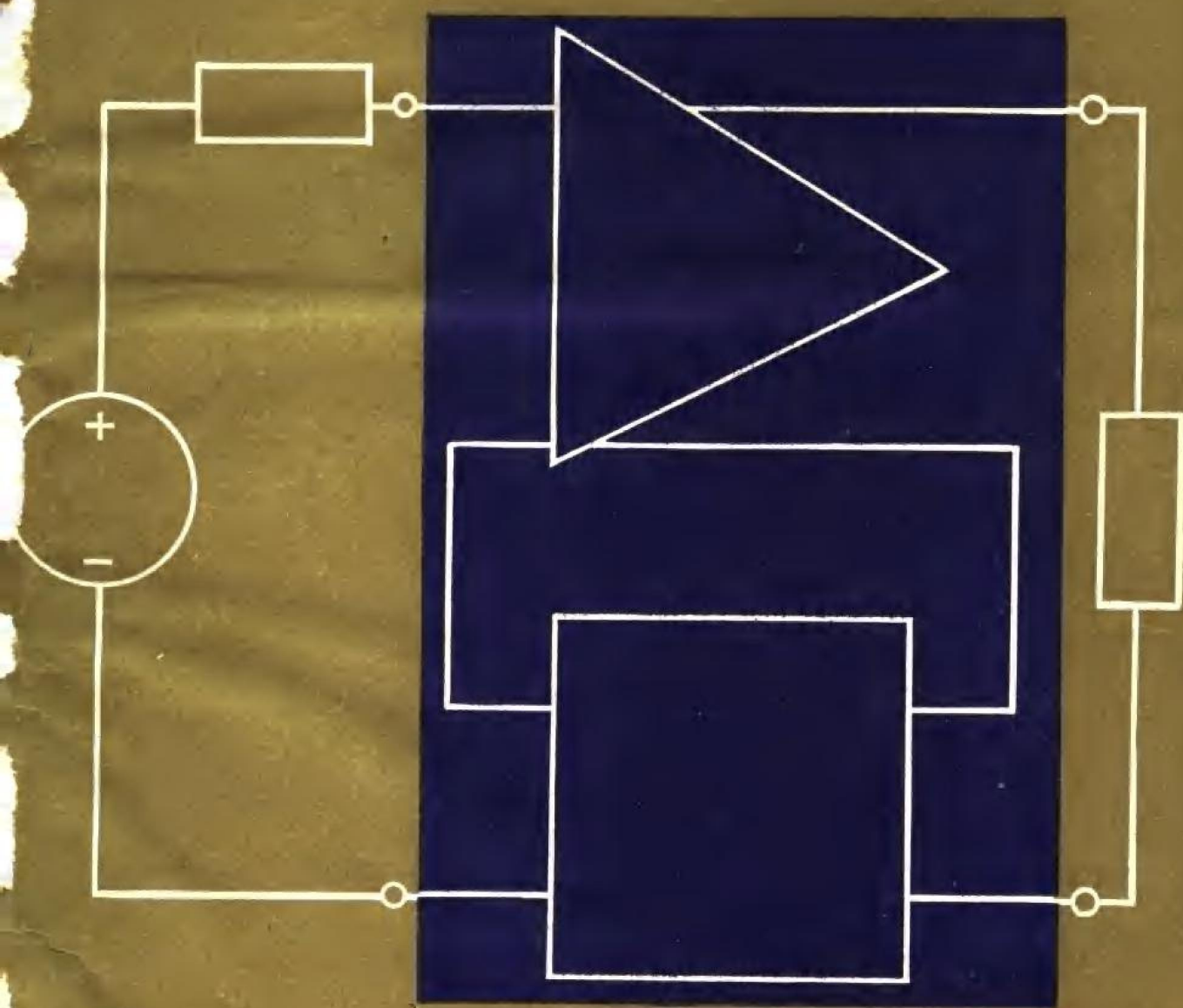


电子线路

[美] M.S. 高 西 著

刘宝榆 译 冯秉铨 校

器件、模型、功能、分析和设计



人民邮电出版社

本书根据美国1971年D. Van Nostrand Reinhold Company出版的Mohammed S. Ghausi著“Electronic Circuits—Devices, Models, Functions, Analysis, and Design”一书译出。

本书内容包括各种电子器件的应用, 各种电子线路的功能及其分析和设计方法。全书共分十一章, 除前两章是电路理论的总结和复习以外, 其余九章分别论述电子器件、单级和多级放大器、反馈放大器和振荡器、宽带放大器、有源滤波器、非线性电子线路、脉冲电路、逻辑电路、集成电路等等。每章末附有大量习题, 在书末附有部分答案。

本书的读者对象是高等院校学生, 并可供教学人员和生产、科研单位有关人员参考。

本书责任编辑 李永和

电子线路

器件、模型、功能、分析和设计

[美] M. S. 高西著

刘宝榆 译 [冯秉铨] 校

*

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

国营五二三厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 33.25 字数 700,000

1980年11月第1版 1981年10月第1次印刷

印数 00,001—15,800

书号 15012·0290 定价 2.75 元

中译本序

本书是1971年在美国出版的一本教材。作者原是纽约大学(现是奥克兰大学)的教授高西,罗无念教授等也参加了本书的编审工作。

本书的读者对象是大学本科三、四年级学生,课程名称是“电子线路”,在选读这门课程之前,学生已学过一个学期的“电路理论初阶”。

正如书名所示,本书内容包括了各种电子器件的应用,各种电子线路的功能及其分析和设计方法。假定在阅读本书之前,读者已掌握了一般交流电路理论基础。书中主要内容除前两章是前一门课程(电路理论)的总结和复习之外,其他九章依次是电子器件、单级和多级放大器、反馈放大器和振荡器、宽带放大器、有源滤波器、非线性电子线路、脉冲电路、逻辑电路、集成电路等等。书后附有四个附录,分别为:半导体性能、集成电路、信号流图和各种常用集成电路的图表数据。

