



# 信号与系统

---

Lecture 1

第一章 绪论

计算机科学与技术学院 孙伟平



# 本讲内容

---

- 概述
  - 无处不在的信号与系统问题
  - 《信号与系统》课程介绍
- 教学安排
  - 教学内容与课时安排
  - 教材及参考书目
  - 成绩评定
- 信号与系统基础
  - 信号、系统的分类与描述
  - 信号的简单处理

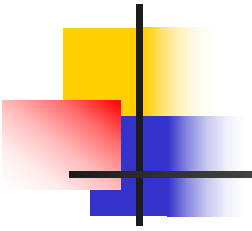
# 概述

- 我们每天都在进行消息的传递。



# 更快，更广，更强



- 
- 消息**传输**，就是将带有信息的**信号**，通过某种**系统**，从发送者传送给接收者。
  - 在实际应用中，为了满足某些需要（例如为了能够用无线电同时传输多个电台的信号），还要对**信号**进行加工，包括提取，变换，分析等**处理**。
  - 这些工作都是用一些具有特定结构特定功能的设备组成，这些设备都是**系统**。

信号与系统问题无处不在。

# 语音去噪

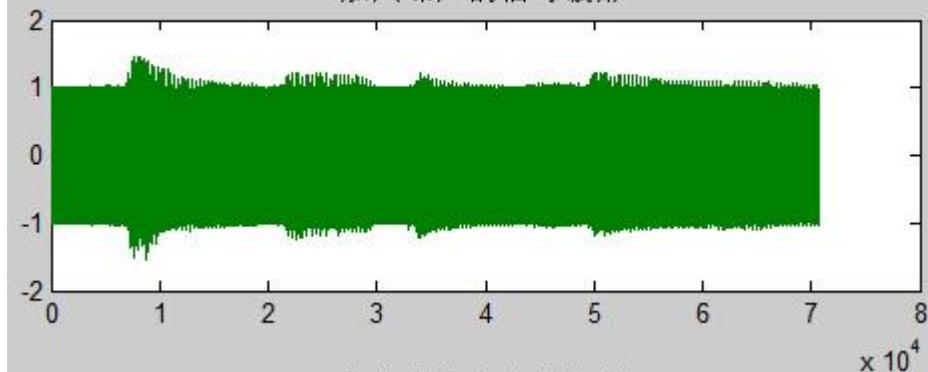
语音（含噪声）



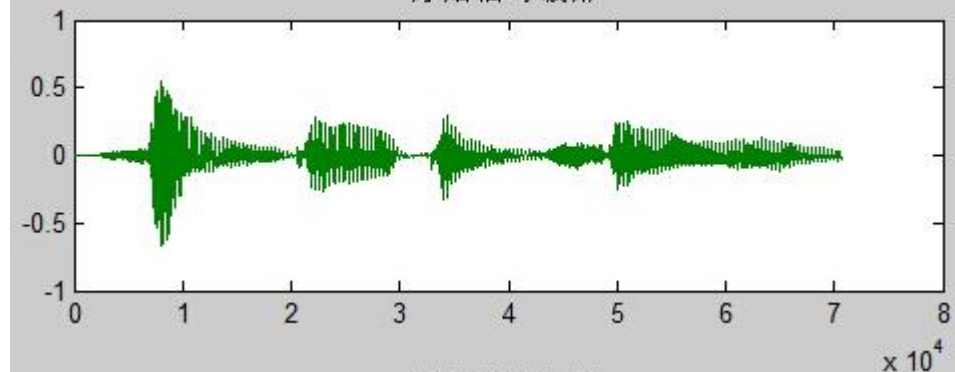
语言（纯净）



加入噪声的信号波形



原始信号波形

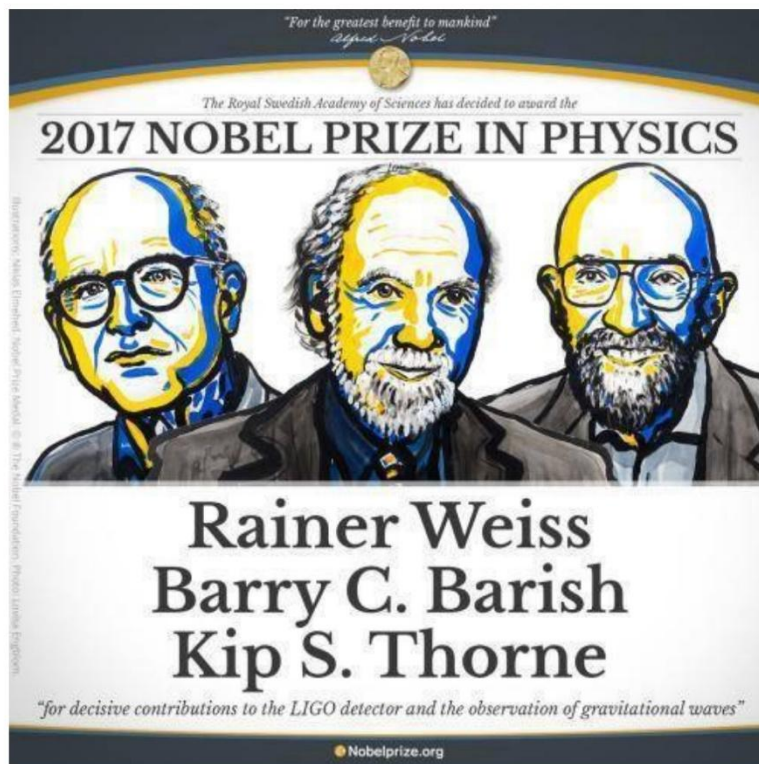




# 引力波

2015年9月14日，在爱因斯坦预测引力波存在近100年后，升级版LIGO第一次观测到引力波。

2017年诺贝尔物理学奖授予对首次探测引力波做出巨大贡献的LIGO团队科学家。





# Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than  $5.1\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410^{+160}_{-180}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$  and  $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$ , with  $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$  radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

## I. INTRODUCTION

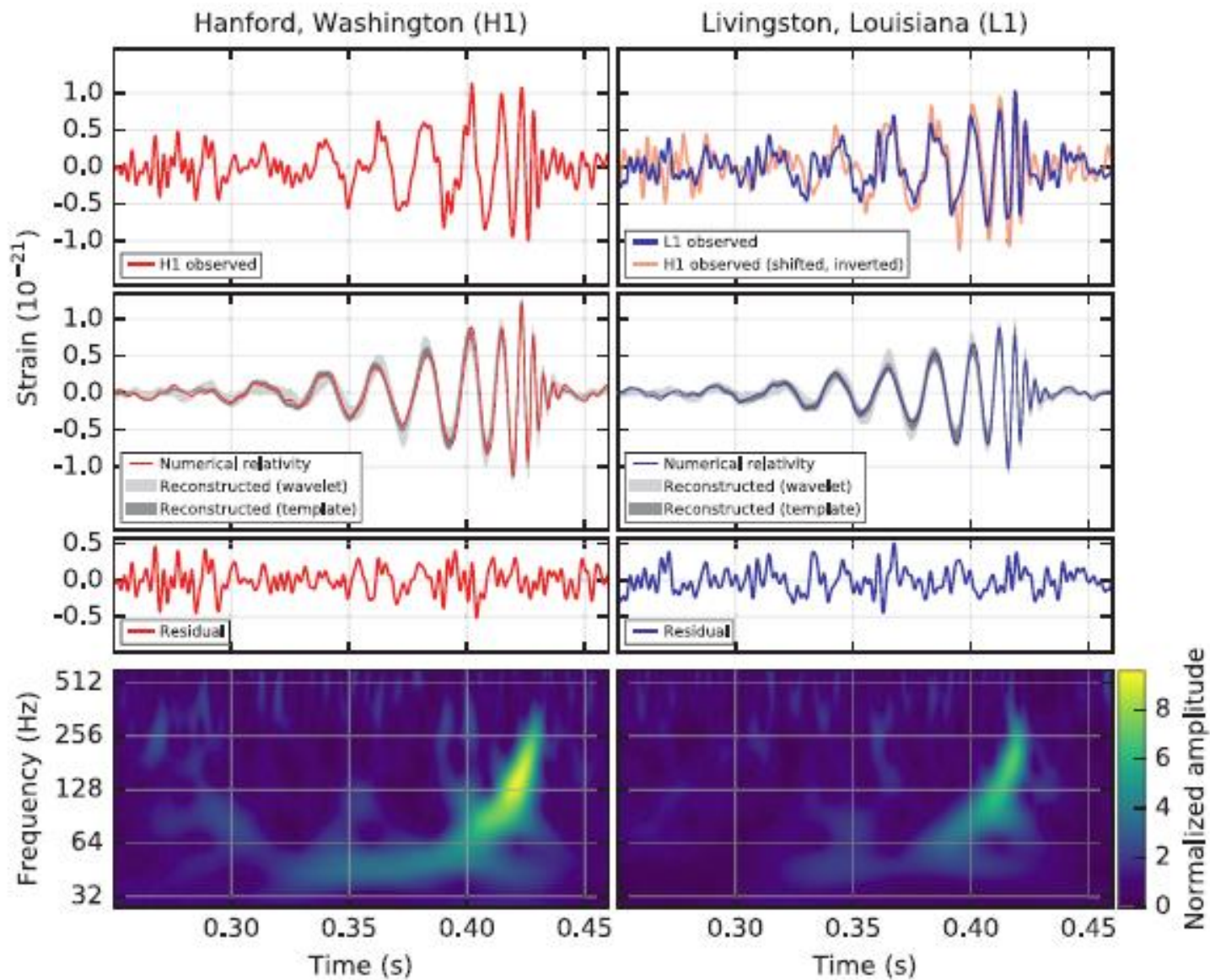
In 1916, the year after the final formulation of the field equations of general relativity, Albert Einstein predicted the existence of gravitational waves. He found that the linearized weak-field equations had wave solutions: transverse waves of spatial strain that travel at the speed of light, generated by time variations of the mass quadrupole moment of the source [1,2]. Einstein understood that gravitational-wave amplitudes would be remarkably small; moreover, until the Chapel Hill conference in 1957 there was significant debate about the physical reality of gravitational waves [3].

