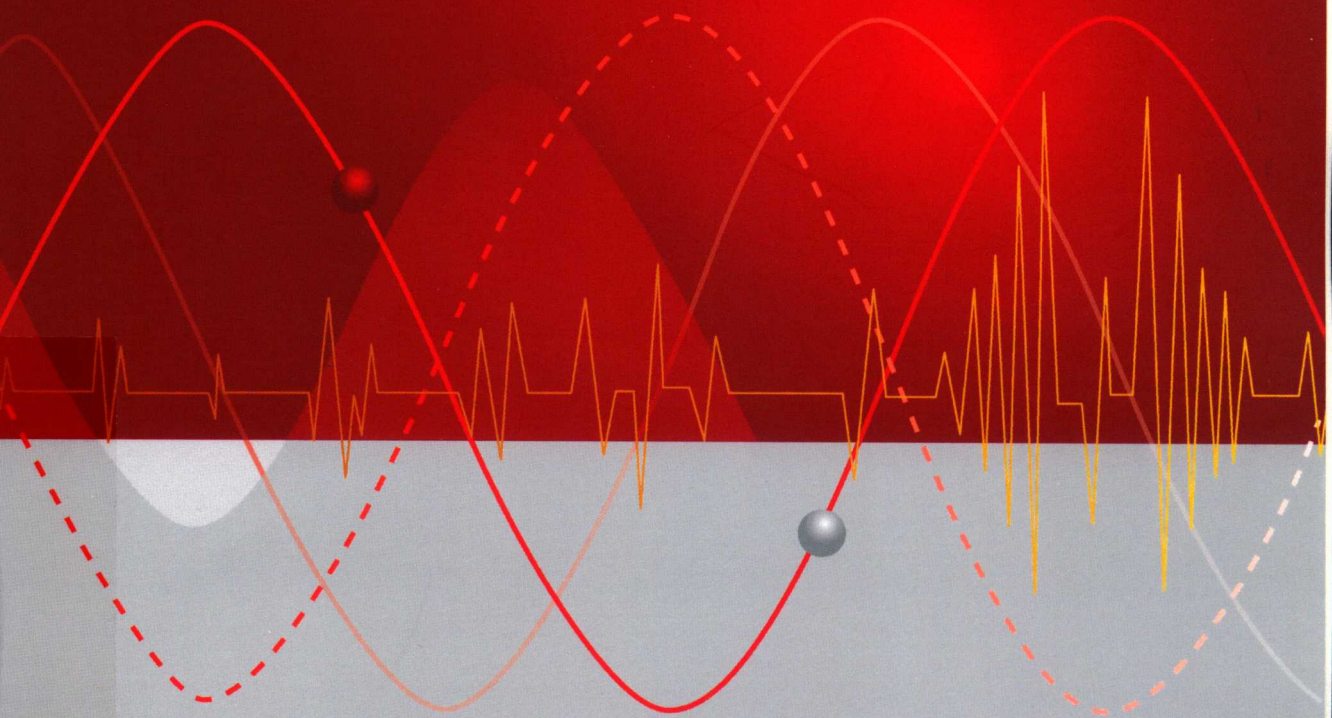


新形态教材

# 数字信号处理及 生物医学工程应用

李韪韬 钱志余 编著



科学出版社

# 数字信号处理及生物医学工程应用

李甦韬 钱志余 编著

科学出版社

北

## 内 容 简 介

本书主要论述数字信号处理技术的基本理论,同时通过实例介绍其在生物医学工程中的应用。本书基本理论与生物医学工程信号特点密切相关,应用实例反映本领域的新知识、新技术、新成果。书中介绍针对生物医学信号处理的相关理论、公式、计算机实现等内容,涉及数字信号处理的各主要方面,包括信号时域分析与系统、傅里叶变换和滤波器设计等。在生物医学工程应用部分,从最新的科研热点、难点出发,重点介绍肌电、心电、脑电、神经元放电、神经血管耦合应用等。书中还提供相关应用实例的仿真代码和原始数据,具有很强的操作性和拓展性。

