

电路、 信号与系统

[美] W. McC. 西伯特 著

科学出版社

电 路、信 号 与 系 统

〔美〕 W. McC. 西伯特 著

朱钟霖 周宝珀 译

科 学 出 版 社

1991

内 容 简 介

本书是美国麻省理工学院(MIT)电气工程与计算机科学系重点课程的近期教材,全书紧密联系控制与通信工程的实际,论述了“信号与系统”的基础理论和分析方法。

全书共20章。第一章复习电路的动态方程及其解;第二至六章阐述单边拉普拉斯变换及其应用;第七、八章阐述 Z 变换及其应用;第九至十一章讨论卷积与卷积和特性;第十二至十七章阐述傅里叶变换及其应用;第十八章讨论离散信号变换的应用;第十九、二十章介绍随机信号及现代通信系统。本书内容丰富,体系新颖,章节虽多,但篇幅较小,便于灵活选材。书中的例题和习题密切联系工程实际,便于读者(特别是初学者)充分领略基本理论及其应用领域。

本书可作为高等院校通信、控制和计算机等专业本科生“信号与系统”方面的教材,也可供从事电路设计、通信工程、控制工程、信息工程以及计算机等工作的广大科技人员及有关专业研究生和教师参考。

William McC. Siebert

CIRCUITS, SIGNALS, AND SYSTEMS

The MIT Press, 1986

电 路、信 号 与 系 统

〔美〕W. McC. 西伯特 著

朱钟霖 周宝珀 译

责任编辑 刘兴民

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991年3月第一版 开本:787×1092 1/16

1991年3月第一次印刷 印张:29

印数:0001—1700

字数:664 000

ISBN 7-03-001993-8/TN·87

定价:27.40 元

译者序言

本书是美国麻省理工学院 (MIT) 电气工程与计算机科学系对重点课程实行改革后的近期教材。著者西伯特 (W. McC. Siebert) 多年来在 MIT 从事电路、信号与系统课程的教学,并一直致力于课程改革的探索。本书就是著者基于 30 多年的授课经验积累而编写成的,并被列入 MIT 电气工程与计算机科学系列丛书之一。

依照著者的设想,本书应能体现以下四个目的:使读者熟悉分析电路与系统的基本方法;展现上述基本方法的实际应用,并帮助读者进一步了解现代通信与控制工程中的许多重要概念与设备;探讨与基本方法有关的数学问题及其作用与局限;进一步发展系统理论。

本书所包括的内容,可以全部覆盖国家教委所订“高等工业学校信号与系统课程教学基本要求”,而在结构体系及内容编排方面,与国内外同类教材相比,至少具有以下几个特点:

1. 强调电路、信号与系统的连贯与统一,比较重视概念与方法的前后衔接与引导,从而使电路与系统的概念及方法达到整体上的和谐与完善。

2. 结构体系独具一格,在内容的展开上,不追求连续时间系统与离散时间系统、时域分析方法与频域分析方法在形式上的“平行”和“对仗”,而是考虑使初学者易于接受。依照分析方法的实际应用,首先讨论因果系统(以控制系统为背景),然后讨论稳定系统(以通信系统为背景),其指导思想突破了同类教材中普遍采用的体系与模式。

3. 各章篇幅较小,每章集中讨论一个专题或方法,正文的叙述简单明确,很少出现冗长的数学推证,便于学习和掌握,而各章的例题、练习题与习题却又极其丰富,涉及面很广且联系应用实际。因此,本书的灵活性较强,可以适应不同专业与不同类型学生的需要。

4. 力求使基本内容的讨论不过多涉及较为复杂的数学知识,部分定理与性质的证明编入习题供学生自行验证。但对于学生必须掌握与应用的数学概念,却又介绍得相当详细严谨。另外,书中还选择了少量数学哲学与应用问题加以讨论,以激发学生的思考与学习热情。

5. 文字叙述生动流畅,多处引用一些哲理名言,将信号与系统的基本概念升华到科学思维方法的高度,发人深省,耐人寻味,充分显示了著者较高的学术造诣。

近年来,我国的“信号与系统”课程已逐渐成熟,有关教材也已出版多种,教学上积累了不少的实践经验,取得了可喜的成就。但是,我国现有的教材与国外同类教材相比,在内容取材的侧重性、体系结构的多样性、联系实际的广泛性以及写作风格的创新性等方面,都还大有借鉴之处。

