



高等学校电子与电气工程
及自动化专业“十三五”规划教材

电 路 (第三版)

高 贇 黄向慧 编著

E. & E. E. & E.



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

电 路

(第三版)

高 贇 黄向慧 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是在第二版的基础上修订的, 新增了特勒根定理与互易定理等内容。

本书共分 18 章, 其主要内容有: 基本概念与基本定律、电路的等效变换、电路的基本分析方法、电路定理、含运算放大器电路分析、电容元件和电感元件、一阶电路分析、二阶电路分析、正弦量与相量、正弦稳态电路分析、三相电路、耦合电感电路、电路的频率响应、非正弦周期信号电路分析、拉普拉斯变换及其在电路中的应用、电路的矩阵方程、二端口网络和非线性电路简介等。

本书的特点是: 在每章的开始叙述了本章的学习目的以及本章在整个课程中所处的位置, 同时介绍该章的主要内容; 每章的最后总结了本章的基本思想以及应该注意的问题; 注重和物理学及数学课程的衔接, 力争做到低起点, 便于读者自学; 整体思路是从静态电路到动态电路, 再到如何运用数学方法综合处理静态电路和动态电路等。

本书可作为普通高等院校电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、电气和控制类专业的教材, 也可作为有关工程技术人员参考书。

★本书配有电子教案, 需要者可登录出版社网站, 免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

电路/高贇, 黄向慧编著. —3 版. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2015. 8

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3793 -

I. ①电… II. ①高… ②黄… III. ①电路—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 197500 号

策 划 马乐惠

责任编辑 马 琼 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2015 年 8 月第 3 版 2015 年 8 月第 3 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 22.25

字 数 523 千字

印 数 8001~11 000 册

定 价 38.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3793 - 8/TM

XDUP 4085003 - 3

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

高等学校

自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化专业

“十二五”规划教材编审专家委员会名单

主任：张永康

副主任：姜周曙 刘喜梅 柴光远

自动化组

组长：刘喜梅(兼)

成员：(成员按姓氏笔画排列)

韦 力 王建中 巨永锋 孙 强 陈在平 李正明
吴 斌 杨马英 张九根 周玉国 党宏社 高 嵩
秦付军 席爱民 穆向阳

电气工程组

组长：姜周曙(兼)

成员：(成员按姓氏笔画排列)

闫苏莉 李荣正 余健明
段晨东 郝润科 谭博学

机械设计制造组

组长：柴光远(兼)

成员：(成员按姓氏笔画排列)

刘战锋 刘晓婷 朱建公 朱若燕 何法江 李鹏飞
麦云飞 汪传生 张功学 张永康 胡小平 赵玉刚
柴国钟 原思聪 黄惟公 赫东锋 谭继文

项目策划：马乐惠

策 划：毛红兵 马武装 马晓娟

前 言

本书作为高等学校电子与电气工程及自动化专业“十一五”规划教材，于2007年首次出版。作者针对书中的一些不足和缺陷，于2011年对全书进行了完善和修订，几年来本书已经使用于作者所在学校需要开设本课程的所有专业。由于使用专业的增多，“电路”这门课程所涉及的内容以及重点也在扩展与变化；另外，作者和教研室同仁在教学过程中不断地进行教学法方面的研究，使得该课程于2013年获得校级精品课程建设项目支持，于2014年又获得省级精品资源共享课程项目的支持。依托精品课程的建设，需要对本书在讲授与学生学习两个方面进行加强，所以作者和出版社协定，再次对该书进行修订。

为了加强电路理论知识的完整性，新版教材在“电路定理”一章增加了“特勒根定理”和“互易定理”以及对应的例题和作业；为了便于学生更好地消化和运用所学的知识，在有关章节补入了一些例题，并对原书部分例题的解题步骤进行了完善和补充；针对原书“波特图”讲授过程中存在的问题，对该部分的内容进行了重写，并增加了例题和习题；在“ $F(s)$ 的分解”方法中，在保留原有留数法的基础上补充了代数分解法；对全书叙述过程中的不足之处，进行了全面的修改与补充，同时对习题答案做了全面的核对与校正。

除了以上修改和补充外，本书的章节基本保持不变，保留了原版中的习题，对新加课程内容补充了习题。

由于本书适用的专业较多，全书的内容可由选用老师根据专业需求和读者根据实际情况自由取舍。对建议取舍的内容书中用“*”号标出。除“*”所标内容外，本书其余内容计划课时为80学时，且自成体系。

本书第1~2章、第6~8章、第12、15和17章由高赞修订，第5章、第9~11和14章由黄向慧修订，第3~4章由唐丽丽修订，第13和18章由任顺英修订，第16章由赵燕云修订。全书修订工作由高赞组织，并负责统稿和审定。

