

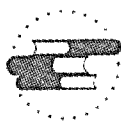


普通高校“十一五”规划教材

张 虹 主编

电路分析

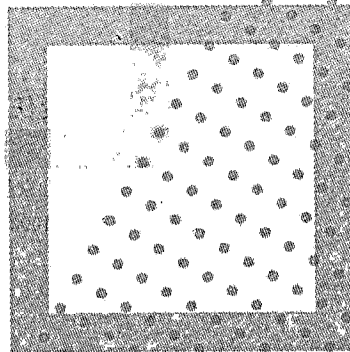
北京航空航天大学出版社



普通高校“十一五”规划教材

电路分析

张 虹 主编



北京航空航天大学出版社

内容简介

根据原国家教委 1995 年颁布的“高等学校工科本科电路分析基础课程教学的基本要求”,结合电子信息时代的新形式和应用型本科院校培养应用型人才的迫切需要,经过教学改革与实践,我们编写了这本《电路分析》。

本教材知识全面,深入浅出,通俗易懂。在保证理论知识够用的同时,注重理论联系实际,培养学生各方面的能力。

全书共分 10 章:电路的基本概念和基本定律,线性电阻电路分析,正弦稳态交流电路分析,互感耦合电路,非正弦周期电流电路分析,动态电路分析,拉普拉斯变换,二端口网络,计算机辅助电路分析,实用电工知识简介。各章均配有经典例题和习题,书后附有习题答案。

本书可作为高等院校计算机、电子、通信、机电一体化等专业本科和专科的教科书,也可作为自学考试和电子技术工程人员的自学用书。本教材总学时为 54~72 学时(不含实验),专科可在此基础上适当增加学时。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/张虹主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2007.8

ISBN 978-7-81124-034-4

I. 电… II. 张… III. 电路分析—高等学校—教材
IV. TN133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 057213 号

电路分析

张 虹 主编

责任编辑 王媛媛 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:20.75 字数:465 千字

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 978-7-81124-034-4 定价:31.00 元

前 言

在我国高等教育由精英阶段向大众化阶段转变的历史性过程中,高等教育系统也在重新构建。新老本科高校都在重新审视和调整自己的办学定位,确定新的发展目标和战略。在新的历史条件下,新建本科院校的出路不能是“再版”传统本科模式,而是要在能够满足社会发展需求的“大众化”、“应用型”领域寻求发展空间。近年来新成立的本科院校大都以应用型为办学定位,形成了一批占全国本科高校总数近30%的与传统本科院校不同的应用型本科院校。

应用型本科院校就是培养本科层次应用型人才的高等学校,重点在它的人才培养上,即主要是对这类学校的人才培养目标、规格以及人才类型、层次作出规定。把人才培养目标定位在一线或实际岗位群,使其具有适应高新技术发展及自我学习、提高的能力。所以,应用型本科教育既非宽泛的工程科学教育,亦非狭窄的职业技能培训,而是培养适应工业、工程生产第一线现实和发展需要的工程应用型、技术应用型人才,是既保证本科人才的基本素质,又具有现代职业技术教育特征的高等教育。

为此,应用型本科教材的编写就要体现和满足它的人才培养模式和培养目标,要充分体现“应用、实用、适用”特色,适应高等院校培养高层次应用人才的实际需要,致力于培养应用型人才的创新精神和实践能力。

本教材即是围绕以上宗旨进行编写的。参编人员大都是双师型教师,有着丰富的工程实践经验,能够从实用角度出发对问题进行论证和阐述;例题、习题的选取也具有这个特点。总之,本教材注重了以下几方面的问题:

- (1) 保证基础,加强概念,培养思路。



(2) 精选内容,主次分明,详略得当。

(3) 面向更新,联系实际,理论与实践并重,知识与技能并重。

(4) 问题分析深入浅出,文字叙述通俗易懂,图文并茂,例题精选,便于自学。

(5) 理论知识以够用为目的,重点加强实际应用。例如,在讲解电路定理、定律时,最后都要结合实际,研究电路理论在实际中的应用,探讨其对实践的指导意义。

(6) 为了适应计算机的广泛应用以及 EDA 技术的不断发展,本书在第 9 章编写了计算机辅助电路分析,介绍了目前比较流行的计算机辅助电路分析软件 PSPICE 以及应用该软件进行电路分析的例子。