众所周知,MIT 是美国著名的理工学院。该校不仅具有世界领先的教学与科研水平,而且学术思想活跃,曾经出版过不少具有创新性的教材,受到世人的瞩目。本书是 MIT 的近期课程改革代表著作之一。我们认为,本书在体系结构、编排方式、联系实际

以及叙述风格等方面都富有特色。另外,本书对因果性与稳定性的理论阐述,对广义函数的确切含义,对离散时间傅里叶变换和离散傅里叶变换的演述,以及对随机信号的引伸介绍等也与众不同。所有这些,无疑对我国这一领域的教学改革与教材改革都具有一定的启发意义。为此我们特将本书译成中文,以期为我国的教学改革和教材改革提供参考与借鉴。

还要指出,本书著者在编写时强调了易懂性,有关理论阐述相当简明严谨,而每章末的习题又涉及广泛的实际问题,有些习题可以激发学生的兴趣,开阔学生的专业知识,甚至可以作为课程设计的题材。因此,根据我们的教学实践,以本书作为主要教材,课堂教学不会发生多大困难,而习题则应适当加以删选。这样,针对学生与班级的不同水平因材施教,将能达到预期的教学效果。

本书的翻译曾得到合肥工业大学芮坤生教授,北京理工大学李瀚荪教授,清华大学郑君里教授,北京师范大学裴留庆副教授,北京邮电学院舒贤林教授、赫慈辉教授,南京邮电学院刘永健教授,西安邮电学院鲁嘉健教授,上海铁道学院周大纲教授,兰州铁道学院张志远副教授,北方交通大学聂涛教授、蒋焕文教授等所给予的鼓励和支持。另外,北方交通大学潘行谦工程师曾协助整理和加工了译文初稿,李哲英讲师等帮助演算了全部习题。在此,我们一并对以上诸位表示深切的谢意。

虽然本书译稿我们曾讲授过多次,但限于我们的水平,译文中难免仍存在错误与不妥之处,敬希读者予以指正。

序 言

在美国麻省理工学院电气工程与计算机科学系, 大学生的重点课程有四门。直到几年以前, 四门课中两门是有关电气工程的专业基础课, 即电路理论和线性系统理论; 另外两门则是有关计算机科学的专业基础课, 即算法语言和计算机结构。然而到了 1978 年, 该系学生的需要和兴趣已经明显地各不相同了。对于部分学生来说, 电气工程的重点课程只是他们进入诸如电子电路与器件设计、控制与通信系统设计或电磁场与微波工程等专业生涯的第一步。而对另一部分学生来说, 这些课程却成为他们学习有关工程和物理科目的最后课程。面对学生要求的不同, 电气工程与计算机科学系于 1979 年从内容和风格两个方面对电气工程的重点课作了修订: 增加了诸如电子器件与电路的内容; 扩大了应用数学的范围, 使之包括更多的应用内容; 加强了实验, 使其更加结合工程的实际应用。至于有关计算机科学重点课的变更情况, 将在本套书的计算机著作中予以说明。

本书是由上述电气工程第二门重点课的讲稿整理而成的。选材的根据是假设学生已经学过常用电路元件的赋定关系(包括简单的半导体器件及运算放大器), 可以熟练地运用基尔霍夫定律写出简单电路的节点动态方程式或状态方程式, 并能够求得上述方程式在零输入或指数(复指数)输入时的解。本书第一章对上述内容进行了复习, 并作了某些扩展。有关先修课程的教材正在编写之中。

本书第二至四章是从电路的角度介绍单边拉普拉斯变换的运算方法、系统函数以及复频域, 并导出分析线性非时变电路性能的输入-输出函数表示法(又称功能法或“黑匣子法”)。第五、六两章讨论线性非时变系统的联接, 特别强调有关反馈的概念及其实际的效果。第七、八两章并行地讨论了以差分方程式及 Z 变换描述的离散时间系统。这两章复习了前几章所讨论的线性非时变电路的数学结构, 并且广泛地介绍了这种结构的重要应用。讨论的方法与以微分方程式及拉普拉斯变换描述的连续时间系统的方法相同。

