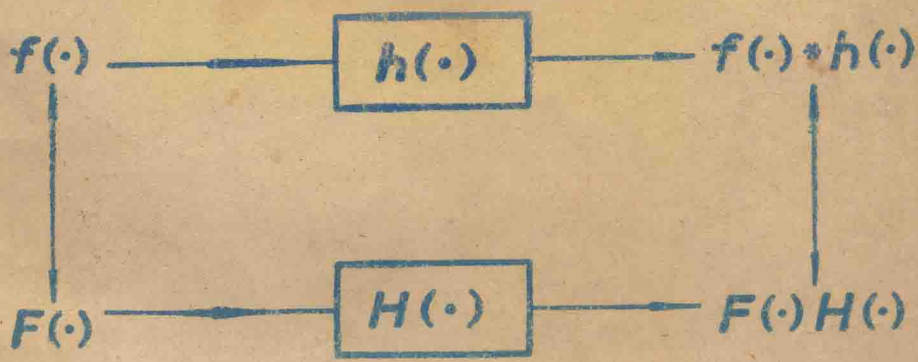
信号与系统分析

張有正 主編



信号与系统分析

張有正 主編

前　　言

本书是我们为前几届研究生和本科学生讲授《信号与系统》时的讲稿，经整理、充实而成。我们把1980年6月成都会议所审定的教学大纲的主要内容分为六章叙述。它们是：绪论、时域分析、频域分析、复频域分析、离散系统分析、系统的状态变量分析。除基本内容以外，在各章中还适当增添了以下内容：信号与系统的等效概念；用算子法计算卷积；用微分冲击法计算付氏变换和拉氏变换；极限条件下的付氏变换以及系统状态的可控性和可观察性，等等。此外，数字信号处理虽然已超出本课程的范围，但由于它的日趋重要性，为此，也简单介绍了它的一些基本知识。在讨论了付氏变换、拉氏变换和 z 变换以后，我们还阐述了这三种变换的内在联系。需要特别指出的是，在拉氏变换和 z 变换中，我们试图以双边变换为主，而单边变换只是作为它的特例加以叙述。

总学时仍按100学时考虑。

本书由张有正主持编写，并亲自写了第一章。参加编写工作的有张庆孚（二、三章），闵大鎰（四、五章），彭毅（六章）。全书经张有正反复审阅，修改定稿。由于时间仓促和水平有限，本书之缺点和謬误在所难免，恳请读者批评指正。

成电104教研室

1982年6月

目　录

第一章 緒　論

1.1 引　　言

信号和系统是两个相互联系而又互有区别的研究对象。信号是运载信息（如语言、音乐、图象、数据等）的工具，在数学上表示为一个(或多个)自变量的函数①。通常采用时间 t 作自变量（虽然它可能并不一定就代表时间），于是信号表示为 $f(t)$、$y(t)$ 等。系统则是产生、传输或处理信号的客观实体，如通信系统、雷达系统、计算机系统等，甚至一个城市、一个社会都可以看作系统。在数学上，常用表征其运动特性的数学模型来表示系统。例如用算符 L 表示系统。系统和系统之间通过信号来联系，信号则在系统之间及系统内部流通，系统和信号互相依存。有时，还可以将系统的概念加以推广，如把信号也看成某一特定的系统。今后会看到，这样的处理往往是非常有用的。

一个系统常常可分解为若干互相影响（作用）的**子系统**；另一方面，许多系统相互联系，它们合在一起又构成一个更大的系统。

可以用各种各样的方法对信号和系统进行分类。譬如，根据信号的物理属性不同，可以将信号分为电的、光的、声的、机械的等等；与之对应，把产生、传输和处理这些信号的系统也分为上述这些类型。也可以按用途不同，区分成为上述的通信系统、雷达系统，等等。但是，用数学模型来分类更为有利，这便于从理论上对信号和系统进行探索研究。譬如有些系统，不论它们是电的、机械的、声的或别的什么，外观和结构怎样千差万别，只要表达这些系统的数学模型相同，那末从本质上看，它们必然具有相同的动态特性。把这一数学方程送入电子计算机，再在不同的条件下求得其解答，这些解答就必然适合于上述任何一种系统。

