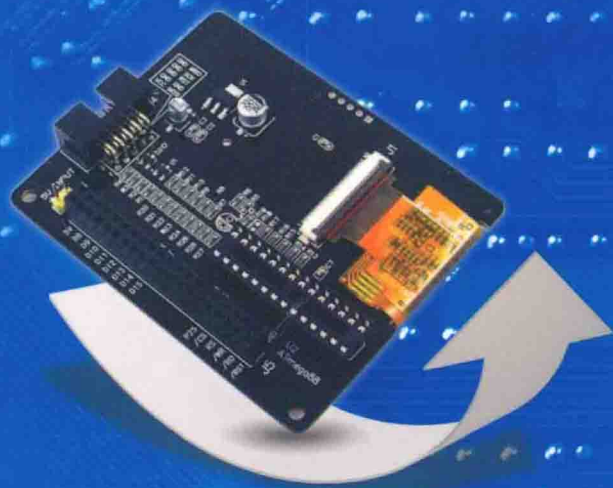




高职高专电气及电子信息专业技能型规划教材

电路分析与 应用基础

祁鸿芳 主 编
张维玲 余正洋 副主编



赠送
电子课件



清华大学出版社

高职高专电气及电子信息专业技能型规划教材

电路分析与应用基础

祁鸿芳 主 编
张维玲 余正洋 副主编

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和教学特点编写的。参考学时范围为 90~100 学时(含实践性环节)。根据高职高专教学以“必须够用”为度的原则,本书讲述了电路分析的基础知识以及相关的应用。全书共分 12 章,内容有:电路的基本概念和定律,直流电阻电路的分析,电路定理,正弦交流电路的稳态分析,网络函数的频率特性与谐振电路,互感电路和理想变压器,三相电路,非正弦周期电流电路稳态分析,线性动态电路的时域分析,二端口网络,磁路和铁心线圈,以及电路实验指导。每章均有与本章知识有关的应用实例,并给出了以培养学生学习兴趣和提高综合能力为目的的实训项目。

本书可作为高等专科院校、高等职业院校、成人高校、本科院校举办的二级职业技术学院及民办高校的电气自动化、电力系统自动化、控制类等电类专业专科学子学习的教材,也可作为电类各专业自学者用书,亦可供有关专业工程技术人员和高校老师参考。

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

电路分析与应用基础/祁鸿芳主编;张维玲,余正洋副主编. —北京:清华大学出版社,2011.9
(高职高专电气及电子信息专业技能型规划教材)

ISBN 978-7-302-26271-8

I. ①电… II. ①祁…②张…③余… III. ①电路分析—高等职业教育—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 141707 号

责任编辑:石 伟 郑期彤

装帧设计:山鹰工作室

责任校对:周剑云

责任印制:何 芊

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:北京季蜂印刷有限公司

装 订 者:三河市李旗庄少明印装厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:22.75 字 数:546 千字

版 次:2011 年 9 月第 1 版 印 次:2011 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:39.00 元

产品编号:039773-01

前 言

本书是为适应 21 世纪高职高专教育教学内容和课程体系改革的需要而编写的,是在 2006 年出版发行的《电路分析基础》的基础上进一步去粗取精、充实提高写成的。

全书共分为 12 章,内容包括:电路的基本概念和定律,主要讨论了电路及电路模型、介绍了电路中的物理量并引入了参考方向的概念;直流电阻电路的分析,介绍了利用等效变换分析有源网络与无源网络的方法,重点研究了电路的三种分析方法(支路电流法、网孔分析法和节点分析法);电路定理,重点研究了三个基本定理(叠加定理、戴维南定理和诺顿定理);正弦交流电路的稳态分析,主要介绍了正弦量及其相量表示法、正弦电流电路的基本性质和基本规律、功率和正弦稳态电路的计算;网络函数的频率特性与谐振电路,介绍了网络的频率特性,以及串联谐振、并联谐振特性;互感电路和理想变压器,介绍了耦合电感元件、耦合电感电路的分析方法;三相电路,介绍了三相电源及负载的连接、对称三相电路的分析计算及不对称三相电路的特点;非正弦周期电流电路稳态分析,主要介绍了傅里叶级数展开式,非正弦周期电流电路中的有效值、平均功率,及如何用谐波分析法计算非正弦周期电流电路;线性动态电路的时域分析,介绍了时域分析的经典法和三要素法;二端口网络,介绍了二端口网络的定义和最常用的导纳参数、阻抗参数、传输参数和混合参数;磁路和铁心线圈,主要介绍了磁路的基本定理、铁磁物质的磁化情况和铁心线圈模型;电路实验指导,与教学内容配套,为学生做实验提供方便。

本书理论教学约 90~100 学时,第 10 章内容可根据不同专业而取舍。第 11 章内容主要作为 6~8 章用到的相关知识点的相关资料的参考资料。

本书的编写特点为:充分考虑读者对象,在内容上力求做到理论以“必须够用”为原则,着重体现理论的应用性和针对性,注重理论与实际的结合,加强实际应用的内容,侧重于培养学生解决生产实际问题的能力;以实际的认识规律建立模型,阐述理想元件的定义与实际器件的辩证关系;每章均含有与理论相适应的工程应用实例,为理论和方法的学习奠定了实际背景基础;将解题思路融于例题中,以利于提高学生分析问题和解决问题的能力;每章均配置了习题,书后配有参考答案供学生参考;增加了与教学内容配套的实验指导环节,以利于提高学生的动手能力;每章后面的小结对全章内容做了比较系统和完整的归纳,便于学生更好地理解 and 掌握全章内容。

