

电 路

CIRCUITS

Fawwaz T. Ulaby & Michel M. Maharbiz 原著

于歆杰 等译



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

电路

CIRCUITS

Fawwaz T. Ulaby & Michel M. Maharbiz 原著

于歆杰 等译



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是美国密歇根大学乌拉比教授和加州大学伯克利分校马哈必斯副教授于2011年编写的电路教材,在美国几十所高校中使用。

本书主要内容包括电路术语、电阻电路、电路分析方法、运算放大器、一阶电路、二阶电路、电路的正弦稳态分析、频率响应和滤波器、拉普拉斯变换和傅里叶变换等。本书的最大特点是包含了丰富的电路应用实例。这些实例具有鲜明的时代特征,而且紧密结合电路分析原理。

本书适合作为普通高等院校电路课程的教材和参考书,也可供科研与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路/(美)乌拉比(Ulaby, F. T.), (美)马哈必斯(Maharbiz, M. M.)著;于歆杰等译. --北京:高等教育出版社,2014. 1

书名原文:Circuits

ISBN 978-7-04-038951-7

I. ①电… II. ①乌… ②马… ③于… III. ①电路-高等学校-教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 290342 号

策划编辑 杜 炜 责任编辑 杜 炜 封面设计 于文燕 版式设计 于 婕
责任校对 李大鹏 责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京市四季青双青印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 48
字 数 1180 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2014 年 1 月第 1 版
印 次 2014 年 1 月第 1 次印刷
定 价 79.80 元

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 38951-00

译者序

从我第一眼看到这本书的那个时刻起,就下定决心要将它翻译成中文出版。原因只有两个,都在封面上。

首先是该书的第一作者为乌拉比(Fawwaz Ulaby)。他写的《应用电磁学基础》(“Fundamentals of Applied Electromagnetics”)是美国最畅销的电磁场教材之一。自我从事电气工程学科的研究和教学工作以来,对既能写电磁场教材也能写电路教材的人是非常敬仰的,因为这代表着此人具备两种完全不同的思维模式:严密的数学推导和灵活的工程应用。我知道在当前这方面的大师有海特(William Hayt)和郑钧(David Cheng)。现在发现乌拉比也写了电路书^①,很是兴奋,认为这本书的内容一定比较严谨。

其次是封面上的佳能5D全幅数码单反相机。作者显然不是随便地将这个时髦货放在封面上以抓人眼球,书中内容必然与数码单反紧密结合。再翻开目录稍微一扫,多达23个“技术概要”和几乎每章一个“应用注释”的名称让人眼前一亮:闪存、触摸屏、有源降噪耳机、夜视成像、普适计算、神经探针、碳纳米管、合成生物学、三维世界地图……作者在第9章末尾还设置了专门的1节“知识点整合”,将这些技术概要的内容梳理起来,告诉读者,掌握了本书的知识点,原则上来说就明白了佳能5D全幅数码单反相机的工作原理。光看看目录就让人觉得:电路真有用啊!我想不仅我有这种感觉,所有看了原书封面和目录的人都会有类似的体会。一旦读者这么想,作者的目的就达到了:让读者对貌似枯燥的理论分析产生强烈的兴趣,认为电路分析理论是真有用的!更让人佩服的地方是,这些技术概要和应用注释都和该章讨论的电路主题息息相关。因此,在仔细阅读完全书以后,这种感觉会更加强烈。

在电路分析理论联系工程实际方面,译者所在的学校(清华大学)从2004年起也进行了比较系统的教学改革,将MOSFET、运算放大器等当代电路器件完整融入电路课程中,在教材和教学中引入了70多个工程实例^②。除MIT电路教材^③外,这本书是我们在美国教材中发现的又一同道^④。

为什么这本电路书能写得如此引人入胜?作者的科研背景是关键。第一作者乌拉比是美国密歇根大学电气与计算机科学系的教授,从事雷达方面的研究,因此对电磁场非常熟悉,对雷达

① 后来居然发现他还写了信号与系统教材:Fawwaz Ulaby and Andrew Yagle, Engineering Signals and Systems, NTS Press, 2012.

