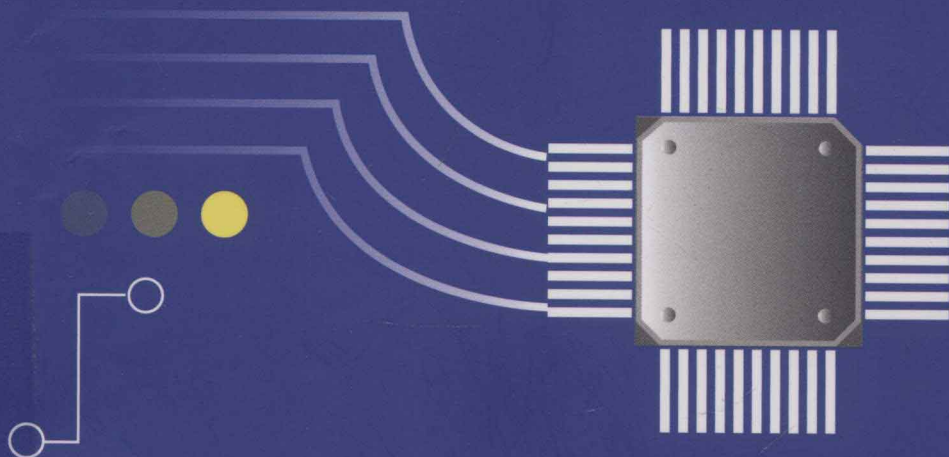


高等院校电子信息类
卓越工程师培养系列教材

Circuit Analysis

电路分析

刘 岚 叶庆云 胡 钊 张小梅 编著



科学出版社

内 容 简 介

本书按照教育部颁布的“电路分析基础课程教学基本要求”,以电路理论的经典内容为核心,以提高学生的电路理论水平和分析解决问题的能力为出发点,以培养“厚基础、宽口径、会应用、能发展”的卓越人才为目的而编写。

全书共分 18 章,内容包括电路的基本概念与电路定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的一般分析方法、电路定理、含有运算放大器的电阻电路、简单非线性电阻电路分析、储能元件、动态电路的时域分析、正弦量与相量、正弦稳态电路分析、含有磁耦合元件的正弦稳态电路分析、三相电路分析、非正弦周期信号激励下的稳态电路分析、正弦交流电路的频率特性、电路的复频域分析、二端口网络分析、线性均匀传输线的正弦稳态分析、线性时不变无损均匀传输线的暂态分析。每章之后均附有思考题和习题,书末附有大部分习题答案。

本书可作为大学本科电子信息类专业教材,可有针对性地运用于卓越工程师培养计划,还可供研究生及科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/刘岚等编著. —北京:科学出版社, 2012

(高等院校电子信息类卓越工程师培养系列教材)

ISBN 978-7-03-035555-3

I. ①电… II. ①刘… III. ①电路分析-高等学校-教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 214641 号

丛书策划:匡 敏 潘斯斯

责任编辑:潘斯斯 张丽花/责任校对:钟 洋 刘小梅

责任印制:阎 磊/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2012 年 9 月第一次印刷 印张: 31 3/4

字数: 752 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电路分析基础是电子信息类专业一门重要的专业基础课程,它为学生从事电子信息技术领域学习、工作和研究奠定基础。

近年来,国家开始启动“卓越工程师培养计划”,为配合该计划的实施,我们编写了这本教材,希望它能为卓越工程师的培养作出贡献。

长期以来,许多高校的电子信息类专业基本上都遵循一个课程教学的习惯顺序:从高等数学开始,接着是电路分析基础、模拟电子技术基础、数字电子技术基础、信号与系统等。这样的顺序虽然符合一定的教学规律,但却带来一个问题,即一些应用技术类课程,如单片机、嵌入式系统等课程的开课时间会由于基础课程的习惯排序而被推后,甚至到大学三年级才能开课。显然,这样的培养方案很难满足卓越工程师的培养要求。为解决这个问题,有的学校开始尝试将电类基础课程的开课时间往前提,在大学一年级的第一学期就开设电路分析基础课程。毋庸置疑,机械地把电类课程往前提有违教学规律。其次,有的专业在制定卓越工程师培养方案时为强化工程应用技术的培养,不得不减少基础理论教学学时。

本书充分考虑上述问题,并且为解决上述问题而编写。对教材的使用及课程体系的安排有如下建议。

(1) 本书的内容划分为三个部分。第1~6章为第一部分,建议学时为48学时;第7~15章为第二部分,建议学时为64学时;第16~18章为第三部分,建议学时为24~32学时。

(2) 第一部分的内容可以安排在大学一年级的第一学期讲述,这部分内容不需要高等数学知识,只要具备高中的基础知识即可进行教学。这部分内容纳入“简单非线性电阻电路分析”,目的是为电子信息类专业的学生在下一步学习电子技术和高频电路等课程时打下一定的理论基础。

