



高等学校电子与电气工程
及自动化专业“十一五”规划教材

电 路 (第二版)

高 贇 黄向慧 编著

Electric Circuits



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“十一五”规划教材

电 路

(第 二 版)

高 贇 黄向慧 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是在第一版的基础上修订的,新增了一章:含运算放大器电路分析,并在其余各章对内容作了调整(增删)。

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的参考书。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

电路/高贇,黄向慧编著. —2 版. —西安:西安电子科技大学出版社,2011.8

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2639 - 0

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(2011)第 150350 号

策 划 马乐惠

责任编辑 张 媛 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

http://www.xduph.com E-mail: xduph@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2011 年 8 月第 2 版 2011 年 8 月第 2 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 20.5

字 数 479 千字

印 数 4001~8000 册

定 价 35.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2639 - 0/TM • 0078

XDUP 2931002 - 2

*** 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 “十一五”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,出版以来作者及教研室同仁在所在学校的自动化、电气自动化、测控技术与仪器和通信等专业实际使用了四年,发现其中有一些不足之处与缺陷,为了完善本书和出版社协商决定再版。

作为普通高等院校强电、弱电类专业的专业基础课,本书继续本着从电路基本概念和组成电路的基本元件入手,重点是使学生逐步掌握电路的基本理论和基本分析方法,充分理解激励和响应、静态和动态以及稳态和暂态的思想,最终使学生建立起“系统分析”的概念,即“从电路到系统”的思维过程,为后续专业课程的学习打好坚实的基础。

为了使本书的体系更完整,这一版增加了有关运算放大器以及含运算放大器电阻电路的分析部分,同时在相关章节补入和运算放大器相关的习题。另外,为了更好地适应电气自动化专业,本书在“非正弦周期信号电路分析”(原章名为“非正弦周期电流电路”)一章中增补了对称三相电路中的高次谐波一节(其他专业可以选学),为该专业后续课程的学习奠定基础。

由于增加了含运算放大器电路分析一章,本书由原来的17章增至18章。前4章的内容保留不变,从第5章开始内容调整如下:第5章为“含运算放大器电路分析”,第6章为“电容和电感元件”,第7章为“一阶电路分析”,第8章为“二阶电路分析”,第9章和第10章为“正弦量与相量”和“正弦稳态电路分析”,第11章为“三相电路”,第12章为“耦合电感电路”,第13章为“电路的频率响应”,第14章为“非正弦周期信号电路分析”,第15章为“拉普拉斯变换及其在电路中的应用”,第16章为“电路的矩阵方程”,第17章为“二端口网络”,最后一章是“非线性电路简介”。本书基本保留了第一版中的习题。

本书除去标有“*”号的内容,计划课时为80学时。除去“*”号所指示的内容后,本书自成体系,教师和读者可以根据实际情况进行取舍。

本书第1~4、6~8、12、15~17章由高赞修订,第5、9~11、14章由黄向慧修订,第13、18章由任顺英修订。全书由高赞组织,并负责统稿和审定。

西安电子科技大学出版社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,本书难免还存在有缺点和错误之处,恳请读者、专家批评指正。

编著者

2011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 章由高赞编写,第 8~10 章由黄向慧编写,第 12~17 章由刘骏跃编写。全书由高赞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	22
1.1 电荷与电流	2	2.2.2 电阻元件的串联与并联	23
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	25
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	26
1.1.3 电流的定义	3	2.3.1 电压源的串联与并联	26
1.2 电压	4	2.3.2 电流源的串联与并联	27
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	27
1.2.2 电压的参考方向	4	2.4 实际电源模型和等效变换	28
1.3 功率和电能	5	2.4.1 实际电源的两种模型	28
1.3.1 电功率的定义	5	2.4.2 两种电源模型的等效变换	29
1.3.2 电压、电流的关联参考方向	5	2.5 电阻 Y 连接和 Δ 连接电路的 等效变换	31
1.3.3 功率守恒与电能的计算	6	习题	34
1.4 电路元件和电路模型	6	第 3 章 电路的基本分析方法	38
1.4.1 电路元件的集总假设	6	3.1 电路的拓扑关系	38
1.4.2 电路模型	7	3.1.1 图的初步概念	38
1.5 电阻元件和欧姆定律	7	3.1.2 电路模型和图的关系	40
1.5.1 电阻元件和欧姆定律的概念	7	3.2 电路 KCL 和 KVL 方程的独立性	41
1.5.2 线性电阻的特性	8	3.2.1 电路 KCL 方程的独立性	41
1.5.3 电阻元件上的功率与能量	9	3.2.2 电路 KVL 方程的独立性	41
1.6 电压源和电流源	10	3.3 支路电流法	42
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	44
1.6.2 电流源的概念与伏安特性	11	3.4.1 网孔电流法	44
1.6.3 电压源和电流源的功率	11	3.4.2 回路电流法	47
1.7 受控源	12	3.5 结点电压法	49
1.7.1 受控源的定义	12	习题	53
1.7.2 线性受控源	12	第 4 章 电路定理	57
1.8 基尔霍夫定律	13	4.1 线性电路	57
1.8.1 支路、结点和回路的概念	13	4.1.1 线性电路的概念	57
1.8.2 基尔霍夫电流定律	14	4.1.2 线性电路方程的性质	57
1.8.3 基尔霍夫电压定律	15	4.2 叠加定理和齐性定理	58
习题	17	4.2.1 叠加定理	58
第 2 章 电路的等效变换	21	4.2.2 齐性定理	61
2.1 电路等效的概念	21		
2.2 无源一端口的等效电阻	22		

