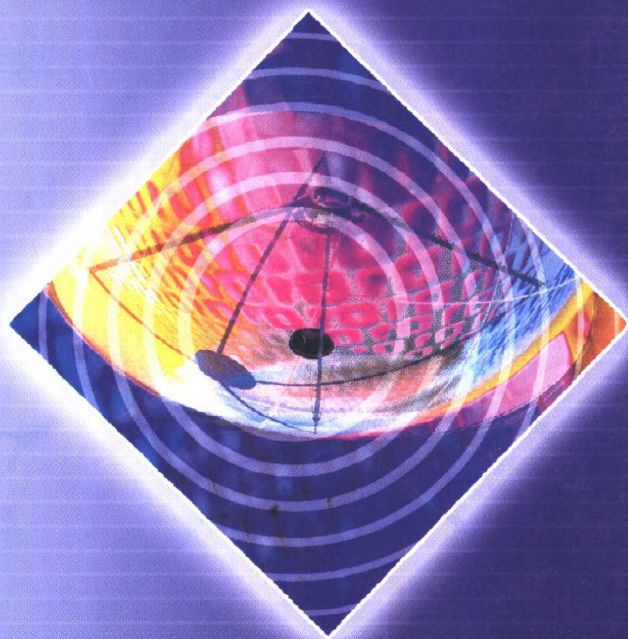




教育科学“十五”国家规划课题研究成果

《信号与系统教程》 教学指导书

燕庆明



高等教育出版社

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

《信号与系统教程》 教学指导书

燕庆明

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是与燕庆明主编《信号与系统教程》相配套的教学指导书。书中明确了主教材各章的教学目标和教学重点,并对重点给予指导。内容精炼,例题丰富。书中除了对全书的习题进行解析外,还编写了8套模拟试题,为学生自学检测提供帮助。

本书适合于高等学校电子信息类专业的教师和学生作为“信号与系统”课程的教学参考书和学习指导书。

图书在版编目(CIP)数据

《信号与系统教程》教学指导书/燕庆明. —北京:
高等教育出版社,2003.12

ISBN 7-04-013015-7

I. 信… II. 燕… III. 信号系统-高等学校-
教学参考资料 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 091953 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	高等教育出版社印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2003年12月第1版
印 张	9.5	印 次	2003年12月第1次印刷
字 数	170 000	定 价	12.50 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

前 言

为了配合电子信息类本科教材《信号与系统教程》实施教学,我们除了开发研制了多媒体 CAI 课件外,又编写了这本《信号与系统教程教学指导书》,为广大师生提供参考和帮助。

本书针对教材所讲述的 7 章内容,经过认真提炼,对每章都编写了“教学目标、教学重点、重点指导”等内容。书中特别列举了许多具有指导性的典型例题,这对深化有关概念的认识很有价值。每章设专题对教材中的所有习题进行解析,以利师生参考。

“信号与系统”课程的实施计划可安排 64 学时左右(包括讲授和课堂讨论)。按照以往的实践经验,各章学时安排如下,供参考。

第 1 章	4 学时
第 2 章	10 学时
第 3 章	14 学时
第 4 章	14 学时
第 5 章	4 学时
第 6 章	10 学时
第 7 章	8 学时

合计	64 学时
----	-------

为了加强训练和自检,本书特别编写了第 8 章:信号与系统模拟试题,共 8 套。这些试题涉及学生应该掌握的基本概念和基本分析方法,是作者长期教学经验的积累。它不但对教师有参考价值,而且对学习本课程的学生来说,亦可用来进行自我检测而从中受益。