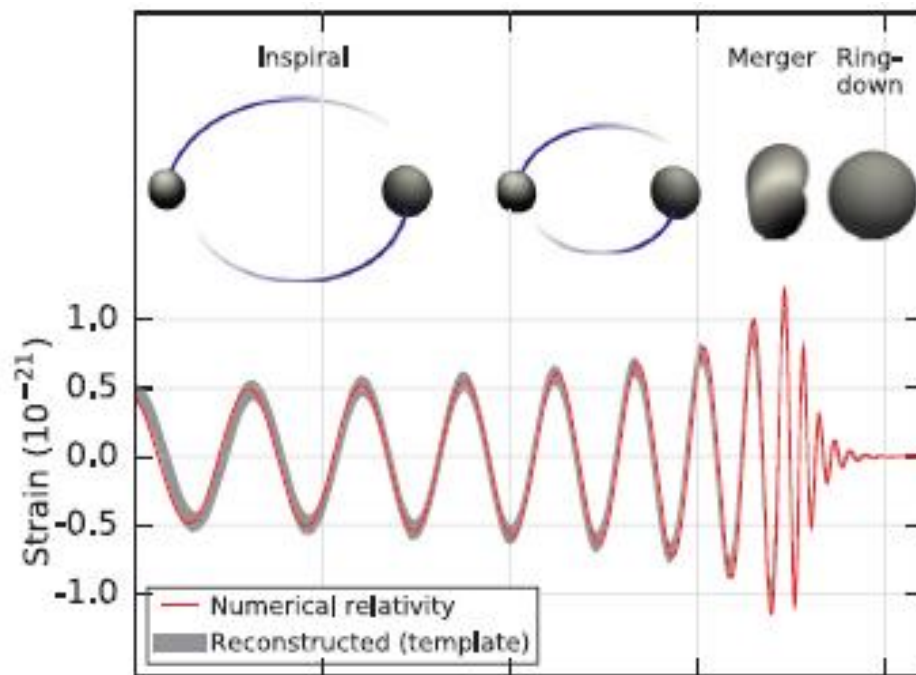
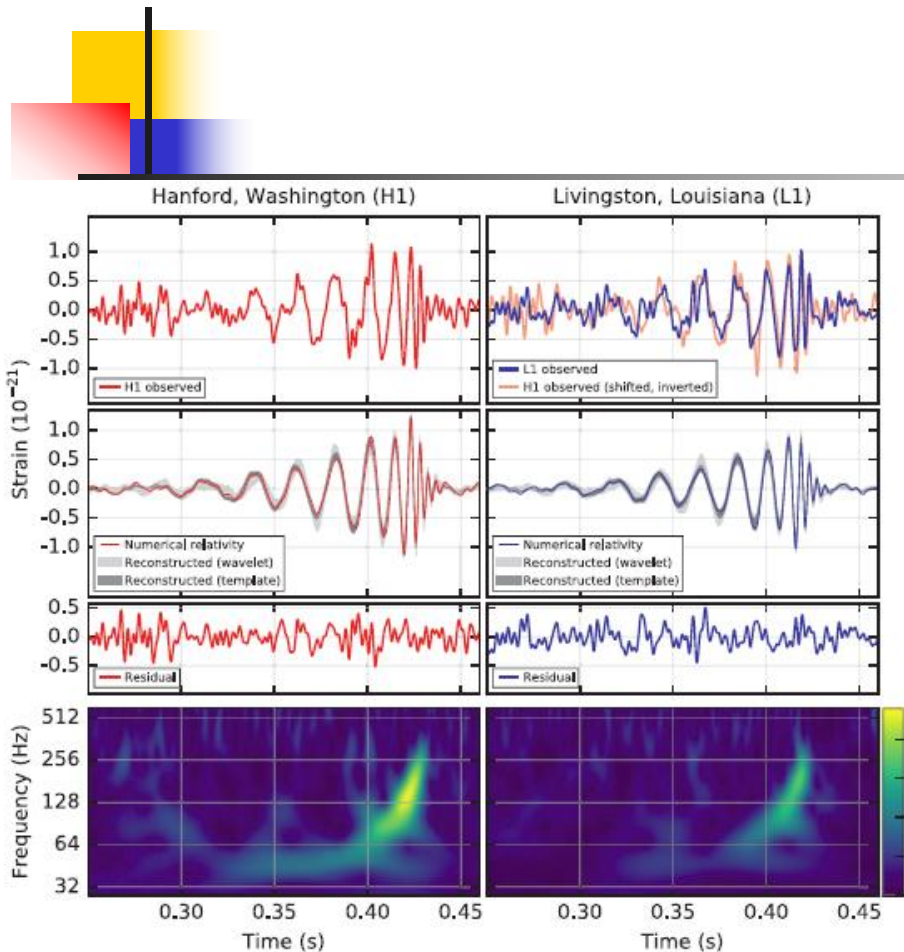
Also in 1916, Schwarzschild published a solution for the field equations [4] that was later understood to describe a black hole [5,6], and in 1963 Kerr generalized the solution to rotating black holes [7]. Starting in the 1970s theoretical work led to the understanding of black hole quasinormal

The discovery of the binary pulsar system PSR B1913+16 by Hulse and Taylor [20] and subsequent observations of its energy loss by Taylor and Weisberg [21] demonstrated the existence of gravitational waves. This discovery, along with emerging astrophysical understanding [22], led to the recognition that direct observations of the amplitude and phase of gravitational waves would enable studies of additional relativistic systems and provide new tests of general relativity, especially in the dynamic strong-field regime.

Experiments to detect gravitational waves began with Weber and his resonant mass detectors in the 1960s [23], followed by an international network of cryogenic resonant detectors [24]. Interferometric detectors were first suggested in the early 1960s [25] and the 1970s [26]. A study of the noise and performance of such detectors [27], and further concepts to improve them [28], led to







从不同角度去认识信号

信号的分解

分解的实现

时域波形  $\rightarrow$  频域频谱  $\rightarrow \dots$

频谱的物理意义

滤波



# 《信号与系统》课程

- 是信息类专业本科生的一门重要的**专业基础**课程，研究信号经系统传输或处理的一般规律，着重基本概念和基本分析方法。
- 对信息大类本科生的许多后续课程有着非常重要的作用，同时对学生今后进入研究生阶段学习许多课程也有很重要的作用。
- 特点：严格的数学理论，现代技术的实践背景
- 计算机专业的课程是数据表达的**逻辑模型**，信号与系统建立的是更底层的、代表了某种物理意义的**数学模型**。



# 学时安排（32学时）

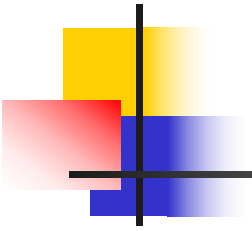
第一章 绪论	2
第二章 连续时间系统的时域分析	4
第三章 连续信号的正交分解	6
第四章 连续时间系统的频域分析	2
第五章 连续时间系统的复频域分析	4
第六章 连续时间系统的系统函数	1
第七章 离散时间系统的时域分析	6
第八章 离散时间系统的变换域分析	6
总复习	1



# 学习内容

第一章 绪论（含：连续时间信号的时域分析）	
第二章 连续时间系统的时域分析	
第三章 连续时间信号的频域分析	
第四章 连续时间系统的频域分析	
第五章 连续时间系统的复频域分析 （含：连续时间信号的复频域分析）	
第六章 连续时间系统的系统函数	
第七章 离散时间系统的时域分析 （含：离散时间信号的时域分析）	
第八章 离散时间系统的变换域分析 （含：离散时间信号的变换域分析）	





第一章 绪论（含：连续时间 <b>信号</b> 的时域分析）	<b>信号</b>
第二章 连续时间 <b>系统</b> 的时域分析	<b>系统</b>
第三章 连续时间 <b>信号</b> 的频域分析	<b>信号</b>
第四章 连续时间 <b>系统</b> 的频域分析	<b>系统</b>
第五章 连续时间 <b>系统</b> 的复频域分析 （含：连续时间 <b>信号</b> 的复频域分析）	<b>信号系统</b>
第六章 连续时间 <b>系统</b> 的系统函数	<b>系统</b>
第七章 离散时间 <b>系统</b> 的时域分析 （含：离散时间 <b>信号</b> 的时域分析）	<b>信号系统</b>
第八章 离散时间 <b>系统</b> 的变换域分析 （含：离散时间 <b>信号</b> 的变换域分析）	<b>信号系统</b>



第一章 绪论 (含: 连续时间信号的时域分析)	连续 信号
第二章 连续时间系统的时域分析	连续 系统
第三章 连续时间信号的频域分析	连续 信号
第四章 连续时间系统的频域分析	连续 系统
第五章 连续时间系统的复频域分析 (含: 连续时间信号的复频域分析)	连续 信号系统
第六章 连续时间系统的系统函数	连续 系统
第七章 离散时间系统的时域分析 (含: 离散时间信号的时域分析)	离散 信号系统
第八章 离散时间系统的变换域分析 (含: 离散时间信号的变换域分析)	离散 信号系统



第一章 绪论 (含: 连续时间信号的时域分析)	连续 信号 时域
第二章 连续时间系统的时域分析	连续 系统 时域
第三章 连续时间信号的频域分析	连续 信号 频域
第四章 连续时间系统的频域分析	连续 系统 频域
第五章 连续时间系统的复频域分析 (含: 连续时间信号的复频域分析)	连续 信号系统 复频域
第六章 连续时间系统的系统函数	连续 系统 复频域
第七章 离散时间系统的时域分析 (含: 离散时间信号的时域分析)	离散 信号系统 时域
第八章 离散时间系统的变换域分析 (含: 离散时间信号的变换域分析)	离散 信号系统 变换域