离散时间系统还可以运用另一种简便方法来分析。这种方法是通过单位取样响应和卷积直接在时域内分析线性非时变系统的输入-输出特性。第九章介绍了这种方法。第十章将此方法推广到连续时间系统。第十一章则对连续时间的冲激函数这一数学方面的难点进行了详细讨论, 并以广义函数的方法予以解决。

对线性非时变系统输入-输出卷积特性的讨论显示出两类互相交叠的系统——因果系统和稳定系统。因果系统(未必是稳定系统)是指只在 $t > t_0$ 时有输入, 在此以前的输入效果是由 $t = t_0$ 时的状态加以体现的系统; 稳定系统(未必是因果系统)则是指在全部时间($-\infty < t < \infty$)内都有输入的系统。因果系统可粗略地看作控制类型的系统, 分析这类系统的适当方法是本书前半部分的内容。稳定系统可粗略地看作通信类型的系统, 分析这类系统的适当方法是双边变换, 特别是本书后半部分讨论的傅里叶变换方法(作为导论, 并不要求预先学习有关复变函数的理论)。

第十二、十三两章讨论了复指数信号的特征函数性质以及用复指数的求和(或积分)表示信号在分析线性非时变系统中的作用, 并且导出傅里叶级数和傅里叶变换的基

本性质。这些性质在后续四章中都有重要应用,诸如取样、滤波、频率搬移(调制)等。所有这些都要着重强调,应当获得一种能从时域和频域两个方面来分析系统的行为(在第十六章,特地导出持续时间与带宽之间的关系和不确定性原理)的洞察能力。为此,本书尽量以对称方法讨论时间与频率的对偶关系。由第十七章所详细讨论的通信系统原理可以明显看出这种分析方法的效力。

第十八章讨论了另一类应用问题——数字信号处理。离散时间傅里叶变换曾在第十四章中作为傅里叶级数的对偶形式加以介绍,这里它被用来计算各种数字硬件,以便实现诸如模拟波形的低通滤波等运算。

第十九章以足够的内容说明,用输入波形的平均值、相关函数及功率密度谱等函数来确定线性非时变系统相应的输出波形的平均值。这一章还讨论了以随机过程的平均值来表示信号的关系式。第二十章应用这些结论说明了诸如脉冲编码调制与脉冲频率调制等宽带通信系统的优良性能。

整个来说,在选材上我已经兼顾了两个互相对立的要求。一方面,作为适合于大学二、三年级的专业基础课程,力求使本书的数学水平保持在必要的最少限度之内,以用来解释那些基本原理;另一方面,为了适应学生们日益广泛并不断增长的求知要求,也选择了一些较难的或较复杂的问题加以讨论,以便激励学生在数学、哲学和应用方面的兴趣。举例来说,考虑到前一个要求,我没有引出电路动态方程的矩阵形式;而照顾到后一个要求,我介绍了有关广义函数和随机过程的知识,这种讨论可能由于过于简化而不够严密。这种折衷在遇到数学定理的证明时是较难处理的。一般地说,我都不追求数学的严格形式,试图遵循 Heaviside 的劝告:“最好的证明就是提出一个可以说明问题的事实,以使定理被看作就是一个事实。”我也体会到 Russell 所提出的格言:“一本书要么具有易懂性,要么具有严密性,两者兼得是不可能的。”我选择了易懂性,或许这会令人感到不够满足。

本书各章所附的习题(除最后一章外)都与课文构成一个整体。其中一部分习题为课文中讨论的问题提供了实际背景。特别简单的问题则作为练习题另外列出并给出了答案。然而,还有很多问题则是用来扩展课文所讨论的内容的。因此,仔细阅读全部习题,至少要了解每个习题所涉及的课题,这应当是学习各章内容的重要组成部分。

在麻省理工学院,本书内容可供十四周的教学选用,每周需要五学时(其中两学时大课讲授,两学时小班讨论,一学时小组辅导)。课堂讲授以及配合讲授的辅助教学,主要是讲解那些用其他方法难以表达的重要理论和观点,也可用来扩展某些书中仅扼要提到的课题,诸如计算方法与双边拉普拉斯变换等。本课程包括四个实验作业,它们是:有源滤波器设计,微分方程式的数值积分算法,抽头延迟线系统的研究,频率调制器与锁相环的特性。

