



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



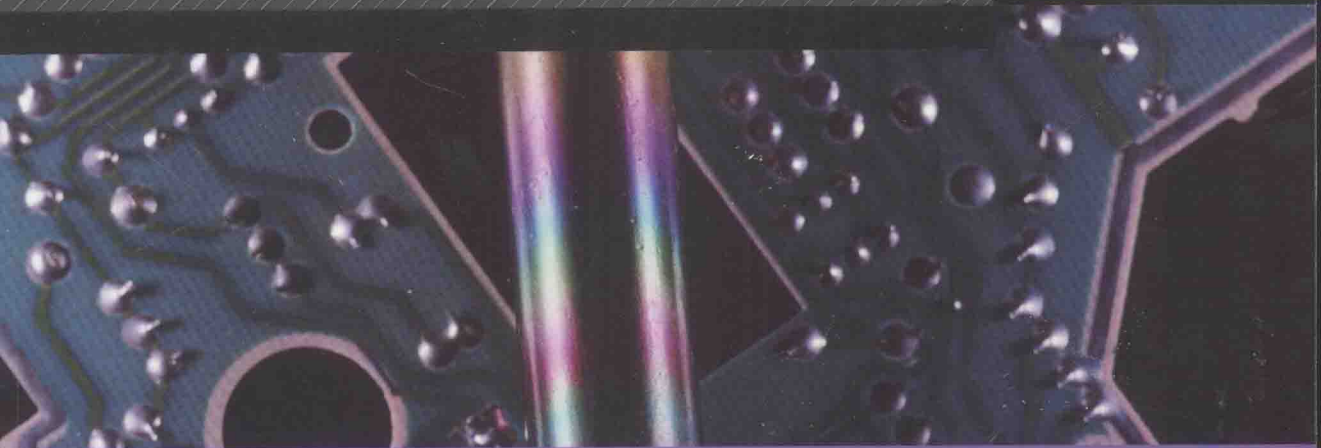
21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Circuit Principle

# 电路原理

张冬梅 公茂法 张秀娟 等 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Circuit Principle

# 电路原理

张冬梅 公茂法 张秀娟 等 编著

人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目(CIP)数据

电路原理 / 张冬梅等编著. -- 北京: 人民邮电出版社, 2016. 4  
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
ISBN 978-7-115-41457-1

I. ①电… II. ①张… III. ①电路理论—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第021677号

## 内 容 提 要

本书是根据教育部“电路原理”课程的教学要求编写的。全书共有15章,前4章以直流的稳态分析为环境,引入了电路的基本概念、基本定律和基本分析方法;第5章主要介绍直流的动态分析环境——时域分析法;第6~10章介绍交流的稳态分析环境——频域分析法(相量法);第11章主要介绍交流暂态的分析法——复频域分析法(运算法);教材最后引入了二端口、非线性电路等概念。

全书共分4个单元,每个单元都设有单元总结和综合例题;每章设有大量的习题,并有对应的答案;另外,还有配套的PPT课件和电子教案。

本书可作为高等院校、高职高专等电类相关专业的教学用书,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

- 
- ◆ 编 著 张冬梅 公茂法 张秀娟 等  
责任编辑 武恩玉  
责任印制 沈 蓉 彭志环
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
三河市潮河印业有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 25.75 2016年4月第1版  
字数: 614千字 2016年4月河北第1次印刷
- 

定价: 56.00元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

本书为工业和信息化普通高等教育“十二五”规划教材立项项目，其中两位编著者公茂法、张冬梅分别是山东科技大学电路课程(2008年山东省精品课程)负责人和青岛理工大学电路原理课程(2009年山东省精品课程)负责人。本书是根据教育部颁布的高等学校《电路基础课程教学基本要求》，兼顾当今高等学校应用型人才的培养要求，融入近年来电路理论的新发展、新应用，并结合近年来国内外电路原理教学改革趋势和编者多年的教学实践与体会编著而成的。

面对种类繁多的教材，本书编写时力求结构简明、脉络清晰，把电路原理通过树的结构形式表现出来，理枝循干，浑然一体，写出特色。

本书以“电路元件的性质、电路的基本定律和基本分析方法”为树的主干，以不同的分析领域为树的分支，使看似繁多的电路分析内容形成了一个清晰的树结构。单元总结和综合例题将这棵树的内容紧密关联、相互贯通，使各部分内容互吸营养、逐步壮大。学生在掌握了第一单元的基础上，能够通过迁移已学知识，层层深入，拓展加深新知识的探究。这不仅使学生有一种温故知新的感觉，更重要的是可以使学生对整个电路原理的知识体系有一个整体的认识和把握，真正体会融会贯通的效果，便于学习和记忆。

本书具体进行了如下的探索和尝试。

(1) 前4章以电阻电路的分析为土壤，栽培以“电路元件的性质、电路的基本定律及基本分析方法”为主干的知识树。前4章只是针对电阻电路的分析，其实，它也是直流的稳态分析，因此，对于分析域来说，它又是一个分支。

在前4章“树干”的基础上，针对电路分析中逐步遇到的新问题、新困难(如暂态、交流源)，利用数学变换的知识，逐个击破，节节拔高。即在直流稳态分析的前提下，派生出直流暂态的时域分析法(第5章)、交流稳态的频域分析——相量法(第6章~第10章)、交流暂态的复频域分析——运算法(第11章)四大树枝。这四大树枝分别对应教材中的四大单元。而“电路元件性质、电路基本定律及基本分析方法”是这棵树的树干，贯穿整本书。本书最后引入了二端口、非线性电路等概念。