# 主要内容 (1) 连续时间信号与系统

第1章

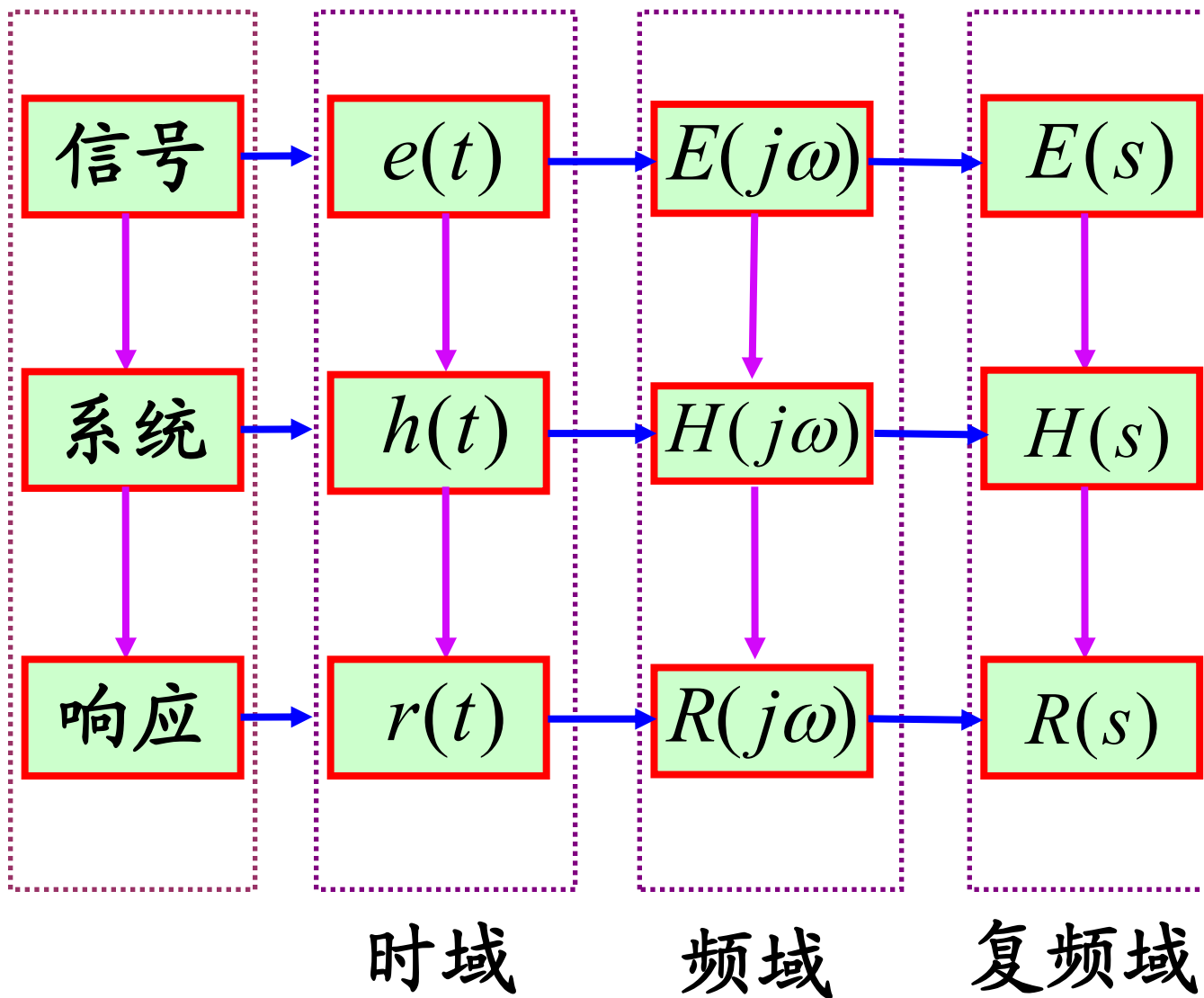
第2章

第3章

第4章

第5章

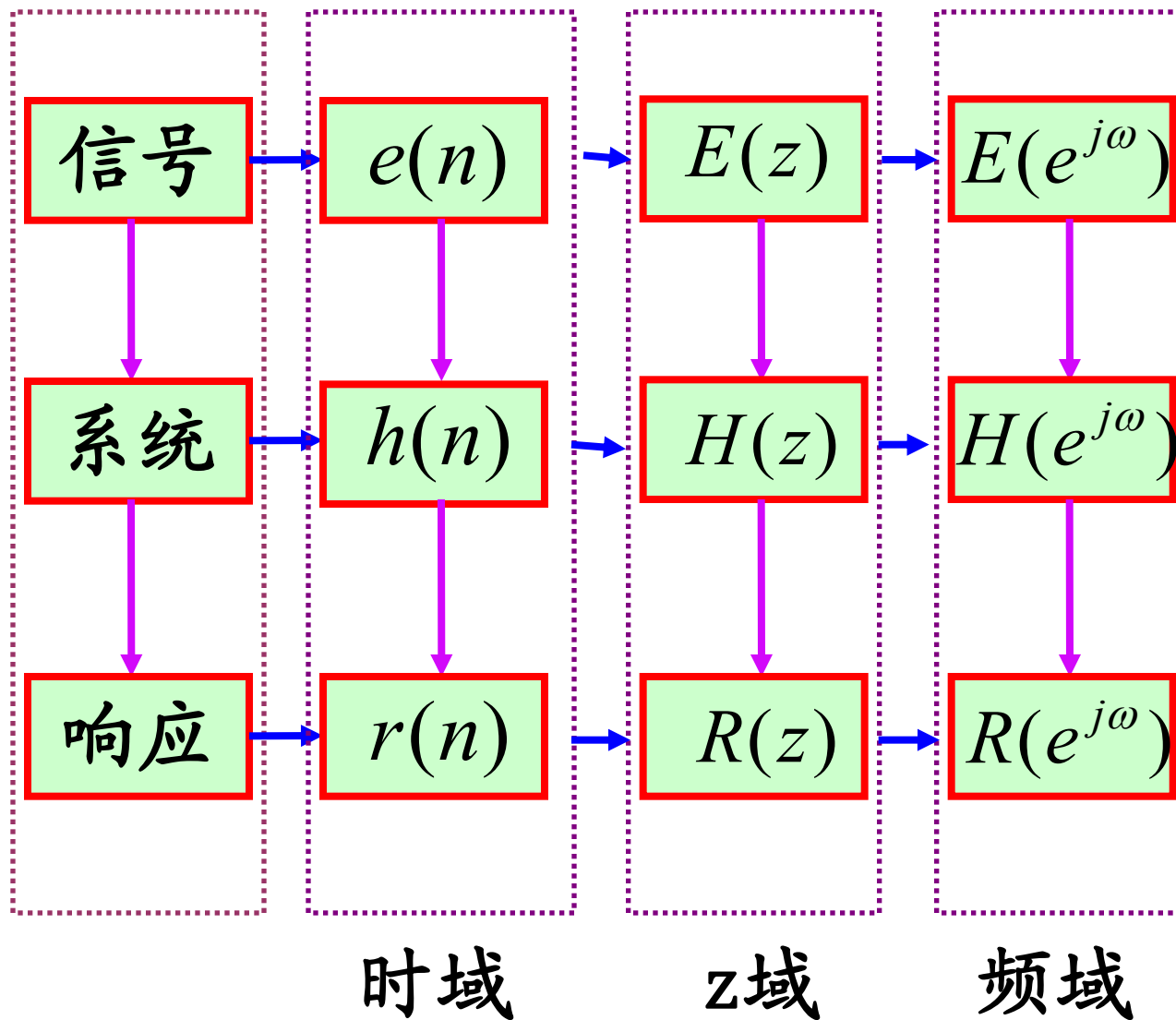
第6章



# 主要内容 (2) 离散时间信号与系统

第7章

第8章





## 三次握手



**连续**  
**离散**



**时域**  
**变换域**



**频域**  
**复频域**



# 《信号与系统》教材

- 《信号与线性系统》（第六版）（管致中等编著）
- 该教材初版于1979年，其第二版获国家级优秀教材奖，第三版获教育部科技进步二等奖，第六版为“十二五”国家级规划教材。

## 参考书目

- 郑君里 等编著. 信号与系统(第3版). 高等教育出版社
- Alan V. Oppenheim. 信号与系统(第二版). 电子工业出版社
- 信号与系统学习指导与题解. 容太平主编. 武汉: 华中科技大学出版社



# 成绩评定

---

- 平时成绩（占总成绩的30-40%）
  - 课堂参与（出勤率，提问，课堂测验等）
  - 作业
- 期末考试（占总成绩的60-70%）
  - 闭卷笔试

作业：按时交作业，作业有有效期

All students participating in the class must agree to abide by the following code of conduct:

1. My answers to homework, quizzes and exams will be my own work (except for assignments that explicitly permit collaboration)
2. I will not make solutions to homework, quizzes or exams available to anyone else.
3. I will not engage in any other activities that will dishonestly improve my results or dishonestly improve/hurt the results of others.