不当之处,请读者指正。

作 者
2003 年 7 月
于江南大学

策划编辑	韩 颖
责任编辑	刘素馨
封面设计	于文燕
责任绘图	尹 莉
版式设计	胡志萍
责任校对	康晓燕
责任印制	韩 刚

目 录

《信号与系统教程》概要	1
第 1 章 导论	5
1.1 教学目标	5
1.2 教学重点	5
1.3 习题解析	5
第 2 章 连续系统的时域分析	10
2.1 教学目标	10
2.2 教学重点	10
2.3 重点指导	10
2.3.1 线性连续系统及其解的形式	10
2.3.2 卷积及其应用	11
2.4 习题解析	19
第 3 章 信号与系统的频域分析	32
3.1 教学目标	32
3.2 教学重点	32
3.3 重点指导	32
3.3.1 周期信号的频谱	32
3.3.2 信号的频带宽度	33
3.3.3 非周期信号的频谱函数	33
3.3.4 信号的传输	34
3.4 习题解析	38
第 4 章 连续系统的复频域分析	56
4.1 教学目标	56
4.2 教学重点	56
4.3 重点指导	56
4.3.1 信号的拉氏变换表示	56
4.3.2 拉氏变换的重要性质	56
4.3.3 系统的 s 域分析	57
4.3.4 线性系统的稳定性	58
4.4 习题解析	61
第 5 章 离散系统的时域分析	81
5.1 教学目标	81

5.2 教学重点	81
5.3 重点指导	81
5.3.1 离散系统的数学表示与响应	81
5.3.2 离散信号的卷积和单位响应	81
5.3.3 离散系统的零状态响应	82
5.4 习题解析	85
第 6 章 离散系统的 z 域分析	90
6.1 教学目标	90
6.2 教学重点	90
6.3 重点指导	90
6.3.1 z 域分析的概念	90
6.3.2 差分方程的 z 变换解	91
6.3.3 系统函数及稳定性	91
6.4 习题解析	94
第 7 章 系统分析的状态变量法	104
7.1 教学目标	104
7.2 教学重点	104
7.3 重点指导	104
7.3.1 状态方程	104
7.3.2 连续线性系统状态方程的求解	105
7.3.3 离散线性系统状态方程的求解	106
7.4 习题解析	109
第 8 章 信号与系统模拟试题	122
8.1 试题一	122
8.2 试题二	125
8.3 试题三	128
8.4 试题四	130
8.5 试题五	132
8.6 试题六	135
8.7 试题七	138
8.8 试题八	141
参考文献	143

《信号与系统教程》概要

在《信号与系统教程》中,针对连续系统和离散系统两大模块,分别介绍了时域分析和变换域(s 、 ω 、 z)分析的概念和方法。各章内容虽有自身的特点,但彼此间绝不是鸿沟隔绝、孤芳自赏,而是相映生辉。这就是科学中蕴含的规律之美。

为了揭示信号与系统的内在规律,该书采用了一些科学方法:即系统方法、类比方法、模拟方法、理论联系实际的方法和数学方法等。运用系统方法,可以从特殊中推知一般规律,举一反三地把电系统的知识运用到其他系统中去;运用类比的方法,就能从连续系统的概念和方法对应地认识离散系统的概念和方法;运用模拟方法,可以把规律(数学模型)相同的各种系统用简单的方法给予物理实现;运用理论联系实际的方法,才能从感性到理性地认识事物,才能学会如何把理论应用到工程实际中去;运用数学方法,才能像显微镜那样,看到信号与系统内在的时域和频域特性。无数事实表明,任何科学离开数学是走不远的,数学使人信服,数学使人坚定。

为了便于读者融会贯通地掌握所学的知识,现将该书的重要概念和方法归纳如下:

1. 信号的表示方法

为了认识确定性信号的特性,该书引入了一些基本信号,如正弦信号、冲激信号 $\delta(t)$ 、阶跃信号 $\epsilon(t)$ 、单位序列 $\delta(n)$ 以及指数信号 $e^{j\omega t}$ 、 $e^{\sigma t}$ 和 z^n 等。利用这些基本信号的线性组合,就可以表示原来的信号。例如

