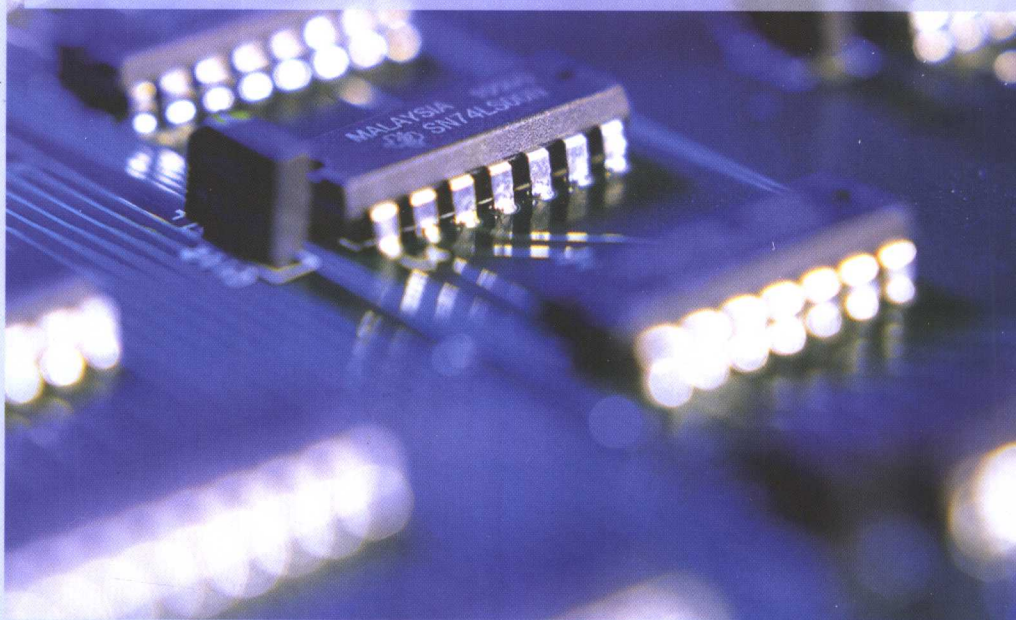




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电路分析 (第2版)

胡翔骏



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电 路 分 析

(第2版)

胡翔骏

高等教育出版社

内容提要

本书是面向 21 世纪课程教材——《电路分析》(胡翔骏编)的修订版,也是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。此次修订主要体现在:1. 根据教育部的教学基本要求调整教材内容。2. 增加电路设计和应用举例内容,加强工程性。3. 在光盘中加入 ppt 演示稿、实验演示等内容。4. 调整例题、习题的配置,提高教材的适用性。具体内容有:电路的基本概念和分析方法;用网络等效简化电路分析;网孔分析法和结点分析法;网络定理;理想变压器和运算放大器;双口网络;电容元件和电感元件;一阶电路分析;二阶电路分析;正弦稳态分析;正弦稳态的功率和三相电路;网络函数和频率响应;含耦合电感的电路分析;动态电路的频域分析。

本书可供普通高等学校电气信息、电子信息专业作为电路课程教材使用,也可供工程技术人员作为参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/胡翔骏. —2 版. —北京:高等教育出版社, 2007. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 020222 - 9

I. 电... II. 胡... III. 电路分析 - 高等学校 - 教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 146174 号

策划编辑 刘激扬 责任编辑 王莉莉 封面设计 于文燕
责任绘图 朱 静 版式设计 余 杨 责任校对 王效珍
责任印制 宋克学

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
			http://www.landaco.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
印 刷	高等教育出版社印刷厂		
开 本	787 × 960 1/16	版 次	2001 年 6 月第 1 版
印 张	36		2007 年 1 月第 2 版
字 数	690 000	印 次	2007 年 1 月第 1 次印刷
插 页	4	定 价	43.90 元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20222 - 00

前 言

《电路分析》教材2001年出版以来，已经重印了十多次，为了更好地满足广大师生的要求，按照教育部最新制定的《高等学校工程本科电路分析基础课程教学基本要求》进行修订。修订后的教材是一套立体化多媒体教材，不仅包含理论教学部分的内容，也涉及实践教学部分的内容，为电路课程的教学提供全面的教学支持，更好地满足高等学校工科电子、通信及信息专业各类本科学生的学习需要。