每次讲授并非都包括书中各章的所有内容,而讲授的内容也不要求被每个学生所掌握。然而,本书经过五年的教学实践以后,我们相信多数学生不仅可以学到一些基本的分析方法,而且对于复杂的系统行为具有较深入的了解,从而为学习以后课程的某些专题作了适当准备。虽然本书是专业基础课程的教材,并不是用来查阅条文或某些公式和算法的手册,但是我相信,本书还可以有其他用途。特别是经过讲授者补充某些较深的内容和实际的素材之后,本书可用作大学四年级一个学年的专业课程教材。

可以说，实际上没有一本书是完全由一个人写成的。本书在内容和风格上都受到我的早期合作者、著名教授 E.A. Guillemin 的很大影响。三十多年来，我一直从事有关课程的教学工作，因此，许多同事们和学生们同样对本书有着很多影响。我要特别感谢下列人士对本书的贡献：H. Abelson, R. Buckley, M. Dawson, B. Gallager, L. Gould, B. Johnson, B. Kennedy, M. Keshner, J. Lim, P. Mathys, B. Schreiber, G. Searle, S. Senturia, G. Sussman, A. Smith, D. Jhornton, G. Verghese, S. Wagner, A. Willsky, J. Wyatt, M. Zahn 和 V. Zue.

我还要深深地感谢为本书的编辑和出版而花费大量时间的 MIT 出版公司的编辑 L. Cohen、工作了一年多的秘书 B. Ricker 和 S. Nelson、为本书绘图的 P. McDowell 以及协助最后打印定稿的 L. Braidia。衷心地感谢我的夫人 Sandy 和孩子们，他们放弃了许多旅游机会使我得以为本书工作。最后，我还要向历届的系校领导们和戈登发展工程课程基金会 (B.M. Gordon ECDF) 致意，正是他们的财务资助和无限的信任，才使本书得以出版。

W. McC. 西伯特

目 录

译者序言

序言

第一章 简单电路的动态方程及其解	1
1.0 引言	1
1.1 电路元件的赋定关系	1
1.2 电路联接的制约关系：基尔霍夫定律	4
1.3 动态方程式的节点形式和状态形式	5
1.4 方框图	9
1.5 动态方程式的解	11
1.6 动态方程式的零输入解	12
1.7 动态方程式的指数输入解	14
1.8 小结	18
练习题	18
习题	22
第二章 单边拉普拉斯变换	30
2.0 引言	30
2.1 单边拉普拉斯变换	30
2.2 $\mathcal{L}$ 变换的举例及定理.....	31
2.3 拉普拉斯反变换	35
2.4 多阶极点	37
2.5 应用拉普拉斯变换分析电路	39
2.6 小结	45
附录 单边 $\mathcal{L}$ 交换及其重要定理.....	45
练习题	46
习题	47
第三章 系统函数	53
3.0 引言	53
3.1 线性非时变电路的叠加公式	53
3.2 系统函数	54
3.3 系统函数为指数激励时的响应幅度	57
3.4 系统函数和输入输出微分方程式	58
3.5 小结	61
附录 二端口 LTI 的系统函数表示法.....	61
练习题	63

习题	65
第四章 极点与零点	76
4.0 引言	76
4.1 零极点图	76
4.2 $H(j\omega)$ 的矢量表示	79
4.3 电位的模拟	83
4.4 波特图	84
4.5 小结	87
练习题	87
习题	90
第五章 系统的互联和反馈	99
5.0 引言	99
5.1 系统的基本联接;负载的影响	100
5.2 简单的反馈环路	102
5.3 负反馈效果的几个例题	104
5.4 小结	112
练习题	112
习题	113
第六章 反馈系统的动态特性	115
6.0 引言	115
6.1 反系统	115
6.2 反馈对频带宽度和响应时间的影响	117
6.3 稳定性	122
6.4 不稳定系统的反馈稳定作用	126
6.5 小结	130
附录 奈奎斯特稳定性准则	130
练习题	136
习题	138
第七章 离散时间信号和线性差分方程式	146
7.0 引言	146
7.1 线性差分方程式	147
7.2 离散时间系统的方框图和状态公式	150
7.3 线性差分方程式的直接解	154
7.4 零输入响应	156
7.5 小结	158
练习题	158
习题	159
第八章 单边 Z 变换及其应用	163
8.0 引言	163

