



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

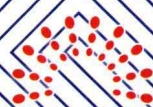
电工电子 (第2版)

黄元峰 刘晓静 高玉良 主编
李继林 徐元中 陈英芝 副主编

Electronics in Electrical
Engineering (2nd Edition)



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列



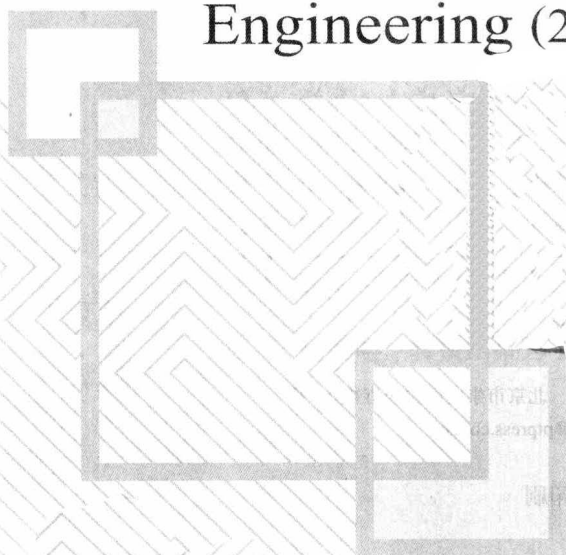
工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

黄元峰 刘晓静 高玉良 主编
李继林 徐元中 陈英芝 副主编

电工电子 (第2版)

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Electronics in Electrical
Engineering (2nd Edition)



人民邮电出版社

北京



高校系列

图书在版编目(CIP)数据

电工电子 / 黄元峰, 刘晓静, 高玉良主编. -- 2版
— 北京: 人民邮电出版社, 2011. 9
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-25630-0

I. ①电… II. ①黄… ②刘… ③高… III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第170787号

内 容 提 要

本书是根据教育部电工学课程组颁布的高等院校“电工技术”、“电子技术”课程教学的基本要求, 以及面向21世纪教学内容和课程体系改革的要求而编写的。

本书介绍电工电子学中的基本概念、基本定律、基本定理和基本分析方法, 注重加强基础理论的系统性、技术发展的先进性、理论与实践结合的实用性。

本书共分为12章, 内容包括直流电路、交流电路、暂态电路、三相电路、磁路、二极管及其应用、三极管及放大电路、集成运算放大器、组合逻辑电路、时序逻辑电路、存储器、数模和模数转换等。各章均配有与基本内容密切相关的例题、思考题与练习。

本书可作为高等学校非电类各专业“电工电子”课程教材, 也可供其他相关专业人员选用和参考。

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

电工电子(第2版)

-
- ◆ 主 编 黄元峰 刘晓静 高玉良
副 主 编 李继林 徐元中 陈英芝
责任编辑 武恩玉
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 21.25 2011年9月第2版
字数: 556千字 2011年9月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-25630-0

定价: 38.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

电工电子是高等院校计算机专业和其他非电类工科专业一门重要的技术基础课。通过本书的学习,旨在让学生掌握电工技术和电子技术方面的基础理论、基本分析方法和基本操作技能,了解电工电子技术发展的前沿状况,为今后进一步学习和从事相关技术和科研工作打下坚实的理论基础和实践基础,并使具有将电工技术、电子技术应用于所学专业和发展所学专业的能力。

本书是在第1版的基础上修订而成的,初版书一经出版,受到了广大读者的欢迎和好评,并已被多所院校选为指定教材。根据第1版使用的反馈意见,我们对全书12章的内容作了进一步充实、调整和较大幅度的改动。

本书编者在编写过程中着重针对非电专业该课程教学内容多、教学学时少的问题,对教材内容进行精心设计和安排,在内容选择上注重将知识的系统性、先进性、实用性相结合,在编写和编排上注重内容精练、表述简捷、难易适度、由浅入深,便于自学以培养学生自主获取知识的能力和分析问题、解决问题的能力。本书在每一节后都附有一定数量的思考与练习题,每一章后都附有大量的习题。

本书的配套书是《电工电子疑难指导与习题全解》(黄元峰、刘晓静、高玉良主编,人民邮电出版社出版)。该书给出了各章的重点、难点内容,以及基本的教学要求,同时还给出了典型例题的解题方法以及本书的习题全解,最后每章还给出了自测题,方便学生检测对所学知识的掌握程度。

本书由武汉工程大学、湖北工业大学和长江大学三所院校的教学一线教师共同编写,其中第1章、第2章由刘晓静编写,第3章、第4章由徐元中编写,第5章由林双喜编写,第6章由陈英芝编写,第7章、第8章由高玉良编写,第9章、第10章由李继林编写,第11章、第12章由黄元峰编写。

全书由长江大学罗炎林教授审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此向罗炎林教授表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2011年6月于武汉

