



高等学校应用型特色规划教材

电路基础

甘祥根 主 编
钟美玲 郭亚红 虞爱娟 副主编



清华大学出版社

高等学校应用型特色规划教材

电 路 基 础

主 编	甘祥根
副主编	钟美玲
	郭亚红
	虞爱娟

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是为满足应用型人才培养的教学需求,依据应用型人才培养的教学特点编写的。

本书共7章,内容包括:电路的基本概念及其基本定律、电路的基本分析方法、单相交流电路、三相交流电路、二端口网络、耦合电感电路和理想变压器,以及电路的暂态过程。每章之前有要点和难点提示,章后附有习题,这些起到了有效引导学生学习,便于学生课后练习和自学的作用。书末附有 Multisim 8 仿真软件简介、电路基础常用仪器仪表简介和习题答案。

本书概念清晰、重点突出、讲解透彻、通俗易懂、例题丰富,通过电路仿真和电路实验使实训得到了切实加强。本书可作为应用型人才培养高等院校的应用电子、电子信息工程、通信技术、机电、计算机应用等电类专业的教材,也可作为职工大学、函授大学相关专业学生的教材,还可供相关工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/甘祥根主编;钟美玲,郭亚红,虞爱娟副主编. —北京:清华大学出版社,2006.8

(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 7-302-09313-X

I.电… II.①甘…②钟…③郭…④虞… III.电子理论—高等学校—教材 IV.TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 062705 号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:李春明

文稿编辑:许瑛琪

排版人员:李 欣

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:14.25 字数:334千字

版 次:2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-13202-X/TM·82

印 数:1~4000

定 价:21.00元

前 言

本书是为满足应用型人才培养的教学需求,依据应用型人才培养的教学特点进行编写的。本书在写作时,力求做到理论联系实际,并将最新的电路仿真软件 Multisim 8 引入教材中,这既体现了教材的时代性,同时又解决了传统实验中所遇到器材短缺和部分实验效果不理想的问题,破解了教学过程中的难题。

本书知识重点突出,兼顾知识点覆盖,强化基础训练和实验操作,使学生学完本课程后既能掌握必要的基础知识,又能使实验技能和使用电子 CAD 的能力得到显著提高。在编写过程中,我们着力体现如下特色:

- 思路清晰,循序渐进,通俗易懂,例题和习题量适度,不但适用于教学,而且适应于学生自学。
- 内容篇幅适中,学时安排合理。本书编写过程中,考虑到教学课时数的实际情况,安排理论教学 58 学时、实训 14 学时,共 72 学时左右,基本适合目前应用型人才培养的教学实际。
- 本书力求克服实际教学过程中的重理论轻实践的弊端,加强实验环节的教学,不但安排了适量的实训课时,而且通过仿真软件的引入使电路基础实验的开出率可达百分之百,课程教学更加符合应用型人才培养的教学目标,使学生的就业前景更加广泛。

全书共 7 章及 3 个附录。正文内容包括电路的基本概念及其基本定律、电路的基本分析方法、单相交流电路、三相交流电路、二端口网络、耦合电感电路和理想变压器,以及电路的暂态过程。书中每章之前有要点和难点提示,章后附有习题,这些起到了有效引导学习,便于学生课后练习和自学的作用。附录内容包括 Multisim 8 仿真软件简介、电路基础常用仪器仪表简介和习题答案。

本书编写分工情况如下:第 1、2 章由浙江万里学院虞爱娟编写,第 3、4 章由江西信息应用职业技术学院钟美玲编写,第 5、6 章由河南漯河职业技术学院郭亚红编写,第 7 章、附录 A 由江西信息应用职业技术学院甘祥根编写,附录 B 由甘祥根和张晓文共同编写。钟美玲审阅了部分书稿,甘祥根负责全书的审阅和统稿工作。

本书在编写过程中,自始至终得到了清华大学出版社李春明编辑和相关院校有关领导、同行的大力支持和帮助,在此表示深深的谢意。同时由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中不妥之处敬请读者批评指正,以便今后改正。

