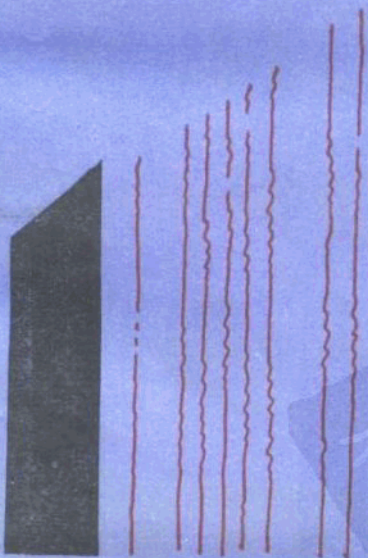


高等学校教材

信号与线性系统分析



TK911

7.91

568012

(11) 高等学校教材

信号与线性系统分析

北方交通大学 朱钟霖 主编



中国铁道出版社

1993年·北京

(京) 新登字 063 号

内 容 简 介

本书是1982年出版的《信号与线性系统分析》试用教材的修订版。全书内容包括：导论、连续时间信号与系统的时域分析、变换域（频域和复频域）分析，系统函数与系统特性，离散时间信号与系统的时域分析、变换域（频域和 z 域）分析，状态空间分析等十章。本书保留了试用教材的体系和特色，融合了近十年的教学实践经验，各章内容都有所更新。为便于学生学习，各章附有思考题及习题，书后附有习题答案。

本书可作为高等院校通信、控制、信息和计算机等专业的本科生教材，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专业的广大科技工作者自学参考。



中国铁道出版社出版、发行
(北京市东单三条14号)

责任编辑 武亚雯 封面设计 王毓平
各地新华书店经售
北京燕山联营印刷厂印

开本：850×1168毫米 1/32 印张：20.5 字数：541千
1993年6月 第1版 第1次印刷
印数：1—2000册

ISBN7-113-01404-6/TN·60 定价：6.60元

前 言

本书的试用本于1982年由中国铁道出版社出版。根据国家教委制订的〈信号与系统课程教学基本要求〉(91年版)及近十年的教学实践的经验,我们对《信号与线性系统分析》试用教材进行了全面修订。修订后的教材保持了原试用版的体系和特色,在编排顺序上,先信号后系统,先时域后变换域,先连续后离散,先输入输出法后状态空间法。从整体选材上,我们兼顾了两种要求:一方面适合于国家教委高等学校工科电工教材编审委员会推荐的教学基本要求,力求阐述简明扼要,做到少而精;另一方面适应当前日益迅速发展的电子科学,适当反映新技术所涉及的基础理论,与试用版相比,本书有如下几个方面的修订:

(一)在信号分析方面,描述信号的方法从时域角度分析,不仅以确定信号为重点,也强调奇异信号的分析与应用。此外,适当介绍随机信号的一些基本概念,目的是使学生对信号分析有一个全面的观念。从变换域角度分析,除了频域、复频域、 z 域分析的经典内容外,对信号的拉普拉斯变换和 z 变换,还增加了双边变换。虽然双边变换在实际应用方面尚未广泛开拓,但这部分理论有利于读者对变换法的全面了解。

(二)在系统分析方面,删减了试用教材中一阶二阶系统响应的过细分析。在时域分析中强调连续系统的卷积法和离散系统的卷积法。在变换域分析中强调拉普拉斯法和 z 变换法。在系统分析中突出系统函数的核心应用。

(三)在离散时间系统分析方面,其内容组织采用与连续时间系统相对偶的方法,使读者对离散时间系统的变换域分析有一个全面的了解,从而掌握分析连续系统和离散系统的共性以及各自的特点。

(四) 状态空间法是一种既适于单输入单输出系统,更适于多输入多输出系统的近代分析法。在内容的组织方面,突出基本方法及其运用,并着重提出作为系统内部的三大特性——稳定性,可控性和可测性的基本概念。