目 录

第1章 电路的基本定律与基本分析方法1	2.2 正弦电量的相量表示法..... 36
1.1 电路的组成及基本物理量.....1	2.2.1 复数及四则运算..... 36
1.1.1 电路的基本物理量及其参考方向.....1	2.2.2 正弦电量的相量表示法..... 39
1.1.2 电路模型.....4	思考与练习..... 40
思考与练习.....4	2.3 单一参数的正弦交流电路..... 41
1.2 电路的基本元件.....4	2.3.1 电阻元件的正弦交流电路..... 41
1.2.1 电阻、电容和电感元件.....5	2.3.2 电感元件的正弦交流电路..... 43
1.2.2 电压源.....7	2.3.3 电容元件的正弦交流电路..... 45
1.2.3 电流源.....8	思考与练习..... 47
思考与练习.....9	2.4 RLC 串联、并联交流电路..... 48
1.3 电路的基本定律.....9	2.4.1 基尔霍夫定律的相量形式..... 48
1.3.1 欧姆定律.....9	2.4.2 RLC 串联交流电路..... 48
1.3.2 基尔霍夫定律.....10	2.4.3 RLC 并联交流电路..... 51
思考与练习.....12	2.5 阻抗的串联与并联..... 53
1.4 基本元件的串联与并联.....12	2.5.1 阻抗的串联..... 53
1.4.1 电阻、电感、电容的串联、并联.....12	2.5.2 阻抗的并联..... 53
1.4.2 电压源、电流源的串联、并联.....15	思考与练习..... 55
思考与练习.....16	2.6 电路中的谐振..... 55
1.5 电路的3种基本工作状态.....16	2.6.1 串联谐振..... 55
1.5.1 有载工作状态.....16	2.6.2 并联谐振..... 58
1.5.2 开路状态.....17	思考与练习..... 59
1.5.3 短路状态.....17	2.7 功率因数的提高..... 59
1.5.4 电位的计算.....17	2.7.1 提高功率因数的意义..... 59
思考与练习.....19	2.7.2 提高功率因数的方法..... 60
1.6 电路的基本分析方法.....19	思考与练习..... 62
1.6.1 支路电流法.....19	2.8 正弦交流电路的频率特性..... 62
1.6.2 结点电压法.....20	2.8.1 低通滤波电路..... 62
1.6.3 叠加原理.....22	2.8.2 高通滤波电路..... 63
1.6.4 电压源与电流源的等效转换.....24	2.8.3 带通滤波电路..... 64
1.6.5 等效电源定理.....25	思考与练习..... 65
1.6.6 非线性电阻电路的分析.....27	习题..... 65
1.6.7 受控源.....28	第3章 线性电路的暂态分析 68
思考与练习.....29	3.1 暂态与换路定则..... 68
习题.....30	3.1.1 暂态分析的基本概念..... 68
第2章 正弦交流电路33	3.1.2 换路定则..... 69
2.1 正弦交流电的基本概念.....33	思考与练习..... 72
2.1.1 正弦交流电的概念.....33	3.2 一阶线性电路的响应..... 72
2.1.2 正弦电量的三要素.....33	3.2.1 一阶线性电路的零输入响应..... 73
思考与练习.....36	3.2.2 一阶线性电路的零状态响应..... 76

3.2.3 一阶电路的全响应·····	79	5.2.1 变压器基本结构·····	111
思考与练习·····	82	5.2.2 变压器工作原理·····	112
3.3 一阶线性电路暂态分析的		5.2.3 变压器基本应用·····	114
三要素法·····	83	思考与练习·····	117
思考与练习·····	84	5.3 电动机·····	117
3.4 微分电路与积分电路·····	85	5.3.1 三相异步电动机·····	117
3.4.1 矩形脉冲信号·····	85	5.3.2 单相异步电动机·····	123
3.4.2 微分电路·····	85	思考与练习·····	124
3.4.3 积分电路·····	86	5.4 继电接触控制系统·····	125
思考与练习·····	88	5.4.1 基本控制器件·····	125
习题·····	88	5.4.2 基本控制电路·····	128
第4章 三相电路 ·····	91	思考与练习·····	131
4.1 三相电源·····	91	习题·····	131
4.1.1 三相电压的产生·····	91	第6章 半导体二极管与直流稳压电源 ·····	133
4.1.2 三相对称电源的正序星形联结·····	92	6.1 半导体基础知识·····	133
思考与练习·····	93	6.1.1 本征半导体·····	133
4.2 三相对称负载电路·····	93	6.1.2 杂质半导体·····	134
4.2.1 负载作星形联结的三相四线制		6.1.3 PN结·····	135
电路(Y_0-Y_0)·····	93	思考与练习·····	136
4.2.2 负载作三角形联结的三相三线制		6.2 半导体二极管·····	137
电路($Y-\Delta$)·····	96	6.2.1 半导体二极管的结构与特性·····	137
思考与练习·····	98	6.2.2 二极管的主要参数·····	138
4.3 三相不对称负载电路·····	99	思考与练习·····	138
4.3.1 三相不对称负载作三角形联结的		6.3 二极管应用电路·····	138
三相电路·····	99	6.3.1 开关电路·····	138
4.3.2 三相不对称负载作星形无中线		6.3.2 限幅电路·····	139
联结的三相电路·····	99	6.3.3 整流电路·····	140
4.3.3 三相不对称负载作星形有中线		思考与练习·····	141
联结的三相电路·····	100	6.4 特殊二极管·····	141
思考与练习·····	101	6.4.1 稳压二极管·····	141
4.4 安全用电·····	101	6.4.2 变容二极管·····	142
思考与练习·····	103	6.4.3 光电二极管·····	143
习题·····	103	6.4.4 发光二极管·····	143
第5章 磁路及基本应用 ·····	105	6.5 直流稳压电源·····	143
5.1 磁路的基本概念·····	105	6.5.1 滤波电路·····	144
5.1.1 磁场的基本物理量·····	105	6.5.2 稳压电路·····	145
5.1.2 磁性材料的主要性能·····	106	思考与练习·····	147
5.1.3 磁路基本定律·····	107	习题·····	147
5.1.4 交流磁路·····	109	第7章 半导体三极管与交流放大电路 ·····	150
思考与练习·····	111	7.1 半导体三极管·····	150
5.2 变压器·····	111	7.1.1 三极管的结构与电流放大原理·····	150