# 第一章 绪论

---

基本要求：了解和掌握信号与系统的定义及其分类，理解信号的时域运算和波形变换方法。掌握系统的线性、时不变、因果等特性。

重点与难点：信号分类。信号的时域运算与变换。系统的分类及特性。



## § 1.2 信号的概念

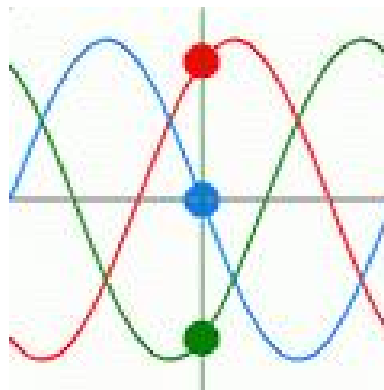
### 1. 什么是信号

消息

声、光、电等

消息

**定义：** 信号是随着时间变化的某种物理量。





---

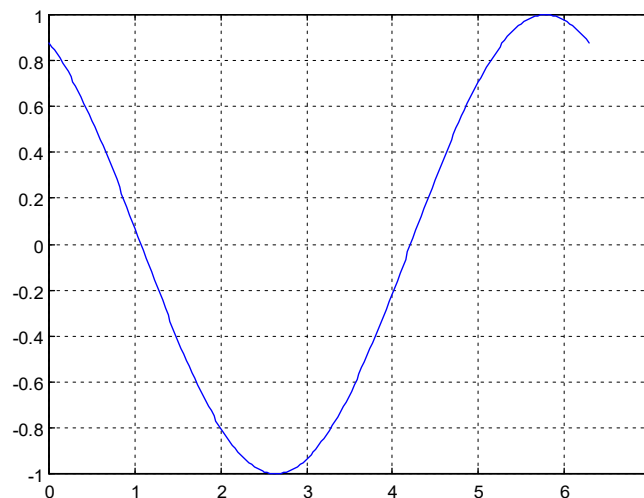
信号是随着时间变化的某种物理量。

- 信号是一个变化量。
- 信号未必是物理量。
- 信号未必是随时间变化的量。

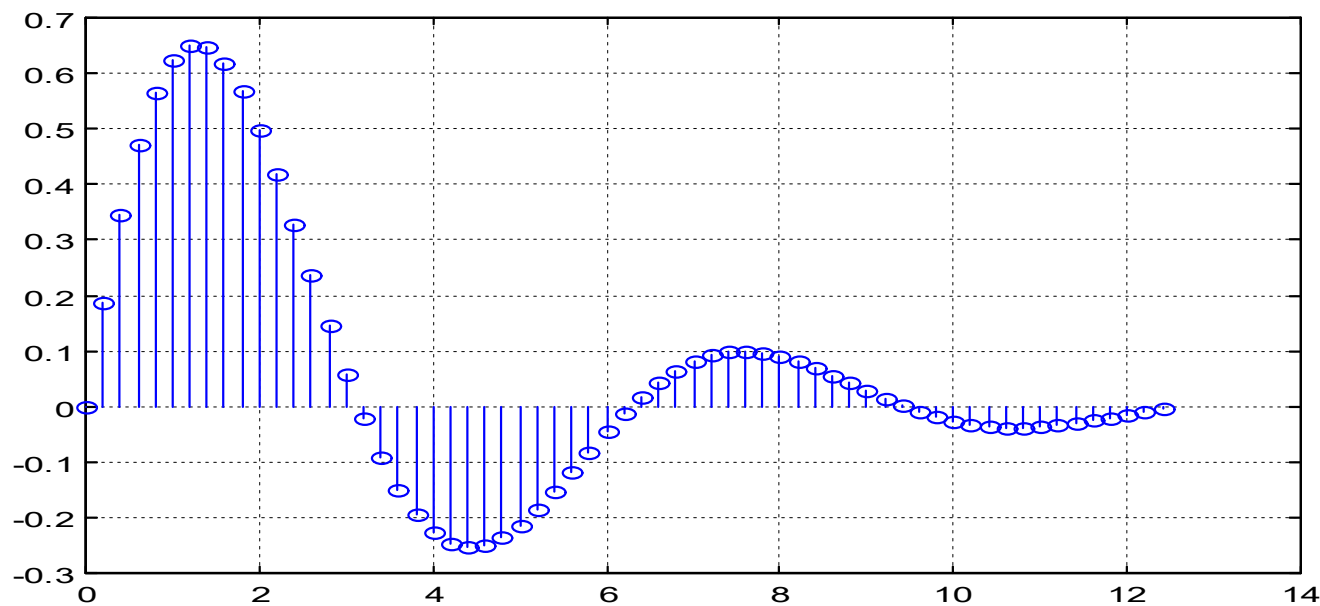
本课程中信号用函数来表示。

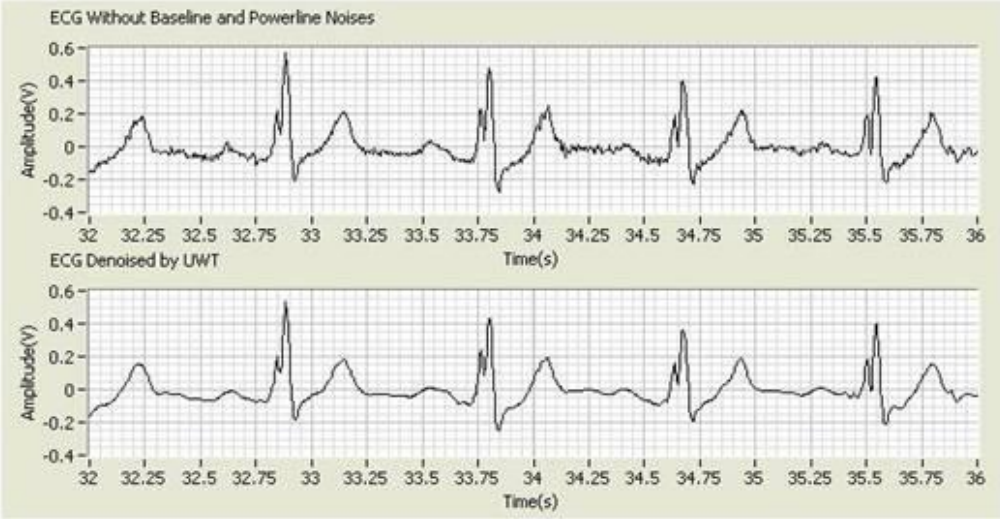
# 函数举例

$$y(t) = A \cos(t + 0.5)$$



$$y(k) = e^{-3k} \sin(k)$$







## 2. 信号的分类

---

- 信号分为： 确定性信号与随机信号

连续信号与离散信号

周期信号与非周期信号

能量信号与功率信号

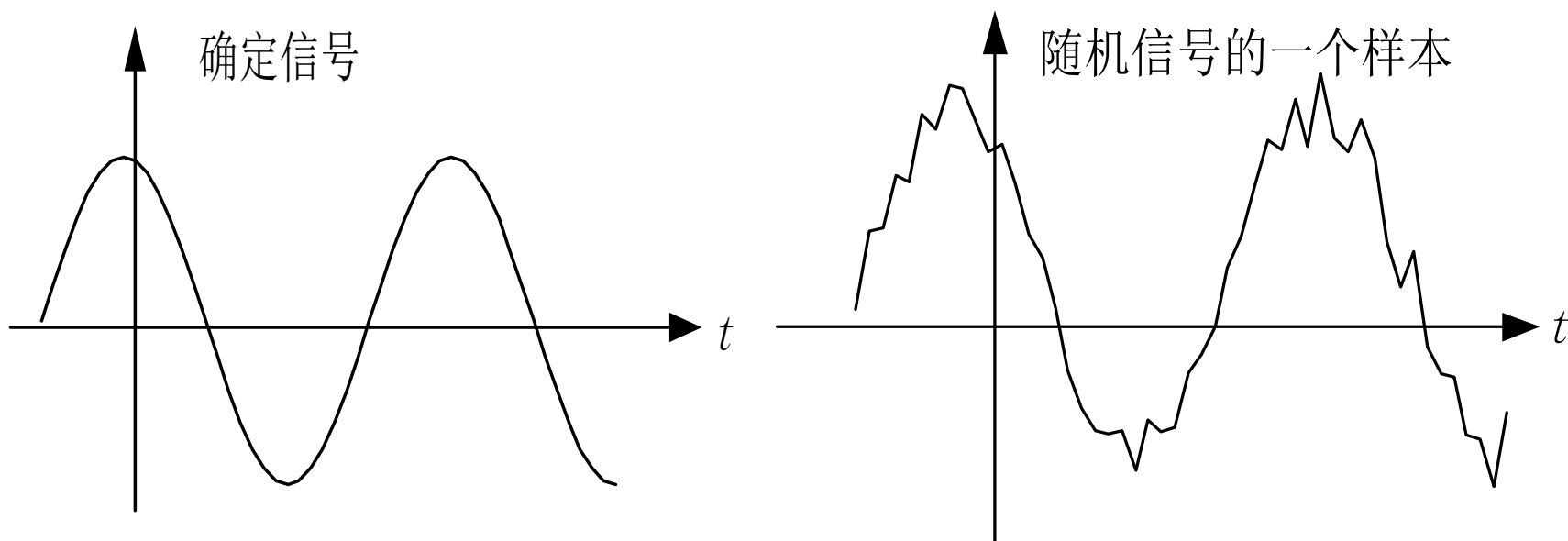


# 确定信号与随机信号

按信号随时间变化的规律:

**确定信号**是指能够以确定的时间函数表示的信号。

**随机信号**也称为不确定信号，不是时间的确定函数。

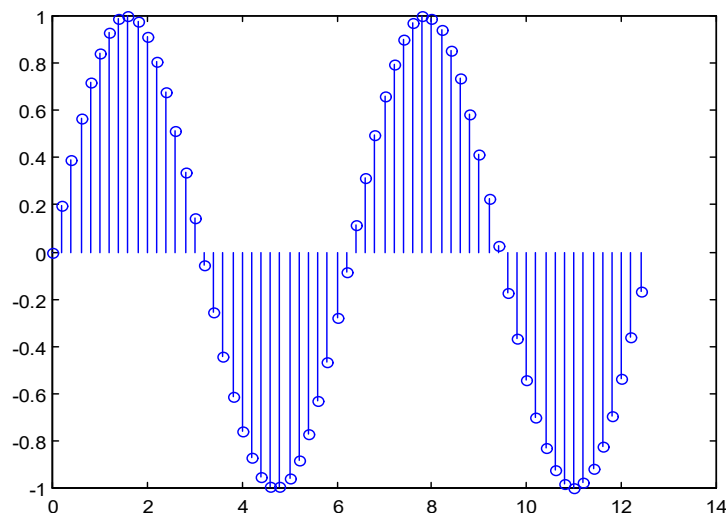
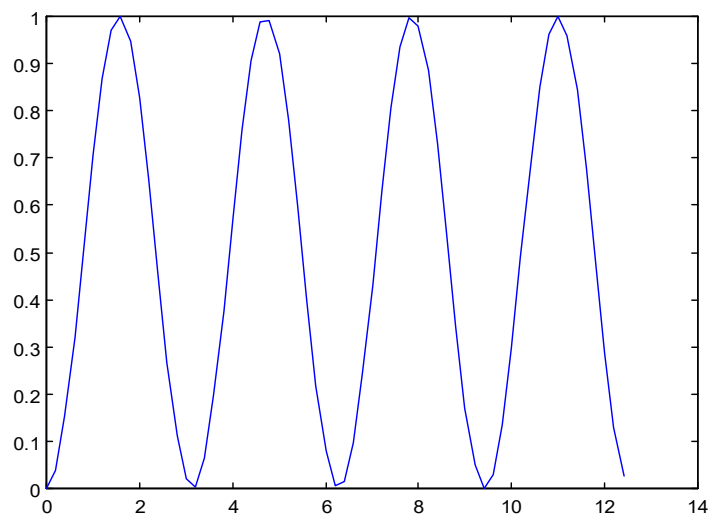