编著者

目 录

第 1 章 电路的基本概念及其基本定律..... 1	
1.1 电路及其组成..... 1	
1.1.1 电路及其组成..... 1	
1.1.2 电路的功能..... 2	
1.2 电路的基本物理量和参考方向..... 3	
1.2.1 电路的基本物理量 和参考方向..... 3	
1.2.2 元件的伏安关系..... 6	
1.3 电气设备的额定值及 电路的工作状态..... 10	
1.3.1 电气设备的额定值..... 10	
1.3.2 电路的 3 种工作状态..... 11	
1.4 电路的基本定律..... 13	
1.4.1 欧姆定律..... 13	
1.4.2 基尔霍夫定律..... 13	
1.5 电路中电位的计算..... 17	
1.6 电源..... 19	
1.6.1 独立源..... 19	
1.6.2 实际电源模型及等效变换..... 20	
1.6.3 受控电压源和电流源..... 23	
1.7 本章实训..... 24	
1.7.1 电路中电位的测量..... 24	
1.7.2 基尔霍夫定律的验证..... 26	
习题..... 27	
第 2 章 电路的基本分析方法..... 33	
2.1 电阻电路的等效..... 33	
2.1.1 等效及等效化简..... 33	
2.1.2 星形和三角形电阻 网络的等效变换..... 36	
2.2 支路电流法..... 38	
2.2.1 支路电流法..... 38	
2.2.2 应用举例..... 40	
2.3.1 节点电压法..... 42	
2.3.2 应用举例..... 43	
2.4 叠加原理..... 46	
2.4.1 叠加原理..... 46	
2.4.2 应用举例..... 47	
2.5 等效电源定理..... 48	
2.5.1 戴维南定理..... 49	
2.5.2 诺顿定理..... 51	
2.6 负载获得最大功率的条件..... 53	
2.7 非线性电阻..... 54	
2.7.1 非线性电阻元件..... 54	
2.7.2 非线性电阻电路的 图解分析法..... 55	
习题..... 59	
第 3 章 单相交流电路..... 64	
3.1 正弦交流电的基本概念..... 64	
3.1.1 正弦量的三要素..... 64	
3.1.2 正弦量的相位差..... 66	
3.1.3 正弦量的有效量..... 68	
3.2 正弦量的相量表示法..... 69	
3.2.1 复数及其运算..... 69	
3.2.2 正弦量的相量表示法..... 72	
3.3 单一参数的交流电路..... 74	
3.3.1 电阻元件电路..... 74	
3.3.2 电感元件电路..... 76	
3.3.3 电容元件电路..... 78	
3.4 电阻、电感和电容串联 的交流电路..... 81	
3.4.1 电压和电流的关系..... 81	
3.4.2 功率关系..... 84	
3.5 阻抗的串联和并联..... 86	

3.5.1 阻抗的串联	86	习题	119
3.5.2 阻抗的并联	87	第 5 章 二端口网络	121
3.6 功率因数的提高	89	5.1 二端口网络方程和参数	121
3.6.1 功率因数的概念及功率 因数提高的意义	89	5.1.1 二端口网络 Z 方程 和 Z 参数	122
3.6.2 功率因数的提高	90	5.1.2 二端口网络 Y 方程 和 Y 参数	123
3.7 电路的谐振	91	5.1.3 二端口网络 T 方程 和 T 参数	125
3.7.1 串联谐振	91	5.1.4 二端口网络 H 方程 和 H 参数	127
3.7.2 并联谐振	95	5.2 二端口网络连接和等效	129
3.8 非正弦周期信号电路分析	98	5.2.1 二端口网络的串联	129
3.8.1 非正弦周期信号的 分解和合成	98	5.2.2 二端口网络的并联	130
3.8.2 非正弦周期信号的平均值、 有效值和负载电路 平均功率	100	5.2.3 二端口网络的级联	131
3.9 本章实训 单相照明电路及 功率因数的改善	101	5.2.4 二端口网络等效	132
习题	103	5.3 本章实训 线性无源二端口 网络测试	135
第 4 章 三相交流电路	105	习题	138
4.1 三相正弦交流电源	105	第 6 章 耦合电感电路和理想变压器	140
4.1.1 三相正弦交流 电动势的产生	105	6.1 耦合电感元件	140
4.1.2 三相电源的连接	106	6.1.1 耦合电感的基本概念	140
4.2 三相电路的计算	108	6.1.2 耦合电感元件的电压、 电流关系	142
4.2.1 负载星形连接三相 电路的计算	108	6.1.3 同名端	143
4.2.2 负载三角形连接三相 电路的计算	110	6.2 耦合电感的去耦等效	147
4.3 三相电路的功率	111	6.2.1 耦合电感的串联等效	147
4.4 安全用电常识	113	6.2.2 耦合电感的 T 型等效	148
4.4.1 电流对人体的作用	113	6.3 空心变压器电路分析	151
4.4.2 触电方式	113	6.3.1 端接负载的空心变压器	152
4.4.3 保护接地和接零	113	6.3.2 端接电源的空心变压器	154
4.4.4 静电防护和电气防爆	114	6.3.3 用去耦等效电路 简化电路分析	154
4.5 本章实训 三相电路及 其仿真研究	114	6.4 理想变压器	156
4.5.1 三相电路的研究	114	6.4.1 理想变压器端口电压、 电流之间的关系	156
4.5.2 三相电路的仿真研究	116		