本书可作为高等院校生物医学工程专业的本科生教材,也可作为工科大学本科生和研究生学习生物医学信号处理课程的参考书,还可供从事信号处理的工程人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理及生物医学工程应用/李颍韬,钱志余编著. —北京:科学出版社, 2018.12

ISBN 978-7-03-059554-6

I. ①数… II. ①李… ②钱… III. ①数字信号处理—应用—生物工程—医学工程 IV. ①R318

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 261712 号

责任编辑:余 江 张丽花 王晓丽/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟/封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 12 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 328 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

本书是作者多年来从事生物医学信号处理教学和科研的总结，内容分为数字信号处理基础理论和生物医学工程应用。本书按照 48 课时的内容进行编写，其中应用实例可以作为课内实验的内容。

第 1 章概述了生物医学工程中的信号处理方法，使读者了解生物医学信号的特点及其与数字信号处理的关系。第 2 章重点介绍数字信号与线性系统的基本概念。第 3 章介绍信号时域处理的方法，重点阐述信号平均和相关分析方法在表面肌电信号处理实例等方面的应用。第 4 章介绍描述系统的工具——差分方程与  $Z$  变换。第 5 章通过 QRS 复波检测实例，分析系统函数的应用案例。第 6 章介绍傅里叶变换的原理、定义和性质。第 7 章介绍快速傅里叶变换的实现方法，同时介绍利用快速傅里叶变换计算线性卷积等应用。第 8 章是信号的傅里叶变换工程问题与实践，重点阐述频谱泄漏、实数序列的频谱计算、语音和钢琴音信号的频谱分析等实例。第 9 章介绍无限长单位冲激响应数字滤波器设计理论和方法。第 10 章介绍有限长单位冲激响应数字滤波器设计理论和方法。第 11 章通过酒精作用下小鼠海马区神经元放电规律研究实例，阐述神经元放电信号的实验及处理方法。第 12 章通过小动物脑水肿模型的神经血管耦合关联研究实例，分析模型的神经元放电、血流、血氧、代谢色团各自的信号处理方法及其关联模型。

书中配图和实例大都采用计算机仿真 (Matlab) 完成，读者可以通过相应的仿真 (Matlab 和 Python) 加深对理论知识的了解。大多数实例来自科研和工程实践，因此经过简单的修改代码就可以分析实际的问题，具有很好的拓展性。本书在关键知识点增加了演示、讲解、代码，读者通过扫描二维码可以查看。作者将最新的科研成果作为实例，并穿插到相应章节，有利于读者的阅读。

本书由南京航空航天大学李赓韬和钱志余编著。本书中的全部应用实例的原始数据和仿真代码，均由作者及其团队在南京航空航天大学生物医学工程系生物医学光子学实验室完成。在此对为本书出版而做出贡献的所有人员致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，欢迎批评指正。