(7) 在学习完电路基本理论的基础上,在最后一章编写了实用电工知识,以便更好地研究、分析、解决在工作和生活中所遇到的问题。

参加本书编写的人员有:张虹(前言、第 1、2、9、10 章),高寒(第 3、4 章),王维兰(第 7、8 章)和张淑玲(第 5、6 章)。本书由张虹担任主编并统编全稿。此外,参加本书编写的其他人员还有:齐丽丽、于钦庆、刘贞德、王立梅、刘磊、秦书平、陈光军、李耀明、李厚荣、张元国以及周金玲。

为了保证内容的系统性和连续性,我们还编写了两本系列教材,即《模拟电子技术》和《数字电路与数字逻辑》。连同本教材《电路分析》一起,将成为应用型本科院校计算机、电子、通信等专业非常实用的教学与学习用书。

本书编写过程中,由于时间仓促,加之编者水平有限,若书中有错误和不妥之处,敬请各方面的读者予以批评指正,以便今后不断改进。

编 者

2007 年 3 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电 路	1
1.1.2 电路模型	2
1.1.3 集总参数电路	3
1.1.4 计量单位制	3
1.2 电路的基本物理量	4
1.2.1 电 流	4
1.2.2 电 压	6
1.2.3 电功率	8
1.3 电阻元件	9
1.3.1 电阻元件介绍	9
1.3.2 电阻元件的功率	10
1.3.3 电阻元件与电阻器	11
1.4 电压源和电流源	12
1.4.1 电压源	13
1.4.2 电流源	14
1.5 受控源	15
1.6 基尔霍夫定律	16
1.6.1 基尔霍夫电流定律	17
1.6.2 基尔霍夫电压定律	18
本章小结	23
习题 1	23

第 2 章 线性电阻电路分析

2.1 二端网络及其等效变换	27
2.1.1 基本概念	27
2.1.2 电阻的串联、并联和混联	28
2.2 电阻星形连接和三角形连接的等效变换	32
2.2.1 电阻的星形连接和三角形连接	32



2.2.2 电阻星形连接与三角形连接的等效变换	33
2.3 电压源与电流源的等效变换	34
2.3.1 独立电源的串联和并联	34
2.3.2 两种实际电源模型的等效变换	35
2.4 节点电压法	39
2.4.1 节点电压及节点电压方程	39
2.4.2 节点法应用举例	41
2.5 网孔电流法	44
2.5.1 网孔电流及网孔电流方程	44
2.5.2 网孔法应用举例	45
2.6 叠加定理	47
2.7 戴维南定理和诺顿定理	49
2.7.1 戴维南定理	50
2.7.2 诺顿定理	52
2.7.3 戴维南-诺顿定理在电路调试中的应用	54
2.8 最大功率传输定理	56
2.9 替代定理	58
本章小结	60
习题 2	60
第 3 章 正弦稳态交流电路分析	
3.1 正弦稳态交流电路的基本概念	66
3.1.1 正弦量的瞬时值	66
3.1.2 正弦量的三要素	67
3.1.3 相位差	69
3.1.4 正弦量的有效值	70
3.2 正弦量的相量表示	71
3.2.1 复数的表示形式及运算规则	72
3.2.2 正弦量的相量表示	74
3.3 单一参数正弦交流电路的分析	76
3.3.1 纯电阻电路	76
3.3.2 纯电感电路	77
3.3.3 纯电容电路	79
3.3.4 电感与电容的连接	82
3.4 基尔霍夫定律的相量形式	84



