



普通高等教育**电子通信类**国家级特色专业系列规划教材
辽宁省“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

电路分析 (第二版)

主编 董维杰 白凤仙
参编 王宏伟 解永平 王鲁云



科学出版社

普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材
辽宁省“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

电 路 分 析

(第二版)

主编 董维杰 白凤仙

参编 王宏伟 解永平 王鲁云

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了电路的基本概念、基本定律及基本分析方法,涵盖直流电路分析(第1~4章)、正弦稳态电路分析(第5~9章)和动态电路分析(第11~12章)三部分。在介绍基本电路元件电压、电流关系基础上,以线性直流电路为依托,介绍简单电路的等效变换分析法、一般电路的回路电流分析法和节点电压分析法及应用电路定理等分析方法。正弦稳态电路部分重点介绍相量分析法,进一步介绍相量分析法在谐振电路、耦合电路、三相电路和非正弦电路等典型正弦稳态电路分析中的应用。动态电路分析部分介绍时域分析法和复频域分析两种方法。双口网络(第10章)涉及直流电路、正弦电路和动态电路,从系统观点出发讨论双口网络方程、连接等。

本书尽量语言精练、通俗易懂、结合工程应用。许多例题和习题与实际应用相结合,与分析方法直接相关的应用提炼为应用拓展,每章最后一节是与本章相关的应用。附录有常用数学公式,每章习题后有本章习题答案,方便查阅。

本书是理工科高等院校教材,可供电子信息工程、电子科学与技术、自动化、电气工程和计算机等专业的本科生使用,也可作为相关专业的专科、成人教育和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析 / 董维杰, 白凤仙主编. —2版. —北京: 科学出版社, 2016.2
普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材·辽宁省“十二五”
普通高等教育本科省级规划教材

ISBN 978-7-03-047200-7

I. ①电… II. ①董… ②白… III. ①电路分析—高等学校—教材
IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 008717 号

责任编辑: 潘斯斯 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 2 月第 二 版 印张: 19 1/2

2016 年 2 月第一次印刷 字数: 462 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

电子、通信、控制、电力、测量、计算机和自动化等学科领域都建立在电路理论基础上,电路理论与数学、物理和拓扑学相结合形成了工程方法,即电路分析方法。学生通过学习基本电路理论和电路分析方法,学会分析直流电路、正弦稳态电路和动态电路三种类型的电路,为后续专业课程奠定必要的电路基础知识。

修订本书的指导思想是培养工程实践能力和创新意识。知识、思维和实践是创新的三要素,知识是基础,发现问题在哪里;思维是关键,想如何解决问题;实践是根本,成功地解决问题。若说本书中所讲的电路基本理论属于知识,那么所讲的多种电路分析基本方法则包含从不同角度解决电路问题的思辨性和逻辑美,书中给出了从工程实际和后续专业课中提炼的典型例题和习题,希望为读者展示理论联系实践的途径,使读者初步体会解决电路问题的快乐和成就感。具体体现在以下几方面。

(1) 强调掌握、并充分理解基本概念、基本理论和基本方法。十分注重电路基本概念、理论和分析方法的讲解,尤其注意指出与已学物理和数学知识的联系。直流电路分析部分强调线性代数为数学基础;正弦稳态电路强调复数运算为数学基础;动态电路分析以微分方程求解为数学基础。

(2) 注意发挥电路分析方法理论严密、逻辑性强的特点,注重培养学生的辩证思维能力,通过例题的透彻讲解和精心设置的习题,试图培养学生的多种能力,如观察能力、计算能力、理论联系实际能力、解决问题能力、逻辑思维能力、综合与创新能力,注意一题多解,训练学生的发散思维能力。

(3) 注重培养学生的工程实践能力,注重理论和方法的应用。内容讲解注意联系工程实际;例题和习题尽量来自实际问题,采用实际中的数值;每章最后一节是本章相关知识在实际工程中的应用举例。

(4) 注意各部分内容的内在联系,注意前后章节内容的呼应,以欧姆定律和基尔霍夫定律为主线将各部分内容贯穿起来。注重与先修课高等数学、大学物理和后续模拟电路、数字电路、单片机电路、电机、集成电路等课程内容的联系。

参加本书修订的有董维杰(第1、10章)、王鲁云(第2、4章)、解永平(第3、6章)、白凤仙(第5、11、12章)、王宏伟(第7、8、9章)。

敬请读者和同行对本书批评指正,电话 0411-84706009-2405。

编 者

2015年11月于大连理工大学

目 录

前言

第 1 章 电路和电路定律	1
1.1 初识电路	1
1.2 电路元件与电路模型	2
1.2.1 电路元件	2
1.2.2 电路模型	3
1.3 电压、电流与功率	4
1.3.1 电流及其参考方向	4
1.3.2 电压及其参考方向	5
1.3.3 电压和电流的分类与测量	6
1.3.4 电压和电流的关联参考方向	7
1.3.5 功率	7
1.4 基尔霍夫定律	9
1.4.1 基尔霍夫电流定律	9
1.4.2 基尔霍夫电压定律	10
1.5 电阻元件及欧姆定律	12
1.5.1 线性电阻元件及欧姆定律	12
1.5.2 开路和短路	13
1.6 独立源与受控源	14
1.6.1 独立电压源和电流源	15
1.6.2 受控源	16
1.7 简单电路分析	18
1.8 应用——用电中的人身安全	20
习题及部分习题答案	21
部分习题答案	27
第 2 章 电阻电路的等效变换分析法	29
2.1 等效及等效变换的概念	29
2.2 无独立源单口网络的等效	30
2.2.1 电阻串联及分压	30
2.2.2 电阻并联及分流	31
2.2.3 电阻串并联	32
2.2.4 电阻 Y 形和 Δ 形连接	34
2.2.5 含受控源单口网络的等效	35
2.3 含独立源单口网络的等效	36