对于一个只有单个输入和单个输出的简单系统，如果我们只需研究其外部特性，则可以用图 1.1—1 所示的方框图来表示。

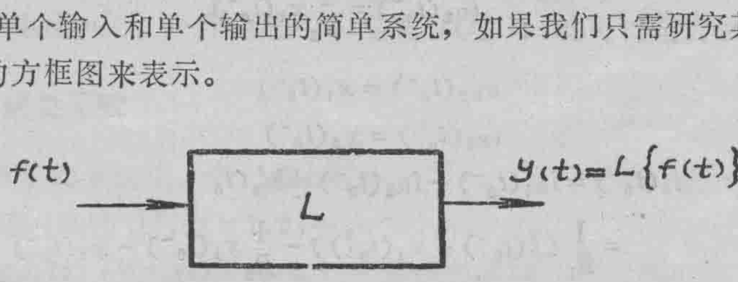


图1·1—1

其中 $f(t)$ 为输入（也称**激励**），$y(t)$ 为输出（也称**响应**），L 代表一种算符，也称转移算子，它把输入 $f(t)$ 通过一定方式的运算，变换成响应 $y(t)$ 即

$$y(t)=L\{f(t)\} \qquad t\geqslant t_0 \qquad (1\cdot1-1a)$$

这样，当已知 $f(t)$ 及 L 后，便可以由式（1·1－1），求出从某一感兴趣的时刻 t_0 开始的系统的响应来。

容易理解，要求给出 t 以前全部时间里，即（$-\infty,t$），作用于系统的输入可能是不现

① 本书只研究一維信号，即只有一个自变量的信号。

实的。一个可行的方案是给出 $t \geqslant t_0$ 时的 $f(t)$（当 $t<t_0$ 时，$f(t)=0$）及 t_0 稍前一瞬间（记为 t_0^-）系统的**状态**，即可算出 $t \geqslant t_0$ 时的 $y(t)$。系统在 t_0^- 的状态可以用几个数值来表明，如 $x_1(t_0^-)$、$x_2(t_0^-)$，…，$x_n(t_0^-)$，常简写为 $\{x_j(t_0^-)\}$，$j=1,2,\cdots,n$。若 $t_0=0^-$，则状态为 $\{x_j(0^-)\}$。于是式（1·1—1a）可改写为

$$y(t)=L[\{x_j(0^-)\},\ f(t)] \qquad t \geqslant 0 \qquad (1\cdot 1-1b)$$

其中 $\{x_j(0^-)\}$ 称为系统的**初始状态**。n 是系统的**阶数**。状态的定义及更进一步讨论可参见第六章和第二章的有关内容。下面仅举一个电系统作为例子来说明状态的意义。

如图 1·1—2 所示的电系统，容易证明，如果 $t \geqslant 0$ 时的输入 $f(t)$ 已知，则某时刻 t_0^- 电容 C 上的电压 $x_1(t_0^-)=v_c(t_0^-)$ 及电感 L 中的电流 $x_2(t_0^-)=i_L(t_0^-)$ 已知后，那末这个系统