本书内容可按 90~120 学时(包括实验和上机)教学。对加※号的某些章节,内容的取舍并不影响全书的连贯和完整,可针对学生和班级的不同水平,因材施教。

本书由北方交通大学朱钟霖教授主编,并与北方交通大学周宝珀副教授共同编写了第一、二、三、四、五、六、七、十章,北方交通大学王瑞英副教授编写了第八、九章。本书由上海铁道学院周大纲教授审阅了第一章至第十章,并负责全书的审阅工作;此外,北方交通大学吴湘淇教授审阅了第一、五、六、八、九章;北京理工大学李翰荪教授、北京邮电学院赫慈辉教授对本书初稿提出了综合性建议,北京师范大学裴留庆副教授通过本书试用版的教学实践,提供了许多建设性意见;上海铁道学院、兰州铁道学院、北京师范大学、北京理工大学、北京邮电学院以及北方交通大学等单位参加了本书 3 审稿会议,并提出了不少宝贵意见,在此我们一并表示诚挚的感谢。

编者

于北方交通大学

一九九一年六月

目 录

第一章 信号与系统分析导论	(1)
第一节 信号的分类和特性.....	(1)
第二节 系统的分类和特性.....	(7)
第三节 信号与系统分析概述	(16)
习 题	(18)
第二章 连续时间信号的时域分析	(22)
第一节 确定信号的时域描述	(22)
一、普通信号的时域描述	(22)
二、奇异信号的时域描述	(25)
第二节 确定信号的时域运算	(33)
一、普通信号的展缩、平移和翻转	(33)
二、普通信号的叠加、相乘、微分和积分	(38)
三、冲激信号的性质与运算	(41)
四、冲激偶信号的性质与运算	(45)
第三节 确定信号的时域分解	(48)
一、信号分解为直流分量与交流分量	(48)
二、信号分解为偶分量与奇分量	(49)
三、信号分解为实部分量与虚部分量	(50)
四、信号分解为冲激信号序列	(51)
五、信号分解为正交信号集	(51)
习 题	(56)
第三章 连续时间系统的时域分析	(61)
第一节 确定信号通过系统的时域分析	(61)
一、经典时域分析方法	(61)
二、系统的零输入响应	(68)

三、系统的冲激响应	(70)
四、系统的零状态响应	(76)
第二节 卷积积分的计算	(82)
一、脉冲波形的卷积积分	(82)
二、任意波形的卷积积分	(84)
三、卷积积分的代数性质	(89)
四、奇异信号的卷积积分	(92)
※第三节 随机信号通过系统的时域分析.....	(100)
一、随机信号的基本概念.....	(100)
二、平稳随机信号的统计特征.....	(104)
三、平稳随机信号的遍历特性.....	(108)
四、随机信号通过系统的统计特征.....	(112)
习 题.....	(117)
第四章 连续时间信号的频域分析.....	(125)
第一节 周期信号的频谱分析.....	(125)
一、周期信号的傅里叶级数展开式.....	(125)
二、周期信号的对称性质.....	(129)
三、周期信号傅里叶级数展开式的其他形式.....	(135)
四、周期信号的频谱.....	(139)
第二节 非周期信号的频谱分析.....	(146)
一、非周期信号的傅里叶积分变换式.....	(146)
二、典型信号的频谱函数.....	(151)
第三节 频谱函数的基本特性.....	(161)
一、频谱函数的奇偶特性.....	(161)
二、频谱函数的变换特性.....	(163)
三、非周期信号的能量频谱.....	(177)
习 题.....	(179)
第五章 连续时间系统的频域分析.....	(187)
第一节 系统响应的频域分析.....	(187)
一、系统特性的频域表示.....	(187)

二、任意信号激励下的系统响应·····	(190)
三、周期信号激励下的系统响应·····	(193)
第二节 理想滤波器与实际滤波器·····	(196)
一、无失真传输系统·····	(196)
二、理想低通滤波器·····	(198)
三、实际低通滤波器·····	(203)
第三节 调制原理与频分复用·····	(206)
一、信号的调制·····	(206)
二、信号的解调·····	(208)
三、频分复用通信·····	(210)
※第四节 随机信号通过系统的频域分析·····	(212)
一、随机信号的功率谱密度函数·····	(212)
二、功率谱密度与自相关函数·····	(215)
三、随机信号通过系统的功率谱特征·····	(218)
习 题·····	(221)
第六章 连续时间系统的复频域分析 ·····	(227)
第一节 单边拉普拉斯变换·····	(227)
一、单边拉普拉斯变换及其收敛条件·····	(227)
二、常用信号的拉普拉斯变换·····	(232)
三、拉普拉斯变换和傅里叶变换之间的关系·····	(236)
四、拉普拉斯变换的性质·····	(239)
五、拉普拉斯反变换·····	(253)
※第二节 双边拉普拉斯变换·····	(263)
一、双边拉普拉斯变换及其收敛条件·····	(263)
二、双边拉普拉斯变换的性质·····	(269)
三、双边拉普拉斯反变换·····	(271)
第三节 系统响应的复频域分析·····	(279)
一、应用拉普拉斯变换法分析系统·····	(279)
二、系统函数与复频域分析法·····	(285)
三、关于系统函数的计算·····	(289)

