

高等院校信息技术规划教材

# 信号与系统 学习指导和习题解析

甘俊英 颜健毅 杨敏 编著

INFORMATION TECHNOLOGY  
INFORMATION TECHNOLOGY  
INFORMATION TECHNOLOGY

清华大学出版社



高等院校信息技术规划教材

# 信号与系统 学习指导和习题解析

甘俊英 颜健毅 杨敏 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是高等院校理工科“信号与系统”课程的辅导教材。全书共分为6章:信号与系统的基本概念,连续时间系统的时域分析,傅里叶分析,复频域分析,离散时间信号与系统的分析以及系统的状态变量分析。每章内容包括基本要求、重点与难点、知识要点、例题精选和习题解答。

本书可作为高等院校电子信息工程、通信工程、自动控制工程、生物医学工程、自动化、计算机等专业学生《信号与系统》课程的辅导教材,或研究生入学考试的参考书,也可供相关领域的教师与工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

信号与系统学习指导和习题解析/甘俊英,颜健毅,杨敏编著. —北京:清华大学出版社, 2007.8

(高等院校信息技术规划教材)

ISBN 978-7-302-15191-3

I. 信… II. ①甘… ②颜… ③杨… 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(2007)第069519号

责任编辑:袁勤勇 李玮琪

责任校对:梁毅

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社总机:010-62770175

邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015

客户服务:010-62776969

印装者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:17.5

字 数:400千字

版 次:2007年8月第1版

印 次:2007年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:23.00元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:025374-01

# 编委会名单

主任：朱敏

副主任：王正洪 鲁宇红 焦金生

成员：（按拼音排序）

常晋义	邓凯	范新南	高佳琴	高玉寰	龚运新
顾建业	顾金海	林罡	刘训非	马正华	沈孟涛
唐全	王继水	王骏	王晴	王志立	吴访升
肖玉	杨长春	袁启昌	张旭翔	张燕	赵明生
郑成增	周凤石				

策划编辑：袁勤勇

在科教兴国方针的指引下,我国高等教育进入了一个新的历史发展时期,招生规模和在校生数量都有了大幅度的增长。我们在进行着世界上规模最大的高等教育。与此同时,对于高等教育的研究和认识也在不断深化。高等学校要明确自己的办学方向和办学特色,这既是不断提高高等教育水平的必然要求,更是高校不断发展和壮大必须首先考虑的问题。

教育部领导明确提出,高等教育应多元化,高等院校应实施分类分层次教学,这是高等教育大众化的必然结果,也是市场对人才需求的客观规律所致。因此要有相当部分的高等院校致力于培养应用型人才。此类院校在计算机教学中如何实现自己的培养目标,如何选择适用的应用型教材,已成为十分重要和迫切的任务。应用型人才的培养不能简单照搬研究型人才的培养模式,要在丰富的实践基础上认真总结,摸索新形势下的教学规律,在此基础上设计相关课程、改进教学方法,同时编写与之相适应的应用型教材。这一工作是非常艰巨的,也是非常有意义的。

在清华大学出版社的大力支持和配合下,应用型教材编委会于2003年成立。编委会汇集了众多高等院校的实践经验,并经过集中讨论和专家评审,遴选了一批优秀教材,希望能够通过这套教材的出版和使用,促进应用型人才培养的实践发展,为建立新的人才培养模式作出贡献。

我们编写应用型教材的主要出发点是:

1. 适应新形势下教育部对高等教育的要求以及市场对应用型人才的需求。
2. 计算机科学技术和信息技术发展迅速,教材内容和教学方式应与之相适应,适时地进行更新和改进。
3. 教育技术的发展对教材建设提出了更高的要求,教材将呈现