本书的特点是材料比较丰富(例如有关各种新型场效应管等等的应用,均已包括在内),特别是有关集成电路的内容(包括附录中的材料),在此之前国内外出版的类似书籍中,还没有这样齐全的。在内容安排上,可以看出作者在教学实践上是有经验的。在文字上,说理清楚、流利,容易阅读。

总的来说,这本书的质量是比较好的,只是份量较重(共700页之多),不适宜作短期教学的课本。译本可供教学人员和生产、科研单位有关人员作为查阅、参考之用。

冯秉铨

序 言

本书是为大学三、四年级电气工程课程编写的电子线路教材。在学习本书以前,要求学过一个学期初等电路理论课程。最好预先或同时开设一学期半导体物理电子学课程,这对学习本书是有帮助的,但不是必需的。

本书的主要目的是为本科学生介绍并使他们熟悉分立元件电子线路及集成电子线路的分析和设计。内容包括线性电路及非线性电路。场效应管(包括结型和绝缘栅型场效应管)与双极型晶体管一起讨论。

为了了解线路的基本特点,加深认识和熟悉线路的功能,本书较为详尽地介绍了简单的初步近似算法。一经理解了电路和器件的特定作用,便可应用更加准确的模型和计算机辅助设计来研究线路性能的准确性是否真实以及改进的方法。在论及计算机辅助分析和设计时,并未规定要用哪一种程序,目的是使本教材有较广泛的适应性。希望学生能用计算机求解某些较为复杂的问题,如果条件许可的话,最好采用程序包。但是,应用数字计算机,并不是使用本教材的重要前提。

本书用作两学期课程,安排如下。第一学期可以讲授第一章至第五章,也可以包括第九章中某些部分及附录 A, B。开头两章是复习的形式,并引入本教材所用的符号。如果学生程度适宜,开头两章的大部分内容也可以跳读。2-5 至 2-8 节也可以稍后讲授,留待与放大器响应特性和设计问题一起讲授。(作者认为这样安排是很有用,而且是合理的。)所以实际上,教材的主要内容是从第三章开始。如果学生对 $p-n$ 结稍微了解,甚至第三章内容也可以相当快地讲授。第九章的部分内容,特别是采用结型二极管和大讯号模型的折线分析法(9-1 至 9-5 节及 10-17 节),如果需要的话,也可以归入第三章一起讲授。

第二学期课程可以由第六章开始,包括本书的其余部分。另外,有些论题是比较次要的,例如信号流图、晶体滤波器、有源分布 RC 滤波器(甚至有源 RC 滤波器整章)、间歇振荡器等,如果没有足够时间阐述其他主要问题的话,则这些章节,也可略去不讲。

使用本教材作为一学年课程时,在内容选择和安排次序方面则有更大的伸缩余地。教材中有意编入超过一学年所需的更多的内容。

教材中强调的器件是双极型晶体管和场效应晶体管,只是偶尔才用到真空管器件。整个教材着重于采用统一的方法,因此场效应管器件并不是集中在某一章中讨论,而在另一章则一律不提。另外,为了侧重于电子线路方面,因此有关器件物理学内容,仅保持在最低限度的水平。教材中引入许多示例性问题,其中所用的实际参数值是为了给学生一种真实的感觉,这些真实值正是在实际工作中常常遇到的。

本书的内容安排如下。

第一章以复习的形式讨论电路理论基础,特别是结合一些重要的网络定理,讨论电路的分析

方法。

第二章论述二端口网络(四端网络)和有关论题。讨论二端口描述法、功率增益的计算、波特图,以及频率响应和暂态响应的确定。另外还包括诸如最大平坦值和线性相位响应的传输判据。

第三章介绍各种器件及其 $V-I$ 特性、模型和偏置。器件包括结型二极管、隧道二极管、击穿(齐纳)二极管、双极型晶体管、结型场效应管(JFET)及绝缘栅型场效应管[IGFET(即MOSFET)]、单结晶体管(UJT)、可控硅(SCR)和真空管器件(如三极管和五极管)。为了不使学生混淆多种不同的晶体管模型,整个教材只采用晶体管共射电路的混合 π 增量模型。另外还讨论了分立元件和集成电路的偏置方法和稳定性问题。

第四章讨论单级放大器的分析和设计,低频及高频响应、阶跃响应和增益-带宽计算是结合一些简单的宽带技术来讨论的。

第五章考虑多级放大器的分析和设计。用简单近似法计算相互作用和非相互作用放大级的级联对放大器频率响应和暂态响应的影响,同时也用更加准确的计算机辅助分析法加以计算,以资比较。也讨论常用于集成电路中的直流放大器和差分放大器。对于时常需要给予不同考虑的多级放大器中的输入级和输出级,作了较为详尽的讨论。例如,噪声计算放在输入级讨论,而功率放大器设计则放在输出级中讨论。

第六章论述反馈放大器的初等反馈理论及指导设计的原则,讨论运算放大器及其应用,也包括对线性系统的根轨迹法和稳定性判据的讨论。本章也简单地讨论了 RC 、 LC 和晶体振荡器。

第七章介绍调谐放大器。讨论不稳定的原因及其补救办法。通过实例说明失配情况下的分析和设计。简短地讨论了晶体带通滤波器。结合灵敏度考虑,引入采用有源 RC 电路的低频调谐放大器。

第八章介绍有源 RC 滤波器,以初等水平和实际例子讨论用于集成电路中滤波功能设计的各种方法。也简短地讨论有源滤波器中分布 RC 网络的应用。

第九章论述非线性电子线路的初等分析。引入示范性例子介绍一阶及二阶非线性微分方程的折线分析法、图解法(诸如等倾线分析法、相平面分析法等),以及较高阶非线性微分方程的数值解法。