6.4.2 理想变压器阻抗变换作用	159
6.5 本章实训 互感耦合电路研究	162
习题	164
第7章 电路的暂态过程	167
7.1 换路定则	168
7.1.1 换路定则	168
7.1.2 初始值的计算	172
7.2 RC 电路的暂态过程	173
7.2.1 RC 一阶电路零输入响应	173
7.2.2 RC 一阶电路零状态响应	176
7.2.3 RC 一阶电路完全响应	177
7.2.4 一阶电路的三要素法	179
7.3 RL 电路的暂态过程	181
7.3.1 RL 一阶电路的 零输入响应	181
7.3.2 RL 一阶电路的零状态响应 ..	183
7.3.3 RL 一阶电路的完全响应	184
7.4 RC 一阶电路在脉冲信号 作用下的暂态过程	186
7.4.1 RC 微分电路	186
7.4.2 RC 积分电路	187
7.5 本章实训 RC 一阶电路 响应仿真测试	188
习题	190

附录 A Multisim 8 仿真

软件使用简介

A.1 Multisim 软件简介	194
A.2 Multisim 的基本使用方法	195
A.2.1 Multisim 软件安装	195
A.2.2 Multisim 界面	195
A.2.3 Multisim 界面定制	196
A.3 Multisim 电路建立	197
A.4 Multisim 电路仿真	200
A.4.1 给电路增加仪表	200
A.4.2 电路仿真	201
A.5 Multisim 电路分析	202
A.5.1 电路分析相关设置	202
A.5.2 电路分析结果观察	203

附录 B 常用仪器仪表简介

B.1 万用表使用简介	204
B.1.1 指针式万用表	204
B.1.2 数字式万用表	206
B.2 示波器简介	208
B.2.1 面板介绍	208
B.2.2 基本操作	210

附录 C 习题答案

参考文献

第 1 章 电路的基本概念及其基本定律

[本章要点]

- 电路的主要物理量及其参考方向
- 元件的伏安关系
- 基尔霍夫定律
- 电路中电位的计算

[本章难点]

电路中电位的计算

本章首先阐述了电路的基本知识,包括电路的组成、功能,电路的基本物理量——电压、电流、功率和电路的工作状态。在此基础上,重点介绍了两方面内容:一是基本电路元件及其伏安特性,即电路元件中电压与电流的关系,包括电阻、电感、电容元件的伏安特性和独立源、受控源的伏安特性;二是介绍了电路中电压与电流相互之间应遵循的规律——基尔霍夫定律。此外,在本章中还运用上述基本理论,对电路中的电位进行分析和计算。

1.1 电路及其组成

电路是电工技术中的主要研究对象,电路理论是电路基础的主要部分。为了研究电路理论,首先要了解什么是电路,即给电路下一个定义。

1.1.1 电路及其组成

有电流通过的路径称为电路。

电路一般由三部分组成:电源、负载和中间环节。图 1.1 所示为照明电路,该电路由电池作为电源,供电给负载——灯,负载和电源之间用导线相连,并用开关控制电路通/断。对电源来讲,负载和中间环节称为外电路,电源内部的一段电路称为内电路。