《电路分析》(第2版)立体化教材尽可能应用现代信息技术提供更多的优质教学资源和解算习题的计算工具，便于采用现代化教学手段和各种教学方法进行教学。使学生在学学习电路模型基本性质和分析方法的同时，对实际电路的特性和实验方法有所了解；使学生在采用“笔算”方法解算电路习题的同时，可以用计算机程序来求解电路分析的习题；使学生在学学习电路分析的同时，对电路设计问题有所了解，从而更好地掌握电路理论，提高分析和解决实际电路问题的能力。

《电路分析》(第2版)立体化教材由纸质教材和电子教材两部分组成。纸质教材由《电路分析》(第2版)主教材和《电路分析教学指导书》(第2版)辅助教材组成。电子教材由《电路分析电子教案》、《电路分析演示解答系统》和《电路分析实验演示系统》等三部分组成，放在一张《电路分析教学辅助系统》DVD光盘中。

纸质教材《电路分析》(第2版)的内容由电阻电路分析和动态电路分析两部分组成。电阻电路分析由“电路的基本概念和分析方法”、“用网络等效简化电路分析”、“网孔分析法和结点分析法”、“网络定理”、“理想变压器和运算放大器”、“双口网络”六章组成；动态电路分析由动态电路的时域分析、正弦稳态分析和频域分析三部分组成。其中的动态电路时域分析由“电容元件和电感元件”、“一阶电路分析”和“二阶电路分析”三章组成；正弦稳态分析由“正弦稳态分析”、“正弦稳态的功率和三相电路”、“网络函数和频率响应”、“含耦合电感的电路分析”四章组成；频域分析由“动态电路的频域分析”一章组成。考虑到不同学校对电路理论课程的要求不同，除了教育部基本要求中规定本科学生必须掌握的内容外，还增加了一些基本要求规定的选学内容和本教材具有特色的内容，供各个学校的师生根据实际情况选择使用。纸质教材《电路分析教学指导书》(第2版)提供全书习题的“笔算”求解过程，

而将计算机求解习题和例题的内容放在电子教材光盘中。

《电路分析教学辅助系统》DVD 光盘中的“电路分析电子教案”包含纸质教材《电路分析》(第2版)全书内容的幻灯片,为教师编写电子教案提供基本的素材,学生也可以利用电子教案进行学习。在“电路分析演示解答系统”中,除了提供电路分析教学难点的演示系统外,还提供一套教学用电路分析程序,学生可以利用这些智能计算工具来解算各种习题和进行电路设计,培养独立解算电路习题的能力和创新能力。在光盘中提供利用这些程序解算全书习题和例题的幻灯片,供师生参考使用。“电路分析实验演示系统”由与电路教学内容密切相关的130多个实验录像组成,这些实验可以使学生在学电路理论的同时了解相关实际电路中发生的物理现象,熟悉一些基本的电路实验方法和仪器,对实际电路与电路模型的区别与联系有所认识,从而更好地掌握电路理论,提高分析和解决实际电路问题的能力。

李瀚荪教授详细地审阅了本书,提出了不少宝贵意见,编者表示衷心的感谢。在教材和软件的使用过程中,很多学校的教师和学生提出过十分有益的意见和建议,编者深表谢意。特别感谢俞大光教授的指导和楼史进编审、刘激扬副编审多年来的帮助。

在电路教材中引入计算机分析和提供大量教学实验录像等教学资源还是一个新事物,由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,请读者提出宝贵的意见,以便今后改进。

胡翔骏

2006年9月于电子科技大学

第 1 版前言

《电路分析》是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”中“电气信息类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”这一项目的研究成果。编写教材的依据是原国家教育委员会 1995 年颁布的“高等学校工科本科电路分析基础课程教学基本要求”，供高等学校工科电子、通信及信息专业使用。本书由电阻电路分析和动态电路分析两部分组成，在附录中介绍了线性动态电路的复频域分析和电路分析程序的使用方法。

为了满足培养 21 世纪创新人才的要求，在教材中增加了计算机分析电路的方法和引用计算机程序分析各种线性电路的内容，体现出教材的先进性。计算机分析电路的通用性和普遍性也体现在对电路基本概念、基本定理和基本分析方法的陈述上。书中突出了单口网络和双口网络的端口特性，增加了建立动态电路微分方程的例题和用计算机程序分析高阶动态电路的内容。为了便于自学，除阐述力求深入浅出、通俗易懂外，书中还安排了比较多的例题和习题，其中包括用计算机分析电路的例题和习题。书中举了几个实际电路的例题，便于学生了解实际电路与电路模型的关系，有助于提高学生分析和解决实际电路问题能力。