西安电子科技大学出版社以及策划部的马乐惠老师为本书的修订提供了重要的帮助与支持，作者在此表示衷心感谢。

由于作者的水平有限，书中难免存在不妥之处，恳求读者、专家批评指正。

编著者

2015年6月

第一版前言

电路是普通高等院校强电、弱电类专业的专业基础课,同时也是电类专业学生进入大学后接触到的第一门专业基础课,对该课程内容及其思想掌握的程度将直接影响到学生对后续课程的学习兴趣和今后学习专业课的能力,所以该课程对于电类专业学生是极其重要的。

本课程是建立在“线性代数”、“高等数学”和“大学物理”等基础课程之上的一门专业基础课。所用到的数学知识主要有:线性方程的列写与求解,微分与积分,线性一、二阶常微方程的列写与求解,复数及复数代数方程的列写与求解,拉普拉斯变换, s 域代数方程的列写与求解以及矩阵与矩阵方程等。物理学的基础概念主要有:电压、电流、直流、交流、功率和能量等。因此,建议读者在学习之前或学习过程中能复习上述有关的数学和物理知识,以便更好地理解和学习本课程的有关内容。

电路是由电路元件组成的,当电路中的电源作用(称为激励)时,电路中就会产生电压和电流(称为响应)。在实际的电路中,电压或电流(响应)既可以表示电能,也可以表示各种信息(例如图像和声音等)。另外,如果将激励看做输入,响应看做输出,可以将电路看成电路系统,从电路分析开始就可以逐步建立“系统分析”的思想,为后续课程的学习打下一个很好的基础。

本书共分为17章。第1章讲电路的基本概念与基本定律,它们是分析电路的基础。电路巾存在着两种约束,即元件上的电压、电流约束和元件的连接关系约束,这两种约束是电路分析的依据。第2章讲电路的等效变换,等效的目的是为了简化电路的计算。第3章讲电路的基本分析方法,这些方法是电路中两种约束的具体体现。第4章讲电路定理,电路定理同样有助于电路分析的简化。第5章讲电容和电感元件,它们是电路中储能现象的等效反映,这两种元件的引入使电路的功能更加丰富多彩。第6章讲一阶电路分析,由于描述一个(或可以等效为一个)储能元件的方程是一阶常微方程,所以称为一阶电路。第7章讲二阶电路分析。第8章和第9章讲正弦量与相量以及正弦稳态电路分析,它是动态电路在正弦激励下电路达到稳态时电路的分析方法。引入相量的目的是将正弦量激励的时域电路映射到复数域(或相量域)进行分析,是分析过程的简化。第10章讲三相电路,因为电力系统是三相系统,所以本章要解决三相电路的分析问题。第11章讲耦合电感电路。第12章讲电路的频率响应,频率响应研究正弦激励源的频率变化时响应应随频率的变化规律。第13章讲非正弦周期电路分析,本章解决非正弦周期信号的傅里叶分解以及电路在非正弦周期激励源激励下的响应问题。第14章讲拉普拉斯变换及其在电路中的应用,通过拉普拉斯变换可以将时域求解动态电路微分方程的问题转换为 s 域求解代数方程的问题。第15章讲电路的矩阵方程,列写电路的矩阵方程可以借助于计算机分析大规模电路,这是电路

计算机辅助分析和设计的基础知识。第16章讲二端口网络,它是复杂电路的基本构件之一,分析二端口的端口性能有助于复杂电路的分析与综合。第17章讲非线性电路,该章简要介绍了含有一个非线性电阻元件电路的分析问题,为后续相关课程(特别是模拟电子技术)的学习做了一些准备。

本书除去标有“*”号的选学内容,计划课时为80学时,老师和读者可以根据实际情况自由取舍。

本书第1~7章和第11章由高赟编写,第8~10章由黄向慧编写,第12~17章由刘骏跃编写。全书由高赟组织编写并负责统稿审定。研究生程辉、朱文琦、胡艳华和苗国耀等同学为本书的画图等方面做了许多工作,在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中参考了许多国内外相关资料,在此一并对其作者表示衷心感谢。

