

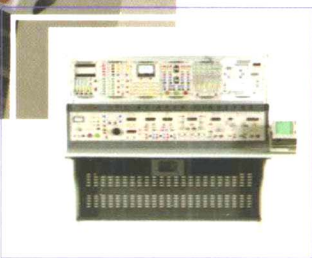


高等学校应用型特色规划教材



电工与电子技术

陶彩霞 田莉 主编



教材从课程设置总体优化的角度出发，整合教学内容，以“基本要求”为依据，恰当地解释了“基础与应用”、“理论与实践”等的矛盾。

教材注意各部分知识的综合，每部分内容都安排了综合应用实例。

本章中的例题和习题都尽量贴近实际应用，以提高学生的自学能力以及分析问题、解决问题的能力，培养学生的创新意识和工程意识。

清华大学出版社

高等学校应用型特色规划教材

电工与电子技术

陶彩霞 田 莉 主 编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分上下两篇,上篇为“电工技术”(第1~7章),内容包括电路的基本概念与基本分析方法、正弦交流电路、三相正弦交流电路、磁路及变压器、交流电动机、继电接触器控制系统、可编程控制器;下篇为“电子技术”(第8~14章),内容包括常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、大规模集成电路。

本书可作为高等学校工科本科非电类各专业电工和电子技术课程的教材,也可作为职业大学、成人教育大学和网络教育等同类专业的教材,还可作为工程技术人员的学习参考资料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术/陶彩霞,田莉主编. —北京:清华大学出版社,2011.8

(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 978-7-302-25785-1

I. ①电… II. ①陶… ②田… III. ①电工技术 ②电子技术 IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 113250 号

责任编辑:李春明 郑期彤

装帧设计:杨玉兰

责任校对:周剑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京市人民文学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:23.75 字 数:568 千字

版 次:2011 年 8 月第 1 版 印 次:2011 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:43.00 元

产品编号:040731-01

前 言

本书是参照“高等学校工科本科电工学课程教学基本要求”，为高等学校非电类专业编写的电工与电子技术基础教材。

教材分上、下两篇，上篇为“电工技术”(第1~7章)，内容包括电路的基本概念与基本分析方法、正弦交流电路、三相正弦交流电路、磁路及变压器、交流电动机、继电器接触器控制系统、可编程控制器；下篇为“电子技术”(第8~14章)，内容包括常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、大规模集成电路。本教材可供32~80学时使用，各校可根据专业设置和要求选学所需内容。

本书根据多年教学经验及教学改革成果和“电工学”精品课程建设内容，从课程设置总体优化的角度出发，整合教学内容，以“基本要求”为依据，恰当地解决好“基础与应用”、“理论与实践”、“重点内容与知识面”等矛盾，使课程内容具有系统性、先进性、启发性、实用性。教材注意各部分知识的综合，每部分内容都安排综合应用实例，每章中的例题和习题都尽量贴近实际应用，以提高学生的自学能力以及分析、解决问题的能力，培养学生的创新意识和工程意识。

本书可作为高等学校工科本科非电类各专业电工和电子技术课程的教材，也可作为职业大学、成人教育大学和网络教育等同类专业的教材，还可作为工程技术人员的学习参考资料。

本书由兰州交通大学陶彩霞、田莉主编。其中第1~3章由田晶京编写，第4~7章由陶彩霞编写，第8~10章由田莉编写，第11~14章由赵霞编写，附录由陶彩霞编写。

本书在编写过程中得到了兰州交通大学电工学教研室全体教师的大力支持，在这里表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请广大读者指正。

编 者

目 录

第 1 章 电路的基本概念与基本分析方法 1

1.1 电路的基本概念..... 1	
1.1.1 电路与电路模型..... 1	
1.1.2 电路的基本物理量及其 参考方向 2	
1.1.3 电路元件 4	
1.2 基尔霍夫定律 12	
1.2.1 基尔霍夫电流定律..... 12	
1.2.2 基尔霍夫电压定律..... 13	
1.3 电路的基本分析方法..... 14	
1.3.1 支路电流法 14	
1.3.2 节点电压法 14	
1.3.3 叠加原理 17	
1.3.4 戴维南定理 19	
1.4 一阶电路的暂态分析..... 22	
1.4.1 换路定律 22	
1.4.2 RC 电路的暂态分析 22	
1.4.3 RL 电路的暂态分析..... 23	
1.4.4 一阶线性电路的暂态分析的 三要素法 24	
1.5 应用举例 26	
1.6 用 Multisim 对电路进行仿真 26	
1.6.1 Multisim 10 软件使用简介 26	
1.6.2 叠加原理的验证仿真..... 29	
1.6.3 一阶电路暂态过程的 仿真分析 30	
本章小结 31	
习题 32	

