

///
■ 高等学校教材

信号与 系统

Signals & Systems

刘 泉 江雪梅



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



中国美术学院美术考级教材

信号与

系统

Signals & Systems

第 1 版



中国科学技术出版社

高等学校教材

信号与系统

刘泉 江雪梅



高等教育出版社

内容简介

本书系统地介绍了信号与线性系统分析的基本原理和方法。全书共七章,内容包括:信号与系统的基本概念、连续时间信号与系统的时域分析、连续时间信号与系统的频域分析、连续时间信号与系统的复频域分析、离散时间信号与系统的时域分析、离散时间信号与系统的 z 域分析以及系统的状态变量分析法。

本书强调基本概念、基本方法和基本技能,论述简明,重点突出,其内容符合教育部颁布的信号与系统课程教学基本要求。

本书既可作为高等工科院校通信与电子信息类专业的教材,也可供自学考试及成人教育有关专业选用,还可供研究生及有关科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统 / 刘泉, 江雪梅. — 北京: 高等教育出版社, 2006.2

ISBN 7-04-018639-X

I. 信... II. ①刘... ②江... III. 信号系统
— 高等学校—教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 003311 号

策划编辑 刘激扬 责任编辑 杜 炜 封面设计 李卫青 责任绘图 朱 静
版式设计 胡志萍 责任校对 康晓燕 责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 20.75
字 数 380 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006 年 2 月第 1 版
印 次 2006 年 2 月第 1 次印刷
定 价 24.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 18639-00

前 言

现代科学技术发展的重要特点之一是不同的学科之间相互影响、相互渗透和相互促进。随着信息技术的迅猛发展,信号与系统理论的基本概念和研究方法日趋完善,且几乎毫无例外地进入了信息及相关领域的各个学科。特别是随着超大规模集成电路技术水平的不断提高,信号处理和系统分析的能力也大大加强,使得信号与系统在科学研究、国防和民用电子技术等领域发挥着愈来愈重要的作用。

“信号与系统”是高等工科院校通信与电子信息类专业的一门重要学科基础课程,“信号与系统”的主要内容是传统经典的。编者根据多年的教学实践认为,编写一本以论述确定性信号作用于线性时不变系统的基本概念、原理和方法为主,且符合电子信息与相关专业教学实际要求的教材是非常必要的。

本书根据高等学校最新“信号与系统教学基本要求”编写而成,参考学时数为60—70学时。本书主要论述信号与系统的基本理论和基本分析方法,力求叙述清楚、讲解透彻、强化基础、结合实际。本书的总体结构是:先连续,后离散;先信号,后系统;先时域,后变换域;先输入—输出法,后状态变量法。遵循循序渐进的教学法原则,有利于学生增强理解,深化认识。并在时域和变换域分析法之间建立一定的对应关系,充分体现了现代系统分析理论的规范性和一致性。通过本书的学习,读者能够较全面地掌握信号与系统的基本概念、基本理论、基本分析方法和综合技能。

信号与系统理论性很强,实践和应用很广,且又不局限于讨论具体的电路和器件。为此,本书特别注意对基本概念、基本理论和基本方法的重点论述,力求把理论和实际应用很好地结合。在阐述中,既注重严谨的科学推理与推导,又强调用系统的观念、从广义的角度来理解,以激发学习兴趣、启迪联想、培养逻辑性和创造性能力。

全书共分七章,第一章论述信号与系统的基本概念,第二、三和四章分别论述了连续时间信号与系统的时域分析、频域分析和复频域分析,第五章和第六章对离散时间信号与系统的时域分析和 z 域分析进行了论述,第七章简要阐述了系统的状态变量分析法。书中用大量的典型例题有针对性地介绍分析方法和解题技巧,促进对基本概念和基本理论的理解。特别地,在每章中,我们精选了一些综合分析题,帮助学生加强对所学内容的理解,并开拓思维和提高综合应用能力。

本书还充分考虑到目前作为国际上公认的最优秀的科技应用软件之一的 MATLAB 语言的作用,正是由于 MATLAB 在数值计算及符号计算等方面的强大功能,使其成为应用学科计算机辅助分析、设计、仿真及其教学等领域不可缺少的基础软件。本书每章的最后一节都给出了应用 MATLAB 对信号与系统进行分析 and 实现的应用实例,使学生在学本课程的同时,掌握 MATLAB 的运用;让学生将课程中的重点、难点及部分课后习题用 MATLAB 进行形象、直观的可视化计算机模拟与仿真实现,从而加深对信号与系统基本原理、方法及应用的理解。