四、激励为复指数信号时系统响应的特点	298
习 题	302
第七章 连续时间系统函数与系统特性	310
第一节 系统函数的零极点特性	310
一、系统的固有频率	310
二、零极点与冲激响应	314
三、零极点与系统频响特性	319
第二节 系统的信号流图与系统模拟	330
一、系统的联结	330
二、系统的信号流图	338
三、系统模拟	345
第三节 系统的稳定性分析	352
一、系统的因果性和稳定性	352
※二、系统稳定性的判据	358
习 题	373
第八章 离散时间信号与系统的时域分析	382
第一节 离散时间信号的时域分析	382
一、离散时间信号的时域描述	382
二、序列的变换和运算	384
三、序列的卷积和	392
四、常用基本序列及其特性	397
第二节 离散时间系统的时域分析	406
一、线性非时变离散系统的特性及其描述	406
二、线性常系数差分方程的求解	410
三、离散时间系统响应的时域分析	416
第三节 连续时间信号的离散化	430
一、取样信号及其频谱	431
二、取样定理	433
三、取样的实际问题	435
四、时分复用	437

习 题	(439)
第九章 离散时间信号和系统的变换域分析	(448)
第一节 离散时间信号与系统的频域分析	(448)
一、线性非时变离散系统对复指数序列的响应	(448)
※二、周期序列的傅里叶级数 (DFS)	(450)
三、非周期序列的傅里叶变换 (DTFT)	(457)
四、离散时间系统的频域分析	(469)
※五、几种傅里叶变换之间的对偶关系	(471)
※六、离散傅里叶变换 (DFT)	(474)
第二节 离散时间信号与系统的 z 域分析	(476)
一、序列的单边 z 变换	(476)
※二、序列的双边 z 变换	(494)
三、 z 变换与 DTFT、DFT 以及拉普拉斯变换之间的关系	(500)
四、离散时间系统响应的 z 域分析法	(504)
五、系统函数 $H(z)$ 与系统特性	(510)
第三节 离散时间系统的结构与实现	(517)
一、离散时间系统的结构与实现	(517)
二、连续时间系统的离散化处理	(522)
习 题	(532)
第十章 系统的状态空间分析	(543)
第一节 系统的状态方程	(543)
一、状态方程的建立方法	(543)
二、状态方程的普遍形式	(549)
三、状态方程的规范型实现	(553)
第二节 系统的状态方程解	(570)
一、线性非时变连续状态方程式解	(571)
二、线性非时变离散状态方程式解	(576)
三、线性时变状态方程式解	(582)
※第三节 系统的可控性和可测性	(583)

一、系统的可控性.....	(583)
二、系统的可测性.....	(590)
三、系统可控和可测的充要条件.....	(594)
习 题.....	(603)
习题答案.....	(613)
参考书目.....	(641)

第一章 信号与系统分析导论

在电子技术领域中，信号与系统是不可分割的整体。随着近代科技的发展，信号与系统的规模日趋复杂，从而促使信号与系统理论得到了进一步的完善和发展。本章作为全书的开始，将首先讨论信号与系统的一般定义、分类及其特性，然后对信号与系统的分析方法做概括性的简介，以便为学习全书奠定基础。

