

高等学校教材

信号与线性系统

上册

管致中 夏恭恪 编

高等教育出版社

高等学校教材

信号与线性系统

上册

管致中 夏恭恪 编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是在管致中、沙玉钧、夏恭格编《电路、信号与系统》一书下册的基础上，根据教育部工科电工教材编审委员会审订的《信号与系统》课程的教学大纲改编而成。全书按照由时域分析到变换域分析、由连续时间系统到离散时间系统、由系统的输入输出方程表示法到状态变量方程表示法这样的顺序安排。全书共九章。上册一至四章，包括绪论、连续时间系统的时域分析、信号分析和连续时间系统的频域分析；下册共分五章，包括连续时间系统的复频域分析、系统函数、离散时间系统的时域分析、离散时间系统的变换域分析，最后讨论线性系统的状态变量分析。配合正文，精选了适当的例题和习题。

本书可作为四年制无线电技术类专业“信号与线性系统”课程的教材，也可供有关科技人员参考。

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日，上级同意恢复“高等教育出版社”。本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

高等学校教材

信号与线性系统

上 册

管致中 夏恭格 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

荆州新华印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张7.625 字数180,000

1982年6月第2版 1984年2月第2次印刷

印数16,091—29,100

书号15010·0456 定价0.83元

前 言

《信号与线性系统》是无线电技术专业的主要技术基础课之一。我们曾一度将此课与电路分析课合并成一课，由于两课程的内容密切相关，这样安排对于统一处理教学内容是有好处的。但是这样一个大课学时过多，在教学计划中安排不便，并且这两部份内容，不少院校是由两个教研组分别开课的；另外也有人主张有关信号与系统方面的理论推迟到高年级学习可能更为有利。所以，在一九八零年春修订的无线电技术专业参考性教学计划中，把这门大课分成为两课。同年六月，在高等学校工科电工教材编审委员会电路理论及信号分析编审小组的会议上，审订了《信号与系统》课程的教学大纲。本书就是根据这个教学大纲对原来我们编写的《电路，信号与系统》的下册重新进行改编而成的。

在教材体系的处理上，本书按照由时域分析到变换域分析、由连续时间系统到离散时间系统、由系统的输入-输出方程表示法到状态变量方程表示法这样的顺序安排，以便将一些基本分析方法和基本概念逐步引出，逐步巩固，逐步扩大，使学生较易接受。在本书第一章绪论中，对于信号和系统的概念以及系统分析方法的特点作了一般介绍。第二章是以卷积法为主要内容的连续时间系统的时域分析法。第三章信号分析，先讨论信号表示为正交函数集的一般方法，然后着重研究了信号的频谱特性。第四章则根据信号的频谱特性和系统的频率特性，很自然地引出了连续时间系统的频域分析法。第五章再把频域的概念推广到复频域，得到了用拉普拉斯变换来分析连续时间系统的复频域分析法。鉴于由复频域分析中引出的转移函数的重要意义，特以第六章一章来讨论连续

时间系统的特性与转移函数的关系。在对连续时间系统的分析作了全面介绍后,第七、第八两章转而介绍离散时间系统的分析。第七章先讨论离散信号的特性及离散时间系统的描述法,然后研究离散时间系统的时域分析法。第八章是离散时间系统的变换域分析,主要是 Z 变换法,也简要介绍了离散傅里叶变换的概念。最后第九章,介绍了系统在状态空间中的描述法,再用和前面所述的解输入-输出方程相对比的方法,介绍了连续时间系统和离散时间系统的状态方程的变换域解法和时域解法。