3.4.1 基尔霍夫电流定律的相量形式	84
3.4.2 基尔霍夫电压定律的相量形式	86
3.5 RLC 串联电路的分析——多阻抗串联与并联	87
3.5.1 RLC 串联电路的分析	87
3.5.2 复阻抗的串联与并联	90
3.6 正弦交流电路的功率	92
3.6.1 瞬时功率和平均功率	92
3.6.2 复功率、视在功率和无功功率	94
3.7 功率因数的提高	96
3.8 相量法分析正弦交流电路	98
3.9 谐振电路	100
3.9.1 RLC 串联谐振电路	100
3.9.2 RL-C 并联谐振电路	104
3.10 三相正弦电路	105
3.10.1 三相电源	105
3.10.2 三相电源的连接	106
3.10.3 三相电源和负载的连接	108
3.10.4 三相电路的计算	109
3.10.5 三相电路的功率	112
本章小结	113
习题 3	114
第 4 章 互感耦合电路	
4.1 互 感	120
4.1.1 互感现象	120
4.1.2 互感系数与同名端	121
4.1.3 耦合系数	126
4.2 含有耦合电感电路的计算	127
4.2.1 串、并联电路	127
4.2.2 去耦等效电路	131
4.2.3 含耦合电感电路的分析	133
4.3 空心变压器	135
4.3.1 电路方程与反射阻抗	136
4.3.2 空心变压器的等效电路	137
4.4 理想变压器	139



本章小结	143
习题 4	144
第 5 章 非正弦周期电流电路	
5.1 非正弦周期信号	147
5.2 非正弦周期信号的分解	148
5.2.1 非正弦周期函数分解为傅里叶级数	148
5.2.2 对称波形的傅里叶级数	151
5.2.3 非正弦周期波的频谱	152
5.3 非正弦周期信号的最大值、有效值、平均值和平均功率	154
5.3.1 最大值	154
5.3.2 有效值	154
5.3.3 平均值	155
5.3.4 平均功率	155
5.4 非正弦周期电流电路的分析和计算	157
本章小结	161
习题 5	162
第 6 章 动态电路分析	
6.1 过渡过程及换路定律	165
6.1.1 过渡过程	165
6.1.2 换路定律	165
6.2 一阶 RC 电路的过渡过程	169
6.2.1 RC 电路的零输入响应	169
6.2.2 RC 电路的零状态响应	173
6.3 一阶 RL 电路的过渡过程	176
6.3.1 RL 电路的零输入响应	176
6.3.2 RL 电路的零状态响应	178
6.4 一阶电路的全响应	180
6.4.1 一阶电路的全响应介绍	180
6.4.2 一阶电路的三要素法	180
6.5 一阶电路的阶跃响应与冲激响应	186
6.5.1 阶跃函数与冲激函数	186
6.5.2 阶跃响应	189
6.5.3 冲激响应	190
6.6 二阶电路分析	192



6.6.1 RLC 串联电路的微分方程及其解	192
6.6.2 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 非振荡放电过程(过阻尼情况)	193
6.6.3 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 振荡放电过程(欠阻尼情况)	195
6.6.4 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 临界阻尼情况	197
本章小结	198
习题 6	199
第 7 章 拉普拉斯变换	
7.1 拉普拉斯变换的定义	204
7.1.1 拉普拉斯变换介绍	204
7.1.2 拉普拉斯反变换	205
7.2 拉普拉斯变换的性质	206
7.2.1 线性性质	206
7.2.2 微分性质	206
7.2.3 积分性质	207
7.2.4 延迟性质	207
7.3 拉普拉斯反变换的部分分式法	209
7.3.1 实数单根	210
7.3.2 重 根	211
7.3.3 共轭复数	212
7.4 运算模型及运算电路	213
7.4.1 基尔霍夫定律的复频域表示形式	213
7.4.2 电阻、电感、电容元件的复频域模型	213
7.5 将拉普拉斯变换应用于电路分析	215
* 7.6 传递函数	220
* 7.7 卷 积	222
本章小结	226
习题 7	226
第 8 章 二端口网络	
8.1 概 述	230
8.2 二端口网络的基本方程及参数	231
8.2.1 导纳参数方程及导纳参数	231