(2) 为加强单元之间、分析方法之间的关联与比较，达到融会贯通之效果，精心编写了综合例题和单元总结。

综合例题运用多种方法求解，便于学生比较各种方法的特点、应用场合，有助于学生对相关章节内容的理解和掌握，使看似分散的内容通过综合例题贯穿起来，便于学生理解和接受。例如，在讲运算法时，通过典型例题，分析了复频域 $s$ 与动态过程中时间常数 $\tau$ (第5章)以及交流电角频率 $\omega$ 的关系(第6章~第10章)，加强了章节的关联，达到了瞻前顾后、举一反三的效果。

(3) 教材中每一个新问题的出现，以序幕的方式介绍背景、发现问题，用已学方法求解遇到的困难，然后利用已学电路基础和数学知识，以平缓的方式切入新方法的探究。

(4) 为引导学生利用现代计算机软件分析电路, 本书附录中配有 Multisim 11 软件介绍, 部分章节有仿真例题, 便于学生自学, 激发学生兴趣。

(5) 面对“学时少、内容多”的现状, 力求抓住实质, 深入浅出。例如, 在讲节点法时, 抓住 KCL 定律的应用, 用节点电压写出每一支路的电流, 然后列出 KCL 方程。这样不仅减轻了学生死记公式的负担, 加深了对基本定律的理解, 而且免除了套用公式时由于条件不符产生的错误。

(6) 注重电路原理与相关课程的关联, 注意承前启后。例如, 在讲叠加定理时, 以模拟电子技术中的直流通道的交流通道为例, 使学生对模拟电路有了初步认识。

(7) 为提高学生的学习效果, 解决学生“上课听得懂, 下课解题难”的问题, 精选了丰富的例题和习题。

(8) 本书研制配套精品课程 PPT 课件和部分 Flash 动画。PPT 课件的突出特点是精心制作了大量的动画过程, 符合认知过程, 尤其是借助 Flash 技术使互感、相量法、暂态过程等难于理解的问题直观易懂。

目前, 本书正在为翻转课堂和 MOOC 的开展做准备, 并在按知识点制作微课视频等。本书可按 60~100 学时(不含实验)安排教学, 根据教学需要可增删内容。本书在编写过程中, 得到了有关领导和教师的支持和帮助, 在此, 对所有帮助过我们的同志一并表示衷心的感谢!

本书第 1 章、第 3 章、第 7 章、第 13 章由张冬梅编著, 第 5 章、第 11 章、第 12 章、第 14 章由公茂法编著, 附录中 Multisim 11 软件介绍及仿真例题由张秀娟、吕丽平编著, 第 2 章由刘宁和张冬梅编著, 第 4 章、第 9 章由夏欣编著, 第 6 章由于昊昱编著, 第 8 章由刘庆雪编著, 第 10 章由陈旭编著。第 15 章由张志伟编著, 书中的波特图、负载能力等由吕丽平、贾超编著绘制, 单元总结和综合例题由张冬梅、张瀚文编著, 全书由张冬梅、公茂法统稿。

限于编者水平, 本书在内容取舍、编写方面难免存在不妥之处, 恳请读者批评指正。

作者

2015 年 11 月

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	1	2.1 引言	26
学习要点	1	2.2 电阻的串联和并联	26
1.1 实际电路和电路模型	1	2.2.1 电阻的串联等效	26
1.1.1 电路的组成	1	2.2.2 电阻的并联等效	27
1.1.2 实际电路	1	2.3 电阻的 Y 连接和 $\Delta$ 连接及其	
1.1.3 电路模型	2	等效变换	30
1.1.4 电路的分类	3	2.3.1 Y 连接和 $\Delta$ 连接	30
1.2 电路中基本物理量及参考方向	4	2.3.2 Y- $\Delta$ 等效变换的计算	30
1.2.1 电流	4	2.4 电压源、电流源的等效变换	32
1.2.2 电压	4	2.4.1 理想电源的串联和并联	32
1.2.3 电位	5	2.4.2 实际电源的等效变换	34
1.2.4 电流和电压的参考方向	6	2.5 输入电阻	35
1.2.5 功率	7	2.6 仿真	37
1.2.6 电能量	8	习题二	39
1.3 电阻、电感和电容元件	8	第 3 章 电阻电路的一般分析	43
1.3.1 电阻元件	8	学习要点	43
1.3.2 电感元件	9	3.1 概述	43
1.3.3 电容元件	11	3.2 图的概念与 KL 独立方程数	43
1.4 独立电源	12	3.2.1 电路的图	43
1.4.1 电压源	12	3.2.2 图的有关概念	43
1.4.2 电流源	13	3.2.3 KCL 的独立方程数	46
1.5 受控源	14	3.2.4 KVL 的独立方程数	46
1.6 基尔霍夫定律	15	3.3 2b 法	46
1.6.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	16	3.3.1 2b 法	46
1.6.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	17	3.3.2 2b 法的步骤	47
1.7 仿真	19	3.4 支路电流法	47
习题一	21	3.4.1 支路电流法	47
第 2 章 简单电阻电路的等效变换	26	3.4.2 支路电流法的步骤	47
学习要点	26	3.4.3 支路电流法的应用	47
		3.5 回路电流法及网孔电流法	49
		3.5.1 回路电流法及网孔电流法	
		的基本思想	49

