 .....	452
习题十	.....	455
* 第十一章	<b>磁路与铁心线圈</b> .....	<b>458</b>
第一节	磁场的基本物理量 .....	458
第二节	铁磁性物质的磁化 .....	461



第三节	磁路的定律 .....	465
第四节	恒定磁通磁路的计算 .....	469
第五节	正弦电压作用下铁心线圈中的磁通 .....	476
第六节	铁心线圈中电流波形的畸变 .....	478
第七节	铁内损耗 .....	482
第八节	正弦磁通磁路的计算 .....	486
第九节	铁心线圈的电路模型 .....	490
习题十一	.....	493
习题参考答案	.....	496
主要参考文献	.....	506

# 第一章 电路模型和电路定律

本章介绍电路和电路模型；电路的主要概念——电流、电压及其参考方向；着重阐述电路元件——电阻元件、电感元件、电容元件、电压源、电流源和受控源的元件特性（元件约束）以及反映元器件联接特性的基本定律——基尔霍夫定律（拓扑约束）。

## 第一节 电路和电路模型

电路是电流的流通过径，它是由一些电气设备和元器件按一定方式联接而成的。复杂的电路呈网状，又称网络。电路和网络这两个术语是通用的。

电路的组成方式不同，功能也就不同。它的一种作用是实现电能的传输和转换，各类电力系统就是典型实例。图 1-1a 是一种简单的实用电路、它由干电池、小灯泡、开关和联接导线等组成。当开关闭合时，电路中有电流流动、小灯泡发光。干电池向电路提供电能；小灯泡是用电器件，它把电能转化为热能和光能；开关和联接导线的作用是把电源和负载联接起来，构成电流通路。

电路的另一种作用是实现信号的处理，收音机和电视机电路就是这类实例。收音机和电视机中的调谐电路是用来选择所需要的信号。由于收到的信号很弱，需用放大电路对信号进行放大。调谐电路和放大电路的作用就是完成对信号的处理。

在自动控制系统、计算机和通信设备中有各种各样的电路，完成不同的任务。

电路中提供电能或信号的器件，称为电源，如图 1-1a 中的干电池。电路中的电流源或电压源称为激励。电路中吸收电能或输出信号的器件，称为负载，如图 1-1a 中的小灯泡。负载中的电流或电压称为响应。在电源和负载之间引导和控制电流的导线和开关等是传输控制器件。因此，电路是由电源和负载通过传输控制器件联接起来而构成的，用以实现电能传输或信号处理功能。

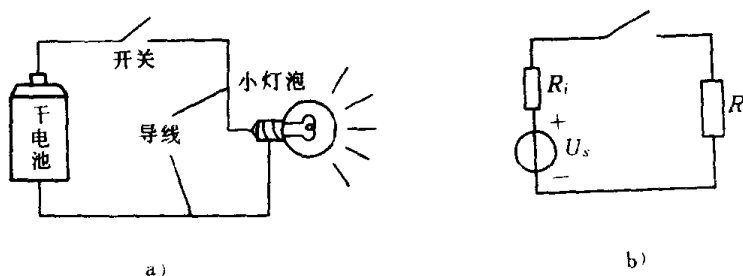


图 1-1 电路的组成

实际电路中器件种类很多，功能各异，其中涉及的物理过程多种多样，涉及声、光、热、化、电、磁等多方面的问题，但本课程只注重其中的电磁过程。为了便于进行分析，常常在一定条件下对实际电路器件加以理想化，抽象出一些反映单一电磁性质的理想化电路元件，通过它们的适当组合构成实际电路的电路模型，这是研究实际电路的常用方法。电路理论研究的对象是电路模型而不是实际电路。电路模型简称为电路。

我们常见的电路元件是一些所谓集中参数电路元件，元

件特性由其端点上的电流和电压来确切表达。由集中参数元件组成的电路称为集中参数电路。图 1-1a 中所示电路的集中参数电路模型如图 1-1b 所示。干电池用电源元件表示，小灯泡用电阻元件表示，导线看作无电阻的理想导线，图中各种符号以后再做说明。

## 第二节 电流、电压及其参考方向

带电粒子（电子、离子等）的定向运动，称为电流。电流的量值（大小）等于单位时间内穿过导体横截面的电荷量，用符号  $i$  表示，即

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} \quad (1-1)$$

式中  $\Delta Q$  为极短时间  $\Delta t$  内通过导体横截面的电荷量。

电流的真实方向（实际方向）为正电荷的运动方向。

当电流的量值和方向都不随时间变化时，则  $dQ/dt =$  定值，这种电流称为直流电流，简称直流（DC）。直流电流常用英文大写字母  $I$  表示，式（1-1）可写成