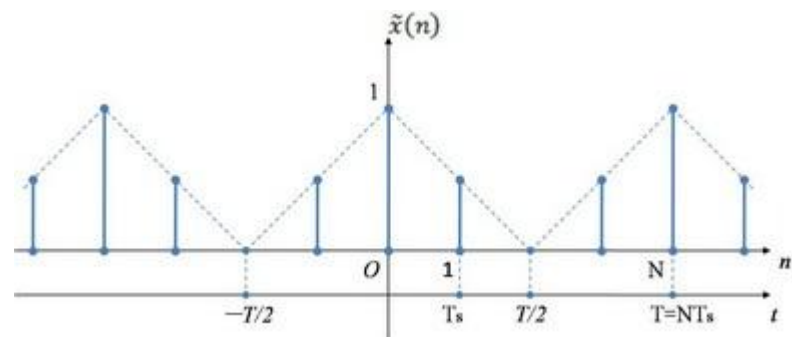
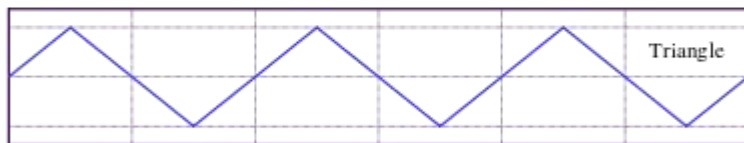
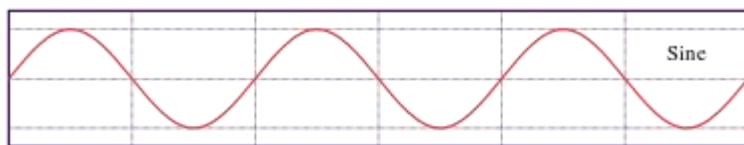
# 连续信号与离散信号

按自变量的取值特点:

**连续时间**信号: 用全体实数描写时间。

**离散时间**信号: 用特定的整数(实数)描写时间。





# 信号

连续

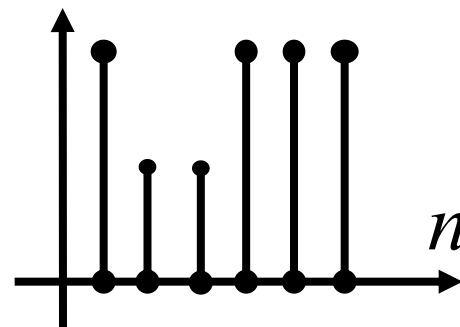
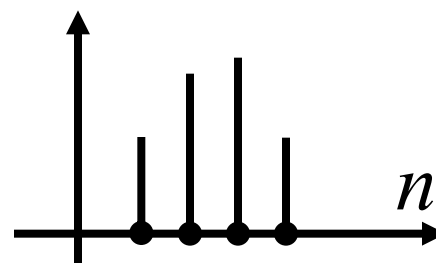
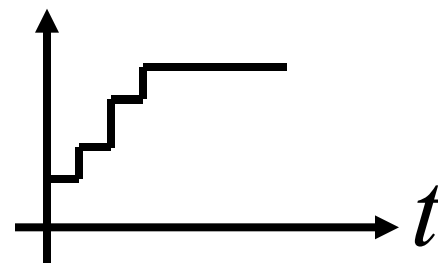
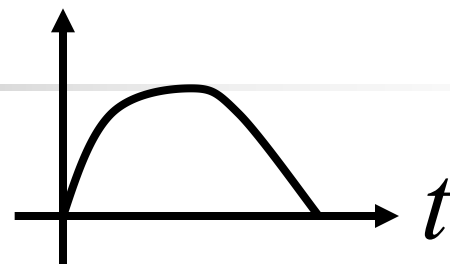
模拟：时间、幅值均连续

量化：时间连续、幅值离散

离散

抽样：时间离散、幅值连续

数字：时间、幅值均离散





# 周期信号与非周期信号

对连续信号 $f(t)$ ，若对所有 $t$ 均有

$$f(t)=f(t+T)$$

则称 $f(t)$ 为连续周期信号，满足上式的最小正数 $T$ 称为 $f(t)$ 的周期。

对离散信号 $f(k)$ ，若对所有整数 $k$ 均有

$$f(k)=f(k+N)$$

就称 $f(k)$ 为离散周期信号或周期序列。满足上式的最小正整数 $N$ 称为 $f(k)$ 的周期。



例1 判定下列信号是否为周期信号。

(1)  $\cos(10t) - \cos(30t)$

(2)  $\cos(2t) - \cos(\pi t)$

(3)  $e^{j2t}$

(4)  $[5 \sin(8t)]^2$

# 能量信号与功率信号

若将信号  $f(t)$  设为电压或电流，则加载在单位电阻上产生的瞬时功率为  $|f(t)|^2$ ，在一定的时间区间内会消耗一定的能量。把该能量对时间区间取平均，即得信号在此区间内的平均功率。

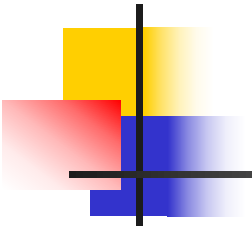
$$E \triangleq \lim_{\tau \rightarrow \infty} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} |f(t)|^2 dt$$

$$E = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{-N}^N |f(k)|^2$$

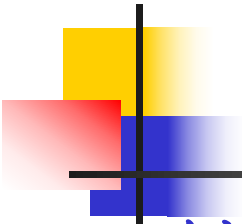
$$P \triangleq \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} |f(t)|^2 dt$$

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




$$E \triangleq \lim_{\tau \rightarrow \infty} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} |f(t)|^2 dt \quad P \triangleq \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} |f(t)|^2 dt$$

- 如果在无限大时间区间内信号的能量为有限值(此时平均功率 $P=0$ )，就称该信号为能量有限信号，简称能量信号。
- 如果在无限大时间区间内，信号的平均功率为有限值(此时信号能量 $E=\infty$ )，则称此信号为功率有限信号，简称功率信号。
- 有的信号即不是能量信号，也不是功率信号。



例如:  $f(t) = \cos(\omega t)$   $T = \frac{2\pi}{\omega}$

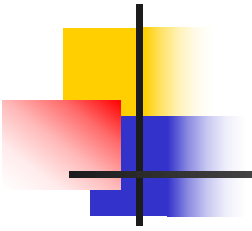
$$E_0 = \int_0^T |f(t)|^2 dt = \int_0^T |\cos(\omega t)|^2 dt = \frac{T}{2}$$

$$\therefore E \rightarrow \infty$$

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2}$$

是功率信号。

周期信号是功率信号。


$$f(k) = 0.5^k$$

$$E = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{-N}^N |f(k)|^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{-N}^N 0.5^{2k} = \infty$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{-N}^N |f(k)|^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{-N}^N 0.5^{2k} = \infty$$