8.1	Z 变换	163
8.2	Z 变换应用于 LTI 离散时间系统	170
8.3	离散时间系统的频域表示	171
8.4	小结	177
	附录 单边 Z 变换及其重要定理	178
	练习题	179
	习题	179
第九章	单位取样响应和离散时间卷积	185
9.0	引言	185
9.1	Z 变换的卷积定理	186
9.2	卷积与一般线性非时变系统	190
9.3	一般卷积运算的代数性质	194
9.4	反卷积举例	195
9.5	小结	198
	练习题	199
	习题	200
第十章	连续时间系统的卷积表示法	204
10.0	引言	204
10.1	$\mathcal{L}$ 变换的卷积定理	204
10.2	卷积和一般 LTI 系统	207
10.3	因果性和稳定性	213
10.4	小结	216
	练习题	217
	习题	217
第十一章	冲激和叠加积分	223
11.0	引言	223
11.1	实际系统的平滑效应	223
11.2	冲激及其基本性质	226
11.3	一般 LTI 系统; 叠加积分	230
11.4	冲激和初始状态的突变	238
11.5	冲激偶和其他广义函数; 冲激平衡	240
11.6	小结	244
	练习题	245
	习题	248
第十二章	一般 LTI 系统的频域法	258
12.0	引言	258
12.1	$H(s)$ 的收敛带	259
12.2	傅里叶积分	260
12.3	特定情况——傅里叶级数	262

12.4	傅里叶级数的其他形式: 频谱	264
12.5	周期函数的均值: 帕色伐尔定理	270
12.6	小结	272
	练习题	273
	习题	274
第十三章	傅里叶变换和傅里叶定理	279
13.0	引言	279
13.1	从傅里叶级数扩展到傅里叶变换	279
13.2	傅里叶定理的进一步说明	285
13.3	奇异函数的傅里叶定理举例	287
13.4	傅里叶变换的卷积特性	291
13.5	小结	293
	附录 A 傅里叶变换及其性质	294
	附录 B 双边拉普拉斯变换	296
	练习题	297
	习题	298
第十四章	时间取样和频率取样	303
14.0	引言	303
14.1	周期冲激串	303
14.2	周期函数的傅里叶变换: 傅里叶级数的重现	304
14.3	取样定理	307
14.4	脉冲调制系统	310
14.5	离散时间傅里叶变换	312
14.6	小结	314
	附录 信号的矢量空间表示	315
	练习题	321
	习题	322
第十五章	理想滤波器与实际滤波器	332
15.0	引言	332
15.1	理想滤波器	332
15.2	因果条件与希尔伯特变换	335
15.3	理想滤波器的阶跃响应与吉伯斯现象	338
15.4	小结	341
	练习题	341
	习题	341
第十六章	持续时间与带宽的关系和不确定性原理	344
16.0	引言	344
16.1	延迟时间、上升时间、持续时间与带宽的定义	344
16.2	不确定性原理的实用意义; 脉冲解析	351

16.3	小结	354
	练习题	354
	习题	355
第十七章	带通的运用和模拟调制系统	357
17.0	引言	357
17.1	幅度调制	357
17.2	混频器与超外差接收机	365
17.3	单边带调制;窄带信号的一般表示	367
17.4	相位调制与频率调制	372
17.5	小结	377
	练习题	377
	习题	378
第十八章	离散时间系统中的傅里叶变换	390
18.0	引言	390
18.1	离散时间傅里叶变换的性质	391
18.2	离散时间滤波器	396
18.3	DT 傅里叶级数及离散傅里叶变换 (DFT)	401
18.4	DT 傅里叶级数及 DFT 的性质	405
18.5	小结	406
	附录 离散时间傅里叶变换及其重要定理	407
	练习题	408
	习题	409
第十九章	均值与随机信号	416
19.0	引言	416
19.1	周期函数的均值	417
19.2	无穷时间均值的特性	422
19.3	简单随机过程的概率模型	425
19.4	小结	432
	习题	432
第二十章	现代通信系统	437
20.0	引言	437
20.1	取样和量化	437
20.2	纠错编码	440
20.3	调制与检测	441
20.4	小结	445
	后记	448