② 感兴趣的读者可参考一篇论文:于歆杰,朱桂萍,陆文娟,等.“电路原理”课程教学改革的理念与实践. 电气电子教学学报,2012,34(1):1-8.

③ 于歆杰,朱桂萍,刘秀成译. 模拟和数字电子电路基础. 北京:清华大学出版社,2008.

④ 关于电路课程和电路教材,感兴趣的读者可参考两位前辈带领我写的一篇论文:龚绍文,郑君里,于歆杰. 电路课程的历史、现状和前景. 电气电子教学学报,2011,33(6):5-12.

成像也不陌生^①。第二作者马哈比斯(Michel Maharbiz)是美国加州大学伯克利分校电气与计算机科学系的副教授,从事用微制造技术对生物进行控制方面的研究^②。应该说,这两位作者的组合正可谓珠联璧合。乌拉比的厚实基础和马哈比斯的前沿应用在本书的内容选择、叙述、例题和习题等方面表现得淋漓尽致。

我国工程学科的高等教育正在向“研究型学习”方面转型。所谓的研究型学习,有多种体现形式,可以是基于项目的学习(project based learning, PBL),可以是构想、设计、实现与运行(conceive, design, implement, operation, CDIO),可以采用“翻转课堂”的方式,将原先的课堂讲授放到课前让学生自己看录像预习,课上以讨论方式强调学生的主动参与(比如普渡大学和加州大学伯克利分校的电路课程)。无论怎样,目的只有一个:让学生的学习过程从“听课—做题—考试—忘记”变成“发现问题—寻找解决方案—重新发现知识—牢固掌握知识甚至发现新的知识”。如果不能将课堂与课前和课后、理论与仿真和实验进行紧密结合,在理论大课堂中是不可能实现研究型学习的。这在美国高水平大学中已成为共识。本书的另一特点是对仿真软件Multisim的介绍融入教学内容。此外,本书在美国发行时还附带另一个小册子^③,作为教学补充(可通过NTS出版社网站免费下载该书的pdf版本^④)。这本小册子总共提供了40个题目(从第2章至第11章每章4个),要求学生用3种不同方式(理论分析、数值仿真和实际测量)来完成每个题目。完成理论分析后,学生要用NI的Multisim软件对电路进行仿真,然后用NI的myDAQ硬件搭建电路并完成测试。每道题都至少要求得到一个数值,用于比较不同方法得出的结果。小册子在题目后面还给出了详细的基于Multisim和myDAQ进行仿真和测量的指导,并且提供了网络视频的链接。由于这部分指导过于细致,而且读者可自由下载该书,因此在翻译过程中仅在本书每章习题的最后提供了题目,题目中给出了所需知识点对应的教材中章节号,供教师开展相应教学改革时参考。

如果要将本书作为电路分析基础课程的教材,则教师需要在非线性电阻电路、互感和三相等方面进行适当补充。如果作为教学参考书,本书特色鲜明、重点突出,具有极强的可参考性。此外还需要说明的是,英美电路教科书中的电路符号及图表规范与我国标准不同,例如电阻和运算放大器的符号、支路连通或交叉的表示方式、坐标和表中变量单位的标注方法等。在不影响理解的前提下,译文中并未对其进行改动。

本书由清华大学电路原理教学组合作翻译,按照章节顺序分工为:第1、4章由于歆杰翻译,第2、3章由关永刚翻译,第5、6章由朱桂萍翻译,第7、8章由刘秀成翻译,第9章(含知识点整合)由郭静波翻译,第10、11章由邹军翻译,全书由于歆杰统稿。虽然所有译者都有在境外长期访问学习的经历,而且一直在从事电路和电磁场课程的教学,但本书鲜明的时代特色也让我们翻译起来颇感吃力。如有误译,恭请指正。本书译文最终定稿之际,恰逢我在美国对普渡大学、威斯康星大学麦迪逊分校、伊利诺伊大学香槟分校、加州大学伯克利分校等大学进行访问,与不少电路课程教师深入沟通和交流了课程的内容选择和教学法,其中和本书第二作者马哈比斯

① <http://sitemaker.umich.edu/fawwaz.ulaby/home>

② <http://www.eecs.berkeley.edu/Faculty/Homepages/maharbiz.html>

③ Edward Doering(Department of Electrical and Computer Engineering, Rose-Hulman Institute of Technology), NI myDAQ and Multisim Problems for Circuits, National Technology and Science Press, 2011.