出纸介质出版物、电子课件以及网络学习环境等相互配合的立体化形态。

4. 根据不同的专业要求,突出应用,使理论与实践更加紧密结合。

以此为目标,我们将努力编写一套全新的、有实用价值的应用型计算机教材。经过参编教师的努力,第一批教材已经面世。教材将滚动式地不断更新、修正、提高,逐渐树立起自己的品牌。希望使用本系列教材的广大师生能对我们的教材提出宝贵的意见,共同建设具有应用型特色的精品教材。

朱 敏

2006年5月

# 前言

## foreword

随着信息科学技术的迅猛发展,掌握信息科学技术是电气信息类专业学生的重要任务。《信号与系统》是电气信息类专业最重要的专业基础课程之一,也是各院校相关硕士点研究生入学考试的必考课程。长期的教学实践表明,学生在学习《信号与系统》课程中,除了必须掌握从事信号处理工作所需的基础理论知识,还需通过各种典型例题来加深对理论知识的理解,同时还要借助一定量的习题训练来巩固和复习课本的主要内容。

本书共分6章。第1章为信号与系统的基本概念;第2章为连续时间系统的时域分析;第3章为连续时间信号与系统的傅里叶分析;第4章为连续时间信号与系统的复频域分析;第5章为离散时间信号与系统分析;第6章为系统的状态变量分析。每章内容均包括基本要求、重点与难点、知识要点、例题精选和习题解答。其中,基本要求、重点与难点旨在帮助读者掌握课程学习的重要知识点,提高课程学习的水平,而知识要点则紧密结合课程的教学,对基本概念和内容要点等做出系统归纳,使读者对《信号与系统》课程的重点内容和公式等一目了然。同时,精选了部分例题,做了详细的分析,使读者熟悉整个答题过程,培养多种解题思路及技巧。每章对涵盖知识点的习题给出了较为详细的解答过程,进一步加深了读者对教学内容的理解和掌握。

本书由甘俊英、颜健毅、杨敏编写,应自炉为本书的编写提供了较多素材,胡异丁、樊可清、李霆、温浩为习题解答提供了部分素材,最后由甘俊英统稿。本书的出版得到了广东省江门市五邑大学教务处和信息学院的大力支持,在此表示感谢!

由于作者水平有限,加上时间仓促,书中错误与不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2007年3月



# 目录

# Contents

<b>第 1 章 信号与系统的基本概念</b> .....	1
1.1 基本要求 .....	1
1.2 重点与难点 .....	1
1.3 知识要点 .....	1
1.3.1 信号的定义与分类 .....	1
1.3.2 典型信号及其特点 .....	2
1.3.3 信号的基本运算 .....	5
1.3.4 信号的分解 .....	6
1.3.5 系统的模型与分类 .....	7
1.3.6 线性时不变系统的特性 .....	8
1.3.7 研究系统的方法 .....	8
1.4 例题精选 .....	8
1.5 习题解答 .....	12
<b>第 2 章 连续时间 LTI 系统的时域分析</b> .....	23
2.1 基本要求 .....	23
2.2 重点与难点 .....	23
2.3 知识要点 .....	23
2.3.1 系统的微分方程与转移算子 .....	23
2.3.2 微分方程的经典求解法 .....	24
2.3.3 零输入响应和零状态响应 .....	26
2.3.4 冲激响应和阶跃响应 .....	27
2.3.5 卷积积分 .....	27
2.3.6 卷积积分的性质 .....	28
2.4 例题精选 .....	30
2.5 习题解答 .....	41





