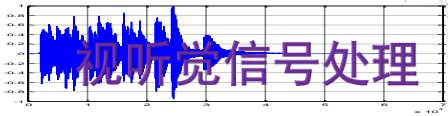


哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



# 视听觉信号处理

## Visual-Audio Signal Processing

计算机学院

姚鸿勋, 郑铁然

2019.9.2



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

• 心中有梦想


• 肩上担使命

机器人写诗  
人脸识别

人工智能  
新时代



HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

### 《视听觉信息处理》专业大方向系列课程目标

视听觉专业方法加强  
视听觉专业技能加强

视听觉信号处理  
72(48+24)

视觉专业方向基础  
数学基础  
专业技能基础  
(数据采集、数据格式...)

模式识别与机器学习  
72(48+24)

视听觉信息处理  
48(24+24)

视听觉专业理论深化  
专业技能专业化

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

### 《视听觉信号处理》大纲

#### 一. 课程基本信息

课程编号: CS32261  
课程名称: 视听觉信号处理  
英文名称: Visual-Audio Signal Processing  
课程类别: 专业基础课  
课程学时: 72; 授课: 48; 实验: 24; 总学分4.5  
先修课程: 无  
适用专业: 计算机大类专业  
开课学期: 3秋  
开课单位: 计算机科学与技术学院

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

### 《视听觉信号处理》大纲

#### 二. 课程目标与课程内容对应关系 (I)

序号	教学内容	教学要求	推荐学时	推荐教学方式	对应的课程目标
1	1.信号与系统 (1)信号和系统的定义 (2)信号的采集 (包括语音、图像、视频) (3)信号的表示与编码 (包括语音、图像、视频)	1.掌握信号与系统的定义、关系 2.掌握信号种类、采集方式 3.理解信号表示与编码方法及其应用	4	课堂讲授	课程目标2
2	2.信号处理方法 (1)傅里叶变换 (2)卷积运算	1.掌握傅里叶变换的概念和特性 2.掌握傅里叶变换的概念和特性	2	课堂讲授	课程目标2
3	3.信号分析 (1)正交空间 (2)正交函数集与信号的分解 (3)信号的稀疏表示	1.能够理解和运用正交概念 2.正确理解信号分解	4	课堂讲授	课程目标2

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

### 《视听觉信号处理》大纲

#### 二. 课程目标与课程内容对应关系 (II)

序号	教学内容	教学要求	推荐学时	推荐教学方式	对应的课程目标
4	4.语音学概要 (1)语音的声学特性及听感特性 (2)语音的产生机理和产生模型 (3)语音的感知和听感 (4)相关的语音学、音韵学和语言学知识 (5)语音处理研究的历史和现状 (6)应用前景	1.理解语音和听感 2.了解语音产生机理和产生模型 3.了解语音感知和听感 4.了解语音处理研究的历史和现状	4	课堂讲授	课程目标1 课程目标2
5	5.语音的时域频域分析 (1)时域分析和短时分析 (2)语音的时域分析方法: 短时能量分析、短时过零率、短时自相关函数和短时功率谱 (3)语音的频域分析方法: 离散傅里叶变换和快速傅里叶变换 (4)语音的时频分析方法: 短时傅里叶变换和短时功率谱 (5)语音的时频分析方法: 短时傅里叶变换和短时功率谱 (6)语音的时频分析方法: 短时傅里叶变换和短时功率谱 (7)语音的时频分析方法: 短时傅里叶变换和短时功率谱	1.理解语音时域频域分析的重要角色 2.理解语音时域频域分析的重要角色 3.理解语音时域频域分析的重要角色 4.理解语音时域频域分析的重要角色 5.理解语音时域频域分析的重要角色 6.理解语音时域频域分析的重要角色 7.理解语音时域频域分析的重要角色	6-6	课堂讲授 实验1	课程目标2 课程目标3 课程目标4

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## 《视听觉信号处理》大纲

### 二. 课程目标与课程内容对应关系 (III)

序号	教学内容	教学要求	推荐学时	推荐教学方式	对应的课程目标
6	6.语音编码技术 (1) 语音编码技术框架 (2) 波形编码: PCM、压扩 PCM、DPCM、一般化的 DPCM、ADPCM、G.726 编码标准 (3) 参数编码: LPC 编码、多脉冲激励线性预测声码器、规范脉冲激励线性预测声码器、长时预测滤波器、感知加权滤波器、闭环搜索、码激励线性预测声码器、多带激励声码器	1. 了解语音编码的概念和发展轨迹 2. 理解语音编码技术的基本框架 3. 理解主要的语音编码算法 4. 了解最新研究动态 5. 能够设计和实现典型的语音编码算法  实验2 语音编码实验 1. 发现基于 DPCM 的语音编码算法 2. 发现基于 ADPCM 的语音编码算法 3. 掌握语音编码系统实现的一般框架	6+2	课堂讲授/ 翻转课堂 实验2	课程目标1 课程目标3
7	7. 语音识别技术概述	1. 了解语音识别任务和其对应的不同解决方案 2. 了解说话人识别任务和其多种解决方案  实验3 命令词识别实验 1. 发现基于 DTW 的语音识别算法 2. 了解基于 HMM 的语音识别方法	4+4	课堂讲授/ 以线代讲/ 翻转课堂 实验3	课程目标1 课程目标4