电源:供给电路电能的设备。它把其他形式的能量转换成电能,如发电机把机械能转换为电能,电池把化学能转换为电能。

负载:各种用电设备。它是将电能转换成其他形式能量的装置,如电动机将电能转换为机械能,电灯把电能转换为光能和热能。

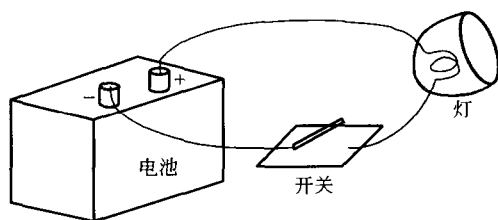


图 1.1 电路的组成

中间环节：连接电源和负载的部分。最简单的中间环节就是导线和开关，起到传输和分配电能或对电信号进行传递和处理的作用。

1.1.2 电路的功能

按工作任务划分，电路功能有两类。

1. 能量的转换、传输和分配

供电电路就是一个实现电能传输、分配和转换的电路。该系统用发电机将其他形式的能量转换成电能，再通过变压器和输电线送到负载，将电能转换成其他形式的能量，如电动机、电炉、电灯等，如图 1.2(a)所示。

2. 信号的处理

常见的信号处理电路有电话机、电视机、收音机等。这些电路将声音或图像信号转换成电信号经各种处理后，送到负载，负载再将电信号转换成声音或图像信号。如图 1.2(b)所示。

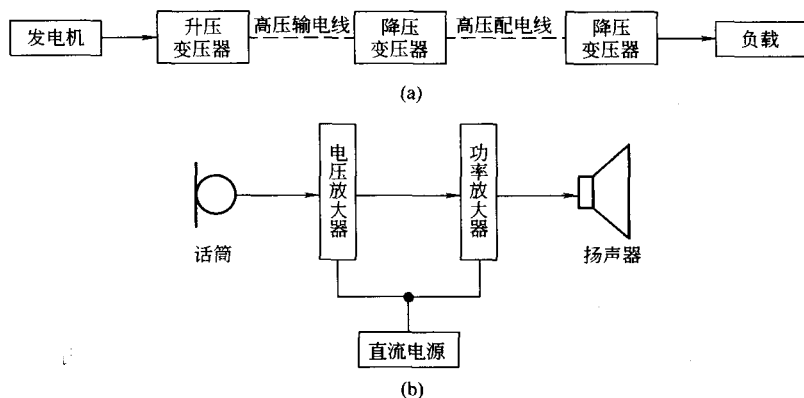


图 1.2 电路的功能

实际电路由各种作用不同的电路元件或器件所组成且电路元件种类繁多，电磁性质复杂。如图 1.1 中所示的白炽灯，除了具有消耗电能的性质外，当电流通过时，还具有电感性。为了便于对实际复杂问题进行研究，常常采用一种“理想化”的科学抽象方法，即把实际元件看作是电阻、电感、电容与电源等几种理想的电路元件。理想的电路元件是具有

某种确定的电或磁性质的假想元件。常见理想元件的符号如图 1.3 所示。

用理想电路元件构成的电路叫电路模型,用特定的符号代表元件连接成的图形叫电路图,如图 1.4 所示就是图 1.1 所示照明电路的电路图。

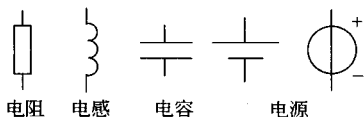


图 1.3 理想电路元件的符号

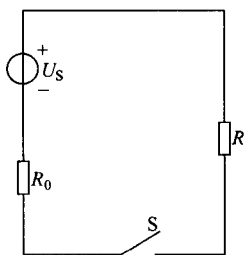


图 1.4 图 1.1 的电路图

1.2 电路的基本物理量和参考方向

在电路中需要分析研究的物理量很多,主要是电流、电压和电功率这 3 个,其中电流、电压是电路中的基本物理量。

1.2.1 电路的基本物理量和参考方向

1. 电流和电流的参考方向

电荷的定向移动形成电流。习惯上规定正电荷的运动方向为电流的方向(事实上,金属导体内部的电流是由带负电的自由电子定向运动形成的),如图 1.5 所示。

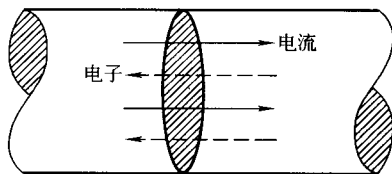


图 1.5 导体中的电子与电流

表征电流强弱的物理量叫电流强度,简称电流。电流在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,一般用符号 i 表示,即

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

式中, dq 是 dt 时间内通过导体横截面的电荷量。电荷量的单位为 C(库仑),时间的单位为 s(秒),则电流 i 的单位为 A(安[培])。

如果电流的大小和方向均不随时间变化而变化,这种电流称为恒定电流,简称直流电流。直流电流通常用大写字母 I 表示,因此式(1-1)可改写成

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中, q 为时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