第十章考虑再生电路、开关电路及波形成形电路。讨论晶体管由截止到导通和由导通到截止时的开关速率。利用适当的波形讨论在多谐振荡器、间歇振荡器和时基发生器中晶体管的应用。也讨论了数字电路中的波形整形。

第十一章介绍逻辑电路和数字集成电路功能块。简短地讨论用于计算机电路的二进制,布尔关系和各种逻辑门。另外还包括利用门电路实现双稳态多谐振荡器,以及在移位寄存器和计数器中双稳态多谐振荡器的应用。

本书还有四个附录。附录A有意用提要的方式说明 $p-n$ 结的性质,仅为读者学习第三章所讨论的各种 $p-n$ 结器件的 $V-I$ 特性和运用,提供所必需的最低限度的半导体知识。附录B讨论集成电路(IC)的制造。讨论各种集成电路元件及设计原则,使学生熟悉分立元件和集成电路设计。

• II •

中的各个方面。附录 C 介绍信号流图,实际上可归入第六章。附录 D 提供一些典型的半导体器件特性图表和集成电路功能块数据表。本教材并未论及其他重要论题,例如调制及检波,因为这些内容通常在其他大学本科课程中已有详细讨论。

每章附有大量经过精心拟定的习题,目的在于加强学生对课程内容的理解。有些习题选自专门文献,一般都作了简化。为了避免学生无益地搜寻解答,有意不列出文献来源。作者感谢这些习题的各位原作者的贡献。一般仅用数字代入公式的习题,只占极少数,因为这种习题并不能加深理解教材本身讨论的主题。部分习题答案列于书末。由于采用了指导设计的方法,本书将有助于有实际经验的工程师自学。

(下略)

M. S. 高西

目 录

第一章 电路理论选题复习.....1

1-1 引言.....1
1-2 集总电路元件.....1
1-3 独立源和受控源.....4
1-4 线性和非时变系统.....6
1-5 拉普拉斯变换.....7
1-6 网络拓扑学初步及其术语.....10
1-7 节点分析.....12
1-8 回路分析.....14
1-9 状态变量方程.....17
1-10 一些网络定理.....22
1-11 网络函数、极点、零点和自然频率.....28
1-12 电路归一化(频率和幅度换算).....31
1-13 用计算机分析电子线路.....32
参考文献和建议读物.....39
习题.....40

第二章 两端口网络及有关论题.....46

2-1 两端口特性.....46
2-2 端接负载的两端口网络.....54
2-3 有源两端口网络的各种功率增益.....57
2-4 固有稳定的有源两端口网络端接最佳无源负载的设计.....60
2-5 频率响应和波特图.....62
2-6 时域响应.....68
2-7 线性相位传递函数.....70
2-8 最平坦幅度函数.....73
2-9 其他近似的判据.....76
参考文献和建议读物.....77
习题.....77

第三章 器件、伏安特性、模型和偏置.....82

3-1 $p-n$ 结二极管.....82
3-2 击穿(齐纳)二极管.....87
3-3 隧道二极管.....88
3-4 双极型晶体管.....89
3-5 双极型晶体管的 $V-I$ 特性.....91
3-6 双极型晶体管的工作区.....94

3-7 双极型晶体管的大信号模型.....95

3-8 低频小信号模型.....97
3-9 双极型晶体管的高频电路模型.....102
3-10 场效应晶体管.....106
3-11 场效应管的小信号模型.....110
3-12 单结型晶体管(UJT).....112
3-13 可控硅(SCR).....113
3-14 真空管器件.....115
3-15 三极管.....115
3-16 五极管特性及模型.....117
3-17 双极型晶体管的偏置.....118
3-18 集成电路(IC)的偏置.....125
3-19 场效应管和真空管器件的偏置方法.....126
3-20 小结.....128
参考文献和建议读物.....129
习题.....129

第四章 单级放大器的分析和设计.....135

4-1 低通放大器的频率特性.....135
4-2 双极型晶体管的中频带增益和阻抗关系.....136
4-3 场效应晶体管的中频带增益和阻抗关系.....142
4-4 双极型晶体管的偏置和耦合电路所引起的低频响应特性.....143
4-5 偏置和耦合电路所引起的场效应晶体管 and 真空管的低频响应.....147
4-6 典型高通电路的阶跃响应和垂度计算.....149
4-7 双极型晶体管的高频响应特性.....151
4-8 密勒效应和单向近似.....154
4-9 用单向模型计算双极型晶体管的增益和频带宽度.....156
4-10 主极点-零点概念和近似.....158
4-11 场效应管和真空管的高频响应.....161
4-12 双极型晶体管的增益-带宽关系.....162
4-13 简单的宽频带技术.....164
4-14 放大器级的阶跃响应.....171
4-15 小结.....173
参考文献和建议读物.....175