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## 《视听觉信号处理》大纲

### 二. 课程目标与课程内容对应关系 (IV)

序号	教学内容	教学要求	推荐学时	推荐教学方式	对应的课程目标
8	8. 数字成像、光度学与色度学	1. 掌握数字成像 (包括电磁波成像、声波成像) 特点 2. 了解图像处理历史发展状况 3. 掌握光度学、色度学及视觉特性 4. 理解彩色空间、形状、纹理、尺度关系 实验4: 完成图像读写、彩色空间转换及图像运算变换实验	4+4	课堂讲授 实验4	课程目标1 课程目标2
9	9. 空域图像增强方法 (1) 各类空域图像平滑算子 (2) 各类空域图像锐化算子 比较各种算法优劣及适用情景	1. 理解图像处理中各类算子的作用 2. 理解各类模型和数据工具的运用技巧 3. 掌握各种图像处理算子方法 4. 具有科研动手能力, 能够设计实现针对问题的图像特征提取系统 实验5: 完成图像增强算子实验, 并可多选图像增强算子实验, 或可选择完成一个具备若干图像(或语音)信号增强处理算子的基本系统。	6-8	课堂讲授 实验5	课程目标1 课程目标3 课程目标4

HIT-Visual Intelligence Lab




哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## 《视听觉信号处理》大纲

### 二. 课程目标与课程内容对应关系 (V)

序号	教学内容	教学要求	推荐学时	推荐教学方式	对应的课程目标
10	10. 频域图像增强方法 (1) 各类频域图像平滑算子 (2) 各类频域图像锐化算子 比较各种算法优劣及适用情景	1. 理解频域图像处理中各类算子的作用 2. 理解各类模型和数据工具的运用技巧 3. 掌握各种图像处理算子方法 4. 具有科研动手能力, 能够设计实现针对问题的图像特征提取系统	4	课堂讲授/ 翻转课堂	课程目标1 课程目标4
11	11. 图像复原 图像恢复原理、图像退化模型及图像复原法	1. 掌握图像退化模型 2. 掌握图像恢复原理及图像复原法	4	课堂讲授/ 翻转课堂	课程目标1 课程目标2

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## 1. 部分

### 教学要求

1. 掌握信号与系统的定义、关系
2. 掌握信号种类、采集方式 (自补)
3. 理解信号表达与编码方法及其应用

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



NiceRF  
为无线

一键电话录音  
高清电话录音设备

电话

SAR28  
4G配置套餐 (4G+无线+蓝牙+电话+录音)

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



地下管网 红外探测 高清夜视  
红外探测 红外探测 红外探测  
红外探测 红外探测 红外探测

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

13



我们被各种各样的信号所包围，  
从众多信号中提取或增强有用的信息——信号处理的基本形式。




哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

14

1. 部分

内容提要

- 信号的概念、描述、分类
- 典型信号介绍
- 信号的基本运算
- 信号处理的目的、步骤
- 信号的分解



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

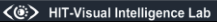
15

信号的概念

信号是反映（或载有）信息的各种物理量，是【系统】可以进行加工、变换的对象。

信号是信息的表现形式，信息则是信号的具体内容。

- 自然和物理信号
  - 例如：语音、图像、地震信号、生理信号等
- 人工产生的信号
  - 例如：雷达信号、通讯信号、医用超声信号、机械探伤信号等



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

16

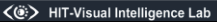
信号描述方法

数学描述：

- 使用具体的数学表达式，把信号描述为一个或若干个自变量的函数或序列的形式。

$$f(t) = \sin(t)$$
$$x(n) = a^n u(n) \quad f(t) = \frac{\sin(t)}{t}$$

因此，常可将“信号”与“函数”和“序列”等同起来

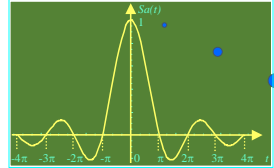


哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

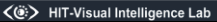
17

信号描述方法

- 波形描述
  - 按照函数随自变量的变化关系，把信号的波形画出来。



$Sa(t) = \frac{\sin(t)}{t}$



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

18

信号描述方法

- 信号的特征
  - 时间特性
    - 信号表现出一定波形的时间特性，如出现时间的先后、持续时间的长短、重复周期的大小及随时间变化的快慢等。
  - 频率特性
    - 任意信号在一定条件下总可以分解为许多不同频率的正弦分量，即具有一定的频率成分。信号的频谱分析就是研究信号的频率特性。



哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

19

信号的分类

可根据自变量个数多少分——

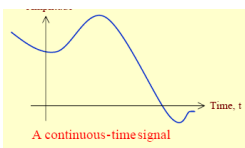


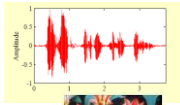
一维：语音  $f(t)$

多维：

二维：图像  $f(x, y)$

三维：视频  $f(x, y, t)$

四维：电磁波  $f(x, y, z, t) \dots$



Hit-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

20

信号的分类

确定信号与随机信号 ——①信号函数表达式确定性

要点：给定的自变量的值，是否可以唯一确定信号的取值。

区分方法：任意给定一个自变量的值，如果可以唯一确定其信号和取值，则该信号是确定信号，否则，如果取值是不确定的随机值，则是随机信号。

周期信号与非周期信号 ——②周期性

要点：关系式是否成立？  $f(t) = f(t+T), \forall t \in R$

周期信号的周期（正值）：最小T值

非周期信号可以视为是周期无穷大的周期信号。

Hit-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

21

信号的分类

时间连续信号与时间离散信号 ——③时间函数取值连续性

连续时间：

模拟：连续幅度

离散幅度

离散时间：

抽样：连续幅度

数字：离散幅度

模拟信号

抽样

抽样信号

A/D转换

量化

数字信号

Hit-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

22

信号的分类

时间连续信号与时间离散信号 ——③时间函数取值连续性

信号的自变量是否在所讨论的整个连续区间内都有定义？

定义域连续？

NO → 时间离散信号

YES → 时间连续信号

通常被称为“序列”

模拟信号、抽样信号与数字信号

模拟信号的定义域和值域都是有连续的；

抽样信号的定义域离散而值域连续；

数字信号在定义域和值域都是离散的。

——计算机特别适合于处理数字信号

Hit-Visual Intelligence Lab

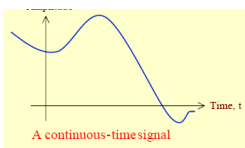
哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

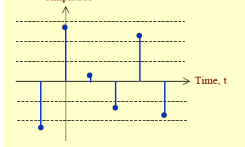
23

信号的分类

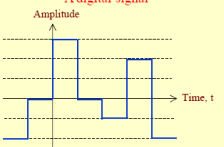
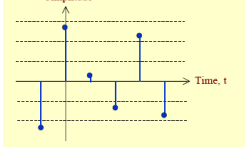
时间连续信号与时间离散信号 ——③时间函数取值连续性



A continuous-time signal



A digital signal



Hit-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

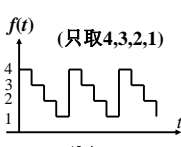
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

24

信号的分类

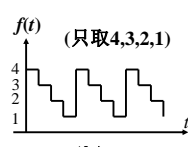
时间连续信号与时间离散信号 ——③时间函数取值连续性

[例1]：信号类型



(a)

连续时间信号  
模拟信号




(b)

连续时间离散幅度信号

Hit-Visual Intelligence Lab

4



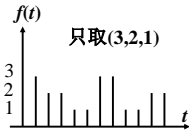
哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

25

### 信号的分类

时间连续信号与时间离散信号——③时间函数取值连续性

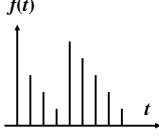
**[例1]: 信号类型**



只取(3,2,1)


(c)


离散时间信号  
数字信号



(d)

离散时间信号  
抽样信号

 HIT-Visual Intelligence Lab



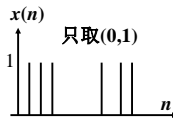
哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

26

### 信号的分类

时间连续信号与时间离散信号——③时间函数取值连续性

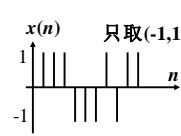
**[例1]: 信号类型**



只取(0,1)

(e)


离散时间信号  
数字信号




只取(-1,1)

(f)

离散时间信号  
数字信号

 HIT-Visual Intelligence Lab

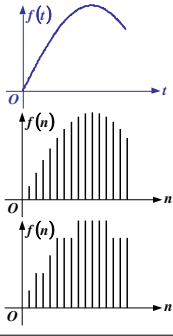


哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

27


### 信号的分类


- 模拟信号：时间和幅值均为连续的信号。
- ↓ 抽样
- 抽样信号：时间离散的，幅值连续的信号。
- ↓ 量化
- 数字信号：时间和幅值均为离散的信号。



(c)

离散时间信号  
抽样信号

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

28

### 信号的分类

**因果信号与非因果信号——④**

如果信号在时间零点之前，取值为零，则称为因果信号。

表示信号在过去时间内不可能发生（取值为零）！

若信号仅在过去（时间零点之前）有非零值，则称为反因果信号。


不是因果信号，就是非因果信号，信号在时间零点之前有非零值。


**实值信号与复值信号——⑤**

如果信号的取值是实数，则称为实值信号，简称实信号。

如果信号的取值是复数，则称为复值信号，简称复信号。

复信号是为了研究方便而引入的

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

29

### 信号的分类

**能量信号与功率信号——⑥**

定义信号的能量为：

连续时间信号  $E[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \|f(t)\|^2 dt$

离散时间信号  $E[f(n)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \|f(n)\|^2$


定义信号的功率为：


连续时间信号  $P[f(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \|f(t)\|^2 dt$

离散时间信号  $P[f(n)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \|f(n)\|^2$

如果信号的能量是有限的，则称为能量有限信号，简称能量信号。

如果信号的功率是有限的，则称为功率有限信号，简称功率信号。

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

30

### 信号的表示

**• 常见音视频数据文件格式**

语音格式文件有wmv,mp3,mp4,dat,rm,avi等。


图像格式最常见的有，JPG格式，也可能是JPEG格式，还有PNG、GIF等格式，甚至BMP格式。

相对于PNG等格式来说，JPG格式的体积相对较小。

JPEG，全称为“Joint Photographic Experts Group”，翻译成中文，则是“联合图像专家小组”，这是一个成立于1986年的组织，1992年，该组织发布了“JPEG标准”，这是一种针对图像的压缩而制定的标准。