第 2 章 正弦交流电路..... 37

2.1 正弦量的基本概念..... 37	
2.1.1 正弦量的三要素..... 37	
2.1.2 正弦量的相量表示法..... 40	

2.2 单一参数的交流电路..... 41	
2.2.1 电阻元件的交流电路..... 42	
2.2.2 电感元件的交流电路..... 43	
2.2.3 电容元件的交流电路..... 46	
2.3 一般正弦交流电路的分析 48	
2.3.1 RLC 串联电路 48	
2.3.2 RLC 并联电路 51	
2.3.3 RLC 混联电路 52	
2.3.4 交流电路的功率..... 54	
2.4 电路中的谐振..... 57	
2.4.1 串联谐振..... 57	
2.4.2 并联谐振..... 59	
2.5 应用举例..... 60	
2.5.1 电容器电车..... 60	
2.5.2 电容降压节能灯电路 61	
2.6 用 Multisim 对单相交流电路 进行仿真 61	
2.6.1 正弦稳态电路电压关系分析..... 61	
2.6.2 谐振电路的仿真分析..... 62	
本章小结 63	
习题 64	

第 3 章 三相正弦交流电路 69

3.1 对称三相正弦交流电源..... 69	
3.1.1 对称三相正弦交流电的产生 及特征..... 69	
3.1.2 三相电源的连接 70	
3.2 负载的星形和三角形连接 71	
3.2.1 负载星形连接的电路分析 71	
3.2.2 负载三角形连接的电路分析 74	
3.3 三相电路的功率..... 75	
3.4 安全用电..... 76	
3.4.1 安全用电常识..... 76	
3.4.2 静电的危害与防护 79	
3.5 应用举例..... 80	



3.5.1 发电与输电	80	5.4.2 旋转磁场主磁通与电源电压 U_1 的关系	115
3.5.2 工业企业配电	81	5.4.3 转子电流、功率因数与 转差率的关系	115
3.6 三相电路的仿真分析	83	5.4.4 异步电动机的电磁转矩	116
3.6.1 三相四线制对称负载 工作方式	83	5.5 三相异步电动机的机械特性	117
3.6.2 三相电路的功率	84	5.5.1 三个主要转矩	117
本章小结	85	5.5.2 电动机的稳定运行	119
习题	86	5.6 三相异步电动机的启动	120
第4章 磁路及变压器	88	5.6.1 启动性能	120
4.1 磁路	88	5.6.2 启动方法	121
4.1.1 铁磁材料的磁性能	88	5.7 三相异步电动机的调速	124
4.1.2 磁路的欧姆定律	90	5.7.1 变频调速	125
4.2 交流铁芯线圈电路	90	5.7.2 变极调速	125
4.2.1 交流铁芯线圈中的磁通	91	5.7.3 变转差率调速	126
4.2.2 功率损耗	92	5.8 三相异步电动机的制动	126
4.3 变压器的结构及工作原理	92	5.8.1 能耗制动	126
4.3.1 用途及分类	92	5.8.2 反接制动	126
4.3.2 变压器的基本结构	93	5.9 单相异步电动机	127
4.3.3 变压器的额定数据	95	5.9.1 电容分相式异步电动机	127
4.3.4 变压器的工作原理	95	5.9.2 罩极式异步电动机	128
4.3.5 变压器的外特性	99	本章小结	129
4.4 其他用途变压器	101	习题	130
4.4.1 自耦变压器	101	第6章 继电器接触器控制系统	133
4.4.2 电压互感器	101	6.1 常用控制电器	133
4.4.3 电流互感器	102	6.1.1 组合开关	133
本章小结	103	6.1.2 按钮	134
习题	103	6.1.3 交流接触器	134
第5章 交流电动机	106	6.1.4 中间继电器	135
5.1 三相异步电动机的构造	106	6.1.5 热继电器	135
5.1.1 定子	106	6.1.6 熔断器	136
5.1.2 转子	107	6.1.7 自动空气断路器	137
5.2 三相异步电动机的铭牌数据	108	6.1.8 行程开关	138
5.3 三相异步电动机的转动原理	110	6.1.9 时间继电器	138
5.3.1 旋转磁场	110	6.2 三相异步电动机的基本控制线路	139
5.3.2 电动机的转动原理	113	6.2.1 三相异步电动机直接启动 控制线路	141
5.3.3 转差率	114	6.2.2 点动与长动(连续)控制线路 ..	142
5.4 三相异步电动机的电磁转矩	115		
5.4.1 电磁转矩	115		