本书由祁鸿芳任主编,张维玲、余正洋任副主编,秦玉娟为参编。其中祁鸿芳编写第 2~4 章,张维玲编写第 1、9、10 章,余正洋编写第 6、7、12 章,秦玉娟编写第 5、8、11 章及各章习题参考答案。祁鸿芳负责全书的统稿。

限于编者水平,错误和不恰当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。在此,对关心本书修改工作的所有同志深致谢意。

编 者

目 录

第 1 章 电路的基本概念和定律	1	2.2.1 两种电源模型的等效 变换	39
1.1 电路和电路模型	1	2.2.2 电压源支路的串并联	40
1.1.1 电路	1	2.2.3 电流源支路的串并联	42
1.1.2 电路模型	2	2.3 支路电流法	44
1.2 电路的基本物理量	3	2.3.1 支路电流法的定义和 方程	45
1.2.1 电流	4	2.3.2 支路电流法的步骤	46
1.2.2 电压、电位、电动势及其参考 方向	5	2.4 网孔分析法和回路分析法	47
1.2.3 电功率和电能	8	2.4.1 网孔分析法的定义和 方程	47
1.3 电阻元件与欧姆定律	9	2.4.2 网孔分析法的计算步骤	48
1.3.1 电阻元件	9	2.4.3 回路分析法	49
1.3.2 线性电阻元件与欧姆 定律	10	2.4.4 含受控源的电路分析	51
1.3.3 线性电阻元件的功率和 能量	11	2.5 节点分析法	51
1.4 基尔霍夫定律	12	2.5.1 节点分析法的定义及 方程	51
1.4.1 几个常用名词	12	2.5.2 节点分析法的计算步骤	53
1.4.2 基尔霍夫电流定律	13	2.5.3 电路中含理想电压源支路的 求解方法	55
1.4.3 基尔霍夫电压定律	14	2.5.4 含受控源电路的节点分析 方法	55
1.5 独立电源	15	2.5.5 单节点偶电路分析(弥尔曼 定理)	56
1.5.1 独立电压源	15	2.5.6 几种分析方法的比较	57
1.5.2 独立电流源	17	本章小结	57
1.6 受控电源	20	习题	59
1.6.1 受控电源的定义	20	第 3 章 电路定理	64
1.6.2 受控电源的类型	20	3.1 叠加定理与齐次定理	64
本章小结	23	3.1.1 叠加定理的内容	64
习题	24	3.1.2 用叠加定理分析含受控源的 电路	66
第 2 章 直流电阻电路的分析	30	3.1.3 齐次定理	67
2.1 无源电阻网络的化简	30	3.2 替代定理	68
2.1.1 等效电路的概念	30	3.3 等效电源定理	70
2.1.2 电阻的串联	31	3.3.1 戴维南定理	70
2.1.3 电阻的并联	32	3.3.2 诺顿定理	73
2.1.4 电阻的串并联	33	3.3.3 最大功率传输定理	75
2.1.5 电阻的三角形连接与星形 连接的等效变换	35	3.4 互易定理	77
2.2 电源模型的等效变换和电源支路的 等效变换	39		

本章小结	79
习题	79
第 4 章 正弦交流电路的稳态分析	83
4.1 正弦量及其三要素	84
4.1.1 正弦量的概念	84
4.1.2 正弦量的三要素	84
4.1.3 正弦量的有效值	87
4.2 正弦量的相量表示法	88
4.2.1 正弦量的旋转矢量	88
4.2.2 正弦量的相量形式	89
4.2.3 正弦量的相量图	90
4.2.4 正弦量的相量运算	91
4.3 基尔霍夫定律的相量形式	92
4.3.1 KCL 的相量形式	92
4.3.2 KVL 的相量形式	92
4.4 电路的元件及其相量形式	93
4.4.1 电感元件和电容元件	93
4.4.2 电阻、电感、电容元件的 相量形式	96
4.5 阻抗和导纳	104
4.5.1 阻抗	104
4.5.2 导纳	107
4.5.3 阻抗的串并联	109
4.6 正弦交流电路中的功率	112
4.6.1 瞬时功率	112
4.6.2 平均功率	113
4.6.3 无功功率	114
4.6.4 视在功率	114
4.6.5 复功率	115
4.7 功率因数的改善及最大功率 传输	118
4.7.1 功率因数的改善	118
4.7.2 最大功率传输	120
4.8 正弦交流电路的稳态计算	121
本章小结	126
习题	128
第 5 章 网络函数的频率特性与谐振 电路	134
5.1 网络函数及频率特性	134
5.1.1 网络函数的定义和分类	134

