

---

# 电路与系统

## 模拟与数字新讲法

---

[美] A·帕普里斯 编著

葛果行等 译 万发贯审校

人 民 邮 电 出 版 社

Athanasios Papoulis  
Circuits and Systems  
A Modern Approach 1980

内 容 提 要

本书共八章。前五章讲电路与系统分析和数字模拟的基本原理，奠定了拉普拉斯变换和 $z$ 变换的数学基础，并将模拟与数字系统并行讲述，讨论了模拟系统的数字模拟问题。第六章较详细地综述了经典模拟综合法和现代数字综合法。第七章介绍离散傅里叶级数和快速傅里叶变换；第八章论述离散傅里叶正、反变换，并通过抽样与插值，将模拟与数字概念、模拟与数字系统交融在一起。本书讲法新颖，简明扼要，起点虽不算高，而讲来进度较快，深入浅出，达到了应有的水平，内容较为丰富，是美国大学新编三年级改革性教材，可供大专院校有关专业作为教学参考书或试用教材，也是广大科技工作者在数字信号与系统方面较好的自学读物。

电 路 与 系 统

模拟与数字新讲法

[美] A. 帕普里斯 编著  
葛果行等 译 万发贯 审校

人民邮电出版社出版  
北京东长安街27号  
北京印刷一厂印刷  
新华书店北京发行所发行  
各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1983年6月第一版  
印张：16 页数：256 1983年6月北京第一次印刷  
字数：423千字 印数：1—13,600册

统一书号：15045·总2689-无6224

定价：2.35元

## 译者前言

由于数字计算机、大规模集成电路和微处理机的飞速发展，数字技术已经渗透到科学技术、国民经济和国防的几乎每一个领域。电路与系统的研究重点正逐步向着离散、数字方面转移。传统的大学课程是以模拟概念为主的。学生学到了三、四年级，就已经在脑海中形成了较完整的模拟概念，而且先入为主，比较牢固，因此对于数字概念的吸收，往往比较困难。为此，国外的大专院校多在着手进行教学改革，例如，美国某些大学在二年级增开的“离散系统导引”课程，就是为提早建立离散、数字概念所作的努力。而且试行以来，已初见成效。我国工科各专业已将电子计算机与算法语言定为基础课，其意义也在于此。

但是国内外在电路与系统课程中，将经典模拟概念与现代数字概念并行讲授的改革工作，还在试行阶段。A·帕普里斯教授所著的本书是这方面较新的著作。他在序言中列举了书中的七个特点，突出的是以“模拟与数字系统并行阐述”为纲。开宗明义，就在第一章中将模拟信号与系统和数字信号与系统并行提出，把近五十年来系统设计由模拟到数字的演变过程作了简要的介绍，把差分与递归方程和微分与微分方程相对照，引进了时域内模拟系统的数字模拟法，从而把模拟与数字系统联系在一起。在第二、三章中奠定拉普拉斯变换和 $z$ 变换的数学

基础,进一步阐述模拟系统与数字系统,微分方程与递归方程。然后在第四、五章中,对迭加、卷积、冲激响应、频率响应、系统函数等重点课题,模拟与数字并行,详加阐述,再导至频域内模拟系统的数字模拟这一有机联系的主题。在第六章中以发展演变为脉络,较详细地综述了经典模拟综合法和现代数字综合法,从而也为学习数字系统的设计奠定了初步基础。在第七章中以傅里叶级数为主线,引出离散傅里叶级数、快速傅里叶变换等,作了适当的介绍。最后在第八章中进一步详细论述傅里叶正、反变换,数值计算方法,性质与应用,并通过抽样与插值,将模拟与数字概念,模拟与数字系统交融在一起,结束全书。

帕普里斯教授是国际知名的学者,他在本书中对模拟与数字系统,通过并行研究的处理方法,作了新的尝试和努力,使我们的思路得到一定的启发。他的著作,概念清晰,例题较多,分析、证明问题时,逻辑性、条理性较强,简明扼要,别具匠心,有他自己独特的风格。在本书第一章和第四章附录中对冲激函数定义的反复论证,即为一例。本书原为纽约理工学院电气工程系电路与系统课程的讲稿,经过整理修订,于1980年10月出版,因此内容较新,例如电荷耦合器件——电子式抽头延迟器(线)的应用贯穿全书等。