(3) 第二部分内容安排在大学一年级的第二学期讲述,这时所需的高等数学基础知识已经具备。由于有第一部分内容作为基础,这一学期可以开设数字电子技术课程。

(4) 第三部分内容安排在大学二年级以后讲述。这部分内容的重点是分布参数电路的分析,从工程应用的角度看,电子信息类专业的学生尤其是在卓越工程师的培养中,加强分布参数电路的学习是有益的。对于这部分内容,教材使用者可以根据教学的具体情况取舍,如果考虑到课程开设的习惯,对这部分内容可以开设一门单立的选修课,如“分布参数电路分析基础”。

有一年级二学期的数字电子技术课程作为基础,二年级一学期可以开设单片机原理及应用课程。当然,模拟电子技术课程也在这学期开设。

(5) 大学二年级的第二学期可以开设高频电子电路、信号与系统、嵌入式微处理器与操作系统等课程。

由以上课程体系的描述可知,本书的推行可配合一系列课程的教学内容和教材的改变。比如,电路分析基础课后接着开设数字电子技术课程,数字电子技术课程中的A/D与D/A部分内容可移到后续的模拟电子技术课程中;单片机原理及应用课程须先讲一些微机原理的基础知识;原来的以8086为主线的微机原理课程须改造。相应一系列教材的编写正在策划和实施。

这是实施卓越工程师培养的一种构思,在这个方案中,专业基础理论的教学不仅没有减弱,而是得到强化。通过对课程顺序及教学内容的调整和重组,学生在校的前两年就可完成电类技术基础课程的学习及单片机、嵌入式系统等应用技术课程的学习,综合技术能力的培养大大提前。进入大学三年级,学生就可以在专业方向和更高层次的专业应用技术方面充分发展,进入卓越工程师的培养天地。

本书内容的深广度符合现阶段我国普通高等学校电子信息类专业的教学要求,其内容的编排立足于能够开展卓越工程师培养的教学需求。书中注重电路的基本概念和基本分析方法的描述,在学生已有的理论基础上由浅入深展开分析。为培养学生正确的思维方法和分析问题的能力,本书在每章之后皆配有适量的思考题和习题,认真完成,有益于帮助学生掌握所学内容,同时,对于提高学生运用理论解决实际问题的能力也有积极的促进作用。

本书的第1~5章、7~8章由叶庆云编写,第9~13章由刘岚编写,第6、17~18章由胡钊编写,第14~16章由张小梅编写。本书的编写借鉴国内外优秀教材的成功之处,以及编者在教学和研究方面所积累的知识和经验。

本书承华中科技大学杨晓非教授和武汉理工大学刘泉教授审阅,他们提出了不少宝贵意见和有益的建议,在此一并表示诚挚的感谢。

限于编者的水平和经验,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2012年4月

目 录

前言

第 1 章 电路的基本概念与电路定律	1
1.1 实际电路与电路模型	1
1.1.1 实际电路的组成与功能	1
1.1.2 电路模型	2
1.1.3 集中参数电路	3
1.2 电路变量及其参考方向	4
1.2.1 电流及其参考方向	4
1.2.2 电压及其参考方向	5
1.2.3 关联参考方向	6
1.2.4 功率及其正负值的物理意义	7
1.3 电阻元件	8
1.3.1 电阻元件的定义	9
1.3.2 开路与短路	10
1.3.3 电阻元件的功率与能量	10
1.4 电压源和电流源	10
1.4.1 电压源	10
1.4.2 电流源	12
1.5 受控源	13
1.6 基尔霍夫定律	15
1.6.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	17
1.6.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	18
1.7 综合示例	20
思考题	22
习题	23
第 2 章 电阻电路的等效变换	27
2.1 电路等效的一般概念	27
2.1.1 单口网络的伏安关系	27
2.1.2 等效、等效电路与等效变换	28
2.2 电阻的串联、并联和混联等效	29
2.2.1 电阻的串联等效	29
2.2.2 电阻的并联等效	30
2.2.3 电阻的混联等效	31
2.3 电阻的 Y 形联接与 Δ 形联接的等效变换	33
2.3.1 Y 形、 Δ 形联接方式	33