6.2.3 三相异步电动机正反转 控制线路	142	8.2.1 二极管的结构和特性	173
6.2.4 多台电动机的顺序控制	143	8.2.2 稳压二极管	179
6.3 行程控制	145	8.2.3 集成稳压电源	180
6.3.1 限位控制	145	8.2.4 光敏二极管和发光二极管	181
6.3.2 自动往复控制	145	8.2.5 光电耦合器	181
6.4 时间控制	146	8.3 晶体三极管	182
6.4.1 Y- Δ 降压启动控制线路	146	8.3.1 晶体管的结构及类型	182
6.4.2 高炉加料小车运行控制 线路	147	8.3.2 晶体管电流放大原理	183
6.5 应用举例	148	8.3.3 晶体管的主要参数	187
6.5.1 直流电动机启动控制线路	148	8.3.4 复合晶体管	188
6.5.2 自动皮带输送机控制电路	149	8.4 绝缘栅型场效应晶体管	189
本章小结	150	8.4.1 基本结构	189
习题	152	8.4.2 工作原理	190
第 7 章 可编程控制器	155	8.4.3 特性曲线	192
7.1 可编程控制器的组成与工作原理	155	8.4.4 主要参数	193
7.1.1 可编程控制器的硬件组成	155	8.5 应用举例	194
7.1.2 PLC 的工作原理	157	8.6 用 Multisim 对二极管电路进行 仿真	194
7.2 可编程控制器的编程语言	158	本章小结	195
7.2.1 可编程控制器的继电器接触器 等效电路	158	习题	195
7.2.2 可编程控制器的编程语言	159	第 9 章 基本放大电路	199
7.3 S7-200 系列 PLC 的编程元件 与编程指令	160	9.1 放大电路的基本概念和主要 性能指标	199
7.3.1 S7-200 系列 PLC 的 编程元件	160	9.1.1 放大的概念	199
7.3.2 S7-200 系列 PLC 的基本 编程指令	161	9.1.2 放大器的主要技术指标	199
7.4 PLC 梯形图控制程序的设计方法	162	9.2 共射极放大电路	201
7.5 应用举例	162	9.2.1 共射极放大电路的组成及 工作原理	201
本章小结	167	9.2.2 共射极放大电路的分析	202
习题	168	9.2.3 工作点稳定的放大电路 (分压偏置放大电路)	208
第 8 章 常用半导体器件	170	9.3 共集电极放大电路	211
8.1 半导体的基础知识	170	9.4 场效应管放大电路	212
8.1.1 半导体材料的导电性能	170	9.4.1 共源极放大电路	213
8.1.2 PN 结及其单向导电性	172	9.4.2 源极输出器	215
8.2 半导体二极管	173	9.5 多级放大电路	216
		9.5.1 级间耦合	216
		9.5.2 多级放大电路的分析方法	217



9.6 差分放大电路	217	10.4.3 运算放大器使用时的 注意事项	252
9.6.1 电路的结构	217	10.5 应用举例	254
9.6.2 主要特点	218	10.5.1 交流电压表电路	254
9.7 功率放大器	219	10.5.2 测量放大器	254
9.7.1 功率放大器的分类	220	10.6 用 Multisim 对波形发生器 进行仿真	255
9.7.2 互补对称功率放大电路	220	本章小结	256
9.8 应用举例	222	习题	257
9.8.1 补偿门铃	222	第 11 章 组合逻辑电路	261
9.8.2 浴缸水满指示器	223	11.1 数字电路基础知识	261
9.9 用 Multisim 对基本放大电路 进行仿真	223	11.1.1 脉冲信号和数字信号	261
9.9.1 直流分析	224	11.1.2 逻辑代数基础	262
9.9.2 交流分析	225	11.1.3 逻辑代数的基本公式、 定律和规则	264
本章小结	225	11.1.4 逻辑代数的表示与化简	266
习题	226	11.2 集成门电路	272
第 10 章 集成运算放大器	231	11.3 组合逻辑电路的分析与设计	275
10.1 集成运算放大器概述	231	11.3.1 组合逻辑电路的分析	275
10.1.1 集成运算放大器的组成 及工作原理	231	11.3.2 组合逻辑电路的设计	277
10.1.2 集成运算放大器的 传输特性	232	11.3.3 集成组合逻辑部件	279
10.1.3 集成运算放大器的 主要参数	233	11.4 应用举例	289
10.1.4 理想集成运算放大器 及其分析依据	233	11.4.1 计算机分时传输电路	289
10.2 放大电路中的负反馈	235	11.4.2 分时显示电路	290
10.2.1 反馈的概念及反馈放大 电路的基本方程	235	11.5 用 Multisim 对组合逻辑电路进 行仿真	291
10.2.2 反馈的类型及判别方法	236	本章小结	291
10.2.3 负反馈对放大电路性能的 影响	238	习题	292
10.3 运算放大器的线性应用	239	第 12 章 时序逻辑电路	297
10.3.1 基本运算电路	240	12.1 触发器	297
10.3.2 运算放大器在信号处理 方面的应用	246	12.1.1 基本 RS 触发器	297
10.4 运算放大器的非线性应用	249	12.1.2 同步 RS 触发器	299
10.4.1 电压比较器	249	12.1.3 JK 触发器	301
10.4.2 矩形波发生器	251	12.1.4 D 触发器	302
		12.1.5 T 触发器	303
		12.1.6 触发器的逻辑符号 与时序图	304