2.3.1 独立源与其他元件的串并联等效	36
2.3.2 实际电源模型的等效变换	38
2.4 应用——电阻应变片测力的电桥电路	41
习题及部分习题答案	41
部分习题答案	46
第 3 章 线性电路的基本分析方法	47
3.1 独立变量和独立方程	47
3.1.1 电路变量	47
3.1.2 标准支路	47
3.1.3 电路的独立方程与独立变量	48
3.1.4 支路电流法	50
3.2 回路电流法和网孔法	51
3.3 节点电压法	56
3.4 应用——节点法在电路仿真计算中的应用	60
习题及部分习题答案	62
部分习题答案	65
第 4 章 线性网络定理	66
4.1 齐性定理和叠加定理	66
4.2 替代定理	69
4.3 戴维南定理和诺顿定理	71
4.4 最大功率传输定理	76
4.5 特勒根定理与互易定理	78
4.6 对偶原理	81
4.7 应用——运算放大器电路分析中叠加定理的应用	84
4.7.1 比例电路	85
4.7.2 应用叠加定理分析加法电路和减法电路	86
习题及习题部分答案	87
部分习题答案	92

第 5 章 正弦稳态电路分析	94	6.4 串并联谐振电路	153
5.1 储能元件	94	6.5 应用——双音频电话及滤波器 ..	154
5.1.1 电容元件	94	习题及部分习题答案	155
5.1.2 电感元件	97	部分习题答案	156
5.1.3 电容与电感的串并联等效 ..	99	第 7 章 含有耦合电感的电路	157
5.2 正弦量	102	7.1 耦合电感的伏安关系	157
5.2.1 正弦量的三要素	102	7.2 含耦合电感电路的分析	160
5.2.2 同频率正弦量的相位差	104	7.2.1 耦合电感的串联及其去耦 等效	161
5.2.3 正弦量的有效值	105	7.2.2 耦合电感的并联及其去耦 等效	162
5.3 正弦量的相量表示法	106	7.2.3 T 形耦合电感及其去耦等效 ..	162
5.3.1 正弦量的相量表示	106	7.3 空心变压器	164
5.3.2 复数运算	108	7.4 理想变压器	167
5.4 电路的相量模型	110	7.5 应用——各类电磁变压器简介 及应用	171
5.4.1 基尔霍夫定律的相量形式 ..	110	习题及部分习题答案	173
5.4.2 电阻、电感和电容的相量 模型	110	部分习题答案	176
5.5 阻抗、导纳、相量图	115	第 8 章 三相电路	177
5.6 正弦稳态电路的功率	120	8.1 对称三相电源	177
5.6.1 瞬时功率	121	8.2 对称三相电路分析及计算	178
5.6.2 平均功率(有功功率)	121	8.2.1 三相电路的 Y-Y 连接 与计算	179
5.6.3 无功功率	123	8.2.2 三相电路的 Δ - Δ 连接 与计算	182
5.6.4 复功率	123	8.2.3 三相电路的 Y- Δ 连接 与计算	184
5.6.5 功率因数	126	8.2.4 对称三相电路一般情况 的计算	185
5.6.6 功率因数的提高	127	*8.3 不对称三相电路分析与计算	188
5.7 最大功率传输	129	8.4 三相电路的功率及其测量	192
5.8 正弦稳态电路的分析	130	8.4.1 对称三相电路的复功率	192
5.9 应用——实际电阻、电容和电感 元件在正弦稳态时的模型	134	8.4.2 对称三相电路的平均功率(有功 功率) P 、无功功率 Q 、视在 功率 S	192
习题及部分习题答案	137	8.4.3 对称三相电路的瞬时功率 ..	192
部分习题答案	142	*8.4.4 三相电路的功率测量	193
第 6 章 频率特性与谐振电路	144	8.5 应用——用电中的设备安全 ..	195
6.1 网络函数及频率特性	144		
6.2 谐振电路	147		
6.2.1 串联谐振	147		
6.2.2 并联谐振	149		
6.3 谐振电路的频率特性	151		
6.3.1 串联谐振电路的频率特性 ..	152		
6.3.2 并联谐振电路的频率特性 ..	153		