随时间变化的电流一般用小写字母 i 表示。

完整地表示电路中的电流应该既有电流的大小又要有其方向。在简单电路中, 电流的实际方向较易判别, 但在复杂电路中, 电路中各电流的实际方向往往很难事先确定。此外, 有些电路中电流的实际方向是随着时间在改变的, 很难标明其实际方向。因此, 在分析和计算电路时引入了一个重要的概念——电流的参考方向。

电流的参考方向是任意设定的, 在电路图中一般用箭头表示。分析计算电路时, 首先应设定电路中各个电流的参考方向, 并在电路图上标出。若计算结果为正值, 则表示电流的实际方向与参考方向一致; 若电流为负值, 则表示实际方向与参考方向相反。图 1.6 表示了电流的实际方向与参考方向的联系。

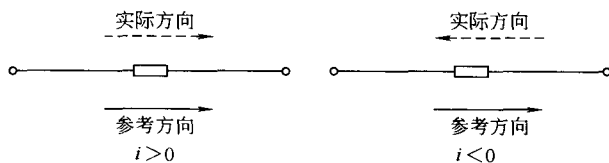


图 1.6 电流的实际方向和参考方向的联系

2. 电压和电压的参考方向

1) 电压

在图 1.7 中, 极板 a 带正电, 极板 b 带负电, 在 a 、 b 间存在电场, 其方向是由 a 指向 b 。在电场力的作用下, 正电荷由 a 经外电路流向 b 。电场力对电荷做了功。用物理量来衡量电场力做功大小, 引入了电压 u 。其定义为: 把单位正电荷从 a 点移动到 b 点电场力所做的功定义为 a 、 b 两点间的电压, 即

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

式中, w 为正电荷 q 由 a 点移动到 b 点电场力所做的功, 单位为 J(焦[耳]), 电压 u_{ab} 的单位为 V(伏[特])。通常直流电压用大写字母 U 来表示。

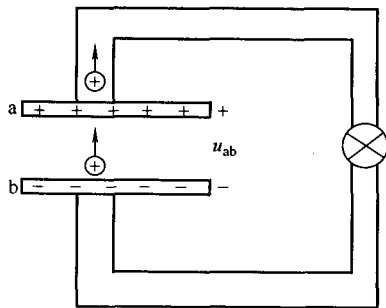


图 1.7 电源电压

2) 电位

电场力将单位正电荷从电场内的 a 点移动至无限远处所做的功, 被称为 a 点的电位 u_a 。由于无限远处的电场为零, 所以电位也为零。因此, 电场内两点间的电位差, 也就是 a 、 b 两点间的电压。即

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1-4)$$

为分析电路方便起见, 一般在电路中任选一点为参考点, 令参考点电位为零, 则电路中某点相对于参考点的电压就是该点的电位。

电压方向规定为由高电位指向低电位, 即电位降方向。在电路分析中也可选取电压的参考方向。电压的参考方向可用箭头表示, 即设定沿箭头方向电位是降低的; 也可以用“+”、“-”表示; 还可采用双下标表示, 如图 1.8 所示。若计算所得电压为正值, 实际方向与参考方向一致; 反之, 则相反。

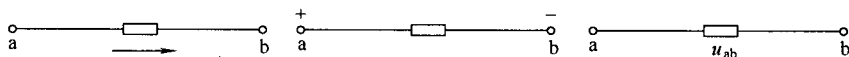


图 1.8 电压参考方向的表示法

在分析电路时电压和电流参考方向的选择是独立无关的, 但为了方便分析问题, 常常把两者的参考方向选择为一致, 即选取成关联参考方向。

3) 电动势

为维持恒定电流不断在电路中通过, 必须保持 U_{ab} 恒定, 因此需要电源力不断克服电场力, 使正电荷由负极 b 移向正极 a 。电源力对电荷做功的能力用物理量电动势来衡量。电源电动势在数值上等于电源力把单位正电荷从负极 b 经电源内部移到正极 a 所做的功, 用 E 表示。电动势的方向规定为由低电位指向高电位, 即电位升方向, 其单位也为 V(伏[特])。

