



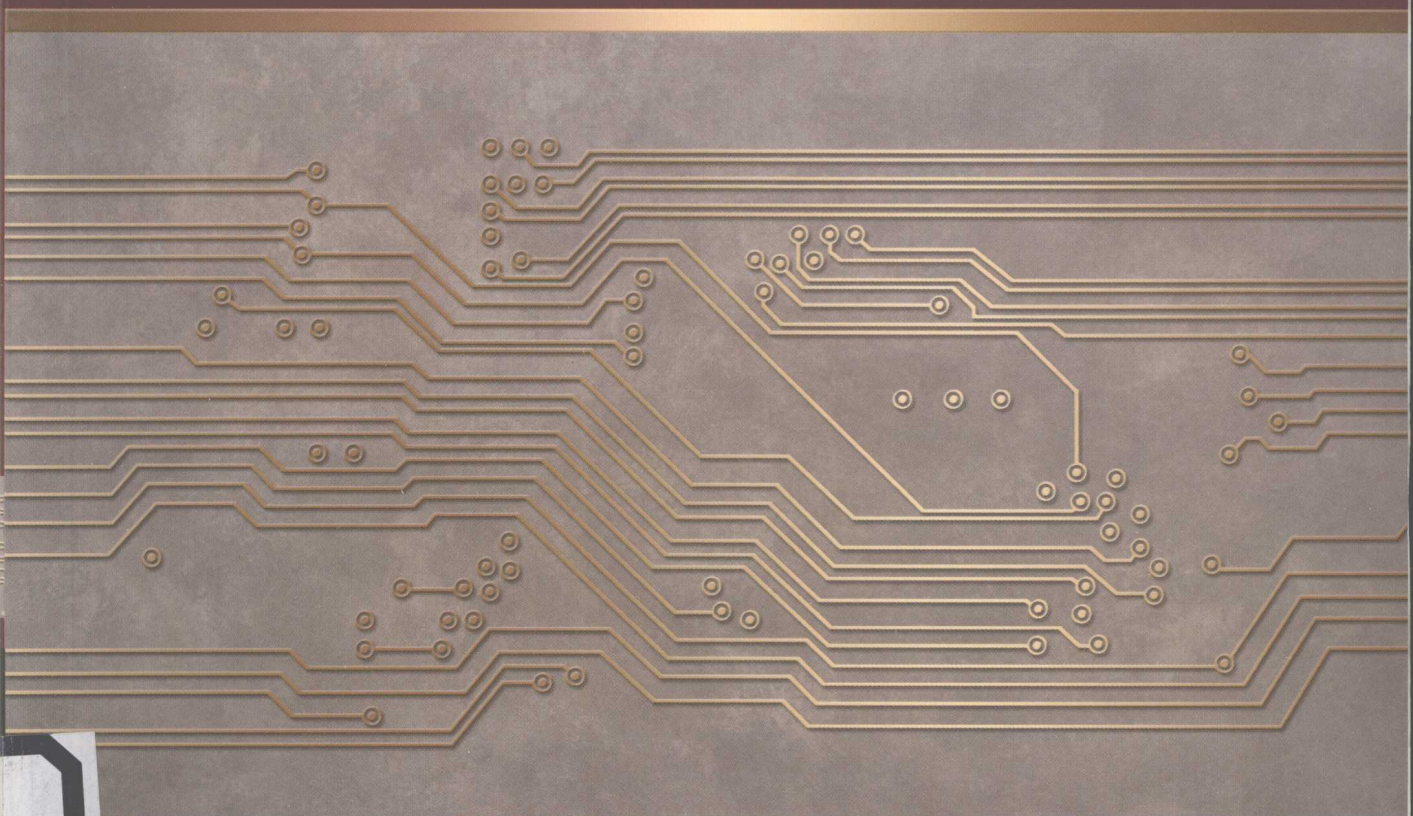
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

新编电气与电子信息类本科规划教材·电子电气基础课程

电路分析

(第2版)

刘 健 主编



778



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家级规划教材
新编电气与电子信息类本科规划教材·电子电气基础课程

电 路 分 析

(第2版)

刘 健 主编

刘良成 徐 祎 尹均萍 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书是依据教育部颁布的《高等学校工科本科电路分析基础课程教学基本要求》，并考虑到结合工程实际的特色而编写的。主要内容有：电路的基本概念和基本定律、电阻电路的分析方法、电路的基本定理及应用、动态电路、正弦稳态电路、三相电路、耦合电感电路、非正弦周期电路、频率响应与谐振电路、拉氏变换及其应用、二端口网络及多端元件、非线性电路基础、电路分析的计算机方法初步、PSpice 简介及应用举例。

本书可作为高等学校电气、电子、计算机等专业本科生教材，也可供有关专业技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析/刘健主编. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2010.1