本书保证了信号与系统课程内容的完整性,突出重点,加强基础。在精练内容的同时,不降低深度,并适当考虑宽度,使学生既能很好地掌握本课程的基本概念、基本理论和基本方法。又能满足读者在今后学习和工作的需要。本书每一章后都附了较为典型的习题,可供读者学习和巩固知识选用;书后还附有信号与系统专业词汇的中英文对照表,并将另行配套出版习题详细解答。

本书在结构安排和内容论述上,有利于授课教师选材,同时在论述与表达上,充分考虑了读者自学的要求。作为本书核心的重要概念、原理和方法,对于其他相关专业也是很重要的,因此,本书也可作为其他专业信号与系统课程的参考教材。

本书第一、二、三和五章由刘泉编写,第四、六和七章由江雪梅编写,全书由刘泉教授统稿。艾青松博士和张小梅博士参与了习题编写与解答的部分工作。

本书承华中科技大学姚天任教授主审,并提出了许多宝贵意见和建议,编者在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些不足之处,殷切期望广大读者批评指正。

编 者

2005 年 8 月

目 录

第一章 信号与系统的基本概念	1
1.1 信号的描述与分类	1
1.2 连续时间信号的基本运算与波形变换	4
1.3 系统的描述与分类	7
1.4 系统分析方法	9
1.5 综合举例	10
1.6 信号与系统的基本概念的 MATLAB 实现	12
习题	15
第二章 连续时间信号与系统的时域分析	18
2.1 常用典型信号	18
2.2 连续时间信号的分解	23
2.3 连续时间系统的数学模型	26
2.4 连续时间系统的时域模拟	29
2.5 连续时间系统的响应	31
2.6 单位冲激响应	35
2.7 卷积	37
2.8 综合举例	43
2.9 连续时间信号与系统的时域分析的 MATLAB 实现	46
习题	51
第三章 连续时间信号与系统的频域分析	56
3.1 周期信号的傅里叶级数	56
3.2 周期信号的频谱	58
3.3 非周期信号的傅里叶变换	62
3.4 常用信号的傅里叶变换	64
3.5 傅里叶变换的性质	75
3.6 连续时间系统的频域分析	83
3.7 系统无失真传输的条件	86
3.8 理想低通滤波器的冲激响应和阶跃响应	87
3.9 调制与解调	90
3.10 综合举例	92
3.11 连续时间信号与系统的频域分析的 MATLAB 实现	96

习题	105
第四章 连续时间信号与系统的复频域分析	113
4.1 拉普拉斯变换	113
4.2 拉普拉斯变换的性质	117
4.3 拉普拉斯反变换	128
4.4 连续时间系统的复频域分析	134
4.5 系统函数	141
4.6 系统函数的零、极点分布与系统的时域和频域特性	143
4.7 双边拉普拉斯变换	151
4.8 连续时间系统的 s 域模拟	155
4.9 系统的稳定性	159
4.10 综合举例	165
4.11 连续时间信号与系统的复频域分析的 MATLAB 实现	168
习题	176
第五章 离散时间信号与系统的时域分析	185
5.1 抽样与抽样定理	185
5.2 常用典型序列及基本运算	189
5.3 离散时间系统的描述与模拟	193
5.4 离散时间系统的响应	197
5.5 离散时间系统的单位样值响应 $h(k)$	201
5.6 卷积和	202
5.7 综合举例	206
5.8 离散时间信号与系统的时域分析的 MATLAB 实现	208
习题	215
第六章 离散时间信号与系统的 z 域分析	222
6.1 z 变换	222
6.2 常用序列的 z 变换	225
6.3 z 变换的性质	227
6.4 反 z 变换	230
6.5 z 变换与傅里叶变换、拉普拉斯变换的关系	236
6.6 离散时间系统的 z 域分析	237
6.7 离散时间系统的频率响应	243
6.8 综合举例	248
6.9 离散时间信号与系统的 z 域分析的 MATLAB 实现	252
习题	256
第七章 系统的状态变量分析法	261
7.1 状态变量与状态方程	261
7.2 连续时间系统状态方程的建立	263