8.2.2 阻抗参数方程及阻抗参数	235
8.2.3 传输参数方程及传输参数	237
8.2.4 混合参数方程及混合参数	239
8.2.5 各组参数间的相互转换	240
8.3 二端口网络的等效电路	241
8.3.1 由 Z 参数确定 T 形电路的三个阻抗	242
8.3.2 由 Y 参数确定 Π 形电路的三个导纳	242
8.3.3 含受控源的无源线性二端口网络的等效电路	243
8.4 二端口网络的连接	244
8.5 二端口网络举例	247
8.5.1 相移器	247
8.5.2 衰减器	248
8.5.3 滤波器	248
本章小结	252
习题 8	252
第 9 章 计算机辅助电路分析	
9.1 计算机辅助电路分析概述	255
9.1.1 计算机辅助电路分析的发展及意义	255
9.1.2 计算机辅助电路分析的主要内容	256
9.1.3 计算机辅助电路分析的方法和步骤	256
9.2 电路模型的矩阵表示方法	257
9.3 电路的表格方程	258
9.4 线性代数方程的求解	260
9.5 基于 PSPICE 的计算机辅助电路分析	261
9.5.1 PSPICE 简介	261
9.5.2 PSPICE 的功能	261
9.5.3 PSPICE 的优越性	263
9.5.4 PSPICE 的基本组成	264
9.5.5 PSPICE 中的电路描述	265
9.5.6 PSPICE 的集成环境	268
9.5.7 使用 PSPICE 仿真的一般步骤	270
9.5.8 PSPICE 中的主要元器件	270
9.5.9 PSPICE 应用举例	271
本章小结	274



习题 9	275
第 10 章 实用电工知识简介	
10.1 常用低压电器	276
10.1.1 低压开关	276
10.1.2 熔断器	280
10.1.3 接触器	280
10.1.4 继电器	282
10.2 常用电工仪表	282
10.2.1 万用表	282
10.2.2 直流单臂电桥	285
10.2.3 兆欧表	286
10.3 安全用电常识	288
10.3.1 安全用电的意义	288
10.3.2 安全用电基本知识	288
10.3.3 触电事故	289
10.4 照明线路的安装	294
10.4.1 导线和电缆的种类及选择	294
10.4.2 照明线路用开关的选用和安装	295
10.4.3 照明电器用灯具种类	296
10.4.4 照明线路配线方法	297
10.4.5 常用照明线路的敷设	302
10.4.6 常用照明线路的连接	302
10.5 照明线路故障检修	304
10.5.1 故障检修时的安全注意事项	304
10.5.2 短路故障的检修	305
10.5.3 断路故障的检修	306
10.5.4 漏电故障的检修	306
本章小结	307
习题 10	308
习题参考答案	
习题 1	309
习题 2	309
习题 3	311
习题 4	313



习题 5	313
习题 6	314
习题 7	315
习题 8	316
习题 9	316
参考文献	

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

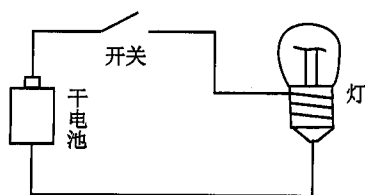
本章主要介绍电路的基础知识,包括:电路的基本概念、基本物理量、常用元件,然后介绍电路中的基本定律——基尔霍夫定律以及应用该定律分析计算电路的方法。

1.1 电路和电路模型

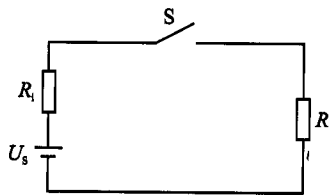
1.1.1 电 路

电路在日常生活、生产和科学研究工作中得到了广泛应用,小到手电筒,大到计算机、通信系统和电力网络中,都可以看到各种各样的电路。可以说,只要用电的物体,其内部都含有电路,只是电路的结构各异,特性和功能也不相同。电路的一种功能是实现电能的传输和转换,例如电力网络将电能从发电厂输送到工厂、农村和千家万户,供各种电气设备使用;电路的另一种功能是实现电信号的传输、处理和存储,例如电视接收天线将接收到的含有声音和图像信息的高频电视信号,通过高频传输线送到电视机中,这些信号经过选择、变频、放大和检波等处理,恢复出原来的声音和图像信号,在扬声器中发出声音并在屏幕上呈现图像。