2.3.2 Y形、 Δ 形等效变换	34
2.4 利用对称电路的特点求等效电阻	38
2.4.1 “传递对称”单口网络	38
2.4.2 “平衡对称”单口网络	39
2.5 无源单口网络 N_0 的输入电阻	40
2.6 电压源、电流源的串联、并联和转移	42
2.6.1 电压源的串联	42
2.6.2 电压源的并联与转移	42
2.6.3 电流源的并联	43
2.6.4 电流源的串联与转移	44
2.7 含源支路的等效变换	45
2.7.1 实际电源的两种电路模型	45
2.7.2 含独立源支路的等效变换	46
2.7.3 含受控源支路的等效变换	46
2.8 含外虚内实元件单口网络的等效变换	48
2.9 综合示例	51
思考题	52
习题	53
第3章 电阻电路的一般分析方法	57
3.1 电路的图	57
3.2 KCL 和 KVL 方程的独立性	58
3.2.1 KCL 方程的独立性	58
3.2.2 KVL 方程的独立性	59
3.3 支路法	62
3.3.1 2b 法	62
3.3.2 b 法	65
3.4 网孔分析法和回路分析法	69
3.4.1 网孔分析法	69
3.4.2 回路分析法	72
3.5 节点分析法	78
思考题	85
习题	85
第4章 电路定理	89
4.1 叠加定理	89
4.2 替代定理	95
4.3 戴维南定理和诺顿定理	97
4.4 最大功率传输定理	103
4.5 特勒根定理	107
4.5.1 特勒根定理 I	107
4.5.2 特勒根定理 II	108
4.6 互易定理	110

4.7 对偶原理	113
思考题	116
习题	116
第5章 含有运算放大器的电阻电路	120
5.1 运算放大器	120
5.2 理想运算放大器	121
5.3 含有理想运算放大器的电阻电路分析	122
思考题	127
习题	127
第6章 简单非线性电阻电路分析	130
6.1 非线性元件与非线性电路的基本概念	130
6.2 非线性电阻	130
6.2.1 非线性电阻的分类	131
6.2.2 静态电阻和动态电阻的概念	133
6.3 非线性电阻电路方程的建立	134
6.3.1 节点法	134
6.3.2 回路法	135
6.4 非线性电阻电路的基本分析法	136
6.4.1 图解法	136
6.4.2 分段线性化解析法	140
6.4.3 小信号分析法	143
思考题	146
习题	146
第7章 储能元件	151
7.1 电容元件	151
7.1.1 电容器与电容元件	151
7.1.2 电容元件的伏安关系	152
7.1.3 电容元件的功率与能量	153
7.2 电感元件	155
7.2.1 电感线圈与电感元件	155
7.2.2 电感元件的伏安关系	156
7.2.3 电感元件的功率与能量	158
7.3 电容、电感的串、并联等效	159
7.3.1 电容的串、并联等效	159
7.3.2 电感的串、并联等效	162
思考题	165
习题	165
第8章 动态电路的时域分析	168
8.1 动态电路的方程及其初始条件	168
8.1.1 过渡过程与换路	168
8.1.2 动态电路的方程及其解	170

8.1.3 换路定则与电路初始条件的求解	172
8.2 一阶电路的零输入响应	175
8.3 一阶电路的零状态响应	182
8.4 一阶电路的全响应	188
8.5 一阶电路的阶跃响应	196
8.5.1 阶跃函数	196
8.5.2 阶跃响应	198
8.6 一阶电路的冲激响应	202
8.6.1 冲激函数	202
8.6.2 冲激响应	205
8.6.3 冲激响应与阶跃响应之间的关系	208
8.7 正弦激励下一阶电路的全响应	210
思考题	212
习题	213
第9章 正弦量与相量	218
9.1 正弦交流电的基本概念	218
9.1.1 正弦交流电	218
9.1.2 正弦量的瞬时表达式	218
9.1.3 正弦量的三要素	219
9.1.4 同频率正弦量的相位差及超前与滞后的概念	219
9.1.5 正弦量的有效值	220
9.1.6 正弦量的叠加问题	221
9.2 正弦量的相量表示	222
9.2.1 复数的表示与运算	222
9.2.2 复数与相量	223
9.2.3 相量的基本运算	225
9.2.4 相量法	226
9.3 电路元件与定律的相量模型	227
9.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	227
9.3.2 线性时不变电阻元件的相量形式	228
9.3.3 线性时不变电容元件的相量形式	228
9.3.4 线性时不变电感元件的相量形式	229
思考题	230
习题	230
第10章 正弦稳态电路分析	232
10.1 运用相量法分析正弦稳态电路	232
10.1.1 复阻抗与复导纳	232
10.1.2 RLC 串联电路的分析	233
10.1.3 RLC 并联电路的分析	235
10.1.4 复阻抗与复导纳的串联、并联及混联电路的分析	236
10.1.5 正弦稳态电路的相量分析法	238