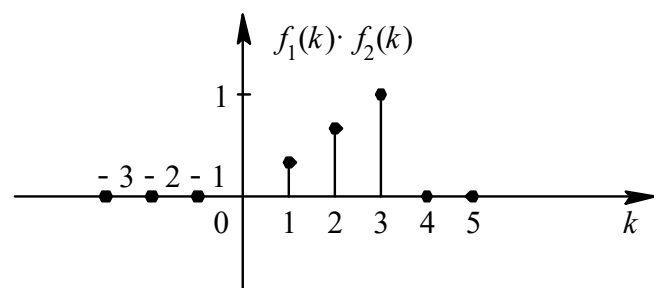
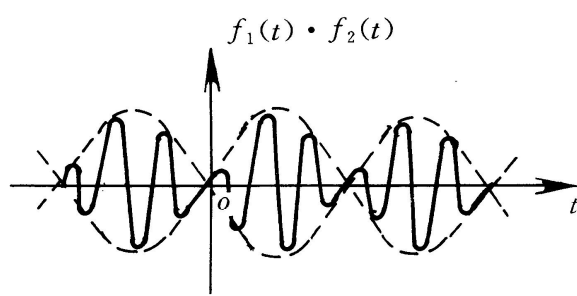
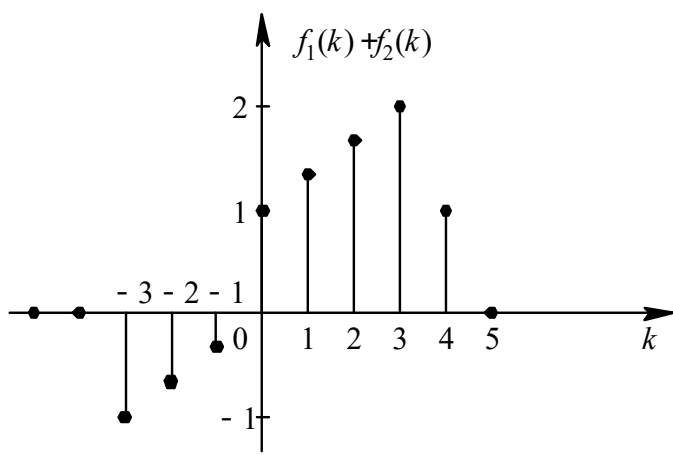
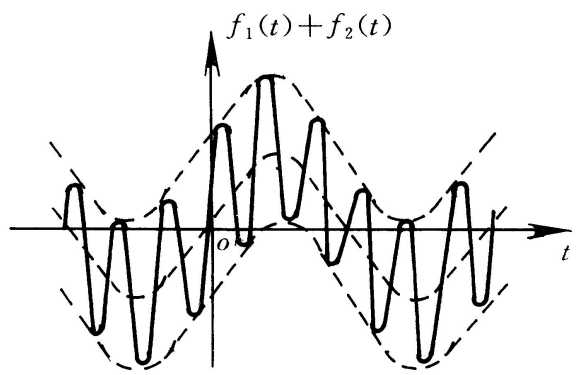
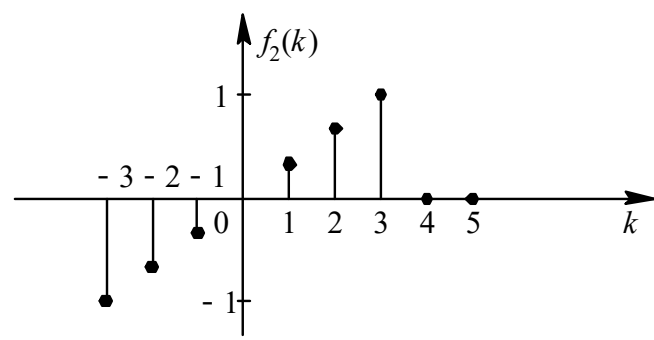
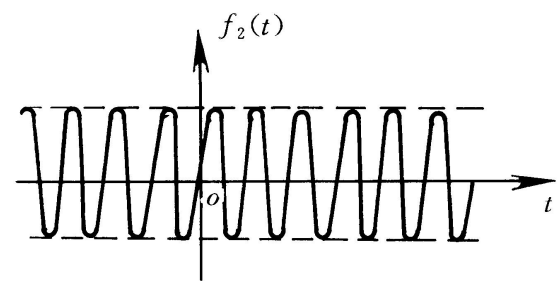
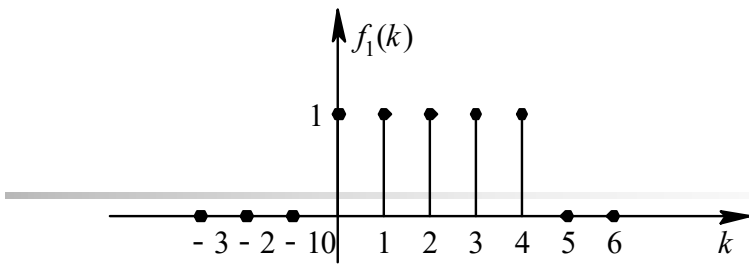
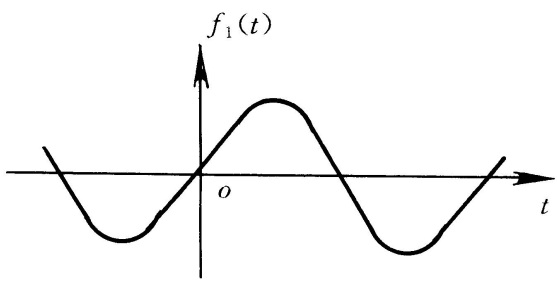
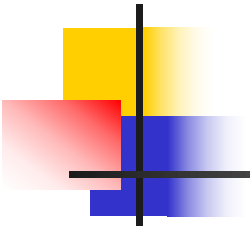
即不是能量信号，也不是功率信号。



## § 1.3 信号的运算

---

- 相加与相乘
- 微分与积分
- 延时
- 反褶
- 尺度变换





例2 将函数 $f(-2t)$ 的图形向右平移 $\frac{5}{2}$ ，得到的函数是（ ）。

A.  $f(-2t + \frac{5}{2})$

B.  $f(-2t - \frac{5}{2})$

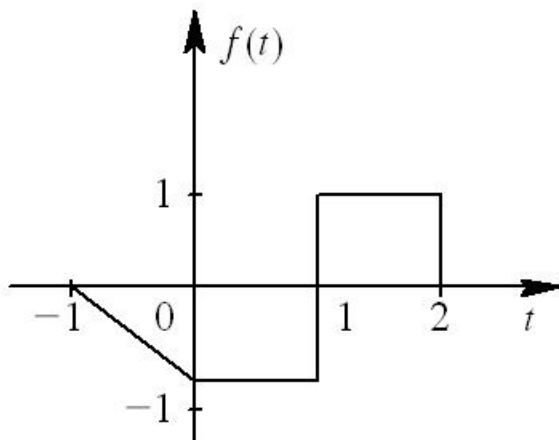
C.  $f(-2t + 5)$

D.  $f(-2t - 5)$

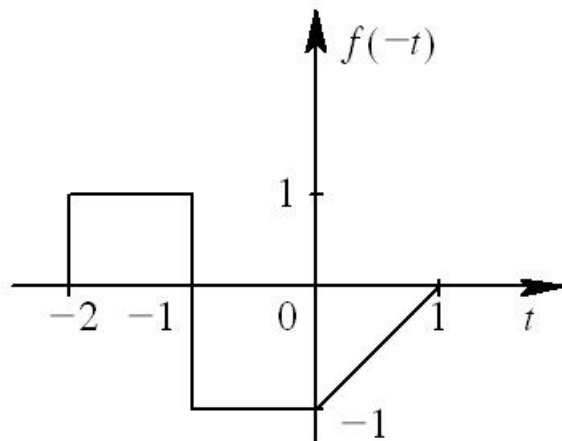
答案：C

例3 信号 $f(t)$ 的波形如图 (a) 所示，试画出 $f(1-2t)$ 的波形。

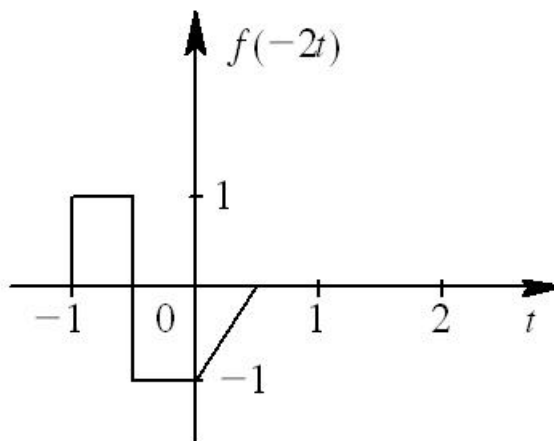
$$f(t) \rightarrow f(-t) \rightarrow f(-2t) \rightarrow f(1-2t)$$



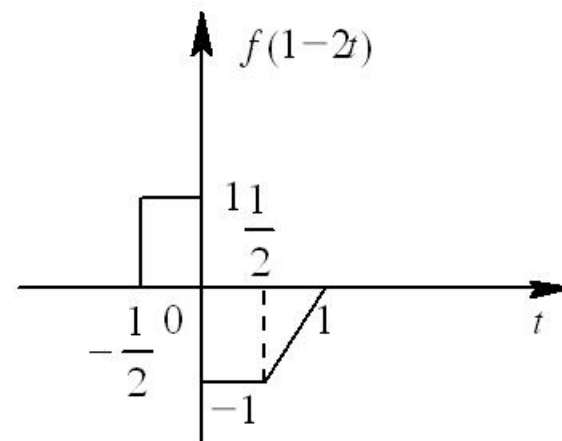
(a)



(b)

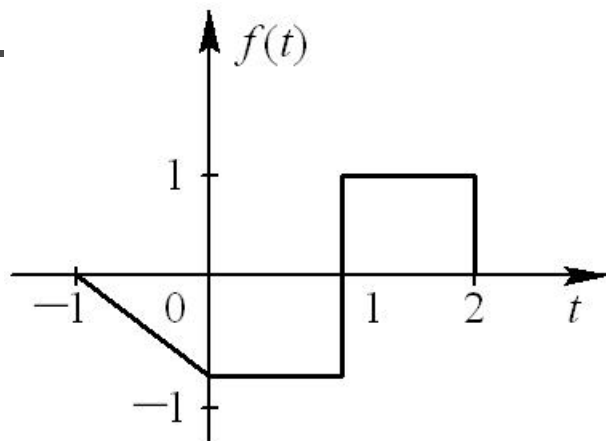


(c)



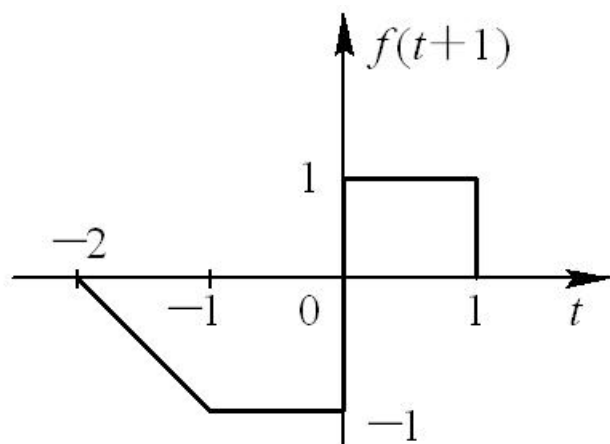
(d)