考虑到教学上应该以学生为中心的思想，书中配有一张磁盘，装有“电路分析演示解答系统”软件的学生版。其中的“演示系统”可以对在黑板上难以表达的很多电路概念进行动画演示。“电路分析解答系统”所提供的四个通用电路分析程序可以对电路理论所涉及的各种线性电路进行分析。该软件曾获得全国普通高等学校优秀计算机辅助教学软件二等奖，是学习电路课程的一种很好的工具，可以解决学生自学中遇到的很多问题，使学生能够更好地掌握现代电路的基本理论，掌握用计算机分析和设计电路的基本方法，从而提高学生分析和解决电路问题的能力以及培养学生的创新精神。

上海大学吴锡龙教授详细审阅了全书，提出了不少宝贵意见，谨致以衷心的感谢。在教材和软件的试用过程中，我校教师和学生提出过十分有益的意见和建议，编者深表谢意。

为了便于教师采用现代化的教学手段(多媒体教学和网络教学)进行教学，还准备了《电路分析》的电子教案和习题解答幻灯片，可以在单个计算机和网络上工作，全部软件放在一张光盘中，由高等教育出版社单独发行，欢迎教师使用。

在电路教材中引入计算机分析还是一个新事物，由于编者水平有限，时间有限，错误和不妥之处在所难免，请读者提出宝贵的意见，以便今后加以改进。

胡翔骏

2000年10月

于电子科技大学

目 录

第一部分 电阻电路分析

第一章 电路的基本概念和分析方法	1
§ 1-1 电路和电路模型	1
§ 1-2 电路的基本物理量	6
§ 1-3 基尔霍夫定律	10
§ 1-4 电阻元件	14
§ 1-5 独立电压源和独立电流源	18
§ 1-6 两类约束和电路方程	25
§ 1-7 支路电流法和支路电压法	33
§ 1-8 电路设计、电路实验和计算机分析电路实例	35
摘要	42
习题一	43
第二章 用网络等效简化电路分析	52
§ 2-1 电阻分压电路和分流电路	52
§ 2-2 电阻单口网络	58
§ 2-3 电阻的星形联结与三角形联结	68
§ 2-4 简单非线性电阻电路分析	71
§ 2-5 电路设计、电路应用和电路实验实例	77
摘要	83
习题二	84
第三章 网孔分析法和结点分析法	91
§ 3-1 网孔分析法	91
§ 3-2 结点分析法	96
§ 3-3 含受控源的电路分析	102
§ 3-4 回路分析法和割集分析法	109

§ 3-5 计算机分析电路实例	113
摘要	117
习题三	117
第四章 网络定理	125
§ 4-1 叠加定理	125
§ 4-2 戴维宁定理	130
§ 4-3 诺顿定理和含源单口网络的等效电路	136
§ 4-4 最大功率传输定理	142
§ 4-5 替代定理	145
§ 4-6 电路设计、电路应用和计算机分析电路实例	147
摘要	155
习题四	156
第五章 理想变压器和运算放大器	164
§ 5-1 理想变压器	164
§ 5-2 运算放大器的电路模型	169
§ 5-3 含运放的电阻电路分析	173
§ 5-4 电路应用和计算机分析电路实例	178
摘要	183
习题五	184
第六章 双口网络	189
§ 6-1 双口网络的电压电流关系	189
§ 6-2 双口网络参数的计算	191
§ 6-3 互易双口和互易定理	200
§ 6-4 含双口网络的电路分析	204
§ 6-5 含独立源双口网络的等效电路	207
§ 6-6 电路实验和计算机分析电路实例	208
摘要	211
习题六	211