5.1.2 网络函数的频率特性	135
5.2 RC 电路的频率特性	136
5.2.1 一阶 RC 低通滤波电路	136
5.2.2 一阶 RC 高通滤波电路	137
5.2.3 二阶 RC 带通滤波电路	139
5.3 谐振电路	140
5.3.1 LC 振荡回路	140
5.3.2 RLC 串联谐振电路	141
5.3.3 并联谐振电路	146
5.3.4 实际元件的并联谐振 电路	148
本章小结	151
习题	153
第 6 章 互感电路和理想变压器	155
6.1 耦合电感元件与同名端	155
6.1.1 耦合线圈的自感和互感	155
6.1.2 耦合线圈的总磁链	157
6.1.3 同名端	157
6.1.4 耦合线圈的自感电压和 互感电压	158
6.1.5 耦合电感元件的电路 模型	159
6.1.6 耦合电感的相量模型	159
6.2 互感的去耦等效电路	161
6.2.1 耦合电感串联的去耦 等效	161
6.2.2 耦合电感并联的去耦 等效	162
6.2.3 单侧连接时的去耦等效	163
6.3 含耦合电感的正弦稳态电路 分析举例	164
6.4 理想变压器	168
6.4.1 理想变压器的模型及电压、 电流关系	168
6.4.2 理想变压器的特性	169
本章小结	171
习题	171
第 7 章 三相电路	173
7.1 对称三相电源及其连接	173
7.1.1 对称三相电源	173
7.1.2 对称三相电源的连接	175

7.2 三相负载的连接	177	9.3.1 RC 电路在直流激励下的零 状态响应	225
7.2.1 星形连接	177	9.3.2 RL 电路在直流激励下的零 状态响应	227
7.2.2 三角形连接	178	9.4 一阶电路的全响应及三要素法	229
7.3 对称三相电路的计算	182	9.4.1 一阶电路的全响应	230
7.4 不对称三相电路的概念	184	9.4.2 分析一阶电路全响应的 三要素法	232
7.5 三相电路的功率	188	9.5 RLC 串联电路的动态分析	237
7.5.1 有功功率、无功功率、视在 功率	188	9.5.1 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ (过阻尼 情况)	238
7.5.2 对称三相电路中的瞬时 功率	189	9.5.2 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ (临界阻尼 情况)	239
7.5.3 三相功率的测量	190	9.5.3 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ (欠阻尼 情况)	240
本章小结	192	本章小结	241
习题	194	习题	242
第 8 章 非正弦周期电流电路稳态 分析	198	第 10 章 二端口网络	247
8.1 非正弦周期电流	198	10.1 二端口网络的概念	247
8.2 非正弦周期函数展开成傅里叶 级数	199	10.2 二端口网络的方程和参数	248
8.2.1 傅里叶级数的展开形式	199	10.2.1 导纳参数方程	248
8.2.2 对称波形的傅里叶级数	202	10.2.2 阻抗参数方程	250
8.3 非正弦周期电量的有效值和平均 功率	206	10.2.3 传输参数方程	253
8.3.1 有效值	206	10.2.4 混合参数方程	256
8.3.2 平均值	207	10.3 无源二端口网络的等效电路	258
8.3.3 非正弦周期电流电路的平均 功率(有功功率)	208	10.3.1 T 型等效电路	258
8.4 非正弦周期电流电路的稳态 分析	209	10.3.2 Π 型等效电路	259
本章小结	213	本章小结	260
习题	214	习题	261
第 9 章 线性动态电路的时域分析	216	* 第 11 章 磁路和铁心线圈	264
9.1 换路定律	216	11.1 磁路的基本物理量及性质	264
9.1.1 过渡过程的概念	216	11.1.1 磁感应强度	264
9.1.2 换路定律的内容	217	11.1.2 磁通	265
9.1.3 初始值的计算	218	11.1.3 磁导率	265
9.2 一阶电路的零输入响应	219	11.1.4 磁场强度	266
9.2.1 RC 电路的零输入响应	220	11.1.5 磁场的基本性质	266
9.2.2 RL 电路的零输入响应	222	11.2 铁磁物质的磁化曲线	266
9.3 一阶电路的零状态响应	225	11.2.1 铁磁物质的磁化	267

11.2.2	磁化曲线	267
11.3	磁路和磁路定律	269
11.3.1	磁路	269
11.3.2	磁路的基本定律	270
11.3.3	磁路和电路的类比和区别	272
11.4	交变磁通磁路	273
11.4.1	磁损耗	273
11.4.2	线圈电压与磁通的关系	274
11.4.3	正弦电压作用下磁化电流的波形	275
11.4.4	正弦电流作用下磁通的波形	276
11.5	交流铁心线圈	277
11.5.1	不考虑线圈电阻及漏磁通的电路模型	277
11.5.2	考虑线圈电阻及漏磁通的电路模型	278
	本章小结	279
	习题	281

第12章 电路实验指导 283

12.1	电路实验须知	283
12.1.1	实验课的目的和要求	283
12.1.2	实验的步骤	284
12.1.3	实验中的几个问题	285
12.2	实际操作实验内容	286
12.2.1	元件特性的伏安测量	286
12.2.2	基尔霍夫定律的验证及电位的测定	289
12.2.3	电源的等效变换	291
12.2.4	线性电路的叠加定理、齐次定理的验证	295