④ <http://www.ntspress.com/publications/ni-mydaq-and-multisim-problems/>

(Maharbiz) 博士的多次讨论也促使我对本书有了更深的认识。

希望能够看到更多基础扎实、时代感强、特色鲜明的
好电路教材!

于歆杰(yuxj@tsinghua.edu.cn)

2013 年元旦于旧金山

前 言

作为大多数电气工程和计算机工程专业学生的基础课,电路课程需要实现下列3个目标:

(1) 需要介绍基本电路分析方法,使学生掌握分析任意平面线性电路(激励可为直流、交流、甚至更为复杂的脉冲和指数)的技能。

(2) 需要介绍神奇的变换域思想(比如拉普拉斯变换和傅里叶变换),使学生不仅学会电路分析方法,更掌握科学和工程领域通用的数学语言。

(3) 需要介绍电路知识在科学和工程中的应用,使学生能够拓展技术视野。

本书致力于实现上述目标。本书的特色包括:

技术概要。书中包括23个技术概要。每个概要都介绍一个对每位电气和计算机工程从业人员来说应该熟知的话题。电子显示器、数据存储媒质、传感器和执行器、超级电容器、三维图像等话题都从技术层面进行讨论,激发学生深入了解该领域的志趣。

应用举例。除第1章外,每章都用1节来讨论某种装置或电路如何在实际应用中体现其功能。这方面的例子包括A/D和D/A转换器、三相功率网络、计算机处理器中的CMOS反相器、信号调制器等。

Multisim。至少在过去的20年中,Spice电路仿真软件已被用来进行电路课程的教学,以揭示电路的工作状态。Multisim是一种较新的、基于Spice的电路仿真软件。与此前的软件相比,它人机界面友好,易于使用和操作,因此具有显著优势。本书中利用各种例子介绍了它的功能,还在所附的DVD中提供了43个模块。我们鼓励学生充分利用如此丰富的资源。

数码照相机。我们在第9章和第10章之间嵌入了一个独立模块:知识点整合。在该模块中,以原理性数码照相机为例,说明本书介绍的电路和技术是如何整合为一个实用系统的。数码照相机的各种传感、照相、计算功能都以框图的形式进行了介绍,这样就在本书讨论的基本内容和现实世界的实际电路之间搭建起一个桥梁。

DVD-ROM。本书的两张DVD-ROM包括如下内容:(1) 书中所有图、表和主要公式。(2) 书中所有练习的解答。(3) 43个Multisim模块(详见附录C)。(4) NI公司的Multisim和LabVIEW学生版软件。(5) MathScript软件。该软件可完成矩阵求逆等其他数学运算,功能类似于MathWorks公司的MATLAB软件。

目 录

第 1 章 电路术语	1
手机中的电路	2
1-1 电路发展历程	4
1-2 单位、量纲和符号	12
技术概要 1: 微纳技术	14
1-3 电荷与电流	17
1-4 电压和功率	22
技术概要 2: 摩尔定律和尺度	27
1-5 电路元件	29
第 1 章知识关系	35
第 1 章重点	35
关键术语	35
习题	36
第 2 章 电阻电路	41
概述	42
2-1 欧姆定律	42
技术概要 3: 超导	48
2-2 电路拓扑	49
2-3 基尔霍夫定律	54
2-4 等效电路	60
技术概要 4: 电阻型传感器	69
2-5 星形-三角形(Y- Δ)变换	71
2-6 惠斯通电桥	76
2-7 应用注释: 线性与非线性 $i-v$ 关系	78
2-8 Multisim 介绍	83
第 2 章知识关系	90
第 2 章重点	90
关键术语	91
习题	91
Multisim 和 myDAQ 应用	100