3. 电功率

除了电压和电流两个基本物理量外, 还需要知道电路元件的功率。电路中, 单位时间内电路元件的能量变化用功率表示, 即

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

功率 p 单位为 W(瓦[特])。将式(1-5)等号右边分子、分母同乘以 dq 后, 变为

$$p = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} \quad (1-6)$$

将式(1-1)、式(1-3)代入式(1-6), 得

$$p = ui \quad (1-7)$$

即: 元件吸收或发出的功率等于元件上的电压与电流之积。直流电路的这一公式写为

$$P = UI \quad (1-8)$$

在电路中, 当 U 、 I 参考方向一致时, $P = UI$; 当 U 、 I 参考方向相反时, $P = -UI$ 。若计算结果 $P > 0$, 说明该元件吸收或消耗功率, 是负载; 若计算结果 $P < 0$, 说明该元件发出功率, 是电源。

当已知设备的功率为 P 时, 则 t 秒钟内消耗的电能为

$$W = Pt \quad (1-9)$$

电能 W 的单位为 J(焦[耳])。在电工中, 直接用瓦特秒($W \cdot s$)作单位。在实际中, 常用千瓦时($kW \cdot h$)作单位。

$$1kW \cdot h = 3\,600\,000W \cdot s$$

例 1-1 图 1.9 是 5 个元件组成的电路, 关联方向下, 如果 $P_1 = -205W$, $P_2 = 60W$, $P_4 = 45W$, $P_5 = 30W$, 计算元件 3 是吸收或发出的功率。

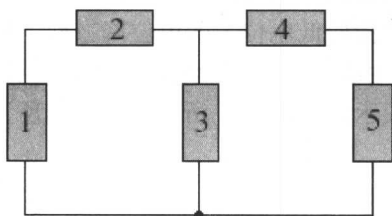


图 1.9 例 1-1 图

解: 电路也应遵守能量守恒定律, 即 $\sum P = 0$ 。

由题意可知, 元件 1 发出功率 205W, 元件 2、4、5 共吸收功率 135W, 则元件 3 吸收功率 70W。

1.2.2 元件的伏安关系

前已述及, 实际电路常用电路模型来表示。因此, 对电路进行分析和计算, 首先必须掌握这些理想模型元件的性质。本节及 1.6 节中将陆续介绍几种常见的理想元件。

1. 电阻元件

1) 金属导体的电阻

在金属导体中, 自由电子在向前运动时, 会与形成结晶格的正离子发生碰撞, 使电子运动受到阻碍, 即导体对电流呈现一定的阻碍作用。这种阻碍作用被称为电阻, 用字母 R 来表示。

导体的电阻值 R 与导体的长度 l 成正比, 与导体的横截面积 s 成反比, 并与导体材料的性质有关, 用公式表示为

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1-10)$$

式中, ρ 是电阻率, 单位为 $\Omega \cdot m$ (欧[姆]米), l 是导体的长度, 单位为 m(米), s 是导体的横截面积, 单位为 m^2 (平方米)。

电阻率 ρ 是单位长度单位截面积时导体的电阻值。 ρ 越大, 物质的导电能力就越差。另外, 金属导体的电阻率还受温度的影响, 一般的金属导体, 温度越高, 电阻率越大。不同的材料, 有不同的电阻率, 表 1.1 列出了常用的电工材料在 $20^\circ C$ 时的电阻率及其温度系数。

从表中可知, 银的电阻率最小, 是最好的导电材料, 其次是铜和铝, 但银的价格昂贵,

除了必要的地方外, 普遍采用铜和铝。

电阻的倒数称为电导, 用 G 表示, 单位为 S (西[门子])

$$G = \gamma \frac{S}{l} \quad (1-11)$$

式中, γ 为电导率, 是电阻率的倒数, 单位为 S/m (西[门子]/米)

表 1.1 常用导电材料的电阻率与温度系数

材料名称	电阻率 ($\Omega \cdot m$) ($20^\circ C$)	电阻率温度系数 α ($20^\circ C$)
银	1.59×10^{-8}	0.00380
铜	1.69×10^{-8}	0.00393
铝	2.65×10^{-8}	0.00410
钨	5.48×10^{-8}	0.00450
铁	9.78×10^{-8}	0.00500
铂	1.05×10^{-7}	0.00300
锡	1.14×10^{-7}	0.00420
铅	2.19×10^{-7}	0.00390
锰铜	$(4.2 \sim 4.8) \times 10^{-7}$	—
康铜	$(4.8 \sim 5.2) \times 10^{-7}$	—
镍铬	$(1.0 \sim 1.2) \times 10^{-6}$	0.00013