12.2.5	戴维南定理和诺顿定理的验证	297
12.2.6	用三表法测量交流电路的参数	300
12.2.7	日光灯电路及功率因数的提高	303
12.2.8	一阶电路的时域响应	306
12.2.9	RLC串联谐振电路	311
12.2.10	二端口网络测试	314
12.2.11	三相电路的电压、电流及功率的测量	317
12.3	虚拟仿真实验内容	321
12.3.1	用EWB仿真工具进行串并联电路和基尔霍夫定律的分析	321
12.3.2	用EWB仿真工具进行直流电路中替代定理和节点电压的仿真分析	323
12.3.3	用EWB仿真工具进行交流电路的仿真分析	326
12.3.4	用EWB仿真工具进行谐振电路的仿真分析	329
12.3.5	用EWB仿真工具进行一阶动态电路分析	333
12.3.6	用EWB仿真工具进行戴维南定理和诺顿定理的研究	337
12.3.7	用EWB仿真工具实现二端口参数的测量	339
12.3.8	用EWB仿真工具进行三相电路分析	341

习题参考答案	344
--------	-----

参考文献	352
------	-----

第 1 章 电路的基本概念和定律

本章要点

- 了解电路、电路模型及理想电路元件的概念。
- 深刻理解电流、电压、电功率和电能的物理意义，牢固掌握各量之间的关系式，深刻理解参考方向的概念。
- 牢固掌握基尔霍夫电流定律、基尔霍夫电压定律和电路元件(电阻元件、电压源、电流源)的电压电流关系。
- 掌握受控源的概念，能进行将含受控源不含独立源的二端电阻网络等效为一个电阻简单电路的计算。

技能目标

- 掌握线性电阻、非线性电阻元件伏安特性的测绘。
- 会用电压表和电流表判断电压和电流的方向。
- 通过实验验证基尔霍夫定律，会测量直流电路中的电流、电压及电位。

主要理论及工程应用导航

本章介绍电路模型和理想电路元件，其中包括电阻、独立电源和受控电源。引进了电流、电压的参考方向的概念。研究与电路连接方式有关的基本定律——基尔霍夫定律，它是集总电路的基本定律，包括电流定律和电压定律。基尔霍夫定律与构成电路的元件性质无关。这些电路的基本概念及电路定律是研究一切电路的电磁现象和进行定量计算的依据和出发点，为后面分析各种电工电子电路奠定了必要的基础。

随着社会的不断进步和科学技术的飞速发展，电作为一种优越的能量形式和信息载体成为当今经济建设和社会生活中不可或缺的重要部分。电的作用变得越来越大，它渗透到了人类生活的每一个角落。对于人类来说，电是如此的重要，又是如此的神奇。因此，作为当今电气类专业的大学生，更有必要学习电的相关概念和知识。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路

电与现代社会息息相关，在人们的生产、生活中几乎无处不在。电的作用是通过具体的电路实现的。所谓实际电路，是由用电设备或电器元件用导线按一定的方式连接而成的电流的通路。

实际的电路千差万别,种类繁多。尽管各种电路的复杂程度相异,完成的功能亦不相同,但它们都是由电源或信号源、用电设备(又称负载)和中间环节这三部分构成的。电路中电源或信号源的作用是将其他形式的能量转化为电能或产生信号并向负载输出;用电设备(负载)的作用是将电能转化为人们需要的其他形式的能量或信号;而中间环节(包括连接导线、开关等)用于将电源和负载相连,并加以控制,构成电流的通路以传输电能。如一个简单的手电筒电路,其电源为干电池,它将化学能转化为电能并提供给负载;手电筒的负载为小灯泡,它将电能转化为光能供人们使用;手电筒的金属外壳或金属连线起着连接导线的作用并附有开关,以便根据需要形成电流的通路,从而使电能从电池传送到灯泡。

不同的电路具有不同的功能。实际电路可实现如下功能之一:完成能量的转换、传输和分配,例如电力系统;实现对某种对象的控制,如电机运行控制电路;对信号进行加工处理,以获取所需的信号,例如通信网络;实现信息的存储及数学运算,如计算机路由等。

1.1.2 电路模型

实际电路的几何尺寸相差甚大。电力系统或通信系统可能跨越省界、国界甚至是洲际,但集成电路的芯片则比指甲还小,在这样大小的芯片上却可能有由成千上万甚至数百万个晶体管相互连接而成的复杂的电路或系统。

电路理论主要研究电路中发生的电磁现象,而用电流、电荷、电压或磁通等物理量来描述其中的过程。电路理论的目标是计算电路中各器件的端电流和端子间的电压,而一般不涉及器件内部发生的物理过程。电路理论中有一个重要的假设,即当构成电路的器件以及电路本身的尺寸远小于电路工作时的电磁波的波长时,或者说若电磁波通过电路的时间可认为是瞬时的,则电磁场理论和实践均证明在任意时刻流入各器件任一端子的电流和任两个端子间的电压都将是单值的量。在这种近似的条件下,我们用足以反映器件电磁性质的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件。这种理想电路元件称为集总元件或集总参数元件。

理想电路元件是具有某种确定的电磁性质的假想元件。它是一种理想化的模型并具有精确的数学定义。理想电路元件是通过端子与外部相连接的,而根据端子的数目可分为二端、三端、四端元件等。我们认为在任何时刻,从具有两个端子的集总元件的一个端子流入的电流将恒等于从另一端子流出的电流,并且元件的端电压是单值的。对于多于两个端子的集总元件来说,在任何时刻流入任一端子的电流和任意两端之间的电压是单值的量。

实际电路中各器件的端子是通过导线相互连接起来的,而在电路模型中各理想元件的端子是用“理想导线”(即认为它们的电阻为零)连接起来的。电路理论中我们用抽象的理想元件及其组合近似地代替实际的器件,从而构成了与实际电路相对应的电路模型。