第3章 分析方法	101
概述	102
3-1 节点电压法	102
3-2 网孔电流法	110
3-3 直观法	115
技术概要 5:发光二极管(LED)	120
3-4 电源叠加	121
3-5 戴维南和诺顿等效电路	124
技术概要 6:显示技术	132
3-6 最大功率传输	136
3-7 应用注释:双极结型晶体管	138
3-8 用 Multisim 进行节点分析	142
第3章知识关系	145
第3章重点	145
关键术语	146
习题	146
Multisim 和 myDAQ 应用	157
第4章 运算放大器	159
概述	160
4-1 运放特性	160
技术概要 7:集成电路制造工艺	164
4-2 负反馈	168
4-3 理想运放模型	170
4-4 反相放大器	173
4-5 加法放大器	177
4-6 差分放大器	180
4-7 电压跟随器	181
4-8 运放信号处理电路	183
4-9 仪器放大器	187
4-10 数字-模拟转换器(DAC)	189
技术概要 8:电磁波谱	193
4-11 在模拟与数字电路中使用 MOSFET	195
技术概要 9:计算机存储电路	200
4-12 应用注释:神经探针	203
4-13 用 Multisim 分析	204
第4章知识关系	210

第 4 章重点	210
关键术语	210
习题	211
Multisim 和 myDAQ 应用	218
第 5 章 一阶 RC 和 RL 电路	220
概述	221
5-1 非周期波形	222
技术概要 10: 闪存	230
5-2 电容	232
技术概要 11: 超级电容器	243
5-3 电感	246
5-4 RC 电路的响应	255
5-5 RL 电路的响应	267
5-6 RC 运放电路	274
5-7 应用注释: 寄生电容与计算机处理器的速度	281
5-8 用 Multisim 分析电路响应	288
第 5 章知识关系	291
第 5 章重点	292
关键术语	293
习题	293
Multisim 和 myDAQ 应用	309
第 6 章 RLC 电路	312
概述	313
6-1 初值和终值	314
6-2 通用求解过程	319
6-3 RLC 串联电路的自由响应	321
6-4 RLC 串联电路的全响应	333
技术概要 12: 微机械传感器与执行器	342
6-5 RLC 并联电路	345
6-6 任意二阶电路的通用求解过程	349
6-7 应用注释: 微机械换能器	359
6-8 用 Multisim 分析电路响应	361
技术概要 13: 触摸屏和有源数字化仪	366
第 6 章知识关系	368
第 6 章重点	369
关键术语	369

习题	369
Multisim 和 myDAQ 应用	381
第 7 章 交流分析	383
概述	384
7-1 正弦信号	384
7-2 复数复习	388
7-3 相量域	392
技术概要 14:有源降噪耳机	398
7-4 相量域分析	401
7-5 阻抗变换	404
7-6 等效电路	413
技术概要 15:夜视成像	417
7-7 相量图	420
7-8 移相电路	423
7-9 相量域分析法	428
技术概要 16:晶体振荡器	437
7-10 应用注释:直流电源电路	440
7-11 交流电路的 Multisim 分析	445
第 7 章知识关系	451
第 7 章重点	451
关键术语	451
习题	452
Multisim 和 myDAQ 应用	465
第 8 章 交流电路的功率	467
概述	468
8-1 周期波形	468
8-2 平均功率	472
8-3 复功率	474
8-4 功率因数	479
8-5 最大功率传输	486
技术概要 17:带宽、数据传输率与通信	489
8-6 应用注释:三相电路	491
8-7 用 Multisim 测量功率	496
第 8 章知识关系	499
第 8 章重点	499
关键术语	500