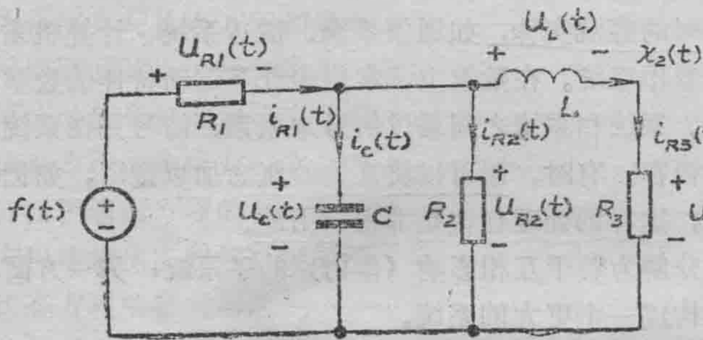


图1·1—2

在该时刻 t_0^- 的全部电压和电流就都可以求出。因为

$$\left.\begin{aligned}
v_{R1}(t_0^-)&=f(t_0^-)-x_1(t_0^-)\\
i_{R1}(t_0^-)&=\frac{1}{R_1}[f(t_0^-)-x_1(t_0^-)]\\
i_{R2}(t_0^-)&=\frac{1}{R_2}x_1(t_0^-)\\
v_{R2}(t_0^-)&=x_1(t_0^-)\\
i_{R3}(t_0^-)&=x_2(t_0^-)\\
i_c(t_0^-)&=i_{R1}(t_0^-)-i_{R2}(t_0^-)-x_2(t_0^-)\\
&=\frac{1}{R_1}[f(t_0^-)-x_1(t_0^-)]-\frac{1}{R_2}x_1(t_0^-)-x_2(t_0^-)\\
v_{R3}(t_0^-)&=R_3\cdot x_2(t_0^-)\\
i_{R3}(t_0^-)&=x_2(t_0^-)\\
v_L(t_0^-)&=x_1(t_0^-)-v_{R3}(t_0^-)=x_1(t_0^-)-R_3\cdot x_2(t_0^-)
\end{aligned}\right\} \qquad (1\cdot 1-2)$$

其中 $x_1(t_0^-)$、$x_2(t_0^-)$ 就称为此电系统在 t_0^- 时刻的状态。

系统在时刻 t_0^- 的状态 $\{x_j(t_0^-)\}$ 虽然是唯一的，但是决定系统在时刻 t_0^- 的状态的方法却不唯一。如图 1·1—2 所示系统，容易证明：$\{i_L(t_0^-),\ v_L(t_0^-)\}$，$\{i_c(t_0^-),\ v_L(t_0^-)\}$，$\{v_{R1}(t_0^-),\ v_L(t_0^-)\}$，$\{i_c(t_0^-),\ v_{R3}(t_0^-)\}$，$\{i_c(t_0^-),\ v_c(t_0^-)\}$ 等都可以规定为系统在 t_0^- 时刻的状态。因为只要知道其中的任意一组，其余各组均可由此算出。

系统在 t_0 时刻的状态说明系统在该时刻的贮能，它应该只反映系统贮能的情况而与 $f(t_0)$

无关。在上例中，若用 $v_{R1}(t_0)$、$v_L(t_0)$ 来描述系统的状态就显然不合适，因为 $v_{R1}(t_0)=f(t_0)-x_1(t_0)$，它与 $f(t_0)$ 有关。为了避开 $f(t_0)$ 的影响，我们可以令当 $t<t_0$ 时，$f(t)=0$，即 $f(t_0^-)=0$。因此，$\{v_{R1}(t_0^-),\ v_L(t_0^-)\}$ 与 $f(t_0)$ 无关。这就是我们用 $\{x_j(t_0^-)\}$ 而不用 $\{x_j(t_0)\}$ 来描述系统状态的原因。由于 t_0 与 t_0^- 只差一个无穷小时间间隔，系统在 t_0^- 时刻的状态就是在 t_0 时刻的状态。

1.2 系統的分类

前已指出，我们将按系统的数学模型来对之进行分类。而且为了方便，今后我们仅以电系统作为分析的具体例子，此时信号就是电压或电流。显然，这样的假设，并不丧失研究问题的一般性。

一、动态系統与非动态系統

如果系统在时刻 t_0 的响应 $y(t_0)$ 不仅与 $f(t_0)$ 有关，而且与 t_0 以前〔即 $(-\infty,t_0)$ 区间〕的输入有关，这种系统称为**动态系統**或**記忆系統**。实际上，$f(t)$ 在 $(-\infty,t_0)$ 区间对于系统的总贡献，就可归结为系统在 t_0^- 时的状态 $\{x_j(t_0^-)\}$。

若 $y(t_0)$ 只与 $f(t_0)$ 有关而与区间 $(-\infty,t_0)$ 的 $f(t)$ 无关，这种系统称为非动态系统或无记忆系统。这种系统显然无状态可言，因此 $y(t)$ 与 $f(t)$ 之间只有简单的函数关系，即

$$y(t)=\phi\{f(t)\} \tag{1.2—1}$$

其中 ϕ 不是一种运算符号而是某函数的符号。一个由纯电阻构成的网络，不论这些电阻是普通的线性电阻或者是特殊的非线性电阻，网络都属于非动态系统。若网络中还包含有储能元件电感或电容，则不管这些储能元件是线性的还是非线性的，网络都属于动态系统。