由集总元件构成的电路称为集总电路,或具有集总参数的电路。从电磁场理论的观点,集总电路的尺寸可以完全忽略不计。如果实际电路的尺寸不远小于工作时电磁波的波长,则这种电路便不能按集总电路来处理。本书正文只考虑集总电路。

本书后面将分别介绍各种理想电路元件(今后涉及的一般均为理想元件,故往往略去

“理想”二字), 如二端电阻元件、电容元件、电感元件等。

图 1-1(a)所示为一个简单的实际电路, 其中有一个电源(干电池)、一个负载(小灯泡)和两根连接导线, 其电路模型如图 1-1(b)所示, 电阻元件 R 表示小灯泡, 干电池用电压源 U_S 和电阻元件 R_S 来表示, 而连接导线在电路模型中用相应的理想导线或线段来表示。

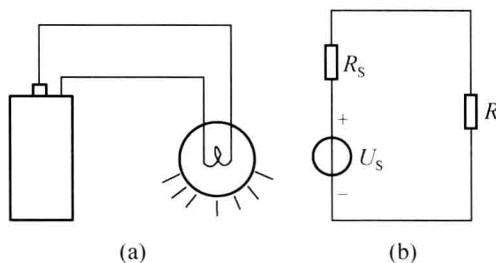


图 1-1 电路模型

应当注意电路元件与实际器件的区别。例如实验室或电子仪器中用的各式各样的电阻器、电容器、线圈、晶体管等, 一般都可以用电路元件及它们的组合来模拟, 但两者之间不完全等同。通常在一定的工作条件下, 根据实际器件的主要物理功能, 可按不同的精确程度用电路元件及它们的组合来予以模拟。例如, 在工作频率比较低时, 一个线圈就可以用电阻和电感元件的串联组合构成的模型来描述。当频率较高时, 线圈的绕线之间的电容效应就不容忽视, 这种情况下表征这个线圈的较精确的模型还应当包含电容元件。总之在不同条件下, 同一实际器件可能要用不同的电路模型来模拟。本书将不涉及如何建立模型的问题。

今后我们所说的电路一般均指由理想电路元件构成的抽象电路而非实际电路。大量实践充分证实只要电路模型取得恰当, 按抽象电路分析计算所得结果与对应的实际电路中测量所得结果基本上是一致的。当然, 如果电路模型选择得不好, 则会造成很大误差, 有时甚至还可能导致自相矛盾的结果。在某种意义上可以说电路理论是一门相当精确的工程学科, 这是因为按理论所预测的电路性状一般与实际情况是十分接近的。

电路理论是一门研究网络分析和网络综合或设计的基础工程学科, 它涉及的面非常广泛。本书的主要内容是介绍电路理论的入门知识, 其重点是电路的分析, 即探讨电路的基本定律和定理, 并讨论电路的各种计算方法。电路中的物理量主要有电流、电荷、电压和磁通。此外, 能量和功率也很重要。无论简单的还是复杂的实际电路都可以通过几种理想电路元件所构成的抽象电路充分地描述。分析和计算这种电路的基本定律也只有几个。研究电路分析的一个重要目标往往是为了进行电路的设计, 并力图使得设计电路的性能良好, 同时又要设法降低其成本, 提高可靠性等。

1.2 电路的基本物理量

描述电路性能的物理量可分为基本变量和复合变量两类。电流、电压是电路分析中最常用的两个基本变量, 有时也用电荷、磁通(或磁链)作基本变量; 复合变量包括功率和能量。一般它们都是时间的函数。

1.2.1 电流

1. 电流概述

大量电荷有规则的定向运动形成电流。为表征电流的强弱,引入电流强度的概念,它被定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量,用符号 i 表示,即

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

式中, dq 是在极短时间 dt 内通过某处的电荷量。

电流强度通常简称为电流。这样,电流这一术语既表示一种物理现象,同时也代表一种物理量。

电流是有流向的,习惯规定正电荷的运动方向为电流的正方向。一般情况下,电流是时间 t 的函数,以小写字母 i 表示,称为瞬时电流。当电流的大小和方向为恒定时,称为直流电流,并可用大写字母 I 表示。周期性变动且平均值为零的电流称为交变电流(alternate current),简称为交流(AC)。

本书中物理量采用国际单位制(SI)。电流的 SI 单位是安[培](ampere),符号为 A;电荷量的单位是库[仑](coulomb),符号为 C。若每秒通过某处的电荷量为 1C,则电流为 1A。将电流的 SI 单位冠以 SI 词头(见表 1-1),即可得到电流的十进倍数单位和分数单位,常用的有 kA(千安)、mA(毫安)、 μ A(微安)等。

表 1-1 常用 SI 词头

因数	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
名称	吉	兆	千	百	十	分	厘	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	h	da	d	c	m	μ	n	p

2. 电流的参考方向

电流在导线中或一个电路元件中流动的实际方向只有两种可能。但在具体电路中,电流的实际方向常常随时间变化;即使不随时间变化,某段电路中的电流的实际方向有时也难以预先断定,因此,往往很难在电路中标明电流的实际方向。由于这些原因,引入了电流“参考方向(reference direction)”的概念。