(新编电气与电子信息类本科规划教材·电子电气基础课程)

ISBN 978-7-121-08925-1

I. 电… II. 刘… III. 电路分析—高等学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 082387 号

责任编辑: 韩同平 特约编辑: 李佩乾

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22.5 字数: 576 千字

印 次: 2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书第 1 版出版以来，被国内多所大学选作为教材，效果良好。为更好地适应高等教育“质量工程”的实施，以及教学内容和课程体系改革的需要，经广泛听取师生的意见和建议，对第 1 版内容进行了全面修订；修订的思路是：（1）保持原书“继承传统性、增强应用性和反映先进性”的特点；（2）为使理论体系更完整，体现与专业课程的衔接，对部分章节做了增删；（3）从易读和应用性的角度，增加了例题和应用举例，并对部分习题进行增删。

第 2 版主要章节保留了原书的风格。主要修订的内容包括：第 5 章功率因数的阐述更加严谨易读，更换了实际工程应用章节的内容；第 6 章交流电路功率测量内容做了部分更新，使之更加理论联系实际；第 8 章非正弦周期电路分析中，完善了应用对称性进行傅里叶级数展开的讨论；第 9 章频率特性与谐振电路中，增加了一些应用举例更易于自学理解，同时考虑到本课程是电类各专业的公共基础课，应突出基本理论核心，故删除了部分烦琐内容；第 11 章增加了实际运算放大器到理想化的引述，对器件的实际与理想有了更全面的认识；第 12 章为了突出非线性电阻电路基本点，增加了含非线性电阻的动态电路分析方法，删除了原书不便展开讨论的内容。

全书内容的编写特点是：在传统基本理论基础上，注重专业基础课程引入实际工程应用的实例。建立模型来源于实际的认识规律，阐述理想元件的定义与实际器件的辩证关系，并提供一些实物图片，为理论和方法的学习奠定实际背景基础。这不仅有利于提高学生的学习兴趣，扩大学习视野，而且，有利于提高学生的分析问题和解决问题的能力。将解题思路融于例题中，取代了过多的文字描述。在电路分析的计算机方法章节中，通过各种方法的讲述使学生能对现代电路理论的发展过程及计算机如何进行电路分析有具体的了解，而不是简单地用现有程序解题。这对培养学生树立不断创新的思维是有益的。附录中介绍了当前国际流行的电路分析程序 PSpice 及应用举例，进一步拓宽学生的思路 and 了解现代电路分析方法的最新进展。为帮助读者学习，每章开始有内容提要 and 要点提示，每节后均附有思考与练习，每章后有习题，书后配有习题参考答案。

本书结构和体系设计的特点是：第 1 章的基本概念和定律为全书奠定基础；电阻电路分为两章，一般分析方法和基本定理；动态电路时域分析作为一章是为了独立性和完整性；正弦稳态电路、三相电路、耦合电感电路、非正弦周期电路主题突出各立一章；拉氏变换、动态电路复频域分析和网络函数作为一章，是为了反映这些分析都是在 s 域中进行的；频率响应和谐振电路、二端口网络及多端元件和非线性电路各成一章；最后一章是电路分析的计算机方法，包括电路方程的矩阵描述和电路的计算机分析程序编写，反映了现代的理论和方法。

本书共 13 章，覆盖了电路分析的主要内容，书中打“*”号部分作为扩展内容供选修。各章课内教学参考学时为：第 1 章 6 学时，第 2 章 10 学时，第 3 章 8 学时，第 4 章 12 学时，第 5 章 9 学时，第 6 章 4 学时，第 7 章 5 学时，第 8 章 4 学时，第 9 章 6 学时，第 10 章 8 学时，第 11 章 10 学时，第 12 章 6 学时，第 13 章 6 学时，全书教学 94 学时左右。弱电各

专业为避免后续课程的重复性,可选择第1、2、3、4、5、6、7、9和11章作为基本教学内容,约70学时。

本书由刘健主编并统稿,由刘健、刘良成、徐祎、尹均萍编写。第2版由刘健和刘良成修订。

中国科技大学庄镇泉教授对本书进行了认真审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中吸取了参考文献中各位专家、学者的许多经验,受益匪浅;同时,对电子工业出版社及韩同平编辑的大力支持一并表示由衷的谢意。