习题	176
第五章 多级放大器的分析和设计	182
5-1 引言	182
5-2 RC 耦合 FET 多级放大器的增益和带宽计算	183
5-3 多个主极点对于放大器带宽、频率响应和阶跃响应的影响	187
5-4 RC 耦合级联共射晶体管放大器级的增益和频率响应的计算	191
5-5 多级电路的中频带增益和阻抗的计算	195
5-6 指定增益和带宽时 RC 耦合共射晶体管放大器的设计	198
5-7 多级宽频带晶体管放大器	200
5-8 放大器设计中的参差调谐和同步调谐	204
5-9 直流放大器和差分放大器	206
5-10 输入级的设计考虑: 噪声	212
5-11 噪声模型	213
5-12 噪声系数	216
5-13 输出级的设计考虑: 功率放大器	219
5-14 甲类功率放大器	220
5-15 失真特性及计算	224
5-16 乙类推挽功率放大器	226
5-17 小结	229
参考文献和建议读物	230
习题	230
第六章 反馈放大器和振荡器	237
6-1 基本反馈概念和定义	237
6-2 反馈组态和反馈分类	239
6-3 负反馈的优点和缺点	249
6-4 从设计观点出发对一些反馈放大器电路的分析	251
6-5 根轨迹法	260
6-6 线性反馈系统稳定性的考虑	267
6-7 运算放大器及其应用	271
6-8 运算放大器的实际考虑	275
6-9 正弦振荡器的线性分析	277
6-10 RC 振荡器	277
6-11 LC 振荡器	279
6-12 晶体振荡器	281
参考文献和建议读物	281
习题	282

第七章 带通放大器的分析和设计实例

7-1 引言	289
7-2 单调谐的中间级	290
7-3 阻抗变换和变压器耦合	295
7-4 在输出端有调谐电路的晶体管单调谐放大器	296
7-5 狭带近似	298
7-6 同步调谐和参差调谐	300
7-7 双调谐中间级	301
7-8 调谐放大器振荡的可能性	304
7-9 双极型晶体管的最高振荡频率	306
7-10 共射-共基调谐放大器	307
7-11 狭带调谐放大器的中和	310
7-12 调谐放大器中的失配	311
7-13 非单向调谐放大器的设计实例	312
7-14 晶体带通滤波器	316
7-15 用有源 RC 电路的调谐放大器	321
7-16 有源 RC 电路的灵敏度	324
参考文献和建议读物	327
习题	328

第八章 有源 RC 滤波器

8-1 RC 驱动点函数	334
8-2 控制源的实现 (RC :- RC 分解)	338
8-3 用简单二阶网络级联的实现	343
8-4 负阻抗变换器作为网络元件	347
8-5 用负阻抗变换器的传递函数综合	349
8-6 用回转器作为网络元件	351
8-7 运算放大器的实现	353
8-8 低灵敏度高 Q 传递函数的实现	355
8-9 分布 RC 电路作为网络元件	358
8-10 分布 RC 网络的应用	361
8-11 有源分布 RC 低通滤波器	363
8-12 小结	371
参考文献和建议读物	373
习题	373

第九章 非线性电子线路的初等分析

9-1 引言	379
9-2 非线性电阻性电路的折线近似模型	378
9-3 折线函数的综合	381
9-4 某些电子器件的折线模型	385
9-5 折线近似分析	388

9-6	负阻特性	393
9-7	张弛振荡器	394
9-8	非线性分析方法	396
9-9	一阶系统, 等倾线法	396
9-10	二阶系统, 相平面图	398
9-11	梁纳德法 (Liencard)	401
9-12	非线性振荡器的实例: 范德堡方程	403
9-13	n 阶非线性系统的数值解法	405
9-14	非线性电抗	407
	参考文献和建议读物	408
	习题	409

第十章 再生电路、开关电路及波形

	形成电路	415
10-1	引言	415
10-2	晶体管开关: 通-断时间间隔的计算	416
10-3	改善晶体管开关时间的电路	421
10-4	再生开关电路的分类	423
10-5	双稳态多谐振荡器	424
10-6	单稳态多谐振荡器	428
10-7	无稳态多谐振荡器	430
10-8	多谐振荡器的应用	432
10-9	间歇振荡器	432
10-10	单稳态间歇振荡器	432
10-11	无稳态间歇振荡器	435
10-12	时基发生器(扫描电路)	436
10-13	自激时基发生器	437
10-14	触发电压时基发生器	439
10-15	触发电流时基发生器	441
10-16	RC 波形整形	442
10-17	削波电路和箝位电路	443
	参考文献和建议读物	446
	习题	446

第十一章 逻辑电路和数字集成电路的

	功能部件	451
11-1	引言	451
11-2	二进制	451
11-3	布尔关系	453
11-4	基本标准部件	453
11-5	标准部件的电路实现	456
11-6	二极管逻辑 (DL)	457
11-7	电阻-晶体管逻辑 (RTL)	458

11-8	直接耦合晶体管逻辑 (DCTL)	460
11-9	二极管-晶体管逻辑 (DTL)	461
11-10	晶体管-晶体管逻辑 (TTL)	462
11-11	发射极耦合逻辑 (ECL 或 CML)	463
11-12	各种逻辑门的比较	464
11-13	门的品质因数	465
11-14	存储电路: 触发器 (FF)	467
11-15	寄存电路和移位寄存器	469
11-16	计数器	470
11-17	小结	472
	参考文献和建议读物	473
	习题	473

附录 A 半导体和 $p-n$ 结特性的摘要

A-1	半导体: 本征半导体和非本征半导体	477
A-2	漂移电流和扩散电流	479
A-3	$p-n$ 结及其特性	480
A-4	$p-n$ 结的 $V-I$ 特性	483
	参考文献和建议读物	486

附录 B 集成电路

B-1	集成电路晶体管的制造	487
B-2	集成电路二极管	491
B-3	集成电路电容器	491
B-4	集成电路电阻	492
B-5	集成电路电感	493
B-6	集成电路设计指南	493
B-7	大规模集成电路 (LSI)	494
	参考文献和建议读物	495

附录 C 信号流图简介

C-1	信号流图的简化	497
C-2	梅逊增益公式	500
C-3	实例	500
	参考文献和建议读物	503

附录 D 分立元件及集成电路功能部

	件数据图表	504
D-1	分立双极型晶体管数据图表	504
	(a) pnp , 2N3250, 2N3251	
	(b) nnp , 2N3011	
D-2	分立场效应管数据图表	504
	(a) n 沟道 FET 2N3823	
	(b) RCA-MOSFET 40461	
D-3	功率晶体管数据图表	504