12.2 常用时序逻辑电路.....	306
12.2.1 寄存器	306
12.2.2 计数器	309
12.3 应用举例	318
12.3.1 优先裁决电路.....	318
12.3.2 电子表电路.....	318
12.4 用 Multisim 对时序逻辑电路 进行仿真	319
本章小结	320
习题	321
第 13 章 脉冲波形的产生与整形	324
13.1 概述	324
13.1.1 脉冲信号	324
13.1.2 脉冲产生电路和整形电路 的特点	324
13.2 555 定时器及其应用.....	325
13.2.1 555 定时器的结构与功能.....	325
13.2.2 555 定时器的应用.....	326
13.3 应用举例	331
13.3.1 温度控制电路.....	331
13.3.2 模拟声响电路.....	331
13.3.3 简易液位监控报警电路.....	332
本章小结	332
习题	333
第 14 章 大规模集成电路	335
14.1 模拟量和数字量的相互转换.....	335
14.1.1 数-模转换器.....	335

14.1.2 模-数转换器	338
14.2 可编程逻辑器件.....	339
14.2.1 概述.....	339
14.2.2 可编程逻辑的表示方法	339
14.2.3 可编程阵列逻辑	340
14.2.4 通用阵列逻辑	342
14.2.5 大规模可编程器件	344
14.3 芯片介绍及应用举例	345
14.3.1 DAC 芯片举例	345
14.3.2 ADC 芯片举例	346
14.3.3 可编程逻辑器件举例	347
本章小结	348
习题	349
附录 A 电阻器和电容器的命名方法 及性能参数	351
附录 B Y 系列三相异步电动机技术 数据及型号说明	354
附录 C 常用低压控制电器的技术 数据	356
附录 D 半导体分立器件命名方法 及性能参数表	359
附录 E 半导体集成电路型号命名方法 及性能参数表	363
参考文献	366

第 1 章 电路的基本概念与基本分析方法

电路是电工技术和电子技术的基础。本章从电路模型入手,通过电阻电路讨论电路的基本物理量、电路的基本定律、电压和电流的参考方向等。这一章介绍基尔霍夫定律,并以直流电路为例介绍分析电路的一些基本方法和定理,这些方法和定理同样适用于分析正弦交流电路。本章还介绍电路的瞬态过程的概念及其产生的原因,以及 RC 和 RL 一阶线性电路暂态过程分析及三要素法。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路与电路模型

1. 电路的组成与作用

电路即电流的通路,它是为了满足某种用途由某些电器设备或器件按一定的方式相互连接组成的。

电路一般包括电源、负载和中间环节三个组成部分。电源是将非电能转换为电能的供电设备,如电池、发电机等。负载是将电能转换为非电能的用电设备,如电动机、照明灯等。负载的大小用负载取用的功率大小来衡量。中间环节指对电路实现连接、控制、测量及保护的装置与设备,包括导线、开关和熔断器等。

电路的作用一般分为两类。一类是实现电能的传输和转换。如电力系统中,发电机产生的电能通过输电线输送到各用户,如图 1.1(a)所示。由于这类电路电压较高,电流、功率较大,常称为“强电”电路。另一类是用于进行电信号的传递和处理。如收音机和电视机,它们的接收天线(信号源)把接收到的载有语音、图像信息的电磁波转换为相应的电信号,通过电路对信号进行传递和处理,再送到扬声器和显像管(负载),还原为原始信息,如图 1.1(b)所示。这类电路通常电压较低,电流、功率较小,常称为“弱电”电路。

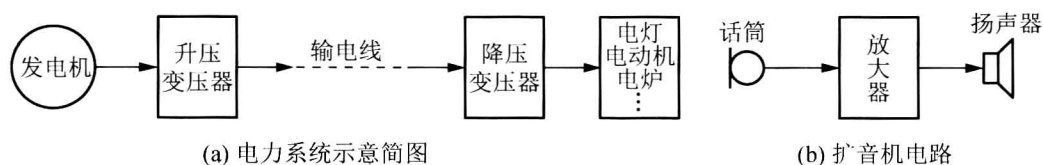


图 1.1 电路示意图

无论是电能的传输和转换,还是信号的传递和处理,其中电源或信号源的电压或电流称为激励,它推动电路工作。激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。所谓电路分析,就是在已知电路结构和元件参数的条件下,讨论激励与响应之间的关系。



2. 电路模型和电路元件

各种实际电路都是由电阻器、电容器、电感线圈、变压器、晶体管、发电机、电池等实际电气器件组成的。这些实际电气器件的物理特性一般是比较复杂的。一种实际的电气器件往往同时具有几种物理特性。例如，一个实际的电感线圈，当有电流通过时，不仅会产生磁通，形成磁场，而且还会消耗电能。即线圈不仅具有电感性质，而且具有电阻性质。不仅如此，电感线圈的匝与匝之间还存在分布电容，具有电容性质。