例 1-2 一台电动机的线圈由直径为 $1.13mm$ 的漆包铜线绕成, 测得在 $20^\circ C$ 时电阻为 1.64Ω , 求共用了多长的导线?

$$\text{解: } s = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} \times (1.13 \times 10^{-3})^2 = 1.003 \times 10^{-6} m^2$$

$$l = R \frac{S}{\rho} = 1.64 \times 1.003 \times 10^{-6} / (1.69 \times 10^{-8}) = 97m$$

2) 电阻元件的伏安关系

1826 年, 德国科学家欧姆通过科学实验总结出电阻元件中电流与两端电压之间的伏安关系, 即欧姆定律。表述如下: 电阻中电流的大小与加在电阻两端的电压成正比, 与电阻值成反比。

若电压与电流取关联参考方向时, 如图 1.10(a)所示, 欧姆定律可表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = RI \quad (1-12)$$

若电压与电流参考方向相反, 如图 1.10(b)所示, 欧姆定律可表示为

$$I = -\frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = -RI \quad (1-13)$$

以电阻元件上的电压和电流为直角坐标系中的横坐标和纵坐标, 画出的 $U-I$ 函数特性曲线称为元件的伏安特性。当电阻元件的伏安特性是通过原点的直线(如图 1.11(a)所示)时, 称为线性电阻元件; 反之, 当电阻元件的伏安特性不是通过原点的直线而是一条曲线(如图 1.11(b)所示)时, 称为非线性电阻元件。有关非线性电阻内容将在第 2.7 节中进一步介绍。

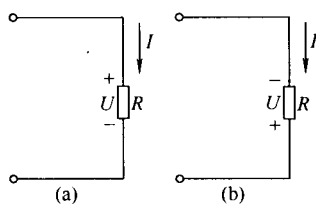


图 1.10 电阻元件的伏安关系

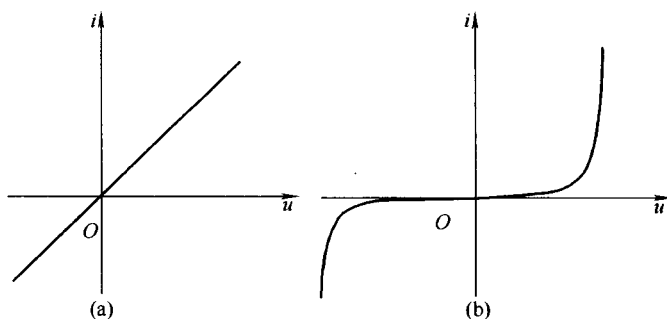


图 1.11 电阻元件的伏安特性

2. 电感元件

许多电工设备、仪器仪表中都有线圈，如变压器线圈、日光灯镇流器线圈等。这些线圈称为电感线圈或电感器。电感是反映磁场能性质的电路参数。电感元件是实际线圈的理想化模型，假想是由无阻导线绕制而成的，用 L 表示，其电路符号如图 1.12 所示。

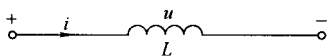


图 1.12 线性电感元件

1) 电感系数

由物理学知识可知，电流 i 通过电感时，由电流 i 产生磁通 ϕ 。对 N 匝线圈，其乘积 $N\phi$ ，称为线圈磁链 ψ 。一般规定磁通 ϕ 和磁链 ψ 的参考方向与电流参考方向之间满足右手螺旋法则，则在这种参考方向下任何时刻线性电感元件的磁链 ψ 与电流 i 成正比，比例系数称为电感系数 L 。即

$$\psi = N\phi = Li \quad (1-14)$$

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (1-15)$$

式中，电感系数 L 的单位为 H(亨[利])；磁链和磁通的单位均为 Wb(韦[伯])。

空心线圈的电感系数 L 是一个常数，与通过的电流大小无关。这种电感称为线性电感。线性电感的大小只与线圈的形状、尺寸、匝数，以及周围物质的导磁性能有关。线圈的截面面积越大，匝数越密，电感系数越大。