10.2 正弦稳态电路的功率	243
10.2.1 瞬时功率	243
10.2.2 平均(有功)功率	244
10.2.3 无功功率	244
10.2.4 视在功率	245
10.2.5 功率三角形	246
10.2.6 复功率	246
10.2.7 功率的可叠加性与守恒性	247
10.2.8 功率因数	249
10.2.9 正弦稳态电路中的最大功率传输	251
思考题	253
习题	253
第11章 含有磁耦合元件的正弦稳态电路分析	258
11.1 磁耦合	258
11.1.1 磁耦合线圈	258
11.1.2 磁耦合系数	259
11.1.3 “同名端”的概念	260
11.2 含耦合电感电路的分析	261
11.2.1 两耦合电感线圈的串联	261
11.2.2 两耦合电感线圈的并联	262
11.2.3 两耦合电感线圈的受控源等效去耦	263
11.2.4 两耦合电感线圈的T形等效去耦	264
11.2.5 含有耦合电感线圈的电路分析	265
11.3 空心变压器	268
11.3.1 空心变压器的一次侧等效电路	268
11.3.2 空心变压器的二次侧等效电路	269
11.4 理想变压器	270
11.4.1 理想变压器的定义	270
11.4.2 理想变压器的特性	272
11.4.3 理想变压器的阻抗变换性质	273
思考题	275
习题	275
第12章 三相电路分析	279
12.1 三相电路的基本概念	279
12.1.1 对称三相电源	279
12.1.2 三相负载	282
12.1.3 三相电路	282
12.2 对称三相电路的分析与计算	286
12.2.1 对称三相四线制(Y_0/Y_0)系统的分析	286
12.2.2 复杂对称三相电路的分析	287
12.3 不对称三相电路概述	289

12.4	三相电路的功率及其测量	290
12.4.1	对称三相电路的功率	290
12.4.2	三相电路的功率测量	293
	思考题	295
	习题	296
第13章	非正弦周期信号激励下的稳态电路分析	299
13.1	非正弦周期信号的简谐分量分解	299
13.1.1	周期信号的分解	299
13.1.2	周期信号的频谱	301
13.2	非正弦周期信号的有效值、平均值和平均功率	304
13.2.1	非正弦周期信号的有效值	304
13.2.2	非正弦周期信号的平均值	305
13.2.3	非正弦周期信号的平均功率	306
13.3	非正弦周期信号激励下的稳态电路分析	307
	思考题	311
	习题	311
第14章	正弦交流电路的频率特性	313
14.1	网络函数	313
14.1.1	网络函数的定义	313
14.1.2	网络函数的分类	314
14.1.3	网络函数的频率特性表示方法	315
14.2	谐振电路的频率特性	316
14.2.1	RLC 串联谐振电路的频率特性	317
14.2.2	RLC 并联谐振电路的频率特性	322
14.3	基本滤波器电路及其频率特性	324
14.3.1	低通滤波器	324
14.3.2	高通滤波器	325
14.3.3	带通滤波器	326
14.3.4	其他形式的滤波器简介	329
	思考题	330
	习题	330
第15章	电路的复频域分析	333
15.1	拉普拉斯变换	333
15.1.1	傅里叶变换简介	333
15.1.2	拉普拉斯变换	334
15.1.3	拉普拉斯变换的基本性质	335
15.1.4	常用函数的拉普拉斯变换	338
15.2	拉普拉斯反变换	338
15.2.1	拉普拉斯反变换的基本方法	338
15.2.2	部分分式分解法	339
15.3	运用拉普拉斯变换分析线性电路	343

15.3.1	KCL 和 KVL 的运算形式	343
15.3.2	电路元件的 s 域模型	344
15.3.3	运用拉普拉斯变换法求解线性电路——运算法	345
15.4	复频域中的网络函数	349
15.4.1	复频域网络函数的定义和性质	349
15.4.2	复频率平面上网络函数的零极点	351
15.4.3	极点与网络的特性	351
15.5	$H(j\omega)$ 与 $H(s)$ 的关系	354
15.6	零点、极点与频率特性	355
	思考题	356
	习题	356
第 16 章	二端口网络分析	361
16.1	二端口网络及其分类	361
16.1.1	二端口网络的定义	361
16.1.2	二端口网络的分类	361
16.2	二端口网络的端口特性方程及其参数	362
16.2.1	开路阻抗参数—— Z 参数	362
16.2.2	短路导纳参数—— Y 参数	364
16.2.3	传输参数—— T 参数	365
16.2.4	混合参数—— H 参数	367
16.2.5	四种参数之间的互换	369
16.3	二端口网络的特性阻抗	369
16.3.1	输入端阻抗与输出端阻抗	369
16.3.2	二端口网络的输入端特性阻抗 Z_{C1} 与输出端特性阻抗 Z_{C2}	370
16.3.3	对称二端口网络的特性阻抗 Z_C	370
16.3.4	二端口网络特性阻抗的重要性质	371
16.4	二端口网络的等效电路	372
16.4.1	用 Z 参数表征的二端口等效电路	373
16.4.2	用 Y 参数表征的二端口等效电路	373
16.4.3	用 T 参数表征的二端口等效电路	374
16.4.4	用 H 参数表征的二端口等效电路	375
16.5	二端口网络的联接	376
16.5.1	二端口网络的级联	376
16.5.2	二端口网络的并联	378
16.5.3	二端口网络的串联	379
16.6	二端口网络的网络函数	380
16.6.1	无端接二端口网络的转移函数	380
16.6.2	有端接二端口网络的转移函数	381
	思考题	385
	习题	385
第 17 章	线性均匀传输线的正弦稳态分析	392