由于编者水平限制,本书结构和体系的安排,内容的取舍和叙述等方面一定会有缺点和错误,恳请读者指正。

为便于教师教学和采用新的教学手段,本教材配有全新内容丰富的电子课件,索取课件可直接与本书主编联系:ljhfgd@163.com。

编 者

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	(1)
1.1 实际电路与电路模型	(1)
1.1.1 实际电路的功能和特点	(1)
1.1.2 电路模型及其意义	(2)
1.2 电路的基本物理量	(3)
1.2.1 电流及参考方向	(4)
1.2.2 电压及参考极性	(4)
1.2.3 电功率	(5)
1.3 基尔霍夫定律	(7)
1.3.1 基尔霍夫电流定律	(8)
1.3.2 基尔霍夫电压定律	(8)
1.4 电路的基本元件及方程	(9)
1.4.1 电阻元件	(9)
1.4.2 电容元件	(10)
1.4.3 电感元件	(12)
1.4.4 独立电压源	(14)
1.4.5 独立电流源	(16)
1.4.6 受控源	(16)
1.5 应用——电路模型的建立	(18)
习题	(19)
第 2 章 电阻电路的分析方法	(24)
2.1 电路的化简与等效	(24)
2.1.1 电阻的串联和并联	(24)
2.1.2 独立源的串联和并联	(26)
2.1.3 实际电源的两种模型及其等效变换	(27)
2.2 电阻星形连接与三角形连接的等效变换	(29)
2.3 等效电路及等效电阻	(31)
2.3.1 等效电路及等效电阻的概念	(31)
2.3.2 等效电阻的计算	(32)
2.4 电路的拓扑图及电路方程的独立性	(33)
2.4.1 网络图论的初步知识	(33)
2.4.2 KCL 方程的独立性	(36)
2.4.3 KVL 方程的独立性	(37)
2.5 支路法	(37)

2.6 网孔电流法和回路电流法	(39)
2.6.1 网孔电流法	(39)
2.6.2 回路电流法	(40)
2.7 结点电压法	(42)
2.8 应用——万用表	(46)
习题	(48)
第3章 电路定理及应用	(54)
3.1 叠加定理和齐性定理	(54)
3.1.1 叠加定理	(54)
3.1.2 齐性定理	(57)
3.2 替代定理	(58)
3.3 戴维南定理和诺顿定理	(58)
3.3.1 戴维南定理	(59)
3.3.2 诺顿定理	(61)
3.4 最大功率传输定理	(63)
3.5 特勒根定理	(65)
3.6 互易定理	(67)
3.7 对偶原理	(69)
3.8 应用——数-模转换器	(71)
习题	(72)
第4章 动态电路	(76)
4.1 动态电路的基本概念和换路定则	(76)
4.1.1 动态电路的基本概念	(76)
4.1.2 换路定则与初始值的确定	(77)
4.2 一阶电路的分析	(79)
4.2.1 RC 和 RL 电路的零输入响应	(79)
4.2.2 RC 和 RL 电路的零状态响应	(83)
4.2.3 全响应	(86)
4.2.4 三要素法	(87)
4.3 二阶电路的分析	(88)
4.3.1 二阶电路的零输入响应	(88)
4.3.2 二阶电路的零状态响应与全响应	(93)
4.4 阶跃响应与冲激响应	(94)
4.4.1 阶跃函数与冲激函数	(94)
4.4.2 阶跃响应	(96)
4.4.3 冲激响应	(97)
4.5 状态方程	(100)
4.5.1 状态与状态变量	(100)
4.5.2 状态方程的建立	(101)
4.5.3 输出方程	(102)

4.6 应用——闪光灯及多谐振荡器	(103)
习题	(104)
第5章 正弦稳态电路	(110)
5.1 正弦量的基本概念	(110)
5.1.1 正弦量的三要素	(110)
5.1.2 正弦量的有效值	(111)
5.2 正弦量的相量表示法	(112)
5.2.1 复数的表示形式及运算	(112)
5.2.2 正弦量的相量表示法	(113)
5.3 基尔霍夫定律及元件方程的相量形式	(116)
5.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	(116)
5.3.2 元件方程的相量形式	(117)
5.4 阻抗和导纳	(120)
5.4.1 阻抗的定义	(120)
5.4.2 导纳的定义	(122)
5.4.3 阻抗与导纳的关系及等效阻抗	(123)
5.5 正弦稳态电路分析	(125)
5.5.1 相量法	(125)
5.5.2 相量图	(128)
5.6 正弦稳态电路的功率	(130)
5.6.1 正弦稳态电路的功率的定义	(130)
5.6.2 功率因数的提高	(133)
5.6.3 最大功率传输	(135)
5.7 应用——交流仪表表头机构	(137)
5.7.1 电磁系仪表	(137)
5.7.2 电动系仪表	(138)
习题	(141)
第6章 三相电路	(146)
6.1 三相电路的基本概念	(146)
6.2 三相电路的连接	(147)
6.3 对称三相电路的计算	(149)
6.4 不对称三相电路	(152)
6.5 三相电路的功率及测量	(155)
6.6 应用——三相电路接零保护系统	(158)
习题	(159)
第7章 耦合电感电路	(162)
7.1 互感现象及耦合电感元件	(162)
7.1.1 耦合现象	(162)
7.1.2 同名端与耦合电感	(162)
7.1.3 耦合系数	(164)

