



数字信号处理基础 (01114301)

主讲老师：曾凡平

辅导老师：朱贯淼、袁园

时间地点：二（晚上） 3322

五 (1,2) 3214

主讲教师简介

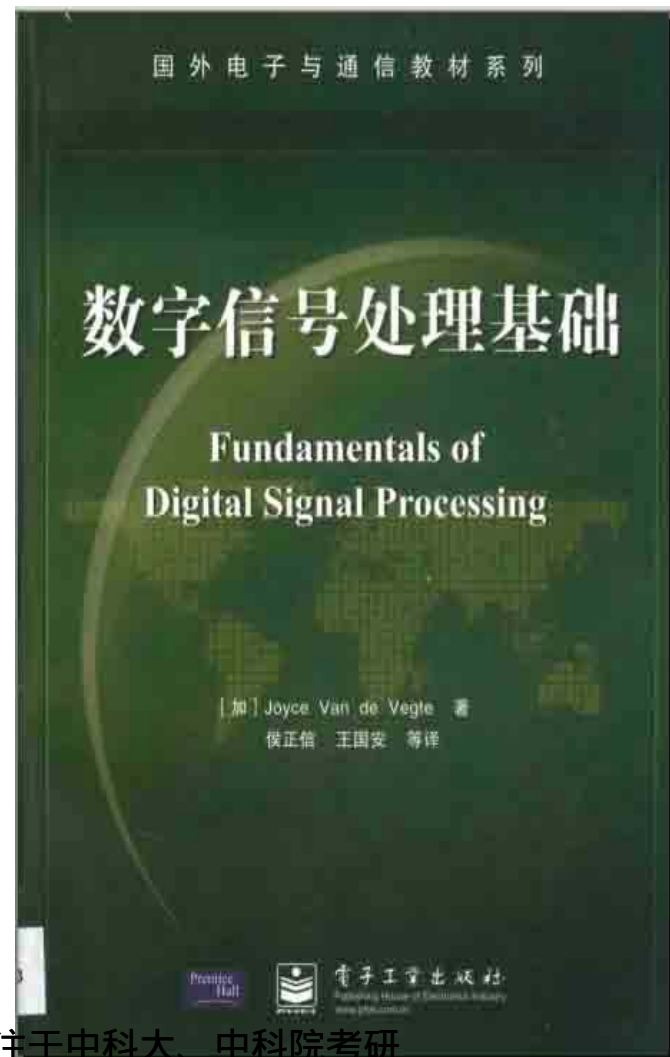
- 曾凡平，计算机学院， 计算机应用
 - 研究方向：软件测试与信息安全
 - 实验室：电三楼418
 - 电话：3601498(办公室)
 - 资源：<http://staff.ustc.edu.cn/~billzeng/>
 - 电邮：billzeng@ustc.edu.cn
 - 辅导老师邮箱：
 - 朱贯淼：zgmzgm@mail.ustc.edu.cn
 - 袁园：yuan0523@mail.ustc.edu.cn

课程简介

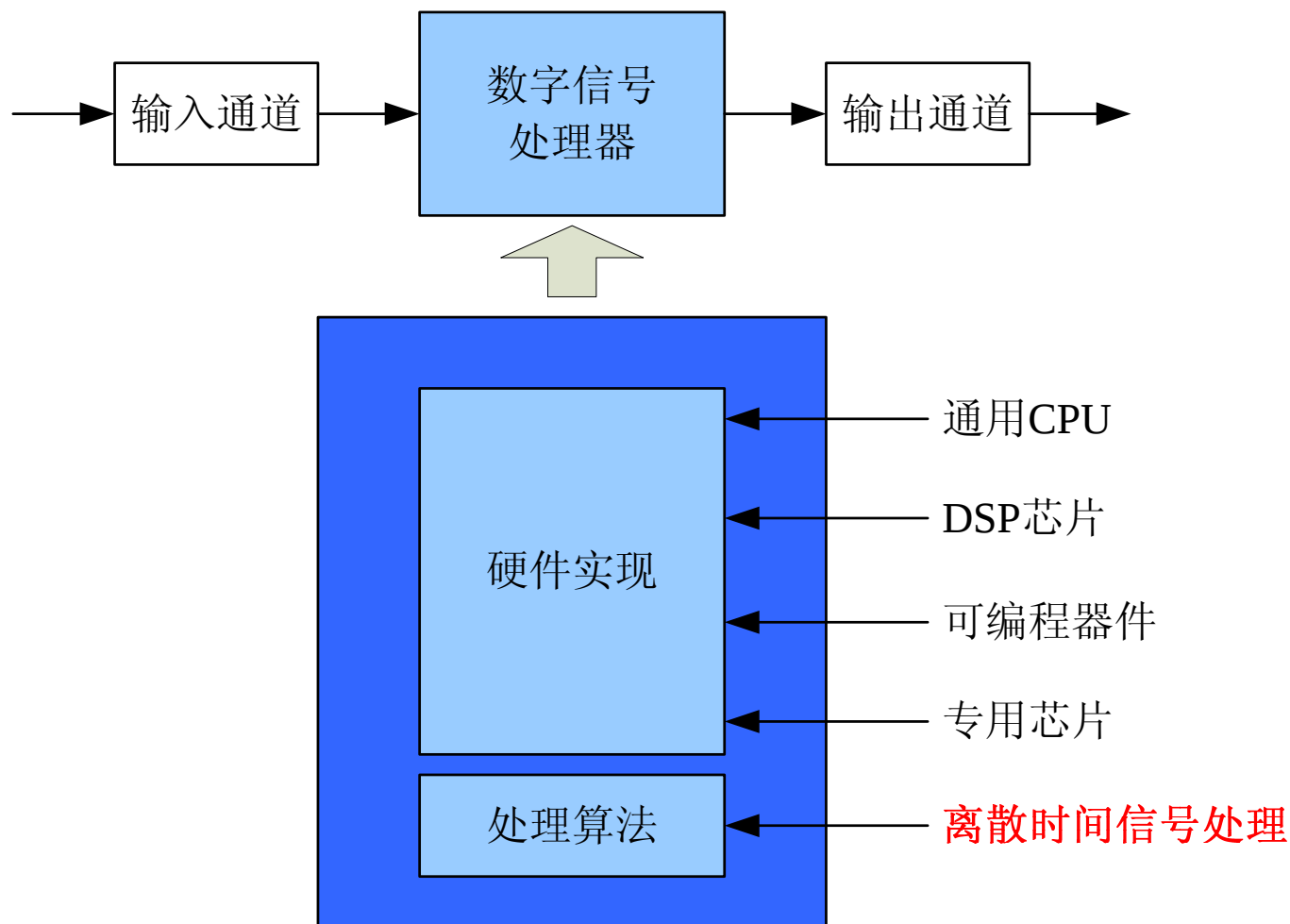
- 主讲60学时+实验20学时 3.5学分
- 开课目的：优化知识体系，增强竞争力
- 课程主要内容：
 - 1个定理：采样定理
 - 1个工具：Matlab
 - 3个变换：Z变换、傅里叶变换、小波变换
 - 4种模型：差分方程、脉冲响应、频率响应、Z传输函数
 - 各种滤波器的原理、设计及其应用
- 成绩评定：
 - 期末考试55分+作业20分
 - +实验15分+考勤10分

教材

- 《数字信号处理基础》中文翻译版
 - 电子工业出版社2005年(再版)
 - 加拿大Joyce Van de Vegte编著
 - 侯正信、王国安翻译
- 授课方式
 - 以多媒体教学为主
 - 板书难点与重点部分
 - 大量使用Matlab工具(7.1)
- 课堂规则
 - 迟到5分钟请下节课入场。
 - 上课不允许吃食物。



典型的数字信号处理系统



常用的硬件实现方法

- 通用CPU

- Intel 80x86序列，ARM系列

- DSP芯片

- AD序列，TI序列

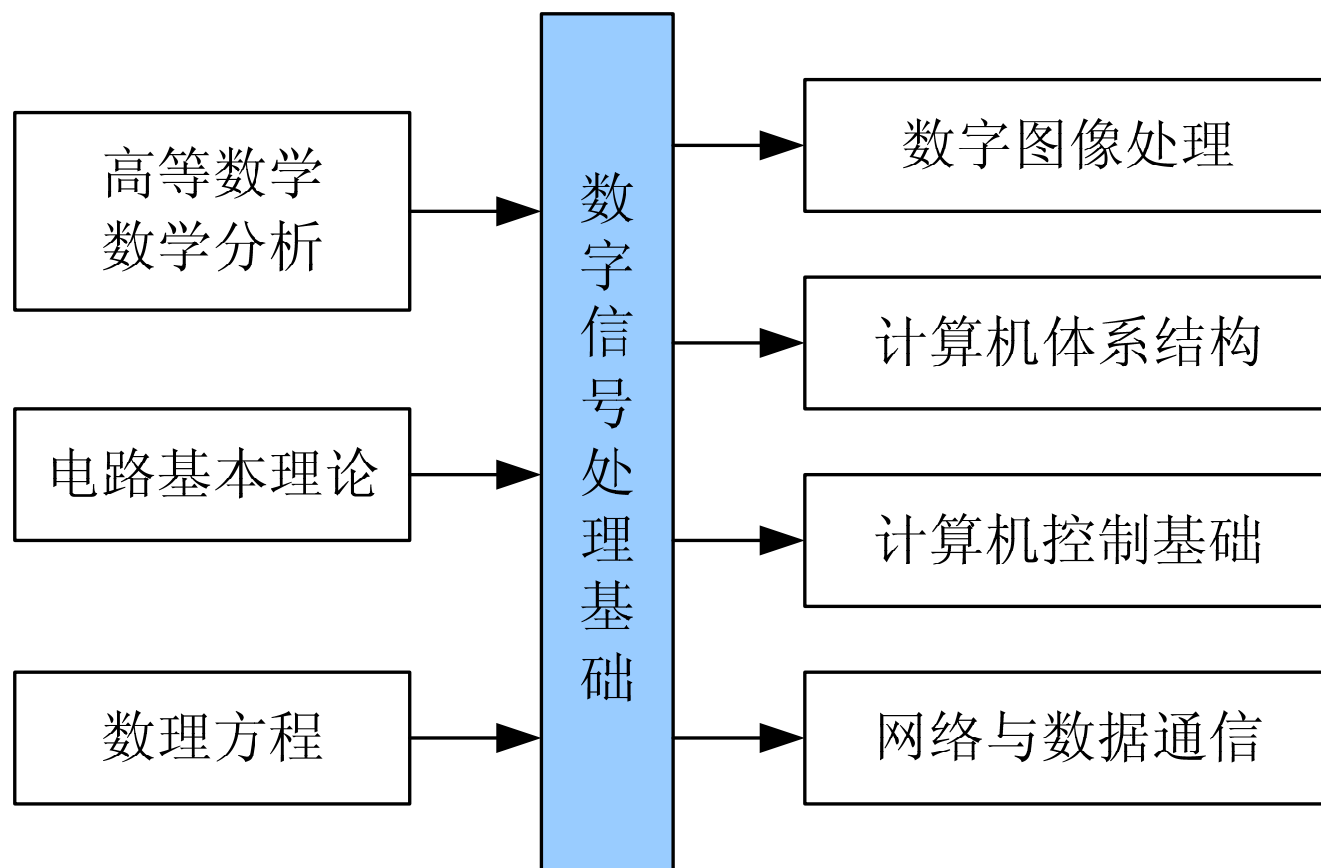
- 可编程器件

- FPGA(Field Programmable Gate Array)

- 专用芯片

- ASIC(Application Specific Integrated Circuit)

与计算机学科其它课程的关系



第1章 数字信号处理概述

1. 模拟和数字信号的区别
2. 模/数转换
3. 数/模转换
4. 信息与其频谱的关系
5. 滤波的基本概念
6. 讨论数字信号处理的应用

1.1 信号与系统

- 人类已经进入以网络技术和计算机技术为标志的信息社会。**信息已经成为人类社会最重要的资源。**
- 计算机所使用的是数字信号。随着计算机应用的普及，对数字信号进行高效处理的需求日益迫切，并且，现代计算机的高速处理能力引起了数字信号的广泛应用，进一步促进了数字信号技术的发展。数字信号处理(或简称DSP)，对于许多应用来讲都是必需的，图1.1中列出了其中一些应用。**数字信号处理已经成为信息社会的技术基础之一。**