在图 1-2 中先选定其中某一个方向作为电流的方向,这个方向叫做电流的参考方向(图中用实线表示)。当然所选的方向并不一定就是电流实际的方向(图中用虚线表示)。把电流看成代数量。若电流的参考方向与它的实际方向一致,则电流为正值($i > 0$);反之,若电流的参考方向与它的实际方向相反,则电流为负值($i < 0$),如图 1-2 所示。于是,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方向。

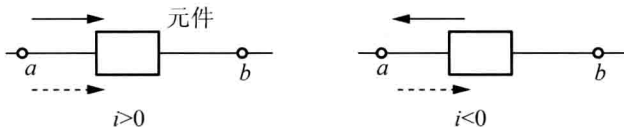


图 1-2 电流的参考方向

电流的参考方向除用箭头在电路图上表示外,还可用双下标表示。例如,对于图 1-3(a) 中的电流 i ,可用 i_{ab} 表示其参考方向为由 a 指向 b (见图 1-3(b)),也可用 i_{ba} 表示其参考方向由 b 指向 a (见图 1-3(c))。显然,两者相差一个负号,即 $i_{ab} = -i_{ba}$ 。

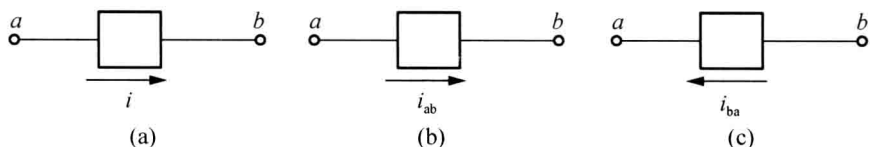


图 1-3 电流参考方向的表示

1.2.2 电压、电位、电动势及其参考方向

1. 电压

电荷移动就形成了电流,那么电荷在什么条件下才能移动呢?由物理学可知,处于电场中的电荷由于受到电场力的作用便可以移动,这样电场力对电荷就做了功。为衡量电场力做功的能力,引入“电压”这一物理量,并定义单位正电荷在电场力的作用下由 a 点转移到 b 点时减少的电能为电路中 a 、 b 两点间的电压(voltage),用符号 u_{ab} 表示,即

$$u_{ab} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

式中, dq 为由 a 点转移到 b 点的电荷量; dW 为转移过程中电荷减少的电能。

电压即表明单位正电荷在电场力作用下转移时减少的电能,减少电能体现为电位的降低(从高电位点降低到电位点),所以电压的方向是电位降低的方向。

2. 电位

若任取一点 o 作为参考点,则由某点 a 到参考点 o 的电压 u_{ao} 称为 a 点的电位(potential),用 φ_a 表示。电位参考点可以任意选取,通常选择大地、设备外壳或接地点作为参考点。在一个连通的系统中只能选择一个参考点。参考点电位为零。

电压与电位的关系为: a 、 b 两点之间的电压等于这两点电位之差,即

$$u_{ab} \stackrel{\text{def}}{=} \varphi_a - \varphi_b \quad (1-3)$$

式中, φ_a 为 a 点电位; φ_b 为 b 点电位。所以,电压和电位差一般可以认为意义相同,知道电路上各点电位后,便可求得各段的电压。电位的量值与参考点的选择有关,在电路选定参考点后,也可由电路各段电压求得电路中各点的电位。例如图 1-4 中,已知 $u_{ab} = 6\text{V}$, $u_{bc} = 2\text{V}$,若选 c 点为参考点,则 $\varphi_c = 0\text{V}$, $\varphi_b = \varphi_c + u_{bc} = 2\text{V}$, $\varphi_a = \varphi_b + u_{ab} = 8\text{V}$ 。

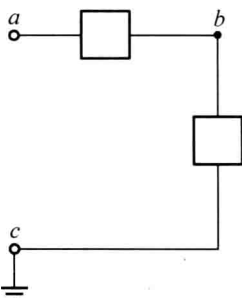


图 1-4 电位的计算

3. 电动势

在电场力作用下,正电荷一般总是从高电位点向低电位点运动。为了形成连续的电流,

在电源中正电荷必须从低电位点移到高电位点。这就要求在电源中有一个电源力作用在电荷上,使之逆电场力方向运动,并把其他能量转换成电能。例如在发电机中,当导体在磁场中运动时,导体内便出现这种电源力;在电池中,电源力存在于电极间。电动势(electromotive force)表明了单位正电荷在电源力作用下转移时增加的电能,用符号 e 表示,即

$$e \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW_s}{dq} \quad (1-4)$$

式中, dq 为转移的电荷; dW_s (下标 S 表示电源) 为转移过程中电荷增加的电能。增加电能体现为电位的升高(从低电位点到高电位点), 所以电动势的方向是电位升高的方向。

如果用正(+)极性表示电源的高电位端, 用负(-)极性表示其低电位端, 如图 1-5 所示, 则电动势 e 的方向是从负极性指向正极性, 而电压 u 的方向是从正极性指向负极性, 两者刚好相反。由能量守恒定律得知: 若不考虑电源内部还可能其他形式的能量转换, 则电源电动势 e 在量值上应当与其两端间的电压 u 相等。当电源不与其他元件连接时, 电源中没有电流, 因而电源内不存在能量转换。这时电源处于开路状态。显然, 电源开路时的电压在量值上等于电动势。