7.2 含耦合电感电路	(166)
7.2.1 串/并联电路	(166)
7.2.2 去耦等效电路	(168)
7.2.3 含耦合电感电路的分析	(169)
7.3 空心变压器	(170)
7.4 理想变压器	(172)
7.5 应用——互感式电工仪表	(174)
习题	(175)
第8章 非正弦周期电路	(178)
8.1 非正弦周期信号的分解	(178)
8.1.1 傅里叶级数的三角形式	(178)
8.1.2 对称性的应用	(180)
8.1.3 频谱图	(181)
8.2 非正弦周期信号的有效值和平均功率	(182)
8.2.1 有效值	(182)
8.2.2 平均功率	(183)
8.3 非正弦周期电路的稳态分析	(184)
8.4 傅里叶级数的复(指)数形式	(187)
8.5 应用——频谱分析仪	(188)
习题	(189)
第9章 频率响应与谐振电路	(191)
9.1 电路的频率响应	(191)
9.1.1 频率响应特性	(191)
9.1.2 RC 电路	(192)
9.1.3 滤波网络	(194)
9.2 串联谐振电路	(200)
9.2.1 LC 振荡回路及品质因数	(201)
9.2.2 串联谐振	(203)
9.2.3 谐振曲线	(205)
9.3 并联谐振电路	(207)
9.3.1 简单并联谐振	(208)
9.3.2 源内阻与负载对谐振的影响	(209)
*9.3.3 双电感和双电容并联谐振电路	(211)
9.3.4 元件损耗对谐振频率的影响	(213)
9.4 应用——收音机调谐电路	(215)
习题	(216)
第10章 拉氏变换及其应用	(220)
10.1 拉氏变换的定义及性质	(220)
10.1.1 拉氏变换的定义及收敛域	(220)
10.1.2 拉氏变换的基本性质	(221)

10.1.3 周期函数的拉氏变换	(225)
10.2 拉氏逆变换	(226)
10.3 运算电路模型	(230)
10.3.1 电路元件的运算模型	(230)
10.3.2 基尔霍夫定律的运算形式	(232)
10.4 运算法	(232)
10.5 网络函数及零、极点分布对响应的影响	(235)
10.5.1 网络函数与单位冲激响应	(235)
10.5.2 网络函数的零、极点与时域响应	(236)
10.5.3 网络函数的零、极点与频率响应	(239)
10.5.4 卷积	(241)
10.6 应用——系统的稳定性	(242)
习题	(243)
第 11 章 二端口网络及多端元件	(247)
11.1 二端口网络	(247)
11.1.1 网络参数与方程	(247)
11.1.2 等效电路	(252)
11.1.3 各组参数间的互换	(253)
11.2 具有端接的二端口	(255)
11.2.1 策动点阻抗	(255)
11.2.2 转移函数	(256)
11.3 二端口网络的连接	(258)
11.3.1 连接方式	(258)
11.3.2 连接的有效性	(260)
11.4 互易和对称二端口	(262)
11.4.1 开路短路阻抗参数	(263)
*11.4.2 特性阻抗与传输系数	(265)
11.5 含源二端口网络	(267)
11.5.1 端口伏安关系	(267)
11.5.2 等效电路	(269)
11.6 运算放大器电路	(269)
11.6.1 多端元件	(270)
11.6.2 运算放大器电路模型	(270)
11.6.3 含理想运算放大器电路	(272)
*11.6.4 RC 有源滤波器	(274)
11.7 回转器和负阻抗变换器	(276)
11.7.1 回转器	(276)
11.7.2 负阻抗变换器	(277)
11.8 应用——晶体三极管小信号放大电路	(278)
习题	(280)

第 12 章 非线性电路基础	(284)
12.1 非线性元件	(284)
12.1.1 非线性电阻	(284)
12.1.2 非线性电容	(286)
12.1.3 非线性电感	(286)
12.2 含非线性电阻电路分析	(287)
12.2.1 含一个非线性元件的电路	(288)
12.2.2 非线性电阻的串、并联	(288)
12.2.3 分段线性化	(289)
12.2.4 小信号分析法	(291)
*12.2.5 含非线性电阻的动态电路	(293)
12.3 含二极管电路	(294)
12.3.1 二极管	(294)
12.3.2 含理想二极管电路	(298)
12.4 应用——整流滤波电路	(299)
习题	(302)
第 13 章 电路分析的计算机方法初步	(305)
13.1 电路拓扑矩阵及 KCL、KVL 方程	(305)
13.1.1 关联矩阵	(305)
13.1.2 割集矩阵	(307)
13.1.3 回路矩阵	(308)
13.1.4 矩阵 A 、 B_r 和 Q_r 的关系	(308)
13.1.5 关于独立变量	(309)
13.2 结点电压方程的矩阵形式	(311)
13.3 回路电流方程的矩阵形式	(313)
*13.4 改进的结点法	(314)
*13.5 直接列写法	(318)
*13.6 电路方程的解	(321)
*13.7 电路分析程序编写	(323)
习题	(328)
附录 A PSpice 简介及应用举例	(330)
A.1 PSpice 简介	(330)
A.2 PSpice 特点	(331)
A.3 PSpice 应用举例	(332)
习题参考答案	(337)
参考文献	(349)