和原来我们编写的《电路、信号与系统》一书下册比较,本书有较大的改动。已调波的频谱分析主要应用于通信系统及电路中,可在其它有关课程中去学习,因此在本课程中予以删去。这样,本书的体系也显得更加合理了。书中强调了转移函数的概念。为适应数字技术发展的需要,把离散时间系统提高到与连续时间系统并重的地位。此外,还增加了一些新内容,包括沃尔什函数,根轨迹,数字滤波器,离散傅里叶变换,线性时变系统与非线性系统的状态方程解法,等等。至于根据我们在教学实践中遇到的问题以及兄弟院校提出的建议而作的增删和修改,包括习题的重新选编就更多了,这里不再一一列举。由于本课程是一技术基础课,学生应当通过本课程的教学集中力量学好有关的基本理论和基本分析方法。所以,和《电路、信号与系统》下册一样,本书不可能也不应当把信号与系统方面的内容包罗无遗。例如随机信号、反馈系统、综合理论等内容,本书基本上均未涉及,留到高年级必修课和选修课中去学习。

当前,我国高等学校教学中存在的较普遍的问题之一是课堂灌输偏多,对于学生自己去掌握知识的积极性则发挥得不够。我们不主张在使用本教材时教师要逐章逐节地依次在课堂上讲一遍。在符合教学大纲基本要求的前提下,教师完全可以根据自己

的经验和观点在诸如内容的取舍上、讲解的次序上以及阐明问题的方法上,采取不同的做法,而不必过多地受教材的约束。目前,最好要减少一点讲课时数,留一部分内容让学生自学,以培养学生独立学习的能力。还要告诉学生,学习一门课程不要只读一本教科书,应当尽量读点参考书,以便开阔思路,学得更活。

本书除第四、五两章外均由管致中同志编写,第四、五章由夏恭恪同志编写,全部习题由华似韵同志选编,教研组内还有一些同志对本书初稿提出了建议并参加了出版的辅助工作。

本教材初稿经清华大学常迥教授审阅。郑君里同志也看过书稿。他们都提出了一些宝贵的修改意见。对于我们原编写的教材《电路、信号与系统》,合肥工业大学芮坤生教授以及其他兄弟院校同志曾提出了宝贵的修改建议。这些意见对本书的改编帮助很大,在此我们谨向上述院校的同志们致以衷心的感谢。

由于我们学识水平有限或工作中的疏忽,本书仍可能留有错误或不妥之处。欢迎读者继续提出意见,寄交人民教育出版社或直接寄给我们,以便今后进一步修改。

编 者

一九八一年十二月于南京工学院

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 信号传输系统	1
§ 1.2 信号的概念	3
§ 1.3 系统的概念	8
§ 1.4 线性非时变系统的分析	12
§ 1.5 非电系统的分析	15
习题	20
第二章 连续时间系统的时域分析	24
§ 2.1 引言	24
§ 2.2 系统方程的算子表示法	29
§ 2.3 系统的零输入响应	32
§ 2.4 奇异函数	39
§ 2.5 信号的时域分解	46
§ 2.6 阶跃响应和冲激响应	52
§ 2.7 迭加积分	60
§ 2.8 卷积及其性质	67
§ 2.9 线性系统响应的时域求解	76
§ 2.10 系统响应的数值计算法	88
习题	92
第三章 信号分析	102
§ 3.1 引言	102
§ 3.2 信号表示为正交函数集	103
§ 3.3 信号表示为傅里叶级数	112
§ 3.4 周期信号的频谱	125
§ 3.5 非周期信号的频谱	133
§ 3.6 常用信号频谱函数举例	142

§ 3.7	傅里叶变换的性质——信号的时域特性和 频域特性间的关系	153
§ 3.8	帕色伐尔定理与能量频谱	166
§ 3.9	调幅波及其频谱	171
§ 3.10	沃尔什函数	183
	习题	193
第四章	连续时间系统的频域分析	202
§ 4.1	引言	202
§ 4.2	非正弦周期信号通过线性电路的稳态分析	204
§ 4.3	调幅信号通过谐振电路的稳态分析	210
§ 4.4	有始信号通过线性电路的瞬态分析	217
§ 4.5	阶跃信号通过理想低通滤波器	220
§ 4.6	信号通过线性系统不产生失真的条件	226
	习题	232