综上所述,我们觉得有必要译出本书,作为大专院校有关专业的教学参考书或试用教材,并为教学改革提供参考。本书起点并不算高(参见原序),但深入浅出,循序渐进,达到了应有的水平,可供广大科技人员作为在数字信号与系统方面的自学读物。

我们在译本中所用单位,一律采用中国国际单位制推行委员会1981年8月6日公布的《中华人民共和国计量单位与符号方案(试行)》中的名称。书中印刷错误或笔误,已据著者寄来的勘误表作了订正,因此译本中不另加注。

本书由葛果行翻译第一、四、八章,唐曼卿、王筠、刘华志、余玉龙、蔡德钧依次翻译第二、三、五、六、七章。然后由葛果行

进行了全面的校订整理。最后由万发贯校阅定稿。由于我们业务水平有限，译本中缺点、错误在所难免，诚恳地希望读者批评指正，并希原著者见谅。

A·帕普利斯教授赠给我们刚出版的本书原版本及有关资料，我们深表感谢。

译者

于华中工学院信息科学和工程系

1981年8月

# 原 序

近年来系统设计经历了根本性的变化。随着集成电路与微处理机的进展，过去传统用模拟系统来执行的大多数功能，现在都有可能数字式地和实时地完成。美国大多数院校已将这发展以数字系统与信号处理新课程的形式编进了教学计划。然而，教学重点从经典模拟概念转移到现代数字概念，主要还只限于研究生和高年级本科生的课程，基础课程实质上并未受到影响。

在教育工作者当中似乎普遍同意以下看法，即系统模型化和分析的基本原理应该按直流与交流电路的传统方法讲述。但是，人们已经认识到基础课程中也应该包括数字设计方法。尽管如此，但由于在第二阶段课程中没有一致这样做，结果在方法上显然并不统一。这就表明有必要进行改革。

最近，作者承担了修订纽约理工学院电气工程系三年级电路与系统教学大纲的任务。经过仔细研究各种讲授方法之后，得出的结论是数字技术不应作为一个分开的单元来讲授，而应作为系统理论与设计一整套课程的组成部分来讲授。作者希望在本书中表明这是一种更经济的处理方法，它有利于较好地理解拉普拉斯变换、 $z$ 变换、微分方程与递归方程，而最重要的是它能阐明数字与模拟概念之间的联系。

学习本书所要求的先修课程并不太高，即只需学过基础微积分和掌握二年级程度的直流与交流电路。最好是学过一些微分方程和模拟系统，但这不是必不可少的。并不要求具有拉普拉斯变换、 $z$ 变换、离散系统或递归方程的预备知识。书中将对这些课题从基本原理开始作系统的讲述。

本书前五章形成一个自成体系的单元，可用作三年级一个学期的电路与系统分析和数字模拟的基本教材。讲完整本书要求两学期的时间。然而，倘若学生事先熟悉拉普拉斯变换和傅里叶级数，也可能用一个学期把这本书学完。

下面是本书中也许值得注意的一些特点：

1. 结合简单实例集中讲基本观点。
2. 并行开展对模拟与数字系统的讲述。
3. 强调线性、迭加、冲激响应、频率响应与系统函数的概念。
4. 简洁而完整地研究拉普拉斯变换和 $z$ 变换。
5. 以用求和逼近卷积积分为基础来讲数字模拟和抽样模拟方法。
6. 综述经典无源与有源综合法和包括数字系统与电子式延迟器的现代综合法。
7. 先讲普通傅里叶级数再依次讲离散傅里叶级数和快速傅里叶变换。

此外还应指出，编著本书的目的不仅在讲述系统的基本原理。书中讨论是作为演绎法训练而展开的，这种训练也可用作一种媒介物，起加强学生对工程课程的分析能力的作用。

本书以作者为纽约理工学院电气工程系伐明德尔分部本科班(EI/78)所设置的课程为基础。在规划该课程及编写手稿的过程中，得到了同事 Christos Chamzas 的协助。对此作者表示感谢。Nima Adamo 为作者打印手稿，在此也一并致谢。