西安电子科技大学出版社的马乐惠老师为本书的编写提供了重要的帮助与支持,作者在此表示衷心感谢。

由于作者的水平有限,书中难免有不妥之处,恳求读者、专家批评指正。

编著者

2007年4月

目 录

第 1 章 基本概念与基本定律	1	2.2.1 无源一端口等效电阻的概念	23
1.1 电荷与电流	2	2.2.2 电阻元件的串联与并联	24
1.1.1 电荷的定义和特性	2	2.2.3 含受控源一端口等效电阻的 计算	26
1.1.2 电流的参考方向	3	2.3 电压源、电流源的串联与并联	27
1.1.3 电流的定义	3	2.3.1 电压源的串联与并联	27
1.2 电压	4	2.3.2 电流源的串联与并联	28
1.2.1 电压的定义	4	2.3.3 电压源和电流源的串联与并联	29
1.2.2 电压的参考方向	4	2.4 实际电源模型和等效变换	29
1.3 功率和电能	5	2.4.1 实际电源的两种模型	29
1.3.1 电功率的定义	5	2.4.2 两种电源模型的等效变换	30
1.3.2 电压、电流的关联参考方向	6	2.5 电阻 Y 连接和 Δ 连接电路的 等效变换	32
1.3.3 功率守恒与电能的计算	6	习题	35
1.4 电路元件和电路模型	7	第 3 章 电路的基本分析方法	39
1.4.1 电路元件的集总假设	7	3.1 电路的拓扑关系	39
1.4.2 电路模型	8	3.1.1 图的初步概念	39
1.5 电阻元件和欧姆定律	8	3.1.2 电路模型和图的关系	41
1.5.1 电阻元件和欧姆定律的概念	8	3.2 电路 KCL 和 KVL 方程的独立性	42
1.5.2 线性电阻的特性	8	3.2.1 电路 KCL 方程的独立性	42
1.5.3 电阻元件上的功率与能量	10	3.2.2 电路 KVL 方程的独立性	43
1.6 电压源和电流源	10	3.3 支路电流法	44
1.6.1 电压源的概念与伏安特性	10	3.4 网孔电流法和回路电流法	45
1.6.2 电流源的概念与伏安特性	11	3.4.1 网孔电流法	46
1.6.3 电压源和电流源的功率	12	3.4.2 回路电流法	49
1.7 受控源	12	3.5 结点电压法	51
1.7.1 受控源的定义	12	习题	55
1.7.2 线性受控源	13	第 4 章 电路定理	60
1.8 基尔霍夫定律	14	4.1 线性电路	60
1.8.1 支路、结点和回路的概念	14	4.1.1 线性电路的概念	60
1.8.2 基尔霍夫电流定律	15	4.1.2 线性电路方程的性质	61
1.8.3 基尔霍夫电压定律	16	4.2 叠加定理和齐性定理	61
习题	18	4.2.1 叠加定理	62
第 2 章 电路的等效变换	22	4.2.2 齐性定理	65
2.1 电路等效的概念	22		
2.2 无源一端口的等效电阻	23		

4.3 替代定理	65	7.6.4 冲激响应	123
4.4 戴维南定理和诺顿定理	67	7.7 阶跃响应与冲激响应的关系	124
4.4.1 戴维南定理	67	习题	126
4.4.2 诺顿定理	70	第8章 二阶电路分析	131
* 4.5 特勒根定理	71	8.1 二阶电路的零输入响应	131
* 4.6 互易定理	74	8.1.1 过阻尼响应	132
4.7 最大功率传输条件	75	8.1.2 临界阻尼响应	133
4.8 对偶原理	77	8.1.3 欠阻尼响应	134
习题	79	8.2 二阶电路的阶跃响应和冲激响应	136
第5章 含运算放大器电路分析	83	8.2.1 二阶电路的阶跃响应	136
5.1 运算放大器的电路模型	83	8.2.2 二阶电路的冲激响应	137
5.2 含理想运放的电阻电路分析	85	* 8.3 一般二阶电路	139
5.2.1 比例运算电路	85	习题	141
5.2.2 加法运算与减法运算电路	86	第9章 正弦量与相量	144
习题	88	9.1 正弦量	144
第6章 电容元件和电感元件	91	9.1.1 正弦量的三要素	144
6.1 电容元件	91	9.1.2 有效值的定义、正弦量的有效值	145
6.1.1 电容元件及其电压、电流关系	91	9.1.3 正弦量的相位差	146
6.1.2 电容元件上的功率和能量	93	9.2 正弦量的相量表示	147
6.1.3 电容元件的串、并联	94	9.2.1 复数	147
6.2 电感元件	95	9.2.2 相量的定义	149
6.2.1 电感元件及其电压、电流关系	95	9.2.3 时域运算和相量运算的关系	150
6.2.2 电感元件上的功率和能量	97	9.3 三种基本电路元件和电路定律的相量关系	152
6.2.3 电感元件的串、并联	98	9.3.1 电阻元件的相量关系	152
习题	99	9.3.2 电感元件的相量关系	153
第7章 一阶电路分析	103	9.3.3 电容元件的相量关系	154
7.1 动态电路与换路定则	103	9.3.4 KCL、KVL 的相量形式	154
7.1.1 动态电路和状态变量	104	9.4 阻抗和导纳	156
7.1.2 动态电路的换路定则	105	9.4.1 阻抗和导纳的定义	156
7.2 一阶电路的零输入响应	107	9.4.2 阻抗和导纳的等效变换	158
7.3 一阶电路的零状态响应	111	9.5 阻抗(导纳)的串联和并联	158
7.4 一阶电路的全响应与三要素法	114	9.5.1 阻抗的串联	159
7.4.1 一阶电路的全响应	114	9.5.2 阻抗(导纳)的并联	159
7.4.2 三要素法	115	习题	161
7.5 一阶电路的阶跃响应	117	第10章 正弦稳态电路分析	164
7.5.1 单位阶跃函数	117	10.1 正弦稳态电路的分析方法	164
7.5.2 阶跃函数在电路中的应用	118	10.2 正弦稳态电路的功率	168
7.5.3 一阶电路的阶跃响应	119	10.2.1 瞬时功率	169
7.6 一阶电路的冲激响应	120	10.2.2 有功功率和功率因数	169
7.6.1 单位冲激函数	120	10.2.3 无功功率	170
7.6.2 单位冲激函数的性质	121		
7.6.3 电容电压和电感电流的跃变	122		