第一章 绪 论

§ 1.1 信号传输系统

无线电技术最早开始于利用电磁波传输信息的无线电通信,以后逐步扩大并发展成为现在的通信、自动控制、电子器件、计算机等学科。到今天可以说,上至天文、下至地理,大到宇宙空间、小到核子粒子等的研究,以及从工农业生产,直到社会、家庭生活,没有一处能脱离这些学科的应用。这种发展和应用,虽然头绪纷繁,但其中一个主要任务,是要解决信息传输的问题,也就是将带有信息的信号,通过某种系统由发送者传送给接收者;并且为了完成这种信息传递的任务,有时需要将信号进行相应的变换和处理。

人们在互相传告某种事件时,是在互相传递着相应的信息。信息要用某种物理方式表达出来,例如可以用语言、文字或图画来表达,还可以用收、发双方事先约定的编码来表达。这些语言、文字、图画、编码等等,分别是按一定规则组织起来因而含有了信息的一组一组的约定的符号,这种用约定方式组成的符号统称为消息。消息一般并不便于直接传输,所以要利用一些转换设备,把各种不同的消息转变成为便于传输的电的信号。电信号常常是随着时间变化的电压或电流等电的量,这种变化是与语言的声音变化或者图画的色光变化等相对应的。这样变化着的电压或电流,分别构成了代表声音、图象和编码等消息的信号,因而信号中也就包含了消息中所含有的信息。所以,带有信息的信号是信息传输技术的工作对象。

信号的传输和处理，要由用许多不同功能的单元组织起来的一个复杂系统来完成。从广泛的意义上说，一切信息的传输过程都可以看成是通信，一切完成信息传输任务的系统都是通信系统，例如电报、电话、电视、雷达、导航等系统均属之。以一个电视系统来说，在这系统中，所要传输的信息包含在一些配有声音的画面之中。在传输这些画面时，先要利用电视摄象机把画面的光线色彩转变成图象信号，并利用话筒把声音转变成伴音信号，这些就是电视要传输的带有信息的原始信号。然后，把这些信号送入电视发射机，发射机能够产生一种反映上述信号变化的便于传播的高频电信号。最后，由天线将这高频电信号转换为电磁波发射出去，在空间传播。电视接收者用接收天线截获了电磁波的一小部分能量，把它转变成为高频电信号送入电视接收机。接收机的作用正好和发射机相反，它能从送入的高频电信号中恢复出原来的图象信号与伴音信号，并把这两种信号分别送到显象管和喇叭，使接收者能看到传输的画面，还听到配有的伴音。这个过程，可以用一个简明的方框图表示，如图 1-1 所示。这个图表示了一般通信系统的组成，



图 1-1 通信系统的组成

其中转换器指的是把消息转换为电信号或者反过来把电信号还原成消息的装置，如摄象管和显象管、话筒和喇叭之类。因为这些装置同时完成了从一种形式的能量转换为另一种形式的能量的工作，所以也常称之为换能器。信道指的是信号传输的通道，在有线电话中它是一对导线；在利用电磁波传播的无线电通信系统中，它可以是空间、卫星通信中的人造卫星，也可以是波导或同轴电缆；在近来发展的光通信中，则是光导纤维。如果理解得更加广泛一

点,发射机和接收机也可以看成是信号的通道,因此有时也称它们为信道机。所以一个通信系统的工作,主要是包括消息到信号的转换、信号的处理和信号的传输。

无线电技术工作的任务,是要保证通过信道传输后的输出信号能够尽量保持输入信号的原来样子或达到某种需要的变换。无线电技术工作者就要为完成这样的任务而去研究信号的特性、系统的分析方法、实现系统各组成部分的具体电路以及这些电路对于通过的信号产生何种影响等问题。

除了通信系统以外,还有其他各种无线电电子学的系统,例如自动控制系统就是其中之一。这些系统的组成部分与通信系统的组成不一样,但是它们的功能一般仍是信号的处理、传输、比较等等。

由以上简略的叙述可以看出,对于无线电技术工作者,信号和系统的基本分析方法以及它们的基本特性是必须具备的知识,本课程就是为研究这方面的基本理论而设置的。在本章下面几节中将分别对于信号、系统、系统分析等问题介绍一点一般概念,以便后面逐章进行详细讨论。