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

式中  $Q$  为时间  $t$  内通过导体横截面的电荷量。

在国际单位制（SI）中，电流的 SI 主单位是安〔培〕，符号为 A。电流的十进倍数单位和分数单位，常用的有千安（kA）、毫安（mA）、微安（ $\mu\text{A}$ ）等。

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

在复杂电路的分析中，一段电路电流的实际方向很难预先判断出来；有时一段电路电流的真实方向还不断改变。因此，很难在电路中标明电流的真实方向。由于上述原因，在

电路分析中要引入电流参考方向（正方向）的概念。

电流参考方向是任意选定的一个方向，在电路中用实线箭头表示。在电流参考方向一定的情况下，电流则为代数量，其数值可正可负。若电流的真实方向与参考方向一致，则电流为正值；若电流的真实方向与参考方向相反，则电流为负值。图 1-2 表明了电流参考方向的意义，虚线箭头代表电流的真实方向。

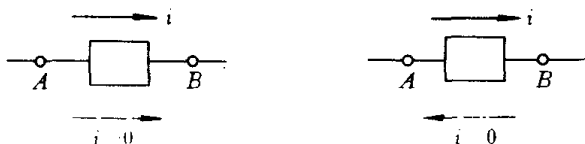


图 1-2 电流的参考方向

当导体中存在电场时，电荷在电场力的作用下运动，电场力对运动电荷做功，运动电荷的电能将减少，电能转化为其他形式的能量。电路中  $A$ 、 $B$  两点间的电压  $u_{AB}$  是单位正电荷在电场力的作用下由  $A$  点移动到  $B$  点所减少的电能，即

$$u_{AB} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta W_{AB}}{\Delta q} = \frac{dW_{AB}}{dq} \quad (1-3)$$

式中  $\Delta q$  为由  $A$  点移动到  $B$  点的电荷量， $\Delta W_{AB}$  为移动过程中电荷所减少的电能。

电压的真实方向是使正电荷电能减少的方向，当然也是电场力对正电荷做功的方向。

在国际单位制中，电压的 SI 单位名称是伏〔特〕，单位符号为 V。电压的十进倍数和分数单位有千伏（kV）、毫伏（mV）、微伏（ $\mu V$ ）等。

对于直流电压，用大写字母  $U$  表示。

与电流类似,在电路分析中也要规定电压的参考方向,通常用三种方式表示:

1) 采用正 (+)、负 (-) 极性表示,称为参考极性,如图 1-3a 所示。这时从正极性端指向负极性端的方向就是电压的参考方向。



图 1-3 电压的参考方向

2) 采用实线箭头表示,如图 1-3b 所示。

3) 采用双下标表示。如  $u_{AB}$  表示电压的参考方向由 A 指向 B。

电压的参考方向指定之后,电压就是代数量。当电压的实际方向与参考方向一致时,电压为正值,当电压的实际方向与参考方向相反时,电压为负值。

引入电流和电压的参考方向后,电流和电压就能用函数式表示。如图 1-4 中,电流按正弦规律随时间变化,则可表示成  $i = I_m \sin \omega t$ , 其中  $\omega = 2\pi/T$ 。

电流和电压的参考方向在电路分析中起着十分重要的作用,分析任何电路时都应先指定电流和电压的参考方向。

一段电路上电流和电压的

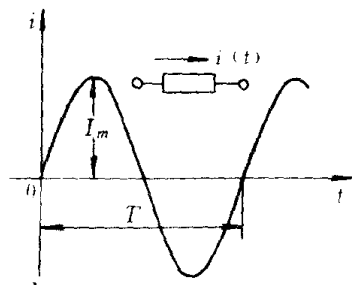


图 1-4 正弦电流

参考方向可独立地任意指定。如果指定电流从电压的“+”极性端流入，并从电压的“-”极性端流出，即电流的参考方向与电压的参考方向一致，则把这种电流和电压的参考方向称为关联参考方向，如图 1-5 所示。

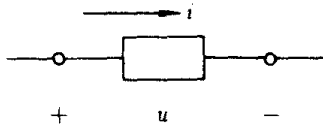


图 1-5 电流和电压的关联参考方向

### 第三节 功 率

一段电路上，正电荷沿着电压的实际方向通过这段电路，电场力作正功，电荷的电能减少，这段电路吸收能量；相反，正电荷逆着电压的实际方向通过这段电路，电场力作负功，电荷的电能增加，这段电路释放出能量。因此一段电路上的电流和电压的实际方向相同时，这段电路吸收电能；电流和电压的实际方向相反时，这段电路发出电能。