以 $\delta(t)$ 表示: $f(t) = f(t) * \delta(t)$

以 $\epsilon(t)$ 表示: $f(t) = f'(t) * \epsilon(t)$

以 $\delta(n)$ 表示: $f(n) = f(n) * \delta(n)$

$$\begin{aligned}\text{以正弦表示: } f(t) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n)\end{aligned}$$

$$\text{以 } e^{jn\omega_1 t} \text{ 表示: } f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega_1 t}$$

$$\left. \begin{aligned}\text{以 } e^{j\omega t} \text{ 表示: } f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \\ F(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt\end{aligned}\right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{以 } e^s \text{ 表示: } f(t) &= \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s) e^{st} ds \\ F(s) &= \int_0^\infty f(t) e^{-st} dt \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{以 } z^n \text{ 表示: } f(n) &= \frac{1}{2\pi j} \oint_c \frac{F(z)}{z} z^n dz \\ F(z) &= \sum_{n=0}^\infty f(n) z^{-n} \end{aligned} \right\}$$

以上这些表示方法,不管在时域还是在频域,其核心是首先将原信号分解为某种基本信号,然后再用这些基本信号合成原信号。应当注意,信号的分解与合成绝不是形式上变换花样,而是人们认识事物内在特性的普遍适用的方法。如非正弦周期信号,从波形上看它们可能极不相同,但一经用正弦基本信号表示(傅里叶级数),就可以看清各种周期信号的共性,从而确定用什么样的系统传送它们。所以,对信号如何分解与合成,是信号分析等领域中特别重要的研究课题。在以后进一步学习中会发现,信号的离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)等都是通过信号的分解与合成应用于工程实际的。

2. 系统的表示方法

对于不同的系统要用不同的数学模型表示。连续系统要用微分方程描述;离散系统要用差分方程描述。对于 LTI 系统,其输入-输出关系为线性常系数微分方程(对连续系统)或线性常系数差分方程(对离散系统)。实际系统常常是非线性的和时变的,为了分析方便,应当在一定条件下把它们简化为线性时不变模型处理。在精度要求较高的场合,对非线性系统应当用非线性微分方程(或差分方程)处理,对时变系统应当用时变微分方程(或差分方程)处理。

研究系统通常有输入-输出法(外部法)和状态变量法(内部法)两大类。状态变量法在研究时变系统、非线性系统中经常采用。

关于表示 LTI 系统特性的方法,该书在时域采用冲激响应 $h(t)$ 和单位响应 $h(n)$;在变换域采用系统函数 $H(s)$ 、频率特性 $H(j\omega)$ 和 $H(z)$,相应的重要关系为

$$h(t) = f(t) |_{f(t)=\delta(t)} * g_n(t)$$

$$H(s) = \int_0^\infty h(t) e^{-st} dt$$

$$H(j\omega) = \int_{-\infty}^\infty h(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$H(z) = \sum_{n=0}^\infty h(n) z^{-n}$$

用 $H(s)$ 或 $H(z)$ 表示系统,可从其零、极点分布判定 $h(t)$ 或 $h(n)$ 的变化模

式和系统的稳定性;用 $H(j\omega)$ 表示系统,可知系统在正弦输入时,系统稳定后的幅频和相频特性,对于研究系统的传输特性非常有用。

3. 系统的时域分析方法

对于 LTI 系统,求系统的零状态响应时,重点介绍卷积(对连续系统)和卷和(对离散系统)方法,归纳如下:

以 $h(t)$ 为桥梁: $y(t) = f(t) * h(t)$

以 $g_n(t)$ 为桥梁: $y(t) = f(t) * g_n(t)$

以 $s(t)$ 为桥梁: $y(t) = f'(t) * s(t)$

以 $h(n)$ 为桥梁: $y(n) = f(n) * h(n)$

4. 系统的变换域分析方法

分析 LTI 系统时,引入三种变换:即拉氏变换(s 域)、傅里叶变换(ω 域)和 z 变换(z 域)。将它们用于 LTI 系统分析时,其理论基础是卷积定理(对连续系统)和卷和定理(对离散系统),即