3.5.2 列写回路电流(网孔电流) 方程的步骤 .....	50	第5章 动态电路的时域分析 .....	102
3.5.3 回路(网孔)法的应用 .....	51	学习要点 .....	102
3.6 节点电压法 .....	53	5.1 动态电路的方程及初始值 .....	102
3.6.1 节点电压法的基本思想 ..	53	5.1.1 电路与方程 .....	102
3.6.2 列写节点电压方程的步骤 .....	54	5.1.2 一阶电路的两种基本类型 .....	103
3.6.3 节点电压法的应用 .....	56	5.1.3 换路及换路定则 .....	103
3.7 仿真 .....	62	5.1.4 初始值的求法 .....	104
习题三 .....	63	5.2 一阶电路的零输入响应 .....	106
<b>第4章 电路定理</b> .....	67	5.2.1 RC电路的零输入响应 ..	106
学习要点 .....	67	5.2.2 RL电路的零输入响应 ..	109
4.1 叠加定理 .....	67	5.2.3 电路零输入响应规律的总结 .....	111
4.1.1 线性电路的比例性 .....	67	5.3 一阶电路的零状态响应和全响应 .....	114
4.1.2 线性电路的叠加定理 .....	68	5.3.1 RC电路的响应 .....	114
4.2 分解方法与替代定理 .....	72	5.3.2 RL并联电路的响应 .....	117
4.2.1 分解方法 .....	72	5.4 三要素法 .....	119
4.2.2 替代定理 .....	73	5.5 一阶电路的阶跃响应 .....	123
4.3 戴维南定理和诺顿定理 .....	74	5.5.1 单位阶跃函数及其性质 .....	123
4.3.1 戴维南定理 .....	74	5.5.2 一阶电路的阶跃响应 .....	124
4.3.2 戴维南定理的证明 .....	75	5.6 一阶电路的冲激响应 .....	124
4.3.3 戴维南定理的应用 .....	75	5.6.1 单位冲激函数及其性质 .....	124
4.3.4 诺顿定理 .....	78	5.6.2 一阶电路的冲激响应 .....	126
4.3.5 诺顿定理的应用 .....	78	5.7 二阶电路的零输入响应 .....	128
4.4 电源的负载能力与最大功率传输 定理 .....	82	5.7.1 RLC串联电路的零输入响应 .....	129
4.4.1 电源的负载能力 .....	82	5.7.2 GLC并联电路的分析 ..	135
4.4.2 最大功率传输定理 .....	82	5.8 二阶电路的全响应、零状态响应 和阶跃响应 .....	136
4.4.3 最大功率传输定理的应用 .....	83	5.8.1 RLC串联电路的全响应 .....	136
* 4.5 特勒根定理与互易定理 .....	84	5.8.2 二阶电路的零状态响应和 阶跃响应 .....	138
4.5.1 特勒根功率定理 .....	85	5.8.3 一般二阶电路的时域分析 .....	140
4.5.2 特勒根似功率定理 .....	85	5.9 仿真 .....	143
4.5.3 互易定理 .....	86		
* 4.6 对偶原理 .....	88		
4.7 仿真 .....	89		
习题四 .....	95		
<b>第一单元 电路的基本分析方法总结</b> .....	100		

习题五 .....	146	7.1.3 耦合电感上的电压、电流关系 .....	192
<b>第二单元 动态电路的时域分析法总结</b> .....	152	7.1.4 互感线圈的同名端 .....	192
<b>第 6 章 正弦稳态分析——相量法</b> ..	154	7.2 含有耦合电感电路的计算 .....	194
学习要点 .....	154	7.2.1 耦合电感的串联 .....	194
6.1 正弦量 .....	154	7.2.2 耦合电感的并联 .....	196
6.2 复数 .....	157	7.2.3 耦合电感的 T 型去耦等效 .....	197
6.3 正弦交流电的相量表示 .....	158	7.3 空心变压器 .....	201
6.3.1 问题的引入 .....	158	7.4 理想变压器 .....	203
6.3.2 正弦量的相量式 .....	158	7.4.1 理想变压器的条件 .....	203
6.3.3 正弦量的相量图表示 .....	159	7.4.2 理想变压器的主要性能 ..	204
6.3.4 正弦量相量表示的应用 .....	161	7.5 仿真 .....	206
6.4 KCL、KVL 相量形式 .....	163	习题七 .....	208
6.5 电阻、电感和电容元件 VCR 的相量形式 .....	164	<b>第 8 章 三相电路</b> .....	212
6.6 正弦交流电路的阻抗、导纳及等效 .....	167	学习要点 .....	212
6.6.1 阻抗的概念 .....	167	8.1 三相电路的基本概念及连接方式 .....	212
6.6.2 导纳的概念 .....	169	8.1.1 对称三相电源 .....	212
6.7 正弦稳态电路的一般分析方法 .....	170	8.1.2 三相电源的连接 .....	213
6.7.1 相量法的原理 .....	170	8.1.3 三相负载的连接 .....	215
6.7.2 相量法的一般分析过程 .....	171	8.2 对称三相电路的计算 .....	216
6.7.3 相量图法 .....	173	8.2.1 简单对称三相电路的计算 .....	216
6.8 有功功率、无功功率、视在功率和复功率 .....	175	8.2.2 复杂对称三相电路的计算 .....	219
6.9 正弦稳态电路的功率守恒 .....	178	8.3 不对称三相电路的计算 .....	220
6.10 正弦稳态电路的最大功率传输 .....	182	8.4 三相功率的计算与测量 .....	224
6.11 仿真 .....	184	8.4.1 三相功率的计算 .....	224
习题六 .....	186	8.4.2 三相功率的测量 .....	225
<b>第 7 章 含有耦合电感电路的分析</b> ..	190	8.5 仿真 .....	228
学习要点 .....	190	习题八 .....	230
7.1 互感 .....	190	<b>第 9 章 非正弦周期信号及其稳态分析</b> .....	233
7.1.1 互感 $M$ .....	190	学习要点 .....	233
7.1.2 耦合因数 $K$ .....	191	9.1 非正弦周期信号 .....	233
		9.2 周期函数分解为傅里叶级数 .....	233