4.3 替代定理	62	习题	116
4.4 戴维南定理和诺顿定理	63	第8章 二阶电路分析	121
4.4.1 戴维南定理	63	8.1 二阶电路的零输入响应	121
4.4.2 诺顿定理	66	8.1.1 过阻尼响应	122
4.5 最大功率传输条件	67	8.1.2 临界阻尼响应	123
4.6 对偶原理	68	8.1.3 欠阻尼响应	123
习题	70	8.2 二阶电路的阶跃响应和冲激响应	125
第5章 含运算放大器电路分析	74	8.2.1 二阶电路的阶跃响应	125
5.1 运算放大器的电路模型	74	8.2.2 二阶电路的冲激响应	127
5.2 含理想运放的电阻电路分析	76	* 8.3 一般二阶电路	128
5.2.1 比例运算电路	76	习题	130
5.2.2 加法运算与减法运算电路	77	第9章 正弦量与相量	133
习题	79	9.1 正弦量	133
第6章 电容元件和电感元件	82	9.1.1 正弦量的三要素	133
6.1 电容元件	82	9.1.2 有效值的定义、正弦量的有效值	134
6.1.1 电容元件及其电压、电流关系	82	9.1.3 正弦量的相位差	135
6.1.2 电容元件上的功率和能量	83	9.2 正弦量的相量表示	136
6.1.3 电容元件的串、并联	84	9.2.1 复数	136
6.2 电感元件	85	9.2.2 相量的定义	138
6.2.1 电感元件及其电压、电流关系	86	9.2.3 时域运算和相量运算的关系	139
6.2.2 电感元件上的功率和能量	87	9.3 三种基本电路元件和电路定律的相量关系	140
6.2.3 电感元件的串、并联	88	9.3.1 电阻元件的相量关系	141
习题	89	9.3.2 电感元件的相量关系	141
第7章 一阶电路分析	93	9.3.3 电容元件的相量关系	142
7.1 动态电路与换路定则	93	9.3.4 KCL、KVL的相量形式	143
7.1.1 动态电路和状态变量	94	9.4 阻抗和导纳	144
7.1.2 动态电路的换路定则	95	9.4.1 阻抗和导纳的定义	144
7.2 一阶电路的零输入响应	97	9.4.2 阻抗和导纳的等效变换	146
7.3 一阶电路的零状态响应	101	9.5 阻抗(导纳)的串联和并联	147
7.4 一阶电路的全响应与三要素法	104	9.5.1 阻抗的串联	147
7.4.1 一阶电路的全响应	104	9.5.2 阻抗(导纳)的并联	148
7.4.2 三要素法	105	习题	149
7.5 一阶电路的阶跃响应	107	第10章 正弦稳态电路分析	152
7.5.1 单位阶跃函数	107	10.1 正弦稳态电路的分析方法	152
7.5.2 阶跃函数在电路中的应用	108	10.2 正弦稳态电路的功率	156
7.5.3 一阶电路的阶跃响应	109	10.2.1 瞬时功率	156
7.6 一阶电路的冲激响应	110	10.2.2 有功功率和功率因数	157
7.6.1 单位冲激函数	110	10.2.3 无功功率	158
7.6.2 单位冲激函数的性质	111	10.2.4 视在功率	158
7.6.3 电容电压和电感电流的跃变	112		
7.6.4 冲激响应	113		
7.7 阶跃响应与冲激响应的关系	114		