<b>第 3 章 连续时间信号与系统的傅里叶分析</b> .....	68
3.1 基本要求 .....	68
3.2 重点与难点 .....	68
3.3 知识要点 .....	68
3.3.1 周期信号的频域分析 .....	68
3.3.2 非周期信号的频域分析 .....	71
3.3.3 功率信号与能量信号 .....	74
3.3.4 抽样信号与抽样定理 .....	75
3.3.5 连续时间 LTI 系统的系统函数 .....	77
3.3.6 系统的无失真传输 .....	79
3.3.7 理想低通滤波器 .....	79
3.3.8 调制与频分复用 .....	80
3.4 例题精选 .....	81
3.5 习题解答 .....	92
<b>第 4 章 连续时间信号与系统的复频域分析</b> .....	125
4.1 基本要求 .....	125
4.2 重点与难点 .....	125
4.3 知识要点 .....	125
4.3.1 拉普拉斯变换的定义 .....	125
4.3.2 典型信号的拉普拉斯变换 .....	126
4.3.3 拉普拉斯变换的基本性质 .....	126
4.3.4 拉普拉斯反变换 .....	127
4.3.5 线性系统的 $s$ 域分析法 .....	129
4.3.6 $s$ 域系统的系统函数 $H(s)$ .....	130
4.3.7 系统方框图和信号流图 .....	130
4.3.8 连续时间 LTI 系统的稳定性 .....	132
4.4 例题精选 .....	132
4.5 习题解答 .....	142
<b>第 5 章 离散时间信号与系统分析</b> .....	175
5.1 基本要求 .....	175
5.2 重点与难点 .....	175
5.3 知识要点 .....	175
5.3.1 离散时间信号及其时域特性 .....	175
5.3.2 离散时间系统 .....	177

5.3.3 Z 变换	179
5.3.4 离散时间系统的 $z$ 域分析	183
5.4 例题精选	184
5.5 习题解答	191
<b>第 6 章 系统的状态变量分析</b>	<b>228</b>
6.1 基本要求	228
6.2 重点与难点	228
6.3 知识要点	228
6.3.1 基本概念和定义	228
6.3.2 连续时间 LTI 系统状态方程的建立	229
6.3.3 连续时间 LTI 系统状态方程的求解	230
6.3.4 离散时间系统状态方程的建立和求解	233
6.4 例题精选	234
6.5 习题解答	238
<b>参考文献</b>	<b>265</b>

## 信号与系统的基本概念

### 1.1 基本要求

- 掌握信号的定义、分类及其描述方法；
- 熟悉典型信号的表达式、波形及特性；
- 信号基本运算和分解；
- 系统的分类、描述和性质。

### 1.2 重点与难点

- 典型连续时间信号(特别是阶跃信号与冲激信号)的描述和特性；
- 线性时不变系统的概念和特性。

### 1.3 知识要点

#### 1.3.1 信号的定义与分类

##### 1. 定义

信息的具体表现形式称为信号,信号是一个或多个独立变量的函数,它包含了某个或某些物理现象性质的信息。

##### 2. 信号的描述

信号的描述方法如下:

- (1) 函数表达式;
- (2) 波形图。

##### 3. 信号的分类

根据信号的一些内在属性和特点,或者研究的需要,可以对信号进行各种不同的分

类：确定性信号和随机信号；连续时间信号和离散时间信号；周期信号和非周期信号；能量信号和功率信号；一维信号和 multidimensional 信号。

### 1.3.2 典型信号及其特点

#### 1. 实指数信号

$$f(t) = Ke^{\sigma t} \quad (1-1)$$

式中  $K, \sigma$  均为实数,  $\sigma$  取不同的值, 实指数信号  $Ke^{\sigma t}$  的波形变化规律如图 1-1 所示。

#### 2. 正弦信号

$$f(t) = K\cos(\omega t + \theta) \quad (1-2)$$

其中,  $K$  为振幅,  $\omega$  是角频率,  $\theta$  称为初始相位, 其波形如图 1-2 所示。

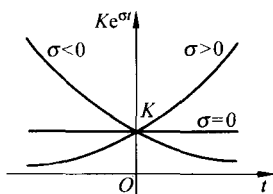


图 1-1 指数信号

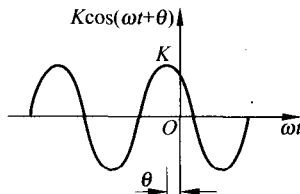


图 1-2 正弦信号

#### 3. 复指数信号

$$f(t) = Ke^{s t} = Ke^{(\sigma + j\omega)t} = Ke^{\sigma t} \cos(\omega t) + jKe^{\sigma t} \sin(\omega t) \quad (1-3)$$