7.3 连续时间系统状态方程的求解.....	268
7.4 离散时间系统状态方程的建立.....	272
7.5 离散时间系统状态方程的求解.....	275
7.6 综合举例.....	278
7.7 系统的状态变量分析法的 MATLAB 实现	282
习题	287
附录 MATLAB 简介	292
部分习题参考答案	299
索引	312
参考文献	320

第一章

信号与系统的基本概念

信号和系统是两个使用极为广泛的基本概念,无论是在自然科学领域,还是在社会科学领域都存在大量的应用研究问题。而随着信息技术的迅速发展和计算机的广泛使用,信号与系统及其理论研究日益复杂。本教材仅以电子信息系统为基本背景,讨论信号分析和系统分析问题:信号分析部分主要论述信号的描述、运算和变换等问题;系统分析主要研究系统的特性、模型和系统在激励作用下的响应等问题。

1.1 信号的描述与分类

一、信号的描述

信息是存在于客观世界的一种事物现象,通常以文字、声音或图像的形式来表现。人们正是通过信息的获取、存储、传输与处理等来不断认识和改造世界的。而信号作为信息的载体,是指带有信息的随时间或其他自变量变化的物理量或物理现象。数学上,信号可以表示为一个或多个自变量的函数,具有一个自变量的信号称为一维信号,如语音类信号;具有多个自变量的信号称为多维信号,如平面图像类的二维信号等。本书只讨论一维信号,且为方便起见,一般都设信号的自变量为时间 t 或序号 k 。

与函数表示一样,一个确定信号除用解析法描述外,还可以用图形、表格等描述。可以通过信号随时间变化的快慢、延时来分析信号的时间特性;也可以从信号所包含的频率分量的振幅大小及相位关系来分析信号的频率特性。不同的信号具有不同的时间和频率特性。

二、信号的分类

信号可以从不同角度进行分类,常用的有下面几种分类方式。

1. 确定信号与随机信号

按信号时间函数的确定性与否,信号可划分为确定信号与随机信号。

确定信号是指可以用一个确定的时间函数式来描述的信号,对于给定的一

个时刻,有其确定的函数值,例如正弦信号、直流信号等。而随机信号则是指不能用确定的时间函数式表示、只能用其统计特性如均值、方差来描述的信号,例如噪声信号、干扰信号等。

实际运用的信号往往具有某种不确定性,但在一定条件下,随机信号也会表现出某些统计确定性。确定信号的分析是研究随机信号的基础,本书只分析确定信号。

2. 连续信号与离散信号

按自变量取值是否连续,信号可划分为连续信号和离散信号。通常自变量为时间,即对应为连续时间信号和离散时间信号。连续时间信号在任何时刻除了有限个不连续点外都有确定的函数值。其函数值可以是连续的,如图1.1(a)所示;也可以是不连续的,如图1.1(b)所示。时间和幅值均连续的信号又称为模拟信号。

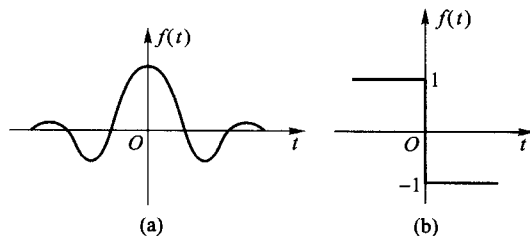


图 1.1 连续时间信号

离散时间信号只在不连续的时刻有函数值,而在其他时刻并无定义,即没有函数值;离散时间信号通常是按时间顺序得出的一组数值,所以也称时间序列,简称序列。离散时间信号也有两种情况:时间离散而幅值连续,即为抽样信号,如图1.2(a)所示;时间离散且幅值经过量化也是离散的,则为数字信号,如图1.2(b)所示。