§1.2 信号的概念

在信号传输系统中,传输的主体是信号,系统所包含的各种电路、设备则是为实施这种传输的各种手段。因此,电路、设备的设计和制造的要求,必然要取决于信号的特性。随着欲待传输的信号日益复杂,相应地,信号传输系统中的元器件、电路、设备和结构等等也日益复杂。这就是信号分析具有重要意义的原因。

广义地说,信号是随着时间变化的某种物理量。只有变化的量中,才可能含有信息。电信号是随着时间变化的电的量,它们通常是电压或电流,在某些情况下,也可以是电荷或磁通。

信号表示为一个时间的函数,所以在信号分析中,信号和函数二词常相通用。当信号是一确定的时间函数时,给定某一时间值,就可以确定一相应的函数值。这样的信号是确定信号。但是,带有信息的信号往往具有不可预知的不确定性,它们是一种随机信号。随机信号不是一个确定的时间函数,当给定某一时间值时,其函数值并不确定,而只知道此信号取某一数值的概率。严格地说,除了实验室发生的有规律的信号外,一般的信号都是随机的。因为对于接收者来说,信号如果是完全确定了的时间函数,就不可能由它得到任何新的信息,因而也就失去了传输信号的目的。但是,对于确定信号的分析仍然具有重要意义,因为有些实际信号与确定信号有相近的特性。例如,乐音在一定时间内近似于周期信号。从这一意义上来说,确定信号是一种近似的、理想化了了的信号,作这样的处理,能够使问题分析大为简化,以便于工程上的实际应用。在信号传输过程中,除了人们所需要的带有信息的信号外,同时也还会夹杂着如象噪声、干扰等人们所不需要的信号,它们大都带有更大的随机性质。本书将只对确定信号进行分析,至于随机过程,留待后续课程中去讨论。

信号表示为确定的时间函数,如果在某一时间间隔内,对于一切时间值,除了若干不连续点外,该函数都给出确定的函数值,这信号就称为连续信号。如图 1-2(a)、(b) 所示的两个函数,都是在

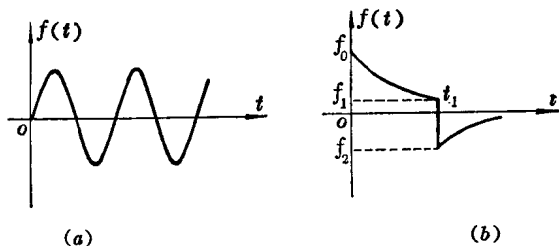


图 1-2 连续信号

时间间隔 $-\infty < t < \infty$ 内的连续信号, 只是在 $t < 0$ 的范围内, 两者的信号值均为零。这里 $t = 0$ 是一个任意选取的起计时间的参考点。这种在 $t < 0$ 时其值为零的函数, 称为有始函数*。可注意的是, 连续信号中可以包含有不连续点。如图 1-2(b) 中所示函数 $f(t)$, 在 $t = 0$ 和 $t = t_1$ 处是不连续的, 因在该两点处

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} f(t + \epsilon) \neq \lim_{\epsilon \rightarrow 0} f(t - \epsilon)$$

实际上, 所谓连续信号是指它的时间变量 t 是连续的。因此, 为了更加确切, 也常把这种信号称做连续时间信号。若用 $f(t_0^+)$ 表示 $\lim_{\epsilon \rightarrow 0} f(t_0 + \epsilon)$, 用 $f(t_0^-)$ 表示 $\lim_{\epsilon \rightarrow 0} f(t_0 - \epsilon)$, 则 $f(t_0^+) - f(t_0^-)$ 称为在 $t = t_0$ 处的不连续值。显然, 图 1-2(b) 中信号在 $t = 0$ 处的不连续值是 f_0 , 这是一正值; 在 $t = t_1$ 处的不连续值是 $f_2 - f_1$, 是一负值。