式中  $s = \sigma + j\omega$  是复变量,  $\sigma, \omega$  为实数。复指数信号实部的波形和虚部的波形如图 1-3 所示, 其中虚部和实部只相差一个相位。

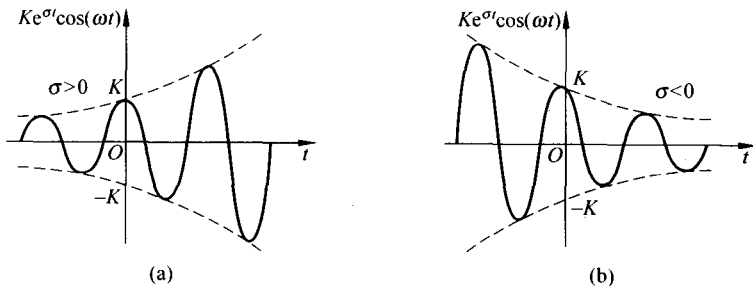


图 1-3 复指数信号的实部波形和虚部波形

#### 4. 抽样信号

$$\text{Sa}(t) = \frac{\sin t}{t} \quad (1-4)$$

抽样信号的波形如图 1-4 所示,其性质如下:

(1) 是偶函数,即  $Sa(t) = Sa(-t)$ ;

(2) 当  $t = k\pi$ , 且  $k$  为非零整数时,函数值等于零;

(3)  $Sa(t)$  曲线下的面积为  $\pi$ , 即  $\int_{-\infty}^{\infty} Sa(t) dt =$

$$2 \int_0^{\infty} Sa(t) dt = \pi;$$

(4) 在  $t=0$  时存在一个重要的极限,即  $\lim_{t \rightarrow 0} Sa(t) =$

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin t}{t} = 1.$$

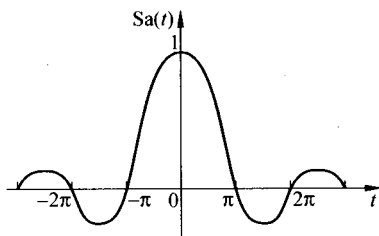


图 1-4 抽样信号

### 5. 单位斜变信号

$$\text{Ramp}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

单位斜变信号的波形如图 1-5 所示。实际中遇到的一般是幅度增长到一定值就被截平的斜变信号,其表达式为

$$R(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{K}{\tau}t, & t \leq \tau \\ K, & t > \tau \end{cases} \quad (1-6)$$

波形如图 1-6 所示。

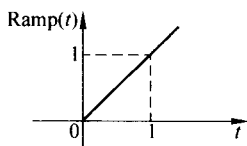


图 1-5 单位斜变信号

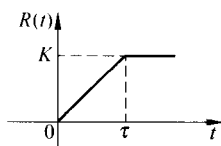


图 1-6 截顶的斜变信号

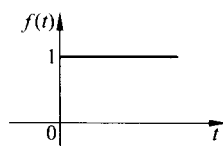


图 1-7 单位阶跃信号

### 6. 单位阶跃信号

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

单位阶跃信号的波形如图 1-7 所示。

单位斜变信号的导数是单位阶跃信号,单位阶跃信号的积分就是单位斜变信号,即

$$\frac{d}{dt} \text{Ramp}(t) = u(t), \quad \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau = \text{Ramp}(t) \quad (1-8)$$

### 7. 门函数

$$G_{\tau}(t) = u\left(t + \frac{\tau}{2}\right) - u\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \quad (1-9)$$

门函数的波形如图 1-8 所示。

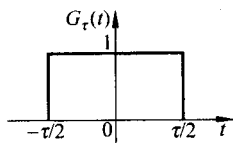


图 1-8 门函数

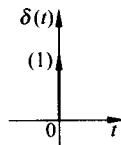


图 1-9 单位冲激信号

## 8. 单位冲激信号

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \\ \delta(t) = 0 \quad t \neq 0 \end{cases} \quad (1-10)$$