第二部分 动态电路分析

第七章 电容元件和电感元件	215
§ 7-1 电容元件	215

§ 7-2 电感元件	224
§ 7-3 动态电路的电路方程	231
§ 7-4 电路应用、电路实验和计算机分析电路实例	236
摘要	240
习题七	242
第八章 一阶电路分析	247
§ 8-1 零输入响应	247
§ 8-2 零状态响应	254
§ 8-3 完全响应	259
§ 8-4 三要素法	264
§ 8-5 阶跃函数和阶跃响应	273
* § 8-6 冲激函数和冲激响应	276
§ 8-7 电路应用、电路实验和计算机分析电路实例	283
摘要	289
习题八	290
第九章 二阶电路分析	301
§ 9-1 RLC 串联电路的零输入响应	301
§ 9-2 直流激励下 RLC 串联电路的响应	309
§ 9-3 RLC 并联电路的响应	312
§ 9-4 一般二阶电路分析	314
§ 9-5 电路实验和计算机分析电路实例	318
摘要	322
习题九	324
第十章 正弦稳态分析	330
§ 10-1 正弦电压和电流	330
§ 10-2 正弦稳态响应	338
§ 10-3 基尔霍夫定律的相量形式	343
§ 10-4 R 、 L 、 C 元件电压电流关系的相量形式	346
§ 10-5 正弦稳态的相量分析	354
§ 10-6 一般正弦稳态电路分析	361
§ 10-7 单口网络的相量模型	369
§ 10-8 正弦稳态响应的叠加	376

§ 10-9 电路实验和计算机分析电路实例	381
摘要	387
习题十	389
第十一章 正弦稳态的功率和三相电路	403
§ 11-1 瞬时功率和平均功率	403
§ 11-2 复功率	407
§ 11-3 最大功率传输定理	409
§ 11-4 平均功率的叠加	413
§ 11-5 三相电路	415
§ 11-6 电路设计、电路实验和计算机分析电路实例	422
摘要	430
习题十一	432
第十二章 网络函数和频率特性	438
§ 12-1 网络函数	438
§ 12-2 RC 电路的频率特性	442
§ 12-3 谐振电路	449
§ 12-4 谐振电路的频率特性	456
§ 12-5 电路设计和计算机分析电路实例	459
摘要	466
习题十二	468
第十三章 含耦合电感的电路分析	474
§ 13-1 耦合电感的电压电流关系	474
§ 13-2 耦合电感的串联与并联	478
§ 13-3 耦合电感的去耦等效电路	480
§ 13-4 空心变压器电路的分析	483
§ 13-5 耦合电感与理想变压器的关系	488
§ 13-6 电路实验和计算机分析电路实例	491
摘要	496
习题十三	497
第十四章 动态电路的频域分析	502
§ 14-1 拉普拉斯变换	502

§ 14 - 2 动态电路的频域分析	503
§ 14 - 3 线性时不变电路的性质	507
§ 14 - 4 计算机分析电路实例	512
摘要	522
习题十四	522
附录 A 计算机辅助电路分析	
§ A - 1 电路模型的矩阵表示方法	525
§ A - 2 直流电路分析程序 DCAP	526
§ A - 3 正弦电路分析程序 ACAP	533
§ A - 4 动态网络分析程序 DNAP	541
§ A - 5 符号网络分析程序 SNAP	544
附录 B 电路分析教学辅助系统	
§ B - 1 电路分析电子教案	548
§ B - 2 电路分析演示解答系统	548
§ B - 3 电路分析教学实验演示系统	550
后语	554
部分习题答案	555
参考书目	564
附图	565

第一部分 电阻电路分析

第一章 电路的基本概念和分析方法

本章介绍电路的基本概念和基本变量，阐述集总参数电路的基本定律——基尔霍夫定律。定义三种常用的电路元件：电阻、独立电压源和独立电流源。最后讨论集总参数电路中，电压和电流必须满足的两类约束以及电路分析的基本方法。这些内容是全书的基础。

§ 1-1 电路和电路模型

一、电路

电在日常生活、生产和科学研究工作中得到了广泛应用。在手机、收录机、电视机、录像机、影碟机、音响设备、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。这些电路的特性和作用各不相同。电路的一种作用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各个工厂、广大农村和千家万户，供各种电气设备使用。电路的另外一种作用是实现电信号的传输、处理和存储，例如电视接收天线将所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息，在扬声器中发出声音并在显像管屏幕上呈现图像。

由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、运算放大器、传输线、电池、发电机和信号发生器等电气器件和设备连接而成的电路，称为实际电路。根据实际电路的几何尺寸(d)与其工作信号波长(λ)的关系，可以将它们分为两大类：满足 $d \ll \lambda$ 条件的电路称为集总参数电路，其特点是电路中任意两个端点间的电压和流入任一器件端钮的电流是完全确定的，与器件的几何尺寸和空间位置无关。不满足 $d \ll \lambda$ 条件的另一类电路称为分布参数电路，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。由波导和传输线组成的电路，是分布参数电路的典型例子。本书只讨论集总参数电路，为叙述方便起见，今后常简称为电路。