图1.1 DSP的应用实例

按键电话	语音合成
图象边缘检测	回波抵消
数字信号及图象滤波	耳蜗移植
地震波分析	抗锁制动
文字识别	信号及图象压缩
语音识别	降噪
磁共振成像MRI扫描	压扩
音乐合成	高清晰度电视
条形码阅读器	数字音频
声纳处理	加密
卫星图像分析	马达控制
数字测绘	远程医疗监护
蜂窝电话	智能设备
数字摄影机	家庭保安
麻醉剂及爆炸物检测	高速调制解调器

信号及其特征

- 信号：信息从一处带到另一处的变化
 - 人的听觉和视觉器官可以感知外界的压力或光的强度的变化，所以人可以听到声音和看到图象。我们遇到的大多数信号都是自然产生的。然而，信号也可以通过人工合成或计算机模拟产生。信号携带着信息，信号处理的目的是提取信号中的有用信息，并转换成合适的形式。信号处理的方法取决于信号的类型及信号中信息的性质。

信号的特征：取值方面

1. 时间方面的特征

- 连续信号：任何时刻都有定义
- 离散信号：某些时间点上无定义

2. 幅值方面的特征

- 模拟信号：在实数域中取值
- 量化信号：只取实数域中的部分值

信号的分类

■ 信号类型（从时间和幅值上分类）

① 连续的模拟信号：模拟信号

② 连续的量化信号：

③ 离散的模拟信号：

④ **离散的量化信号：数字信号**

■ 因为量化信号是对应的模拟信号的近似表示，其精确度与字长有关，当字长足够时，误差可以忽略不计，因此大部分情况下只考虑时间方面的特征：**连续和离散信号**。

■ 一般而言，模拟信号指连续的模拟信号，数字信号指离散的量化信号。

信号的特征：变化规律与能量特征

■ 变化规律

- 确定信号：可以由一个完全定义的过程来确定
- 随机信号：由随机方式产生且不能预测

■ 能量特征

- 能量信号：能量有限，平均功率为零
- 功率信号：平均功率有限，能量无限

信号的维数（自变量的个数）

- 一维信号：信号的幅值随时间变化
 - 如声音: away.wav, ooo.wav, 虎鲸的声音, 音叉信号
 - 脑电图
 - 风的速度
 - 电压、电流等
- 如图1.2 中的信号实例（下页）