7.1.2 三极管的特性曲线	152	8.1.2 集成运放的主要参数与分类	190
7.1.3 三极管的微变等效电路	153	8.1.3 理想运放及特点	191
7.1.4 三极管的主要参数	154	思考与练习	192
思考与练习	155	8.2 放大电路中的负反馈	192
7.2 共射放大电路	155	8.2.1 反馈的基本概念和分类	193
7.2.1 放大电路的基本概念	155	8.2.2 负反馈对放大电路性能的影响	194
7.2.2 共发射极放大电路的组成及 工作原理	157	思考与练习	197
思考与练习	158	8.3 集成运放在信号运算方面的应用	197
7.3 放大电路的基本分析法	158	8.3.1 比例运算电路	197
7.3.1 放大电路的静态分析	159	8.3.2 加法运算电路	198
7.3.2 放大电路的动态分析	159	8.3.3 减法运算电路	199
思考与练习	164	8.3.4 积分和微分运算电路	200
7.4 静态工作点的稳定	165	8.3.5 乘法和除法运算电路	202
思考与练习	167	思考与练习	202
7.5 共集放大电路	167	8.4 集成运放在信号处理电路中的 应用	202
思考与练习	169	8.4.1 有源滤波器	202
7.6 功率放大电路	169	8.4.2 电压比较器	206
7.6.1 功率放大电路概述	169	思考与练习	209
7.6.2 互补对称放大电路	170	8.5 集成运放在信号产生电路中的 应用	209
7.6.3 集成功率放大器	173	8.5.1 产生正弦振荡的条件	209
思考与练习	173	8.5.2 RC 正弦振荡电路	210
7.7 多级放大电路	173	8.5.3 矩形波产生电路	212
7.7.1 多级放大电路的耦合	173	8.5.4 三角波产生电路	213
7.7.2 多级放大电路的动态分析	175	思考与练习	214
思考与练习	176	习题	214
7.8 差动放大电路	176	第9章 门电路和组合逻辑电路	217
7.8.1 差动放大电路的工作原理	176	9.1 基本门电路及其组合	217
7.8.2 典型差动放大电路	177	9.1.1 逻辑状态的表示	218
7.8.3 恒流源式的差动放大电路	179	9.1.2 基本逻辑门电路	218
思考与练习	180	9.1.3 基本逻辑门电路的组合	220
7.9 场效晶体管及其放大电路	180	思考与练习	222
7.9.1 绝缘栅场效晶体管	181	9.2 TTL 门电路	222
7.9.2 场效晶体管的主要参数及微变等 效电路	182	9.2.1 TTL 与非门电路	222
7.9.3 场效晶体管放大电路	183	9.2.2 三态输出与非门电路	223
思考与练习	186	9.2.3 集电极开路与非门电路	224
习题	186	思考与练习	225
第8章 集成运算放大电路及其应用	189	9.3 CMOS 门电路	225
8.1 集成运算放大电路	189	9.3.1 CMOS 非门电路	226
8.1.1 集成运放的组成	189	9.3.2 CMOS 与非门电路	226

9.3.3 CMOS 或非门电路	226	习题	274
9.3.4 CMOS 传输门电路*	227	第 11 章 存储器 and 可编程逻辑器件	280
9.4 逻辑代数	227	11.1 只读存储器	280
9.4.1 逻辑代数的基本定律	227	11.1.1 ROM 的结构	280
9.4.2 逻辑函数的表示方法	228	11.1.2 ROM 的工作原理	281
9.4.3 逻辑函数的化简	230	11.1.3 ROM 的分类	282
思考与练习	233	11.1.4 ROM 的应用	283
9.5 组合逻辑电路的分析和设计	233	思考与练习	285
9.5.1 组合逻辑电路的分析	233	11.2 随机存储器	285
9.5.2 组合逻辑电路的设计	234	11.2.1 RAM 的结构	285
思考与练习	236	11.2.2 RAM 容量的扩展	287
9.6 常用组合逻辑功能器件	236	思考与练习	288
9.6.1 加法器	237	11.3 可编程逻辑器件	288
9.6.2 编码器	239	11.3.1 PLD 的结构、内部电路表示方法	288
9.6.3 译码器和数字显示电路	242	11.3.2 PLD 的分类及特点	289
9.6.4 数据选择器和数据分配器	246	11.3.3 PROM 及其应用	290
思考与练习	249	11.3.4 PLA 及其应用	291
习题	249	11.3.5 PAL 及其应用	292
第 10 章 触发器和时序逻辑电路	252	11.3.6 GAL 及其应用	293
10.1 双稳态触发器	252	思考与练习	295
10.1.1 RS 触发器	252	习题	295
10.1.2 JK 触发器	254	第 12 章 数/模和模/数转换技术	297
10.1.3 D 触发器	257	12.1 数/模转换器	297
10.1.4 T 触发器	258	12.1.1 倒 T 型电阻网络数/模转换器	298
思考与练习	259	12.1.2 数/模转换器的主要技术指标	299
10.2 寄存器	259	12.1.3 集成数/模转换器及其应用	300
10.2.1 数码寄存器	260	思考与练习	303
10.2.2 移位寄存器	260	12.2 模/数转换器	303
思考与练习	262	12.2.1 模/数转换的一般步骤及采样定理	303
10.3 计数器	262	12.2.2 逐次逼近型模/数转换器	304
10.3.1 二进制计数器	262	12.2.3 模/数转换器的主要技术指标	306
10.3.2 十进制计数	265	12.2.4 集成模/数转换器及其应用	306
10.3.3 任意进制计数器	268	思考与练习	308
思考与练习	269	习题	308
10.4 555 定时器及其应用	269	参考答案	310
10.4.1 555 定时器	270	参考文献	330
10.4.2 555 定时器的应用	271		
思考与练习	274		

第 1 章 电路的基本定律与基本分析方法

本章首先讨论电路中的物理量及其参考方向、基尔霍夫定律、电路的 3 种基本工作状态以及电路基本器件，这些内容是分析与计算电路的基础。其次讨论电路的基本原理和分析方法。通过上述内容的学习，应能根据电路的结构特点，运用这些定理简化电路，分析与计算电路中的有关物理量。

1.1 电路的组成及基本物理量

电路，简单地说就是电流流通的路径。它是由某些电气设备、元件按照一定方式用导线联结而成的。电路的作用是在电力系统中实现能量的输送与转换，或者在电子系统中实现信号的传递和处理。组成电路的元器件及其联结方式虽然多种多样，但都包含电源（信号源）、负载和中间环节这 3 个基本组成部分。