	RCA 型 40546, 40547	(b) MOS 门电路· 3102
D-4	运算放大器数据图表.....505	部分习题答案.....506
	(a) μ A 702C	缩写.....512
	(b) MC 1520	汉英名词对照.....513
D-5	集成电路逻辑门电路.....505	
	(a) 晶体管 ECL 门电路: MC 300, 306, 307	

第一章 电路理论选题复习

1-1 引言

电子线路包括信号处理系统的广泛领域。信号通常是时间的函数。信号可以是完全已知的(例如正弦的),或者大部分是未知的(例如随机噪声)。在物理方面信号是一个可测量的量,诸如电压、电流、速度或压力。通常把非电信号变换为随时间变化的(时变的)电压或电流形式的电信号。电子系统的目的在于变换或处理携带信息的信号,计算机、电视、通讯卫星、雷达、无线电是这些系统的例子。

个体系统可以是模拟系统,也可以是数字系统,或是二者的组合系统,可以把系统分为诸如放大器、滤波器、振荡器、开关、存储器、逻辑门、时基发生器和计数器等子系统。这些子系统中的每一种都是由诸如电阻、电容、电感、变压器、晶体管和二极管等元、器件以这种或那种形式所组成。

本书讨论这些子系统的分析和设计。在各种电子线路的功能中特别要考虑放大、滤波、开关、逻辑功能的实现和波形发生器。为了分析和设计这样的系统,我们必须完全熟悉元件的电性能和它们的电压-电流关系,以及不同元件之间的相互作用。因此,在研究电子线路之前,我们将复习电路理论方面的一些基本论题。

假定读者已经学过这些论题中的大多数,下述讨论必然是简单的。本章试图作为复习材料,并且借此机会引入本教材将使用的术语和各种定义。因此,首先给出理想元件的数学定义方程,跟着介绍网络拓扑学和电路分析的各种通用方法,接着讨论一些有用的网络定理,因为网络定理的知识,除了增长洞察能力以外,还有助于简化分析。也复习线性非时变电路的网络函数和自然频率。本章最后简单地讨论用计算机辅助分析电子线路的问题。

1-2 集总电路元件

各种理想电路元件及其电压-电流关系如下:

电阻器: 电阻器是二端元件,符号如图 1-1 所示。电阻的瞬时电压-电流关系由下式表示:



图 1-1 带有电压极性 & 电流参考方向的电阻器的图示符号

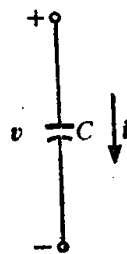


图 1-2 带有电压极性 & 电流参考方向的电容器的图示符号

$$v(t) = Ri(t) \quad \text{或} \quad i(t) = Gv(t) \quad (1-1)$$

式中, R 是电阻, 单位为欧姆; G 是电导, 单位为姆欧; 并且 $G = \frac{1}{R}$ 。对于线性非时变电路, R 和 G 都是常数, 与 i, v 和时间均无关。对于线性时变网络, R 和 G 均与 i 和 v 无关, 但与时间有关。对于非线性电路, R 和 G 都是 i 和 v 的函数。

电容器: 电容器是二端元件, 符号如图 1-2 所示。定义电容的方程是

$$q(t) = Cv(t) \quad (1-2)$$

式中, C 是电容, 单位为法拉; q 是瞬时电荷, 单位为库仑。

对于线性非时变电路, C 是常数, 由式(1-2)得出电容上的瞬时电压-电流关系

$$i = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (1-3a)$$

或

$$v(t) = v(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (1-3b)$$

有时将电容表为 $e = \frac{1}{C}$, 则 e 通常称为倒电容。注意要完全列出 $v-i$ 关系, 必须知道电容上的初始电压。对于线性时变电路, C 可以是时间的函数, 由式(1-2)得出 $v-i$ 关系如下:

$$i = \frac{dq}{dt} = C(t) \frac{dv}{dt} + v(t) \frac{dC(t)}{dt} \quad (1-4)$$

对于非线性电容, 电荷与电压之间不是常数关系, 而是函数关系, 因而 $q-v$ 关系是非线性的, 即, $q = f[v(t)]$ 。对于非线性时变电容, $q = f[v(t), t]$ 。

电感器: 电感器是二端元件, 符号如图 1-3 所示。

定义电感的方程为

$$\phi(t) = Li(t) \quad (1-5)$$

式中 L 是电感, 单位为亨利; $\phi(t)$ 是瞬时磁链, 单位为韦伯。

对于线性非时变电路, L 是常数, 并且电感的瞬时电压-电流关系, 由式(1-5)得出

$$v = \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1-6a)$$

或

$$i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v(\tau) d\tau \quad (1-6b)$$

有时为了方便, 将 L 表为 $\Gamma = \frac{1}{L}$ 。注意要完全列出电感的 $v-i$ 关系, 必须知道流过电感的初始电流。对于线性时变电路, L 可以是时间的函数, 由式(1-5)得出的 $v-i$ 关系为

$$v = \frac{d\phi(t)}{dt} = L(t) \frac{di(t)}{dt} + i(t) \frac{dL(t)}{dt} \quad (1-7)$$