习题及部分习题答案	197	*10.7 应用——用电容和运放实现	
部分习题答案	198	的模拟电感	238
第 9 章 非正弦周期电流电路	199	习题及部分习题答案	240
9.1 非正弦周期信号	199	部分习题答案	242
9.2 非正弦周期信号分解为傅里叶级数	201	第 11 章 线性动态电路的时域分析	244
9.3 非正弦周期量的有效值、平均功率	204	11.1 动态电路及其方程	244
9.4 非正弦周期电流电路的计算	206	11.2 一阶电路的三要素分析法	247
9.5 应用——直流稳压电源和电网中的谐波问题	211	11.2.1 初始值 $f(0_+)$	247
习题及部分习题答案	213	11.2.2 时间常数	248
部分习题答案	214	11.2.3 稳态值 $f(\infty)$	250
第 10 章 双口网络	216	11.3 典型一阶电路分析	254
10.1 双口网络概述	216	11.4 一阶电路的阶跃响应和冲激响应	261
10.2 双口网络的方程和参数	217	11.4.1 一阶电路的阶跃响应	261
10.2.1 导纳 Y 参数方程	217	*11.4.2 一阶电路的冲激响应	263
10.2.2 阻抗 Z 参数方程	219	11.5 二阶电路的动态过程	267
10.2.3 混合 H 参数方程	221	11.6 应用——单片机复位电路中的 RC 充放电	271
10.2.4 传输 T 参数方程	222	习题及部分习题答案	271
10.3 双口网络的等效电路	224	部分习题答案	276
10.3.1 互易双口网络的等效电路	224	第 12 章 动态电路的复频域分析	278
*10.3.2 非互易双口网络的等效电路	225	12.1 拉普拉斯变换	278
10.4 双口网络与电源和负载的连接	228	12.2 拉普拉斯变换的基本性质	279
10.4.1 输入阻抗	229	12.3 拉普拉斯反变换	283
10.4.2 输出阻抗	229	12.4 线性定常网络的复频域模型及电路定律	289
*10.4.3 特性阻抗	230	12.5 线性定常网络的复频域分析	291
10.5 双口网络的连接	231	12.6 网络函数、零点与极点	295
10.5.1 串联连接	231	12.6.1 网络函数	295
10.5.2 并联连接	232	12.6.2 网络函数的极点和零点及其与相应的冲激响应性质	298
10.5.3 级联	232	习题及部分习题答案	299
10.6 回转器	235	部分习题答案	302
10.6.1 回转器的电路符号及定义	235	参考文献	303
10.6.2 回转器的特性	236	附录 常用公式	304
*10.6.3 回转器的实现	237		

第 1 章 电路和电路定律

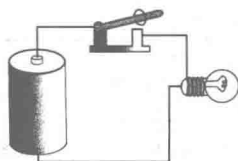
基本要求

- 理解电压、电流的参考方向概念
- 熟练运用关联和非关联方向下的欧姆定律
- 掌握独立电压源、独立电流源和受控源的电压与电流关系
- 牢固掌握基尔霍夫定律，熟练运用基尔霍夫定律分析简单电路
- 正确计算电路元件的功率

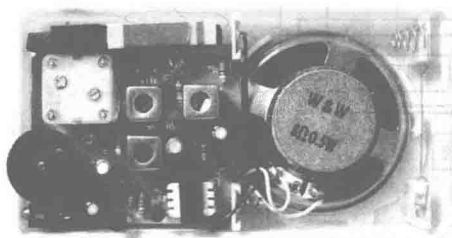
1.1 初 识 电 路

在电子与电气工程中，为了把电能或信息从一点传递到另一点，必须通过一些相互连接的电气设备才能实现。按照一定方式相互连接起来的若干电气设备或器件构成了电路 (electronic circuit)，这些电气设备或器件被称为电路元件。电路也可称为电网络。

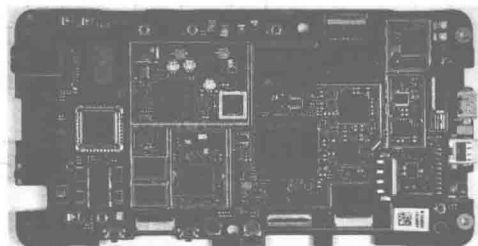
在日常生活、工农业生产、科学研究以及国防等各个方面都离不开电和电路。最简单的电路是手电筒，如图 1-1 (a) 所示；最常用的收音机电路，如图 1-1 (b) 所示；现在普遍使用的手机电路，如图 1-1 (c) 所示。



(a) 手电筒电路



(b) 超外差式收音机电路



(c) 某智能手机主板电路

图 1-1 几种实际电路

电路的几何尺寸相差很大，电力系统和通信系统可跨越省界、国界，覆盖几千公里，而在图 1-1 (c) 所示的手机电路中有很多集成电路芯片，芯片中一枚大头针针尖大小的面积上含有 100 多万个晶体管。电路的功能也是千差万别，通过以下几大类型的电路系统可以了解电路及电路的功能。

(1) 电力系统。产生、传输和分配电能电系统,包括发电、输变电、配电和用电等环节。电能是当今世界利用的主要能源形式,电力系统遍布世界各地。

(2) 通信系统。产生、传送和分配信息的电系统,如电视、电话、发报机、接收机、雷达系统等。

(3) 计算机系统。用电信号存储和处理文字信息、图像信息以及进行数学运算,如计算机、个人计算机和计算机网络系统。

(4) 控制系统。用电信号控制其他形式的能量,如化工过程中的温度、压力和流量等的控制器,电梯中电机、门和灯光的控制装置。

(5) 信号处理系统。对承载信息的电信号进行处理,如各种选频电路、滤波电路、放大电路、语音压缩编/译码器等。

上述五类电路系统之间存在联系、相互作用。通信系统中需要计算机来控制信息的流动;计算机中包含通信、控制和信号处理系统;控制系统中也包含计算机;电力系统需要通信系统来安全可靠地调整系统的运行;信号处理系统中会包括通信、计算机和控制系统。这种相互联系使得电路系统越来越复杂、功能越来越强大。