17.1	分布参数电路与均匀传输线的基本概念	392
17.2	均匀传输线的偏微分方程	393
17.3	正弦稳态下均匀传输线相量方程的通解	395
17.4	正弦稳态下均匀传输线相量方程的特解	397
17.5	正弦稳态下均匀传输线上的行波	400
17.5.1	均匀传输线上电压和电流的时域表达式	400
17.5.2	均匀传输线上的正向行波和反向行波	401
17.6	均匀传输线的传播常数与特性阻抗	406
17.6.1	传播常数	407
17.6.2	特性阻抗	409
17.7	终端连接不同类型负载的均匀传输线	411
17.7.1	终端接特性阻抗的传输线	412
17.7.2	终端开路时的工作状态	415
17.7.3	终端短路时的工作状态	418
17.7.4	终端接任意负载阻抗	420
17.8	无损耗均匀传输线	421
17.8.1	无损耗线的传播常数和特性阻抗	421
17.8.2	正弦稳态下无损线方程的定解	422
17.8.3	无损耗线终端接有不同类型负载时的工作状态	423
17.9	均匀传输线的集中参数等效电路	440
17.9.1	均匀传输线的单个二端口等效电路	441
17.9.2	均匀传输线的链形二端口等效电路	443
	思考题	444
	习题	445
第 18 章	线性时不变无损耗均匀传输线的暂态分析	447
18.1	均匀传输线暂态过程的基本概念	447
18.2	无损耗线均匀传输线偏微分方程的通解	447
18.3	零状态无损耗线在理想阶跃电压源激励下波的产生与正向传播	451
18.3.1	阶跃直流电压源激励下波的产生与正向传播	451
18.3.2	任意函数形式阶跃理想电压源激励下波的产生与正向传播	453
18.4	无损耗线边界上波的反射	455
18.4.1	一般边界条件下无损耗线方程的复频域解	456
18.4.2	三种特殊边界条件下无损耗线上波的反射	457
18.4.3	无损线终端接有集中参数负载时波的反射	467
18.5	求解无损线暂态过程中波的反射和透射的柏德生法则	475
	思考题	479
	习题	479
	参考文献	482
	部分习题答案	483

第 1 章 电路的基本概念与电路定律

本章从建立电路模型、认识电路变量等最基本的问题出发,给出电路中电压、电流参考方向的概念,介绍电阻、独立电源和受控源等基本电路元件,阐述电路所遵循的基本定律,为电路分析奠定基础。

1.1 实际电路与电路模型

“模型”是现代自然科学、社会科学分析研究问题时普遍使用的重要概念,如没有宽窄厚薄的“直线”是数学学科研究中的一种模型;没有空间尺寸却有一定质量的“质点”是物理学科研究中的一种模型。人们在分析研究某一客观事物时,几乎都要采用模型化的方法,将客观事物科学抽象成反映客观事物最主要物理本质的理想化的物理模型,使问题合理简化,然后再建立与物理模型相对应的数学模型,并以此模型作为对象进行定性或(和)定量分析,根据分析结果,得出合乎客观事物实际情况的科学结论。在采用模型化的方法中,人们用对其模型的分析代替对客观事物的分析。因此,一切科学理论都建立在模型基础之上,没有模型就很难进行科学分析。分析研究电路问题也是如此,首先建立电路模型,然后再用数学的方法对电路模型进行定量分析和计算。

1.1.1 实际电路的组成与功能

人们对“实际电路”的概念并不陌生,在广泛用电的今天,实际电路随处可见。例如,一节干电池、一个灯泡、一个开关、再加上三根导线,按照如图 1-1 所示的方式连接,就组成一个最简单的实际照明电路。

由此可以对实际电路作出一般定义:若干个电气设备或电子器件按照一定的方式相互连接所形成的电流的通路就是实际电路。

实际电路的形式多种多样,如由电阻、电感、电容及晶体管等元器件构成的分立元件电路,或将数以千计的元件集成在几个平方毫米内的集成电路,以及电力系统、现代通信网络、数据信息计算机网络等大型电路。

实际电路的功能基本上可以分成两类。一类是用来实现电能的转换、传输和分配。例如,发电厂的发电机把热能或水能转换成电能,通过变压器、输电线等输送分配给用电单位,其用电设备又把电能转换成机械能、光能或热能等,这样就构成了一个庞大而极为复杂的电力系统电路。其中,供给电能的设备称为电源,而用电设备则称为负载。电路的另一类功能是用来传输、储存、处理各种电信号,如数字语音信号、数字图像信号和控制信号等。目前,人们可以很方便地设计制造出各种不同的电路,以完成某种预期的功能,如整流,即把两个方向的交流电信号变成单一方向的交流电信号;放大,即把微弱电信号放大为强电信号;滤波,即抑制电信号中不需要的频率成分或干扰;变换,即把一种电信号波形变换为所需要的另一种电信号波形;