通常，描述动态系统的方程（1.1—1）是一个（或一组）微积分方程，它的阶数就是系统的阶数。可以证明，对电系统来说，独立电感、电容的总个数，就是系统的阶数，在时刻 t_0^-，这些电容上的电压 $v_c(t_0^-)$ 和电感中的电流 $i_L(t_0^-)$，就可以充当系统在 t_0 时的状态。

二、綫性与非綫性系統

在图 1.1—1 所示的系统中，若已知：

（1）初始状态 $\{x_j(0^-)\}$，$j=1,2,\cdots,n$

（2）$f(t)=a_1f_1(t)+a_2f_2(t)$，$t\geqslant 0$

并设其它因素均为零时，状态值 $x_1(0^-)$ 单独所引起的系统响应为 $y_{x1}(t)$，

记为　$x_1(0^-)\longrightarrow y_{x1}(t)$，$t\geqslant 0$

同样　$x_2(0^-)\longrightarrow y_{x2}(t)$，$t\geqslant 0$

…………………………

$x_n(0^-)\longrightarrow y_{xn}(t)$，$t\geqslant 0$

且设输入分量 $f_1(t)$ 单独所引起的响应为 $y_{t_1}(t)$，

记为　$f_1(t)\longrightarrow y_{t_1}(t)$，$t\geqslant 0$

及　$f_2(t)\longrightarrow y_{t_2}(t)$，$t\geqslant 0$

则，　对于**綫性系統**来说，必然有

$$y(t)=\sum_{j=1}^{n} y_{xj}(t)+\sum_{j=1}^{\alpha} a_j y_{fj}(t),\quad t\geqslant 0$$
$$=f_x(t)+y_f(t) \tag{1·2—2}$$

其中 $y_x(t)$ 称为系统的**零输入响应**，它是响应中完全由状态所引起的那一部分分量；$y_f(t)$ 称为系统的**零状态响应**，它是响应中完全由输入所引起的那一部分分量。$y(t)$ 称为系统的全响应。反之，不满足式（1.2—2）的系统，则称为**非线性系统**。

式（1·2—2）说明，一个线性系统必须同时具备**分解性**、**零输入线性**和**零状态线性**。这是线性性质的合乎逻辑的结果。众所周知，数学上的所谓线性性意味着**比例性**和**叠加性**这两个性质：（1）如果 $f_1(t)\longrightarrow y_{f1}(t)$，则 $af_1(t)\longrightarrow ay_{f1}(t)$。这种性质叫比例性。（2）如果 $f_1(t)\longrightarrow y_{f1}(t)$，$f_2(t)\longrightarrow y_{f2}(t)$，则 $f_1(t)+f_2(t)\longrightarrow y_{f1}(t)+y_{f2}(t)$。这种性质叫做叠加性。由于线性系统中，把状态 $\{x_j(0^-)\}$ 也当作一种原因，所以说它必须具有上述三种性质。由于线性系统必须满足（1·2—2）式因此下面四个式子所描述的就都不是线性系统。

（1）$y'(t)=\log x(0^-)+f^2(t)+5y(t)$

（2）$y''(t)=y'(t)y(t)+x_1(0^-)+x_2(0^-)+\log f(t)$

总是 （3）$y(t)=x^2(0^-)+\int_0^t f(\tau)d\tau$

（4）$y'(t)=f(t)y(t)+3x(0^-)$

一个网络，若只有线性电阻、线性电容、线性电感（一般平时所用的电阻、电容、电感，都可视为线性或近似线性）以及其它线性元件，则该网络就可以看作是一个线性系统。若其中含有一个或几个非线性元件，它就属于非线性系统。在自然界中，严格的、绝对的线性系统是不存在的。我们所谓的线性系统，往往是指在一定条件下，可以近似地看作线性系统。