学习电路相关理论和分析方法,最终目的就是要培养设计、开发、研究各类电路系统的能力,电路课与电气信息类主干课程、五大类电路系统的关系如图 1-2 所示。摆在最基础最重要位置的就是电路课程,电路课是进入电子与电气工程领域的入门课和必修课。学习电路之前同学只有数学和物理基础,所以要学好这门课程,一方面要以数学和物理为工具,另一方面要注意电路与后续课程的联系,以及在后续课程学习和实践中体会电路基础理论的应用。

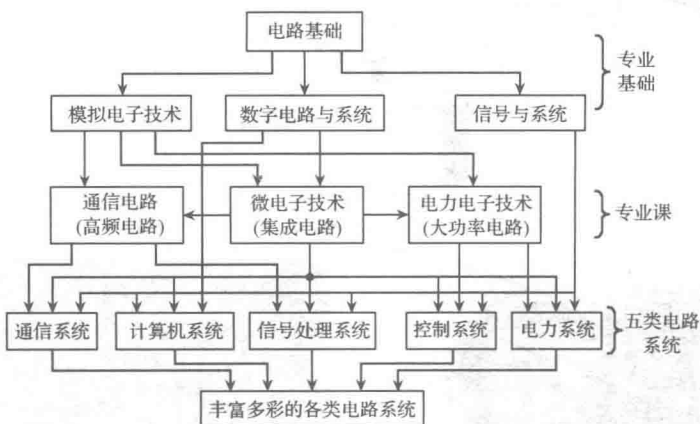


图 1-2 电路课与电气信息类主干课程、各类电路的关系

1.2 电路元件与电路模型

1.2.1 电路元件

实际电路中使用各种电气、电子器件,如干电池、蓄电池、发电机、信号发生器、电阻器、电感线圈、电容器、晶体管和变压器等,如图 1-3 所示。实际电路元件品种繁多,

技术指标、尺寸和形状千差万别,电磁性能不同。为了判断实际电路元件的主要性能,必须将实际电路器件在一定条件下按其主要性质进行理想化和抽象化,每一种理想电路元件只体现单一的电磁现象,从而得到几类理想电路元件,称为实际电路元件的模型。

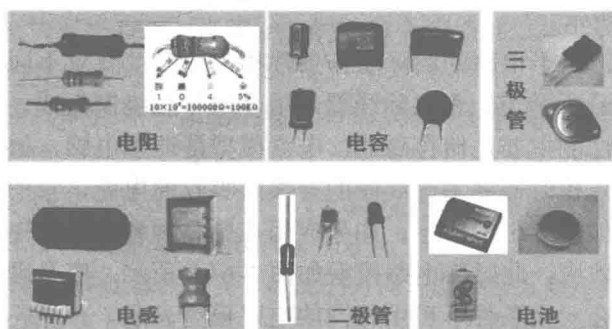


图 1-3 实际电路元件

1) 理想负载元件

理想负载元件包括理想的电阻元件、电容元件和电感元件,电路符号分别如图 1-4 (a)、(b)、和 (c) 所示。

电阻元件,吸收电能并将电能转换为其他形式的能量。电阻器、白炽灯、电炉等实际电路器件主要吸收电能,可用电阻作为其元件模型。

电容元件,只体现单一电场现象,只储存电场能量,不储存磁场能量,也不吸收电能。各种电解电容器、陶瓷电容器、贴片电容器等主要储存电场能量,可用电容作为其元件模型。

电感元件,只体现单一磁场现象,只储存磁场能量,不储存电场能量,也不吸收电能。天线线圈、振荡线圈、扼流线圈、陷波线圈等都用电感作为元件模型。

2) 理想电源元件

理想电源元件包括理想电压源和理想电流源,电路符号分别如图 1-4 (d)、(e) 所示。理想电压源的电压始终保持规定值,理想电流源的电流始终保持规定值。

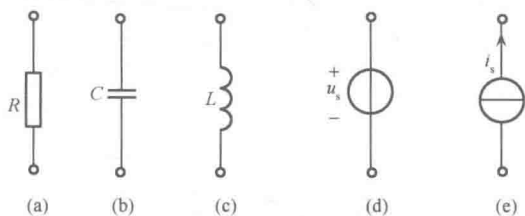


图 1-4 理想电路元件符号

3) 理想耦合元件

理想耦合元件包括受控源、耦合电感、变压器和回转器,都是四端子元件,是内部存在耦合或控制关系的实际元件的理想化模型,将陆续在本章、第 7 章和第 10 章介绍。

1.2.2 电路模型

用理想电路元件的组合可以近似地表征成千上万的实际电气装置,只要这种近似处理与实际测量结果之间的误差在允许范围内即可。由若干理想电路元件组成的电路称为电路

模型。在图 1-1(a) 所示的由电池、小灯泡、开关和导线组成的照明电路实例中, 小灯泡的模型是理想电阻元件, 其微小电感可忽略; 新干电池的内阻与灯泡电阻相比可忽略不计, 它的模型是电压恒定的理想电压源; 导线短的情况下可视为理想导体, 电阻为零。所以, 其电路模型如图 1-5 所示。