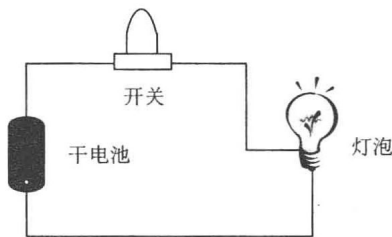


图 1-1 简单照明电路

采样,即把连续电信号变成离散电信号;记忆,即存储原电信号,需要时再将其取出。图 1-2 是描述上述这些电路功能的示意图,左边波形为电路的输入信号,也称为电路的激励;右边波形则为电路的输出信号,也称为电路的响应。

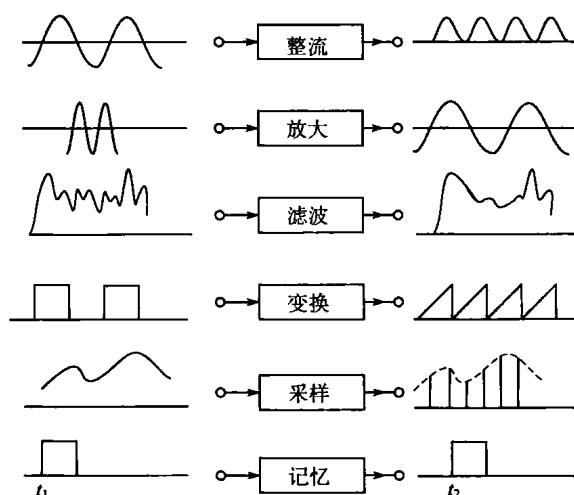


图 1-2 电路功能示意图

1.1.2 电路模型

构成实际电路的电气设备和电子器件统称为实际电路器件,常用的实际电路器件有:发电机、电池、信号发生器、电阻器、电容器、电感器、变压器、晶体管等。人们制造某种器件的目的是利用它的某种物理性质。例如,制造一个电阻器,是利用它的电阻,即对电流呈现阻力的性质;制造连接导体是利用它的优良导电性质,使电流顺畅流过。但是事实上,在制造器件时很难制造出只表现某一特定性质的理想电路器件。任何一个实际电路器件在通电后,其物理表现相当复杂,往往会同时出现若干种电磁现象。例如,当通过电池的电流增大时,电池的端电压会降低,且电池会发热;电阻器通电后会发热,同时还有磁场产生;电流流过电感线圈时产生磁场,电感线圈会发热,匝间还有电场出现;当电容器极板间的电压变化时,电容器中除了变化的电场,还有变化的磁场,同时还有热损耗。因此,直接分析由实际电路器件构成的实际电路相当困难。解决这一难题最好的方法是采用模型化的方法,即在一定的条件下对实际电路器件进行理想化处理,忽略次要性质,用一个足以表征其主要电磁性质的模型来表示,这种模型称为理想电路元件,可以用图形符号描绘。

实际电路器件虽然种类繁多,但在电磁现象上却有许多共同的地方。只要具有相同的主要电磁性质,则在一定条件下可用同一个模型表示。例如,电阻器、照明器具、电炉等的主要特性是消耗电能,可用一个具有两个端钮的理想电阻元件反映其消耗电能的特性,其模型的图形符号如图 1-3(a)所示, R 是反映能量损耗性质的电路参数;各种实际电容器主要用于储存电能,可用一个具有两个端钮的理想电容元件反映其储存电能的特性,其模型的图形符号如图 1-3(b)所示, C 是反映电场储能性质的电路参数;各种实际电感器主要用于储存磁能,可用一个具有两个端钮的理想电感元件反映其储存磁能的特性,其模型的图形符号如图 1-3(c)所示, L 是反映磁场储能性质的电路参数。这些图形符号抽掉了各类实际电器件的外形和尺寸的差异性,用相应的电路参数表现各类的共性(主要的电磁性质)。