第一节 信号的分类和特性

什么是信号？“信号”一词在人们的日常生活与社会活动中有着广泛的含义。严格地说，所谓信号，是指消息的表现形式与传送载体。我们一般将主观感受到的语言、文字、数据或图像等统称为消息，而将消息之中赋予人们的新知识与新概念称为信息。这就是说，消息与信息有所不同。信息是包含在消息之中的新内容，即人们原来不知道或不确定的事物。我们知道，消息一般都不能直接传送，而必须借助于某种物理量作为运载手段。例如通过声、光、电等物理量的变化来表示和传送消息。这些物理量的变化就是信号。因此，信号是消息的表现形式和传送的载体，消息是信号的实际内容。传送消息，一般都要先将消息转换成信号，然后将信号由发送端传至接收端，最后再将信号还原成消息。我们的祖先以烽火台上的火光表示敌人的入侵并传送数百里，就是早期的一种信号。

在可以作为信号的众多物理量中，电是应用最广的物理量。因为电比较容易产生和控制，也容易实现与非电量的相互转换。本书只讨论电信号，以下即简称为信号。

信号的分类方法有很多。可以由不同的角度对信号进行分类，

例如按照信号的实际用途划分，信号可分为广播信号、电视信号、雷达信号、控制信号、通信信号、遥感信号等等。在信号与系统分析中，我们常以信号所具有的时间函数特性加以分类。这样，信号可分为确定信号与随机信号；连续时间信号与离散时间信号；周期信号与非周期信号；能量信号与功率信号等。下面分别说明上述各种信号的定义和特性。

一、确定信号与随机信号

按照时间函数的确定性划分，信号可分为确定信号与随机信号。

确定信号是指能够以确定的时间函数表示或分段表示的信号。图 1-1(a) 就是确定信号的一个例子，称为信号波形。由于

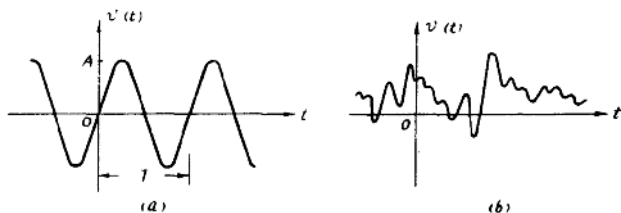


图 1-1 信号波形

确定信号可以由确定的时间函数表示，图 1-1 (a) 波形的数学表示式为

$$v(t) = A \sin \omega_0 t (\text{V}), \omega_0 = \frac{2\pi}{T}, -\infty < t < \infty \quad (1-1)$$

从而，可以知道信号在任意时刻的数值。

随机信号又称为不确定信号。“随机”一词具有不可预测的涵义。随机信号无法以确定的时间函数描述，也无法根据历史的记录准确地预测其未来的情况。图 1-1(b) 就是随机信号的一个例子，图示为其部分波形的记录。

严格地说，确定信号仅是理论的抽象，生活与生产实践中的

很多信号都是随机信号。以通信传输来说，如果传送的信号都是确定信号，受信者就不能得到更多的信息，从而也就失去了通信传输的意义。此外，象电视中的图像信号、通信设备中的噪声信号、雷达检测的输出信号以及人体中的生物信号等也都是随机信号。

由于随机信号是客观存在的，因此，随机信号的分析与研究对于认识自然界的客观规律具有重要的意义。虽然随机信号是不确定的，但是在一定条件下，某些随机信号的统计特征却是确定的函数。这样就可以建立相应的近似数学模型，从而掌握或预测随机信号的变化趋势。本书着重讨论确定信号。为了较全面地认识客观信号的各种形态与机制，本书第三章与第五章，也适当地介绍一些有关随机信号的基本概念。

二、连续时间信号与离散时间信号

按照时间函数的连续性划分，信号可分为连续时间信号与离散时间信号。

连续时间信号是指在信号的时间定义域内，任意时刻都具有确定数值的信号。本书以 $f(t)$ 表示。图 1-2 就是连续时间信号的两个例子。两个信号的时间定义域均为 $-\infty < t < \infty$ ，但信号 $f_2(t)$ 在 $t < -1$ 及 $t > 2$ 区域内的取值为零。因此，两个信号在定义域中的任意时刻都有确定的函数值（包括零值）。