$$y(\cdot) = f(\cdot) * h(\cdot)$$

$$Y(s) = F(s) \cdot H(s)$$

$$Y(j\omega) = F(j\omega) \cdot H(j\omega)$$

$$Y(z) = F(z) \cdot H(z)$$

将变换域的响应函数 $Y(s)$ 、 $Y(j\omega)$ 、 $Y(z)$ 取相应的反变换,可得时域的零状态响应。

最后,将信号分析与系统分析的主要方法归纳如图 0-1 所示。

第1章 导论

1.1 教学目标

学习本章,要求学生理解信号的基本概念和信号的基本形式;认识系统的概念、性质和分类方法;了解信号与系统分析的基本思想。

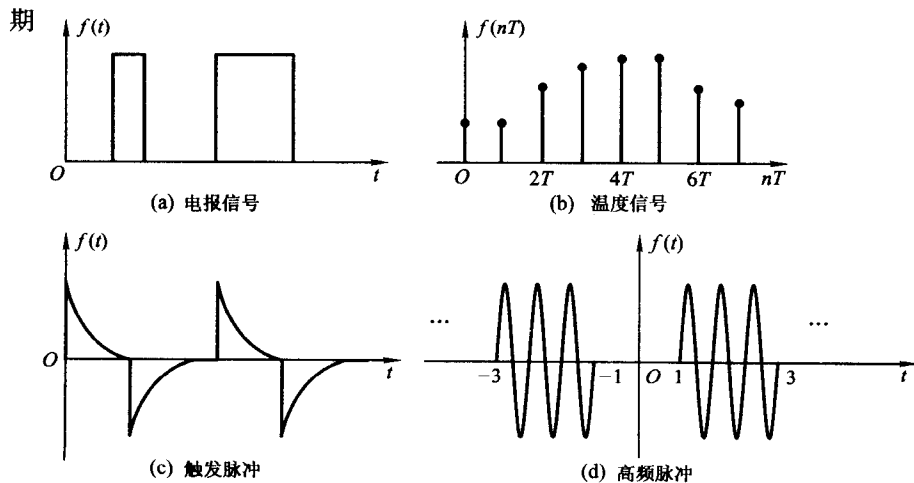
1.2 教学重点

在本章的教学中,要注意以下重点知识:

1. 信号、消息和信息的区别与联系;
2. 弄清周期信号与非周期信号、连续信号与离散信号、因果信号与非因果信号的概念;
3. 掌握线性系统的基本特性,如线性、微分特性、积分特性和频率保持性。

1.3 习题解析

1-1 题 1-1 图示信号中,哪些是连续信号? 哪些是离散信号? 哪些是周期

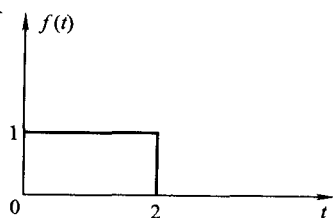


题 1-1 图

信号? 哪些是非周期信号? 哪些是有始信号?

解 (a)、(c)、(d)为连续信号;(b)为离散信号;(d)为周期信号;其余为非周期信号;(a)、(b)、(c)为有始(因果)信号。

1-2 给定题 1-2 图示信号 $f(t)$, 试画出下列信号的波形[提示: $f(2t)$ 表示将 $f(t)$ 波形压缩, $f(\frac{t}{2})$ 表示将 $f(t)$ 波形展宽]。



题 1-2 图

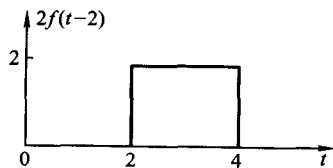
(a) $2f(t-2)$

(b) $f(2t)$

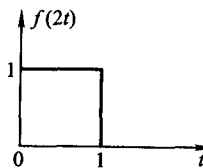
(c) $f(\frac{1}{2}t)$

(d) $f(-t+1)$

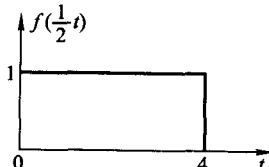
解 以上各函数的波形如图 p1-2 所示。



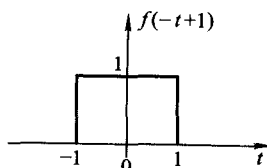
(a)