电源是将其他形式能量转换为电能的装置，如蓄电池、发电机和信号源。它们可将化学能、机械能、水能、原子能、声能等能量转换为电能。

负载是消耗电能的设备，它将电能转换成非电形态的能量并消耗掉，如电动机、照明灯、电炉等。它们可将电能转换成机械能、光能和热能。

中间环节包括变压器、联结导线、控制开关、保护装置等，主要起传输、控制、分配与保护作用。电路在电力系统和电子系统中的典型应用如图 1-1-1 所示。

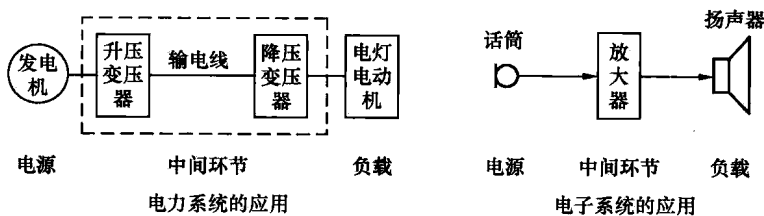


图 1-1-1

1.1.1 电路的基本物理量及其参考方向

电路中涉及的物理量主要有电流、电压、电动势、电位和功率。在进行电路的分析和计算时，需要知道电压和电流的方向，关于电压和电流的方向，有正方向和参考方向之分，要加以区别。

1. 电流

电流 i 是由带电粒子有规则的定向运动而形成的，其大小等于单位时间 dt 内通过导体横截面的电荷量 dq ，即 $i = \frac{dq}{dt}$ 。随时间的变化而变化的电流是交流电，用小写字母 i 表示；不随时间的变化而变化的电流是直流电，用大写字母 I 表示。

在国际单位制中, 电流这个物理量的单位是安培(库仑/秒), 简称安, 用大写字母 A 表示。另外还有毫安(mA)、微安(μA), 它们的换算关系为

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

既然电流是由带电粒子有规则的定向运动而形成的, 那么电流就是一个既有大小、又有方向的物理量。

习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向为电流的正方向。

因为电流的实际正方向可能是未知的, 也可能是随时间变动的, 为了便于分析和计算, 人为地引入了电流参考方向的概念。所谓参考方向就是人们在电路图中任意选定的各电量正方向, 并用箭头表示。图 1-1-2 所示为某电路的一部分, 其中长方框表示一个二端元件, 流过这个元件的电流为 i , 其实际正方向可以由 A 到 B, 也可以是由 B 到 A。在该图中用实线箭头表示电流参考方向, 它不一定是电流的实际正方向。如果电流 i 的实际正方向是由 A 到 B, 如图 1-1-2 (a) 中虚线箭头所示, 它与参考方向一致, 则电流为正值, 即 $i > 0$; 在图 1-1-2 (b) 中, 电流的参考方向由 B 到 A (见实线箭头), 如果电流的实际方向是由 A 到 B (见虚线箭头), 两者不一致, 故电流为负值, 即 $i < 0$ 。这样, 在指定的电流参考方向下, 电流值的正和负就可以反映出电流的实际正方向。

今后在分析与计算电路时, 都要在电路图中标出有关支路电流的参考方向。这样, 最后计算出来的电流正负值才有意义。

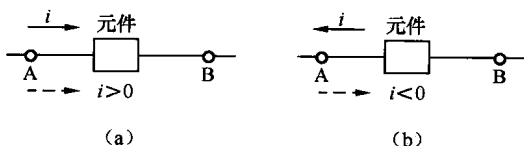


图 1-1-2 电流的参考方向

2. 电压与电动势

电压这个物理量, 是用来表示电场力移动电荷做功的本领。a、b 两点之间的电压 U_{ab} , 在数值上就等于电场力将单位正电荷 q 从点 a 移到点 b 所做的功 W_{ab} , 即

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q}$$

电动势是用来表示电源力移动单位正电荷做功本领的物理量, 电源的电动势 E_{ba} , 在数值上等于电源力把单位正电荷 q 从负极 b (低电位) 经由电源内部移到电源的正极 a (高电位) 所做的功 W_{ba} , 即

$$E_{ba} = \frac{W_{ba}}{q}$$

电源的符号如图 1-1-3 (a) 所示。

由电压 U_{ab} 和电动势 E_{ba} 的表达式可知

$$U_{ab} = -E_{ba}$$

电压也称为两点间的电位差, 即

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

在国际单位制中, 电压和电动势的单位都是伏特(焦耳/库仑), 简称伏, 用大写字母 V 表示。另外还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV), 它们的换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} = 10^6\text{mV} = 10^9\mu\text{V}$$

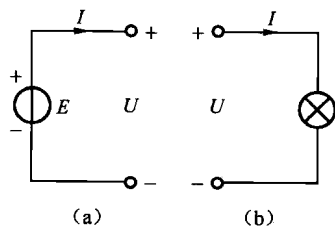


图 1-1-3 关联参考方向

电压的正方向规定为由高电位（“+”极性）端指向低电位（“-”极性）端，即为电位降低的方向；电源电动势的正方向规定为在电源内部由低电位（“-”极性）端指向高电位（“+”极性）端，即为电位升高的方向。与电流一样，在较为复杂的电路中，往往无法事先确定电压或电动势的实际正方向（或者极性）。因此，在电路图上所标出的也都是电动势和电压的参考方向。若参考方向与实际正方向一致，则其值为正；若参考方向与实际正方向相反，则其值为负。这样，在指定的电压参考方向下，电压值的正和负就可以反映出电压的实际正方向。