和连续信号相对应的是离散信号。代表离散信号的时间函数只在某些不连续的时间值上给定函数值, 如图 1-3 所示。图中函数

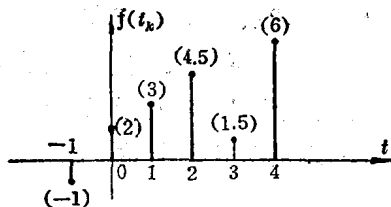


图 1-3 离散信号

$f(t_k)$ 只在 $t_k = -1, 0, 1, 2, 3$ 等等离散的時刻给出函数值 (图中括号内的数值)。所以, 所谓离散信号, 实际上指的是它的时间变量 t 取离散值 t_k , 因而这种信号也常称为离散时间信号。当 $t_k < 0$ 时, 如果函数值 $f(t_k)$ 均为零, 则这种离散时间函数也是有始的。离散

* causal function 通常译为“因果函数”, 但“因果”一词不能确切地表示在 $t < 0$ 时它的值为零的意义, 故本书中称之为“有始函数”。

时间信号可以在均匀的时间间隔上给出函数值，也可以在不均匀的时间间隔上给出函数值，但一般都采用均匀间隔。

用确定的时间函数表示的信号，又可分为周期信号和非周期信号。对于周期性和非周期性的意义，是大家都熟悉的，这里不再赘述。严格的数学意义的周期信号，是无始无终地重复着某一变化规律的信号。当然，这样的信号实际上是不存在的，所谓周期信号只是指在较长时间内按照某一规律重复变化的信号。

信号还可以用它的能量特点来加以区分。在一定的时间间隔里，把信号施加在一负载上，负载中就消耗一定的信号能量。把这能量值对于时间间隔取平均，即得在此时间内信号的平均功率。现在，如果将时间间隔无限趋大，则一般信号均将属于下述两种情况之一：或者信号总能量为有限值而信号平均功率为零；或者信号平均功率为有限值而信号总能量为无限大。属于前一种情况的信号称为能量信号，因为它们只能从能量去加以考察，而无法从平均功率去考察；属于后一种情况的信号称为功率信号，对于它们，总能量就没有意义，因而只能从功率去加以考察。由直观不难理解，在时间间隔无限趋大的情况下，周期信号都是功率信号；只存在于有限时间内的信号是能量信号；存在于无限时间内的非周期信号可以是能量信号，也可以是功率信号，这要根据信号是何种函数而定。

表示确定信号的时间函数，包含了信号的全部信息量。所以信号的特性首先表现为它的时间特性。信号的时间特性主要是指信号随时间变化快慢的特性。所谓变化的快慢，一方面的意义是同一形状的波形重复出现的周期短或长；另一方面的意义是信号波形本身的变化速率。图 1-4 表示一个周期性的脉冲信号，这个信号对时间变化的快慢，一方面由它的重复周期 T 表现出来，另一方面由脉冲的持续时间 τ 以及脉冲上升和下降边沿陡直的程度表现

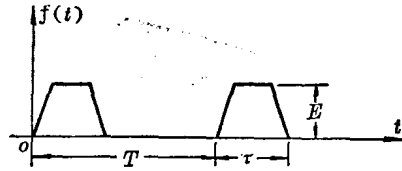


图 1-4 周期性脉冲信号

出来。当然,信号作为一个时间函数,除了变化速率外,还可有其它的特性,例如图中的脉冲幅度 E 的大小之类。

除了时间特性外,信号还具有频率特性。如以后将要详细讨论的,对于一个复杂信号,可以用傅里叶分析法把它分解为许多不同频率的正弦分量,而每一正弦分量则以它的振幅和相位来表征。各个正弦分量可以将其振幅和相位分别按频率高低依次排列成频谱。这样的频谱,同样也包含了信号的全部信息量。复杂信号频谱中各分量的频率,理论上说可以扩展至无限,但是由于原始信号的能量一般均集中在频率较低的范围,高于某一频率的分量,在工程实用上可以忽略不计。这样,每一信号的频谱都有一个有效的频率范围,这个范围称为信号的频带。