第1章 电路的基本概念和基本定律

【内容提要】

本章介绍电路模型、电路的基本物理量、基本定律和基本元件，以及电路模型的应用实例。通过本章的学习，了解实际电路的功能和特点，电路模型的概念和意义，实际电路与电路模型内在的联系和区别。电流和电压参考方向是电路分析中最基本的概念，基尔霍夫电流定律和电压定律是电路理论的基石，应熟练掌握和运用。要理解和掌握电路基本元件的定义和元件方程与参考方向的关系，以及功率和能量的计算。学习电路理论应注重与实际应用的结合。

1.1 实际电路与电路模型

通过模型化的方法研究客观世界是人类认识自然的一个基本方法。为了能对模型进行定量分析和研究，通常是将实际条件理想化、具体事物抽象化、复杂系统简单化。建立起来的模型应能反映事物的基本特征，以便对实际事物本质的了解。研究电路问题也不例外地采用模型化的方法。

1.1.1 实际电路的功能和特点

实际电路在日常生活和工程上随处可见，它们是由电器件或电气设备通过导线的互连组合，以实现某一特定功能的总体。图 1-1 所示为手电筒照明电路，它是由干电池、灯泡、开关和导电外壳等组成的。干电池作为电源，给电路提供电能，其内部的化学能转变为电能；灯泡作为负载消耗电能，将电能转变为光能和热能；外壳作为连接导线，在开关的控制下，形成闭合回路。图 1-1 为最简单的实际电路，其功能是进行能量的转换。

例如，家用电器供电线路如图 1-2 所示。从发电厂发出的电经远距离传输，送至千家万户，为家电产品的使用提供电能。在发电厂的一端，发电机将非电形式的能量，如势能、热能、原子能和太阳能等，转换成电能（电源）；在用户端，不同的用电设备（负载），又将电能转换为非电形式的能量，如机械能、热能、光能，等等。又如，家用洗衣机中的电动机是将电能转换为机械能，其功能也是进行能量的转换。

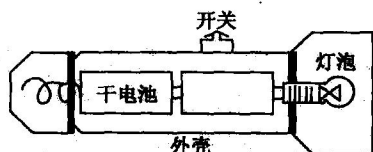


图 1-1 手电筒实际电路

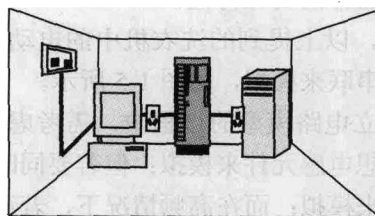


图 1-2 家电路

由上述讨论可知:

- (1) 电路的基本构成至少包括: 电源、负载和导线;
- (2) 上述实际电路的基本功能都是能量的传递与转换。

实际中, 还可见到各种各样的电路, 如用来检测电量(电压、电流、功率等)和非电量(时间、压力、速度等)的仪器、仪表电路, 这种电路的功能是进行各种物理量的测量和处理。又如人们天天打交道的音响、电视机等电路, 是将接收到的高频信号进行选频、放大和还原等处理, 以恢复出原来的声音和图像。这类电路的功能是实现信号的加工处理。

实际电路种类繁多。归纳起来, 构成电路的基本单元均包括电源、负载和导线等电器件。电路的基本功能有两种: (1) 实现能量的传递和转换; (2) 实现信号的加工处理。

在工程上, 采用国家标准的电气图形符号来表示实际电器件和设备的互连关系的电路图, 称为电气原理图。图 1-3(a)和(b)所示分别为手电筒照明电路和家用洗衣机中的电动机电路的电气原理图。