10.2.4 视在功率	170	13.1.3 谐振电路的通频带、品质因数 和选择性	213
10.2.5 R 、 L 、 C 元件的有功和 无功功率	171	13.2 并联谐振	215
10.3 复功率	171	13.2.1 并联电路谐振的条件	215
10.4 功率因数的提高	172	13.2.2 并联谐振电路的特点	215
10.5 正弦稳态最大功率传输	174	13.3 正弦稳态网络函数	216
习题	176	13.3.1 频域网络函数的定义	217
第 11 章 三相电路	180	13.3.2 网络函数的幅频特性和 相频特性	217
11.1 三相对称电压	180	* 13.4 波特图	219
11.1.1 三相对称电压的产生	180	13.4.1 对数坐标与分贝的概念	219
11.1.2 三相电源的连接、线电压与 相电压	181	13.4.2 幅频特性和相频特性的 波特图	220
11.2 三相负载	183	* 13.5 滤波器	225
11.2.1 三相负载的连接	183	习题	226
11.2.2 三相负载中的电流和电压	184	第 14 章 非正弦周期信号电路分析	230
11.3 对称三相电路的计算	184	14.1 非正弦周期信号及傅里叶分解	230
11.3.1 负载 Y 连接电路的计算	184	14.1.1 非正弦周期信号	230
11.3.2 负载 Δ 连接电路的计算	186	14.1.2 非正弦周期信号的傅里叶 分解	231
11.4 不对称三相电路的计算	187	14.2 有效值、平均值和平均功率	233
11.5 三相电路的功率	189	14.2.1 非正弦周期信号的有效值	234
11.5.1 三相电路的功率	189	14.2.2 非正弦周期信号的平均值	234
11.5.2 三相电路功率的测量	189	14.2.3 非正弦周期的平均功率	235
习题	192	14.3 非正弦周期信号电路的分析	235
第 12 章 耦合电感电路	195	* 14.4 对称三相电路中的高次谐波	237
12.1 耦合电感	195	14.4.1 对称三相非正弦的周期量	237
12.1.1 耦合电感及其伏安关系	195	14.4.2 零序谐波激励下的对称 电路分析	238
12.1.2 耦合电感的耦合系数	198	* 14.5 傅里叶级数的指数形式	240
12.2 耦合电感的串联与并联	198	* 14.6 傅里叶变换简介	241
12.2.1 耦合电感的串联	199	14.6.1 傅里叶积分	241
12.2.2 耦合电感的并联	200	14.6.2 傅里叶变换	242
12.3 空芯变压器	202	习题	243
12.4 理想变压器	204	第 15 章 拉普拉斯变换及其在电路 中的应用	245
12.4.1 理想变压器的理想条件	204	15.1 拉普拉斯变换的定义	245
12.4.2 理想变压器的电压、电流关系	204	15.2 拉普拉斯变换的性质	246
12.4.3 理想变压器的阻抗变换	206	15.2.1 线性性质	246
习题	207	15.2.2 微分性质	247
第 13 章 电路的频率响应	211	15.2.3 积分性质	248
13.1 串联电路的频域响应与谐振	211	15.2.4 延迟性质	248
13.1.1 RLC 串联电路的频率响应	211		
13.1.2 RLC 串联电路谐振的 条件与特点	212		

15.3 s 域电路定律和运算电路模型	249	16.4.3 含受控源的复合支路	285
15.3.1 s 域电路定律	250	16.5 结点电压矩阵	287
15.3.2 基本电路元件的 s 域模型	250	16.5.1 复合支路	287
15.3.3 s 域电路方程	252	16.5.2 结点电压矩阵方程	288
15.4 $F(s)$ 的分解及拉普拉斯反变换	253	* 16.6 割集电压矩阵	290
15.4.1 单根情况	253	* 16.7 状态方程及矩阵表示	291
15.4.2 共轭复根情况	254	习题	295
15.4.3 重根情况	255	第 17 章 二端口网络	299
15.5 拉普拉斯变换在线性电路分析 中的应用	257	17.1 二端口网络	299
15.6 s 域网络函数	261	17.2 二端口网络参数	300
15.6.1 s 域网络函数的定义	261	17.2.1 Y 参数	300
15.6.2 s 域网络函数的零点和极点	263	17.2.2 Z 参数	302
15.6.3 极点与冲激响应	265	17.2.3 H 参数	305
* 15.7 卷积积分	267	17.2.4 T 参数	306
15.7.1 卷积积分的定义	267	17.2.5 二端口参数之间的关系	307
15.7.2 拉普拉斯变换的卷积定理	268	17.3 二端口的转移函数	309
15.7.3 卷积积分在电路分析中的 应用	269	17.4 二端口网络的互联	311
习题	271	17.4.1 二端口网络的串联	311
第 16 章 电路的矩阵方程	276	17.4.2 二端口网络的并联	312
16.1 关联矩阵	276	17.4.3 二端口网络的级联	313
16.1.1 关联矩阵的概念	276	17.5 回转器和负阻抗变换器	314
16.1.2 用关联矩阵表示的 KCL 和 KVL 方程	277	17.5.1 回转器	314
16.2 回路矩阵	278	17.5.2 负阻抗变换器	315
16.2.1 回路矩阵的概念	278	习题	316
16.2.2 用回路矩阵表示的 KVL 和 KCL 方程	279	第 18 章 非线性电路简介	321
* 16.3 割集与割集矩阵	280	18.1 非线性电路的基本分析方法	321
16.3.1 割集的定义	280	18.1.1 非线性电路的图解分析法	322
16.3.2 割集矩阵	281	18.1.2 非线性电路的迭代计算 分析法	322
16.3.3 用割集矩阵表示的 KVL 和 KCL 方程	282	18.2 非线性电路的近似分析方法	323
16.4 回路电流矩阵	283	18.2.1 分段线性化分析法	323
16.4.1 复合支路	283	18.2.2 小信号分析方法	324
16.4.2 回路电流矩阵方程	283	习题	327
		部分习题答案	329
		参考文献	344