第一章 简单电路的动态方程及其解

1.0 引言

第一章有两个目标：让读者复习一下电路分析的一些基本原理，并以适当的方法给出这些基本原理的公式，以使我们能在以后章节中进一步发展这些原理。所谓电路（或称网络），顾名思义，是指那些由电子元件互相连接在一起的装置。然而，“电路”一词，既可指那些在实验室中用电线或印刷电路连接起来的电阻、电容和晶体管的实际网状结构，又可指那些抽象讨论的模型。本书大部分章节将要讨论的电路是后一种含义（虽然如此，作为工程技术人员，我们时刻不应忘记，对于电路模型的兴趣，首先在于它可以帮助我们理解 and 设计那些实际的系统）。因此，我们的首要任务就是对于我们选用的名词“互相连接的”和“元件”给予抽象的定义。这样，电路模型就成为我们描述电路行为的一组动态方程式的图解。但是，动态方程的描述方法通常都是隐式的。本章后半部分将要讨论求解简单动态方程的方法，从而能够得到电路对于简单激励所产生响应的显式说明。本书后续各章的目的是进一步扩展和完善本章内容，使其成为分析和设计那些表征当今工程实际的某些复杂系统的有力工具。

1.1 电路元件的赋定关系

在电路模型中，元件或支路是通过支路电压与支路电流¹⁾的关系方程式来表征的，这个方程式称为赋定关系。最简单抽象的电路元件是图 1.1-1 所示的线性电阻、电容、电感和理想电源。应当注意，图中所示的赋定关系，其电流 $i(t)$ 和电压 $v(t)$ 的参考方向是一致的，这就是电流 $i(t)$ 的正方向是由电压 $v(t)$ 的正端通过元件流向负端的。电流 $i(t)$ 和电压 $v(t)$ 的单位分别是安（A）和伏（V）。

电路元件也可以具有两个以上的端钮。最重要的抽象多端元件是理想受控源，它具有四种基本类型，如图 1.1-2 所示。理想受控源是常用的有源元件如晶体管和运算放大器在线性区段运用时的理想化模型。例如，理想运算放大器就是理想的电压控制电压源在极限范围内使增益 α 极大时的特殊情况。这时，可用专门的符号表示，如图 1.1-3 所示。理想运算放大器总是用于反馈电路中，这样当激励的输入电压差 $\Delta v(t)$ 近于零时，运算放大器具有有限的输出电压。多端元件的其他例子还有耦合线圈、变压器、转换器和回转器等，这些将在第三章的习题中加以讨论。

图 1.1-1, 2, 3 所示的理想二端元件（独立源除外）都是线性的。这就是说，其动态变

1) 应该指出，本书所讨论的概念也可应用于其他领域，在这些领域中，重要的动态变量是力和流量（如机械力和速度，温度和热流量，化学位势和反应速率等）。另外，社会科学和生物学中的许多模型也可用类似于我们要讨论的方程式来描述。有些书籍以极大篇幅来总结概括这些类似方程式，而我们认为这是不值得的。因为大部分学生可以很容易地处理必要的转换。在本书的全部习题中，就包括一些非电的应用例题。