10.2.5 R 、 L 、 C 元件的有功和无功功率	158	13.2.1 并联电路谐振的条件	201
10.3 复功率	159	13.2.2 并联谐振电路的特点	201
10.4 功率因数的提高	159	13.3 正弦稳态网络函数	202
10.5 正弦稳态最大功率传输	161	13.3.1 频域网络函数的定义	203
习题	163	13.3.2 网络函数的幅频特性和相频特性	203
第 11 章 三相电路	167	* 13.4 波特图	204
11.1 三相对称电压	167	13.4.1 对数坐标与分贝的概念	204
11.1.1 三相对称电压的产生	167	13.4.2 幅频特性和相频特性的波特图	205
11.1.2 三相电源的连接	168	* 13.5 滤波器	208
11.2 三相负载	170	习题	209
11.2.1 三相负载的连接	170	第 14 章 非正弦周期信号电路分析	212
11.2.2 三相负载中的电流和电压	171	14.1 非正弦周期信号及傅里叶分解	212
11.3 对称三相电路的计算	171	14.1.1 非正弦周期信号	212
11.3.1 负载 Y 连接电路的计算	171	14.1.2 非正弦周期信号的傅里叶分解	213
11.3.2 负载 Δ 连接电路的计算	173	14.2 有效值、平均值和平均功率	215
11.4 不对称三相电路的计算	174	14.2.1 非正弦周期信号的有效值	216
11.5 三相电路的功率	176	14.2.2 非正弦周期信号的平均值	216
11.5.1 三相电路的功率	176	14.2.3 非正弦周期的平均功率	217
11.5.2 三相电路功率的测量	176	14.3 非正弦周期信号电路的分析	217
习题	178	* 14.4 对称三相电路中的高次谐波	219
第 12 章 耦合电感电路	182	14.4.1 对称三相非正弦周期量	219
12.1 耦合电感	182	14.4.2 零序谐波激励下的对称电路分析	220
12.1.1 耦合电感及其伏安关系	182	* 14.5 傅里叶级数的指数形式	221
12.1.2 耦合电感的耦合系数	185	* 14.6 傅里叶变换简介	222
12.2 耦合电感的串联与并联	185	14.6.1 傅里叶积分	222
12.2.1 耦合电感的串联	186	14.6.2 傅里叶变换	223
12.2.2 耦合电感的并联	187	习题	224
12.3 空芯变压器	189	第 15 章 拉普拉斯变换及其在电路中的应用	226
12.4 理想变压器	190	15.1 拉普拉斯变换的定义	226
12.4.1 理想变压器的理想条件	190	15.2 拉普拉斯变换的性质	227
12.4.2 理想变压器的电压、电流关系	191	15.2.1 线性性质	227
12.4.3 理想变压器的阻抗变换	192	15.2.2 微分性质	228
习题	193	15.2.3 积分性质	229
第 13 章 电路的频率响应	197	15.2.4 延迟性质	229
13.1 串联电路的频域响应与谐振	197	15.3 s 域电路定律和运算电路模型	230
13.1.1 RLC 串联电路的频率响应	197	15.3.1 s 域电路定律	230
13.1.2 RLC 串联电路谐振的条件与特点	198	15.3.2 基本电路元件的 s 域模型	231
13.1.3 谐振电路的通频带、品质因数 and 选择性	199		
13.2 并联谐振	201		