第1章 基本概念与基本定律

电气工程的所有分支均是建立在电路理论和电磁理论两个基本理论之上的。电气工程的许多分支,如输电理论、电机学、控制理论、电子学、通信理论、仪器仪表等都是以电路理论为基础的。因此,电路理论课程对于电气工程相关专业的学生而言是最重要的基础课程。另外,电路理论也为物理学科中的其它一些分支(力学、液压系统等)的研究提供了一条很好的途径,原因是电路通常是能量系统中一种易于实现的模型,通过研究电路的行为可以间接得出物理学科中某些问题的结论,因为在数学上它们的模型是等价的。

在电气工程中,我们感兴趣的问题是将能量(电能)或信息(电信号)从一个地方传送到另一个地方,或者将它们由一种形式转换成另一种形式。为了实现这些目的,必须采用一些实际的电路元件或器件并把它们进行适当的连接,这样连接而成的对象称为一个实际电路。例如,图1-1所示为一个简单的实际电路,组成它的基本元件是一个电池、一个灯泡和两根导线。这样一个电路可以用于照明或信号指示等。

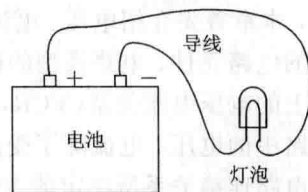


图 1-1 一个实际的电路

图1-2所示是一个复杂的实际电路,它是由TB2204单片收音机集成电路、扬声器和若干个电阻、电容和电感等组成的一个实际的收音机电路。该电路可以将无线电信号转换成声音。

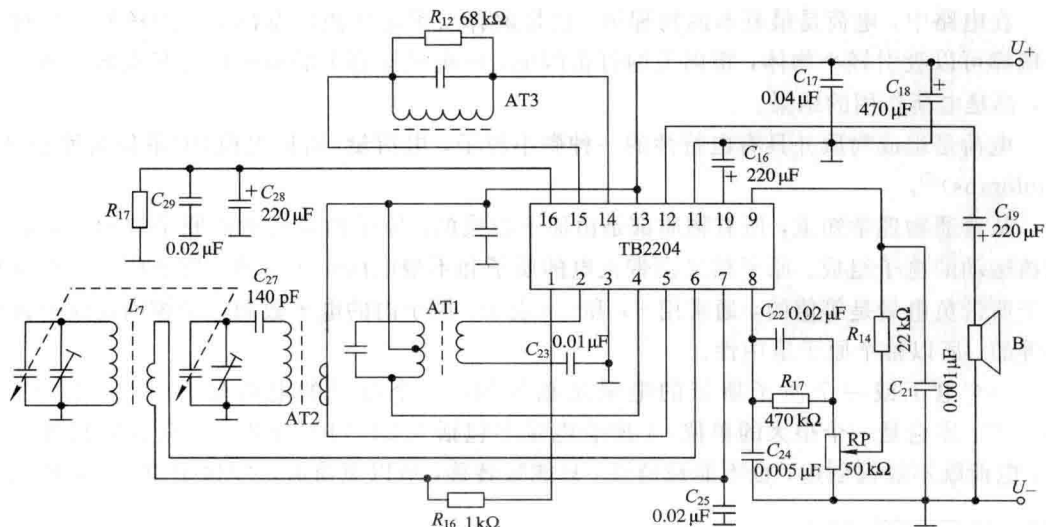


图 1-2 TB2204 调幅收音机电路

为了实现不同的目的,可以构建不同的实际电路。所构建的电路可以很简单(见图 1-1),也可以较复杂(见图 1-2),甚至相当复杂和庞大(如通信网络、输配电系统等)。构建的电路是否能完成预先设定的目的,首先要对构建的电路进行分析。分析电路的目的是:了解在某种输入的驱动下电路的行为(输出);了解组成电路的元件(或器件)、连接关系或施加给电路的输入驱动改变后,电路的输出是如何变化的;判断电路的输出是否能达到所期望的结果。在电路中,输入驱动通常是由电源作用的,所以将电源的作用称为激励,电源作用下电路的行为称为响应。有时也将激励称为输入,响应称为输出。电路分析就是在已知激励和电路结构的条件下求出电路中的响应或响应的变化规律,这也是本课程的主要目的。