A·帕普里斯

# 目 录

译者前言 .....	1
原 序 .....	1
第一章 元件与方程 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 信号 .....	7
1.3 电路元件与方程 .....	18
1.4 数字元件与方程 .....	30
习题 .....	40
第二章 拉普拉斯变换、模拟系统、微分方程 .....	49
2.1 引言 .....	49
2.2 拉普拉斯变换的基本原理 .....	54
2.3 电路与微分方程 .....	73
附录 2 A 部分分式展开 .....	98
习题 .....	102
第三章 $z$ 变换、数字系统、递归方程 .....	110
3.1 引言 .....	110
3.2 $z$ 变换的基本原理 .....	116
3.3 数字系统与递归方程 .....	124
3.4 抽样与数字模拟 .....	135
附录 3 A 经典法 .....	143
习题 .....	146
第四章 卷积 .....	154
4.1 迭加 .....	154
4.2 卷积 .....	162
4.3 看作求和式的卷积、抽样系统与抽头延迟器 .....	175
附录 4 A 卷积的单位元素 .....	185
习题 .....	188



第五章 系统函数、频率响应、数字模拟 .....	197
5.1 模拟与数字系统的系统函数 .....	197
5.2 模拟与数字系统的频率响应 .....	219
5.3 频域中的数字模拟 .....	243
附录 5 A 伯德图 .....	260
习题 .....	269
第六章 模拟与数字综合 .....	282
6.1 无源综合 .....	282
6.2 滤波器 .....	299
6.3 有源综合 .....	316
6.4 数字综合 .....	331
6.5 一般系统 .....	346
习题 .....	359
第七章 傅里叶级数 .....	367
7.1 周期函数 .....	367
7.2 性质与应用 .....	381
7.3 离散傅里叶级数与快速傅里叶变换 .....	397
7.4 截断的傅里叶级数与非周期函数 .....	419
习题 .....	429
第八章 傅里叶积分 .....	435
8.1 频谱 .....	435
8.2 性质与应用 .....	446
8.3 抽样与内插 .....	464
习题 .....	473
内容索引 .....	479

# 1 元 件 与 方 程

## § 1.1 引 言

本节对系统理论与设计的各个方面作简要的叙述。

让我们从解释信号与系统这两个名词开始。这两个名词一般用来有很多含义，如电子系统、运输系统、生物系统；无线电信号、智能信号、光学信号；甚至超感信号和行星系统等等。所以，任何要给这两个名词下准确的普遍定义（即使在工程课文中）的想法，都不会是很成功的。这两个名词的意义通常只能根据上下文来理解。

在本书中对信号与系统这两个名词给出了三种相关联的解释。第一种解释是：系统<sup>[1]</sup>是由电阻器、电感器、电容器和信号源组成的电网络。信号就是该网络中各处的电压和电流。因而信号都是时间的函数，它们之间的关系由根据物理定律（基尔霍夫定律）写出的一组方程来表示。第二种解释不以物理元件为着眼点，而注重这些元件所完成的数学功能：电阻器是倍乘器；电感器和电容器是微分器或积分器。这种解释把系统看作是倍乘器、微分器或积分器的集合体，把信号看作是由一组方程来联系的任意时间函数，这些方程则是由各元件的相互连接法得出的。换言之，系统乃是用来处理各种信号的装置。这种处理可用电路或其他模拟系统来实现，但也不一定要用模拟系统。如果同样的处理可以数字地、实时地完成，则该模拟系统就可以用一部计算机来代替。这就引出了系统的第三种解