三、时变与时不变系统

如果某系统的初始状态为 $\{x_j(0^-)\}$，$j=1,2,\cdots,n$，其 $t\geqslant 0$ 的输入为 $f(t)$，这时系统的响应已求出为 $y(t)$〔见图 1·2—1a〕，则如果该系统是时不变系统，那末当改变初始时刻为 t_0^- 而保持初始状态不变时，即 $\{x_j(0^-)\}=\{x_j(t_0^-)\}$，若 $t\geqslant t_0$ 的输入等于 $f(t-t_0)$，系统的响应必定为 $y(t-t_0)$〔见图 1·2—b〕。

系统的时不变性说明系统内部的所有参数与时间无关，因此又称它为**恒参系统**。对于时不变的动态系统，当系统在 $t=0$ 时的状态等于 $t=t_0$ 时的状态时，即若

$$\{x_j(0^-)\}=\{x_j(t_0^-)\}$$

又
$$y(t)=L\{f(t)\}$$

则
$$y(t-t_0)=L\{f(t-t_0)\} \tag{1·2—3}$$

反之，不满足（1·2—3）式的系统则属于时变系统。当式（1·2—3）是微积分方程时，这个方程的全部系数应均为常数。

倘若系统内部的参数有一个或几个随时间而变化，它就是时变系统，也称**变参系统**。这时若其数学模型是微积分方程，其系数就不全是常数而有一些是时间 t 的函数。在一个网络中，若所有的电阻、电容、电感以及其它元件的值均不随时间而改变，则不论它们是线性的

还是非线性的，这个网络属于时不变系统，否则就是时变系统。

在自然界中，严格的、绝对的时不变系统也是不存在的。我们所指的时不变系统，其实是在一定条件下，近似地可看作时不变的系统。

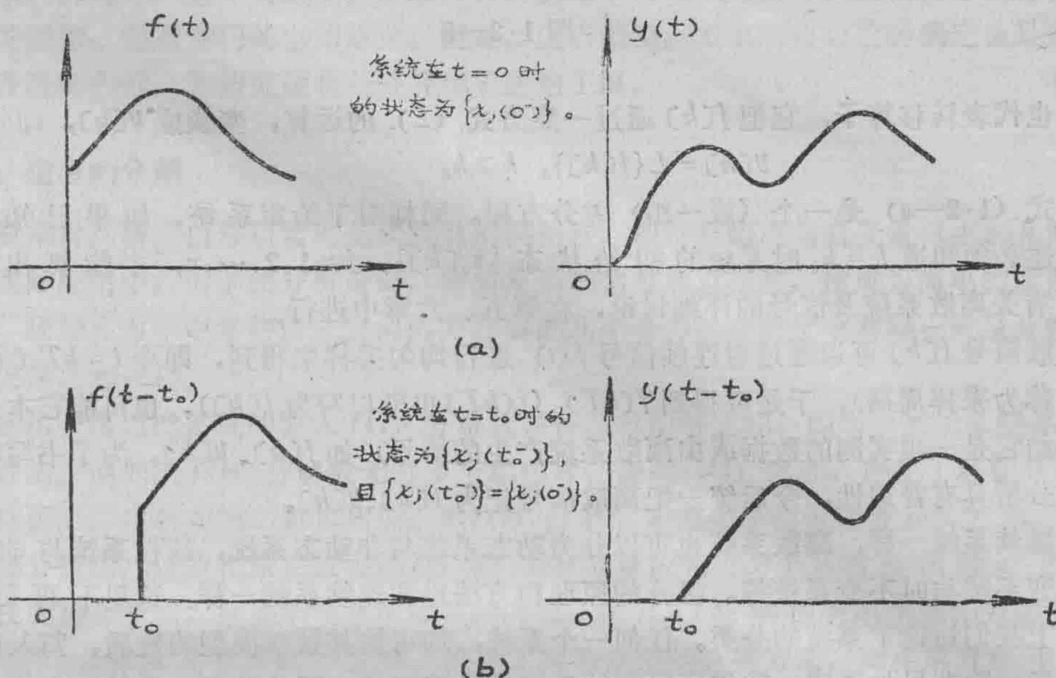


图1.2—1

四、离散系统与連續系統

迄今我们所讨论的都是连续时间系统（简称连续系统），与之相联系的是连续时间 信 号（简称连续信号）。此外，还有一种所谓**离散时間系統**（简称离散系统），与之相联系的则是**离散时間信号**（简称离散信号）。数学上，离散信号用按次序排列的数字序列 $f[k]$、$y[k]$ 来表示，宗量 k 是整数。$f(t)$ 与 $f[k]$ 的区别可由图 1·2—2 看出来。