电路是由元件连接而成的,实际电路中的一个元器件上往往同时存在着几种物理现象。为了简单,可以用一个单一的电路元件描述实际元器件中的一种物理现象,这种单一的电路元件称为理想电路元件。如果将实际电路中的所有元器件均用理想的电路元件来替代,同时保持电路的连接关系不变,于是就得到一个理想化的电路,该电路被称为实际电路的电路模型,简称为电路。

激励和响应是由电压和电流描述的,电压和电流是电路分析中最重要的物理量。因此,本章首先介绍电压、电流以及和其有关的物理量,即电荷、功率和能量等。其次介绍理想的电路元件、电路模型的概念以及基本的电路元件,如电阻、电源和受控电源元件以及其上的电压电流关系(VCR, Voltage Current Relation)。电阻元件上的 VCR 是欧姆定律。电路中的电压、电流除了受元件本身的约束外还要受连接关系的约束,所以本章最后介绍由电路连接关系所决定的 VCR,即基尔霍夫电压和电流定律。

1.1 电 荷 与 电 流

1.1.1 电荷的定义和特性

在电路中,电荷是最基本的物理量,它是解释众多电现象的基础。如用丝绸摩擦过的玻璃棒可以吸引轻小物体,雷雨天的打雷闪电,电视机屏幕上的图像以及互联网中的信息等,都是电荷作用的结果。

电荷是组成物质并具有电特性的一种微小粒子,电荷量(简称电荷)的单位为库仑(C, Coulombs)^①。

从普通物理学知道,所有物质都是由原子组成的。原子由带正电的原子核和一定数目绕核运动的电子组成。原子核又由带正电的质子和不带电的中子组成。质子所带正电量和电子所带负电量是等值的,通常用 $+e$ 和 $-e$ 表示。原子内的电子数和原子核内的质子数是相等的,所以整个原子呈中性。

一个电子或一个质子所带的电量是相等的,一个电子的电荷量为 $e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。库仑是一个很大的单位,1 库仑电量中包括 6.24×10^{18} 个电子。在任何物理过程中,电荷既不能被创造,也不能被消灭,只能被转移,所以电荷满足守恒定律。电荷的唯一

^① 本书采用国际单位制(SI)。

特性是只能被转移,即只能被从一个地方转移到另一个地方。电荷移动过程伴随着能量的传输与转换以及信息的传输处理。

1.1.2 电流的参考方向

在图 1-1 所示的电路中,灯泡发光的原因是有持续不断的电荷流过灯泡。电流就是电荷的流动。由于历史的原因,人们规定正电荷流动的方向为电流的方向,实际上电路中流动的是电子,因为带正电的原子核是不能移动的。但是人们仍然沿用正电荷流动的方向为电流的方向。在分析一个电路时,有时很难判断流过电路某部分或某一元件电流的实际方向,甚至有些电流的方向是随时间变化的。为了便于分析,在电路中通常假设出电流的方向,这个假设的方向称为电流的参考方向。图 1-3 表示电路的一部分,其中长方框表示一个二端元件。假设流过这个元件的电流 i 的参考方向为由 a 到 b ,如果计算得到 $i > 0$,则说明实际电流也是从 a 流到 b ;如果计算得到 $i < 0$,则说明实际电流从 b 流到 a (和假设相反)。

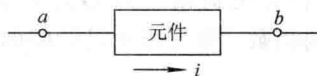


图 1-3 电流的参考方向

1.1.3 电流的定义

电流定义为电荷随时间的变化率,单位为安培(A, Amperes)。电流定义的数学表达式为

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

式中, q 表示电荷, t 表示时间(单位为秒(s))。

由电流的定义知,电流大小是电荷随时间的变化率。如果电荷随时间的变化率是常数,则称此电流为直流(DC, Direct Current),即 $i(t) = I$,如图 1-4(a)所示,如电池所提供的电流为直流。如果电荷随时间的变化率是以正弦规律变化的,则称此电流为正弦交流(AC, Alternating Current),简称为交流,如图 1-4(b)所示,如电网对线性负载(在后续章节中会给出定义)提供的是交流电流。如果电荷随时间的变化率是任意的,则可用对应的时间函数来表示这样的电流,即 $i(t) = f(t)$,如图 1-4(c)所示。