单位冲激信号的波形如图 1-9 所示,其性质如下:

$$\delta(t) = \delta(-t) \quad (1-11)$$

$$\delta(t - t_0) = \delta[-(t - t_0)] \quad (1-12)$$

$$f(t)\delta(t) = f(0)\delta(t) \quad (1-13)$$

$$f(t)\delta(t - t_0) = f(t_0)\delta(t - t_0) \quad (1-14)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(0)\delta(t) dt = f(0) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = f(0) \quad (1-15)$$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t - t_0) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t_0)\delta(t - t_0) dt \\ &= f(t_0) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = f(t_0) \end{aligned} \quad (1-16)$$

$$\delta(at) = \frac{1}{|a|} \delta(t) \quad (1-17)$$

$$\int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = u(t) \quad (1-18)$$

$$\frac{d}{dt} u(t) = \delta(t) \quad (1-19)$$

## 9. 冲激偶信号

$$\delta'(t) = \frac{d\delta(t)}{dt} \quad (1-20)$$

冲激偶信号的波形如图 1-10 所示,其性质如下:

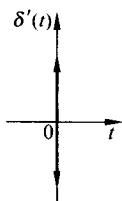


图 1-10 冲激偶信号

$$\delta'(t) = -\delta'(-t) \quad (1-21)$$

$$\delta'(t - t_0) = -\delta'[-(t - t_0)] \quad (1-22)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta'(t) dt = 0 \quad (1-23)$$

$$\int_{-\infty}^t \delta'(\tau) d\tau = \delta(t) \quad (1-24)$$

$$f(t)\delta'(t - t_0) = f(0)\delta'(t) - f'(0)\delta(t) \quad (1-25)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta'(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)d\delta(t) \\ = \delta(t)f(t) \Big|_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)f'(t)dt = -f'(0) \quad (1-26)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta^{(n)}(t-t_0)dt = (-1)^{(n)}f^{(n)}(t_0) \quad (1-27)$$

### 1.3.3 信号的基本运算

#### 1. 信号相加

$N$  个信号  $f_1(t), f_2(t), \dots, f_N(t)$  相加构成新的信号  $y(t)$ , 即

$$y(t) = \sum_{n=1}^N f_n(t) \quad (1-28)$$

#### 2. 信号相乘

$N$  个信号  $f_1(t), f_2(t), \dots, f_N(t)$  相乘构成新的信号  $y(t)$ , 即

$$y(t) = \prod_{n=1}^N f_n(t) \quad (1-29)$$

#### 3. 信号微分

$$y(t) = \frac{d}{dt}f(t) \quad (1-30)$$

#### 4. 信号积分

$$y(t) = \int_{-\infty}^t f(\tau)d\tau \quad (1-31)$$

#### 5. 信号时移、反折与尺度变换

##### (1) 时移

信号  $f(t)$  的时移就是将表达式中自变量  $t$  用  $t \pm t_0$  替换。当  $t_0 > 0$  时, 时移信号  $f(t-t_0)$  的波形比  $f(t)$  的波形在时间上滞后  $t_0$ ;  $f(t+t_0)$  的波形比  $f(t)$  的波形在时间上超前  $t_0$ 。

##### (2) 反折

信号  $f(t)$  的反折就是将表达式中自变量  $t$  用  $-t$  替换成  $f(-t)$ ,  $f(-t)$  的波形是  $f(t)$  的波形相对于纵轴的镜像。

##### (3) 尺度变换

信号  $f(t)$  的尺度变换是把信号定义域中自变量  $t$  用  $at$  替换成  $f(at)$ , 其中,  $a$  是常量。如果  $a > 1$ , 则  $f(at)$  表示  $f(t)$  的波形沿时间轴压缩至原来的  $\frac{1}{a}$ ; 如果  $0 < a < 1$ , 则