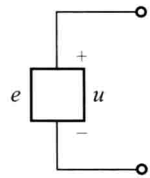


图 1-5 电源的电动势和电压

如上所述, 电动势与电压的物理意义并不相同, 但就其对外部的效果而言, 一个电源具有方向从负极性指向正极性的电动势和具有方向从正极性指向负极性量值相同的电压, 二者是没有区别的。所以近代电路理论中逐渐省略了电动势这个量。但在专业课中还广泛地应用电动势的概念, 所以本书仍作了阐述。

按电压和电动势随时间变化的情况, 可将它们分为直流与交流两种。如果电压和电动势的量值与方向都不随时间而变动, 则称为直流电压和电动势, 分别用符号 U 和 E 表示。量值与方向随时间变化的电压, 称为时变电压, 一般用符号 u 表示。量值与方向随时间作周期性变化且平均值为零的时变电压, 称为交流电压。

电压、电位、电动势的 SI 单位都是伏[特](volt), 符号为 V。当 1C 的电荷在电场力或电源力作用下由一点转移到另一点转换(减少或增加)的电能为 1J 时, 则该两点间的电压或电动势为 1V, 其十进倍数和分数单位常用的有 kV(千伏)和 mV(毫伏)、 μV (微伏)等。

4. 电压、电位、电动势的参考方向

与电流类似, 在分析与计算电路时, 把电压、电动势看作一个具有正负值的代数量, 也必须事先规定某一方向作为其数值为正的方向, 称为参考方向。参考方向可任意规定, 一般有以下三种表示方式。

(1) 采用参考极性表示。在电路图上标出正(+)、负(-)极性, 如图 1-6(a)所示, 当表示电压的参考方向时, 标以电压符号 u , 这时正极指向负极的方向就是电压的参考方向; 当表示电动势的参考方向时, 标以电动势符号 e , 这时负极指向正极的方向就是电动势的参考方向。

(2) 采用箭头表示。用箭头表示在电路图上, 并标以电压符号 u 或电动势符号 e 。对于同一个处于开路状态的电源设备, 它的电动势与电压方向相反而量值相等。当用箭头表示参考方向时, 若选择电动势和电压的箭头方向相反, 如图 1-6(b)所示, 则有 $e = u$; 若选择电动势和电压的箭头方向相同, 如图 1-6(c)所示, 则有 $e = -u$ 。

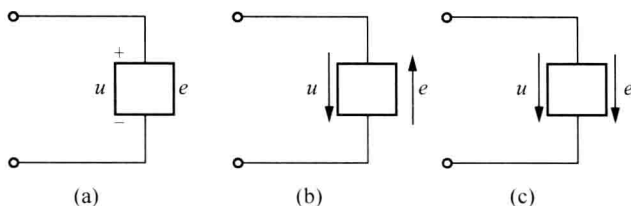


图 1-6 电压和电动势的参考方向

(3) 采用双下标表示。如 u_{ab} 表示电压的参考方向是由 a 指向 b ； e_{ba} 表示电动势的参考方向是由 b 指向 a 。

5. 电流和电压的关联参考方向

一般而言，电流和电压的参考方向可以独立地任意指定。若在选取两者的参考方向时，使电流从电压的“+”极流入，从“-”极流出，如图 1-7(a)所示，这种情形称为电流电压的关联参考方向，或称一致的参考方向。相反的情形称为电流电压的非关联参考方向，如图 1-7(b)所示。

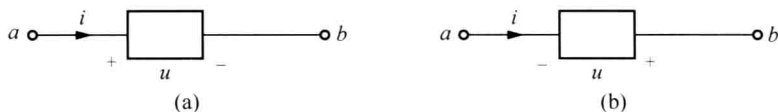


图 1-7 电流和电压的关联参考方向和非关联参考方向

6. 关于参考方向的说明

(1) 电流、电压的方向是客观存在的，但往往难以事先判定。参考方向是人为规定的电流、电压数值为正的方向，在分析问题时需要先规定参考方向，然后根据规定的参考方向列写方程。

(2) 参考方向一经规定，在整个分析计算过程中就必须以此为准，不能变动。

(3) 不标明参考方向而说某电流或某电压的值为正或负是没有意义的。

(4) 参考方向可以任意规定而不影响计算结果，因为参考方向相反时，解出的电流、电压值也要改变正负号，最后得到的实际结果仍然相同。

(5) 在电路分析中，电流电压参考方向的标示可采用关联参考方向，这样做，可使问题的讨论更为方便。此时可在电路图中只标示电流的参考方向，或者只标示电压的参考方向。一般地，在仅标示某一电流(或电压)的参考方向而不加说明的情况下，可默认采用的是关联参考方向。

例 1-1 图 1-8(a)中， $u=5\text{V}$ ；图 1-8(b)中， $u_{ab}=-7\text{V}$ ，试分别比较 a 、 b 两点的电位。