9.3 非正弦周期信号的有效值、平均值和平均功率 .....	238	11.1.1 拉氏变换的定义 .....	270
9.3.1 三角函数的积分 .....	238	11.1.2 拉氏变换的条件 .....	270
9.3.2 非正弦周期信号的有效值 .....	238	11.1.3 拉氏变换的基本性质 .....	271
9.3.3 非正弦周期信号的平均值 .....	239	11.2 拉氏反变换——分解定理 .....	275
9.3.4 非正弦周期信号的平均功率 .....	240	11.3 线性动态电路的复频域模型——运算电路 .....	279
9.4 非正弦周期交流电路的分析 .....	240	11.3.1 KL 的运算形式 .....	279
习题九 .....	241	11.3.2 VCR 的运算形式 .....	279
<b>第 10 章 电路的频率响应</b> .....	244	11.4 用复频域分析法计算线性电路——运算法 .....	281
学习要点 .....	244	11.5 网络函数及其零点、极点 .....	289
10.1 滤波器 .....	244	11.6 零、极点与冲激响应的关系 .....	291
10.1.1 低通滤波电路 .....	244	11.7 零、极点与频率响应的关系 .....	293
10.1.2 高通滤波电路 .....	245	11.8 卷积的应用 .....	296
10.1.3 带通滤波电路 .....	246	习题十一 .....	297
10.2 RLC 串联电路频率特性与串联谐振 .....	248	<b>第四单元 运算法总结</b> .....	302
10.2.1 RLC 串联谐振电路 .....	248	<b>第 12 章 二端口网络</b> .....	304
10.2.2 RLC 串联谐振的特征 .....	249	学习要点 .....	304
10.2.3 RLC 串联电路的频率响应 .....	251	12.1 二端网络与多端网络 .....	304
10.3 并联谐振电路 .....	255	12.2 二端口网络的方程和参数 .....	305
10.3.1 GLC 并联谐振电路 .....	255	12.2.1 二端口网络的 Y 参数及其方程 .....	305
10.3.2 电感线圈和电容并联的谐振电路 .....	256	12.2.2 二端口网络的 Z 参数及其方程 .....	307
10.4 波特图 .....	257	12.2.3 二端口网络的 T 参数及其方程 .....	309
10.5 仿真 .....	260	12.2.4 二端口网络的 H 参数及其方程 .....	310
习题十 .....	264	12.2.5 二端口网络参数之间的关系 .....	311
<b>第三单元 交流电路的稳态分析总结</b> .....	267	12.3 有端接的二端口网络 .....	312
<b>第 11 章 动态电路的运算分析法</b> .....	269	12.3.1 输入阻抗 .....	312
学习要点 .....	269	12.3.2 特性阻抗 .....	313
11.1 拉普拉斯变换的定义及性质 .....	269	12.3.3 有端接二端口网络的转移函数 .....	314
		12.4 二端口网络的等效电路 .....	315

12.5 二端口网络的连接 .....	317	14.2.3 回路电流方程的矩阵形式 .....	352
12.5.1 两个二端口的级联 .....	317	14.3 割集矩阵 $Q$ · 割集分析法 ...	354
12.5.2 两个二端口的并联 .....	318	14.3.1 割集与割集矩阵 $Q$ .....	354
12.5.3 二端口的串联 .....	318	14.3.2 KCL、KVL 方程的矩阵形式 .....	355
12.6 回转器和负阻抗变换器 .....	319	14.3.3 割集电压方程的矩阵形式 .....	356
12.6.1 回转器 .....	319	14.4 状态方程 .....	357
12.6.2 负阻抗变换器 .....	320	14.4.1 状态变量与状态方程 ...	358
习题十二 .....	321	14.4.2 状态方程的直观列写 .....	359
<b>第 13 章 含有运算放大器的电阻电路</b> .....	326	14.4.3 状态方程的系统列写 .....	361
学习要点 .....	326	习题十四 .....	362
13.1 运算放大器 .....	326	<b>第 15 章 非线性电路</b> .....	367
13.2 含有运算放大器的电阻电路分析 .....	327	学习要点 .....	367
13.3 仿真 .....	332	15.1 非线性元件与非线性电路 ...	367
习题十三 .....	335	15.2 非线性电阻元件 .....	367
<b>第 14 章 网络方程的矩阵形式</b> .....	339	15.3 非线性电容和非线性电感 ...	370
学习要点 .....	339	15.4 非线性电路方程 .....	373
14.1 关联矩阵 $A$ · 节点电压方程的矩阵形式 .....	339	15.5 图解分析法 .....	374
14.1.1 关联矩阵 $A$ 和 KCL、KVL 方程的矩阵形式 .....	339	15.6 小信号分析法 .....	374
14.1.2 复合支路及其 VCR 的矩阵形式 .....	341	15.7 分段线性化方法 .....	378
14.1.3 节点电压方程的矩阵形式 .....	344	习题十五 .....	380
14.1.4 改进的节点电压方程 .....	348	<b>附录 Multisim 11 软件基本介绍</b> .....	383
14.2 回路矩阵 $B$ · 回路电流方程的矩阵形式 .....	349	(一) Multisim 11 的特点 .....	383
14.2.1 回路矩阵 $B$ 和 KVL、KCL 方程的矩阵形式 .....	349	(二) Multisim 11 使用简介 .....	385
14.2.2 复合支路及其 VCR 的矩阵形式 .....	352	(三) Multisim 11 仿真基本流程举例简介 .....	387
		<b>参考答案</b> .....	395