建立电路模型时, 由于电路的实际工作条件和工程精度要求不同, 其电路模型可以有不同的形式。图 1-6(a) 所示为一个实际线圈, 用金属导线绕制而成。如果应用在低频电路中, 它所表现的电磁性能主要是储存磁能, 电路模型是理想电感, 如图 1-6(b) 所示; 如果应用在高频电路中, 建模时需要考虑线圈的导线所吸收的电, 它的电路模型应取理想电阻与理想电感串联, 如图 1-6(c) 所示; 如果应用在更高频率的电路中, 还需考虑线圈导体表面的电荷, 即电容效应, 此时其电路模型如图 1-6(d) 所示。容易理解, 主要电磁性能相同的实际电路元件, 在一定条件下可用相同的电路模型表示。

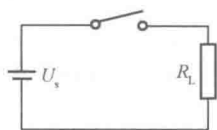


图 1-5 手电筒电路的电路模型

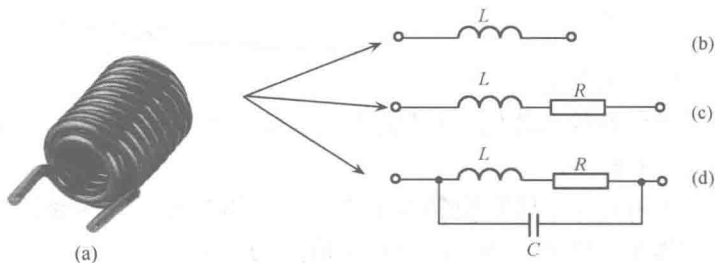


图 1-6 实际电感器及在不同精度等级下的电路模型

看得见、摸得着的实际电路转化成抽象的电路模型, 模型方法不仅在电路理论中应用, 在其他科学领域也都利用模型分析具体事物。

上述电路模型只有当实际电路尺寸远小于电路中电磁波波长时才适用, 即认为电路中各点之间的信号是瞬间传递的, 整个电路可看成电磁空间的一个点, 此时这种电路模型又称为集总参数电路。例如, 我国电力系统的工作频率为 50Hz , 电压电流近似以光速 ($c=3\times 10^8\text{m/s}$) 传播, 那么电磁波波长为 6000km 。如果某电力系统物理尺寸远小于 6000km , 那么就可以将它当作集总参数电路。而微波电路的工作波长 ($\lambda < 1\text{m}$) 一般与电路的尺寸相当, 如电视天线和雷达天线等, 这些电路中的电压电流不仅是时间的函数, 也是位置的函数, 要用电磁场理论去分析, 采用分布参数电路模型。

1.3 电压、电流与功率

电路分析的目的是获得给定电路的电性能, 电流 i 、电压 u 、电荷 q 和磁通 Φ 这四个基本物理量可描述电路的各种电磁现象。在此基础上, 还经常用功率 p 和能量 w 来反映电路的能量传递情况。电路分析中最常用到的是电流 i 、电压 u 和功率 p 三个基本变量。

1.3.1 电流及其参考方向

电荷(charge)的定向移动形成电流。电荷有正电荷和负电荷之分, 电荷量是电子电荷量 $1.6022\times 10^{-19}\text{C}$ 的整数倍。所以, 电流是既有大小又有方向的物理量。

电流(current)的大小定义为单位时间通过导体横截面的电荷量,即

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

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

规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。

电流在导线中或者二端元件中流动的实际方向只有两种可能, 而在复杂电路中常常很难直观地判断出到底是哪一种可能方向; 况且当电流的实际方向不断改变时, 始终跟踪其实际方向是不现实的, 因此引入了电流参考方向。电流的参考方向就是假定的正电荷运动方向, 用实线箭头标注在电路图上, 如图 1-7 所示。

在分析电路之前, 首先要任意假定各个电流的方向, 即参考方向; 然后在这些假定方向下求电流的大小。若求出的电流大小为正值, 说明实际方向与电流参考方向相同, 如图 1-7(a) 所示; 若电流的大小为负值, 则说明实际方向与电流参考方向相反, 如图 1-7(b) 所示。由此可见: 根据电流参考方向和电流大小的正、负值, 能够唯一确定实际电流的方向和大小; 因参考方向不同, 同一电流有两种不同的表示法; 若电路中不标出参考方向, 则电流的正、负毫无意义。

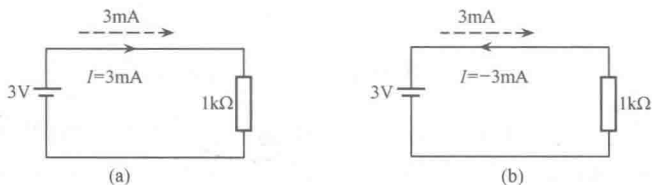


图 1-7 两种可能的电流参考方向(虚线箭头为实际方向, 实线箭头为参考方向)

总之, 电路分析前必须指定电路中所有电流的参考方向, 参考方向的指定是任意的。当然, 如果能够明显地判断出来电流的实际方向, 则最好把参考方向设为实际方向, 高中物理的电学部分就是这样做的。一旦指定了参考方向, 在计算过程中就不能更改。

1.3.2 电压及其参考方向

电荷的定向移动必然受到原子核或电子热运动的阻碍, 如果没有电场力推动是不可能产生电流的。如同没有水压水就不会流动一样。

电场力推动单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功称为 a 、 b 两点间的电压(voltage)。设电场力将 dq 个正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功为 dw , 则

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

其中, 电压 u_{ab} 的单位为伏特(V); 功 w 的单位为焦耳(J)。

任选电路中的一点为零参考点, 电路中某点与参考点之间的电压称为该点的电位。一般选大地为参考点, 电气设备的机壳接大地时, 机壳就是参考点; 机壳不接大地时, 一般选支路汇集的一个点作参考点。