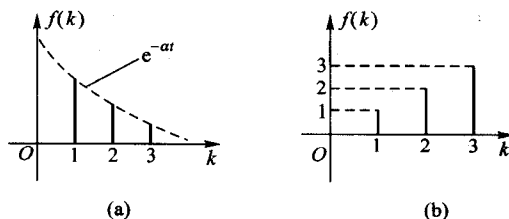


图 1.2 离散时间信号

3. 周期信号与非周期信号

连续时间信号和离散时间信号都可分为周期信号和非周期信号。周期信号是指经过一定时间重复出现的信号；而非周期信号在时间上不具有周而复始的特性。

连续周期信号可以表示为

$$f(t) = f(t + kT), \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.1)$$

满足上式的最小正 T 值称为 $f(t)$ 的周期。连续周期信号如图 1.3(a) 所示。

离散周期信号可以表示为

$$f(k) = f(k + mN), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.2)$$

满足上式的最小正 N 值称为 $f(k)$ 的周期。离散周期信号如图 1.3(b) 所示。

非周期信号也可以看作是一个周期趋于无穷大的周期信号。

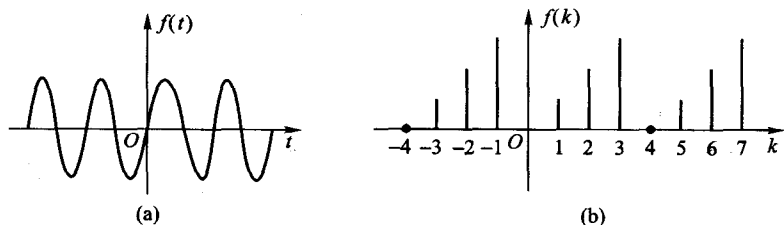


图 1.3 周期信号

4. 能量信号和功率信号

连续时间信号 $f(t)$ 的能量 E 和功率 P 分别定义为

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (1.3)$$

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (1.4)$$

离散时间信号 $f(k)$ 的能量 E 和功率 P 分别定义为

$$E = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f^2(k) \quad (1.5)$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{k=-N}^N f^2(k) \quad (1.6)$$

若信号能量有限, 即 $0 < E < \infty$, 且 $P = 0$, 则称此信号为能量信号; 若信号功率有限, 即 $0 < P < \infty$, 且 E 趋近于 ∞ , 则称此信号为功率信号。

一个信号不可能既是功率信号, 又是能量信号, 但可以既非功率信号, 又非能量信号, 例如, $t\epsilon(t)$ 。一般来说, 周期信号都是功率信号, 而非周期信号可能是能量信号, 也可能是功率信号。