### 学习要点

- (1) 电压、电流及参考方向。
- (2) 功率的吸收、释放与计算。
- (3) R、L、C 元件的定义与伏安关系(VCR)。
- (4) 电压源、电流源的定义及 VCR。
- (5) 受控源的概念类别及 VCR。
- (6) 掌握基尔霍夫定律(KL)。

本章是学习电路的基础，重点是基尔霍夫定律和元件(R、L、C、电压源、电流源、受控源)的伏安关系，两者可称为电路的两大约束关系，基尔霍夫定律概述了元件之间约束，元件伏安关系给出元件自身特性的约束，这两大约束关系贯穿《电路原理》全书。本章还要注意参考方向的引入，做到熟练正确地应用。列写电路方程时，必须先确定参考方向。

## 1.1 实际电路和电路模型

### 1.1.1 电路的组成

电路即电流的通路，它由若干电气设备或器件组成。组成电路的电气设备或器件称为电路元件。大千世界存在着不胜枚举的实际电路，简单的电路有手电筒、电炉子等，复杂的电路有大规模集成电路、电力系统等。无论电路如何简单或复杂，它都是由基本的三个部分组成：电源、负载和中间环节。其中，电源——是将其他形式的能转换成电能的设备，如把机械能转换成电能的发电机等；负载——是将电能转换成其他形式能的设备，如将电能转换成机械能的电动机等；中间环节——是连接和控制电源与负载的设备，如导线、开关、熔断器等。

### 1.1.2 实际电路

实际电路——由若干实际电器元件或设备组成，为完成某种预期目的而被设计连接，形成的电流通路。图 1-1(a)是最简单的手电筒实际照明电路。

它由以下三部分组成：

- (1) 电源为干电池，它将化学能转换为电能；
- (2) 负载为灯泡，它将电能转换成光能和热能；
- (3) 中间环节为导线、开关，实现对电路的控制。

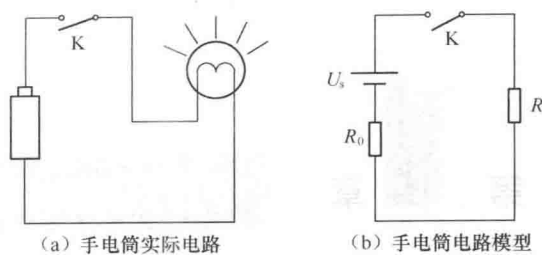


图 1-1 手电筒实际电路与电路模型

### 1.1.3 电路模型

由于实际电路器件的形状和电磁性能较为复杂，为了便于对实际的电路进行分析计算，可将实际电路器件理想化(也称模型化)。

抽掉了实际电路器件的外形、尺寸等差异，反映其电磁性能共性的电路模型的最小单元是理想电路元件。

由理想电路元件组成的电路，就是实际电路的模型。

图 1-1(b)所示是手电筒的电路模型。图中，电阻元件  $R$  是灯泡的电路模型，电压源  $U_s$  和电阻  $R_0$  串联是干电池的模型，连接导线(包括开关)用理想导线表示，其电阻忽略不计。

发生在实际电路器件中的电磁现象按性质可分为：①消耗电能；②释放电能；③储存电场能量；④储存磁场能量。

假定以上现象可以分别研究，将每一种性质的电磁现象用一理想电路元件来表征，则电路中有如下几种基本的理想电路元件。

(1) 电阻——消耗电能，把电能转换成热能等形式，如图 1-2(a)所示；

(2) 电感——储存磁场能量，把电能以磁场能量形式储存起来，纯电感不消耗能量，如图 1-2(b)所示；

(3) 电容——储存电场能量，把电能以电场能量形式储存起来，纯电容不消耗能量，如图 1-2(c)所示；

(4) 电源——产生电能，将其他形式的能量转变成电能。

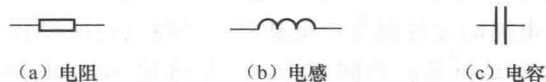


图 1-2 三种基本理想元件的符号图形

需要注意的是，同一实际电路器件在不同的工作条件下，其模型可能有不同的形式。例如，对于电感线圈，若在直流情况下，一个线圈的模型可以是一个电阻元件；若在较低交流频率下，就要用电阻和电感元件的串联组合模拟；若在较高交流频率下，还应计及导体表面的电荷作用，即电容效应，所以其模型还需要包含电容元件。