图1.2(a) 单词“away”的时域波形

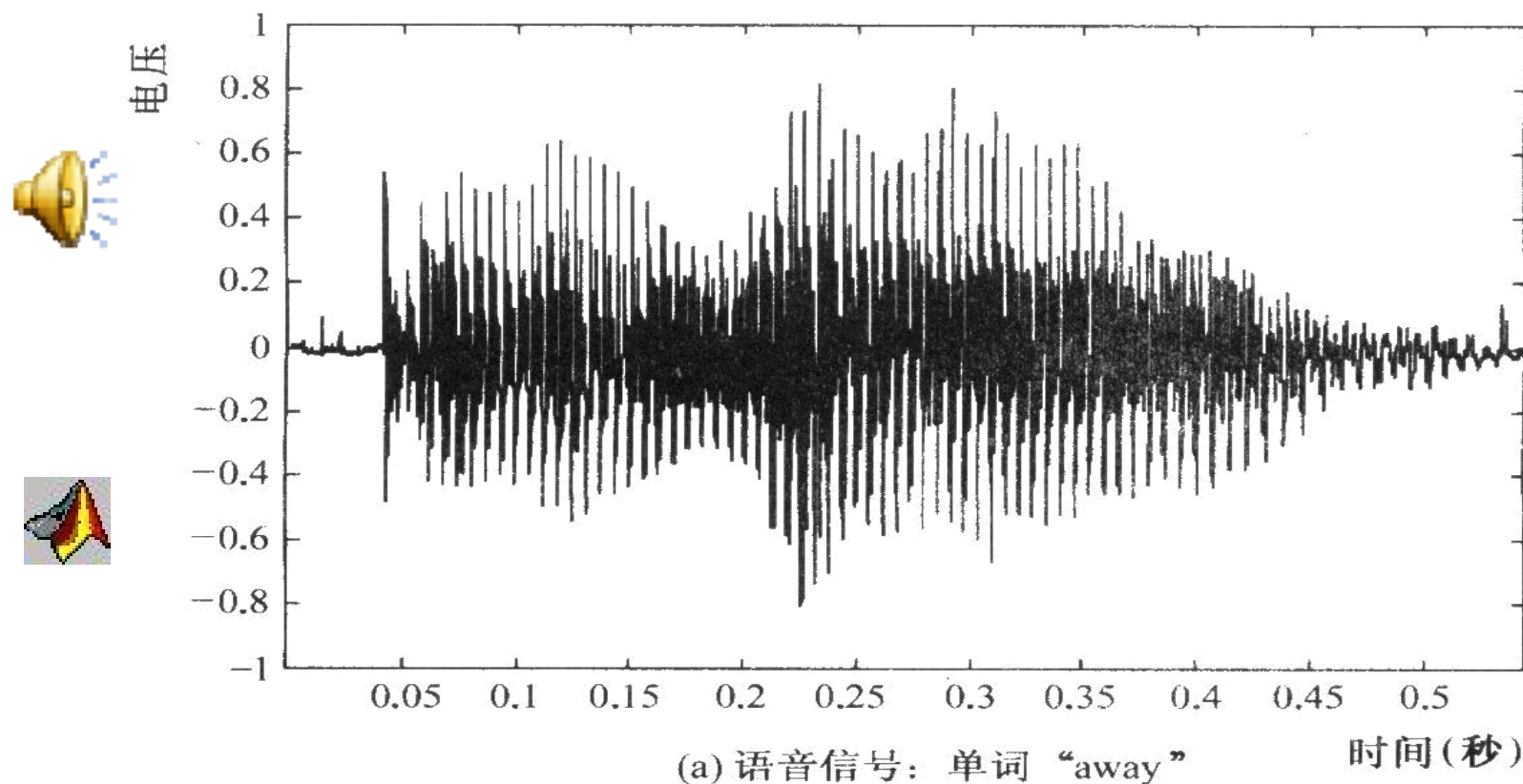


图1.2(b) 元音“ooo”的时域波形

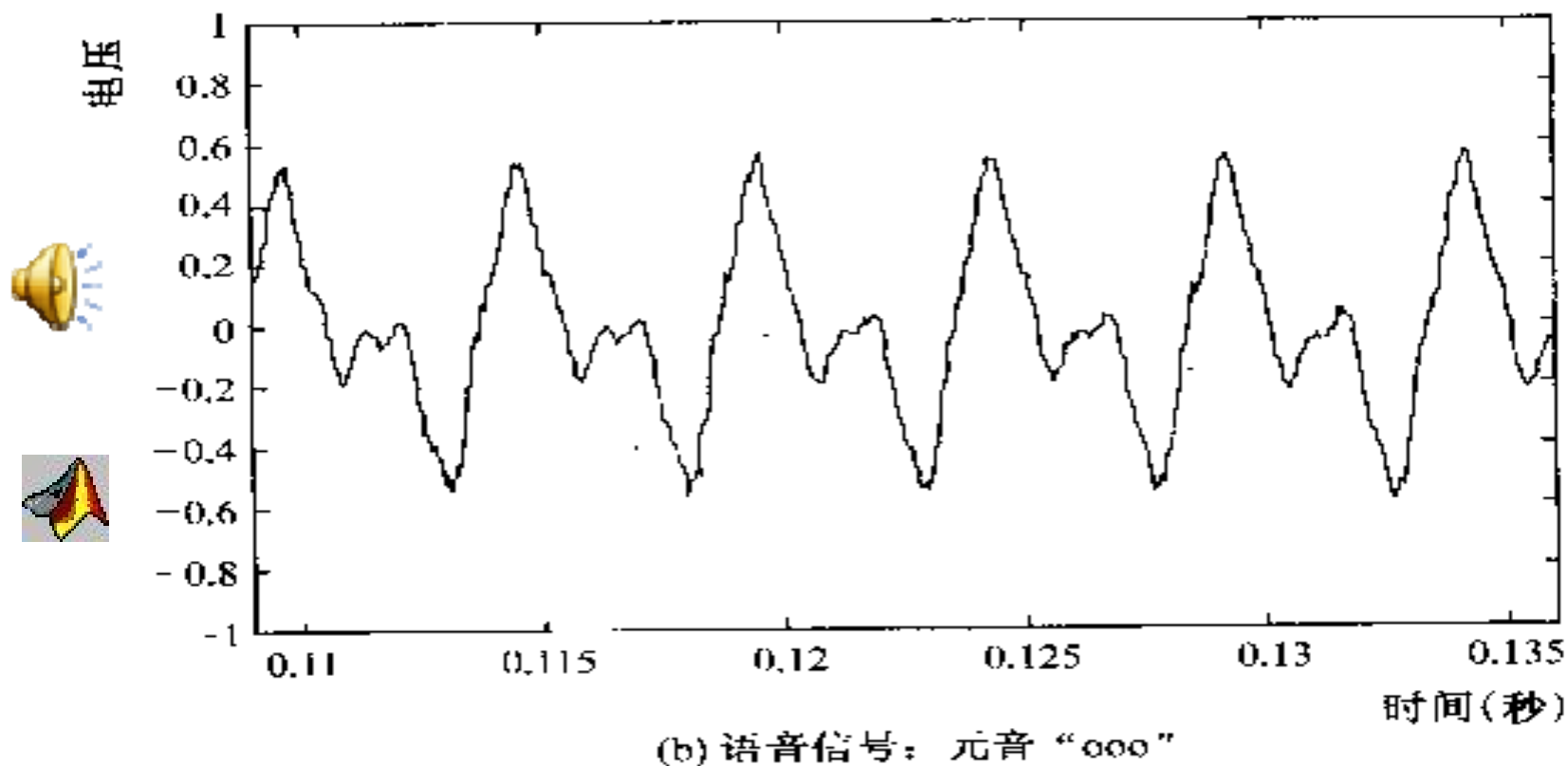


图1.2(c) 虎鲸的声音

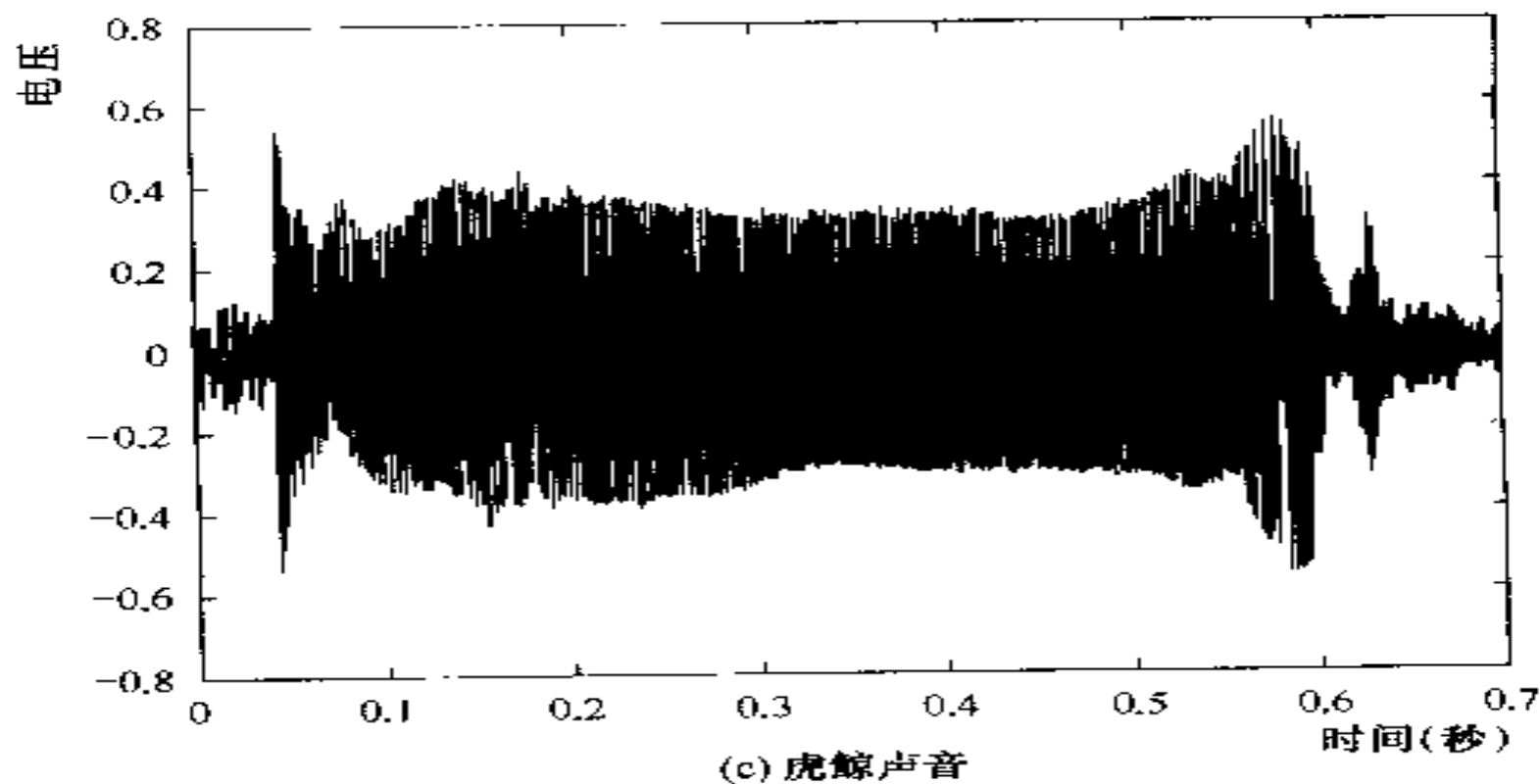


图1.2(d) 256Hz音叉信号

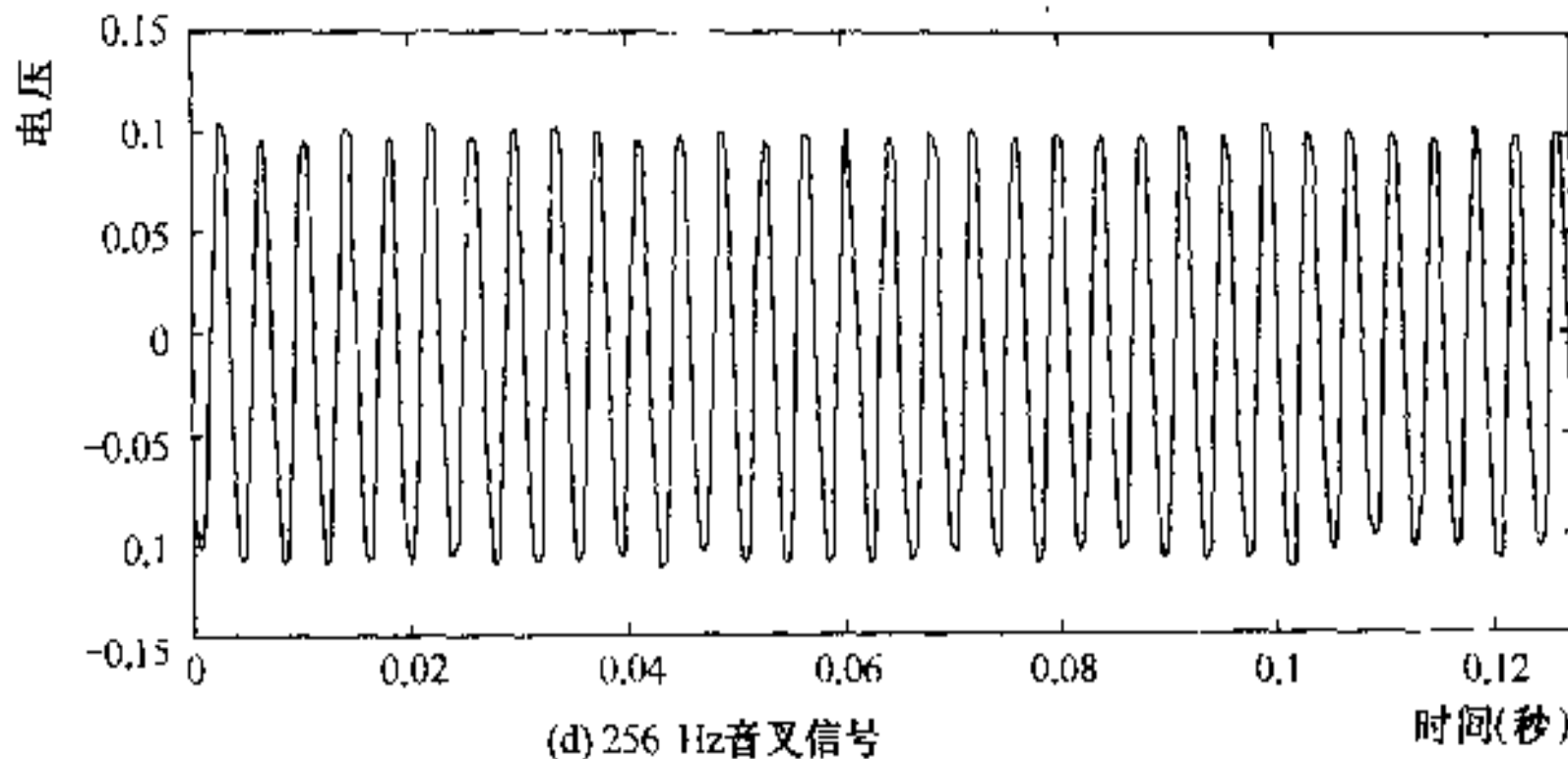


图1.2(e) 脑电图 (EEG)

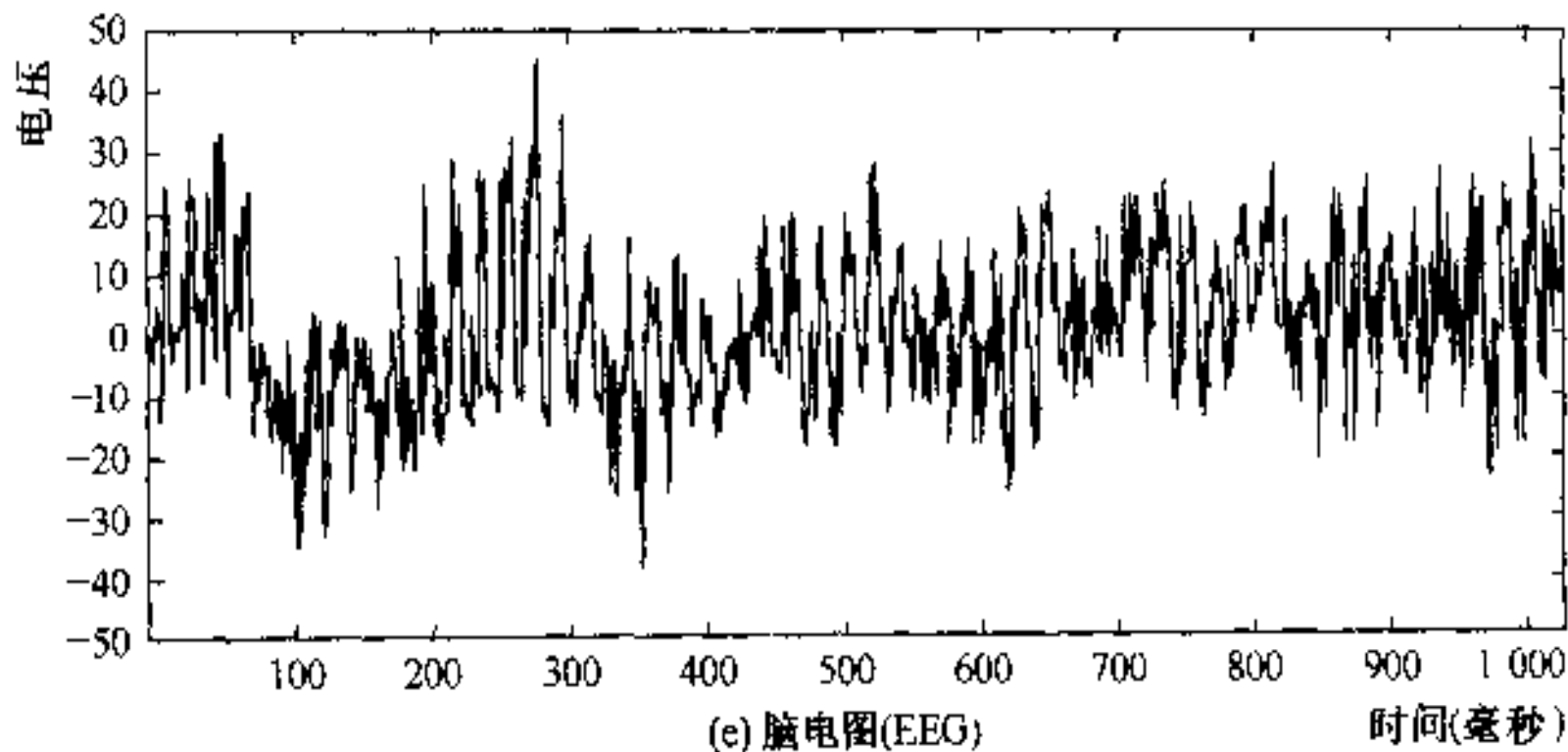
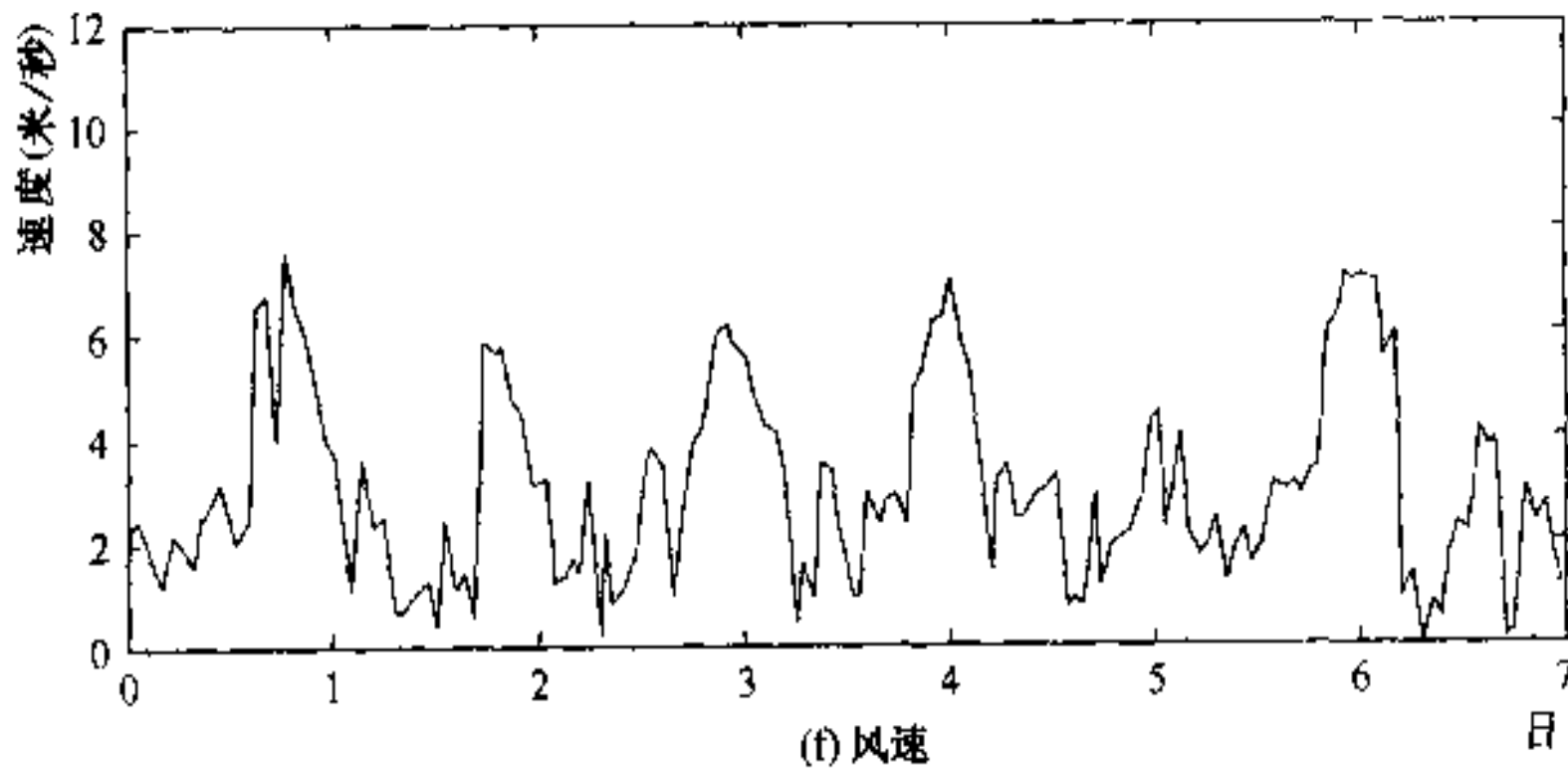