(b)



(c)



(d)

图 p1-2

1-3 如题 1-3 图示, R 、 L 、 C 元件可以看成以电流为输入, 电压为响应的简单线性系统 S_R 、 S_L 和 S_C , 试写出各系统响应电压与激励电流函数关系的表达式。

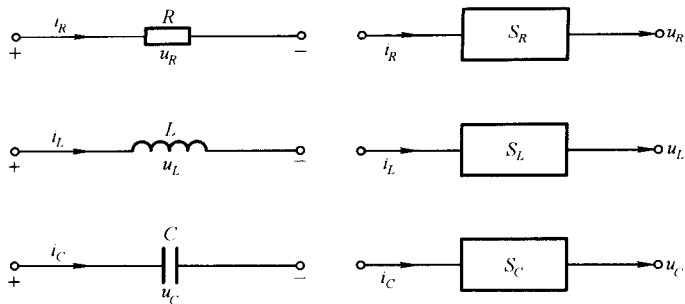
解 各系统响应与输入的关系可分别表示为

$$u_R(t) = R \cdot i_R(t)$$

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

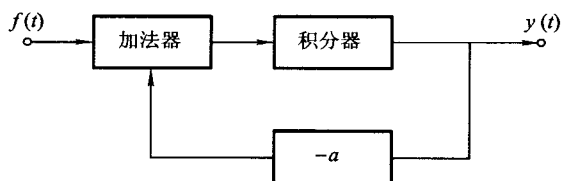
$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C(\tau) d\tau$$

1-4 如题 1-4 图示系统由加法器、积分器和放大量为 $-a$ 的放大器三个



题 1-3 图

子系统组成,系统属于何种联接形式? 试写出该系统的微分方程。



题 1-4 图

解 设加法器的输出为 $x(t)$, 由于

$$x(t) = f(t) + (-a)y(t)$$

且

$$y(t) = \int x(t) dt, x(t) = y'(t)$$

故有

$$y'(t) = f(t) - ay(t)$$

即

$$y'(t) + ay(t) = f(t)$$

1-5 已知某系统的输入 $f(t)$ 与输出 $y(t)$ 的关系为

$$y(t) = |f(t)|$$

试判定该系统是否为线性时不变系统?

解 设 T 为系统的运算子, 则 $y(t)$ 可以表示为

$$y(t) = T[f(t)] = |f(t)|$$

不失一般性, 设 $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$, 则

$$T[f_1(t)] = |f_1(t)| = y_1(t)$$

$$T[f_2(t)] = |f_2(t)| = y_2(t)$$

故有

$$T[f(t)] = |f_1(t) + f_2(t)| = y(t)$$

显然

$$|f_1(t) + f_2(t)| \neq |f_1(t)| + |f_2(t)|$$

即不满足可加性,故为非线性时不变系统。

1-6 判断下列方程所表示的系统的性质。

$$(a) \quad y(t) = \frac{df(t)}{dt}$$

$$(b) \quad y''(t) + 2y'(t) + 3y(t) = f'(t) + f(t-2)$$

$$(c) \quad y''(t) + 2ty'(t) + 2y(t) = 3f(t)$$

$$(d) \quad [y'(t)]^2 + y(t) = f(t)$$

解 (a) 线性;(b) 线性时不变;(c) 线性时变;(d) 非线性时不变。

1-7 试证明方程

$$y'(t) + ay(t) = f(t)$$

所描述的系统为线性系统。式中 a 为常数。

证明 不失一般性,设输入有两个分量,且

$$f_1(t) \rightarrow y_1(t), f_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则有