设 a 点的电位为 u_a , b 点的电位为 u_b , 则 a 、 b 之间的电压 u_{ab} 又可定义为这两点之间的电位差。

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

(1-3)

电压也是既有大小又有方向的物理量。规定电位降低的方向为电压的实际方向，所以电压又可叫作**电压降、电位降**。

通常很难直观地判断两点之间电压的实际方向，所以在求解电路之前，总是先任意指定高、低电位，称为电压参考方向。用“+”表示假设的高电位，“-”表示假设的低电位，这一对“+、-”号就设定了电压的参考方向，如图 1-8 所示。

图 1-8 中， $u_a=5\text{V}$ ， $u_b=3\text{V}$ ， a 、 b 间电压的实际方向是由 a 指向 b 。图 1-8(a) 将 a 点设为高电位、 b 点设为低电位，则电压 $U=5-3=2(\text{V})>0$ ，说明电压的实际方向与参考方向相同；反过来，图 1-8(b) 中将 a 点设为低电位、 b 点设为高电位，则 $U=3-5=-2(\text{V})<0$ ，说明电压的实际方向与参考方向相反。可见，根据所设电压参考方向与求得数值的正、负，电压的大小和实际方向就唯一确定了。

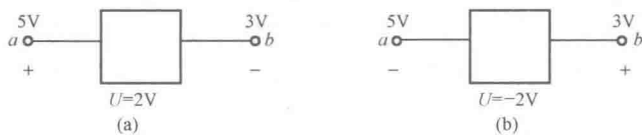


图 1-8 电压参考方向的两种设定方式

大学物理里介绍过保守力和保守场，库仑电场力和重力都是保守力，库仑电场和重力场都是保守场。保守力做功与物体运动所经过的路径无关，只与运动物体的起点和终点位置有关。库仑电场力将单位正电荷从一点移动到另一点所做的功，只与两点之间的位置有关，而与移动电荷的路径无关。所以，两点之间的电压只与两点之间的位置有关，与路径无关。

1.3.3 电压和电流的分类与测量

电压和电流都是可以用仪表测量的，测量时要同时注意电压和电流的大小和方向。如果电压和电流的大小和方向均不随时间变化，则称为**直流电压和直流电流**，如图 1-9(a) 所示，习惯上用大写字母 U 和 I 表示。本书 1~4 章分析的电路变量主要是直流电压和直流电流。

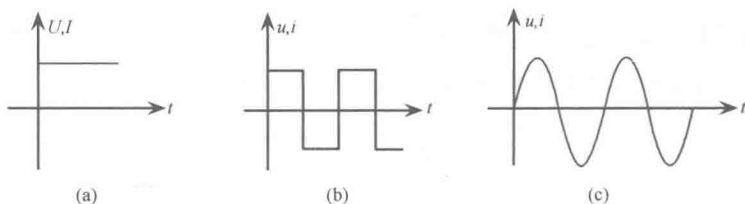


图 1-9 直流电压、电流和时变电压、电流

直流电压表可以测量直流电压，测量时需要记住：黑表笔接触的点相当于电压参考方向的低电位点，红表笔相当于高电位点，直流电压表的示数即为电压的大小。若红、黑表笔位置与实际高、低电位点相同，则示数为正；若相反，则示数为负。直流电流表可以测量直流电流，表的示数为电流的大小，而电流的方向是从红表笔流向黑表笔。直流电压和

电流的测量如图 1-10 所示, 图中元件两端的电压 $U=12\text{V}$, 电流 I_1 方向由右向左, 大小为 2A 。可见电压、电流的测量与电路分析一样, 都是在设定方向下求大小。

如果电压和电流的大小或方向随时间变化, 则称为时变电压和时变电流, 如图 1-9(b) 和(c)所示, 时变电压和电流的瞬时波形只能用示波器等仪器观测, 注意所测电压或电流的方向也是按示波器的接线端子规定的方向。图 1-9(c) 中电压和电流按照正弦规律变化, 称为正弦电压和正弦电流。本书 5~8 章分析的电路变量主要是正弦电压和正弦电流。

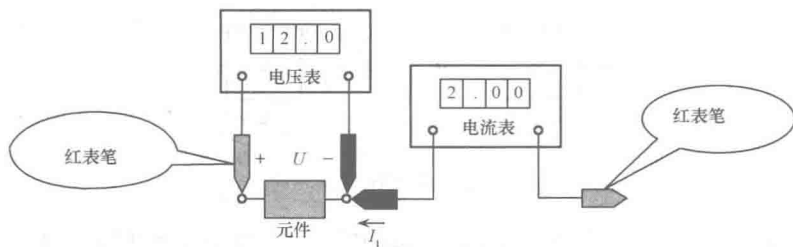


图 1-10 直流电压、电流的测量

1.3.4 电压和电流的关联参考方向

电路分析前必须设定电流和电压的参考方向。虽然同一段电路的电压和电流的参考方向可以各自选定, 不必强求一致, 但为了分析方便, 常选定某些元件的电压和电流的参考方向一致。即, 电流从电压“+”极性端流入该元件再从电压“-”极性端流出, 这种参考方向称为关联参考方向 (passive sign convention)。在关联参考方向下, 画出电流参考方向后可不用再画电压参考方向了。