图1.2(f) 风速



多维信号

- 二维信号：两个自变量
 - 图像(如图1.3 照片(下页));
- 三维信号：三个自变量
 - 物体某个点的密度
 - 视频信号;

黑白照片（2维信号）



图 1.3 黑白照片(© Snap-shot.com)

彩色照片（2维信号）



视频（3维信号）



信号的数字形式

- 要对信号进行处理，必须首先(主要通过传感器)获取信号。例如，声音信号可通过麦克风转变为电信号。而图像可通过模拟或数字照相机来获得。模拟照相机中，光信号控制胶片上的化学反应；数字照相机中，物体的光信号产生电荷包，转变为二维栅上的电信号，这些电信号与产生它们的光信号一样，自然也是模拟信号。
- 物理界中最普遍的信号是时间上连续的模拟信号，在任意时刻取值，并具有无限多个电平（**需要无限多个比特来精确表示物理量的大小**），不适合计算机处理。在处理之前，必须将他们采样并转换为数字形式。

- 数字信号(digital signal)在有限(可数)的时间点上取值，具有有限个量化值（只需要有限个比特来表示信号的大小），所以非常适合计算机处理。
- 数字信号用数字表示，任何对数字可行的运算，同样适合于数字信号。

- 在大多数数字信号处理系统中数字信号和模拟信号二者都出现。系统输入端的模拟信号转换为数字形式，再进行处理，处理后，数字形式的信号再转换为模拟信号输出。
- 灵活快速的 **DSP**是在只存在数字信号的处理阶段实现的。图1.1中所列的应用实例均是系统(system)。
- 系统可以对信号进行分析、合成、修正、记录或播放。例如，图像压缩系统对数字图像进行再编码，使图像占用较少的内存空间，并以较短的时间在网间传输。语音识别系统用来自动识别人的声音。再例如，数字滤波器允许某些频率通过，而滤除其他频率的信号。
- 总之，数字信号处理多种多样，系统的性能取决于数字处理的算法。

系统

■ 系统:

- 由若干相互依赖的事物组成的具有某种特定功能的整体
 - 处理信号的物理设备(主动)
 - 以某种形式对信号作出响应的物理设备(被动)

■ 系统的分类

- 模拟系统：输入输出为模拟信号
- 连续时间系统：处理连续时间信号
- 离散时间系统：处理离散时间信号
- 数字系统：**处理离散数字信号**

数字系统与模拟系统相比有许多优点

- 模拟系统是由元器件搭建而成的电路，而元器件的特性在制造误差范围内差异很大，且特性还会随温度而改变，从而改变了电路的性能。
- 相比之下，数字系统的工作具有可预测性和可重复性。由于数字系统主要取决于软件，所以它的性能几乎不受以上因素的影响。因此，数字系统比模拟系统有更好的抗噪声性能。此外，数字系统比模拟电路体积小、功耗低。不过，数字技术的最大优势是它的灵活性，可通过简单地更改程序中的一些语句来修改设计，而大多数模拟系统的重新设计则往往需要重新搭建电路。

信号处理和数字信号处理器

■ 信号处理：Digital Signal Processing

- 用系统对信号进行处理(变换)，以获得人们期望的信号，从而达到提取信息，便于应用的一门学科。如：滤波、检测、压缩、识别、合成。

■ 数字信号处理器：Digital Signal Processor

- 能快速、有效完成数字信号处理的专用微处理器(内置了许多高效的数字信号处理算法)。

1.2 模/数和数/模转换

■ DSP系统处理的是数字信号，而现实世界中的信号是各种形式的模拟信号，为了处理这些信号，必须转换为数字信号。从模拟信号获得数字信号的过程称为模/数转换。

(1) 获得模拟电信号：获得数字信号的第一步是把它形式的信号转换为适合于处理的与被测信号成比例的电信号（电压或电流），这就要用各种相应的传感器：比如，麦克风可以把声音转换为电压信号，热电阻和热电偶可以把温度转换为电阻和电压，光敏二极管可以把光信号变换为电压信号（CCD芯片集成了光传感元件）。

图1.5 模拟电压信号

- 这些传感器的输出通常为与被测信号成比例的电信号(电压或电流)。而这个模拟电信号必须转换成数字的形式。
- 图1.5所示为电压信号。此信号可取其最小和最大值之间的任意值，且在任意时刻均有值。

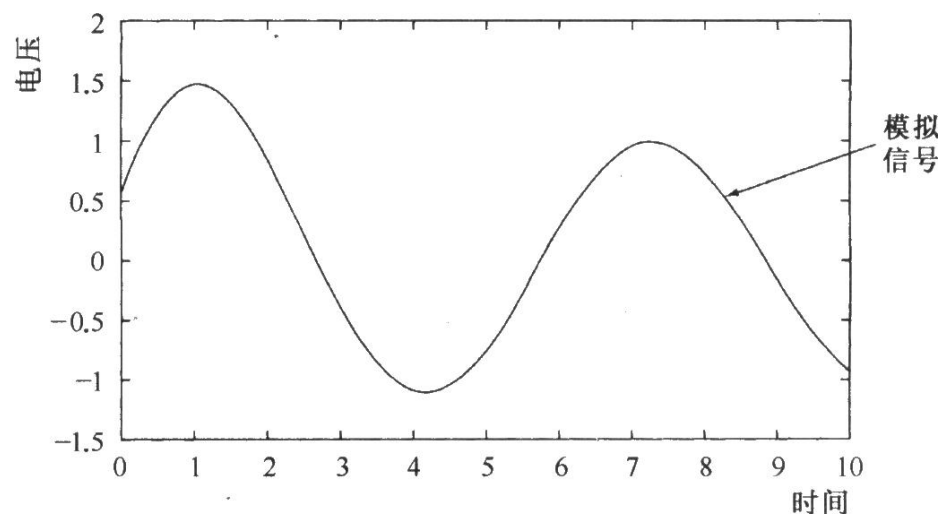


图 1.5 模拟电压信号

(2) 采样和量化

- 获得数字信号的第二步是对模拟电压信号进行模/数转换，又分为两个过程：
 - 1) 采样过程：以一定的时间间隔(采样周期 T)采集信号并保持到下一次采样(采样保持)。
 - 采样必须足够快，采样周期 T 必须足够小，跟上信号的最快变化，以避免丢失重要的信号特征，采样定理规定了不失真采样的最大采样周期(第二章介绍)。

图1.6 采样保持信号

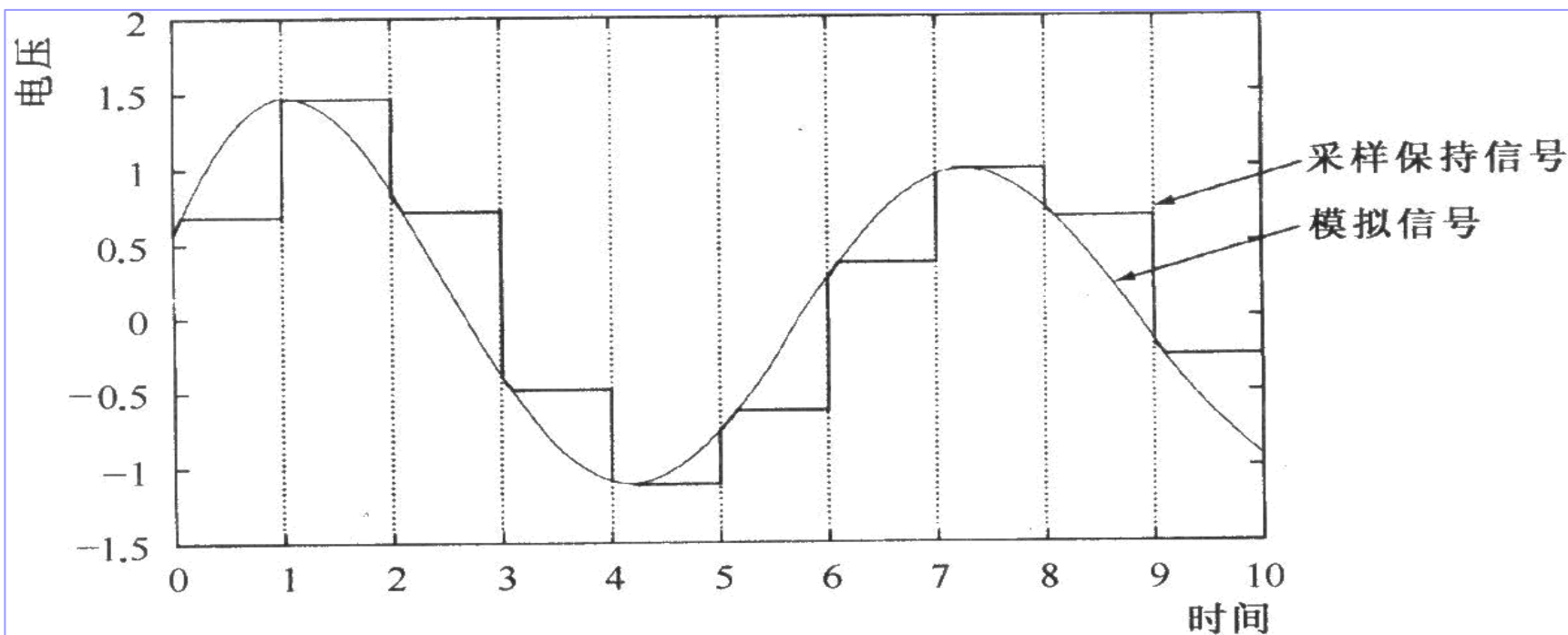
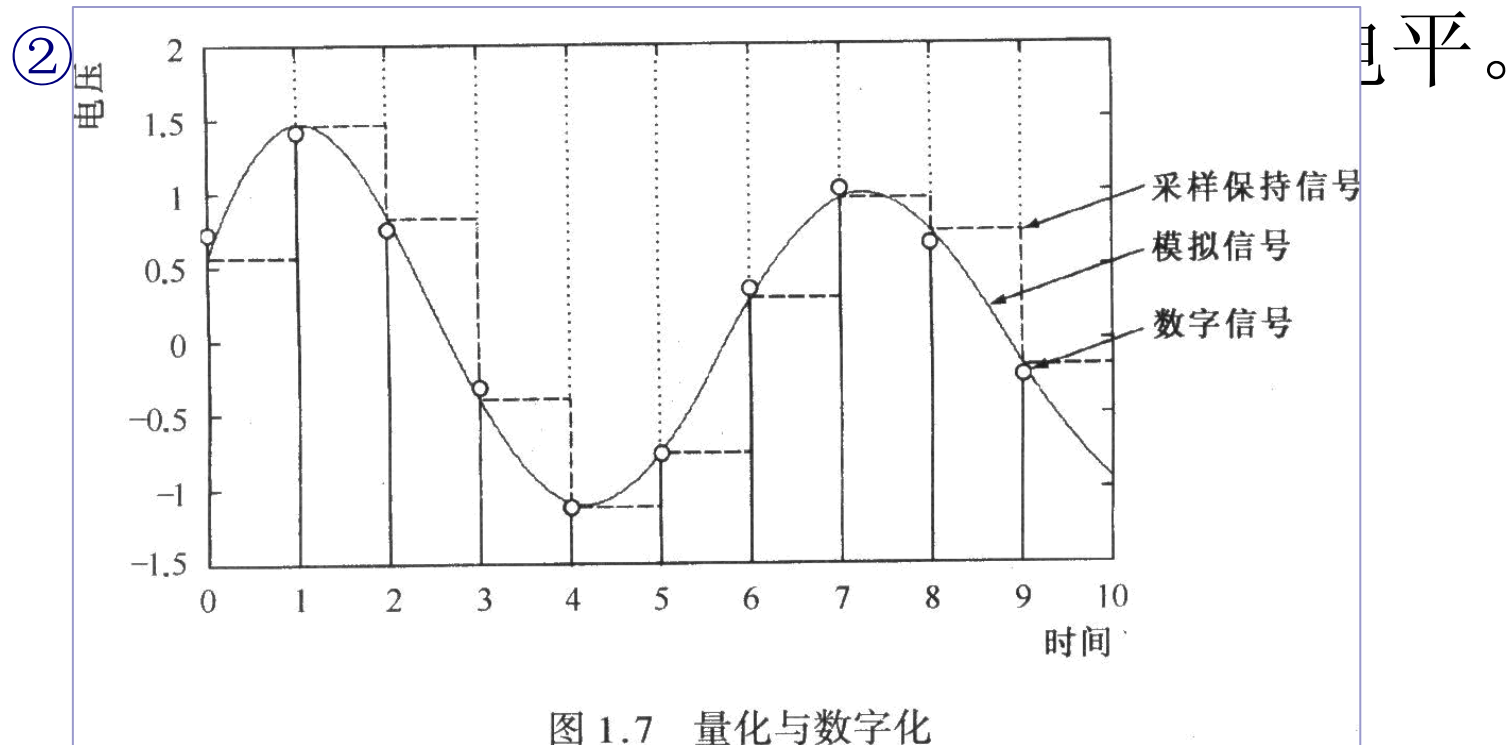