1.2 连续时间信号的基本运算与波形变换

连续时间信号的基本运算主要包括相加(减)、相乘(除)、微分、积分等,信号波形变换主要指波形的翻转、平移和展缩等。

一、信号的相加

两个信号相加得到一个新信号,它在任意时刻的值等于这两个信号在该时刻的值之和,可表示为

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) \quad (1.7)$$

图 1.4 给出了连续时间信号相加的信号波形。

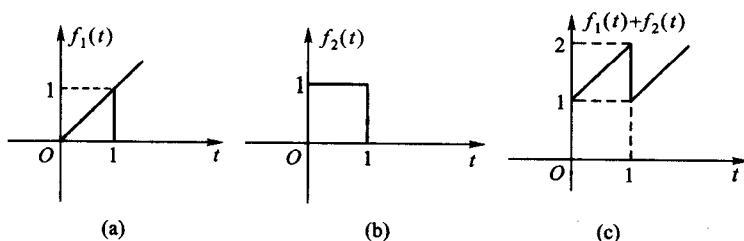


图 1.4 信号的相加

二、信号的相乘

两个信号相乘得到一个新信号,它在任意时刻的值等于这两个信号在该时刻的值的积,可表示为

$$f(t) = f_1(t) \times f_2(t) \quad (1.8)$$

图 1.5 给出了连续时间信号相乘的信号波形。

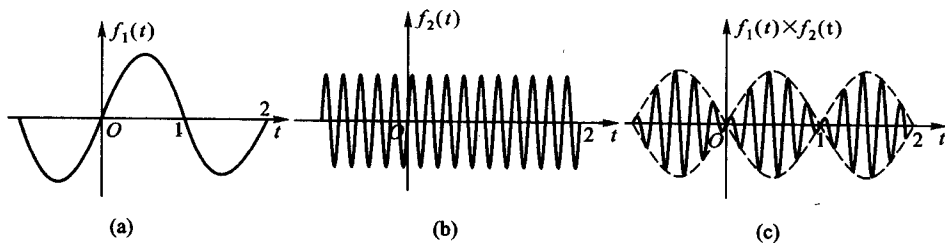


图 1.5 信号的相乘

三、信号的微分

对连续时间信号而言,信号的微分运算定义为

$$f'(t) = \frac{d}{dt}f(t) \quad (1.9)$$

如图 1.6 所示。

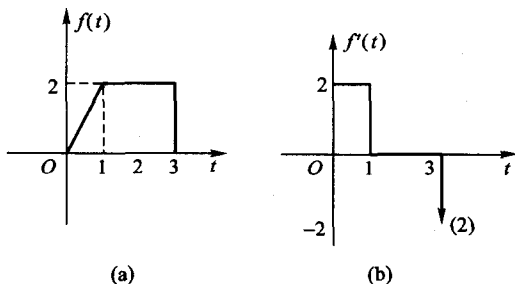


图 1.6 信号的微分

可见信号经微分运算后突出显示了信号变化的部分,即表示了信号的变化速率。当 $f(t)$ 中含有间断点时, $f(t)$ 在这些点上仍有导数,即出现冲激,其冲激强度为该处的跳变量。

四、信号的积分

对连续时间信号而言,信号的积分定义为

$$f^{(-1)}(t) = \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau \quad (1.10)$$

如图 1.7 所示。可见信号经积分运算后,其突变部分可变得平滑。

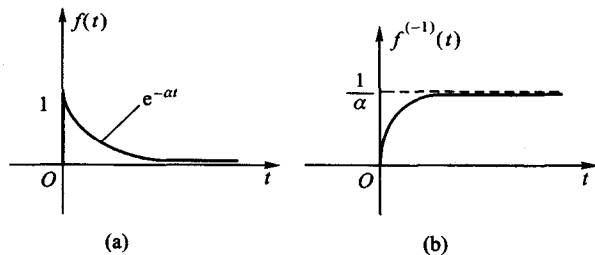


图 1.7 信号的积分

五、信号的反褶

信号的反褶表示为将信号 $f(t)$ 的自变量 t 换成 $-t$; 其信号 $f(-t)$ 的波形由原 $f(t)$ 的波形以纵轴为对称轴反褶得到。如图 1.8 所示。

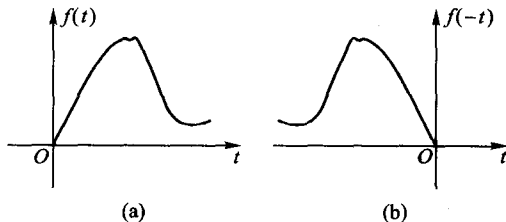


图 1.8 信号的反褶

六、信号的时移

连续时间信号 $f(t)$ 的时移 $y(t)$ 定义为

$$y(t) = f(t - t_0) \quad (1.11)$$

式中 t_0 是时移量。如果 $t_0 > 0$, $f(t - t_0)$ 的波形由 $f(t)$ 沿时间轴向右平移 t_0 得到; 如果 $t_0 < 0$, $f(t - t_0)$ 的波形则由 $f(t)$ 向左平移 $|t_0|$ 得到。如图 1.9 所示, 信号经过时移变换后, 在波形上完全相同, 仅在时间轴上有一个水平移动。

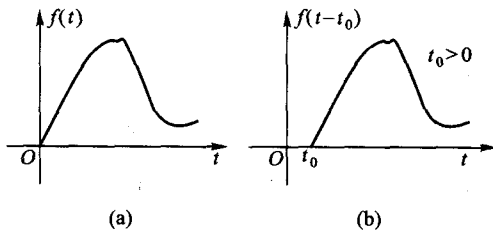


图 1.9 信号的时移

七、信号的尺度变换

信号的尺度变换表示将信号 $f(t)$ 的自变量 t 换成 at ($a \neq 0$), 得到的 $f(at)$ 的波形是 $f(t)$ 波形在 t 轴上的扩展或压缩。

若 $|a| > 1$, 波形在 t 轴上压缩; $|a| < 1$, 波形在 t 轴上扩展。如图 1.10 所示。若 $f(t)$ 表示正常语速信号, 则 $f(2t)$ 相当于是 2 倍语速的信号, $f\left(\frac{1}{2}t\right)$ 相