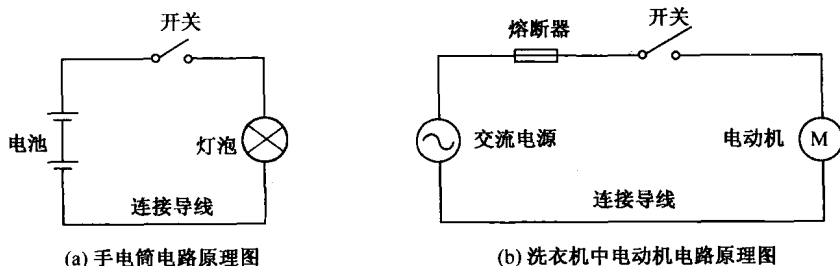


图 1-3 电气原理图举例

1.1.2 电路模型及其意义

为了便于理论研究, 揭示电路的内在规律, 根据实际电气器件和设备的基本物理特性进行理想化和简单化处理, 从而建立它们的物理模型或数学模型。这些基本的物理模型称为理想化的电路元件, 简称电路元件。由这些电路元件组成的理想化电路模型, 简称电路。例如, 实际的灯泡和电炉的主要物理特性都是消耗电能, 可以定义一种理想电阻元件来反映这类器件消耗电能的特性。图 1-1 的手电筒照明电路, 可用图 1-4 所示的电路模型来近似, 图中 U_s 为理想直流电压源, 表示干电池; R 为理想的电阻元件, 表示灯泡; S 为理想开关, 表示实际开关; 线段为理想导线(无阻导体), 表示手电筒外壳。考虑到实际电池中有能量损耗, 图中增加了电阻元件 R_s 。注意, 这与电气原理图不同, 原理图只是用图形代替器件, 并不考虑器件的物理特性。

又如, 以上提到的洗衣机中的电动机, 其线圈绕组的电路模型可由一个电阻元件和电感元件的串联来模拟, 如图 1-5 所示。

在建立电路模型的过程中, 需考虑的因素是多方面的。例如, 实际线圈在一定条件下可以用理想电感元件来模拟; 但若同时要考虑到线圈的损耗, 就要用电感元件和电阻元件二者的串联来模拟; 而在高频情况下, 若还要考虑线圈每匝之间的电容效应, 这时一个实际线圈就可能要用电感、电阻和电容元件的共同组合来模拟。请读者自行画出这三种情况下的电路模型(见思考与练习 1.1-3)。

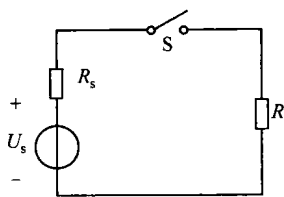


图 1-4 手电筒电路模型

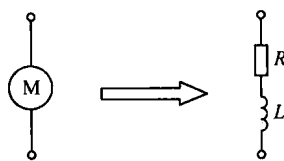


图 1-5 电动机模型

这里所讲的各种理想元件（后面将逐一介绍）在实际中是不存在的，实际电器件在不同的工作环境和要求下，可由若干理想电路元件的相应组合来模拟近似。关于实际器件如何用理想元件来模拟近似，以及电路模型如何建立等问题，涉及到多方面的综合知识，本课程不做深入讨论。为了加强对电路模型的理解，本章最后一节将介绍几个电路模型的应用实例。

值得一提的是，实际的电路器件工作时的电磁现象，是复杂交错在一起，并同时发生在整个电路中的。严格地讲，电子在导体中流动也是需要时间的。但在满足一定条件下，即当实际电路的尺寸远小于其工作信号的波长时，就可以假设：电磁过程分别集中在各自器件内部发生，并忽略电子的流动时间和器件的几何尺寸。因此可以认为，电流从元件的一端流入与从另一端流出发生在同一时刻。凡满足这种假设的元件称为集总参数元件，由此元件构成的电路称为集总参数电路。与集总参数电路对应的另一类电路称为分布参数电路。本书只讨论集总参数电路，书中所提到的电路元件和电路均指满足集总参数条件的理想模型，除非特殊加以说明。

本书对“电路”、“网络”和“系统”各词的含义不加严格区分，通常“网络”和“系统”还具有更广泛的意义，这在后续的课程中将会逐步地理解。

电路理论包括两个方面的内容：电路分析和电路综合（设计）。本书只涉及前者，其任务是针对确定的电路（模型），探讨电路的基本定律、基本定理和基本的分析方法，同时介绍电路理论在工程实际领域的应用。

思考与练习

- 1.1-1 试列举能量转换和信号处理的实际应用电路。
- 1.1-2 为什么要建立电路模型？本书所说的“电路”指的是什么？
- 1.1-3 试画出实际线圈的电路模型。

1.2 电路的基本物理量

电路理论中所涉及到的基本物理量有六种：电荷、磁通（磁通链）、电流、电压、能量和电功率。在电路分析中，更多关注的基本物理量是电路中的电流、电压和电功率。各量的符号和基本单位（SI 单位制）见表 1-1。习惯上当各物理量随时间变化时，用小写字母表示。实际应用中还涉及到对基本单位大小的换算。应用表 1-2 中的单位词头，可构成 SI 单位制的十进制数倍数或分数换算关系，其中词头从兆至尧的符号用大写。

表 1-1 基本物理量和单位

物 理 量	基 本 单 位
电荷 q	库仑 C
磁通 (链) ϕ (ψ)	韦伯 Wb
电流 i	安培 A
电压 u	伏特 V
能量 w	焦耳 J
功率 p	瓦特 W