使用JPEG标准压缩的图片文件，被称为“JPEG文件”，这种文件的扩展名通常是JPG、JPEG、JPE、JFIF以及JIF，在这些文件格式中，以JPG的使用最为广泛。

JPEG，采用YCbCr模型。取样的比例可以是4:4:4（无缩减取样）、4:2:2（在水平方向的倍数中取样）和4:2:0（在水平方向和垂直方向的2的倍数中取样），其中，以4:2:0最为常见。

 HIT-Visual Intelligence Lab

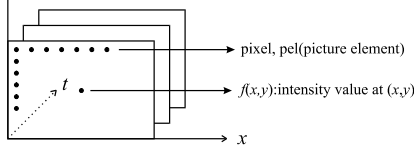
哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

31

信号的表示

• 二维信号表示



pixel, pel (picture element)

$f(x,y)$ : intensity value at  $(x,y)$

$x$

$y$

- picture size  $\Rightarrow$  picture resolution ; 256x256, 512x512
- $0 \leq f(x,y) \leq L (=255)$  ; gray level, 8bit/pixel
- $(x,y)$  ; spatial coordinate
- $t$  ; temporal coordinate

HIT-Visual Intelligence Lab

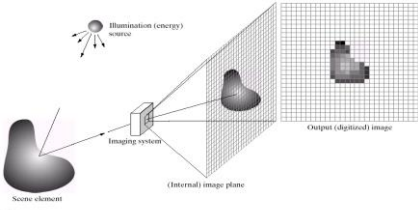
哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

32

信号的表示

• 二维信号表示



illumination (energy) source

Scene element

Imaging system

(Internal) image plane

Output (digitized) image

FIGURE 2.15 An example of the digital image acquisition process. (a) Energy ("illumination") source. (b) An element of a scene. (c) Projection of the scene onto the image plane. (d) Digitized image.

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

33

信号的表示

• 二维信号表示

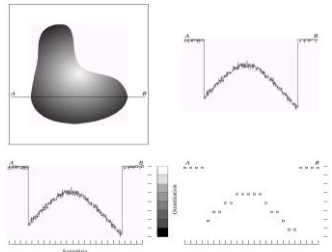


FIGURE 2.16 Generating a digital image. (a) Continuous image. (b) A scan line from A to B in the continuous image. (c) Sampling and quantization. (d) Digital scan line.

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

34

信号的表示

• 二维信号表示

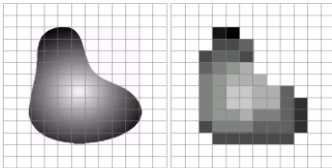


FIGURE 2.17 (a) Continuous image projected onto a sensor array. (b) Result of image sampling and quantization.

HIT-Visual Intelligence Lab

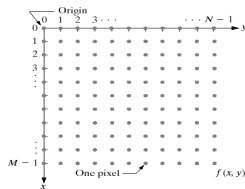
哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

35

信号描述方法

• 二维信号表示



Origin

$x$

$y$

0 1 2 3 ... N-1

0 1 2 3 ... M-1

One pixel

$f(x,y)$

FIGURE 2.18 Coordinate convention used in this book to represent digital images.

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

36

信号的表示

• 二维信号表示

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & \cdots & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} ; M \times N \text{ matrix}$$
$$A = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & \cdots & a_{0,N-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M-1,0} & \cdots & \cdots & a_{M-1,N-1} \end{bmatrix} ; a_{ij} = f(x=i, y=j)$$

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

37

信号的表示

• 二维信号表示

FIGURE 2.19 A  $1024 \times 1024$ , 8-bit image subsampled down to size  $32 \times 32$  pixels. The number of allowable gray levels was kept at 256.

Spatial resolution

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

38

信号的表示

• 二维信号表示

FIGURE 2.20 (a)  $1024 \times 1024$ , 8-bit image (b)  $512 \times 512$  image resampled into  $1024 \times 1024$  pixels by row and column duplication (c) through (f)  $256 \times 256$ ,  $128 \times 128$ ,  $64 \times 64$ , and  $32 \times 32$  images resampled into  $1024 \times 1024$  pixels.