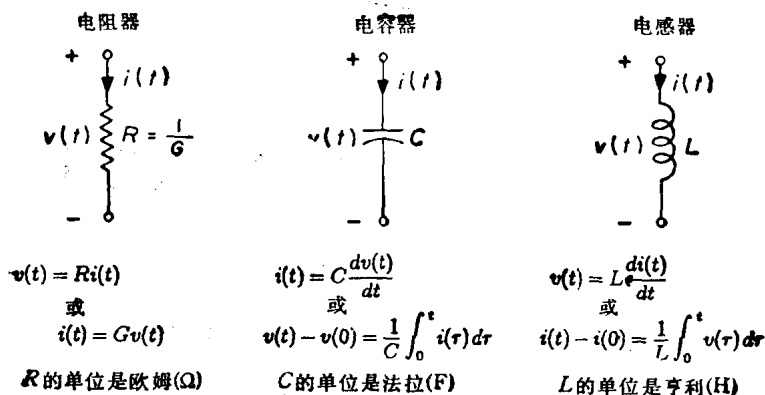


图 1.1-1 简单的线性二端集总电路元件及其赋定关系。应当注意, 电流源与电压源不同, 电源符号中的箭头方向或+ - 符号表明电源的标定正方向

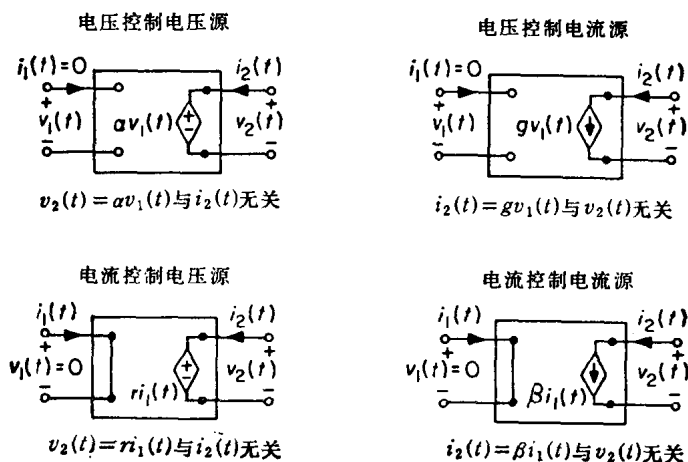


图 1.1-2 理想受控源及其赋定关系。应当注意, 此处菱形用来表示受控源, 圆圈则表示独立源

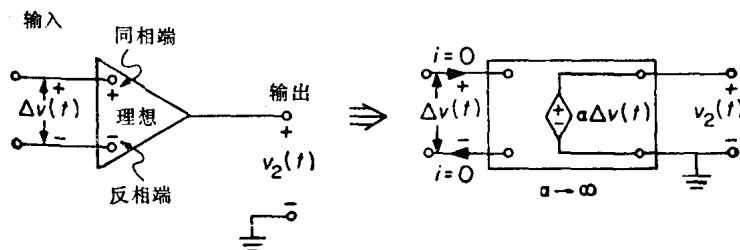


图 1.1-3 理想运算放大器

量满足下面的叠加(线性)原理。

叠加(线性)原理

如果 $i'(t)$ 与 $v'(t)$ 是满足某个元件赋定关系的任意一对函数,而 $i''(t)$ 与 $v''(t)$ 是满足同样关系的另一对函数,则当函数 $i(t)=ai'(t)+bi''(t)$ 与 $v(t)=av'(t)+bv''(t)$,其中 a, b 为任意常数,同样也满足该赋定关系时,我们就说此元件服从叠加原理(或说元件是线性的)。

图 1.1-1, 2, 3 所示的理想二端元件(独立源除外)同样满足下述非时变原理¹⁾。

非时变原理

如果 $i(t)$ 与 $v(t)$ 是满足某个元件赋定关系的任意一对函数,则当 $i(t-\tau)$ 与 $v(t-\tau)$, 其中 τ 为任意值,同样也满足该赋定关系时,我们就说此元件是非时变的。