习题	500
Multisim 和 myDAQ 应用	509
第 9 章 电路的频率响应和滤波器	512
概述	513
9-1 传递函数	513
9-2 标度	520
9-3 波特图	522
9-4 无源滤波器	536
9-5 滤波器的阶数	548
技术概要 18: 电气工程和音响	551
9-6 有源滤波器	555
9-7 级联有源滤波器	557
技术概要 19: 智能微尘、传感器网络 and 普适计算	564
9-8 应用注释: 调制与超外差接收机	565
9-9 用 Multisim 研究频率响应	569
第 9 章知识关系	572
第 9 章重点	573
关键术语	573
习题	574
Multisim 和 myDAQ 应用	584
知识点整合: 计算机结构和数码相机	585
第 10 章 拉普拉斯变换分析法	590
概述	591
10-1 奇异函数	591
10-2 拉普拉斯变换的定义	595
10-3 拉普拉斯变换的性质	599
10-4 电路分析过程	607
技术概要 20: 碳纳米管	609
10-5 部分分式展开	611
10-6 s 域电路元件模型	620
10-7 s 域电路分析	623
10-8 传递函数和冲激响应	629
10-9 卷积积分	632
10-10 非平凡输入时电路的 Multisim 分析	641
技术概要 21: 硬盘驱动器 (HDD)	644
第 10 章知识关系	646

第 10 章重点	647
关键术语	647
习题	647
Multisim 和 myDAQ 应用	658
第 11 章 傅里叶分析法	660
概述	661
11-1 傅里叶级数分析法	661
11-2 傅里叶级数表示	664
11-3 电路应用	677
技术概要 22: 合成生物学	682
11-4 平均功率	685
11-5 傅里叶变换	686
11-6 傅里叶变换对	692
11-7 帕塞瓦尔定理	699
技术概要 23: 绘制三维世界地图	700
11-8 傅里叶变换和拉普拉斯变换的比较	702
11-9 用傅里叶变换进行电路分析	702
11-10 应用注释: 相位信息	705
11-11 Multisim: 混合信号电路和 Σ - Δ 调制器	711
第 11 章知识关系	715
第 11 章重点	716
关键术语	716
习题	717
Multisim 和 myDAQ 应用	727
附录 A 符号、量和单位	729
附录 B 求解代数方程组	731
附录 C Multisim 简介	732
附录 D 数学公式	736
附录 E 部分习题答案	737
索引	742

技术概要和应用注释目录

技术概要 1:微纳技术	14
技术概要 2:摩尔定律和尺度	27
技术概要 3:超导	48
技术概要 4:电阻型传感器	69
技术概要 5:发光二极管(LED)	120
技术概要 6:显示技术	132
技术概要 7:集成电路制造工艺	164
技术概要 8:电磁波谱	193
技术概要 9:计算机存储电路	200
技术概要 10:闪存	230
技术概要 11:超级电容器	243
技术概要 12:微机械传感器与执行器	342
技术概要 13:触摸屏和有源数字化仪	366
技术概要 14:有源降噪耳机	398
技术概要 15:夜视成像	417
技术概要 16:晶体振荡器	437
技术概要 17:带宽、数据传输率与通信	489
技术概要 18:电气工程和音响	551
技术概要 19:智能微尘、传感器网络和普适计算	564
知识点整合:计算机结构和数码相机	585
技术概要 20:碳纳米管	609
技术概要 21:硬盘驱动器(HDD)	644
技术概要 22:合成生物学	682
技术概要 23:绘制三维世界地图	700
2-7 应用注释:线性与非线性 $i-v$ 关系	78
3-7 应用注释:双极结型晶体管	138
4-12 应用注释:神经探针	203
5-7 应用注释:寄生电容与计算机处理器的速度	281
6-7 应用注释:微机械换能器	359

第1章 电路术语

本章内容:

手机中的电路

1-1 电路发展历程

1-2 单位、量纲和符号

技术概要1:微纳技术

1-3 电荷与电流

1-4 电压和功率

技术概要2:摩尔定律和尺度

1-5 电路元件

第1章知识关系

第1章重点

关键术语

习题

学习目标:

学完本章内容后,你将能够:

1. 了解有源与无源器件,分析与综合,器件、电路与系统以及直流与交流之间的区别。
2. 了解电气工程和计算机工程发展的里程碑节点。
3. 使用表示倍数和约数的前缀。
4. 认识电荷与电流、电压与能量、功率与电流和电压之间的关系,学会无源符号约定。
5. 学会独立源和受控源的表示方法。
6. 学会电压源、电流源、电阻、电容、电感的 $i-v$ 关系。
7. 学会 SPST 和 SPDT 开关的工作。

手机中的电路

我们每天使用的各种小玩意儿中都包含了电子电路。电子传感器、计算机、显示装置是大多数企业的核心部分。这些企业涉及的领域包括农业生产、运输、医疗和环境等。无处不在的手机(如图 1-1 所示)已越来越成为人们不可或缺的设备。手机集成了大量电子电路,包括放大器、振荡器、增频和降频变换器以及许多其他功能电路(如图 1-2 所示)。各种电路之间的兼容性和良好的电气连接成为手机集成和工作的关键要素。



图 1-1 手机

我们通常以分级的方式来进行电子电路的分析与设计。首先将整体视为系统,子系统视为电路,单个电路元件视为器件。以这种观点来看待的话,手机就是一个系统(它自身也是更为复杂的通信系统的一部分),其中的音频放大器是一个电路,电阻和集成电路以及构成音频放大器的其他成分是器件。事实上,集成电路内部包含相当复杂的电路,但是它的输入/输出关系可以用比较简单的等效电路来表示。因此我们可将其视为器件。通常我们指的器件为无源器件,它们的输入输出关系与外加电源无关。无源器件包括电阻、电容和电感等。与之相反的是有源器件(比如晶体管和集成电路等)^①,它们需要有外加电源才能提供相应的功能。

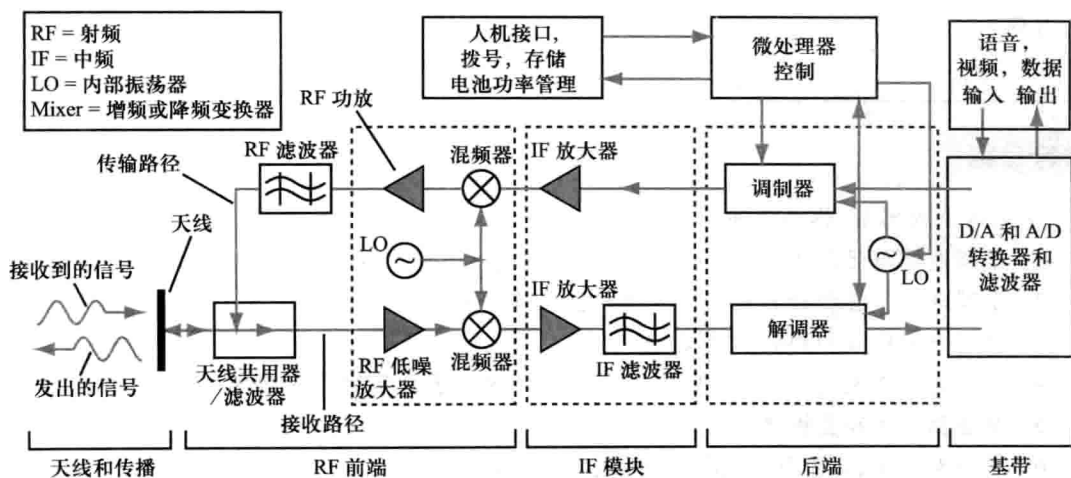


图 1-2 手机功能框图

本书介绍电路。有时学生会问:“电路和电子电路有什么区别?这两个名词的含义是一样的还是有所区别?”严格地讲,二者均指由电子实现的电荷的定向移动。但是从历史的观点来

^① 译者注:作者在全书中对“有源”和“无源”这两个概念并未进行定义,而且并未严格区分“有源电路”和“有独立源电路”、“无源电路”和“无独立源电路”这两对概念。我们在翻译时一般会明确说明“有独立源电路”和“无独立源电路”。如果译为“有源”或“无源电路”,则是一般意义上的“有源”或“无源”的概念。关于该概念的定义,请参考相关电路教材。