信号的频谱和信号的时间函数既然都包含了信号所带有的全部信息量,都能表示出信号的特点,那么信号的时间特性和频率特性之间,就不可能互不相关、互相独立,而必然具有密切的联系。例如,在图 1-4 中,重复周期 T 的倒数就是这周期性脉冲信号的基波频率,周期的大或小分别对应着低的或高的基波和谐波频率。同时,脉冲持续时间 τ 和边沿的陡度决定着脉冲中的能量向高频方向分布的程度,也就是决定着信号的频带宽度。有关信号的这些特性,将在第三章中作进一步研究。

§ 1.3 系统的概念

所谓系统，当然不限于前面所说的通信系统、自动控制系统，它也包括诸如机械系统、化工系统之类的其他物理系统，还包括象生产管理、交通运输等社会经济方面的系统。从一般的意义上说，系统是一个由若干互有关联的单元组成的并用来达到某些特定目的的有机整体。例如，它的组成单元可以是一些巨大的机器设备，甚至把参加工作的人也包括进去，这些单元组织成为一个庞大的体系去完成某种极其复杂的任务；简单的组成单元也可以仅仅是一些电阻、电容元件，把它们联结起来成为具有某种简单功能的电路。这些单元及其组成的体系也可以是非物理实体。所以系统的意义十分广泛。

无线电电子学中的系统，常常是各种不同复杂程度的用作信号传输与处理的组合体。通常的概念，一般是把系统看成比电路更为复杂、规模更大的组合。但实际上却很难从复杂程度或规模大小来确切地区分什么是电路，什么是系统，这两者的区别毋宁说是观点上、处理问题的角度上的差别。电路的观点，着重在电路中各支路或回路的电流及各节点的电压上；而系统的观点，则着重在输入输出间的关系或者运算功能上。因此一个 RC 电路也可以认为是一个初级的信号处理系统，它在一定的条件下具有微分或积分的运算功能。在信号传输技术中，一般都是用系统的观点去分析问题的。

系统的功能，可以用图 1-5 的方框图来表示。图中的方框代



图 1-5 系统的方框图

表某种系统； $e(t)$ 是输入信号的函数，称为激励； $r(t)$ 是输出信号的函数，称为响应。这里所示的是单输入单输出的系统，复杂的系统可以是多个输入和多个输出的。系统的功能和特性就是通过由怎样的激励产生怎样的响应来体现。不同的系统具有各种不同的特性。但是实际可以实现的系统，都必须具有共同的因果性，或者说都必须遵从因果律。一切物理现象，都要满足先有原因然后产生结果这样一个显而易见的因果关系，结果不能早于原因而出现。对于一个系统，激励是原因，响应是结果，响应不可能出现于施加激励之前。所以响应先于激励的系统是制造不出来的，也就是在物理上是不可实现的。

系统按其特性可以分为线性系统和非线性系统两类。一般说，线性系统是由线性元件组成的系统，非线性系统则是含有非线性元件的系统。但是，有的非线性元件的系统在一定的工作条件下，也可以看成是一线性系统。所以，对于线性系统应该由它的特性来规定其确切的含义。所谓线性系统是同时具有齐次性和迭加性的系统。齐次性表示，当输入激励改变为原来的 k 倍时，输出响应也相应地改变为原来的 k 倍，这里 k 为任意常数。即如果由激励 $e(t)$ 产生的系统的响应是 $r(t)$ ，则由激励 $ke(t)$ 产生的该系统的响应是 $kr(t)$ 。或者用符号表示为

$$\begin{array}{ll} \text{若} & e(t) \rightarrow r(t) \\ \text{则} & ke(t) \rightarrow kr(t) \end{array} \quad (1-1)$$

迭加性表示，当有几个激励同时作用于系统上时，系统的总响应等于各个激励分别作用于系统所产生的分量响应之和。如果 $r_1(t)$ 为系统在 $e_1(t)$ 单独作用时的响应， $r_2(t)$ 为同系统在 $e_2(t)$ 单独作用时的响应，则在激励 $e_1(t) + e_2(t)$ 作用时此系统的响应为 $r_1(t) + r_2(t)$ 。或者用符号表示为