---

[1]在本书中系统一词是指线性非时变系统。其他种类的系统不拟进行研究。

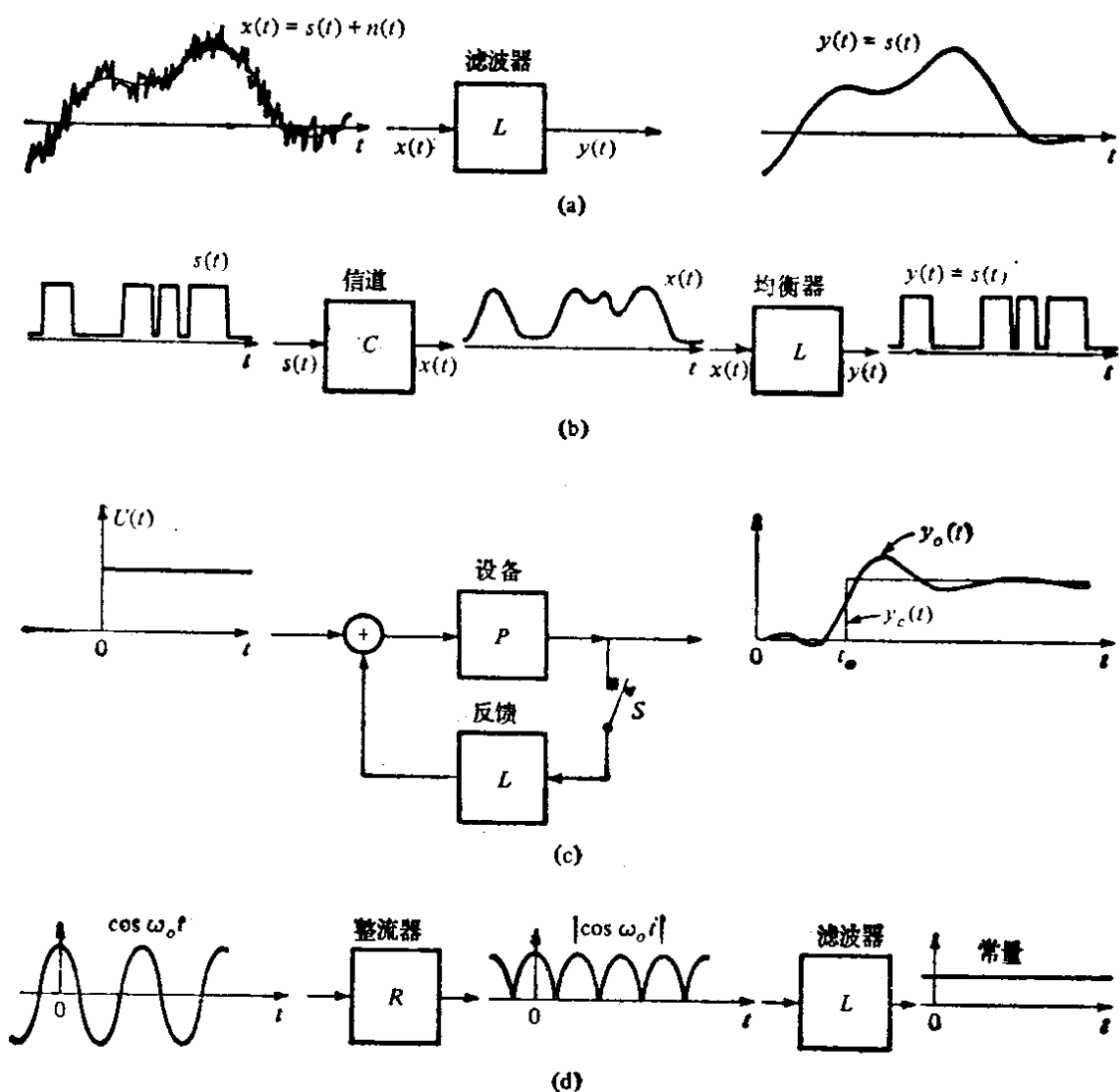


图 1.1

释：系统是输入和输出都是数列（离散信号）的数字装置。

为了说明系统理论的应用情况，我们在图 1.1 中示出了四个典型的例子。

**滤波器** 在第一例（图 1.1 a）中，函数  $x(t)$  为和式  $x(t) = s(t) + n(t)$ ，其中  $s(t)$  为待确定的信号， $n(t)$  为干扰（加性噪声）。我们希望找到一个系统  $L$ ，使得当  $x(t)$  为其输入时，得到的输出  $y(t)$  等于  $s(t)$ 。

**均衡器** 在第二例（图 1.1 b）中，信号  $s(t)$  通过信道  $C$ （例如，电话电缆）进行传输。在信道终点接收到的信号  $x(t)$  是已失真的  $s(t)$ 。我们的任务是设计一个系统  $L$ ，使它对  $x(t)$  的响应等