图 1.6 采样保持信号

2) 量化和数字化

① 用最接近的量化电平代表采样保持电平。



转换过程会带来误差

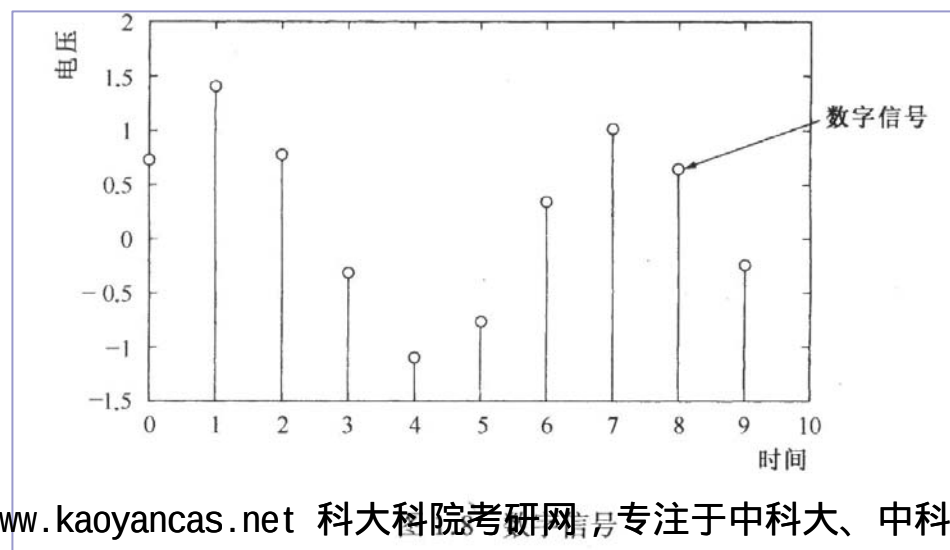
- 注意，图1.7中的数字信号值一般与该采样点的模拟信号值不一致。由于计算机存储是数字方式，所以不可能完全一致。计算机所用的数值以二进制形式存储于存储单元中。二进制值只能用称为比特(bit)的0和1(或二进制数)表示。计算机中，存储单元是硬件结构，它储存一组比特，每个存储单元可存储8，16或32比特。
- 转换过程会带来误差，误差的大小与转换器的字长和允许输入的模拟电压的最大值有关。
- 误差可以随字长的增加而减小，但不会消除。

(3) 数字信号的特点

□ 数字信号用高度与电平成比例的带圆圈的线段表示(见图1.8)。

■ 数字信号的特点

- 数字信号取值的个数受限于计算机所用的字长。
- 数字信号仅在采样时刻有值，采样点之间没有定义。



模拟信号的重构 —— 数 / 模转换

- 处理后，数字信号一般还要转换为模拟信号的形式。例如，数字信号不适合驱动扬声器，而要正确地再现声音，则需要模拟信号。
- 数 / 模转换[digital-to-analog conversion]的第一步是把数字代码转换为与其成比例的模拟电压。图1.8所示为数字信号，每个采样点处的高度对应数字代码得到的模拟电压。这个模拟电压的电平保持一个采样周期，称为零阶保持(Zero order hold)，如图1.9 (下一页)。

重构1：数 / 模转换及零阶保持

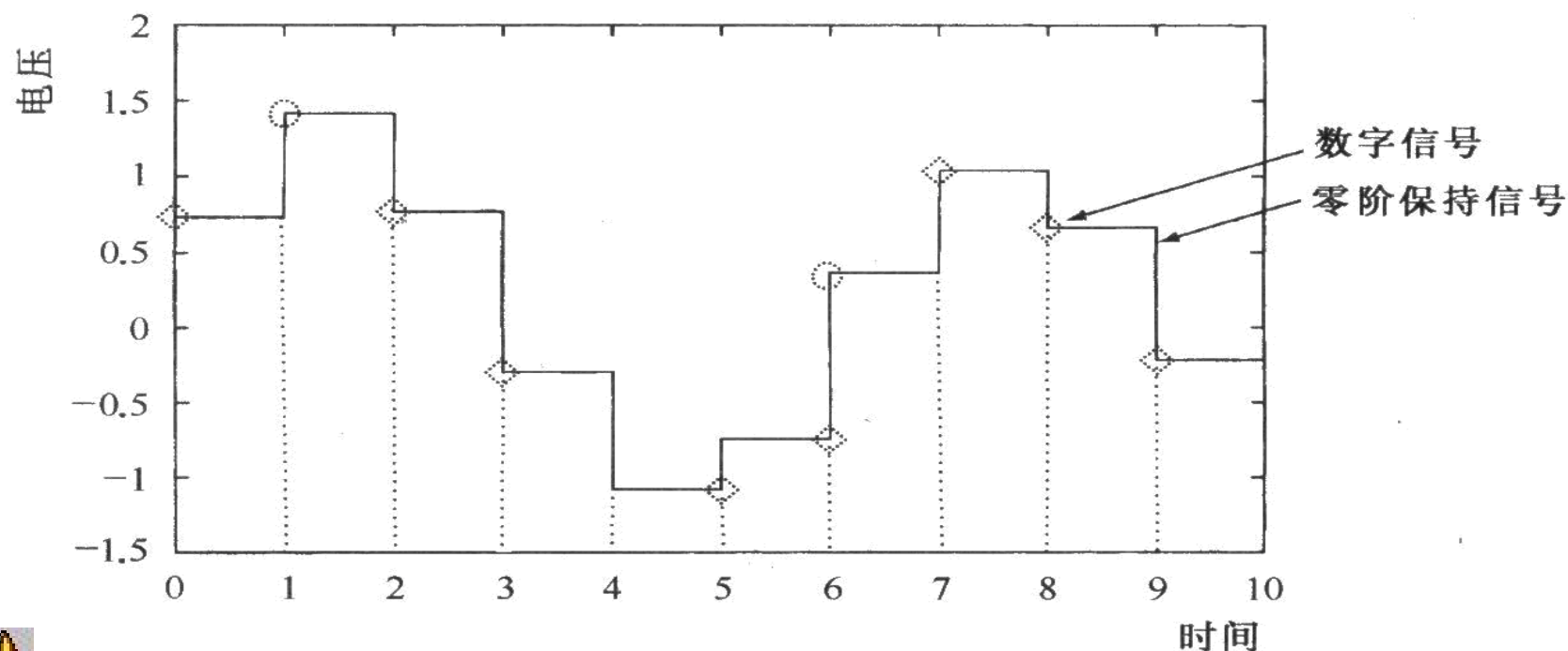
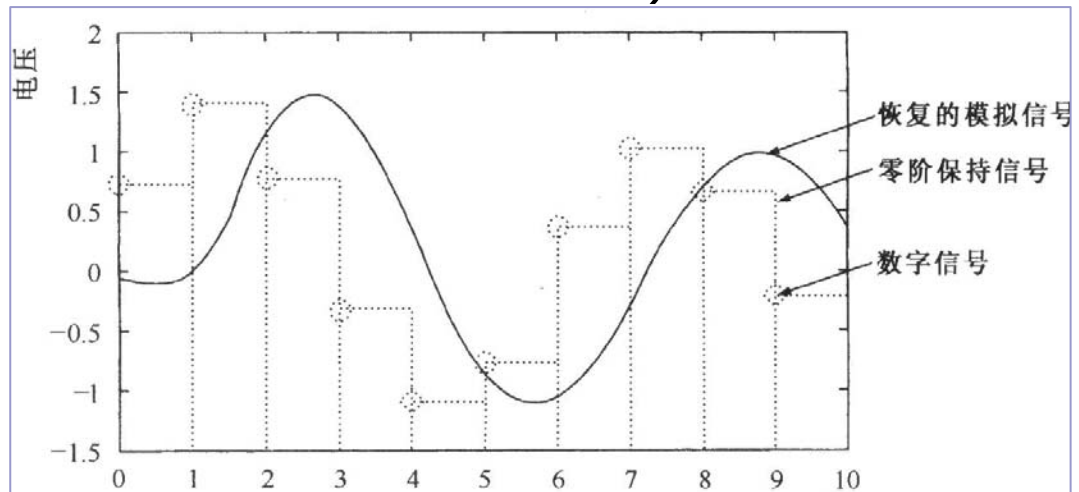


图 1.9 零阶保持信号

重构2：信号平滑

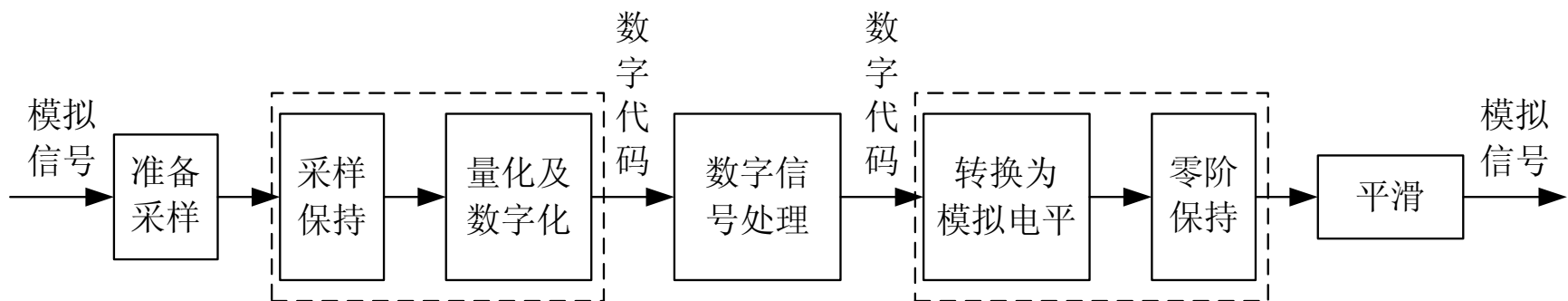
- ZOH信号是模拟信号，但它的阶梯形状与最初被采样的模拟信号不一致。因此，D/A转换的第二步就是平滑该零阶保持信号。这个平滑步骤会引起时移的副作用。图1.10为最终的模拟信号。

- (阶梯形的)零阶保持信号变为(光滑的)模拟信号
- 平滑会带来时移(比原信号在时间上有滞后)



完整的DSP系统

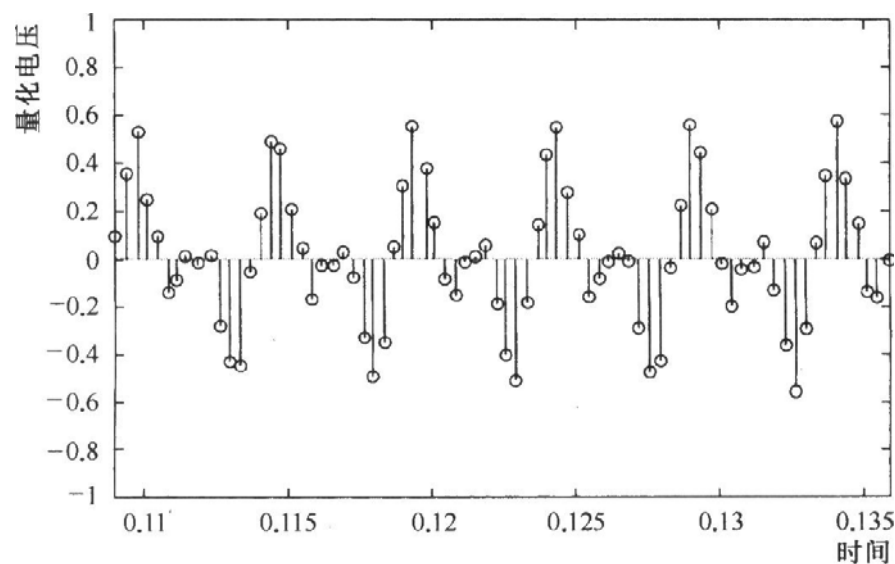
- 若采样足够快，且数字化该模拟信号所用的比特数足够多，那么，输入和输出的模拟信号将非常接近。由于图1.10中的数字信号与图1.7中的完全一致，所以图1.10中的模拟信号与图1.7中的模拟信号相比，除时移外，应非常接近。
- 完整的DSP系统(图1.11)(P8)