对于一个简单的单输入 $f[k]$、单输出 $y[k]$ 的系统，若只从其外部进行研究，也可以用方框图（1·2—3）来表示。

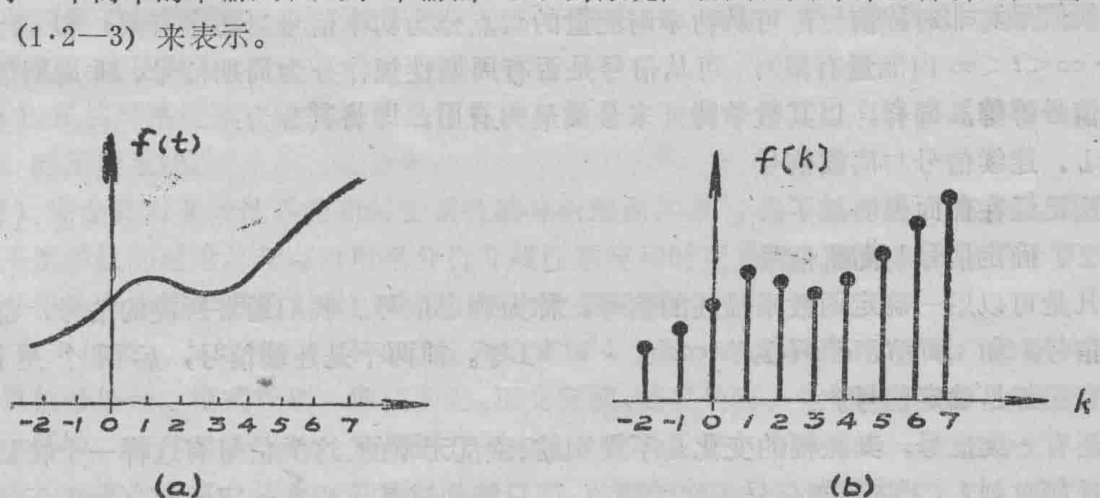


图 1·2—2

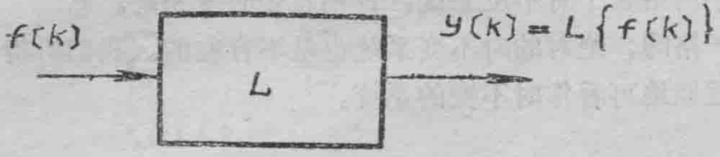


图 1·2—3

其中 L 也代表转移算子，它把 $f[k]$ 通过一定方式（L）的运算，变换成 $y[k]$，即

$$y[k]=L\{f[k]\},\quad k\geqslant k_0 \tag{1·2—4}$$

通常，式（1·2—4）是一个（或一组）差分方程。同样对于给定系统，如果已知 $k\geqslant k_0$ 的 $f[k]$，还必须知道 $k=k_0$ 时系统的初始状态 $\{x_j[k]\}$，$j=1,2,\cdots,n$，才能算出 $k\geqslant k_0$ 的 $y[k]$。有关离散系统及信号的详细讨论，在第五、六章中进行。

离散信号 $f[k]$ 可以通过对连续信号 $f(t)$ 进行均匀采样来得到，即令 $t=kT$（T 为固定常数，称为采样周期），于是可得到 $f(kT)$（$f(kT)$ 也可以写为 $f[k]$）。也可能它本身就是离散的（如它是一串实测的数据或由离散系统产生的信号）如 $f[k]$、$y[k]$。为了书写简单，更为了使分析具有普遍性，今后统一把离散信号记为 $f[k]$、$y[k]$。