于  $s(t)$ 。

**反馈** 在第三例 (图 1.1 c) 中, 设备  $P$  的输入为阶跃函数  $U(t)$ , 产生的输出为函数  $y_0(t)$ 。我们希望找到一个系统  $L$ , 使得按图连接后, 新系统 (在  $S$  闭合时) 的输出  $y_c(t)$  等于延迟的阶跃函数  $U(t-t_0)$ 。

**直流电源** 在最后一例 (图 1.1 d) 中, 全波整流器  $R$  的输入为正弦型波  $\cos \omega_0 t$ , 其输出等于  $|\cos \omega_0 t|$ 。要设计系统  $L$ , 使它对  $|\cos \omega_0 t|$  的响应为一常量。

系统的设计包含几个步骤, 从给定的设计要求出发, 到写出用现有的物理元、部件可以实现的技术规范, 直到最后的综合。所有这些步骤都取决于现有元、部件的特性, 因此与工艺技术水平直接有关。为了使读者对系统设计中工艺技术如何起作用有一些概念, 下面略述近五十年来滤波器综合的主要方法的演变过程。

**无源综合** 无源综合是指仅由无源元件组成的系统的设计。图 1.2 所示低通滤波器即其一例。这种综合方法自从五十多年前提出, 直到五十年代后期始终处于支配地位。今天它已不是主要的综合方法, 但在许多应用中仍然使用。无源综合仍较经济, 其元件不灵敏, 且能荷载大的电流。例如, 在电源设计中, 主要使用无源元件。

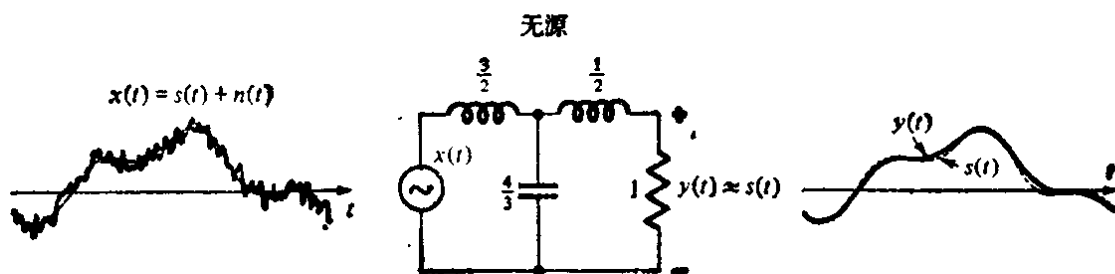


图 1.2

**有源综合** 电子学在近年来的进展已经显著地减小了电阻器和电容器的尺寸。然而, 要同样减小电感器的尺寸却不能实现。由于

其他原因，电感器也不为人们所乐用。这些原因是：价格昂贵、有损耗、显示非线性、不能被有效地屏蔽以及没有标准元件供应。我们将会知道，在网络综合中电感器可以用有源器件来代替。图 1.3 中的滤波器即其一例。这只滤波器等效于图 1.2 中的无源滤波器，但它仅由电阻器和电容器组成。有源器件是运算放大器。

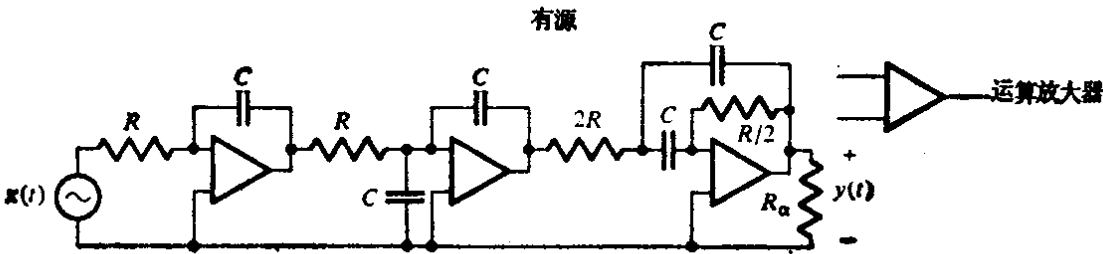


图 1.3

在晶体管发明以前，由于当时有源器件（电子管）价格昂贵、不可靠、体积大和功耗高，有源综合并不通用。这些问题已不复存在。当前，在不断增多的应用中，常规采用有源器件。有源综合的其他优点包括：增益、隔离、尺度展缩和高选择性。