$$y_1'(t) + ay_1(t) = f_1(t)$$

$$y_2'(t) + ay_2(t) = f_2(t)$$

相加得

$$y_1'(t) + ay_1(t) + y_2'(t) + ay_2(t) = f_1(t) + f_2(t)$$

即

$$\frac{d}{dt}[y_1(t) + y_2(t)] + a[y_1(t) + y_2(t)] = f_1(t) + f_2(t)$$

可见

$$f_1(t) + f_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$$

即满足可加性,齐次性是显然的。故系统为线性的。

1-8 试证明题 1-7 的系统满足时不变性。

证明 将方程中的 t 换为 $t - t_0$, t_0 为常数。即

$$y'(t - t_0) + ay(t - t_0) = f(t - t_0)$$

由链导法则,有

$$\frac{dy(t - t_0)}{dt} = \frac{dy(t - t_0)}{d(t - t_0)} \cdot \frac{d(t - t_0)}{dt}$$

又因 t_0 为常数,故

$$\frac{d(t-t_0)}{dt} = 1$$

从而

$$\frac{dy(t-t_0)}{dt} = \frac{dy(t-t_0)}{d(t-t_0)}$$

所以有

$$\frac{dy(t-t_0)}{dt} + ay(t-t_0) = f(t-t_0)$$

即满足时不变性

$$f(t-t_0) \rightarrow y(t-t_0)$$

1-9 试一般性地证明线性时不变系统具有微分特性。

证明 设 $f(t) \rightarrow y(t)$, 则

$$f(t-\Delta t) \rightarrow y(t-\Delta t) \quad (\text{时不变性})$$

又因为

$$\frac{f(t) - f(t-\Delta t)}{\Delta t} \rightarrow \frac{y(t) - y(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (\text{线性可加性})$$

所以

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t) - f(t-\Delta t)}{\Delta t} \rightarrow \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{y(t) - y(t-\Delta t)}{\Delta t}$$

即有

$$f'(t) \rightarrow y'(t)$$

1-10 若有线性时不变系统的方程为

$$y'(t) + ay(t) = f(t)$$

在非零 $f(t)$ 作用下其响应 $y(t) = 1 - e^{-t}$, 试求方程

$$y'(t) + ay(t) = 2f(t) + f'(t)$$

的响应。

解 因为 $f(t) \rightarrow y(t) = 1 - e^{-t}$, 由线性关系, 则

$$2f(t) \rightarrow 2y(t) = 2(1 - e^{-t})$$

由线性系统的微分特性, 有

$$f'(t) \rightarrow y'(t) = e^{-t}$$

故响应

$$\begin{aligned} 2f(t) + f'(t) &\rightarrow y(t) = 2(1 - e^{-t}) + e^{-t} \\ &= 2 - e^{-t} \end{aligned}$$

第2章 连续系统的时域分析

2.1 教学目标

学习本章,要求学生掌握连续系统时域模型的数学描述方法。阶跃响应和冲激响应的求解及基本模式、卷积积分的概念和应用。

2.2 教学重点

1. 连续系统微分方程及其解的基本特点;
2. 阶跃信号的概念和阶跃响应的求解;
3. 冲激信号的概念和冲激响应的求解;
4. 系统的特征函数及其应用;
5. 卷积及其在系统分析中的应用。

2.3 重点指导

2.3.1 线性连续系统及其解的形式

系统的微分方程一般形式为

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^m b_j f^{(j)}(t)$$

式中, $f(t)$ 为系统的输入, $y(t)$ 为系统的响应, (i) 和 (j) 分别表示 $y(t)$ 和 $f(t)$ 求导的次数。

在线性系统中,系统的响应有如下三个特性:

- (1) 可分解性:全响应可分解为零输入响应 $y_{zi}(t)$ 和零状态响应 $y_{zs}(t)$, 即

$$y(t) = y_{zi}(t) + y_{zs}(t)$$

- (2) 齐次性: $y_{zi}(t)$ 和 $y_{zs}(t)$ 均满足齐次性, 即

$$ax(0) \rightarrow ay_{zi}(t)$$

$$bf(t) \rightarrow by_{zs}(t)$$

- (3) 叠加性:零输入响应和零状态响应均满足叠加性, 即