为了便于对实际电路进行分析和计算，常常将实际元件理想化(或称模型化)，即在一定的条件下突出其主要的电磁性质，忽略其次要因素，把它近似地看作理想电路元件。由一些理想电路元件所组成的电路就是实际电路的电路模型，它是对实际电路电磁性质的科学抽象与概括。

理想电路元件(以下简称电路元件)分为两类：有源元件和无源元件。基本的有源元件有电压源和电流源，如图 1.2(a)、(b)所示；基本的无源元件有电阻元件 R 、电感元件 L 、电容元件 C ，如图 1.2(c)、(d)、(e)所示。这些理想电路元件具有单一的物理特性和严格的数学定义。实际电气器件消耗电能的物理特性用电阻元件来表征，实际电气器件存储磁场能的物理特性用电感元件来表征，实际电气器件存储电场能的物理特性用电容元件来表征。这样，根据不同的工作条件，可以把一个实际电气器件用一个理想电路元件或几个理想电路元件的组合来模拟，从而把一个由实际电气器件连接成的实际电路转化为一个由理想电路元件组合而成的电路模型。建立实际电路的电路模型是分析研究电路问题的常用方法。

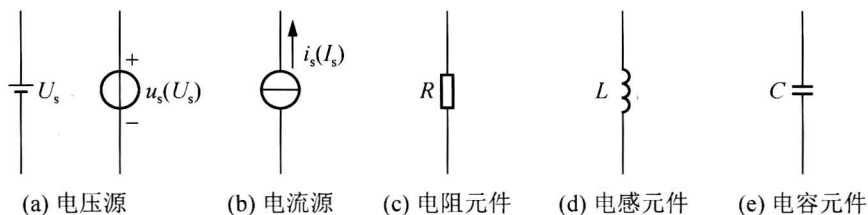


图 1.2 理想电路元件模型

1.1.2 电路的基本物理量及其参考方向

1. 电流

单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，用以衡量电流的大小。电流强度简称为电流，用符号 i 表示，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

式中电荷量 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)。

如果电流的大小和方向都不随时间变化，则称为直流电流(Direct Current, DC)，用大写字母 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化，则称为交流电流(Alternating Current, AC)，用小写字母 i 表示。

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实际方向。电流的实际方向是客观存在的。

2. 电位、电压和电动势

1) 电位

电位在数值上等于电场力把单位正电荷从电场中某点移到零电位点所做的功。工程上常选与大地相连的部件(如机壳等)作为参考点。没有与大地相连部分的电路,常选电路的公共节点为参考点,并称为地。在电路分析中,可选电路中一点作为各点电位的参考点,用接地符号“ $\perp$ ”标出。电路中 a 点的电位记为 V_a 。

2) 电压

电压是电场力把单位正电荷从电场中的 a 点移到 b 点所做的功。电压用字母 $u(U)$ 表示, a 、 b 两点间的电压记作 $u_{ab}(U_{ab})$, 下标 a 、 b 表明电压方向为由 a 到 b 。

电压和电位的单位都是伏[特](V)。根据电压与电位的定义可知, a 、 b 两点间的电压等于 a 、 b 两点间的电位之差, 即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1.2)$$

若以 b 点为参考点, a 、 b 两点间的电压等于 a 点的电位。

需要注意如下几个方面。

(1) 若 $V_a > V_b$, 则 $U_{ab} > 0$; 反之 $U_{ab} < 0$ 。电压的方向为电位降低的方向。

(2) 电位是相对的, 电压是绝对的。即电路中参考点选的不同, 各点电位值也不同, 但是任意两点间的电位差不会变, 它与参考点的选择无关。

(3) 电位值与电压值都与计算时所选的路径无关。

在电子电路中, 为了作图的简便和图面的清晰, 常利用电位的概念简化电路。即把供给电路能量的直流电源的一端接“地”, 另一端用等于电源电压值的电位表示。例如图 1.3(a) 所示电路可简化为图 1.3(b) 所示电路。

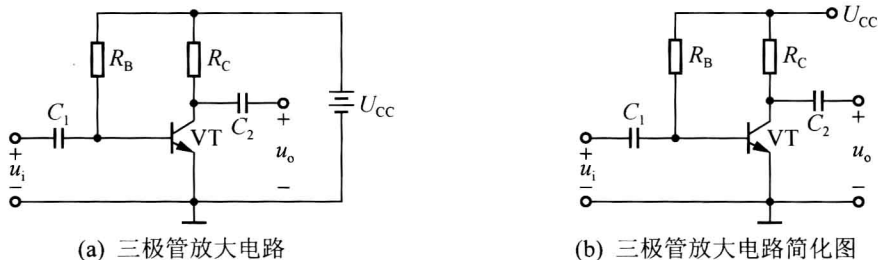


图 1.3 利用电位的概念简化电路

3) 电动势

电动势是电源力把单位正电荷在电源内部由低电位端移到高电位端所做的功。电动势用字母 $e(E)$ 表示, 单位与电压相同, 方向为电位升高的方向, 与电压方向相反。