1.3 数字信号(的描述)及其频谱

■ 信号的时域描述

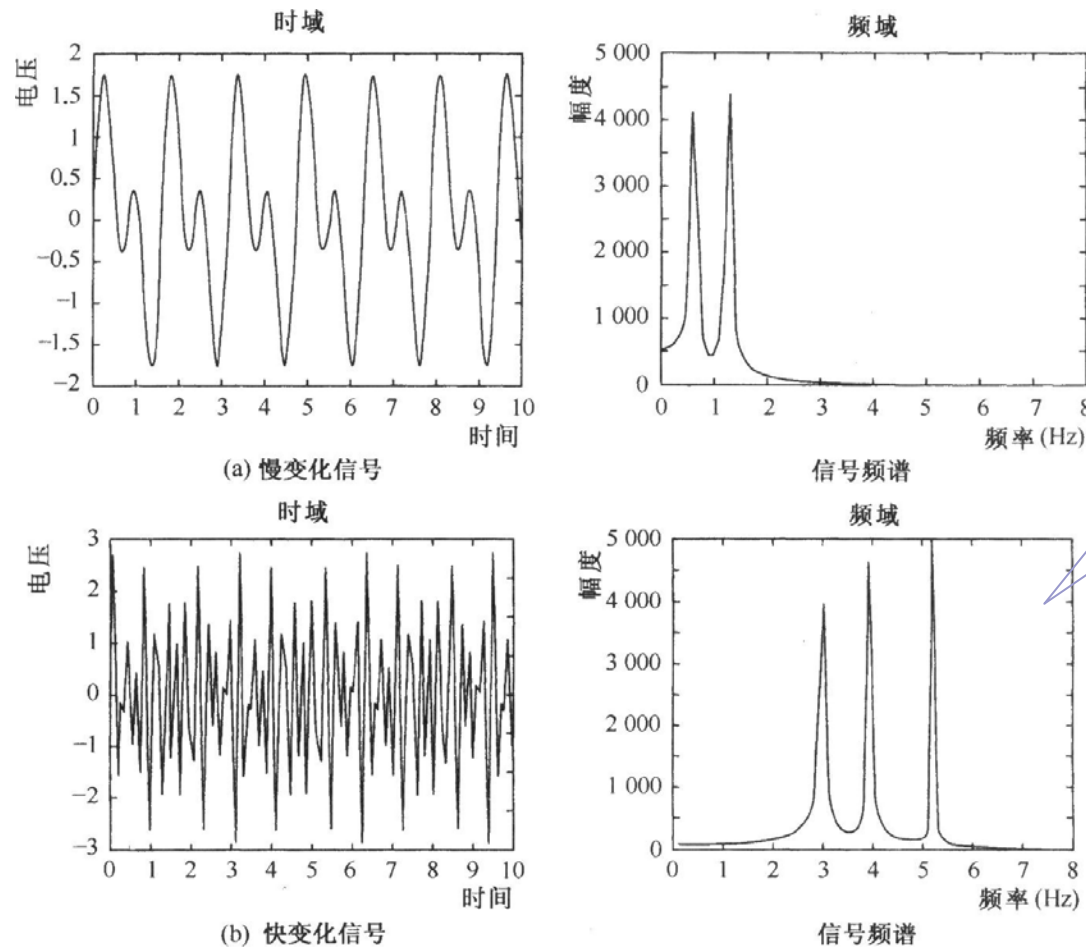
- 信号的大小随时间的变化(曲线)。
- 纵坐标表示电压的大小，横坐标表示时间。



信号的频域描述

- 在DSP中，除了基于时间的变化外，经常还需要知道信号的频率。例如，众所周知，女性的音调通常比男性的高，但对于自动语音识别系统，语音中的准确频率分量非常重要。
- **频谱(spectrum)**：是对信号中所含频率分量的描述，信号频率分量的重要性由该频率处的频谱幅度表示。频谱用幅度随频率的变化画出，因此，频谱是信号的**频域(frequency domain)**描述，通常用**FFT(快速傅里叶变换)**计算。
- 低频信号是常量或随时间变化较慢的信号，在频谱的左端。而高频信号随时间变化较快，出现在频谱的右端。

图1.13 信号的时域及频域图形



频谱可清楚地反映出信号的特性（由哪些频率的正弦信号构成），而时域描述则不行。

图 1.13 信号及其频谱

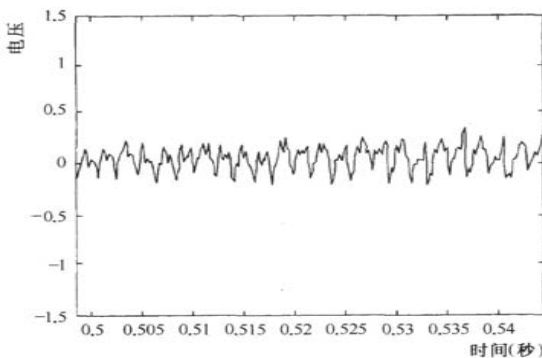


图 1.14 钢琴单音(中音 C)及其时域波形(续)

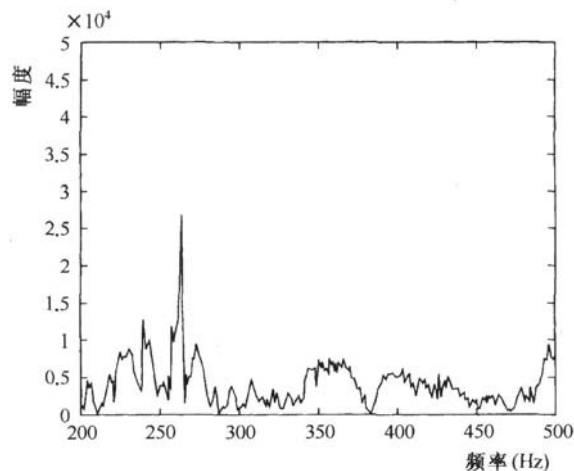
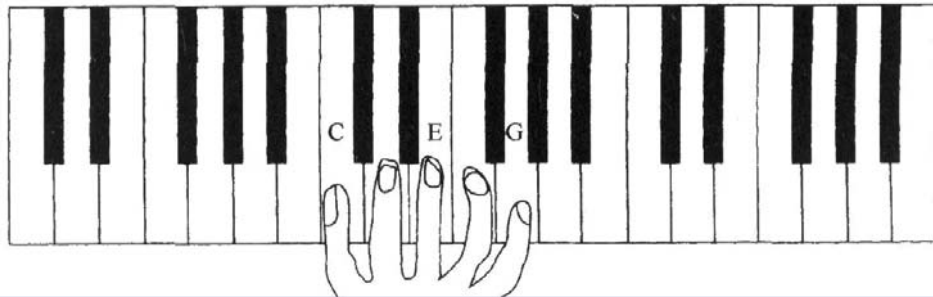


图 1.15 中音 C 频谱(200 ~ 500 Hz)

频谱实例

- 图1.14为敲击一个钢琴键后时域波形的一部分，图1.15为它的频谱。每个钢琴音由许多谐波频率(harmonic frequency)组成，这些谐波频率为基波频率(fundamental frequency)的倍数，也就是说，完整的频谱应包含许多尖峰。在所示频谱部分，位于262 Hz的这个尖峰对应中音C的基频。



频谱实例

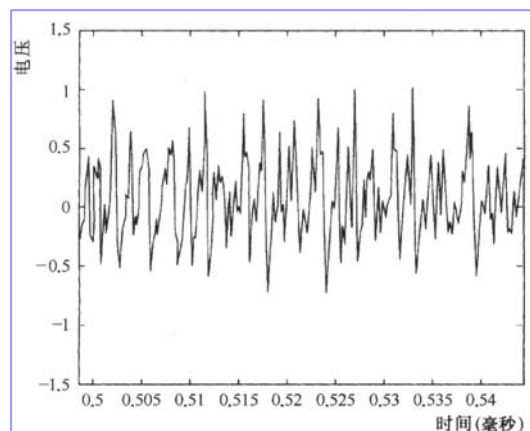


图 1.16 钢琴和弦(CEG)及其时域波形(续)

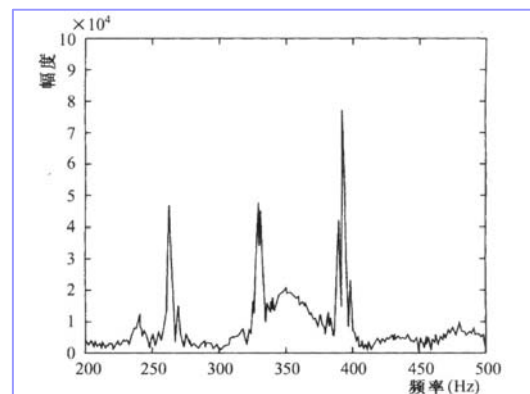
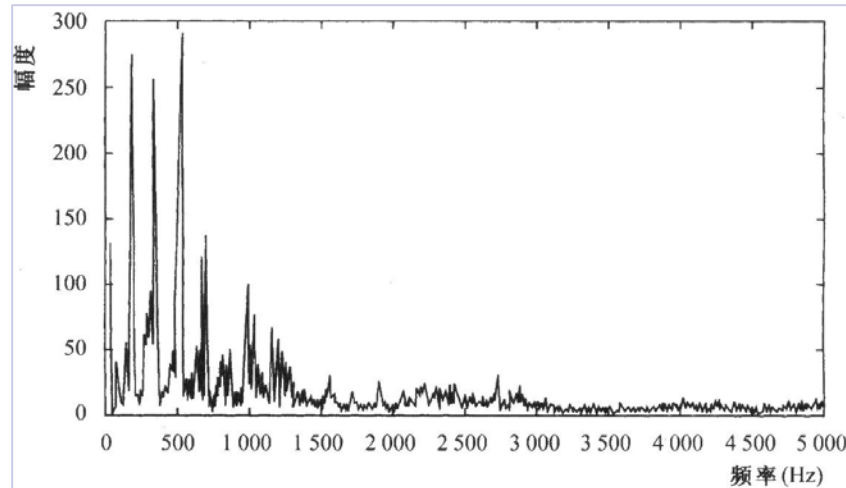


图 1.17 CEG 和弦频谱(200 ~ 500 Hz)

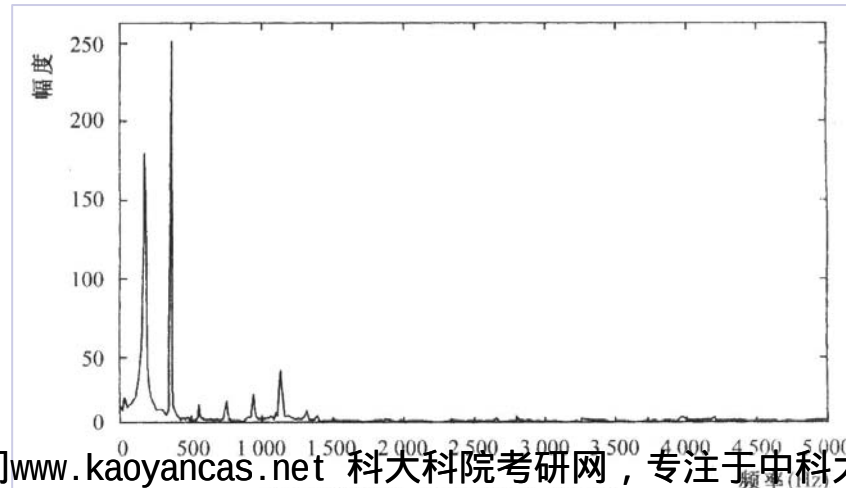
- 图1.16为和弦CEG时域波形的一部分，图1.17中给出了它的一部分频谱。该频谱中有三个尖峰，信号中每个音对应一个。
- 中音C的尖峰仍位于262 Hz。由于E和G琴键位置在钢琴键盘的更右边一点，所以E和G对应的尖峰位于较高频率，分别为330 Hz和392 Hz。