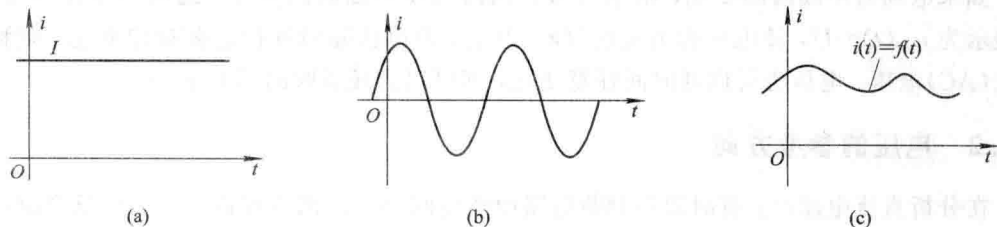


图 1-4 电流的波形

例 1-1 已知流入电路中某点的总电荷为 $q(t) = [2t \sin(10t)] \text{ mC}$,求流过该点的电流,并计算 $t = 0.5 \text{ s}$ 时的电流值。

解 由电流的定义知

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}[2t \sin(10t)] = [2 \sin(10t) + 20t \cos(10t)] \text{ mA}$$

当 $t=0.5 \text{ s}$ 时,

$$i(0.5) = [2 \sin(5) + 10 \cos(5)] = 0.919 \text{ mA}$$

1.2 电 压

1.2.1 电压的定义

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?由物理学知,处于电场中的电荷由于受到电场力的作用而产生了移动,这样电场力对电荷就做了功。电场力对电荷做功的能力是由电压来度量的。图 1-5(a)所示为电路中的任意两点 a 和 b ,两点电压的定义为:电压在量值上等于将单位正电荷由 a 点移到 b 点电场力所做的功,单位为伏特(V, volts)。如果电场力是时间的函数,则电压也是时间的函数,其数学表达式为

$$u_{ab}(t) = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-2)$$

式中, ω 表示能量,单位为焦耳(J, Joules); q 表示电荷,单位为库仑(C)。1 伏特表示 1 牛顿(N, Newton)的力可以将 1 库仑(C)的电荷移动 1 米(m, meter)。

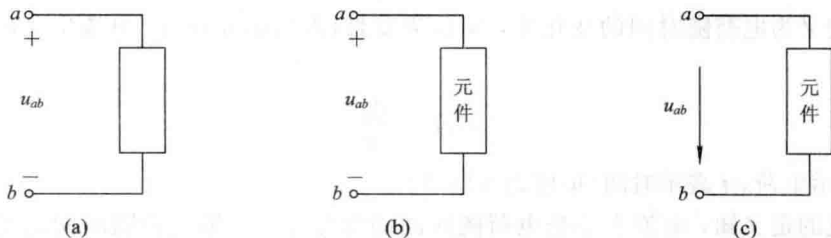


图 1-5 电压的定义与参考方向

电压也称为电位差,如果 $u_{ab}(t) > 0$,则说明在 t 时刻 a 点的电位比 b 点的电位高;如果 $u_{ab}(t) < 0$,则说明 t 时刻 a 点的电位比 b 点的电位低;如果 $u_{ab}(t) = 0$,则说明 t 时刻 a 点和 b 点的电位是相等的,即等电位。

如果电场力不随时间变化,则电场力所做的功也不随时间变化,此时的电压为常数,可表示为 $u_{ab}(t) = U$,该电压称为直流(DC)电压。若电压随时间按正弦规律变化,则称为交流(AC)电压。电压也可以随时间任意变化,即可以为任意时间函数 $f(t)$ 。

1.2.2 电压的参考方向

在分析直流电路时,有时很难判断电路中两点间哪一点的电位高。对于正弦交流电路或电压是任意时间函数变化的电路,因为电路中任意两点间电位的高低是随时间变化的,更是无法确定哪一点的电位高。因此,在分析电路前,首先应假设出电路中两点间电压的正方向(从高电位指向低电位),将这个假设的方向称为该电压的参考方向。图 1-5(b)所示为电路中连接到 a 、 b 两点的一个二端元件,假设电压的参考方向为 u_{ab} (为简单起见省去时间变量 t)。如果计算得到 $u_{ab} > 0$,则说明在 t 时刻电压的参考方向和实际方向相同;

如果得到 $u_{ab} < 0$, 则说明 t 时刻电压的参考方向和实际方向相反。为简单起见, 可以省去 u 的下标。电路中两点间的电压也可以用箭头来表示, 如图 1-5(c) 所示。

电流和电压是电路中两个最为基本的物理量或变量。电流和电压变量既可以表示能量, 也可以表示信息。就是说, 电流或电压的大小和变化可以反映出能量的大小和变化; 另外, 电流或电压的变化还可以反映出信息的变化。例如在电力系统中, 研究电流、电压的目的是从能量的角度出发的; 而在通信等用于信息传输的系统中, 主要考虑电流、电压所携带的信息。在信息传输的系统中通常将电流、电压变量称为电流信号或电压信号。