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

39

信号的表示

• 二维信号表示 Gray-level resolution

256 128 16 8 64 32 4 2

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

40

信号的表示

• 信号——

语音信号的例子  $f(t) = K \sin(\omega t + \theta)$

心电图（ECG）信号的例子

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

41

典型信号

• 正余弦信号：

正弦信号  $f(t) = K \sin(\omega t + \theta)$

余弦信号  $f(t) = K \cos(\omega t + \theta)$

说明：

(1)  $K$ 为振幅

(2)  $\omega$ 为角频率

(3)  $\theta$ 为初相位

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

42

典型信号

• 指数信号：  $f(t) = Ke^{\alpha t}$

参数  $\alpha$

符号

- 正号 信号增强A
- 0 直流信号B
- 负号 信号衰减CD

绝对值

- 大 变化速度快D
- 小 变化速度慢C

微分或积分后还是指数信号

哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

43

典型信号

• 复指数信号： $f(t) = Ke^{st}$

指数因子  $s$  是复数

欧拉公式

$$\begin{cases} e^{j\omega t} = \cos\omega t + j\sin\omega t \\ e^{-j\omega t} = \cos\omega t - j\sin\omega t \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos\omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \\ \sin\omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \end{cases}$$

复指数信号与正余弦信号之间的关系

$$\begin{aligned} f(t) &= Ke^{st} = Ke^{(\sigma + j\omega)t} \\ &= Ke^{\sigma t} \cdot e^{+j\omega t} \\ &= Ke^{\sigma t} \cdot (\cos\omega t + j\sin\omega t) \\ &= (Ke^{\sigma t} \cos\omega t) + j(Ke^{\sigma t} \sin\omega t) \end{aligned}$$

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

44

典型信号

• 复指数信号： $f(t) = Ke^{st} = Ke^{\sigma t} \cos \omega t + jKe^{\sigma t} \sin \omega t$

一个复指数信号可以分解成为实、虚两部分。其中，实部包含余弦信号，虚部则为正弦信号。

指数因子实部  $\sigma$  表征了正弦与余弦函数振幅随时间变化的情况：  
若  $\sigma > 0$ ，正弦、余弦信号是增幅振荡；  
若  $\sigma < 0$ ，正弦、余弦信号是衰减振荡。

指数因子虚部  $\omega$  则表示正弦与余弦信号的角频率。

几个特殊情况：

★ 当  $\sigma=0$ ，即  $s$  为虚数，则正弦、余弦信号是等幅振荡；

★ 当  $\omega=0$ ，即  $s$  为实数，则复指数信号成为一般的指数信号；

★ 当  $\sigma=0$  且  $\omega=0$ ，即  $s$  等于零，则复指数信号的实部与虚部都与时间无关，成为直流信号。

HIT-Visual Intelligence Lab

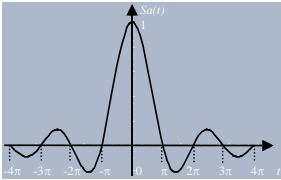
哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

45

典型信号

• Sa函数： $Sa(t) = \frac{\sin t}{t}$



特点：  
(1) Sa函数是偶函数  
(2) 过零区间宽度  
(3) Sa函数过零位置

$$\int_{-\infty}^{\infty} Sa(t) dt = \pi \quad \longrightarrow \quad \int_{-\infty}^0 Sa(t) dt = \int_0^{\infty} Sa(t) dt = \frac{\pi}{2}$$

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

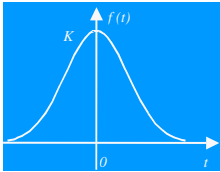
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

46

典型信号

• 高斯信号：

$$f(t) = Ke^{-(t/\tau)^2}$$



特点：  
(1) 形状象一口钟，故有时也称钟形脉冲信号  
(2) 在随机信号分析中有重要地位

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

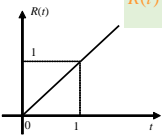
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

47

奇异信号

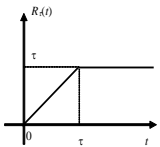
• 单位斜变信号  $R(t)$ ：

$$R(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & t \geq 0 \end{cases}$$



截顶的单位斜变信号：

$$R(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & 0 \leq t \leq \tau \\ \tau, & t \geq \tau \end{cases}$$



HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学

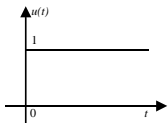
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

48

奇异信号

• 单位阶跃信号  $u(t)$ ：

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$



$$R(t) = \int_{-\infty}^t u(t) dt \quad \frac{dR(t)}{dt} = u(t)$$

特点：  
(1) 与单位斜变信号是积分/微分关系  
(2) 用于描述分段信号

HIT-Visual Intelligence Lab

8



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

49

奇异信号

• 单位矩形脉冲信号 $G_{\tau}(t)$ :

$$G_{\tau}(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \tau/2 \\ 0, & |t| > \tau/2 \end{cases}$$

信号四则运算

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

50

奇异信号

• 符号函数 $\text{sgn}(t)$ : 用以表示自变量的符号特性

$$\text{sgn}(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases}$$

$$\text{sgn}(t) + 1 = 2u(t)$$

$$\text{sgn}(t) = 2u(t) - 1$$

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

51

奇异信号

• 单位冲激信号 $\delta(t)$

引入原因:  
描述自然界中那些发生后持续时间很短的现象。

信号定义:  $\leftarrow$  非常规的定义方法

设信号有一个总的冲激强度, 它在整个时间域上的积分等于该强度值, 而在除冲激点之外的其他点的函数取值为零。

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \\ \delta(t) = 0 \quad (t \neq 0) \end{cases}$$
 狄拉克定义式

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

52

奇异信号

• 单位冲激信号 $\delta(t)$

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \\ \delta(t) = 0 \quad (t \neq 0) \end{cases}$$