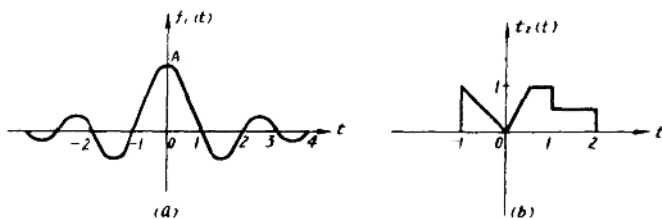


图 1-2 连续时间信号

量，这样的离散时间信号称为数字信号。与数字信号相对应的称为模拟信号，这是指未经幅度量化的连续时间信号，即时间坐标与幅度坐标均为连续量的信号。离散时间信号的最大特点是可以由一组数字序列表示信号，这无疑有利于计算机的输入，因而得到了广泛的应用。

三、周期信号与非周期信号

按照时间函数的周期性划分，信号可分为周期信号与非周期信号。

周期信号，是依时间周而复始的信号。连续时间周期信号与离散时间周期信号的数字表示式应当分别满足

$$f(t) = f(t + nT), n = \pm 1, \pm 2, \dots, -\infty < t < \infty \quad (1-2)$$

或

$$f[k] = f[k + nN], n = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1-3)$$

式中 T, N 分别称为信号周期。图 1-1 (a) 与 1-3 (a) 所示都是周期信号。显然，只要给出周期信号在一个周期内的变化过程，就可知道信号在任意时刻的数值。因此，就传送消息而言，周期信号是不经济的，因为除第一个周期以外，信号不再含有任何信息。但是，由于周期信号易于产生、描述和分析，又是常用的测试信号源，因此仍占有重要的地位。

非周期信号就是不具有周期的信号。图 1-2 (a)、(b) 与图 1-3 (b) 所示都是非周期的信号的例子。

还有一种信号介于周期信号与非周期信号之间，称为概周期信号或近似周期信号。一般是指没有精确的周期而只存在近似周期的信号。例如

$$f(t) = \cos t + \cos \sqrt{2}t, -\infty < t < \infty \quad (1-4)$$

信号 $f(t)$ 由两个周期信号叠加组成，两个周期信号的周期分别为 2π 与 $2\pi/\sqrt{2}$ 。由于 π 与 $\sqrt{2}$ 都是无理数， $f(t)$ 不存在最小的公倍周期，因而不是周期信号。但是，如果取 $\pi \approx 3.1$ ， $\sqrt{2} \approx 1.4$ ，则 $f(t)$ 的最小公倍周期近似为 $10\pi = 31$ (s)；若取 $\pi \approx 3.1$ ， $\sqrt{2}$

≈ 1.41 , 则 $f(t)$ 的近似周期为 $200\pi = 620$ (s)。这样 $f(t)$ 就可看作周期信号。因此, 概周期信号是具有近似周期的信号, 其近似周期是所含全部周期信号的近似最小公倍周期。

四、能量信号与功率信号

按照时间函数的可积性划分, 信号可分为能量信号与功率信号。

我们知道, 信号可看作是随时间变化的电压或电流。这样, 如果将信号 $f(t)$ 通过一个 1 欧的电阻, 则信号在时间间隔 $-T \leq t \leq T$ 内所消耗的能量称为归一化能量, 应为

$$W = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (\text{J}) \quad (1-5)$$

同样, 信号在上述时间间隔内的平均功率称为归一化功率, 应为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (\text{W}) \quad (1-6)$$

对于给定的信号, 若其归一化能量为有限值, 而其归一化功率为零, 即 $0 < W < \infty, P = 0$, 则称此信号为能量信号; 若信号的归一化功率为有限值, 而其归一化能量趋于无穷, 即 $0 < P < \infty, W \rightarrow \infty$, 则称此信号为功率信号。例如, 图 1-2(b) 所示的信号就是能量信号; 直流信号和周期信号都是功率信号。信号可以既不是能量信号, 也不是功率信号, 但不可能既是能量信号, 又是功率信号。

以上定义也适用于离散时间信号, 这时信号的归一化能量与归一化功率分别定义为

$$W = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{-N}^N f^2[k] \quad (\text{J}) \quad (1-7)$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{-N}^N f^2[k] \quad (\text{W}) \quad (1-8)$$

下面举例予以说明。

〔例 1-1〕 试判断下列信号属于能量信号还是功率信号。