当于降低一半语速的信号。

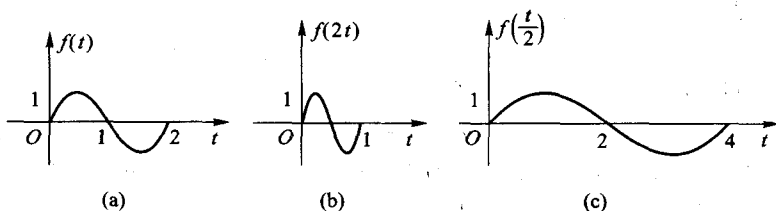


图 1.10 信号的尺度变换

1.3 系统的描述与分类

一、系统的描述

广义地讲,系统是指由一些相互联系制约的部分或事物组成并且具有一定功能的整体。从数学角度来说,系统可定义为实现某种功能的运算。设符号 T 表示系统的运算,将输入信号(又称激励) $e(t)$ 作用于系统,得到输出信号(又称响应) $r(t)$,表示为

$$r(t) = T[e(t)] \quad (1.12)$$

用框图表示为

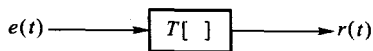


图 1.11 表示系统的方框图

为叙述方便,输入与输出(或激励与响应)的关系也常用符号“ $e(t) \rightarrow r(t)$ ”表示。

二、系统的分类

与连续时间信号和离散时间信号类似,系统可分为连续时间系统和离散时间系统。输入和输出信号均为连续时间信号的系统称为连续时间系统;输入和输出信号均为离散时间信号的系统称为离散时间系统。有两者混合组成的系统称为混合系统。不同的系统具有不同的特性,按照系统的特性又可将系统作如下分类:

1. 线性系统与非线性系统

线性系统是指满足齐次性和叠加性的系统。所谓齐次性是指系统输入改变 k 倍, 输出也相应改变 k 倍, 这里 k 为任意常数。即

$$T[ke(t)] = kT[e(t)] \quad (1.13)$$

或用符号描述为: 若 $e(t) \rightarrow r(t)$, 则

$$ke(t) \rightarrow kr(t) \quad (1.14)$$

叠加性是指若有 n 个输入同时作用于系统时, 系统的输出等于各个输入单独作用于系统所产生的输出之和, 即

$$T[e_1(t) + e_2(t)] = T[e_1(t)] + T[e_2(t)] \quad (1.15)$$

或用符号描述为: 若 $e_1(t) \rightarrow r_1(t)$, $e_2(t) \rightarrow r_2(t)$, 则

$$e_1(t) + e_2(t) \rightarrow r_1(t) + r_2(t) \quad (1.16)$$

因此, 线性系统可以表示为

$$T[k_1 e_1(t) + k_2 e_2(t)] = k_1 T[e_1(t)] + k_2 T[e_2(t)] \quad (1.17)$$

或用符号描述为: 若 $e_1(t) \rightarrow r_1(t)$, $e_2(t) \rightarrow r_2(t)$, 则

$$k_1 e_1(t) + k_2 e_2(t) \rightarrow k_1 r_1(t) + k_2 r_2(t) \quad (1.18)$$

2. 时不变系统与时变系统

若构成系统的元件参数不随时间而变化, 则称此系统为时不变系统, 也称非时变系统; 若构成系统的元件参数随时间改变, 则称其为时变系统。

对时不变系统而言, 若在输入 $e(t)$ 作用下的响应为 $r(t)$, 则输入延迟一时间 τ 后, 即 $e(t - \tau)$ 作用于该系统时的响应也相应地延时 τ , 但形状不变, 如图 1.12 所示, 即若 $r(t) = T[e(t)]$, 则

$$r(t - \tau) = T[e(t - \tau)] \quad (1.19)$$

用符号表示为: 若 $e(t) \rightarrow r(t)$, 则

$$e(t - \tau) \rightarrow r(t - \tau) \quad (1.20)$$

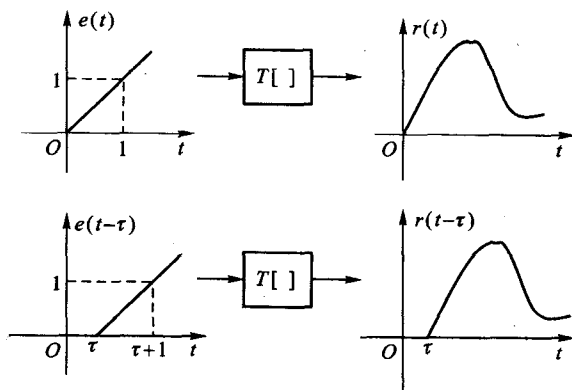


图 1.12 时不变系统的激励与响应波形