所有的实际电路都是由电气设备和元器件按照一定的方式连接起来,为电流的流通提供路径的总体,也称网络。在实际电路中,电能或电信号的发生器称为电源,用电设备称为负载。电压和电流是在电源的作用下产生的,因此,电源又称为激励源,简称激励。由激励而在电路中产生的电压和电流称为响应。有时,根据激励和响应之间的因果关系,把激励称为输入,响应称为输出。手电筒电路就是一个最简单的实用电路。这个电路是由一个电源(干电池)、一个负载(灯)、一个开关和连接导线组成的,如图 1.1(a)所示。



(a) 实际电路



(b) 电路模型

图 1.1 手电筒电路



1.1.2 电路模型

为了便于对实际电路进行分析,通常是将实际电路器件理想化(或称模型化),即在一定条件下,突出其主要的电磁性质,忽略其次要因素,将其近似地看作理想电路元件,并用规定的图形符号表示。例如用电阻元件来表征具有消耗电能特征的各种实际元件,那么在电源频率不十分高的电路中,所有电阻器、电炉、电灯等实际电路元器件,都可以用电阻元件这个理想化的模型来近似表示。同样,在一定条件下,电感线圈忽略其电阻,就可以用电感元件来近似地表示;电容器忽略其漏电,就可以用电容元件近似地表示。此外还有电压源、电流源两种理想电源元件。以上这些理想元件分别可以简称为电阻、电感、电容和电源,它们都具有两个端钮,称为二端元件。其中,电阻、电感、电容又称无源元件^①。常见电路元件和符号如表 1.1 所列。

表 1.1 常用电路元件的符号

元件名称	符 号	元件名称	符 号
电池		可变电容	
电压源		无铁芯的电感	
电流源		有铁芯的电感	
电阻		相连接的交叉导线	
可变电阻		不连接的交叉导线	
电容		开关	

由理想元件组成的电路,就称为实际电路的电路模型。图 1.1(b)即为图 1.1(a)的电路模型。又如图 1.2(a)所示为一个最简单的晶体管放大电路,其电路模型如图 1.2(b)所示。以下如未加特殊说明,所说的电路均指电路模型。

以上用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件的过程称为建模。建模时必须考虑工作条件,并按不同精确度的要求把给定工作情况下的主要物理现象及功能反映出来。例如,在直流情况下,一个线圈的模型可以是一个电阻元件;在较低频率下,就要用电阻元件和电感元件的串联组合模拟;在较高频率下,还应计及导体表面的电荷作用,即电容效应,所以其模型还需

^① 电路中有两类元件:有源元件和无源元件。有源元件能产生能量或具有能量控制作用,而无源元件不能,电阻、电容、电感等均为无源元件,发电机、电池、运算放大器、三极管、场效应管等为有源元件。

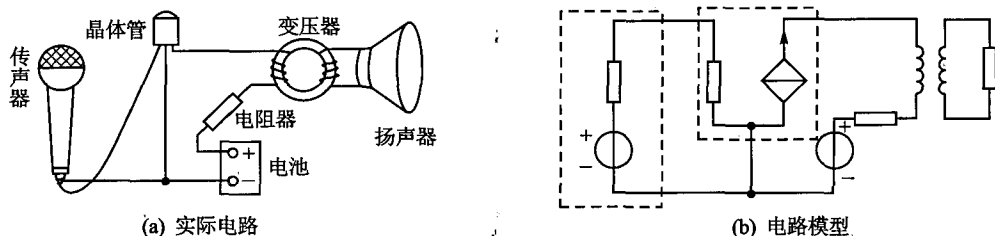


图 1.2 晶体管放大电路

要包含电容元件。可见,在不同的条件下,同一实际器件可能采用不同的模型。模型取得恰当,对电路的分析和计算结果就与实际情况接近;模型取得不恰当,则会造成很大误差,有时甚至导致自相矛盾的结果。如果模型取得太复杂,就会造成分析困难;反之,如果取得太简单,就不足以反映所需求解的真实情况。所以建模问题需要专门研究,绝不能草率定论。