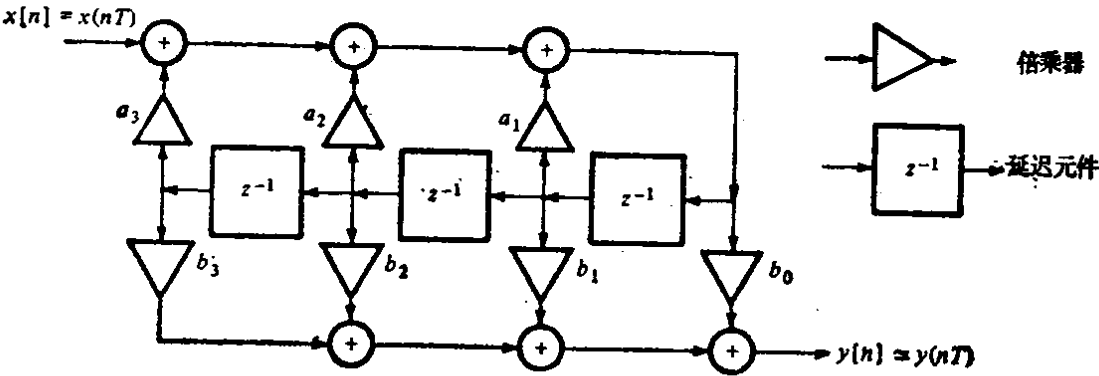


图 1.4

**数字综合** 随着集成电路和微处理机的进展，系统设计已经进入了一个新纪元。当前有可能数字地实现大部分处理功能，并且可以经济地、基本上实时地完成。图 1.4 的数字滤波器即其一例。这只滤波器的输入等于信号  $x(t)$  的样本  $x(nT)$ ，得到的输出等于所需响应的样本  $y(nT)$ 。该滤波器由延迟元件（移位寄存器）、倍乘器和加法器组成，因而它是数字地模仿模拟系统操作的一部小型计算机。

模拟 下面对“模拟” (“Simulation”) 一词的含义作简单的解说：这个词一般的含义是用一组方程及其解来构成一给定系统（如化工厂、飞机、人眼）的模型，这些方程的解或者用数值法求出，或者作为模拟系统（模型）的响应来得出。在本书中对这个词将作如下解释：所谓（数字）模拟就是设计一个数字系统，使其执行给定模拟系统同样的功能。从这种意义上看来，图 1.4 的数字系统就是图 1.2 中模拟系统的数字模拟器。

A/D 转换器 数字系统是输入为数字的计算机。待处理的信号是时间的函数。所以，数字系统必须包括一个将时间函数转换为数列的装置（图 1.5）。这样一种装置称为模-数转换器（A/D 转换器）。A/D 转换器是作为集成电路工艺品的一部分，以不同形式、不同转换速率和不同价格供应的一种颇为复杂的装置。转换中