3. 电压与电流的参考方向

在进行电路的分析与计算时, 需要知道电压与电流的方向。在简单直流电路中, 可以根据电源的极性判别出电压和电流的实际方向。在复杂直流电路中, 电压和电流的实际方向往往是无法预知的, 而且可能是待求的。而在交流电路中, 电压和电流的实际方向是随时间不断变化的。因此, 在这些情况下, 需要给它们假定一个方向作为电路分析与计算时



的参考。这些假定的方向称为参考方向或正方向。在参考方向下,电压与电流都是代数量。当电压、电流的参考方向与实际方向一致时,则解得的电压、电流值为正;相反时则为负。分析电路前应先在电路中标出各电压与电流的正方向,如图 1.4 所示。参考方向一经选定不得再更改,以免与其代数值不符。

原则上电压与电流的参考方向是可以任意假定的,为了电路分析方便起见,在假定无源电路元件的电压、电流参考方向时,通常将两者的参考方向取为一致,并称为关联参考方向。对电源的电压和电流的参考方向,我们一般习惯于取非关联参考方向。

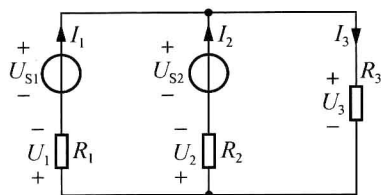


图 1.4 电压、电流的参考方向

4. 电功率

功率是电路分析中常用到的另一个物理量。我们知道在电路接通后,电路中同时进行着电能与非电能的转换。根据能量守恒定律,电源提供的电能等于负载消耗或吸收电能的总和。

负载消耗或吸收的电能即电场力移动电荷所做的功,用字母 W 表示,有

$$W = \int_0^q u dq = \int_0^t u i dt \quad (1.3)$$

式中: t 为电流通过负载的时间。

功率是单位时间内消耗的电能,用字母 $p(P)$ 表示。

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1.4)$$

在直流情况下,有

$$W = UI t \quad (1.5)$$

$$P = UI \quad (1.6)$$

在国际单位制中,电功率的单位为瓦[特](W);电能的单位为焦[耳](J)。工程上也常用度(千瓦小时)作为电能的单位。各单位间的关系为

$$1 \text{度} = 1000 \text{W} \times 3600 \text{s} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$$

式(1.5)为元件电压、电流参考方向一致时消耗电功率的表达式。当元件电压、电流参考方向不一致时,电功率的表达式前要加“-”号,即

$$P = -UI \quad (1.7)$$

无论是上述哪种情况,若结果为 $P > 0$,表示该元件吸收功率,此元件为负载;若结果为 $P < 0$,则表示该元件输出功率,此元件为电源。

1.1.3 电路元件

1. 电阻元件

电气设备中,将电能不可逆地转换成其他形式能量的特征可用“电阻”这个理想电路元件来表征。例如电灯、电炉等都可以用电阻来代替。

电阻的符号如图 1.5(a)所示。当电流通过它时将受到阻力,沿电流方向产生电压降,如图 1.5(a)所示。电压降与电流之间的关系遵从欧姆定律。在关联参考方向下,其表达式为

$$u = Ri \quad (1.8)$$

式中: R 是表示电阻元件阻碍电流变化这一物理性质的参数。电阻的单位是欧[姆](Ω)。

电阻元件也可用电导参数来表征,它是电阻 R 的倒数,用字母 G 表示,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.9)$$

电导的单位是西[门子](S)。

在直角坐标系中,如果电阻元件的电压-电流特性(伏安特性)为通过坐标原点的一条直线(见图 1.5(b))就定义为线性电阻。这条直线的斜率等于线性电阻的电阻值,是一个常数。

如果电阻元件的电阻值随着通过它的电流(或其两端的电压)的大小和方向变化,其伏安特性是曲线,则称为非线性电阻。

电流通过电阻元件时,电阻消耗的电功率在 u 、 i 的参考方向一致时为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1.10)$$

由于电阻元件的电流和电压降的实际方向总是一致的,所以算出的功率任何时刻都是正值,是消耗电能。因此电阻是一种耗能元件。

2. 电感元件

电感元件是用来表征电路中储存磁场能这一物理性质的理想元件。当有电流流过电感线圈时,其周围将产生磁场。磁通是描述磁场的物理量,磁通与产生它的电流方向间符合右手螺旋定则,如图 1.6(a)所示。