原则上各电量的参考方向是可以任意选择的，但是在分析某一电路元件中的电压与电流的关系时，往往需要将它们联系起来选择，即当电压与电流的参考方向选择都是从同一点出发并到同一点终止时，这样选择的参考方向就称为**关联表达**。今后在单独分析电源或负载的电压与电流关系时，选用图 1-1-3 (a)、(b) 所示的关联表达，并且只需选择一个电量（电压或是电流）的参考方向，使电路图显得整洁、清晰。

3. 电位

在分析和计算电路时，特别是在电子技术中，常常将电路中的某一点选作参考点，并规定其电位为零，即 $V_0 = 0V$ ，于是电路中其他任何一点与参考点之间的电压便是该点的电位，即 $V_x = U_{x0} - V_0$ 。在同一电路中，如果选择的参考点不同，各点的电位值会随着改变，但是任意两点之间的电压值是不变的。所以各点的电位高低是相对的，而两点间的电压值是绝对的。

原则上，参考点可以任意选择，但为了统一起见，电力系统中常选大地为参考点；电子系统中常选元件汇集的公共端或公共线作为参考点，也称为“地”。在电路图中用“ \perp ”表示参考点。

【例 1-1】求图 1-1-4 所示电路中开关 S 闭合和断开两种情况

下 a、b、c 各点的电位。

【解】当开关 S 闭合时， $V_a = 6V$ ， $V_b = -3V$ ， $V_c = 0V$ 。

当开关 S 断开时，点 a 的电位不变， $V_a = 6V$ 。

因为电路中无电流流过电阻 R， $V_b = V_a = 6V$ 。

点 c 的电位比点 b 电位高 3V， $V_c = 6 + 3 = 9V$ 。

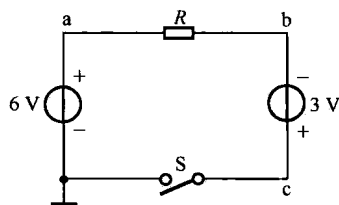


图 1-1-4 例 1-1 图

4. 功率

在电路的分析和计算中，功率的计算是十分重要的。因为电路在工作状态下总伴有电能与其他形式能量的相互交换；同时任一电气设备本身都有功率的限制，在使用时要注意其功率值是否超过额定值，超载使用会使设备或部件损坏。

功率是能量转换的速率，电路中任何元件的功率 P ，都可用元件的端电压 U 和其中的电流 I 相乘求得。

当 U 与 I 的参考方向关联时，则 $P = UI$ (1-1-1)

当 U 与 I 的参考方向非关联时，则 $P = -UI$ (1-1-2)

功率的正负表示了元件在电路中的作用不同。若功率为正值，则表明该元件在电路中是负载，将电能转换成了其他的能量，电流流过该元件时是电场力做功；若功率是负值，则表明该元件在电路中是电源，将其他形式的能量转换成电能，电流流过该元件时是电源力做功。

在图 1-1-5 中，已知某元件两端的电压 u 为 5V，点 A 电位高于点 B 电位，电流 i 的实际正方向为自点 A 到点 B，其值为 2A，在图 1-1-5 (a) 中 u 和 i 为关联表达， u 、 i 表示瞬时电压和电流，瞬时功率为 $p = (5 \times 2)W = 10W$

为正值，此元件吸收的功率为 10W。如果指定的 u 和 i 的参考方向为非关联，如图 1-1-5 (b) 所

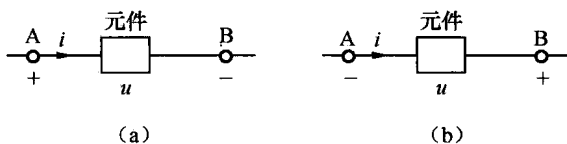


图 1-1-5 元件的功率

示, 则此时 $u = -5\text{V}$, $i = 2\text{A}$, 瞬时功率 $p = -ui = -(-5) \times 2\text{W} = 10\text{W}$, 所以此元件还是吸收了 10W 的功率, 与图 1-1-5 (a) 求得的结果一致。

在同一个电路中, 发出的功率和吸收的功率在数值上是相等的, 这就是电路的功率平衡。

在国际单位中, 功率的单位是瓦特 (焦耳/秒), 简称瓦, 用大写字母 W 表示, 还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW) 等单位。它们的换算关系为

$$1\text{kW} = 10^3\text{W} = 10^6\text{mW}$$

1.1.2 电路模型

生活中接触到的电路都是实际电路, 实际电路是由实际电路元件组成的。每一个实际电路元件中都包含了多种复杂的电磁关系, 给我们的分析和计算带来了一定的困难。因此, 我们引入了电路模型的概念。我们把仅含有一种主要电磁关系的电路元件称为理想电路元件。如理想电阻元件仅反映它的耗能物理现象, 而不考虑它建立磁场的物理过程; 理想的电感元件仅反映它建立磁场能的物理过程, 而不考虑它的耗能过程; 理想的电容元件仅考虑它建立电场能的过程, 而不考虑它的漏电过程。用理想电路元件及国家规定的标准电器元件符号所组成的电路图称为电路模型。今后我们都是要在电路模型上进行分析 and 计算。