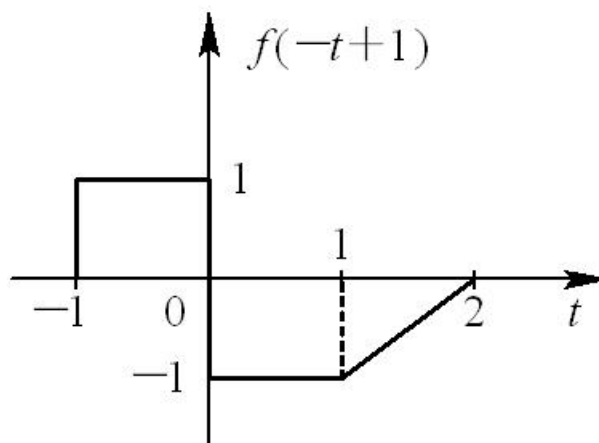


(a)

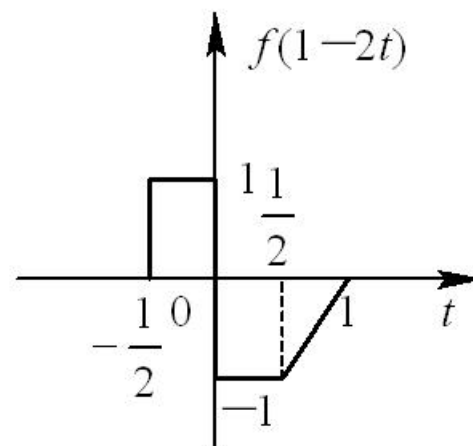
$$f(t) - f(t+1) - f(-t+1) - f(1-2t)$$



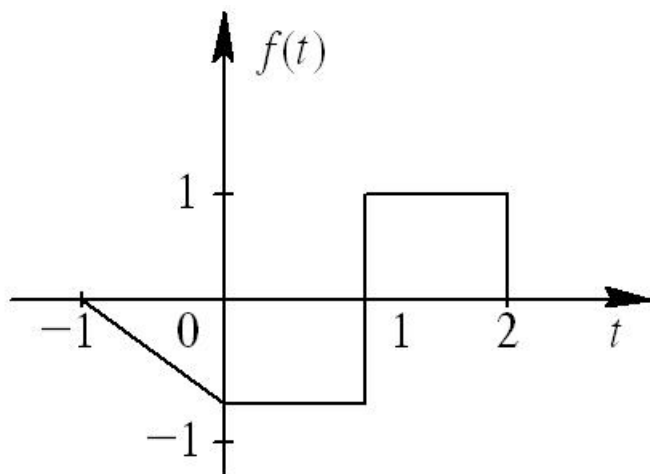
(b)



(c)

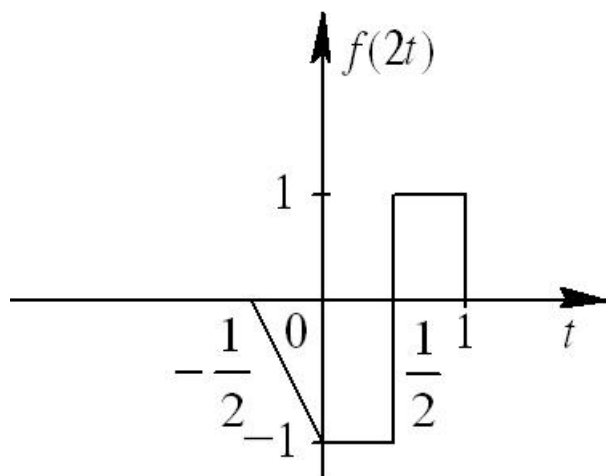


(d)

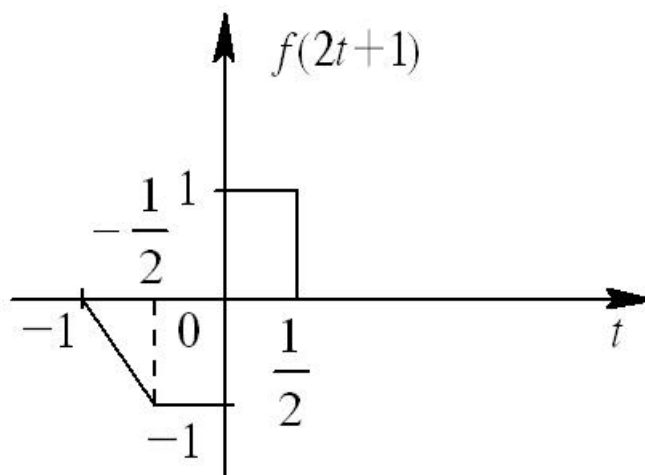


(a)

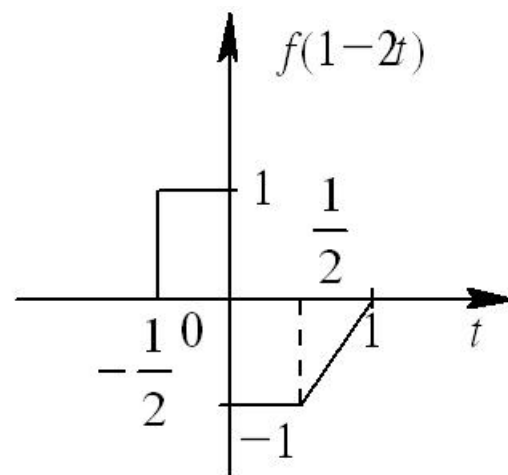
$$f(t) - f(2t) - f(2t+1) - f(1-2t)$$



(b)

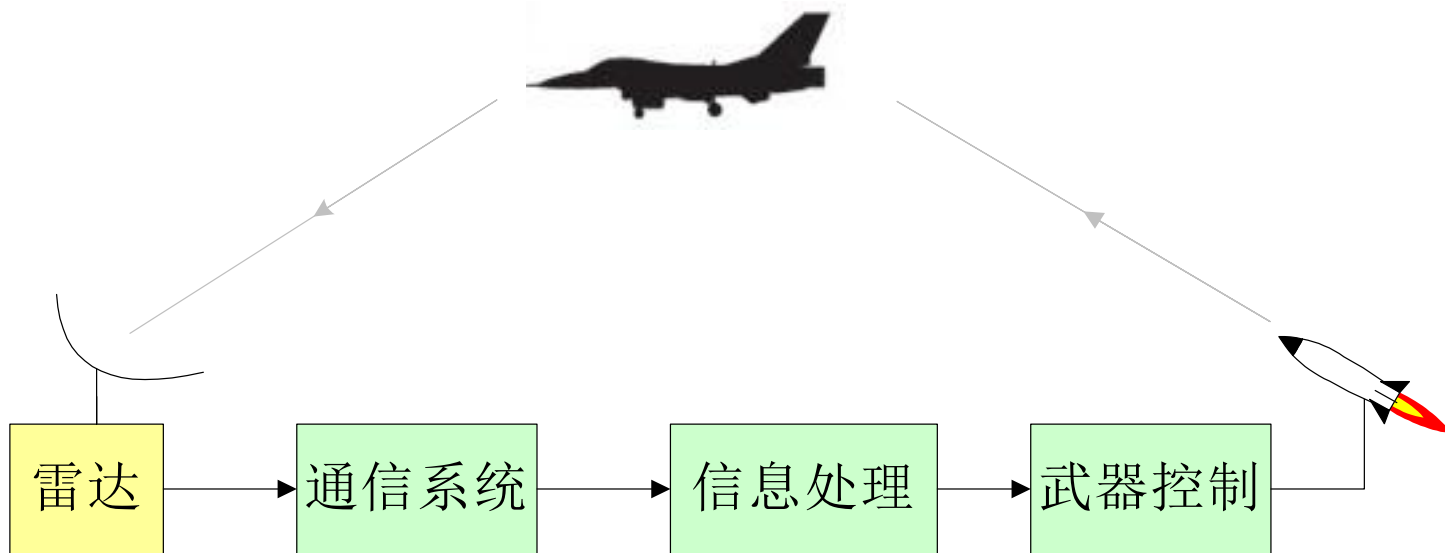


(c)



(d)

## § 1.4 系统的概念



系统（system）：由若干相互联系、相互作用的单元组成的具有一定功能的整体。



对系统进行研究的内容包括：

1. 已知系统特性和输入信号，求系统的输出；
2. 已知系统的输入和输出信号，求系统特性；
3. 已知输入信号和欲得到的输出信号，构造系统。



# 1. 系统模型

---

所谓系统模型是指对实际系统基本特性的一种抽象描述。

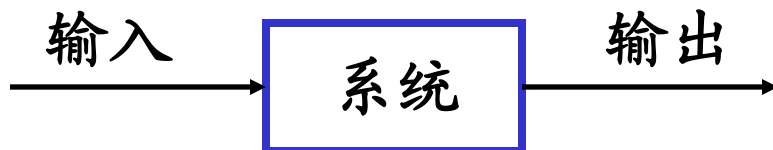
根据不同需要，系统模型往往具有不同形式。

- 电路图
- 模拟框图
- 信号流图
- 数学方程

系统的描述方法：

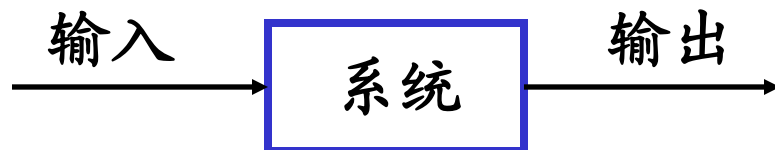
- 输入输出方程
- 状态空间方程

## 2. 系统分类



- 连续时间系统和离散时间系统
- 线性系统和非线性系统
- 时不变系统和时变系统
- 因果系统和非因果系统
- 稳定系统和不稳定系统（第5章）
- 即时系统和动态系统
- 集总系统和分布系统
- 可逆系统和不可逆系统

# 连续时间系统/离散时间系统



- 如果系统的输入、输出信号都是连续时间信号，则称之为**连续时间系统**，简称为连续系统。
- 如果系统的输入、输出信号都是离散时间信号，就称为**离散时间系统**，简称离散系统。
- 由两者混合组成的系统称为**混合系统**。