1.1.3 集总参数电路

可以认为理想电路元件的电磁过程都是集中在元件内部进行的,即在任何时刻,从具有两个端钮的理想元件的某一端钮流入的电流,恒等于该时刻从另一端钮流出的电流,并且元件两端钮间的电压值也是完全确定的,与器件的几何尺寸和空间位置无关。凡端钮处电流和端钮间电压满足上述情况的电路元件称为集总参数元件(lumped parameter element),由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。

用集总参数电路来近似实际电路是有条件的,这个条件就是实际电路元件的几何尺寸 d 与电路工作频率所对应的波长 λ 相比,满足 $d \ll \lambda$ 。例如,我国电力用电的频率为 50 Hz,对应的波长为 6 000 km。对以此为工作频率的实验室设备来说,其尺寸与这一波长相比可以忽略不计,因而用集总概念是完全可以的。反之,不满足 $d \ll \lambda$ 条件的另一类电路称为分布(distributed)参数电路,其特点是电路中的电压和电流不仅是时间的函数,也与器件的几何尺寸和空间位置有关。由波导和高频传输线组成的电路是分布参数电路的典型例子。例如,对于电视天线及其传输线来说,其工作频率为 10^8 Hz,譬如 10 频道,其工作频率约为 200 MHz,相应的工作波长为 1.5 m,这时的传输线就是分布参数电路。

本书只讨论集总参数电路,为叙述方便起见,以下也简称为电路。

1.1.4 计量单位制

计量单位制是一个通用的计量单位的规定,不论国家与地区,只要涉及某个物理量的测量,就要以规定的单位来表示,这样大家都能明白和接受。本书采用的是国际单位制(SI)。国际单位制是在 1960 年国际度量会议上所确定的通用计量单位制。SI 有 6 个基本单位,表 1.2 所列这 6 个基本单位、符号及所表示物理量的名称。由基本单位可导出其他物理量的单位,



表 1.2 国际单位制的 6 个基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开尔文	K
发光强度	坎德拉	cd

例如,电荷量的单位是 C(库[仑]), $1\text{ C}=1\text{ A}\cdot\text{s}$,力的单位是 N(牛[顿]), $1\text{ N}=1\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ 。有些物理量的导出单位也可以用具有专门名称的 SI 制导出单位表示,如功率的单位是 W(瓦[特]), $1\text{ W}=1\text{ J}/\text{s}$,电压的单位是 V(伏[特]), $1\text{ V}=1\text{ W}/\text{A}$ 等。以上均可参考国家标准 GB 3100—1993《国际单位制及其应用》。

国际单位制的一个优点是可以用以 10 的幂次方为基础的前缀(或称词头)与基本单位连起来表示很大或很小的量。表 1.3 所列为国际单位制的前缀及其符号。

表 1.3 国际单位制前缀

所乘的 10 次幂	前 缀	符 号	所乘的 10 次幂	前 缀	符 号
10^{18}	艾[可萨]	E	10^{-1}	分	d
10^{15}	拍[它]	P	10^{-2}	厘	c
10^{12}	太[拉]	T	10^{-3}	毫	m
10^9	吉[咖]	G	10^{-6}	微	μ
10^6	兆	M	10^{-9}	纳[诺]	n
10^3	千	k	10^{-12}	皮[可]	p
10^2	百	h	10^{-15}	飞[母托]	f
10^1	十	da	10^{-18}	阿[托]	a

1.2 电路的基本物理量

在电路理论中,电路的基本物理量有 4 个:电流、电压、电荷和磁通,其中最常用的是电流和电压。电路的基本复合物理量为电功率和电能。电路分析的基本任务是计算电路中的电流、电压和功率。

1.2.1 电 流

电荷的定向运动形成电流。电流的实际方向习惯上指正电荷运动的方向。电流的大小用电流强度来衡量,电流强度指单位时间内通过导体横截面积的电荷量,电流强度简称电流,其数学表达式为