对实际电路的电路模型取得恰当，对电路的分析和计算结果就与实际情况接近，而如果取得不恰当，则会造成较大误差。因此，我们在一定的条件下对实际器件加以理想化，忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要性质的模型(model)来表示，以便于对电路进行分析、计算。本书主要讨论如何分析已经建立起来的电路模型。更明确地说，电路原理

分析的对象是电路模型而不是实际电路。

### 1.1.4 电路的分类

#### 1. 按电路的功能分

(1) 一种电路的功能是进行能量的转换、传输和分配, 此时对电路的要求是减小损耗、提高效率。例如, 电力系统(发电、变电、输电、配电、用电的整体)如图 1-3 所示, 发电厂的发电机将其他形式的能转换成电能, 然后通过变压器、输电线输送给各用户, 负载再将电能转换为其他形式的能。

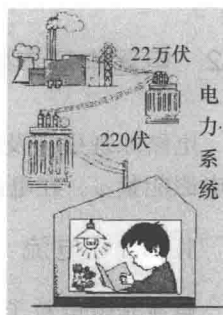


图 1-3 电力系统示意图

(2) 另一种电路的功能是实现信号的传递、存储和处理, 此时对电路的要求是减小失真。例如, 扩音机(由话筒、放大器、扬声器组成)通过话筒把声音变换为电信号然后放大, 送到扬声器还原声音, 完成了声音放大的任务。

#### 2. 按电路中电源的种类分

(1) 直流电路——当电路的电源是直流电源, 且电路中电压、电流方向不变的电路。

(2) 交流电路——当电路的电源是交流电源, 且电路中电压、电流的大小和方向随时间做周期性变化的电路。交流电路分为正弦交流电路和非正弦交流电路。

#### 3. 按实际电路尺寸分

(1) 集总电路——实际电路尺寸及其元件尺寸  $l$  远远小于工作电磁波波长  $\lambda$ 。

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-1)$$

式中,  $c$  为电磁波的传播速度, 在真空中  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ——为光速;  $f$ ——电路的工作频率, 单位为 Hz。

(2) 分布电路——实际电路尺寸及其元件尺寸与电磁波波长比较不可忽略, 如电力传输线等。

#### 4. 按电路的输入与输出的线性关系分

(1) 线性电路——输入和输出之间关系可以用线性函数表示, 这类电路满足叠加定理。

(2) 非线性电路——凡不属于线性电路的即为非线性电路。

#### 5. 按电路的输入与输出间的时间特性分

(1) 时不变电路——系统的参数不随时间而变化。

(2) 时变电路——一个电路不是时不变电路则为时变电路。

#### 6. 按电路是否具有记忆特性分

(1) 无记忆电路——在这种电路中, 其  $t$  时刻的响应仅仅依赖该时刻的激励, 而不依赖于过去或将来的激励值。如纯电阻电路就是一个典型无记忆电路, 又称为瞬时电路。

(2) 记忆电路——在这种电路中, 其  $t$  时刻的响应不仅依赖于  $t$  时刻的激励, 还与过去的激励有关, 含有储能元件的电路几乎都具有这种特性, 这种电路又称为动态电路。

本书的主要讨论对象是集总参数电路、线性电路、时不变电路、交直流电路、瞬时电路及动态电路。

## 1.2 电路中基本物理量及参考方向

电路原理中涉及的物理量主要有电流  $i$ 、电压  $u$ 、电位  $v$ 、电荷  $q$ 、磁通  $\varphi$ 、电功率  $p$  和电磁能量  $\omega$ 。在电路分析中，人们主要关心的物理量是电流、电压和功率。

### 1.2.1 电流

**电流**是带电粒子在外电场的作用下做有秩序的移动而形成的，为了定量地衡量电流的大小，将电流强度简称为电流，用  $I$  或  $i$  表示<sup>①</sup>。

单位时间内通过导体横截面的电量，被定义为电流强度  $i$ 。

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

其中，电荷  $q$  的单位为库仑(C)，时间  $t$  的单位为秒(s)，电流  $i$  的单位为安培(A)。

习惯规定，正电荷移动的方向为电流的实际方向。

电路中经常遇到各种类型的电流，如图 1-4 所示，图(a)表示一个大小和方向都不随时间而变化的电流，是恒定电流，习惯简称为直流电流(Direct Current)，记为 DC 或 dc；图(b)表示一个随时间按正弦规律变化的电流，称为正弦电流(Sine Current)；图(c)和图(d)分别表示指数电流和全波整流电流。