图1.18 频谱实例



(a) 语音频谱：单词“away”的频谱

图 1.18 频谱实例



(b) 语音频谱：元音“ooo”的频谱

频谱实例

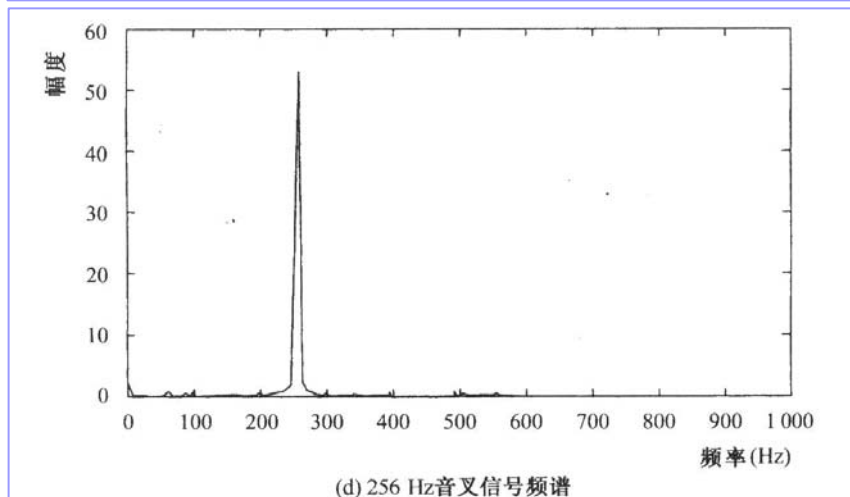
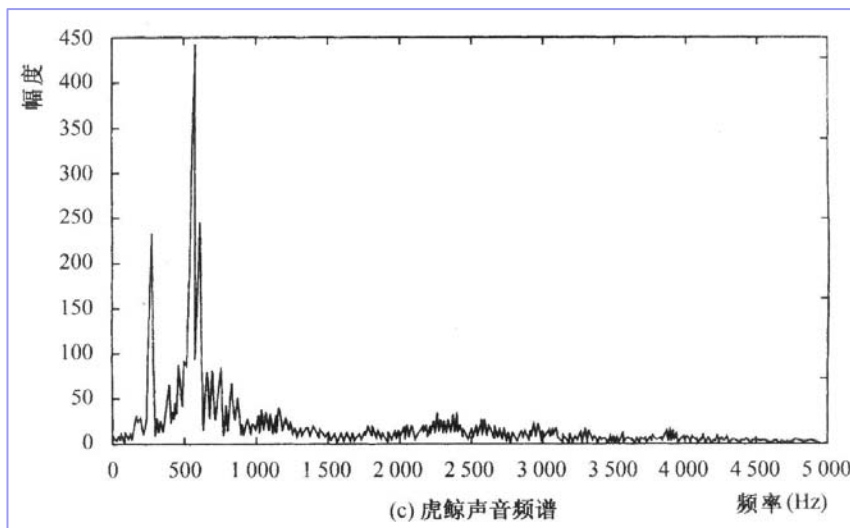
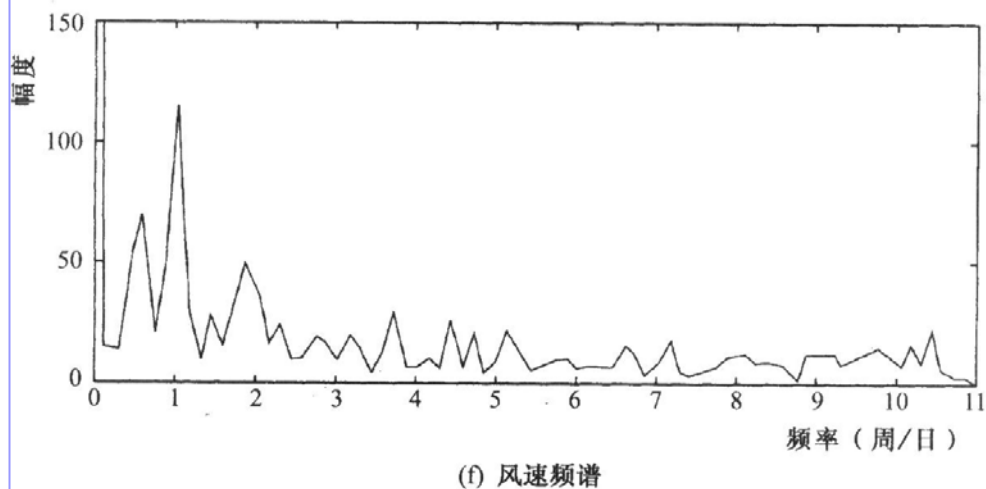
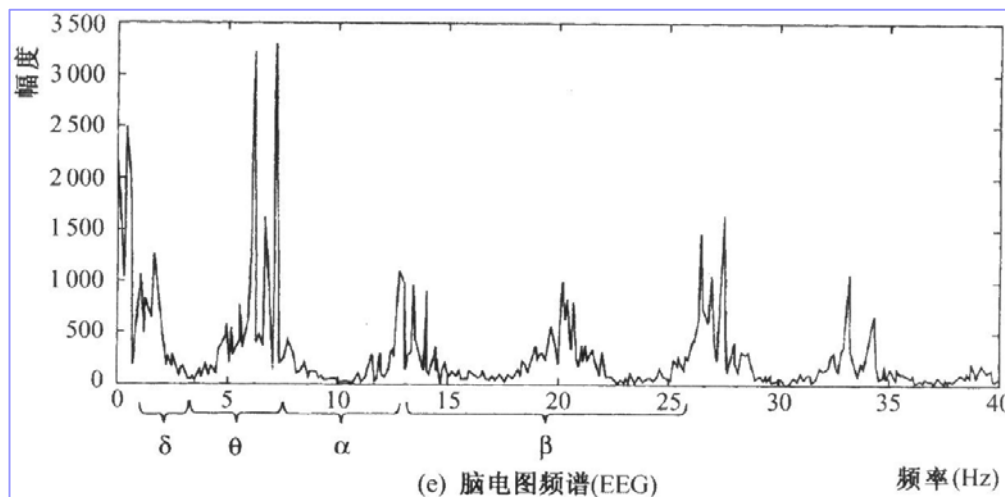


图 1.18 频谱实例(续)

频谱实例



1.4 数字滤波

- 数字滤波器可便捷地改变信号的特性。最常用的滤波器改变信号的频率特性，通过某些频率的信号，阻塞某些频率的信号。
- **滤波器：**改变信号频率特性的(数字)设备，其特性用频率响应表示。
- **频率响应：**对输入的正弦信号产生幅度和相位的改变。根据幅度频率响应，可以把滤波器分成四类：
 1. **低通滤波器：**使低频信号通过，阻塞高频信号。
 2. **高通滤波器：**使高频信号通过，阻塞低频信号。
 3. **带通滤波器：**允许一定频带内的信号通过。
 4. **带阻滤波器：**允许一定频带外的信号通过。

图1.19 男音、女音的频率范围

- 如果低通滤波器作用于合唱，则滤波器将提取男低音，而阻塞女高音；而高通滤波器，将通过女高音，而阻塞或衰减男低音。图1.19列出了通常的男低音、男高音、女低音和女高音范围。



提取此特定频率范围的滤波器形状

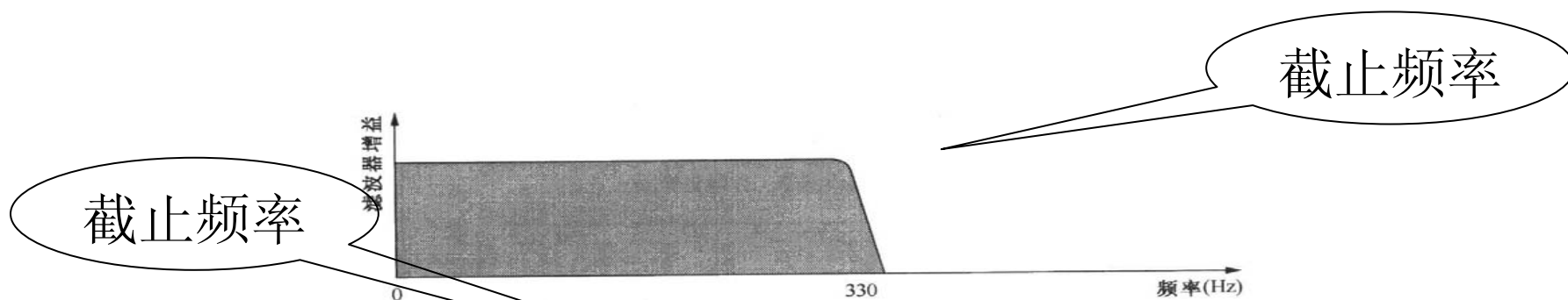


图 1.20 提取男低音的低通滤波器

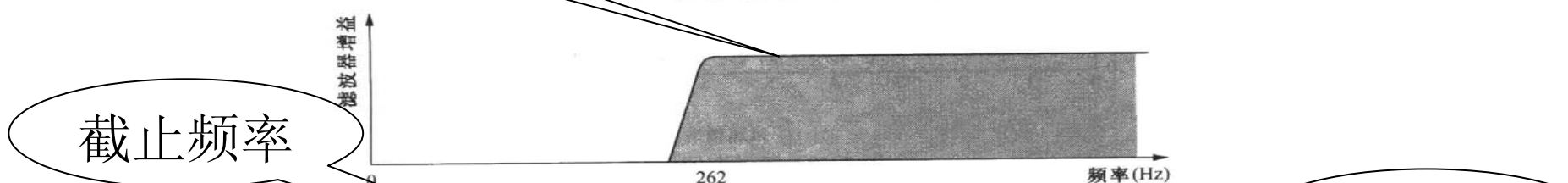


图 1.21 提取女高音的高通滤波器

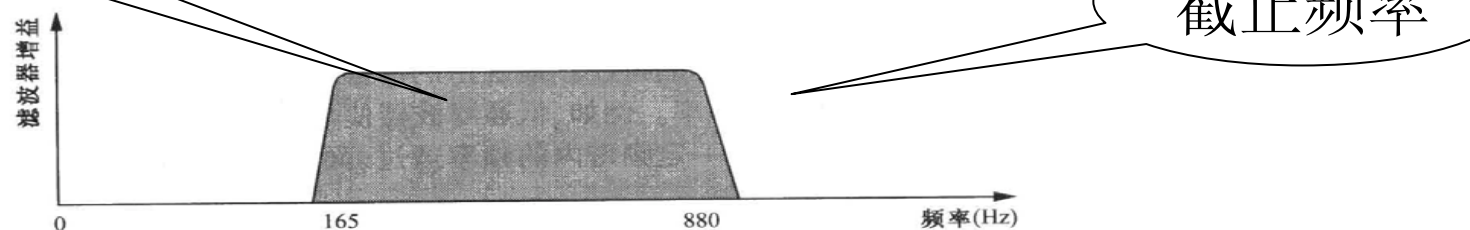


图 1.22 提取女低音的带通滤波器

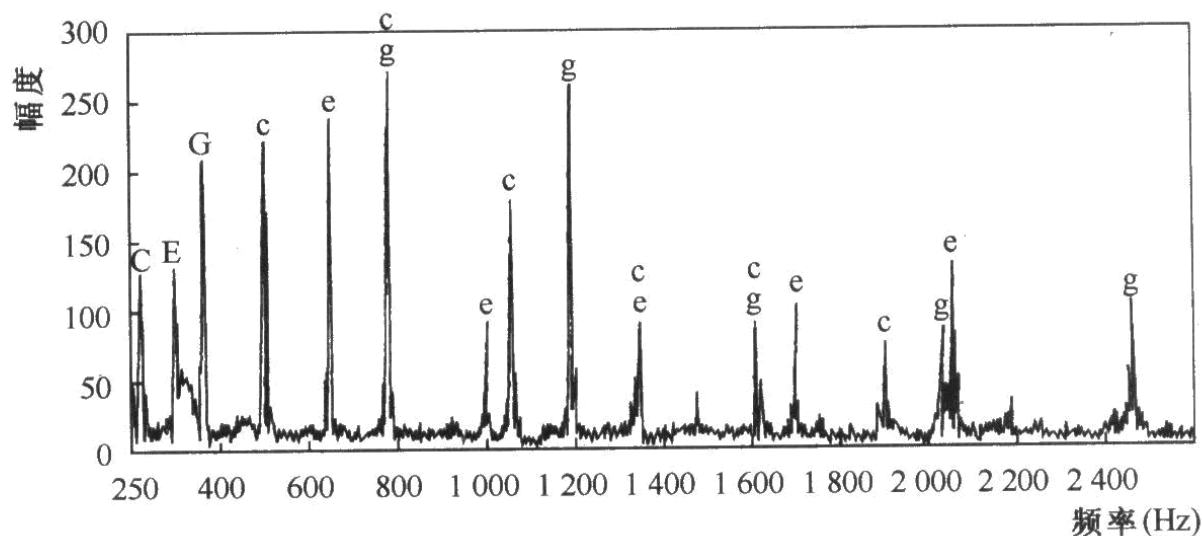
滤波器拐角处的频率称为截止频率(**cut-off frequency**)