2) 电感元件的伏安关系

根据电磁感应定律，当电流 i 随时间 t 变化时，磁链、磁通也会发生变化。同时在电感

线圈两端便会产生感应电动势 e_L

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1-16)$$

那么在电感元件两端便有感应电压 u_L ，若电压 u_L 与电流 i 参考方向一致(如图 1.12 所示)，其伏安关系为

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-17)$$

即电感两端电压与通过电流的变化率成正比。

3. 电容元件

1) 电容

电容元件(用 C 表示)通常由用绝缘介质隔开的两块金属板组成。这种结构的电容称为平板电容，中间的绝缘材料称为电介质，如图 1.13(a)所示。实际的电容元件忽略介质及漏电损耗就是理想电容元件。

当在电容元件两端加上电源时，两块极板上便聚集起等量的正、负电荷，如图 1.13(b)所示。其电荷量 q 与外加电压 u 之间有确定的函数关系。对于线性电容元件， q 、 u 之间的关系为

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-18)$$

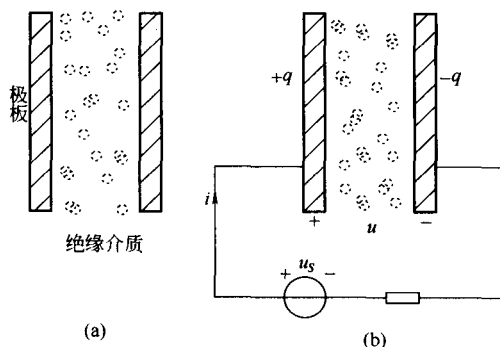


图 1.13 平板电容器

式中， C 为电容元件的电容量，单位为 F(法[拉])。

电容量 C 的大小与两端电压 u 无关，仅与电容器元件的形状、尺寸及电介质有关。如平板电容器的电容量 C 为

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1-19)$$

式中， A 为两极板正对面积， d 为两平行极板间距离， ϵ 为电介质的介电常数。

2) 电容元件的伏安关系

如图 1.14 所示电容元件，若所加电压 u 随时间 t 变化，则电容 C 极板上的电荷量 q 也随时间变化，根据电流定义，这时电容上便有电流通过。若电流 i 与电压 u 取关联参考方向，则

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-20)$$

即通过电容的电流与电容两端电压的变化率成正比。

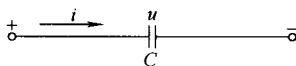


图 1.14 线性电容元件

1.3 电气设备的额定值及电路的工作状态

1.3.1 电气设备的额定值

为了保证电气设备在使用年限内安全、可靠运行，对其电压、电流、功率设定了一个限额值，这个限额值就称为电气设备的额定值。例如，“220V、60W”的白炽灯，“380V、4kW”的电动机等。大多数电气设备的使用寿命与绝缘材料的耐热性能及绝缘强度有关，因此电气设备的额定值主要有额定电流 I_N 、额定电压 U_N 、额定功率 P_N 。

1. 额定电流 I_N

当电气设备中通过工作电流时，由于电气设备本身有电阻，会产生热量，使电气设备温度升高。如果通过的电流过大，会导致温度过高，使绝缘材料因过热而损坏。为使电气设备工作温度不超过其最高允许温度，对电气设备长期运行时的最大容许电流设定了一个限制值，该限制值便是电气设备的额定电流 I_N 。

2. 额定电压 U_N

如果电气设备绝缘材料两端的电压过高，绝缘材料会因承受过大的电场强度而击穿，导致电气设备损坏。为了限制电气设备的电流及限制绝缘材料承受的电压，允许加在各电气设备上的电压也有一个限值，该限值便是电气设备的额定电压 U_N 。

由于供电电压有一系列电压等级标准，如交流用 330kV、220kV、110kV、35kV、10kV、660V、380V、220V 等；直流用 660V、220V、110V 等；蓄电池为 6V、12V、24V 等；干电池为 1.5V、3V、6V 等，因此电气设备的额定电压应与供电电压等级相吻合。

3. 额定功率 P_N

额定功率是指电气设备正常运行时的输入功率或输出功率，对电阻性负载而言

$$P_N = U_N I_N = I_N^2 R = \frac{U_N^2}{R} \quad (1-21)$$

当电气设备工作电流、电压、功率等于额定值时，称满载；低于额定值时称轻载或欠载；高于额定值时称超载(或过载)。轻载不能充分利用电气设备能力，而超载会引起电气设备损坏或降低使用寿命。额定值通常标于铭牌上，使用时必须注意，不应使实际值超过额定值，并且尽量使电气设备工作在满载状态。例如，白炽灯会因电压过高或电流过大而