理想电路元件符号如图 1-1-6 所示。

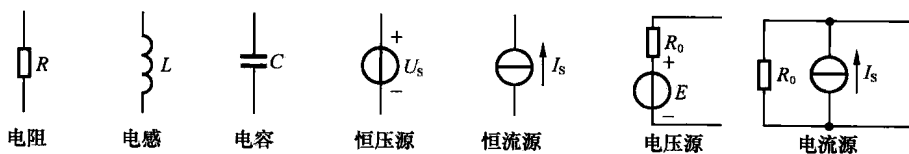


图 1-1-6 理想电路元件符号

思考与练习

1.1.1 求如图 1-1-7 所示的电路中开关 S 闭合和断开两种情况下 a 、 b 、 c 各点的电位。

1.1.2 一个电源的功率, 也可用其电动势 E 和电流 I 相乘求得。试说明采用此方法计算的电源功率的正负值的意义。

1.1.3 求如图 1-1-8 所示电路中通过恒压源的电流 I_1 、 I_2 及其功率, 并说明其是起电源作用还是起负载作用。

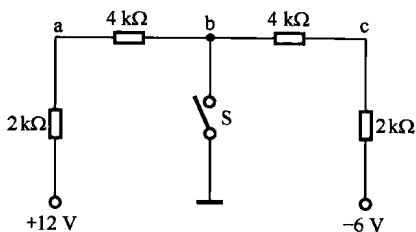


图 1-1-7 思考与练习 1.1.1 图

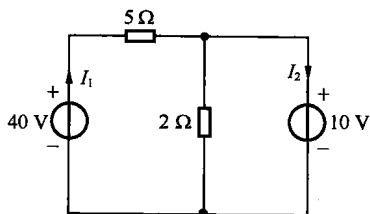


图 1-1-8 思考与练习 1.1.3 图

1.2 电路的基本元件

电路元件是电路中最基本的组成单元。电阻器、电容器、电感器都是组成电路模型的理想元

件。电阻、电容和电感这3个名词既代表了3种理想的电路元件，又是表征它们量值大小的参数。电源是任何电路中都不不可缺少的重要组成部分，它是电路中电能的来源。

1.2.1 电阻、电容和电感元件

1. 电阻元件

电阻器是表征电路中电能消耗的理想元件。电阻器简称电阻，用符号 R 表示。一个电阻有电流通过后，若只考虑它的热效应，忽略它的磁效应，即成为一个理想电阻元件。电阻元件的图形符号如图 1-2-1 所示。图 1-2-1 中， u 和 i 的参考方向关联表达，根据欧姆定律得出

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-2-1)$$

式 (1-2-1) 称为电阻元件 u 和 i 的约束方程，即电阻元件上的电压与通过的电流成线性关系，两者的比值是一个大于零的常数，称为这一部分电路的电阻，单位是欧姆 (Ω)。

由 $\int_0^T i^2 R dt = i^2 RT$ 可知：电阻元件把从电源吸收的电能全部转化为热能消耗掉，所以电阻是一个耗能元件，电阻消耗电能的过程是不可逆的能量转换过程。

在直流电路中，电阻的电压与电流的乘积即为电功率，单位是瓦 (W)，即

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

在 t 时间内消耗的电能为

$$W = Pt$$

W 的单位是焦[耳] (J)，工程上电能的计量单位为千瓦·小时 ($kW \cdot h$)，1 千瓦·小时称为 1 度电。度与焦的换算关系为

$$1kW \cdot h = 3.6 \times 10^6 J$$

2. 电容元件

电容器是用来表征电路中电场能储存这一物理性质的理想元件。电容器简称电容，用符号 C 表示。图 1-2-2 所示为一个电容器。当电路中有电容器存在时，电容器极板（由绝缘材料隔开的两个金属导体）上会聚集起等量异性电荷。电压 u 越高，聚集的电荷 q 就越多，产生的电场越强，储存的电场能就越多。 q 与 u 的比值称为电容。即

$$C = \frac{q}{u}$$

式中， q 的单位为库[仑] (C)； u 的单位为伏[特] (V)； C 称为电容量，单位为法[拉] (F)。由于法[拉]的单位太大，工程上多用微法 (μF) 或皮法 (pF)，它们的换算关系为

$$1F = 10^6 \mu F = 10^{12} pF$$

当极板上的电荷量 q 或电压 u 发生变化时，在电路中就要引起电流流过。其大小为

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

式 (1-2-2) 称为电容元件的 u 和 i 约束方程，它是在 u 和 i 的参考方向关联表达的情况下得出的，否则要加负号。

当电容器两端加恒定电压时，则由式 (1-2-2) 可知： $i = 0$ ，电容元件相当于开路。

将式 (1-2-2) 两边积分，便可得出电容元件上的电压与电路中电流之间的关系式，即

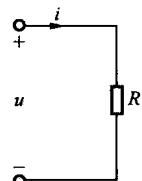


图 1-2-1 电阻元件

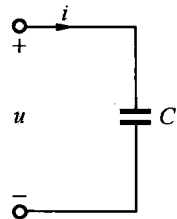


图 1-2-2 电容元件

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t idt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 idt + \frac{1}{C} \int_0^t idt = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t idt \quad (1-2-3)$$

式(1-2-3)中, u_0 是初始值, 即在 $t=0$ 时电容元件两端的电压值。
若 $u_0=0$ 或 $q_0=0$, 则

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t idt \quad (1-2-4)$$

如将式(1-2-4)两边乘上 u , 并积分之, 则得

$$\int_0^t u idt = \int_0^t C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-2-5)$$

式(1-2-5)表明, 理想电容元件是不消耗电能的, 仅仅把电源输出的电能转变成电场能并储存在两极板之间, 所以电容是一个储能元件。

由式(1-2-5)可知: 当电容元件两端的电压增加时, 电场能量增大, 在此过程中, 电容元件从电源取用能量(充电), 式(1-2-5)中的 $\frac{1}{2} C u^2$ 就是电容元件极板间的电场能量; 当电容元件两端的电压降低时, 电场能量减小, 即电容元件向电源放还能量(放电)。

实际的电容器除了有储能作用外, 也会消耗一部分电能(反映出电容的漏电), 因此实际的电容器元件可以被看成是理想电容元件和理想电阻元件的并联组合。

3. 电感元件

电感器是用来表征电路中磁场能储存这一物理性质的理想元件。电感器又称为线圈或电感线圈, 用符号 L 表示。当电路中有电感器(线圈)存在时, 电流通过线圈时会产生比较集中的磁场, 因而必须考虑磁场能储存的影响。