例如，一个音频放大电路的最高工作频率为 $f = 25 \text{ kHz}$ ，其波长为

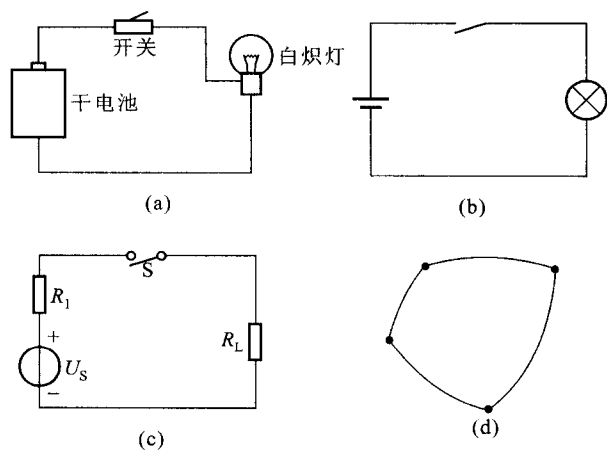
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{25 \times 10^3 / \text{s}} = 12 \times 10^3 \text{ m} = 12 \text{ km}$$

一般的音频放大电路和音响设备的几何尺寸 (d) 远比这个波长 (λ) 小，均应视为集总参数电路。

表 1-1 列举了我国国家标准中的部分图形符号。采用这些图形符号，可以画出表明实际电路中各个器件互相连接关系的电原理图。例如图 1-1(a) 表示日常生活中使用的手电筒电路，它由干电池、白炽灯、开关和手电筒壳(连接导体)组成。图 1-1(b) 是用电气图形符号表示的手电筒电路的电原理图。又如图 1-3(a) 表示一个最简单的晶体管放大电路，它由传声器、晶体管、电阻器、电池、变压器和扬声器组成，其电原理图如图 1-3(b) 所示。

表 1-1 部分电气图用图形符号(根据国家标准 GB 4728—2000)

名称	符号	名称	符号
导线		隧道二极管	
连接的导线		晶体管	
接地		运算放大器	
接机壳		电池	
开关		电阻器	
熔断器		可变电阻器	
灯		电容器	
电压表		线圈, 绕组	
传声器		变压器	
扬声器		铁心变压器	
二极管		直流发电机	
稳压二极管		直流电动机	



(a) 实际电路 (b) 电原理图 (c) 电路模型 (d) 拓扑结构图

图 1-1 手电筒电路

二、电路模型

研究集总参数电路特性的一种方法是用电气仪表对实际电路直接进行测量。另一种更重要的方法是将实际电路抽象为电路模型，用电路理论的方法分析计算出电路的电气特性，如图 1-2 所示。运用现代电路理论，借助于计算机，可以模拟各种实际电路的特性和设计出电气性能良好的大规模集成电路。

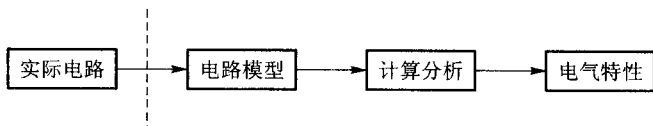
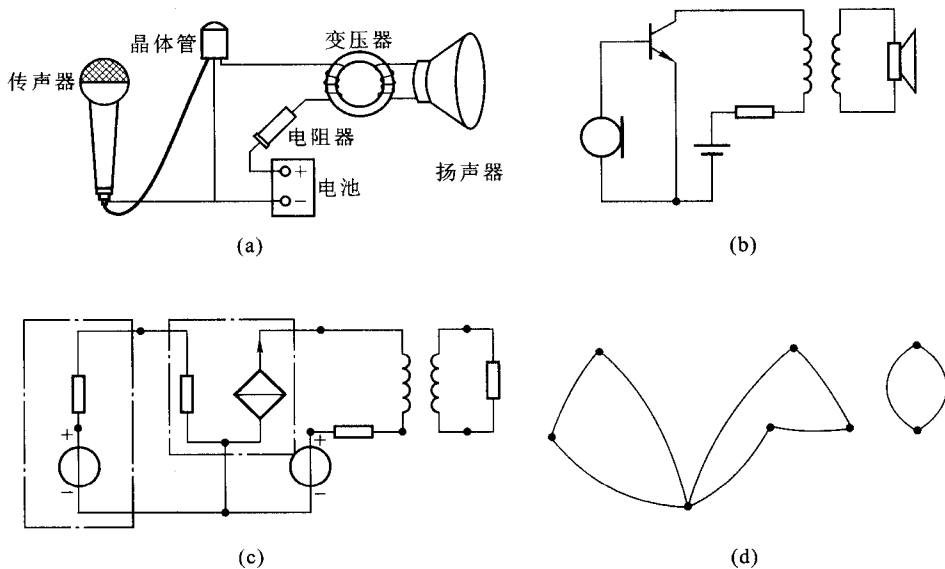