注意 谈到关联参考方向时, 一定要弄清楚是关于哪部分电路关联。在图 1-11 中, u 、 i 关于 3V 电压源是非关联参考方向, 关于电阻 R 却是关联参考方向。

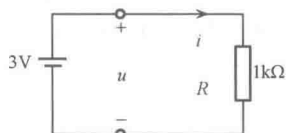


图 1-11 关联与非关联参考方向

1.3.5 功率

各种电气设备都有一定的电流限额、电压限额和功率限额, 在使用时超过这些额定值会损坏设备。所以, 在电路分析和设计中仅计算电压和电流是不够的, 功率计算也是非常重要的。况且, 电路系统的有效输出经常是非电气的, 如电动机的有效输出是转矩, 用功率才能把电和非电的输入或输出进行比较。

元件单位时间内吸收或发出的电能叫作功率 (electric power), 即

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1-4)$$

其中, 功率 $p(t)$ 的单位为瓦特 (W); 能量 $w(t)$ 的单位为焦耳 (J); 时间 t 的单位为秒 (s)。

在图 1-12(a) 中, N 为一个元件或一段电路, u 和 i 关联方向, 根据式 (1-1) 和式 (1-2) 电流、电压定义, 可以得到 N 吸收或消耗的瞬时功率为

$$p_{\text{吸}}(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt} = u(t) \cdot i(t) \quad (1-5)$$

式(1-5)表示电路元件消耗的功率等于该元件两端的电压大小与流过的电流大小的乘积。其物理过程是：库仑电场力将正电荷从高电位点移动到低电位点，因而电场力做正功，电场能量减少，减少的能量被电路 N 吸收了。

在图 1-12(b)中， N 的 u 和 i 非关联方向，则 N 吸收或消耗的功率为

$$p_{\text{吸}}(t) = -u(t) \cdot i(t) \quad (1-6)$$

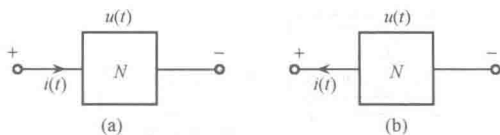


图 1-12 功率计算示意图

式(1-6)实际表示 N 发出的功率为 $p_{\text{发}}(t) = u(t) \cdot i(t)$ ，这里的物理过程是：非库仑电场力做正功，将正电荷由低电位点搬运到高电位点，结果使电场能量增加，这增加的能量由电路 N 释放出来。

利用式(1-5)或式(1-6)计算功率时，若 $P_{\text{吸}} > 0$ ，表明电路 N 吸收功率；若 $P_{\text{吸}} < 0$ ，表明电路 N 实际上是发出功率。计算时，要根据所得数值的正负指明电路到底是吸收功率还是发出功率。

例 1-1 电路各元件电压和电流的参考方向如图 1-13 所示。已知 $U_1 = U_4 = 10\text{V}$ ， $U_2 = -12\text{V}$ ， $I_1 = 1\text{A}$ ， $I_2 = I_3 = 1.5\text{A}$ ， $I_4 = -0.5\text{A}$ 。计算各个元件的功率，并验证是否符合能量守恒定律。

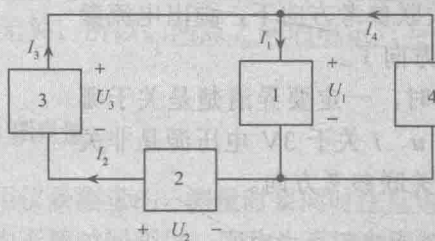


图 1-13 电路元件未知情况下计算功率

解 根据两点之间电压与路径无关，有 $U_3 = U_1 - U_2 = 22\text{V}$ ，则

元件 1 吸收的功率： $P_1 = U_1 I_1 = 10 \times 1 = 10(\text{W})$ ；

元件 2 吸收的功率： $P_2 = U_2 (-I_2) = -12 \times (-1.5) = 18(\text{W})$ ；

元件 3 发出的功率： $P_3 = U_3 I_3 = 22 \times 1.5 = 33(\text{W})$ ；

元件 4 发出的功率： $P_4 = U_4 I_4 = 10 \times (-0.5) = -5(\text{W})$ ，实际吸收 5W 。

电路吸收的功率 $= 10 + 18 + 5 = 33(\text{W})$ ，电路发出的功率 $= 33\text{W}$ ，吸收的功率等于发出的功率，所以，电路中的功率是平衡的，符合能量守恒定律。

评注 电路元件的功率分为吸收功率和发出功率两种情况，所以，计算功率时必须指明是吸收还是发出功率，否则仅仅一个数量，例如， -5W ，是没有意义的。本题未限定电路中的具体元件，是想说明功率只取决于电压、电流两个量，与元件类型无关。

本节小结：本节主要讲述了电压、电流和功率这三个基本物理量；在求解电路时，必须

先假定所求电压和电流的参考方向,参考方向一经选定在计算过程中不能改变;电路或电路元件的功率分为吸收和发出两种情况,要根据电压和电流的方向来判断。对于以后几节要介绍的每一种电路元件,都要从电压、电流约束关系以及功率计算两方面来掌握每个元件的特性。

1.4 基尔霍夫定律

电路元件连接起来组成电路,连接必然使各元件两端的电压和流过的电流相互制约,这种由电路结构产生的约束体现为基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, KCL)和基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, KVL)。