全部由线性、非时变元件组成的电路(独立源除外)是线性非时变系统(LTI)的例子。然而,线性非时变系统则是更加概括性的概念,这在以后各章中将要讨论。

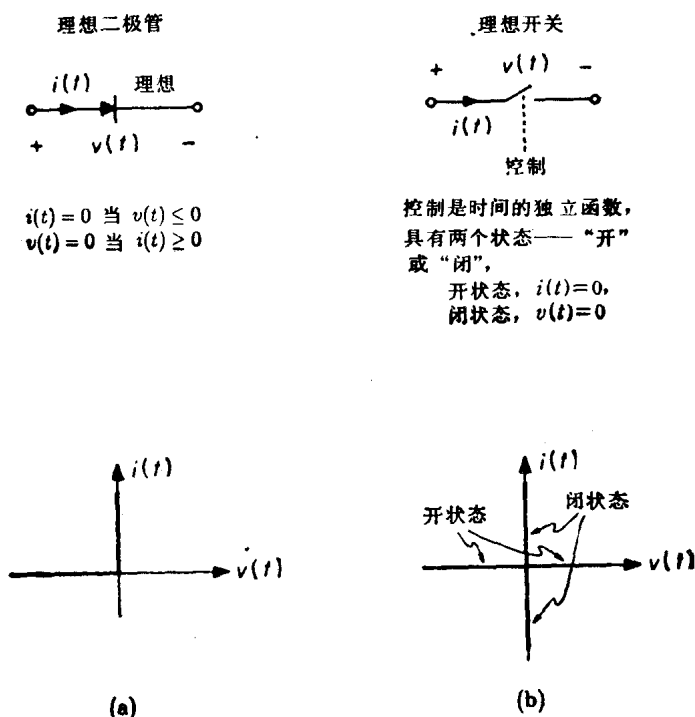


图 1.1-4 (a) 理想二极管, (b) 理想开关

最常用的非线性元件是二极管,其理想的赋定关系如图 1.1-4 所示。图中还给出了最重要的时变元件——开关的赋定关系。含有非线性元件或时变元件的电路是很有用的(某些例子可见习题 1.13—1.15)。但是,分析这种电路时常是很困难的。研究非线性电路特性的一般原理和方法似乎并不存在,每一种新的电路都可能存在新的问题。与此相

1) 叠加原理与非时变原理可以直接推广到多端元件,还有一些线性或非线性、时变或非时变的二端元件例子,见练习题 1.1。

对照的是,线性非时变系统的理论却包括很丰富的定理、概念和方法,这些为分析与设计系统提供了有力工具。所以,实际电子电路中必要的非线性特性时常被限制在内线性非时变系统隔离开的局部环节中。这样处理可以大大简化分析方法,从而为取得期望的动态效果提供足够的设计方便。当不能使用上述隔离局部化的方法时,如在某些高速集成电路中,其设计过程可以简化成用数值方法研究器件的性能随各种参数所作系统变化的情况。为此目的而建立的计算机电路仿真技术已有很大发展。然而,仿真技术的广泛应用并不能取消学习线性非时变系统理论的必要性,这是因为线性非时变系统的理论保留着用来讨论复杂系统性能的有效语言。

1.2 电路联接的制约关系: 基尔霍夫定律

除了强加于支路元件的赋定关系外,电路中的各支路电压和支路电流还要由图 1.2-1 所描述的两个基本定律加以制约。

基尔霍夫电流定律 (KCL)

流进电路任意节点的电流代数数和为零。(更一般地说,流进网络任意割集的电流代数数和必为零。如果把电路任意切割为两个部分,所谓割集,就是切割后各支路的集合。)

基尔霍夫电压定律 (KVL)

围绕电路任意网孔的电压降代数数和为零。(更一般地说,围绕电路任意闭合路径的电压降代数数和必为零。)

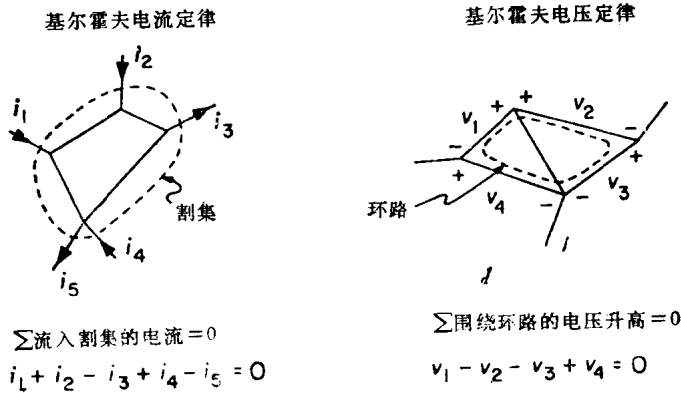


图 1.2-1 基尔霍夫定律

上述两个定律来自麦克斯韦方程式¹⁾。如果电路中变量的变化非常缓慢,以致所有的电磁能量全部储存在电路元件之中,而不是存于各元件之间,这样的能量储存称为集总的。对于那些由集总元件组成的一般常用电路,当信号频率低于几十兆赫时,基尔霍夫定

1) 有关基尔霍夫定律适用条件更为详细的讨论可见 R.M.Fano, L. J. Chu, and R. B. Adler, *Electromagnetic Fields, Energy, and Forces* (New York, John Wiley, 1960).