和连续系统一样，离散系统也可以分为动态系统与非动态系统，线性系统与非线性系统，时变系统与时不变系统等。区分的原理和方法也和连续系统一样，这里不再赘述了。

以上我们讨论了系统的分类。任何一个系统，均可按其数学模型的性质，归入适当的类别。今后，除非另加说明，我们所研究的系统总是动态的，因此动态二字就可省略。有时，系统的类别不言自明，就简称系统，不再冠以详细的类别称呼。

1.3 信号的分类和分解

一、信号的分类

和系统一样，信号也有各种各样的分类方法。譬如可以分为雷达信号、通信信号、遥测信号…等等；也可以分为电信号、光信号…等等。此外还可按其内在的对称性质分为奇信号、偶信号与非对称信号；可从功率与能量的观点分为功率信号（功率有限）和能量信号（在 $-\infty<t<\infty$ 内能量有限）；可从信号是否有周期性规律分为周期信号、非周期信号和概周期信号等等。同样，以其数学特征来分类最为有用，即将其分为：

1．连续信号与离散信号

这已经在前面说明过了。

2．确定信号与随机信号

凡是可以用一确定函数来描述的信号，称为确定信号。我们通常所说的信号，都假定是确定信号，如 $\sin\omega_0 t$，$e^{\sigma t}u(t)$，$A\cos k$，$k^2u[k]$ 等。前两个是连续信号，后两个是离散信号，它们都是确定信号。

还有一类信号，其振幅的变化是不规则的、杂乱无章的。这类信号有这样一个特征：在未来的任何时刻 t_0，无法预知信号振幅的确值，而只能知道其出现在一定区间（如电压值的某一范围）的**概率**。这种信号称为**随机信号**。由电子器件所产生的噪声，就属于这种随机信号。实际上，严格的确定信号是不存在的，信号一经产生，它就处于噪声的包围之中，更何况在

产生信号的过程中，它还必然随时被噪声所污染。因此，我们实际上碰到的往往是确定信号与随机信号的叠加，甚至完全是随机信号（如随机信号的测量）。由于随机信号处处存在，而且对确定信号形成干扰，这就是我们需要对随机信号加以研究的原因。

本书作为基础，为了突出最基本的内容，仅限于研究确定信号，随机信号的特性及其通过系统的问题，另有专门的书籍研究。但是，应当指出，本书所要讨论的确定信号通过线性系统所涉及的内容，为研究随机信号提供了理论工具。

二、信号的分解

一般来讲，研究信号重要的是研究其时间特性，即信号幅度与自变量（t、k等）的关系。在实际应用中，为了使分析简便，常将复杂的信号加以分解，使成为简单的所谓**基本信号**之和，犹如在力学中常将任一方向的力分解成几个分力，在数学中常将一矢量分解成若干基本的矢量之和一样。

正是由于可以把系统的输入$f(t)$分解成各种基本信号之和，因而产生了线性系统的各种分析方法。例如把$f(t)$分解成无穷多个**单位冲击函数**$\delta(t)$之和，产生了**卷积**分析法也称时域分析法，这将在第二章里研究；把$f(t)$分解成无穷多个指数函数$e^{j\omega t}$之和，产生了**付氏变换**分析法，这放在第三章去进行；把$f(t)$分解成无穷多个复指数函数e^{st}之和，产生了**拉氏变换**分析法，这是第四章所研究的内容；把$f[k]$分解成有限个或无穷多个单位数字冲击$\delta[k]$之和或复幂级数z^k之和，产生了离散系统的分析方法，则在第五章中讨论。也还有一些信号分解的其它方法，它们分别产生了沃尔什（Walsh）—阿达马（Hadamard）变换、哈尔（Haar）变换…等等，这些内容已经逸出了本书的范围。总之线性系统分析就是这样受信号分解的不同方式所决定。完全可以预期，随着新的变换方法的出现，线性系统分析的理论将不断的丰富与完善。

信号和系统之间的这种互相依存、不可分割的关系，是我们学习本书所必须注意的。

1.4 綫性时不变系統

本书仅限于讨论线性、时不变系统。在系统理论中，线性、时不变系统的理论处于特殊重要的地位，这是因为

（1）虽然严格说来，这类系统是罕见的，但是在一定条件下，有许多系统可以近似看作线性、时不变系统。

（2）完全针对非线性系统和时变系统的分析理论，迄今仍不够严谨、完善。而利用线性、时不变系统的理论，却可以用来分析非线性系统和时变系统。譬如利用电子计算机及状态变量分析法（参阅本书第六章）就可以解决此类问题。