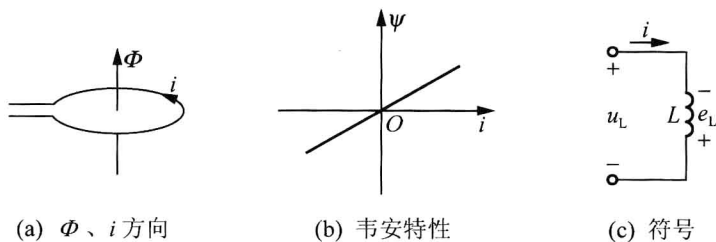


图 1.6 电感元件

如果线圈有 N 匝,并且绕得比较密集,则可以认为通过各匝的磁通相同,与线圈各匝相交链的磁通总和称为磁链,即 $\psi = N\Phi$ 。 ψ 与通过线圈的电流 i 的比值为

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} \quad (1.11)$$

式中: ψ (或 Φ) 的单位为韦[伯](Wb); i 的单位为安[培](A); L 为线圈的电感,是电感元件的参数,单位为亨(H)。由式(1.11)可画出磁链与电流之间的函数关系曲线(电感的韦安特性)。



如果 ψ 与 i 的比值是一个大于零的常数, 其韦安特性是一条通过坐标原点的直线, 如图 1.6(b) 所示, 则该电感称为线性电感; 否则便是非线性电感。如果线圈的电阻很小可以忽略不计, 而且线圈的电感为线性电感时, 该线圈便可用如图 1.6(c) 所示的理想电感元件来代替。根据电磁感应定律, 当线圈中的电流变化时, 磁通与磁链将随之变化, 并在线圈中产生感应电动势 e_L , 而元件两端就有电压 u_L 。 e_L 的方向与磁链方向间符合右手螺旋定则, e_L 的值正比于磁链的变化律, 即

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1.12)$$

因此, 在图 1.6(c) 中, 关联参考方向下, u_L 与 i 的参考方向是一致的, 可得

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (1.13)$$

根据基尔霍夫电压定律有 $u_L = -e_L$, 由此可知电感电压和电流的关系为

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (1.14)$$

上式表明, 电感电压与电流的变化律成正比。如果通过电感元件的电流是直流电流, 则 $\frac{di}{dt} = 0$, $u_L = 0$, 因此, 在直流电路中, 电感元件相当于短路。将式(1.14)等号两边积分并整理, 可得电流 i 与电压 u_L 的积分关系式为

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u_L dt + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt \quad (1.15)$$

式中: $i(0)$ 为计时时刻 $t=0$ 时的电流值, 又称初始值。上式说明了电感元件在某一时刻的电流值不仅取决于 $[0, t]$ 区间的电压值, 而且与电流的初始值有关。因此, 电感元件有“记忆”功能, 是一种记忆元件。在电压电流关联参考方向下, 电感元件吸收的电功率为

$$p = u_L i = Li \frac{di}{dt} \quad (1.16)$$

当 i 的绝对值增大时, $i \frac{di}{dt} > 0$, $p > 0$, 说明此时电感从外部输入电功率, 把电能转换成了磁场能; 当 i 的绝对值减小时, $i \frac{di}{dt} < 0$, $p < 0$, 说明此时电感向外部输出电功率, 把磁场能又转换成了电能。可见, 电感中储存磁场能的过程也是能量的可逆转换过程。若电流 i 由零增加到 I 值, 电感元件吸收的电能为

$$W = \int_0^I L i di = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1.17)$$

若电流 i 由 I 值减小到零值, 则电感元件吸收的电能为

$$W' = \int_I^0 L i di = -\frac{1}{2} L I^2 \quad (1.18)$$

W' 为负值, 表明电感放出能量。比较以上两式可见, 电感元件吸收的能量与放出的能量相等。电感元件是储能元件。实际的空心电感线圈, 当它的耗能作用不可忽略且电源频率不高时, 常用电阻元件与电感元件的串联组合模型来表示。

当电感线圈中插入铁芯时, 因电感的韦安特性不为直线, 故电感不是常数, 属于非线性电感。

3. 电容元件

电容是用来表征电路中储存电场能这一物理性质的理想元件。凡用绝缘介质隔开的两个导体就构成了电容器。如果忽略中间介质的漏电现象,则可看作一理想电容元件。

当电容元件两端加有电压 u 时,它的两极板上就会聚集等量异性的电荷 q ,在极板间建立电场。电压 u 越高,聚集的电荷 q 越多,产生的电场越强,储存的电场能也越多。 q 与 u 的比值即称为电容,有

$$C = \frac{q}{u} \quad (1.19)$$

电容 C 的单位为法[拉](F)。由于法的单位太大,使用中常采用微法(μF)或皮法(pF)。由式(1.19)可画出一条电荷 q 与电压 u 之间的函数关系曲线(电容的库伏特性)。当 q 与 u 的比值是一个大于零的常数时,其库伏特性是一条通过坐标原点的直线,如图1.7(a)所示,则该电容称为线性电容;否则为非线性电容。