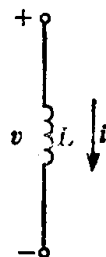


图 1-3 带有电压极性及电流参考方向的电感器的图示符号

对于非线性电感, $\phi-i$ 关系是非线性的, 即, $\phi=f[i(t)]$ 。对于非线性时变电感, 则有 $\phi=f[i(t), t]$ 。

理想变压器: 理想变压器是四端元件, 符号如图 1-4a 所示。定义理想变压器的电压-电流关系是

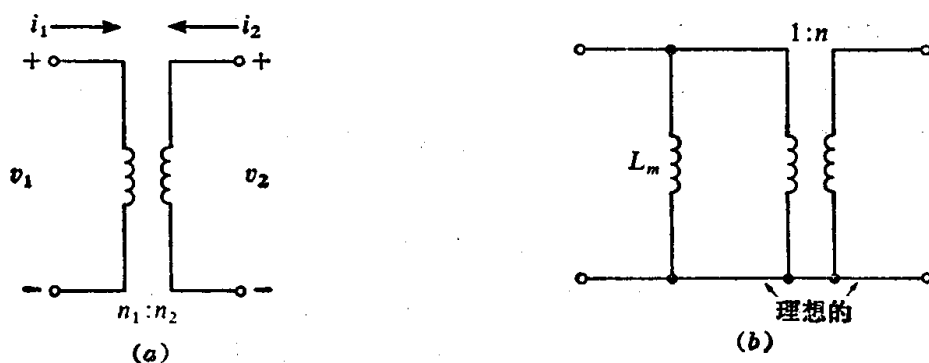


图 1-4 (a) 理想变压器; (b) 实际变压器(忽略损耗)

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1-8a)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-8b)$$

式中, n_1 和 n_2 分别是初级和次级绕组(线圈)的匝数。由于 n_1 和 n_2 都是常数, 理想变压器是线性非时变的电路元件。至于实际变压器(假如忽略损耗)可以用图 1-4b 表示, 这里 L_m 是磁化电感, 并且 $n = \frac{n_2}{n_1}$ 。

耦合电感器: 两个耦合电感器的符号如图 1-5 所示。对于线性非时变电感器, 瞬时的电压-电流关系是



图 1-5 耦合线圈

$$v_1(t) = L_{11} \frac{di_1(t)}{dt} \pm L_{12} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (1-9a)$$

$$v_2(t) = \pm L_{21} \frac{di_1(t)}{dt} + L_{22} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (1-9b)$$

其中, M ($M = L_{12} = L_{21}$) 在图 1-5a 中取正号, 而在图 1-5b 中取负号。物理系统中 M 的大小受下列关系式约束:

$$|M| = k \sqrt{L_{11} L_{22}} \quad (1-10)$$

这里 $0 < k < 1$, k 称为耦合系数。

由电阻器、电感器、电容器和耦合电感器(或变压器)组成的任何电路,称为 RLCM 电路。

理想回转器: 理想回转器的符号如图 1-6 所示。定义理想回转器的电压-电流关系是

$$v_1(t) = \alpha i_2(t) \quad (1-11a)$$

$$v_2(t) = -\alpha i_1(t) \quad (1-11b)$$

式中常数 α 称为回转器电阻,量纲是欧姆。由于 α 是常数,回转器是线性非时变的电路元件。与其他无源电路元件(RLCM)不同,理想回转器是一种不可逆的无源四端元件(见第二章)。

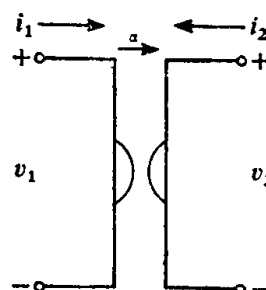


图 1-6 回转器的符号

让我们再次指出,上述这些模型都是理想化的,往往与真实的物理器件十分近似,但是在某些情况下,理想化模型是不可取的,必须用更复杂的模型来代替。可是,更复杂的模型,仍是由这些基本元件以及下一节讨论的其他元件所组成。

1-3 独立源和受控源

源有两种基本型式:独立源和受控源(或称非独立源)。图 1-7a 及 1-7b 分别表示独立电压源和独立电流源的图示符号和参考方向。有时也把图 1-7a 的独立电压源写成双下标的符号,图中不取正和负的符号,而写作 v_{jk} 。本教材将采用极性符号,有时也用带箭头的 v_1 表示,这里箭头指向的点相当于正参考方向。也可以把图 1-7b 的独立电流源用不带箭头的双下标表示,而写作 i_{jk} 。我们将采用箭头表示独立源的电流方向。

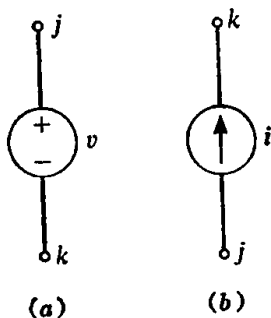


图 1-7 (a)独立电压源(v_{jk});(b)独立电流源(i_{jk})

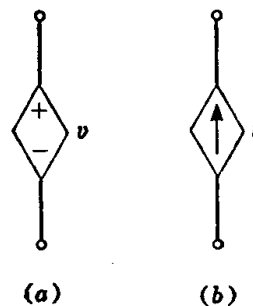


图 1-8 (a)受控电压源;(b)受控电流源

本书将分别用图 1-8a 及图 1-8b 表示受控电压源和受控电流源的图示符号。一些最近出版的教材(参考文献 1, 2, 3)也用这种表示方法,以强调独立源和受控源之间的不同。

图 1-9 给出二端口网络的四种基本的理想受控源的表示方法,注意这些电路都是三端电路。对于受电压控制的电压源(简称为 VCVS),输入可以是独立的或非独立的电压源,而输出是非独立的电压源。读者可以用同样的方式自己解释其他电路,这里无需再作说明。在电子线路中,受控源元件是很重要的,并且是电子器件模型的基本组成部分。虽然这些模型都是理想化了的,但结合适当的 RLC 元件(在第三章讨论),就可以合适地代表以线性工作的实际电子器件。控制源既可以代表有源元件,也可以代表无源元件。例如,理想变压器和理想回转器,二者都是