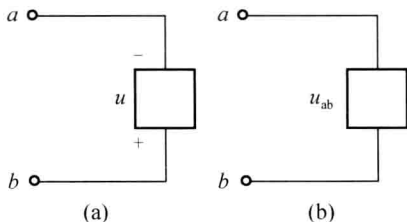


图 1-8 例 1-1 电路

解: 图 1-8(a)中, 参考极性 b 点为正, a 点为负, $u=5\text{V}$, 所以 b 点电位比 a 点电位高 5V 。

图 1-8(b)中, u_{ab} 为 a 点到 b 点的电位降, $u_{ab}=-7\text{V}$, 所以 a 点电位比 b 点电位低 7V 。

1.2.3 电功率和电能

1. 电功率

在电路中, 正电荷 dq 受电场力作用从高电位点 a 流向低电位点 b , 设 ab 间电压为 u , 则根据式(1-2)可知在转移过程中 dq 减少的电能为

$$dW = udq \quad (1-5)$$

减少电能意味着电能转换为其他形式的能量, 被电路吸收(消耗)。电能转换的速率称为电功率, 简称为功率(power)。功率 p 、电能 W 和电路中电压、电流的关系是

$$p = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-6)$$

直流时, 为

$$P = UI \quad (1-7)$$

上述情况中电压方向与电流方向一致。

功率的 SI 单位为瓦[特](watt), 符号为 W 。功率的十进倍数和分数单位常用的有 kW (千瓦)、 MW (兆瓦)和 mW (毫瓦)等。在式(1-6)和式(1-7)中, 如电压单位为 V (伏), 电流单位为 A (安), 则功率单位为 W (瓦)。

进行功率计算时必须注意式(1-6)和式(1-7)可带有正号或负号。当电压和电流的参考方向是关联的, 则式(1-6)和式(1-7)带正号, 即

$$p = ui \text{ 或 } P = UI \quad (1-8)$$

当两者的参考方向是非关联的, 则式(1-6)和式(1-7)带负号, 即

$$p = -ui \text{ 或 } P = -UI \quad (1-9)$$

由式(1-8)和式(1-9)得到的功率为正值时, 表示这部分电路吸收(消耗)功率; 若为负值时, 则表示这部分电路提供(产生)功率(表示其他能量转换为电能的速率), 此功率供给电路的其余部分。

2. 电能

根据式(1-6), 从 t_0 到 t 时间内, 电路吸收(消耗)的电能[量]为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-10)$$

直流时, 为

$$W = P(t - t_0) \quad (1-11)$$

电能的 SI 单位是焦[耳](joule), 符号为 J , 它等于功率 $1W$ 的用电设备在 $1s$ 内消耗的电能。在实用上还采用 kWh (千瓦小时)作为电能的单位, 它等于功率 $1kW$ 的用电设备在 $1h(3600s)$ 内消耗的电能, 简称为 1 度电, 即

$$1\text{kWh}=10^3\text{W}\times 3600\text{s}=3.6\times 10^6\text{J}=3.6\text{MJ}$$

例 1-2 (1) 在图 1-9(a)中, 已知 $U_1=10\text{V}$, $I_1=-3\text{A}$, 求此二端电路的功率, 并说明是吸收功率还是产生功率。

(2) 在图 1-9(b)中, 已知二端电路吸收的功率为 12W , $I_2=3\text{A}$, 求电压 U_2 。

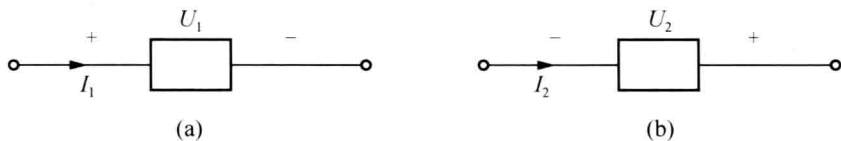


图 1-9 例 1-2 电路

解: (1) 因图 1-9(a)中电压、电流为关联参考方向, 则功率的计算式为

$$P_1=U_1 I_1=10\times(-3)\text{W}=-30\text{W}$$

因 $P_1<0$, 所以该二端电路为产生功率。

(2) 在图 1-9(b)中电压、电流为非关联参考方向, 则功率的计算式为 $P_2=-U_2 I_2$ 由已知得 $P_2=12\text{W}$, 则

$$U_2=-\frac{P_2}{I_2}=-\frac{12}{3}\text{V}=-4\text{V}$$

3. 额定值

各种电气器件(电灯、电烙铁、电阻器等)都有一定的量值限额, 称为额定值, 包括额定电压、额定电流和额定功率。许多器件在额定电压下才能正常、合理、可靠地工作, 电压过高时器件容易损坏, 过低时则功率不足(电灯变暗、电烙铁温度较低等)。使用电气器件时不应超过其额定电流或额定功率, 否则时间稍长就可能因过热而烧坏。由于功率、电压和电流之间有一定的关系, 所以在给出额定值时, 没有必要全部给出。例如对灯泡、电烙铁等通常只给出额定电压和额定功率, 而对于电阻器除电阻值外, 只给出额定功率。

例 1-3 已知某实验室有额定电压 220V 、额定功率 100W 的白炽灯 24 盏, 另有额定电压 220V 、额定功率 4kW 的电炉两台, 都在额定状态下工作。试求: 总功率、总电流和在 2h 内消耗的总电能。

解: 总功率为

$$P=(100\times 24+4000\times 2)\text{W}=10400\text{W}=10.4\text{kW}$$

总电流为

$$I=\frac{P}{U}=\frac{10400}{220}\text{A}\approx 47.3\text{A}$$

总电能为

$$W=Pt=10.4\times 2\text{kWh}=20.8\text{kWh}$$

1.3 电阻元件与欧姆定律

1.3.1 电阻元件

电路是由元件连接组成的, 研究电路时必须了解各电路元件的特性。表示元件特性的