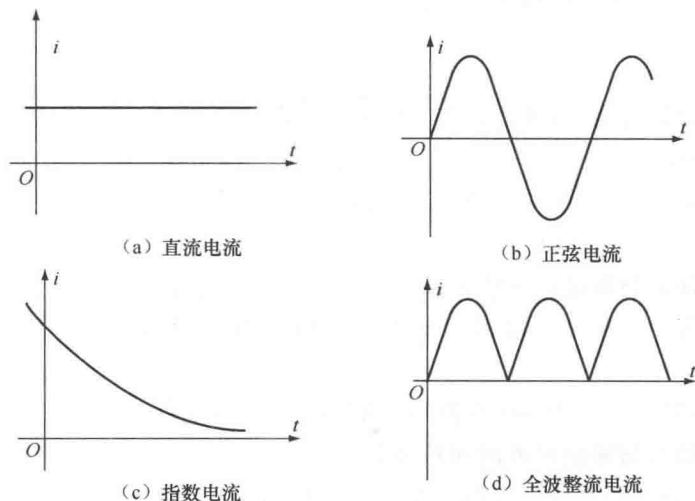


图 1-4 各种类型的电流

### 1.2.2 电压

金属导体中虽有大量自由电子，但没有外电场的作用时是不会形成电流的。要使自由电子做有规则的运动，必须要有外加电场。电场力将迫使自由电子做定向运动而形成电

<sup>①</sup> 注意：一般地，小写字母是一个广义的符号，它既可以表示随时间变化的变量，也可以表示恒定的常量；而大写字母只能表示常量。电路中的这种约定，也用于电路中的其他各物理量。例如， $i$  或  $i(t)$  既可以表示随时间而变的交流电流，也可以表示直流电流，而  $I$  只能表示恒定的直流电流或交流电的有效值。

流。电场力移动电荷就对电荷做了功。为了衡量电场力做功的大小，我们引用电压这个物理量。

电压的定义：电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功，称为 a、b 两点之间的电压  $u$ 。

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-3)$$

式(1-3)中， $\omega$  是电场力将正电荷由 a 点移到 b 点所做的功，单位为焦耳(J)。 $q$  是被移动的正电荷的电量，单位为库仑(C)。 $u$  是电路中 a、b 两点之间的电压，单位为伏特(V)。

电压的实际方向由高电位指向低电位，即电位降的方向。

如图 1-6 所示，若正电荷从  $a \rightarrow b$ ，电场力做功，则电压的实际方向是从  $a \rightarrow b$ ，此时 a 与 b 之间的元件吸收电能，即 a 与 b 之间的元件 R 把电能转换成其他形式的能；若正电荷沿电源支路从  $c \rightarrow a$ ，电源力做功，则电动势的实际方向是从  $c \rightarrow a$ ，而电压的实际方向是从  $a \rightarrow c$ ，此时 c 与 a 之间的元件产生(或释放)电能，即 c 与 a 之间的元件把其他形式的能转换成电能。c 与 a 之间的元件是电源。

电压又称电位降。

### 1.2.3 电位

电位(物理学中称为电势)是在电场中定义的概念。电场中某点的电位，是指在电场中将单位正电荷从该点移至电位参考点时电场力所做的功，它是一个相对量。在电路中引用电位的概念，就得选定一个零电位参考点。电路中某点的电位是指该点相对于参考点之间的电压。在工程图中，一般用一些图形符号

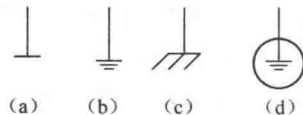


图 1-5 各类零电位符号

号表示零电位参考点，如图 1-5 所示。一般用图(a)的符号“—”表示一般的抽象零电位参考点；图(b)的符号表示以大地为零电位的参考点；图(c)的符号表示以机壳为参考点；图(d)的符号表示安全接地。这些符号习惯上都称为接地，它们在工程上是有实际意义的。

若在图 1-6(a)所示的电路中，选择 b 点为零电位参考点，这时各点的电位是

$$V_a = 6\text{V}; V_b = 0\text{V}; V_c = -6\text{V}$$

如果把 c 点作为零电位参考点，则

$$V_a = 12\text{V}; V_b = 6\text{V}; V_c = 0\text{V}$$

从上述分析中可见，任意点的电位随参考点的不同而不同，即电位是相对参考点而言的，这叫电位的相对性。只有参考点被选定之后，电路中各点的电位才有定值，而任意两点之间的电压则与参考点的选择无关。图 1-6(a)的电路中，无论电路的零电位参考点在哪一点，电压  $U_{ab} = 6\text{V}$ ， $U_{bc} = 6\text{V}$  是不会改变的，这叫作电压的单值性。

为了作图简便和图面清晰，习惯上不画电源，通常将电源的一端接“地”。而在电源的非接地端注以  $+U$ 、 $-U$ ，或注明其电位的数值，如图 1-6(a)可以画成图 1-6(b)所示形式。可见，借助电位的概念可以简化电路作图。

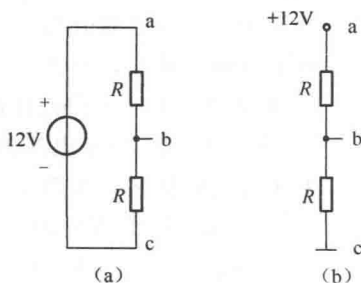


图 1-6 零电位参考点

### 1.2.4 电流和电压的参考方向

#### 1. 参考方向(正方向)

电流、电压、电动势等物理量都具有方向性,但在实际问题中,其真实方向往往难以标出,如图 1-4(b)中的正弦电流,其大小、方向是随时间而变化的,难以用一个固定的箭头来表示它的方向。另外,即便是直流,如果是求解较复杂的电路(见图 1-7),A、B 间的电流  $I_R$  的实际方向往往不能预先确定;然而,电路中电流和电压的方向是我们列写电路方程的重要依据。为解决这一矛盾,首先要任意假设电流和电压的方向,为此引入一个十分重要的概念——参考方向(Reference Direction),又称“正方向”。