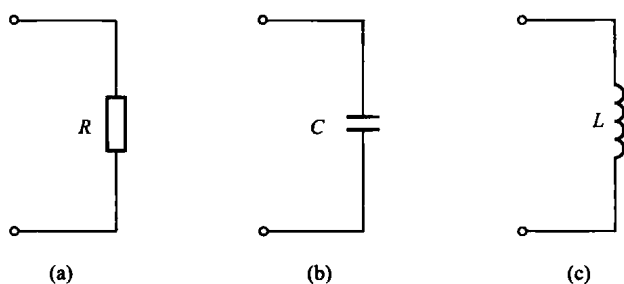


图 1-3 理想电阻、电容、电感元件图形符号

根据上述定义的理想电阻元件、理想电容元件和理想电感元件,对于任何一个实际电阻器、电容器和电感器,则可根据不同的应用条件,用足以反映其主要电磁性质的一些理想电路元件或其组合表示,从而构成实际电路器件的模型。例如,一个实际的电感器在一个骨架上用金属导线绕制而成,如图 1-4(a)所示。如果应用在低频电路中,它主要表现为储存磁能的性质,而消耗的电能与储存的电能都很小,可以忽略不计,所以,在低频应用条件下实际的电感器的模型如图 1-4(b)所示。如果应用在高频电路中,绕制电感线圈的导线所消耗的电能须考虑,但它储存的电能仍可忽略,在这种情况下,实际电感器的模型如图 1-4(c)所示。如果这个实际电感器应用在更高频率的电路中,它储存的电能也须考虑,这时其模型须在图 1-4(c)基础上增加并联的理想电容元件,如图 1-4(d)所示。

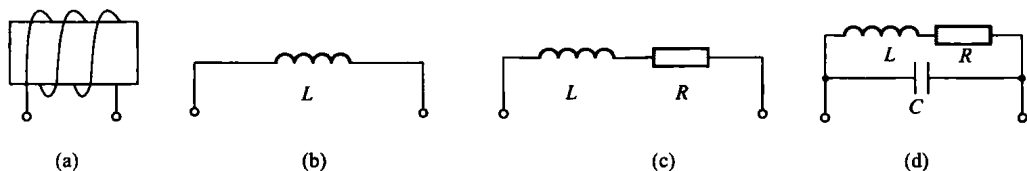


图 1-4 实际电感器在不同应用条件下的电路模型

将实际电路中各个实际电路器件用其模型的图形符号表示,且连接导线用理想导线(线段)表示,这样画出的图称为实际电路的电路模型图,简称电路图,电路图并不反映实际电路的大小尺寸。图 1-5 是简单照明电路的电路图,其中:干电池的模型是理想电压源 U_s ,灯泡的模型是理想电阻元件 R ,连接导线的模型是理想导线。电路理论分析研究的对象是电路模型而不是实际电路。

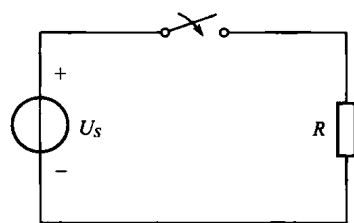


图 1-5 模型化的简单照明电路的电路图

1.1.3 集中参数电路

实际电路中使用的实际电路器件一般都和电能的消耗现象和电磁能的储存现象有关。电能的消耗发生在实际电路器件所有的导体通路中,电磁能则储存在实际电路器件的电场、磁场中。这些现象一般同时存在,且又交织在一起发生在整个器件之中。因此,实际电路中的能量损耗和电场储能、磁场储能具有连续分布的特征,故反映这些能量过程的三种电路参数 R 、 C 、 L 也连续分布。于是,在实际电路的任何部分,既有电阻,又有电容、电感,这给分析研究电路带来很大的困难。幸好科学研究表明,若实际电路器件及实际电路满足集中化条件,即它们的

各向几何尺寸 d 远小于电路工作频率 f 所对应的电磁波的波长 λ , 即

$$d \ll \lambda \quad \lambda = c/f \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s (光速)}$$

这时, 电路参数的连续分布特性对电路性质的影响并不明显, 可以将具有分布特性的电路参数集中起来, 即认为能量损耗、电场储能和磁场储能这三种电磁过程是分别集中在电阻元件、电容元件和电感元件内部进行。这样的元件称为集中参数元件, 每一种集中参数元件只表示一种电磁特性, 并且其电磁特性还可以用数学方法精确定义。由集中参数元件构成的电路称为集中参数电路, 集中参数电路的突出特点是: 将实际电路器件中的电场和磁场在空间分隔开, 电场只与电容元件关联, 磁场只与电感元件关联, 两种场之间不存在相互作用, 因而没有任何电磁能量辐射; 电流同时传送到电路的各处, 即没有时间延迟; 整个电路可以看成电磁空间的一个点, 电路中的电压及电流仅是时间 t 的函数, 而与空间坐标无关。具备这些特点的电路有利于分析。

例如, 我国工业用电的频率为 50Hz, 其波长为 6000km。对于低频电子电路而言, 其尺寸与这一波长相比都可以忽略不计。因此, 可以采用“集中参数”概念, 将它们作为集中参数电路来处理。对于远距离的通信线路和电力输电线, 则不满足集中化条件, 必须考虑电场、磁场沿电路分布的现象, 这时就不能用集中参数, 而用分布参数表征电路。

本书第 1~16 章所分析研究的对象是集中参数电路。集中化条件是电路分析的重要条件, 本书在这一部分所讨论的电路基本定律及以基本定律为基础的各种分析计算方法都以集中化条件为前提。本书第 17~18 章研究分布参数电路。