当电容元件两端的电压随时间变化时,极板上储存的电荷就随之变化,与极板连接的导线中就有电流。若 u 与 i 的参考方向如图1.7(b)所示,则

$$i = \frac{\text{d}q}{\text{d}t} = C \frac{\text{d}u}{\text{d}t} \quad (1.20)$$

上式表明,线性电容的电流 i 与端电压 u 对时间的变化率 $\frac{\text{d}u}{\text{d}t}$ 成正比。对于直流电压,电容的电流为零,故电容元件对直流来说相当于开路。在电压电流关联参考方向下,电容元件吸收的电功率为

$$p = ui = Cu \frac{\text{d}u}{\text{d}t} \quad (1.21)$$

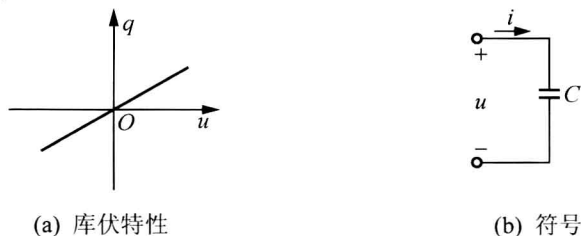


图 1.7 电容元件

若电压 u 由零增加到 U 值,则电容元件吸收的电能为

$$W = \int_0^U C u \text{d}u = \frac{1}{2} C U^2 \quad (1.22)$$

若电压 u 由 U 值减小到零值,则电容元件吸收的电能为

$$W' = \int_U^0 C u \text{d}u = -\frac{1}{2} C U^2 \quad (1.23)$$

W' 为负值,表明电容放出能量。比较式(1.22)和式(1.23),可以看出电容元件吸收的电能与放出的电能相等,故电容元件不是耗能元件,而是储能元件。

对实际电容器,当其介质损耗不能忽略时,可用一个电阻元件与电容元件的并联组合模型来表示。



电阻器和电容器的命名方法及性能参数见附录 A。

4. 独立电源

能为电路提供电能的元件称为有源电路元件。有源电路元件分为独立电源元件和受控电源元件两大类。独立电源元件(简称独立电源)能独立地给电路提供电压和电流,而不受其他支路的电压或电流的支配。独立电源元件即理想电源元件,是从实际电源中抽象出来的。当实际电源本身的功率损耗可以忽略不计,而只起产生电能的作用时,这种电源便可用一个理想电源元件来表示。理想电源元件分理想电压源和理想电流源两种。

1) 理想电压源

理想电压源具有以下两个基本性质。

(1) 它的端电压总保持一恒定值 U_s 或为某确定的时间函数 $u_s(t)$, 而与流过它的电流无关, 所以也称为恒压源。

(2) 它的电流由与它连接的外电路决定。电流可以从不同的方向流过恒压源, 因而电压源既可向外电路输出能量, 又可以从外电路吸收能量。

理想电压源的图形符号如图 1.8(a)所示, 上面标明了其电压、电流的正方向。图 1.8(b)常用来表示直流理想电压源(如理想电池), 其伏安特性如图 1.8(c)所示, 为平行于 i 轴且纵坐标为 U_s 的直线。伏安特性也表明了理想电压源的端电压与通过它的电流无关。

2) 理想电流源

理想电流源具有以下两个基本性质。

(1) 它输出的电流总保持一恒定值 I_s 或为某确定的时间函数 $i_s(t)$, 而与它两端的电压无关, 所以也称为恒流源。

(2) 它两端的电压由与它连接的外电路决定。其端电压可以有不同的方向, 因而电流源既可向外电路输出能量, 又可以从外电路吸收能量。

理想电流源的图形符号如图 1.9(a)所示, 上面标明了其电压、电流的正方向。其伏安特性如图 1.9(b)所示, 为平行于 u 轴的直线。伏安特性也表明了理想电流源的电流与它的端电压无关。

无论是理想电压源还是理想电流源都有两种工作状态。当它们的电压和电流的实际方向与图 1.8(a)和图 1.9(a)所示电路中规定的参考方向相同时, 它们输出(产生)电功率, 起电源的作用; 否则, 它们取用(消耗)电功率, 起负载的作用。

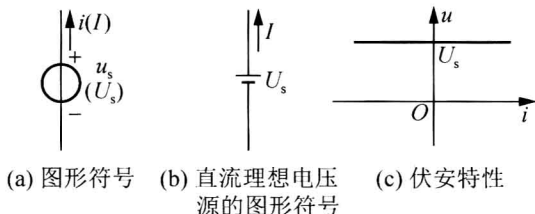


图 1.8 理想电压源

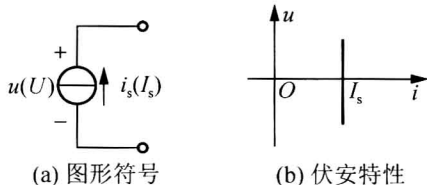


图 1.9 理想电流源

3) 实际电源模型

一个实际的电源一般不具有理想电源的特性, 例如蓄电池、发电机等电源不仅对负载产生电能, 而且在能量转换过程中有功率损耗, 即存在内阻, 实际的电源可以通过图 1.10(a)