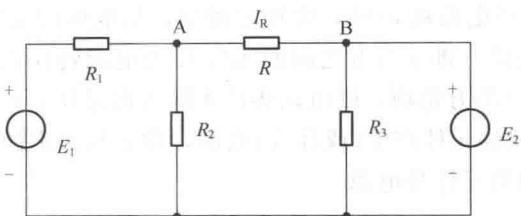


图 1-7

“参考方向”是任意假设的方向。设定了参考方向,电压、电流就有正负之分。若经过计算,结果为“正”时,表明参考方向与实际方向一致;计算结果为“负”时,表明参考方向与实际方向相反。

#### 2. 电流与电压参考方向的关系

在同一电路元件或一段电路上,电流的参考方向和电压的参考方向二者是独立的,它们可以任意假定。当电流与电压的参考方向一致时,称为关联参考方向;当电流与电压的参考方向相反时,称为非关联参考方向。

#### 注意

(1) 一般情况下,采用关联参考方向时,可以只标出电流(或电压)的参考方向。即,某元件上若只标出电流的参考方向,可以默认电压的参考方向与标出电流的参考方向一致,反之亦然。

(2) 在某一元件或某一段电路上,电流、电压的参考方向可以任意假定,一旦假定好了,就不能任意变动,根据假定的参考方向进行分析计算。注意列方程时,只看参考方向,代入数据时,“是正就代正,是负就代负”,直到问题分析计算終了为止。

#### 3. 电流和电压方向的习惯标注

电流和电压在电路分析时,要时刻关注其方向。

电流方向的标注,如图 1-8 所示。



图 1-8 元件上电流的标注

① 箭头法:  $I$  的方向常用箭头表示,如图 1-8(a)所示;

② 下标法:  $I_{ab}$  表示电流的流向是从 a 到 b,如图 1-8(b)所示。

电压方向的标注,如图 1-9 所示。

① 箭头法:  $U$  的方向用箭头表示,如图 1-9(a)所示;

② 极性法:  $U$  的方向用“+”“-”表示,如图 1-9(b)所示;

③ 下标法:  $U$  的方向用  $U_{ab}$  表示电压的方向是从 a 到 b,图 1-9(c)所示。



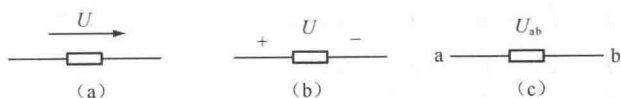


图 1-9 元件上电压的标注

### 1.2.5 功率

电路的基本作用之一是实现能量的变换与传递。我们用功率(Power)来表示能量变化的速率,它是电路分析中经常遇到的一个重要物理量,用  $P$  或  $p$  表示。

在物理学中,功率定义为单位时间内能量的变化,也就是能量对时间的导数,即

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-4)$$

其中,  $\omega$  是能量,单位为焦耳(J),  $t$  是时间,单位为秒(s),  $p$  是功率,单位为瓦特(W)。

在电路中,功率通常用电压、电流来表示,即

$$p = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-5)$$

功率单位为瓦特,在直流情况下  $P=UI$ ,即  $1\text{W}=1\text{VA}$ 。

式(1-5)中的电压、电流为关联参考方向,此时,若  $p>0$ ,表示吸收功率,该元件是负载;若  $p<0$ ,表示发出功率,该元件是电源。

为了更明确地区别是吸收还是发出功率,当电压、电流为关联参考方向时,通常计算其吸收的功率

$$p_{\text{吸收}} = u \cdot i$$

此时  $p_{\text{吸收}}>0$ ,表示吸收功率,该元件是负载;若  $p_{\text{吸收}}<0$ ,表示发出功率,该元件是电源。

当电压、电流为非关联参考方向时,通常计算其发出的功率

$$p_{\text{发出}} = u \cdot i$$

此时  $p_{\text{发出}}>0$ ,表示发出功率,该元件是电源;若  $p_{\text{发出}}<0$ ,表示吸收功率,该元件是负载。

#### 注意

(1)一般地,电压、电流为关联参考方向时,吸收的功率就写  $p$  或  $P$ ,即,  $p$  或  $P$  已默认是吸收功率。

(2)对一个完整的电路,发出的功率等于吸收的功率,满足功率平衡。

**例 1-1** 求图 1-10 所示电路中各方框所代表的元件吸收或发出的功率。

已知:  $U_1=1\text{V}$ ,  $U_2=-3\text{V}$ ,  $U_3=8\text{V}$ ,  $U_4=-4\text{V}$ ,  $U_5=7\text{V}$ ,  $U_6=-3\text{V}$ ,  $I_1=2\text{A}$ ,  $I_2=1\text{A}$ ,  $I_3=-1\text{A}$ 。

**解:**  $P_{1\text{发出}}=U_1 I_1=1\text{V} \times 2\text{A}=2\text{W}$

$P_{2\text{吸收}}=U_2 I_1=(-3)\text{V} \times 2\text{A}=-6\text{W}$

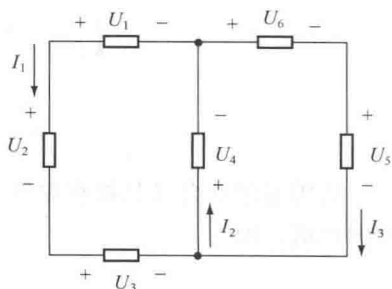


图 1-10 例 1-1 图