1.2 电路变量及其参考方向

任何的物理过程及物理现象都必须用一些基本物理量描述和度量。在分析研究电路时, 同样须用到一些基本物理量, 这些物理量与电路中发生的电磁现象有密切的关系。电流 $i(t)$ 、电压 $u(t)$ 、电荷 $q(t)$ 、磁链 $\psi(t)$ 是分析研究电路时所用到的四个基本变量, 以此为基础, 用功率 $p(t)$ 和能量 $W(t)$ 这两个基本复合变量反映电路的能量消耗与传递情况。电路分析的任务是求解这些变量, 这些变量中最常用到的是电流、电压和功率, 物理学课程中对它们已作详细讨论, 这里先作简要复习, 然后引出电流、电压的参考方向的概念, 再着重说明功率数值正负号的物理意义。

1.2.1 电流及其参考方向

带电粒子的定向移动形成电流, 电流的大小或强弱取决于导体中电荷量的变化。通常, 把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流, 即

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

式(1-1)中, 若电荷量的单位为 C(库仑), 时间的单位为 s(秒), 则电流的单位为 A(安培), 因此 1 安 = 1 库/秒。电力系统有时取 kA(千安)为电流的单位, 而电子电路常用 mA(毫安)、 μA (微安)作为电流单位, 它们之间的换算关系是

$$\left. \begin{aligned} 1\text{kA} &= 10^3 \text{ A} \\ 1\text{mA} &= 10^{-3} \text{ A} \\ 1\mu\text{A} &= 10^{-6} \text{ A} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

电流不但有大小,而且有方向,通常规定正电荷运动的方向为电流的实际方向(真实方向),可用一个单方向箭头表示。

如果电流的大小和方向都不随时间变化,则这种电流为恒定电流,简称直流电流(简写作 dc 或 DC),可用符号 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化,则称为交变电流,简称交流电流(简写作 ac 或 AC),可用符号 $i(t)$ 表示。

在一些类似于如图 1-5 所示的简单电路中,电流的实际方向显而易见,它是从电源正极流出,流向电源负极。但是,一些较为复杂的电路,如图 1-6 所示,电阻 R 上电流的实际方向难以确定。此外,如果电路中电流的实际方向不断地随时间变化,那就更不可能用一个固定的单方向箭头表示电流的真实方向。为解决这样的问题,需引入“电流的参考方向”这一概念。电流的参考方向是人为任意假定的,在电路图中可用单方向箭头标出。图 1-6 一个较为复杂的电路图依据假定的电流方向可建立描述电路的数学方程(电路方程),求解出的电流是代数量。若求解出的电流为正值,说明实际方向与所标的参考方向一致;若求解出的电流为负值,说明实际方向与所标的参考方向相反。注意:电流的参考方向一经指定,在计算过程中不能再改变。

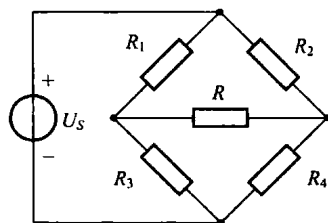


图 1-6 一个较为复杂的电路图

例 1-1 电路元件如图 1-7(a)所示,设每秒有 10C 的正电荷由 a 端移到 b 端。

(1) 若电流的参考方向如图 1-7(b)所示,试求 i_1 。

(2) 若电流的参考方向如图 1-7(c)所示,试求 i_2 。

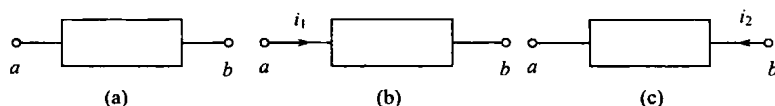


图 1-7 例 1-1 图

解 (1) 图(b)的参考方向与正电荷运动的方向相同,故电流应取正值,即 $i_1 = 10\text{A}$ 。

(2) 图(c)的参考方向与正电荷运动的方向相反,故电流应取负值,即 $i_2 = -10\text{A}$ 。

显然,在这两种参考方向下,两个电流之间的关系为 $i_1 = -i_2$ 。

1.2.2 电压及其参考方向

电路中的电荷具有电位(势)能。电荷只有在电场力的作用下才能作有规则的定向移动,从而形成电流。电场力对电荷做功的大小用电压来衡量,电路中 a 、 b 两点之间的电位(势)之差即是 a 、 b 两点间的电压,在数值上等于单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量,即

$$u(t) = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

式(1-3)中, dq 为由 a 点移动到 b 点的正电荷的电量,单位为 C(库仑); dW 为电荷 dq 移动过程中所获得或失去的能量,单位为 J(焦耳); $u(t)$ 是 a 、 b 两点间的电压,单位为 V(伏特)。因此,1 伏 = 1 焦/库。常用的电压单位还有 kV(千伏)、mV(毫伏)及 μV (微伏),它们之间的换算关系为