15.3.3 s 域电路方程	233	16.5 结点电压矩阵	261
15.4 $F(s)$ 的分解及拉普拉斯反变换	233	16.5.1 复合支路	261
15.4.1 单根情况	234	16.5.2 结点电压矩阵方程	262
15.4.2 共轭复根情况	235	* 16.6 割集电压矩阵	264
15.4.3 重根情况	235	* 16.7 状态方程及矩阵表示	265
15.5 拉普拉斯变换在线性电路分析 中的应用	236	习题	267
15.6 s 域网络函数	239	第 17 章 二端口网络	272
15.6.1 s 域网络函数的定义	240	17.1 二端口网络	272
15.6.2 s 域网络函数的零点和极点	241	17.2 二端口网络参数	273
15.6.3 极点与冲激响应	242	17.2.1 Y 参数	273
* 15.7 卷积积分	243	17.2.2 Z 参数	275
15.7.1 卷积积分的定义	244	17.2.3 H 参数	277
15.7.2 拉普拉斯变换的卷积定理	245	17.2.4 T 参数	278
15.7.3 卷积积分在电路分析中的 应用	245	17.2.5 二端口参数之间的关系	280
习题	247	17.3 二端口的转移函数	281
第 16 章 电路的矩阵方程	252	17.4 二端口网络的互联	283
16.1 关联矩阵	252	17.4.1 二端口网络的串联	283
16.1.1 关联矩阵的概念	252	17.4.2 二端口网络的并联	284
16.1.2 用关联矩阵表示的 KCL 和 KVL 方程	253	17.4.3 二端口网络的级联	285
16.2 回路矩阵	254	17.5 回转器和负阻抗变换器	286
16.2.1 回路矩阵的概念	254	17.5.1 回转器	286
16.2.2 用回路矩阵表示的 KVL 和 KCL 方程	255	17.5.2 负阻抗变换器	287
* 16.3 割集与割集矩阵	256	习题	288
16.3.1 割集的定义	256	第 18 章 非线性电路简介	293
16.3.2 割集矩阵	257	18.1 非线性电路的基本分析方法	293
16.3.3 用割集矩阵表示的 KVL 和 KCL 方程	258	18.1.1 非线性电路的图解分析法	294
16.4 回路电流矩阵	259	18.1.2 非线性电路的迭代计算 分析法	294
16.4.1 复合支路	259	18.2 非线性电路的近似分析方法	295
16.4.2 回路电流矩阵方程	259	18.2.1 分段线性化分析法	295
16.4.3 含受控源的复合支路	261	18.2.2 小信号分析方法	296
		习题	299
		部分习题答案	301
		参考文献	315

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，如输配电理论、电机学、控制理论、电子学、通信理论、仪器仪表等均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。

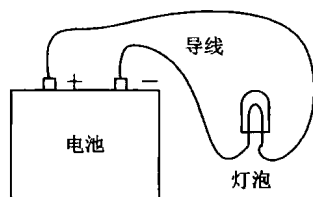


图 1-1 一个实际的电路

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。

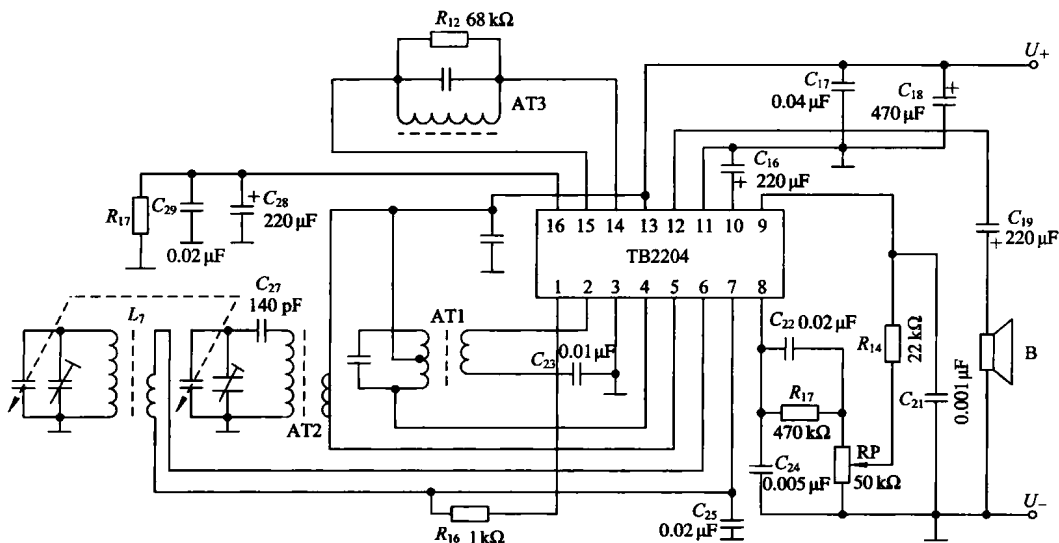


图 1-2 TB2204 调幅收音机电路

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或电流描述的,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和互联网中的信息等,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)^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的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相等,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,所以电荷满足电荷守恒定律。电荷的唯一特性是只能被转移,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转换。