基尔霍夫(Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887),德国物理学家和化学家。1847年在他还是一名大学生的时候,提出了著名的电流定律和电压定律,成为电路分析最基本的依据。他与德国化学家 Robert Bunsen 在波谱学方面的合作研究导致了铯和铷元素的发现。他还提出了基尔霍夫辐射定律。图 1-14 是德国发行的基尔霍夫纪念邮票,公式 $\sum I=0$ 和 $\sum u=0$ 就是基尔霍夫电流定律和电压定律的表达式。

基尔霍夫定律仅取决于电路元件相互连接的结构,描述电路结构用支路、节点、回路、网孔等术语。

(1)支路(branch):流过同一个电流的一段电路,图 1-15 中 $a \rightarrow b$ 、 $b \rightarrow c$ 、 $c \rightarrow m \rightarrow a$ 都是支路。

(2)节点(node):三个或三个以上支路的连接点,如图 1-15 中的节点 a 、 b 、 c 、 d 。在用计算机分析电路时,两个元件的连接点 m 点也是节点。

(3)回路(loop):由支路组成的任意闭合路径。图 1-15 中 $a \rightarrow b \rightarrow d \rightarrow a$ (即回路 I)、 $b \rightarrow c \rightarrow a \rightarrow d \rightarrow b$ 、 $d \rightarrow c \rightarrow a \rightarrow d$ (即回路 II)和 $c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow d \rightarrow c$ 都是回路。

(4)网孔(mesh):平面电路中内部不包含支路的回路(平面电路是指可以画在一个平面上、没有支路彼此交叉的电路)。回路 I 和回路 II 都是网孔。



图 1-14 基尔霍夫纪念邮票

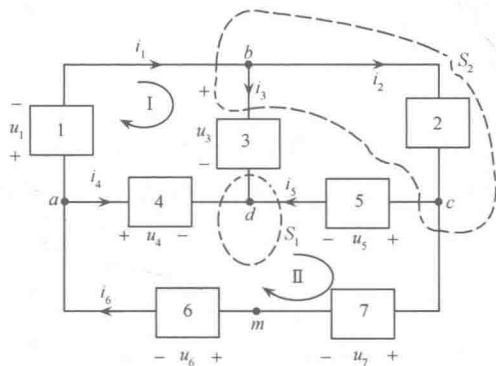


图 1-15 电路结构示意图

1.4.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律叙述如下。

在集总参数电路中，在任一时刻，流出或流入任一节点或封闭面的各支路电流的代数和为零(习惯上流出的电流为正，流入的电流为负)，即

$$\sum i(t) = 0 \quad (1-7)$$

另一种表述：在集总参数电路中，在任一时刻，参考方向“流出”该节点的所有支路电流之和恒等于“流入”该节点的各支路电流之和。

$$\sum i_{\text{出}}(t) = \sum i_{\text{入}}(t) \quad (1-8)$$

对图 1-15 中部分节点和封闭面列写 KCL 方程如下：

$$\text{对节点 } a \quad i_1 + i_4 - i_6 = 0$$

$$\text{对节点 } c \quad -i_2 + i_5 + i_6 = 0$$

$$\text{对封闭面 } S_1 \text{ (仅包围节点 } d) \quad -i_3 - i_4 - i_5 = 0$$

$$\text{对封闭面 } S_2 \text{ (包围节点 } b \text{ 和 } c) \quad -i_1 + i_3 + i_5 + i_6 = 0$$

由上可见，KCL 仅是对支路电流的约束，它与电路元件性质无关，因此不管是线性电路还是非线性电路、时变电路还是非时变电路、含源电路还是无源电路，KCL 皆适用。对于封闭面应用 KCL 称为广义 KCL。

基尔霍夫电流定律是电荷守恒原理的体现。具体说，到达电路任一节点的电荷既不可能增生，也不可能消灭，流入节点的电荷必须等于流出的电荷，电流是连续流动的。

在列写 KCL 方程时，将遇到两套符号。一套是方程中每项电流变量前面的正负号，它取决于各支路电流参考方向流入还是流出节点，习惯上流出节点取正号，流入取负号。另一套符号是指各电流变量数值的正负，它取决于电流的实际方向与参考方向之间的关系，正值表示实际方向和参考方向一致，负值表示实际方向与参考方向相反。

1.4.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律表述如下。

在集总参数电路中，在任一时刻，沿任一回路巡行一周，各元件上电压降的代数和为零，即

$$\sum u(t) = 0 \quad (1-9)$$

另一种表述：在集总参数电路中，在任一时刻，沿任一回路巡行一周，一部分元件上电压降的代数和等于另一部分元件上电位升的代数和。

$$\sum u_{\text{降}}(t) = \sum u_{\text{升}}(t) \quad (1-10)$$

列写 KVL 方程的具体方法是：

- (1) 指定各支路电压的参考方向，一般与支路电流方向一致；
- (2) 标出各回路的巡行方向，可以顺时针方向，也可以逆时针方向；
- (3) 在回路电压方程中，与回路巡行方向一致的支路电压前取正号，如图 1-15 中回路 I 中的电压 u_1 和 u_3 ；反之取负号，如图 1-15 中回路 I 中的电压 u_4 。若遇到只标出电流参考方向的情况，当巡行方向与电流方向一致时，支路电压前取正号，反之取负号。

$$\text{对图 1-15 的回路 I} \quad u_1 + u_3 - u_4 = 0$$