表 1-2 国际单位制词头及换算关系

词 头	换 算 率	词 头	换 算 率	词 头	换 算 率
幺_(y)	10^{-24}	毫_(m)	10^{-3}	吉_(G)	10^9
仄_(z)	10^{-21}	厘_(c)	10^{-2}	太_(T)	10^{12}
阿_(a)	10^{-18}	分_(d)	10^{-1}	拍_(P)	10^{15}
飞_(f)	10^{-15}	十_(da)	10^1	艾_(E)	10^{18}
皮_(p)	10^{-12}	百_(h)	10^2	泽_(Z)	10^{21}
纳_(n)	10^{-9}	千_(k)	10^3	尧_(Y)	10^{24}
微_(μ)	10^{-6}	兆_(M)	10^6	—	—

1.2.1 电流及参考方向

单位时间内通过导体横截面的电荷量 q 定义为电流 $i^{①}$ ，数学上可描述为

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

当电流的大小和方向不随时间变化时，称为直流（恒定）电流，习惯上用大写字母 I 表示；若电荷的单位为库仑（C），时间的单位为秒（s），则电流的单位为安培（A）。由表 1-2 可得如下换算关系

$$1 \text{ kA (千安)} = 10^3 \text{ A}, 1 \text{ mA (毫安)} = 10^{-3} \text{ A}$$

实际中根据不同的应用场合采用不同的单位来度量，如在微电子系统中较多地采用毫安、微安（ μA ），而在电力系统中常采用安或千安。

根据物理学上的规定：正电荷移动的方向为电流的实际方向。在电路分析中，往往在电路求解之前并不知道元件中电流的实际方向。对直流而言，电路中任意元件的电流的实际方向有两种可能（除电流为零外），如图 1-6 所示，或者从 A 端流向 B 端（图(a)），或者从 B 端流向 A 端（图(b)）。为了便于电路方程的描述和计算，可预先任意规定某一个方向为假设的实际方向，称为电流的参考方向，并用箭头标注在电路图中。在假设了参考方向的前提下，经计算所得的电流若大于零（正值），则可断定电流的实际方向与其参考方向相同；反之，电流小于零（负值），实际方向与参考方向相反。因而，根据电流的参考方向和计算出的电流值的正与负，就可确定电流的实际方向。不难得到两种参考方向电流的关系为： $i_{AB} = -i_{BA}$ 。对于方向随时间变化的交变电流而言，引入了参考方向的概念，便可方便地表示出不同时刻电流的实际方向（见思考与练习 1.2-3）。

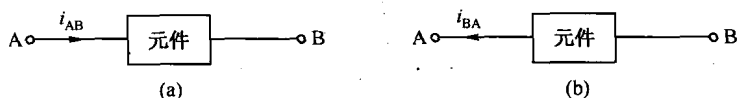


图 1-6 两种电流参考方向

1.2.2 电压及参考极性

将单位正电荷由 a 点移至 b 点电场力所做的功或能量 w ，称为 a、b 两点间的电压 u ，

① 为简单，本书中令 $q(t)=q$ ， $i(t)=i$ 等。

可描述为

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

若设无穷远点为参考点，将单位正电荷分别从 a 点和 b 点移至参考点，电场力所做的功分别称为 a 点电位（记为 u_a ）和 b 点电位（记为 u_b ），a、b 两点之间的电压（记为 u_{ab} ）等于 a、b 两点的电位差，即

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1-3)$$

当电压的大小和方向不随时间变化时，称为直流（恒定）电压，通常用大写字母 U 表示。若功的单位为焦耳（J），电荷的单位为库仑（C），则电压的单位为伏特（V）。在工程上不同的应用场合，采用不同的电压单位来度量。在 SI 单位制中，各电压单位之间的换算关系可参考表 1-2。

电压的实际极性定义为从高电位端（正端“+”）指向低电位端（负端“-”）。如同电流一样，通常在电路分析前并不知道各元件两端电压的实际极性，因而也必须引入参考极性（也可称为参考方向）的概念。对直流而言，电路中任意元件两端的电压极性只有两种可能（零电压除外），或者 A 端为正（+）、B 端为负（-），当用箭头表示时，从 A 端指向 B 端，如图 1-7(a)所示；或者 B 端为正（+）、A 端为负（-），如图 1-7(b)所示。

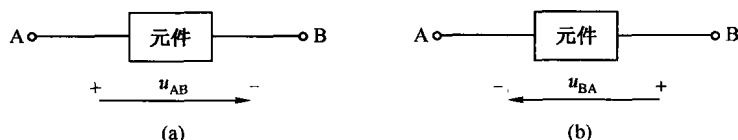


图 1-7 两种电压参考极性

采用与电流参考方向类似的处理方法，先任选某一方向为假设的实际电压方向，称为电压参考极性，并用“+”和“-”符号（或箭头）标注在电路元件两端。在此参考极性的假设下，经电路分析计算后所得的电压若大于零，说明参考极性与实际极性相同；若小于零，说明参考极性与实际极性相反。因此，有了电压参考极性及电压值的正、负号，就可确定该元件两端电压的实际极性，并有 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。在随时间变化的交变电压情况下，有了电压参考极性的概念就可确定实际电压随时间变化的规律。