图 1-2 研究电路的基本方法

如何将实际电路抽象为电路模型呢？实际电路中发生的物理过程是十分复杂的，电磁现象发生在各器件和导线之中，相互交织在一起。对于集总参数电路，当不关心器件内部的情况，只关心器件端钮上的电压和电流时，可以定义一些理想化的电路元件来近似模拟器件端钮上的电气特性。例如定义电阻元件是一种只吸收电能（它可以转换为热能或其他形式的能量）的元件，电容元件是一种只存储电场能量的元件，电感元件是一种只存储磁场能量的元件。用这些电阻、电容和电感等理想化的电路元件近似模拟实际电路中每个电气器件和设备，再根据这些器件的连接方式，用理想导线将这些电路元件连接起来，就得到该电路的电路模型。例如图 1-1(c) 表示图 1-1(a) 所示电路的电路模型。图 1-3(c) 表示图 1-3(a) 所示电路的电路模型，这些图形称为电路图。今后，提到“电路图”一词时，可能指表示实际电路的电原理图，也可能指

表示电路模型的电路图，请读者注意区别。

在电路分析中，为了便于看出电路模型中各元件的连接关系，常采用仅仅表示元件连接关系的拓扑结构图，如图 1-1(d) 和图 1-3(d) 所示。



(a) 实际电路 (b) 电原理图 (c) 电路模型 (d) 拓扑结构图

图 1-3 晶体管放大电路



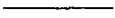
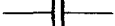



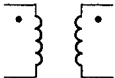


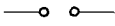
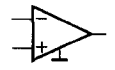
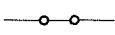
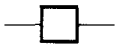
表 1-2 列举了本书采用的部分电路元件的图形符号，其中有一些符号与电气图所用的图形符号相同。这些电路元件的定义和特性将在以后陆续介绍。

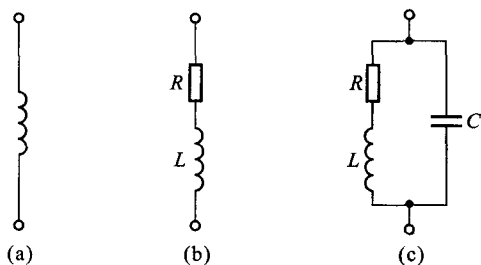
电路模型近似地描述实际电路的电气特性。根据实际电路的不同工作条件以及对模型精确度的不同要求，应当用不同的电路模型模拟同一实际电路。例如图 1-4(a) 所示线圈，在低频交流工作条件下，用一个电阻和电感的串联来模拟，如图 1-4(b) 所示；在高频交流工作条件下，则要再并联一个电容来模拟，如图 1-4(c) 所示。

表 1-2 部分电路元件的图形符号

名称	符号	名称	符号
独立电流源		受控电压源	
独立电压源		电阻	
受控电流源		可变电阻	

续表

名 称	符 号	名 称	符 号
非线性电阻		理想二极管	
理想导线		电容	
连接的导线		电感	
电位参考点		理想变压器 耦合电感	
理想开关		回转器	
开路		理想运放	
短路		二端元件	



(a) 线圈的图形符号 (b) 线圈通过低频交流的模式

(c) 线圈通过高频交流的模式

图 1-4 线圈的几种电路模型

将实际电路抽象为电路模型的工作，需要对各种电气器件的特性有深入的了解，有时是非常复杂和困难的。本书只能涉及一些简单的情况，其目的是为了牢固地树立“电路模型”的概念。本课程的主要任务是研究电路模型(简称为电路)的各种分析方法，其目的是通过对电路的分析研究来预测实际电路的电气特性，以便指导改进实际电路的电气特性和设计制造出新的实际电路。电