（3）近年来，与线性、时不变系统理论密切有关的一些学科迅速发展，如数字信号处理、随机信号处理、模式识别、通信理论、正交变换、信息处理、生物电子学、自动控制等。在这些学科中，有些是新兴的，它们正方兴未艾、蓬勃发展，有些已有一定的历史，但却正为大量新的内容所丰富，还有一些则是边缘学科。本教材与这些学科彼此交叉、相互渗透，并作为这些学科的基础理论，其重要性是不言自明的。

一个实际的电系统可以由电阻、电容、电感以及其它器件按特定的方式联接而成。当这

些元件的几何尺寸远大于在系统中流通的信号的最长波长时，这种系统称为**集中参数系统**。这时系统的能量被认为贮藏或消耗在这些孤立的元件中，因此其数学模型是常微分方程。与之对应，如果信号的波长并不能认为远小于系统的几何尺寸时，这种系统称为分布参数系统。在分布系统里，不能再把系统的元件看作是分立的，而必须看作分布在整个系统的空间中。这时信号就不仅涉及独立时间变量 t，而且还需涉及独立的空间变量 x。因此分布参数系统的数学模型是偏微分方程式。

本教材只讨论集中参数系统。所以今后不再特别加以注明。

1.5 研究系统的方法

研究系统的方法可分为输入、输出法及状态变量法两大类。

前几节我们所讨论的实际上都是涉及的输入、输出法。这种方法仅研究系统的对外特性，它只研究输入和输出之间的关系。对于一些较为简单的系统，或者系统虽然复杂，但我们只对其外特性感兴趣，这时用这种方法就很合适，因为它简单、直观。

此外还有一种分析方法称为状态变量法。这种方法把系统内部所有的响应变量都作为分析研究的对象。一个 n 阶系统，其中独立的响应变量共有 n 个。从本质来讲，这种分析方法是把 n 阶系统看成是由 n 个一阶子系统所构成，所以从数学模型来看，即是把一个 n 阶微积分方程用 n 个一阶方程来表示。这样，就可以观察和研究信号（即变量）在系统内部流通的情况。这种方法特别适合于以下两方面：

（1）用于自动控制系统的分析和设计；

（2）用于对时变系统和非线性系统的分析研究。

系统的研究方法，还可以以数学模型的求解方式，区分为时域法和变换域法两大类。

时域法直接处理系统的数学模型，按已知的激励，计算出所要求的响应。在1·3节已经指出，这种方法实质上是将激励 $f(t)$ 或 $f[k]$，分解成 $\delta(t)$ 或 $\delta[k]$ 这种基本信号，再利用线性系统的叠加性求解的，由于它是通过卷积及卷和来完成的，所以又称**卷积法**。

变换法是通过各种正交变换及反变换，利用系统转移函数的概念来研究系统，如付氏变换、拉氏变换、z 变换法等。1·3节中已经指出，它们实质上是将激励 $f(t)$、$f[k]$ 分别分解成 $e^{j\omega t}$、e^{st} 及 z^k 这些基本信号，再利用系统的叠加性质求解的。本书中三、四、五章分别对之进行详细讨论。上述这些内容，都属于输入、输出法的范围。

第六章属于状态分析法范围。同样，在求解数学模型时，时域和变换域法都可运用，分析的对象既包括连续系统也包括离散系统。即前五章中所有的方法都将同时用到。

习　　题

1—1　系统的数学模型如下式所示：

(a)　$y(t)=af(t)+bf^2(t)$，$-\infty<t<\infty$　无记忆、时不变、非线性、连续

(b)　$y(t)=x(t_0^-)+\int_{t_0}^{t}f(\tau)d\tau$，$t>t_0$　动态、时不变、线性、"

(c)　$y(t)=x(t_0^-)+3t^3f(t)$，$t>t_0$　动态　时变、线性、"