在图 1-2-3(a)中, 设线圈的匝数为 N , 电流 i 通过线圈而产生的磁通为 Φ , 两者的乘积($\varphi = N\Phi$)称为线圈的磁链, 它与电流的比值: $L = \frac{\varphi}{i}$ 称为电感器(线圈)的电感。式中, φ 和 Φ 的单位为韦[伯](Wb); i 的单位为安[培](A); L 的单位为亨[利](H)。

图 1-2-3(b)所示为理想电感元件。当线圈中的电流变化时, 磁通和磁链将随之变化, 就会在线圈中产生感应电动势。在规定的参考方向与磁场线的方向符合右手螺旋定律时有

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\varphi}{dt}$$

在图 1-2-3 中, 关联参考方向规定: 当 u 与 i 的参考方向一致, i 与 e 的参考方向都与磁场线的参考方向符合右手螺旋定律时, i 与 e 的参考方向也应该一致。在此规定下得到了电感中感应电动势的另一种计算公式, 即

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

所以

$$u = -e = L \frac{di}{dt} \quad (1-2-6)$$

式(1-2-6)称为电感元件 u 和 i 的约束方程。

当线圈中通过不随时间而变化的恒定电流时, 由式(1-2-6)可知, 其感应电动势为零, 电感

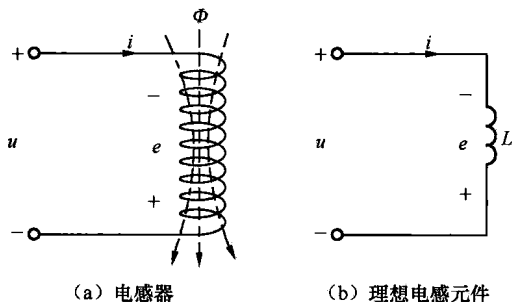


图 1-2-3 电感元件

元件可视为短路。

将式 (1-2-6) 两边积分, 便可得出电感元件的端电压与电流的关系式, 即

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u dt + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1-2-7)$$

式中, i_0 是初始值, 即在 $t=0$ 时电感元件中通过的电流值。

若 $i_0=0$, 则

$$i = \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1-2-8)$$

将式 (1-2-8) 两边乘上 L , 并积分之, 则得

$$\int_0^t u dt = \int_0^t L i dt = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1-2-9)$$

式 (1-2-9) 表明: 理想电感元件是不消耗电能的, 仅仅把电源输出的电能转变成磁场能并储存在线圈中, 所以电感是一个储能元件。

由式 (1-2-9) 可知: 当电感元件中的电流增大时, 磁场能量增大, 在此过程中电能转换为磁能, 即电感元件从电源取用能量 (充磁过程); 当电感元件中的电流减小时, 磁场能量转换为电能, 即电感元件向电源放还能量 (放磁过程)。

实际的电感元件除了有储能作用外, 也会消耗一部分电能 (反映组成线圈的导线电阻耗能大小), 因此实际的电感元件可以被看成是理想电感元件和理想电阻元件的串联组合。

【例 1-2】 如图 1-2-4 所示, 在指定的电压 u 和电流 i 参考方向下, 写出各元件 u 和 i 的约束方程 (元件的特征方程)。

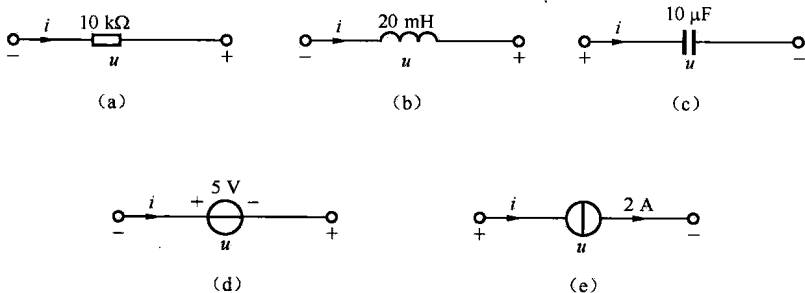


图 1-2-4 例 1-2 图

【解】 (a) $u = -10^4 i$; (b) $u = -L \frac{di}{dt} = -2 \times 10^{-2} \frac{di}{dt}$; (c) $i = C \frac{du}{dt} = 10^{-5} \frac{du}{dt}$; (d) $u = -5V$; (e) $i = 2A$ 。

1.2.2 电压源

由电动势 E 和电阻 R_0 串联组成的电源模型, 称为电压源。如图 1-2-5 中 a、b 左边部分所示。图中 U 为电压源对外输出的端电压, 当接上负载电阻 R_L 形成回路时, 电路中便有电流 I 流过, 则电源的端电压为

$$U = E - IR_0 \quad (1-2-10)$$

式 (1-2-10) 为电压源的外特性, 如图 (1-2-6) 所示。

当 $I=0$ (即电压源开路) 时, $U = U_0 = E$, (U_0 称为开路电压)。

当 $U=0$ (即电压源短路) 时, $I = I_s = \frac{E}{R_0}$ (I_s 称为短路电流)。

内阻 R_0 越大, 则直线越陡, R_0 内阻对端电压 U 的影响作用就越大。

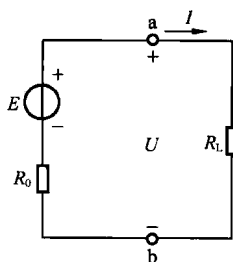


图 1-2-5 电压源电路

当 $R_0=0$ 时, 电压 U 恒等于电动势 E , 是一个定值, 而其中的电流 I 则是任意值, I 的大小完全由负载电阻 R_L 及电压 U 本身确定。这样的电压源称为理想电压源或恒压源。理想电压源电路如图 1-2-7 所示。