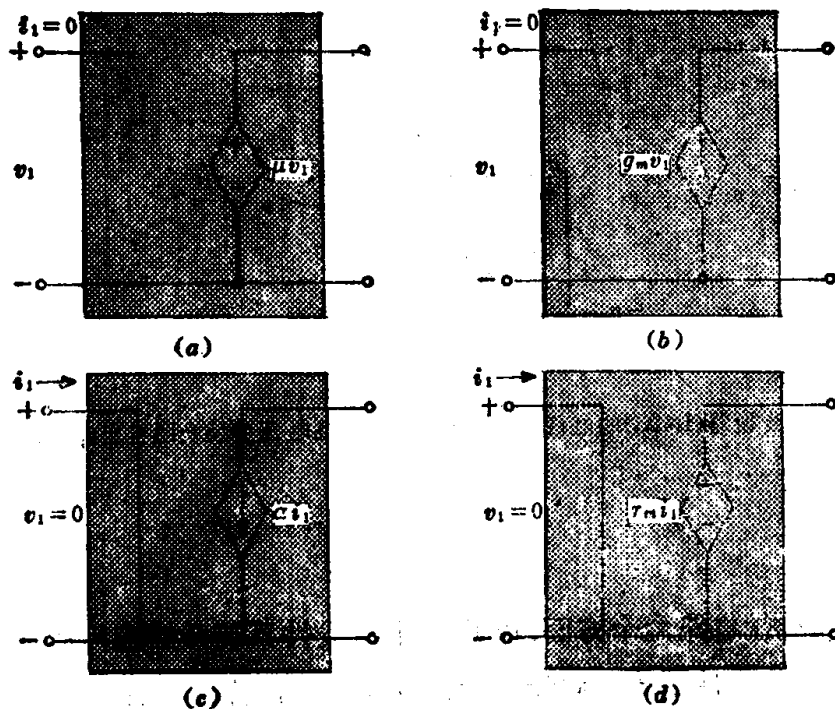


图 1-9 (a) 受电压控制的电压源(VCVS); (b) 受电压控制的电流源(VCCS); (c) 受电流控制的电流源(CCCS); (d) 受电流控制的电压源(CCVS)

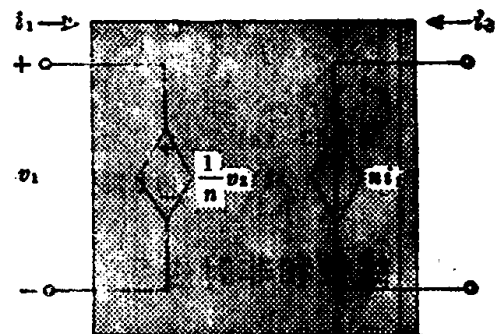


图 1-10 理想变压器的受控源表示

无源元件, 可以分别用图 1-10 及图 1-11 的控制源模型表示。

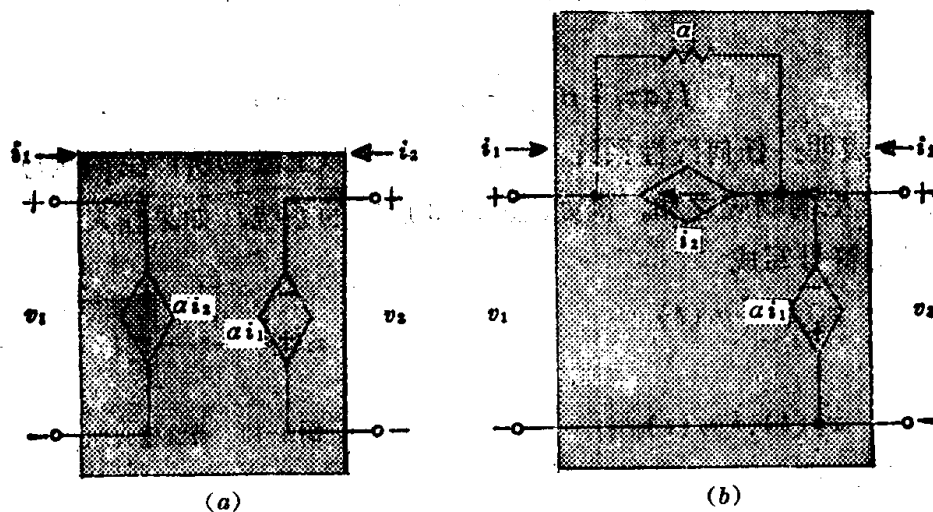


图 1-11 理想回转器的电路表示

在有源滤波器(第八章)中所使用的一种有效的有源元件是单位增益负阻抗变换器(简称为NIC)。有两种类型NIC: 电流变换负阻抗变换器(即INIC)和电压变换负阻抗变换器(即VNIC)。定义单位增益 INIC 的方程是