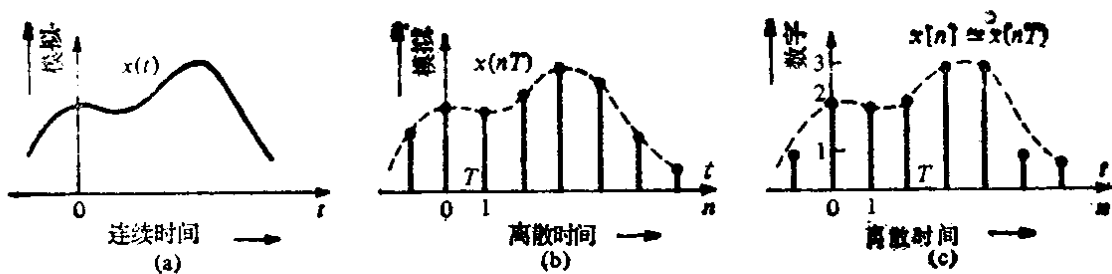


图 1.5

涉及的信号有连续时间信号、离散时间信号、模拟信号和数字信号。这些名词可说明如下：A/D 转换器的输入  $x(t)$  是连续时间信号（图 1.5 a）。它的样本  $x(nT)$  形成离散时间信号（图 1.5 b）。因而，连续与离散的区别是就自变量（定义域）来说的。信号  $x(t)$  和  $x(nT)$  都可以取任何值，从这个意义上看来，两者都是模拟信号。A/D 转换器的输出  $x[n]$  则是将  $x(nT)$  舍入而得出的数列（图 1.5 c）。数列的值都是最小有效位的倍数，从这个意义上看来， $x[n]$  是数字信号。因而，模拟与数字的区别是对于因变量（值域）而言的。本书对舍入问题不拟进行讨论。所以，我们将不把离散时间模拟信号  $x(nT)$  和离散时间数字信号  $x[n]$  加以区别。

抽样系统和抽头延迟器 集成电路工艺新近已经生产出一种新

组件——电子式抽头模拟延迟器，它能以模拟形式执行数字系统的全部操作。这种组件可以用来设计等效于数字系统的一种系统，但是并不要求用  $A/D$  转换器或其他复杂的元部件。所得到的系统价格较廉，但不如数字系统那么可靠，也没有那么准确。

这种组件是一种实质上等效于传输线的电荷转移有源电路。它有  $m$  个抽头（图 1.6 a）其第  $k$  个抽头的信号  $y_k(t)$  是输入  $x(t)$  的延迟型式：

$$y_k(t) = x(t - kT)$$

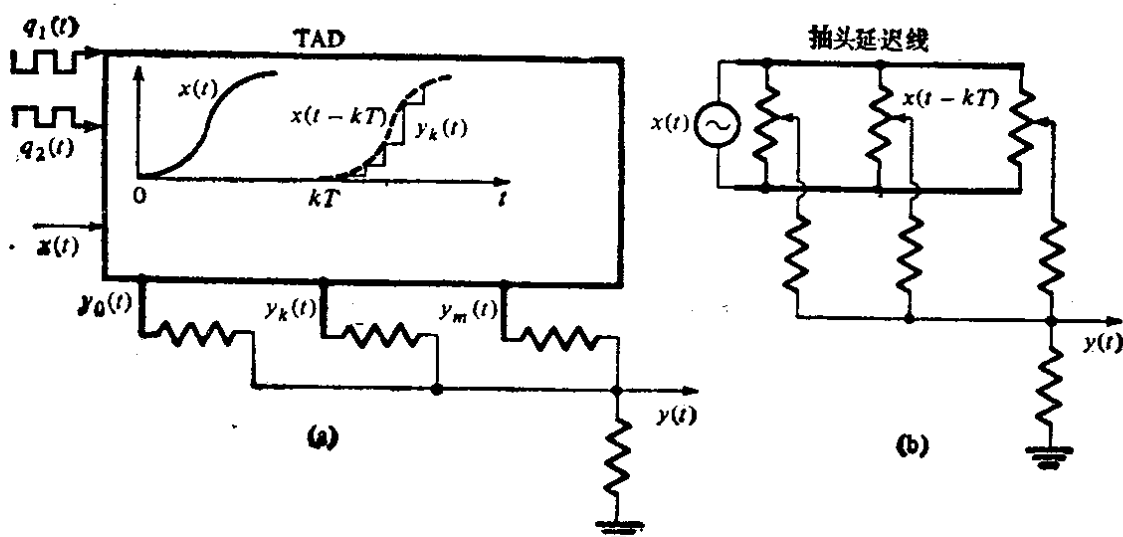


图 1.6

典型的组件，如 Reticon TAD-32 型，具有 32 个抽头，还有一个附加的端子，可以用来把几个这样的组件同步地接成级联，从而增加可用的抽头数目。该组件的输入是待处理的信号  $x(t)$  以及两个用以存贮信号并将其转移到下一个抽头的时钟波形  $q_1(t)$  和  $q_2(t)$ 。每个信号  $y_k(t)$  都作为电压源（受控源）被引出到一个外部端子，并用缓冲器把它与内部隔离（见第 6.3 节）。因而，该组件是一只抽头延迟器（移位寄存器），它每隔  $T$  秒把第  $k$  个抽头上的信号  $y_k(t)$  移到下一个抽头上去。用这种组件构成的系统仅由倍乘器和加法器组成，得到的输出为

$$y(t) = \sum_{k=0}^m c_k y_k(t) = \sum_{k=0}^m c_k x(t - kT)$$

图 1.6 a 的电路是这个和式的一种可能的实现。可以证明（见第四章第 4.3 节），若适当地选择加权值  $c_k$  而  $m$  又足够大，则  $y(t)$  等于某规定系统对同一输入  $x(t)$  的响应。这样，我们就有了一种确实很简单的系统综合方法。