对同一个元件，当其电流的参考方向与电压的参考极性（方向）相同时，即电流从电压“+”端流入，“-”端流出，称为电流和电压参考方向相关联。反之，称为非关联的参考方向。

1.2.3 电功率

物理上定义，单位时间所做的功称为功率 p ，数学上的描述为

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

当时间的单位为秒（s），功的单位为焦耳（J）时，功率的单位为瓦特（W）。

设元件中的电流和电压参考方向相关联，如图 1-8(a)所示，应用式（1-1）和式（1-2），可将式（1-4）改写为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-5)$$

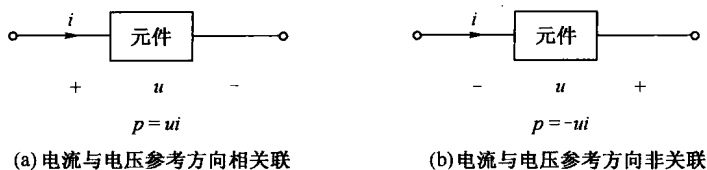


图 1-8 不同参考方向对功率计算的影响

上式表明，电路元件所吸收的电功率等于元件中的电压和电流的乘积，当电压和电流的单位分别取伏特（V）和安培（A）时，功率的单位为瓦特（W）。电功率的各单位换算可参考表 1-2。

在电流和电压参考方向相关联的条件下，可得如下判断：当 p 大于零时，表明该元件是吸收（消耗）功率；当 p 小于零时，表明该元件是发出功率（或吸收负功率）。若电流和电压参考方向非关联时，如图 1-8(b)所示，则利用式（1-5）计算功率时要加负号： $p = -ui$ 。

对整个电路而言，任一时刻电路中各元件吸收的电功率总和应等于发出的电功率总和，或总功率的代数和必为零。即必须满足能量守恒定律。

例 1-1 各元件电流和电压参考方向如图 1-9 所示。已知 $U_1 = 3\text{ V}$ ， $U_2 = 5\text{ V}$ ， $U_3 = U_4 = -2\text{ V}$ ， $I_1 = -I_2 = -2\text{ A}$ ， $I_3 = 1\text{ A}$ ， $I_4 = 3\text{ A}$ 。试求各元件的功率，并指出是吸收功率还是发出功率，整个电路的总功率是否满足能量守恒定律？

解 根据各元件的参考方向及式（1-5），可得各元件的功率为

$$\text{元件 1: } P_1 = U_1 I_1 = 3 \times (-2) = -6\text{ W} \quad (\text{发出功率})$$

$$\text{元件 2: } P_2 = U_2 I_2 = 5 \times 2 = 10\text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

$$\text{元件 3: } P_3 = -U_3 I_3 = -(-2) \times (1) = 2\text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

$$\text{元件 4: } P_4 = U_4 I_4 = (-2) \times 3 = -6\text{ W} \quad (\text{发出功率})$$

$$\text{电路的总功率: } P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 0 \quad (\text{能量守恒})$$

根据功率与能量的关系， $t_0 \sim t$ 时间元件所吸收的电能为

$$w(t) = \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau \quad (1-6)$$

在电力系统中，电能单位常用千瓦小时（kW·h），1 千瓦小时又称为 1 度电。

思考与练习

1.2-1 设电流参考方向如图 1-6(a)所示，已知电流 $i_{AB} = -2\text{ A}$ ，试判断其实际方向。

1.2-2 取不同的参考方向将会对实际方向有影响吗？

1.2-3 电流参考方向如图 1-6(b)所示，已知电流为 $i_{BA}(t) = 2\cos 100\pi t\text{ A}$ 。求 $t = 7.5\text{ ms}$ 时的电流值，并判断此时电流的实际方向。

1.2-4 假设取图 1-7(a)所示的电压参考极性，并已知 $u_{AB} = 5\text{ V}$ ，试判断实际电压极性。

1.2-5 试画出与图 1-7(b)所示电压相关联的电流参考方向。

1.2-6 确定图 1-10 所示各电路中的功率，并指出是发出功率还是吸收功率。

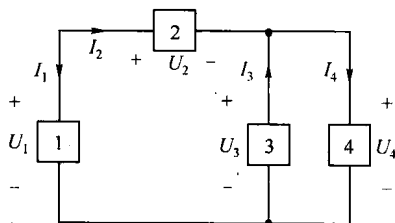


图 1-9 例 1-1 图