1.3 功率和电能

在电路中, 尽管电流、电压变量的大小和变化可以反映出能量的大小和变化, 但实际上必须要知道一个电器装置所能承受的功率是多大。如果施加到某电器装置上的功率超过其额定值, 则该装置(或其中的部件)就可能被损坏或不能正常工作。另外, 经验告诉我们, 100 W 的灯泡比 60 W 的亮, 在相同的点亮时间内, 100 W 灯泡所消耗的电能比 60 W 的多, 所付的电费也多。可见, 功率和能量的计算也是很重要的。

1.3.1 电功率的定义

由物理学知道, 功率是能量随时间的变化率, 即

$$p(t) = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-3)$$

式中, $p(t)$ 表示功率, 单位为瓦(W, Watts); ω 表示能量, 单位为焦耳(J); t 表示时间, 单位为秒(s)。将式(1-3)的分子分母同乘以 dq , 即

$$p(t) = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u(t)i(t) \quad (1-4)$$

可见, 功率是电压和电流的乘积, 若电压、电流是时间的函数, 则功率也是时间的函数, 即功率 $p(t)$ 是随时间变化的, 该功率称为瞬时功率; 若电压、电流不随时间变化(DC), 则功率也不随时间变化, 则 $p(t) = P = UI$ 为定值。

由电压的定义知, u_{ab} 表示电场力将正电荷从 a 点移到 b 点, 电场力在做正功。如图 1-6 所示, 正电荷 q 在电场 E 的作用下由正极板 A 移到负极板 B, 电荷移动就形成电流 i 。由电流的定义知, 电流 i 的方向也是正电荷流动的方向。所以, 式(1-4)表示的功率为正功率, 即功率的定义是表示吸收(或消耗)的功率。

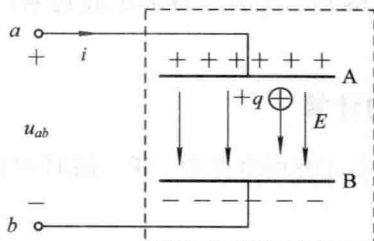


图 1-6 电荷在电场中移动示意图

1.3.2 电压、电流的关联参考方向

为了分析方便,将电流、电压的参考方向引入到功率的表达式中。如果给出电压的参考方向为 u_{ab} ,即假设 a 点的电位比 b 点的电位高,正电荷从 a 移到 b ;如果假设功率为正,则电流的参考方向必须假设为由 a 到 b 。对于这种电流、电压参考方向假设上的相互制约称为关联参考方向。如果电流、电压的参考方向不满足上述制约关系,则称为不关联,此时有

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1-5)$$

此式仍然满足电场力做正功(功率为正)的思想。如图 1-7(a)所示电路中的电压、电流是关联参考方向,而图 1-7(b)则不关联。

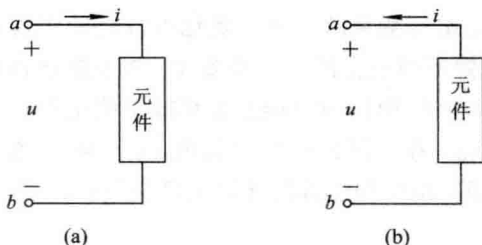


图 1-7 电压、电流的关联参考方向

今后,在分析电路时,电路中所标出的电压、电流的方向均认为是参考方向,这些方向要么是自己假设的,要么是别人假设的。由于是假设方向,所以电路分析的结果是,电压可能为正或负($\pm u$),电流也可能为正或负($\pm i$)。由式(1-4)和式(1-5)知,功率也有正或负,即 $p = \pm ui$ 。如果 $p > 0$,则说明元件在吸收正功率;如果 $p < 0$,则说明元件在吸收负功率,即释放(发出)功率。式(1-4)和式(1-5)是假设元件处于吸收功率的状态。

例 1-2 已知某二端元件的端电压为 $u(t) = 50 \sin(10\pi t)$ V,流入元件的电流为 $i(t) = 2 \cos(10\pi t)$ A,设电压、电流为关联参考方向,求该元件吸收的瞬时功率的表达式,并求 $t = 10$ ms 和 $t = 80$ ms 时瞬时功率的值。

解 由式(1-4),有

$$p(t) = u(t)i(t) = 50 \sin(20\pi t) \text{ W}$$

当 $t = 10$ ms 和 $t = 80$ ms 时,

$$p(10 \times 10^{-3}) = 50 \sin(20\pi \times 10 \times 10^{-3}) = 29.39 \text{ W}$$

$$p(80 \times 10^{-3}) = 50 \sin(20\pi \times 80 \times 10^{-3}) = -47.55 \text{ W}$$

计算结果说明,在 $t = 10$ ms 时该元件从外界吸收功率,在 $t = 80$ ms 时该元件向外界释放功率。

1.3.3 功率守恒与电能的计算

根据能量守恒定律,在一个完整的电路中,任一瞬时所有元件吸收功率的代数和等于零,即

$$\sum p(t) = 0 \quad (1-6)$$

由此可见,一个电路中吸收功率之和等于释放功率之和。