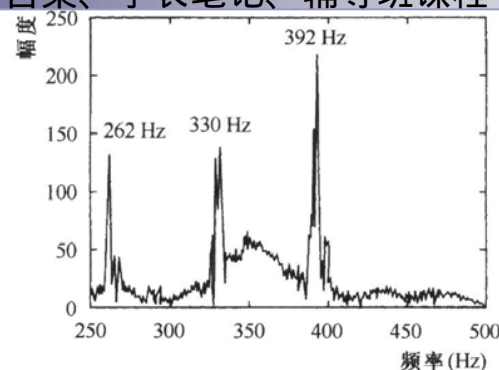
数字滤波实例

- 图1.16所示的钢琴的和弦信号每次用不同的低通滤波器滤波，可得到不同的结果。图1.23给出了CEG和弦从250到2 500 Hz的频谱。

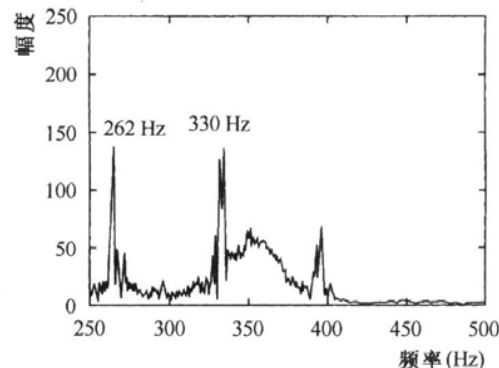


CEGn1.wav

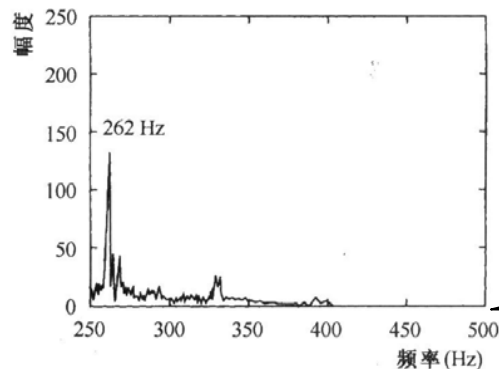




(a) 提取CEG基频(截止频率456 Hz)



(b) 提取CE基频(截止频率361 Hz)



(c) 提取C基频(截止频率296 Hz)

图 1.24 钢琴和弦的低通滤波

图1.24给出了和弦的低通滤波结果。当截止频率为456 Hz的低通滤波器对CEG和弦滤波时，基频分量全部保留，而消除了其余谐波成分。这种滤波使信号的声音发生了明显变化。和弦的欢快声音丢失了，只剩下压抑的声音。

如果低通截止频率降为361 Hz，则严重衰减和弦中G的部分

若移至296 Hz，则将滤除E和G部分，只剩下中音C单个基频。

- 对于图像，也有低通和高通滤波器。图像的低频部分是指颜色变化缓慢的部分，而高频部分对应边缘或颜色突变部分。低通滤波器滤除了高频成分后，使图像变得模糊；而高通滤波器可用来锐化边缘及确定数字图像中物体的边界。
- 数字滤波器只不过是由一系列滤波器系数定义的方程。这些方程构成数字滤波程序部分，滤波程序接收原始数据，并且输出滤波后的数据。这种程序的最大优点在于滤波器的再设计不需要硬件方面的更改，只要简单地改变滤波器的系数表即可完成滤波器特性的修改。
- 数字滤波程序可在任何处理器上实现，但最有效的是在专门设计用来进行高速滤波或其他DSP处理的硬件上实现。DSP硬件可使非常复杂的任务在极短的时间内完成，因此它经常作为大计算量的系统核心。

1.5 语音、音乐、图像及其他应用

- DSP的应用已经非常广泛，最常见的是多媒体应用。
- 因为应用由软件确定，相同的DSP硬件可适用于不同的应用。

(1) 语音

- 语音识别：通常语音识别方法基于语音的频谱分析。尽管这种分析很费时，但快速DSP硬件可实现实时识别。如实时自动翻译系统。
- 语音合成：电话自动应答系统（95598、电话银行等），金山词霸等电子词典。
- TTS系统（文本语音转换系统）。

(2) 音乐

- DSP在音乐和其他声音处理方面也有很大贡献。对旧的音乐录音带可进行清洗，去除背景中的咔哒及嗡嗡声。同样，许多乐器的声音可复制下来用于电子合成器。真实录音与数学模型相结合可对许多乐器进行高质量的合成，包括钢琴、提琴和笛子等。一些特殊DSP合成研究中，为电影重新创作了阉人的声音。DSP也可用于动物声音，为了研究鲸鱼的交流方式及寻找它们的家族特征，目前已经有人对鲸鱼的声音进行了分析。
- 1. 电声乐器：电子琴，电子吉他
- 2. 音效提高：
- 3. MP3，MP4播放器：

(3) 图像

将DSP应用于图像处理可制作奇异的效果

- 图像可以被组合，如在尼克松总统的纪录片中数字地添加了一个阿甘的角色。（动画片，特技电影）
- 背景中的斑点可以通过平均同一场景的几幅图片而除去。运动可以通过同一场景中一幅图像减去另一幅图像来检测，突出两幅图像不同的部分。
- 可以修改彩色图像，改善对比度。

(3) 图像-2

- 变形技术可使一幅图像平缓地变化为另一幅图像。
- 同一物体的几幅数字图像可用来合成该物体的三维图像，这种技术用于医疗图像，产生比如磁共振成像(MRI)和计算机断层成像(CT)。（三维重建：从多个切片构成立体图形）
- 而视觉检测和机器人视觉系统则基于目标的自动识别，通过目标边缘检测与高级的模式识别相结合来完成。机器视觉：机器人看得见，听得清。

(4)通信-1

- 移动通信、无线通信系统
- **DSP**在通信领域中也许多重要作用，尤其在蜂窝电话、数字调制解调器和视频音频传输技术这些方面。
- 数字蜂窝电话中，**DSP**主要完成两方面的任务：在保证话音可识别的基础上，对话音进行尽可能的压缩编码；

(4)通信-2

- 在无线传输中可靠地传输该编码的话音。话音编码算法(称为声码器)将话音数据对应为仅需少数参数的语音模型。传输时只传输这些参数而不是话音信号本身，接收端再将这些参数用于相同的模型而获得原话音信号的再现。声码器的应用使得单个呼叫所需的传输量大为减少，提高了蜂窝电话网的效率。

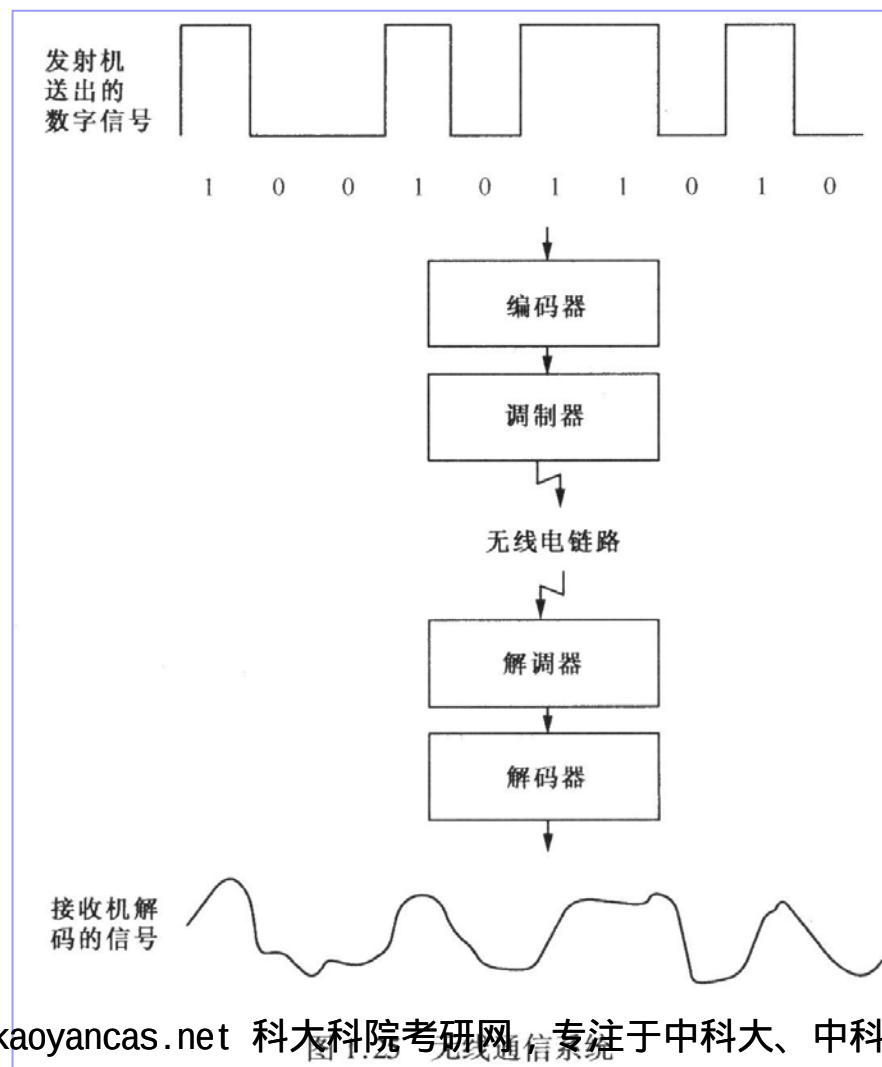
(4)通信-3 调制解调器-1

- 由于无线传输不支持数字信号的直接传输，所以必须使用调制器。一个常用的方法是正交幅度调制(QAM)，任意时刻数字信号的几个比特决定要传输的正弦信号的幅度和相位。接收端接收到的信号幅度和相位，通过解调器检测得到原数字信号。呼叫无差错传输的两个障碍是信号衰落和噪声，有几种方法可减轻它们的影响。

(4)通信-4 调制解调器-2

- 例如，将接收端可检查出的误码添加在传输数据的某个部分。同样，不同组的语音参数互相交替，可以降低组的整体被单个突发噪声破坏的可能性。噪音与衰落后果使得接收到的信号与所发信号相差甚远，如图1.25所示。为了帮助信号恢复，有时发送端发送一组已知的比特流至接收端，接收端可以此估计链路的特性，从而尽可能正确地识别接收信号里的比特。

无线通信系统



(4)通信-5

- 现代技术使计算机可以通过普通电话线或电视电缆进行通信。在这些介质上高速传输数据的算法计算复杂，而这些计算必须快，以便跟上输入的数据。对于大吞吐量及可靠检测的有线传输，数字数据必须首先进行编码。电话线的损伤(如噪音、衰减和话间干扰等)会产生误码。为了避免重发，纠错码可加在传送数据中，使接收端不仅可以检测误码，还可以纠错。

(4)通信-6

- 对于蜂窝电话，数字调制解调器有时互传已知信号以监控信道质量。有些调制解调器甚至可以根据线路质量来调整其传输速率，以减少误码。除编码和误码控制外，调制解调器可通过压缩来减小传输的数据量。例如，一种压缩方法是用短码代替最常见的比特模式，接收端再用原比特模式替换这些编码。为了保密，一些调制解调器也提供加密功能。

(5) 数据压缩-1 视频压缩

■ 视频和音频压缩

- 无论是有线传输还是无线传输，因特网的迅速发展引起了视频和音频文件的传送量急剧增大。为了节省空间和传输时间，压缩技术已远不是简单的替换代码。例如，视频压缩技术[如 **MPEG**(运动图像专家组)]就是基于视频图像中相邻帧之间的差别很小，不是对所有帧的所有像素进行编码，而是对相邻帧的差值进行编码。

(5) 数据压缩-2 音频压缩

- MPEG也提供了音频压缩标准(MP3)，它利用人们听觉系统的特点，对被其他声音所掩盖的声音、过强的声音和低于听力阈值的弱音都不予编码。压缩后的音频仍可产生CD音质的声音。

谢谢

■ 重点掌握

- 信号的特点及分类
- 数字信号的获得和模拟信号的重构的过程
- 信号的频谱的意义
- 滤波器的作用

■ 作业

- 2, 5, 9, 12