^① 本书采用国际单位制(SI)。

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)。

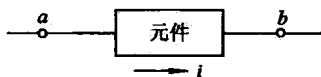


图 1-3 电流的参考方向

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)。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))。

由电流的度量定义知,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), $i(t) = I$,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,如供电网对线性负载(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。

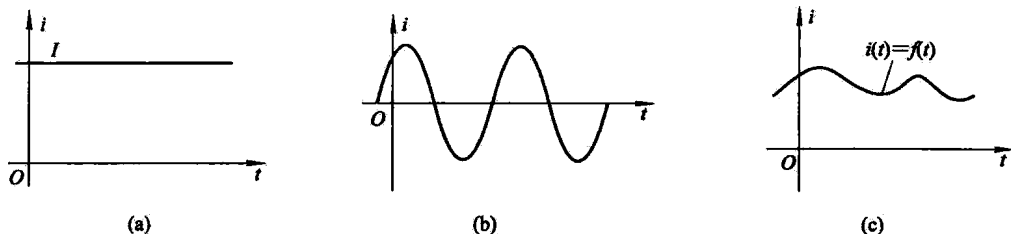


图 1-4 电流的波形

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

解 由电流量度定义知

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

当 $t = 0.5$ s 时,

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

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 , 两点电压度的定义为: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)。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

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

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

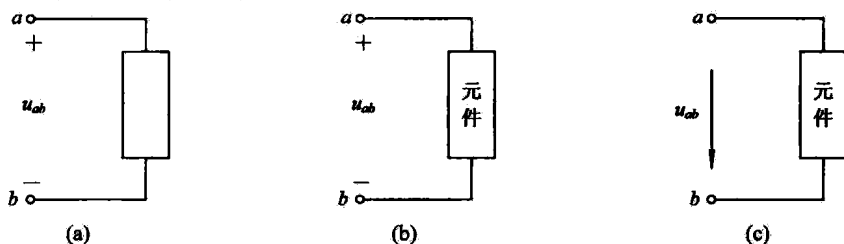


图 1-5 电压的定义与参考方向

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。

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 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气装置所能承受的功率是多大。如果施加到某电气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

由物理学中知道, 功率是能量随时间的变化率, 即

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

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

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

可见, 功率是电压和电流的乘积, 当电压、电流是时间的函数时, 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; 当电压、电流不随时间变化(DC)时, 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。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, 即吸收的功率。

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 流到 b ; 如果假设功率为正, 则电流的参考方向必须由 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 1-6(a)所示电路中的电压、电流是关联参考方向, 而图 1-6(b)则不关联。

今后, 电路中电压、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。

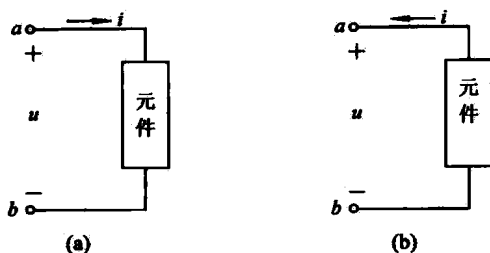


图 1-6 电压、电流的关联参考方向

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。

根据式(1-4),一个元件从 t_0 时刻到 t 时刻吸收的电能为

$$w(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-7)$$

在实际中,电能的度量单位为度,即

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ 千瓦时} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

例 1-2 已知某二端元件的端电压为 $u(t) = 50 \sin(10\pi t) \text{ V}$, 流入元件的电流为 $i(t) = 2 \cos(10\pi t) \text{ A}$, 设电压、电流为关联参考方向, 求该元件吸收瞬时功率的表达式, 并求 $t = 10 \text{ ms}$ 和 $t = 80 \text{ ms}$ 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 $t = 10 \text{ ms}$ 和 $t = 80 \text{ ms}$ 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 $t = 10 \text{ ms}$ 时该元件从外界吸收功率, 在 $t = 80 \text{ ms}$ 时该元件向外界释放功率。

1.4 电路元件和电路模型

1.4.1 电路元件的集总假设

一个实际电路是由实际的电路元件、器件或设备构成的。实际电路元器件端子上的电流和端子间的电压反映出它们的电能消耗以及电磁能的存储现象。电能消耗发生在元器件所有导体的通路中, 电磁能存储在元件或器件的电场、磁场之中。一般情况下, 这些现象同时存在, 且发生在整个元件或器件之中, 并往往交织在一起。为了分析简单, 将这些交