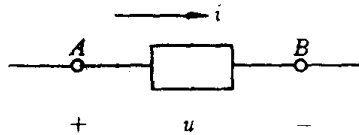


图 1-6 功率的定义

图 1-6 所示的一段电路，电流和电压的参考方向是关联的。根据电压的定义，这段电路从  $t_0$  到  $t$  时间内所吸收的电能  $W$  为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq \quad (1-4)$$

由于  $i = dq/dt$

所以 
$$W = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi \quad (1-5)$$

式中  $u$  和  $i$  都是时间  $t$  的函数，并且是代数量，因此电能  $W$  也是时间  $t$  的函数，且也是代数量。电能 SI 单位名称为焦〔耳〕，单位符号为 J，实用上常用千瓦小时 (kW·h，习称度)

$$1\text{kW}\cdot\text{h}=3.6\text{MJ}$$

电能对时间的变化率称为功率。功率的单位名称是瓦〔特〕，简称瓦，单位符号为 W。功率的十进倍数和分数单位有千瓦 (kW)、兆瓦 (MW) 和毫瓦 (mW) 等。

在电流和电压的关联参考方向下，功率 (用  $p$  表示) 为

$$p = \frac{dW}{dt} = u(t)i(t) \quad (1-6)$$

式 (1-6) 是一段电路吸收功率的表达式， $p$  是代数量。 $p > 0$ ，该段电路吸收电能； $p < 0$ ，则该段电路实际是释放电能。因为在电流和电压的关联参考方向下，一段电路吸收电能时，其电流和电压的实际方向相同，电流和电压的量值同号， $p = ui > 0$ ；一段电路发出功率时，其电流和电压的实际方向相反，电流和电压的量值反号， $p = ui < 0$ 。

如果一段电路的电流的参考方向与电压的参考方向相反 (非关联)，则  $p = ui$  是该段电路发出功率的表达式。 $p > 0$ ，该段电路发出电能； $p < 0$ ，该段电路实际上是吸收电能。因此在这种电流和电压的参考方向下，一段电路发出电能时，其电流和电压的实际方向相反，电流和电压的量值符号相同， $p = ui > 0$ ；一段电路吸收电能时，其电流和电压的实际方向相同，电流和电压的量值符号相反， $p = ui < 0$ 。

**例 1-1** 图 1-7 所示的直流电路中， $U_1 = 5\text{V}$ ， $U_2 = -6\text{V}$ ， $U_3 = 8\text{V}$ ， $I = 2\text{A}$ ，求各元件吸收的电功率。



解 各元件上的电流和电压的参考方向是关联的, 故  $P_1 = U_1 I = 5 \times 2 \text{ W} = 10 \text{ W}$  (吸收)

$$P_2 = U_2 I = (-6) \times 2 \text{ W} = -12 \text{ W} \text{ (发出)}$$

$$P_3 = U_3 I = 8 \times 2 \text{ W} = 16 \text{ W} \text{ (吸收)}$$

各种实际的电气元器件(如电灯、电烙铁、电阻器等), 都有关于电流、电压和功率的量值限额, 称作额定值, 即额定电流、额定电压和额定功率。在额定电压下, 许多器件才能正常、安全、可靠地工作。电压过高时容易损坏, 电压过低时则功率不足。由于

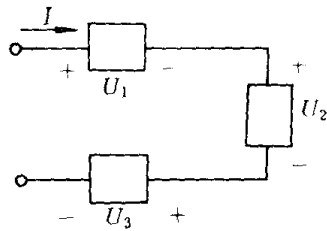


图 1-7 例 1 图

于电流、电压和功率间有一定关系, 所以在给出额定值时, 三者不必全部给出。灯泡、电烙铁通常只给额定电压和额定功率, 而电阻器除给出电阻的额定值外, 还给出额定功率。

#### 第四节 电阻元件

电路是由元件联接而成的, 研究电路时首先要了解各种电路元件的特性。表示电路元件特性的数学关系称为元件约束。

电阻元件是一种只消耗电能的二端理想元件, 电阻的电流和电压的实际方向总是相同的, 它的特性用其电流与电压的代数关系表示, 称作电压电流关系 (VCR), 也叫做伏安特性。在  $u-i$  坐标平面上表示元件特性的图形是通过坐标原点的曲线, 称为伏安特性曲线。

若电阻元件的伏安特性不随时间变动, 称为定常电阻, 否则称为时变电阻。本书只讨论定常电阻。