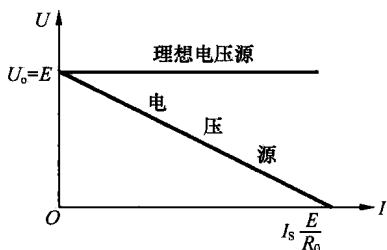


图 1-2-6 电压源和理想电压源的外特性曲线

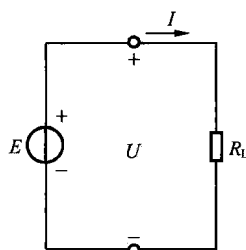


图 1-2-7 理想电压源电路

常见实际电源(如发电机、蓄电池等)的工作机理比较接近电压源, 其电路模型是 E 和 R_0 的串联组合。理想电压源实际上是不存在的。但是当电压源内阻 R_0 远小于负载电阻 R_L 时, 内阻上的压降 IR_0 将远小于 U , 则可认为 $U \approx E$, 基本上恒定, 这时可将此电压源看成是理想电压源。通常用的稳压电源可认为是一个理想电压源。

1.2.3 电流源

电源除用电动势 E 和内阻 R_0 串联的电路模型表示外, 还可以用另一种并联电路模型来表示。将式(1-2-10)两端除以 R_0 , 得

$$\frac{U}{R_0} = \frac{E}{R_0} - I = I_S - I$$

即

$$I_S = \frac{U}{R_0} + I \tag{1-2-11}$$

这样, 就可以用一个电流 $I_S = \frac{E}{R_0}$ 和一个内阻 R_0 并联的电路模型去表示一个电源, 此即电流源。如图 1-2-8 中 a、b 左边部分所示。图中 U 为电流源的端电压, 接上负载电阻 R_L 构成回路后, 其中将有电流 I 流过。

式(1-2-11)中 I_S 和 R_0 均为常数, U 和 I 的关系称为电流源的外特性, 外特性曲线如图 1-2-9 所示。当电流源开路时, $I=0$, $U=U_0=I_S R_0$ (U_0 称为开路电压)。

当其短路时, $U=0$, $I=I_S$ (I_S 称为短路电流)。

当内阻 R_0 越大, 则直线越陡, R_0 支路对 I_S 的影响作用就越小。

当 $R_0=\infty$ (相当于 R_0 支路断开) 时, 电流 I 将恒等于 I_S , 是一定值, 而其两端的电压 U 则是任意值, 端电压 U 的值完全由负载电阻 R_L 及电流 I_S 本身确定。这样的电源称为理想电流源或恒流源。理想电流源电路如图 1-2-10 所示。

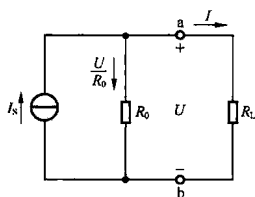


图 1-2-8 电流源电路

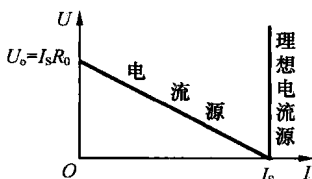


图 1-2-9 电流源和理想电流源的外特性曲线

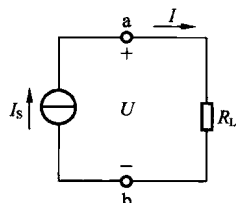


图 1-2-10 理想电流源电路

像光电池一类的器件，工作时的特性比较接近电流源，其电路模型是电流源与电阻的并联。

理想电流源是不存在的，但是在电源内阻 R_0 远大于负载电阻 R_L ，即 $R_0 \gg R_L$ 时， R_0 支路的分流作用很小，则可认为 $I \approx I_s$ ，这时可将此电流源看成是理想电流源。

思考与练习

1.2.1 在图 1-2-11 中，一个理想电压源和一个理想电流源相连，试讨论它们的工作状态。

1.2.2 在图 1-2-12 (a) 中， $L=4\text{ H}$ ，且 $i(0)=0$ ，电压的波形如图 1-2-12 (b) 所示。试求：当 $t=1\text{ s}$ ， $t=2\text{ s}$ ， $t=3\text{ s}$ 和 $t=4\text{ s}$ 时的电感电流。

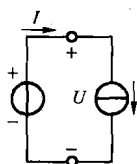


图 1-2-11 思考与练习 1.2.1 图

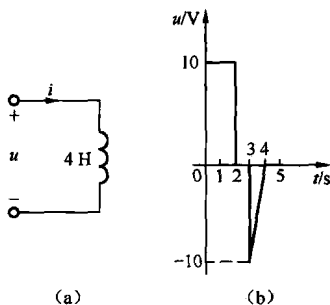


图 1-2-12 思考与练习 1.2.2 图

1.3 电路的基本定律

欧姆定律、基尔霍夫电流和电压定律是进行电路分析与计算的基本定律。

1.3.1 欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一，它指流过线性电阻中的电流与加在电阻两端的电压成正比。对于图 1-3-1 (a) 所示电路，欧姆定律可用下式表示

$$\frac{U}{I} = R \text{ 或 } U = IR \quad (1-3-1)$$

式中， R 即为该段电路的电阻值。

由上式可知，在电压 U 一定的情况下，电阻 R 越大，则电流越小。可见，电阻具有对电流起阻碍作用的性质。欧姆定律表示了线性电阻两端电压和电流的约束关系。因此，欧姆定律的表达式也称为线性电阻元件约束方程。

在图 1-3-1 (b) 和图 1-3-1 (c) 中，由于电阻元件的端电压和电流的参考方向非关联，则得

$$U = -IR \quad (1-3-2)$$

当元件的电压 u 和电流 i 之间的关系满足欧姆定律时，称为线性器件；当器件的电压 u 和电流 i 之间的关系不满足欧姆定律时，称为非线性器件。

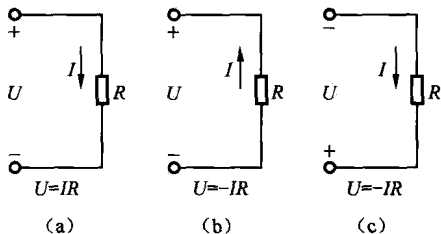


图 1-3-1 欧姆定律