当然，这种方法并不新。上述和式毕竟用一根如图 1.6 b 所示的传输线就可以获得。然而，实际的传输线在低频应用中延时太小，而且，即便延时能够改变，其变化范围也有限。新就新在有了一种电子延迟器可资利用。这种组件的延时系用时钟频率来控制，并易于从 1 毫秒改变到 0.1 微秒，复盖范围从 1 千赫到约 10 兆赫<sup>[2]</sup>。

**分析、逼近、综合** 在设计问题中，所需特性往往导致一组不能用物理元部件实现的技术要求。例如，理想滤波器即使在原则上也不可能实现（见第六章第 6.5 节）。所以设计的第一步就是用物理可实现的技术要求来逼近所需特性。这一步是以事先了解的各种物理系统的性质为根据：无源、有源、数字、抽头延迟器等，因而，系统设计包含分析、逼近和综合。

**系统分析** 是计算给定系统对各种输入的响应并确定它们的性质。

**逼近问题** 是用物理可实现的技术要求来逼近设计特性。

**系统综合** 则是用给定的可实现的技术要求来确定系统结构。

本书的主要目标是系统分析。逼近问题在简单系统的课程中讨论。综合问题将在第六章介绍，但重点是作总的考察而不是对每种方法进行详细论述。

## § 1.2 信 号

**信号** 是代表一个物理量的函数。

**连续时间信号** 是其定义域包括一个区间内每一点的函数

---

[2]据著者称：1980 年研制中的样品已高达 100 兆赫——译者。



$x(t)$ 。

离散时间信号是其定义域为一个整数集的函数。

因而离散时间信号是一个数列。这种数列本书多写成函数符号  $x[n]$ 。方括号表示自变量  $n$  仅取整数值。

离散时间信号  $x[n]$  往往由对连续时间信号  $x(t)$  抽样来组成。若样本都是等间距的，则

$$x[n] = x(nT) \quad (1.1)$$

(图 1.7)。常数  $T$  是抽样间隔。

常用的连续时间信号是阶跃函数

$$U(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

(图 1.8 a)。它的样本  $U[n] = U(nT)$  所组成的离散时间信号

$$U[n] = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$$

称为阶跃序列(图 1.8 b)。

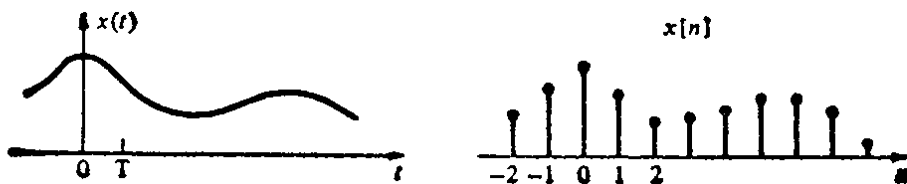


图 1.7

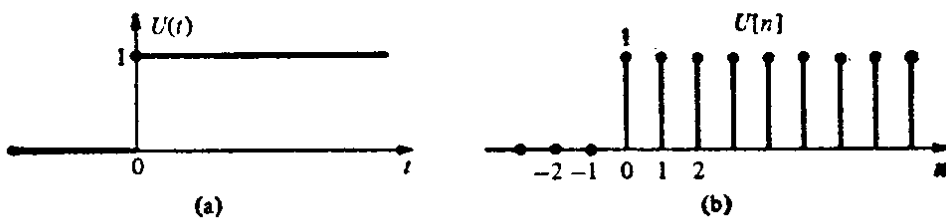


图 1.8

电压、电流或其他物理量通常用连续时间信号来表示。如果它们的值只在  $t$  值的一个离散集上能规定出来，则它们也可以用离散时间信号来表示。