$f(at)$ 表示  $f(t)$ 的波形沿时间轴扩展为原来的  $\frac{1}{a}$ 。

### 1.3.4 信号的分解

根据不同的需要,信号可从不同角度进行分解。

#### 1. 直流分量与交流分量

$$f(t) = f_D + f_A(t) \quad (1-32)$$

其中,  $f_D$  为信号的直流分量;  $f_A(t)$  为信号的交流分量。

$$f_D = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) dt \quad (1-33)$$

#### 2. 偶分量与奇分量

$$f(t) = f_e(t) + f_o(t) \quad (1-34)$$

$$f_e(t) = \frac{1}{2} [f(t) + f(-t)] \quad (1-35)$$

$$f_o(t) = \frac{1}{2} [f(t) - f(-t)] \quad (1-36)$$

#### 3. 实部分量与虚部分量

$$f(t) = f_r(t) + f_i(t) \quad (1-37)$$

$$f_r(t) = \operatorname{Re}[f(t)] = \frac{f(t) + f^*(t)}{2} \quad (1-38)$$

$$f_i(t) = \operatorname{Im}[f(t)] = \frac{f(t) - f^*(t)}{2} \quad (1-39)$$

#### 4. 脉冲分量

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \delta(t - \tau) d\tau \quad (1-40)$$

#### 5. 正交函数分量

$f(t)$ 为定义在区间  $(a, b)$  内的函数,  $\{\varphi_i(t), i=1, 2, \dots, \infty\}$  是一个完备的正交函数集, 则

$$f(t) = \sum_{i=1}^{\infty} C_i \varphi_i(t) \quad (1-41)$$

式中  $i=0, 1, \dots, \infty$  为正交函数的序号或  $f(t)$  所含分量的序号,  $C_i$  为  $x(t)$  所含的第  $i$  个分量的系数。

### 1.3.5 系统的模型与分类

#### 1. 系统的定义

系统就是由若干个相互关联又相互作用的事物组合而成的,具有某种或某些特定功能的整体。

#### 2. 系统的模型

所谓系统模型,是系统物理特性的数学抽象,一般也称为数学模型。系统模型可用数学表达式、框图、信号流图等形式描述。

#### 3. 系统的分类

按照系统功能或特性的区别或数学模型描述的区别,可将系统进行不同的分类。主要包括:

##### (1) 连续时间系统和离散时间系统

如果系统的输入信号、输出信号和系统内部的信号都是连续时间信号,则该系统称为连续时间系统;如果系统的输入信号、输出信号和系统内部的信号都是离散时间信号,则该系统称为离散时间系统。

##### (2) 即时系统和动态系统

如果系统的输出信号只取决于同时刻的输入,与它过去的工作状态无关,则称该系统为即时系统或无记忆系统;如果系统的输出信号不仅取决于同时刻的输入,还取决于系统过去的工作状态,这种系统称为动态系统。

##### (3) 线性系统和非线性系统

满足叠加性和均匀性的系统称为线性系统;否则为非线性系统。

##### (4) 时变系统和时不变系统

如果系统的参数不随时间变化,则称该系统为时不变系统,或称为非时变系统或定常系统;如果系统的参数随时间变化,则称该系统为时变系统或参变系统。

##### (5) 可逆系统和不可逆系统

如果系统在不同的输入作用下产生不同的输出,则该系统称为可逆系统,否则为不可逆系统。

##### (6) 单输入-单输出系统和多输入-多输出系统

如果系统只有一个输入信号,一个输出信号,则该系统称为单输入-单输出系统;如果系统有不止一个输入信号或输出信号,则称为多输入-多输出系统。

##### (7) 一维系统和多维系统

如果系统处理的是一维信号,则该系统称为一维系统;如果系统处理的信号是多维信号,则称为多维系统。