# 线性系统/非线性系统

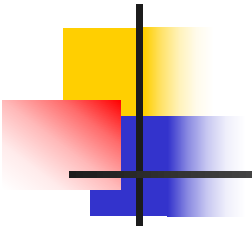
1. 定义：所谓线性系统，是指同时具有齐次性和叠加性的系统。其中


齐次性：

若  $e(t) \rightarrow r(t)$  ， 则  $ke(t) \rightarrow kr(t)$  ， 这里  $k$  为任意常数。

叠加性：

若  $e_i(t) \rightarrow r_i(t), i = 1, 2$  ， 则  $\sum_{i=1}^2 e_i(t) \rightarrow \sum_{i=1}^2 r_i(t)$

- 
- 线性系统理论成熟，体系完整，是解决其它系统的理论基础。
  - 线性系统可以用线性微分方程或差分方程描述；而非线性系统可以用非线性微分方程或差分方程描述。
  - 非线性系统情况复杂，没有成熟的体系和理论，难于分析。
  - 以往大多用线性系统近似分析非线性系统。但是，最近随着非线性科学的发展，非线性系统表现出一些非常独特、与线性系统不同的特性（如混沌，分形，奇怪吸引子，孤子等），成为当今人们研究的热点。



例2 试判定下列方程所描述的系统（初始状态为零）是否为线性系统。

$$(1) y(t) = 2e(t) + 10$$

$$(2) y(t) = 10 (e(t))^2$$

$$(3) y(t) = \frac{d}{dt} e(t)$$

$$(4) y(t) = \int_0^t e(t) dt$$

答案 (1) 否; (2) 否; (3) 是; (4) 是



## 2. 零输入响应和零状态响应:

a. 仅由初始时刻的储能引起的响应, 记为  $r_{zi}(t)$

b. 仅由激励信号  $e(t)$  所产生的响应, 记为  $r_{zs}(t)$

3. 分解性: 把由于初始储能引起的响应和由于激励引起的响应分离开来的系统的性质。

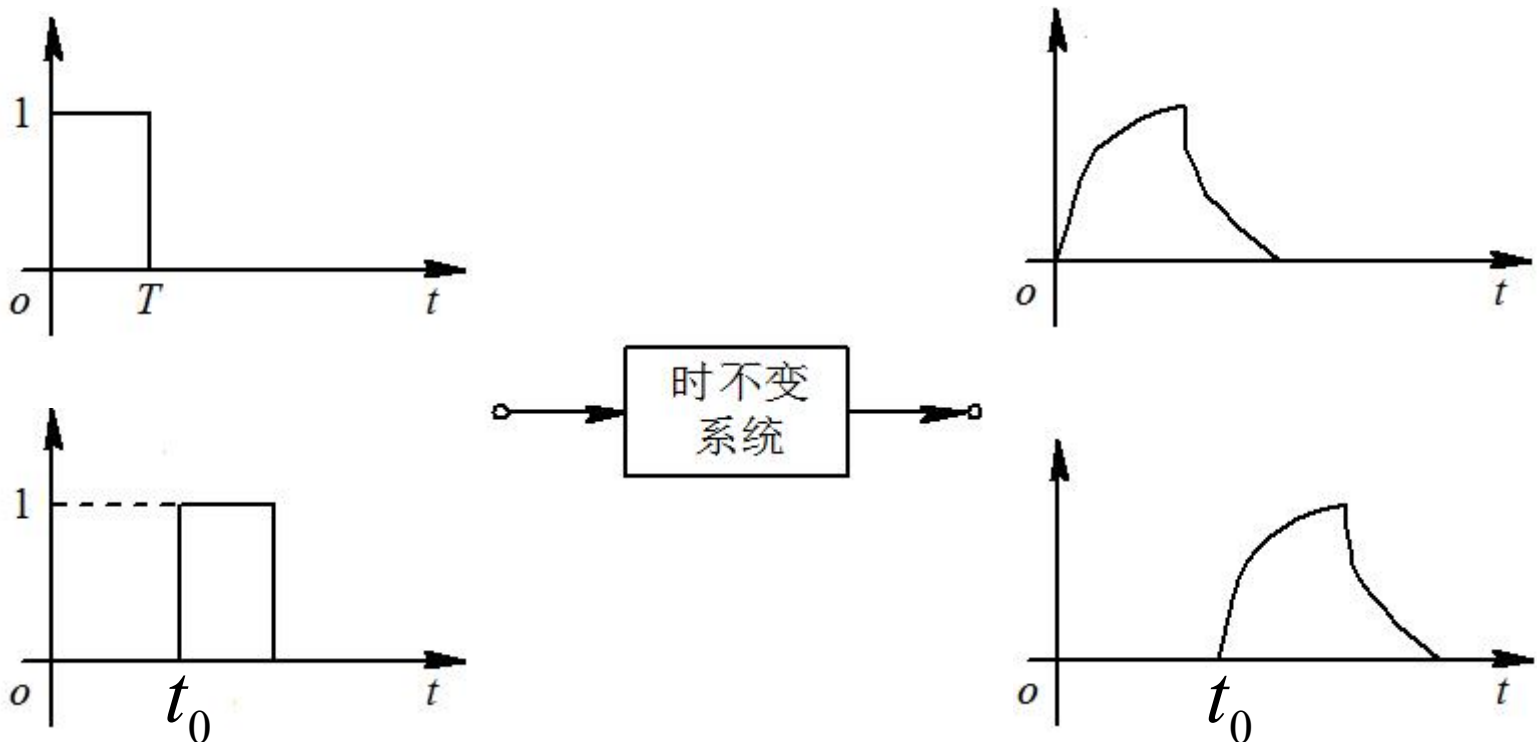
4. 对于初始状态不为零的系统, 如果它同时满足以下条件:

(1) 分解性; (2) 零状态响应 (对激励) 线性

也称其为线性系统。

# 时不变系统/时变系统

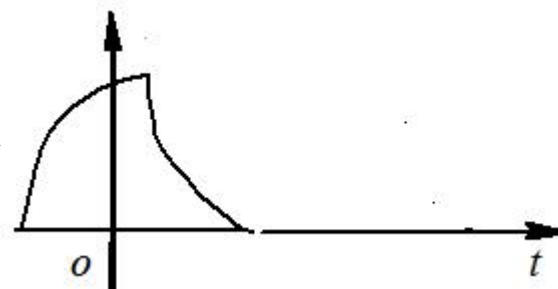
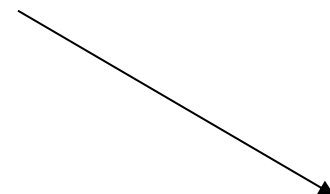
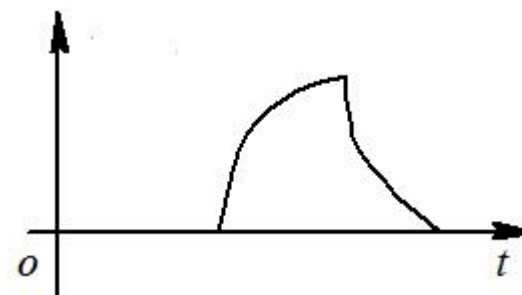
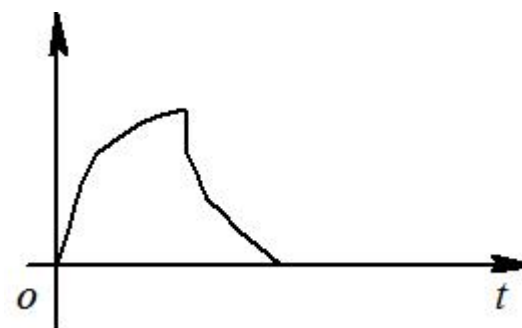
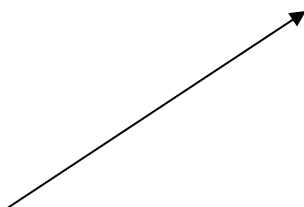
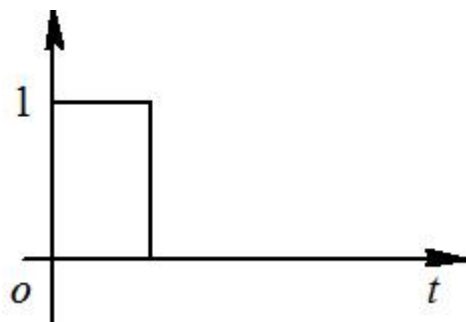
1. 定义: 若  $e(t) \rightarrow r(t)$  , 则  $e(t-t_0) \rightarrow r(t-t_0)$
2. 特点: 响应的形状不随激励施加时间的不同而改变。



# 因果系统/非因果系统

因果系统是指响应不早于激励的系统。

否则，称为非因果系统。





常把  $t=0$  接入系统的信号称为因果信号，也称为有始信号。

对于因果系统，在因果信号的激励下，响应也为因果信号。





例3 以下系统是否为因果系统。

$$y(t) = ax(t) + b$$

$$y(t) = cx(t) + x(t-1)$$

$$y(t) = x(t+1)$$

$$y(k) = \sum_{i=-\infty}^k x(i)$$



例4 试判断以下系统是否为线性的、时不变的、因果的系统。

$$(1) y(t) = e^{x(t)}$$

$$(2) y(t) = \frac{dx(t)}{dt}$$

$$(3) y(t) = \sin(6t)x(t)$$

$$(4) y(t) = \int_{-\infty}^{5t} x(\tau) d\tau$$

$$(5) y(t) = x\left(\frac{t}{3}\right)$$

答案 (1) 非线性, 时不变, 因果; (2) 线性, 时不变, 因果;  
(3) 线性, 时变, 因果; (4) 线性, 时变, 非因果;  
(5) 线性, 时变, 非因果.



# 小结

- 信号分类：周期信号，能量/功率信号等
- 信号的简单运算及其波形变化
- 数学里的“方程”，本课程叫“系统”  
线性时不变系统，因果系统
- 数学里的“解”，本课程叫“响应”：  
零输入响应，零状态响应

## 课外作业

阅读：第一章    预习：2.1 – 2.5

作业：1.3 (1) (2) (3)

1.10