波形表示:  
在冲激点处画一条带箭头的线, 线的方向和长度与冲激强度的符号和大小一致。

冲激点在 $t_0$ 、强度为E的冲激信号

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

53

奇异信号

• 单位冲激信号 $\delta(t)$ 函数的性质:

1 对称性: 冲激函数是偶函数  
 $\delta(-t) = \delta(t)$

2 时域压扩性:  $\delta(at) = \frac{1}{|a|} \delta(t) \quad (a \neq 0)$

3 抽样特性\*:  $\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - t_0) dt = f(t_0)$  也称“筛选特性”

4 积分:  $\begin{cases} \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = 1 & (t > 0) \\ \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = 0 & (t < 0) \end{cases} \rightarrow \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = u(t)$

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

54

信号运算

四则运算: 四则运算后的信号在任意一点的取值定义为原信号在同一点处函数值作相同四则运算的结果

加法:

乘法:

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

55

信号运算

冲激信号

加法

冲激串

连续信号

冲激串:  $\Delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s)$

用途

产生抽样信号

抽样信号的产生方法

$f_s(t) = f(t) \cdot \Delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT_s) \delta(t - nT_s)$

抽样信号波形表示

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

56

波形变换

反褶运算:

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

原信号

反褶信号

将原信号  $f(t)$  的波形 按纵轴对称翻转 过来。

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

57

波形变换

时移运算

$f(t) \rightarrow f(t-b)$

参数  $b$  决定平移方向和位移量

$b > 0$ : 右移  $b < 0$ : 左移

原信号

$f(t-8) = f(t+8)$

左移

$f(t-9)$

右移

将原信号  $f(t)$  的波形 沿横轴平移  $b$  个单位。

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

58

波形变换

压扩运算 (也被称为尺度变换)

$f(t) \rightarrow f(at)$

参数  $a$  的符号控制是否先要反褶?  
>0: 不需反褶 <0: 需要反褶

参数  $a$  的绝对值控制是压缩还是扩张?  
>1: 压缩 <1: 扩张 倍数  $1/|a|$

原信号

$f(2t)$

信号压缩

$f(-0.5t)$

信号扩张

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

59

信号运算

数学运算:

$f(t)$ 

微分运算  $\frac{d}{dt}[f(t)]$

积分运算  $\int_{-\infty}^t f(t)$

连续进行

连续  $n$  次微分  $\left(\frac{d}{dt}\right)^n$

连续  $n$  次积分  $\left(\int_{-\infty}^t\right)^n$

HIT-Visual Intelligence Lab

哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

60

卷积运算

定义:


$f_1(t) * f_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau$

性质:

交换律  $f_1 * f_2 = f_2 * f_1$  卷积积分的次序可以交换  
(通过变换积分变量来证明)

分配律  $f_1 * (f_2 + f_3) = f_1 * f_2 + f_1 * f_3$  用于并联系统的分析  
(利用积分运算的线性性来证明)

HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

61


卷积运算


结合律  $(f_1 * f_2) * f_3 = f_1 * (f_2 * f_3)$

证明:

用于串联系统的分析

$$\begin{aligned} & ((f_1 * f_2) * f_3)(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\lambda) f_2(\tau - \lambda) d\lambda \right] f_3(t - \tau) d\tau \quad (\text{卷积定义}) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\lambda) f_2(\tau - \lambda) f_3(t - \tau) d\lambda d\tau \quad (\text{二重积分}) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\lambda) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f_2(\tau - \lambda) f_3(t - \tau) d\tau \right] d\lambda \quad (\text{变换积分次序}) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\lambda) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f_2(\tau) f_3(t - \lambda - \tau) d\tau \right] d\lambda \quad (\text{变量替换}) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\lambda) [f_2 * f_3](t - \lambda) d\lambda \quad (\text{定义}) \\ &= (f_1 * (f_2 * f_3))(t) \quad (\text{定义}) \end{aligned}$$

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

62

卷积运算

★函数与单位冲激函数的卷积


$$f(t) * \delta(t - t_0) = f(t - t_0)$$


一个函数与单位冲激函数的卷积，等价于将该函数**平移**到单位冲激函数的冲激点位置。

——亦称单位冲激函数的**搬移特性**

证明:

$$\begin{aligned} & f(t) * \delta(t - t_0) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau - t_0) f(t - \tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau - t_0) f(t - t_0) d\tau \\ &= f(t - t_0) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau - t_0) d\tau \\ &= f(t - t_0) \end{aligned}$$

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

63


卷积运算


单位冲激信号搬移特性的应用:

$$f_1(t - t_1) * f_2(t - t_2) = f_1(t) * f_2(t - t_1 - t_2)$$

证明:

$$\begin{aligned} & f_1(t - t_1) * f_2(t - t_2) \\ &= (f_1(t) * \delta(t - t_1)) * (f_2(t) * \delta(t - t_2)) \\ &= f_1(t) * f_2(t) * \delta(t - t_1 - t_2) \\ &= f_1(t - t_1 - t_2) * f_2(t) \\ &= f_1(t) * f_2(t - t_1 - t_2) \end{aligned}$$

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

64

卷积运算


卷积的微分:


两个信号卷积的微分等于其中任一信号微分与另一信号卷积。

$$\frac{d}{dt} [f_1(t) * f_2(t)] = f_1(t) * \left[ \frac{d}{dt} f_2(t) \right] = \left[ \frac{df_1(t)}{dt} \right] * f_2(t)$$

证明:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} [f_1(t) * f_2(t)] \\ &= \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau \quad (\text{定义}) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) \left( \frac{d}{dt} f_2(t - \tau) \right) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) \left( \frac{df_2}{dt} \right) (t - \tau) d\tau \quad (\text{交换微分、积分顺序}) \\ &= \left( f_1 * \frac{df_2}{dt} \right) (t) \quad (\text{定义}) \end{aligned}$$

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

65

卷积运算

卷积的积分:


两个信号卷积的积分等于其中任一信号的积分与另一信号的卷积。


$$\int_{-\infty}^t (f_1 * f_2)(\lambda) d\lambda = f_1(t) * \int_{-\infty}^t f_2(\lambda) d\lambda = \left( \int_{-\infty}^t f_1(\lambda) d\lambda \right) * f_2(t)$$

→  $f(t) * u(t) = \int_{-\infty}^t f(\lambda) d\lambda$  一个函数与单位阶跃函数的卷积等于该函数的积分。

证明:

$$\begin{aligned} & f(t) * u(t) \\ &= f(t) * \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^t f(\tau) * \delta(\tau) d\tau \quad \leftarrow \text{卷积的积分特性} \\ &= \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau \quad \leftarrow \text{冲激函数的搬移特性} \end{aligned}$$

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY


66


卷积运算

应用类似的推演可以导出卷积的高阶导数或多次积分之运算规律

$$(f_1 * f_2)^{(n)}(t) = f_1^{(m)}(t) * f_2^{(n-m)}(t)$$

上式中的  $m$ 、 $n$  及  $n-m$  取正整数时为导数的阶次，而取负整数时为重积分的次数。

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

67


### 相关运算


相关运算：

$$R_{f_1 f_2}(t) = R(f_1(t), f_2(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) f_2^*(\tau - t) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau + t) f_2^*(\tau) d\tau$$
$$R_{f_2 f_1}(t) = R(f_2(t), f_1(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(\tau) f_1^*(\tau - t) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(\tau + t) f_1^*(\tau) d\tau$$

→  $R_{f_1 f_2}(t) = R_{f_2 f_1}^*(-t)$  即相关与次序有关

相关与卷积的关系  $R_{f_1 f_2}(t) = f_1^*(-t) * f_2(t)$

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

68

### 相关运算


自相关（函数自身求相关）：


$$R_f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) f^*(\tau - t) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau + t) f^*(\tau) d\tau$$

→ 实函数的自相关是偶函数

→ 周期函数的相关函数总是在周期的整数倍nT处取得最大值。

→

 HIT-Visual Intelligence Lab

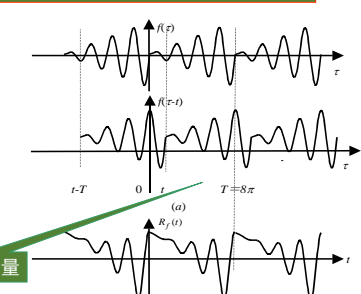


哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY


69


### 相关运算

用自相关函数检测准周期信号的准周期



t 是平移量

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

70


### 信号处理及目的


信号处理

对信号进行提取、变换、分析和综合等处理过程的统称。

信号处理的目的

- 去伪存真 去除信号中冗余的和次要的成分。
- 特征抽取 把信号变成易于进行分析和识别的形式。
- 编码解码 把信号变成易于传输、交换与存储的形式（编码），或从编码信号中恢复出原始信号（解码）。

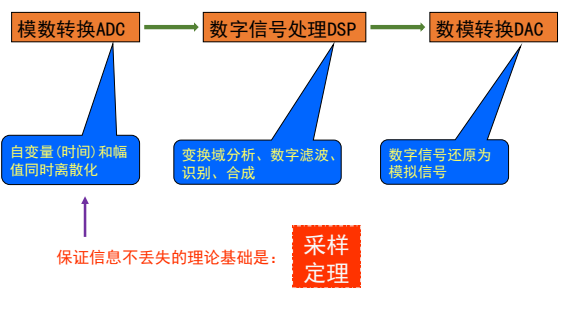
 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

71

### 数字信号处理步骤




模数转换ADC → 数字信号处理DSP → 数模转换DAC


自变量(时间)和幅值同时离散化

变换域分析、数字滤波、识别、合成

数字信号还原为模拟信号

保证信息不丢失的理论基础是：采样定理

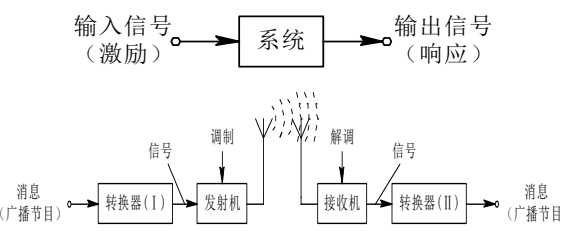
 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY


72


### 系统的概念



输入信号（激励） → 系统 → 输出信号（响应）

消息（广播节目） → 转换器（I） → 信号 → 调制 → 发射机 → 接收机 → 解调 → 信号 → 转换器（II） → 消息（广播节目）

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

73

### 系统的概念

**系统**是若干相互作用和相互依赖的事物所组成的具有特定功能的整体。

**系统、电路（网络）：**


$e(t)$


$r(t)$

系统强调功能与特性，关心全局；  
电路强调结构与参数，关心局部

**广义系统分类：**

物理/非物理；自然/人工

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

75

### 系统的分类

①

连续时间系统

$e(t) \rightarrow \boxed{\phantom{0}} \rightarrow r(t)$

微分方程

离散时间系统

$x(n) \rightarrow \boxed{\phantom{0}} \rightarrow y(n)$

差分方程

混合系统

$e(t) \rightarrow \boxed{\phantom{0}} \rightarrow y(n)$

$x(n) \rightarrow \boxed{\phantom{0}} \rightarrow r(t)$

②

即时系统：输出决定于同时刻输入

$R$  代数方程

动态系统：输出与历史输入有关

$L, C$  微分、差分方程


③


集总参数：只含集总参数元件

$R, L, C$  微分方程

分布参数：含有分布参数元件

传输线、波导 偏微分方程

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

76

### 系统的分类

④

线性系统：叠加性、均匀性

$$\begin{matrix} e_1(t) \rightarrow \boxed{\phantom{0}} \rightarrow r_1(t) \\ e_2(t) \rightarrow \boxed{\phantom{0}} \rightarrow r_2(t) \end{matrix} \Rightarrow \boxed{\phantom{0}} \rightarrow a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$$


非线性系统


⑤

时变：参数随时间变化

时不变：参数不随时间变化

$$e(t) \rightarrow \boxed{\phantom{0}} \rightarrow r(t) \Rightarrow e(t-t_0) \rightarrow \boxed{\phantom{0}} \rightarrow r(t-t_0)$$

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

77

### 系统的分类

⑥

因果：输出变化出现在输入变化之后

$t = t_0$ 时刻输出只与  $t = t_0$  及  $t < t_0$  时刻输入有关，如  $r(t) = e(t-1)$


非因果：反之，如  $r(t) = e(t+1)$


⑦

稳定：有界输入  $\Rightarrow$  有界输出

$|e(t)| \leq M \Rightarrow |r(t)| \leq K \quad -\infty < t < +\infty$

不稳定

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

78

### 系统的分类

⑧


可逆：不同激励  $\Rightarrow$  不同响应


如  $r(t) = 5e(t)$

不可逆：不同激励  $\Rightarrow$  相同响应

如  $r(t) = e^2(t)$

$$e_1(t) \rightarrow \boxed{\text{系统}} \rightarrow r_1(t) \rightarrow \boxed{\text{逆系统}} \rightarrow e_2(t) = e_1(t)$$

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

79

### 系统的分类

**线性时不变系统(Linear Time Invariant-LTI系统)：**

① 满足叠加性：


$$\begin{matrix} e_1(t) \rightarrow r_1(t) & e_2(t) \rightarrow r_2(t) \\ e_1(t) + e_2(t) \rightarrow r_1(t) + r_2(t) \end{matrix} \Rightarrow \left. \begin{matrix} \\ \end{matrix} \right\} \text{线性}$$

② 满足均匀性：


$e(t) \rightarrow r(t) \Rightarrow ae(t) \rightarrow ar(t)$

③ 满足时不变特性：

$e(t) \rightarrow r(t) \Rightarrow e(t-t_0) \rightarrow r(t-t_0)$

 HIT-Visual Intelligence Lab

13



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

80


系统的分类


④ 满足微（积）分特性：

$$e(t) \rightarrow r(t) \Rightarrow \frac{de(t)}{dt} \rightarrow \frac{dr(t)}{dt}$$
$$e(t) \rightarrow r(t) \Rightarrow \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau \rightarrow \int_{-\infty}^t r(\tau) d\tau$$

⑤ 因果特性：

若  $t < t_0$  不存在激励，且  $t_0$  起始状态为0，则线性常系数微分方程描述的系统满足因果性，即：线性时不变系统未必就满足因果性。

 HIT-Visual Intelligence Lab



哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

81

系统分析

系统分析：已知  $e(t)$  和系统，求响应  $r(t)$


$e(t) \xrightarrow{\text{系统}} r(t) ?$


① 步骤

- i) 建数学模型：用框图或数学表达式描述
- ii) 解数学模型：已知数学模型或输入激励

② 方法

- i) 描述方法：输入—输出描述法、状态变量描述法
- ii) 求解方法：时域（经典、卷积、数值）和变换域（频域、复频域、Z域、FFT）
- iii) 非线性方法（人工神经网络、遗传算法、模糊理论）

 HIT-Visual Intelligence Lab




哈尔滨工业大学  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

82

参考文献

- Alanv. Oppenheim (刘树棠 译), 《信号与系统》，西安交通大学出版社
- 王宝祥, 《信号与系统》，电子工业出版社
- 郑君里《信号与系统》，高等教育出版社
- 余成波, 陶红艳, 《信号与系统》，清华大学出版社

 HIT-Visual Intelligence Lab