$$v_1 = v_2 \quad \text{及} \quad i_1 = i_2 \quad (1-12a)$$

式(1-12a)所表示的受控源如图 1-12a 所示。定义单位增益 VNIC 的方程是

$$v_1 = -v_2 \quad \text{及} \quad i_1 = -i_2 \quad (1-12b)$$

式(1-12b)所表示的受控源如图 1-12b 所示。

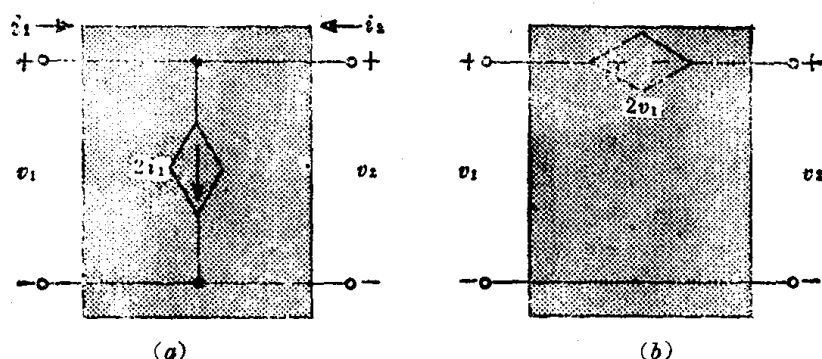


图 1-12 (a) 表示单位增益电流变换负阻抗变换器(INIC)的电路; (b) 表示单位增益电压变换负阻抗变换器(VNIC)的电路

1-4 线性和非时变系统

由于本书将同时考虑线性电路和非线性电路两个方面, 因此从定义线性系统开始较为适宜。服从齐次性和迭加性特性的系统, 称为线性系统。对任一个常数 α 齐次性特性都有

$$f(\alpha x) = \alpha f(x)$$

另一方面迭加性特性则有

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$$

迭加原理把这两种特性归结在一起, 就是说, 对每一个输入 x_1 和 x_2 , 以及对每一个常数 α 和 β , 都有

$$f(\alpha x_1 + \beta x_2) = \alpha f(x_1) + \beta f(x_2) \quad (1-13)$$

换句话说, 迭加原理表明: 任何线性系统, 对于超过一个以上激励所产生的响应, 等于该系统对于各个单独激励所产生的响应之和。例如, 图 1-13 所示的系统, 如果输入(激励) x_1 产生的输出(响应)为 y_1 , 则可用符号写成

$$x_1(t) \rightarrow y_1(t)$$

如果也有

$$x_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则对所有常数 k_1 和 k_2 , 有

$$k_1 x_1(t) + k_2 x_2(t) \rightarrow k_1 y_1(t) + k_2 y_2(t)$$

要确定系统是否线性, 必须建立式(1-13)。

如果对所有 $x(t)$ 和所有 $\tau > 0$ 的情况, 输入 $x(t + \tau)$ 产生的输出为 $y(t + \tau)$, 则系统是线性非时变系统。换句话说, 在任何时间施加激励都不会影响响应的波形。对于因果系统, 响应不应在激励之前, 也就是如果在 $t = t_0$ 时施加激励, 对于 $t \leq t_0$ 时响应为零。用一组常系数线性积分微分方程表示线性非时变电路的平衡方程。对于这样的系统, 能够通过变换技术把一组积分微分方程简化为一组线性代数方程。

系统的零输入响应定义为输入为零时系统的输出 y_0 。这样的响应不一定为零, 因为电容上可以储有初始电荷, 和(或)电感上有初始磁通。在系统理论中, 初始条件也称为系统的初始状



图 1-13 带有输入和输出变量的线性系统

态。(关于“状态”这一概念的详尽讨论,建议读者查阅参考文献1。)我们定义零状态响应为所有初始条件为零时,即初始状态为零时,由于任意输入所引起的输出 y 。电容上的初始电荷,可以用一个独立的恒压源和一个具有零初始状态的电容互相串联来表示。同样,电感上的初始磁通,也可以用一个独立的恒流源和一个具有零初始状态的电感互相并联来表示。因而,对于线性系统,全响应就等于零输入响应与零状态响应之和。迭加意味着几个独立源共同引起的零状态响应是每一个独立源分别单独作用时所引起的零状态响应之和。

对于单个输入、单个输出、集总线性非时变系统,一般可用一个 n 阶常系数线性微分方程来表示输入-输出关系,即

$$A_n \frac{d^n y}{dt^n} + A_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + A_0 y = B_n \frac{d^n x}{dt^n} + B_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \cdots + B_0 x \quad (1-14)$$

式中 x 和 y 分别表示输入和输出变量。

当输入和下列初始条件

$$y(0), \quad \frac{dy(0)}{dt}, \quad \dots, \quad \frac{d^{n-1}y(0)}{dt^{n-1}}$$

均给定时, $y(t)$ 的全解将唯一地被确定。注意齐次方程的解,即令式(1-14)右边为零时的解,确定着零输入响应;而当所有初始条件为零时,取决于 x 的特解,则确定着零状态响应。

1-5 拉普拉斯变换

拉普拉斯变换,或简称拉氏变换,是一族积分变换中的一种,适用于线性非时变系统的分析和设计。由于本教材的前几章主要论述线性非时变电路,所以这里简单地复习一下拉氏变换。

单向或单边的拉氏变换(简写 $\mathcal{L}$),以下列定义的积分^①表示:

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (1-15)$$

如果 $F(s)$ 收敛(这里 s 是复频率,即 $s = \sigma + j\omega$),并且对所有 $t < 0$ 时, $f(t) = 0$,则这个定义是有意义的。能进行拉氏变换的函数有唯一的变换式。反过来也一样。

拉氏变换是一种线性运算,即对于所有的 A_1 和 A_2 值,

$$\mathcal{L}[A_1 f_1(t) + A_2 f_2(t)] = A_1 F_1(s) + A_2 F_2(s) \quad (1-16)$$

拉氏变换的一些初等和基本性质,可由式(1-15)导出,并列于表1-1中。

用逆转积分通过拉氏反变换,可将函数 $F(s)$ 变换为 $f(t)$,或者通过部分分式展开,把 $F(s)$ 分解为较简单的函数;然后用诸如表1-1的 $\mathcal{L}$ 变换表,即可求出 $f(t)$ 。

部分分式展开

考虑下列复频函数:

① 一些作者用 0^- 作积分下限,包括了在 $t=0$ 时 $f(t)$ 中的脉冲(如果存在的话),例如,如果 $f(t) = \delta(t)$,则

$$F(s) = \int_0^{\infty} \delta(t) e^{-st} dt = \int_0^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

对于 0^- 的定义, $t < 0$ 时 $f(t)$ 不必为零。