作 者

2018 年 9 月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 生物医学信号处理概述       | 1  |
| 1.1 数字信号处理基本原理         | 1  |
| 1.2 生物医学传感器            | 4  |
| 1.3 A/D 转换器的性能指标       | 5  |
| 1.4 处理结果显示             | 6  |
| 1.5 生物医学信号概述           | 8  |
| 1.6 信号处理的典型工具          | 10 |
| 1.7 生物组织多通道光电采集系统应用    | 11 |
| 习题                     | 13 |
| 第 2 章 数字信号与线性系统        | 14 |
| 2.1 离散时间信号——序列         | 14 |
| 2.2 时域离散系统             | 21 |
| 2.3 时域离散系统的稳定性和因果性     | 24 |
| 2.4 信号的采样与恢复           | 25 |
| 习题                     | 29 |
| 第 3 章 信号平均和相关分析方法与应用   | 30 |
| 3.1 信号的量化              | 30 |
| 3.2 信号的统计学描述           | 31 |
| 3.3 表面肌电信号的磨牙模式识别算法应用  | 32 |
| 3.4 生物组织参数时域平均算法的应用    | 36 |
| 3.5 相关性分析              | 39 |
| 3.6 诱发电位单次提取中的 3A 技术   | 41 |
| 习题                     | 44 |
| 第 4 章 差分方程与 Z 变换       | 45 |
| 4.1 常系数线性差分方程          | 45 |
| 4.2 Z 变换的定义与收敛域        | 47 |
| 4.3 Z 反变换              | 50 |
| 4.4 Z 变换的性质和定理         | 55 |
| 习题                     | 58 |
| 第 5 章 系统函数及 QRS 复波检测应用 | 60 |
| 5.1 离散系统的系统函数特点        | 60 |
| 5.2 心电信号的 QRS 复波检测算法   | 64 |
| 5.3 QRS 复波检测实例         | 68 |

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 习题                                                    | 69  |
| <b>第 6 章 离散傅里叶变换</b>                                  | 70  |
| 6.1 傅里叶变换的四种表示形式                                      | 70  |
| 6.2 周期序列的离散傅里叶级数                                      | 73  |
| 6.3 离散傅里叶变换                                           | 76  |
| 6.4 离散傅里叶变换的性质                                        | 78  |
| 6.5 频域采样                                              | 84  |
| 6.6 脑电 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$ 、 $\delta$ 波段的提取 | 87  |
| 习题                                                    | 89  |
| <b>第 7 章 快速傅里叶变换</b>                                  | 91  |
| 7.1 直接计算 DFT 的问题及改进途径                                 | 91  |
| 7.2 按时间抽选的基-2FFT 算法                                   | 92  |
| 7.3 按频率抽选的基-2FFT 算法                                   | 99  |
| 7.4 DIT 与 DIF 的异同                                     | 103 |
| 7.5 IFFT 算法                                           | 104 |
| 7.6 线性卷积的 FFT 算法                                      | 106 |
| 7.7 FFT 算法的计算机实现                                      | 110 |
| 习题                                                    | 110 |
| <b>第 8 章 信号的傅里叶变换工程问题与实践</b>                          | 111 |
| 8.1 傅里叶变换的频谱泄漏                                        | 111 |
| 8.2 实数序列的频谱计算                                         | 115 |
| 8.3 信号的移位 DFT 特性                                      | 119 |
| 8.4 用 DFT 对模拟信号作频谱分析                                  | 120 |
| 8.5 序列插值后的频谱变化                                        | 121 |
| 8.6 语音和钢琴音信号的频谱分析实例                                   | 122 |
| 8.7 信号频段非单位圆频谱分析实例                                    | 126 |
| 习题                                                    | 128 |
| <b>第 9 章 无限长单位冲激响应数字滤波器设计</b>                         | 129 |
| 9.1 数字滤波器                                             | 129 |
| 9.2 模拟低通滤波器                                           | 131 |
| 9.3 冲激响应不变法滤波器设计                                      | 137 |
| 9.4 双线性映射法                                            | 140 |
| 9.5 模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器                                 | 145 |
| 习题                                                    | 151 |
| <b>第 10 章 有限长单位冲激响应数字滤波器设计</b>                        | 153 |
| 10.1 线性相位 FIR 滤波器的特点                                  | 153 |
| 10.2 窗函数设计法                                           | 159 |
| 10.3 其他频带 FIR 滤波器设计方法                                 | 168 |
| 10.4 数字滤波器的计算机辅助设计                                    | 170 |

|               |                                  |            |
|---------------|----------------------------------|------------|
| 10.5          | IIR 和 FIR 数字滤波器的比较 .....         | 175        |
| 10.6          | 脑电信号的 FIR 数字带通滤波器滤波实例 .....      | 175        |
|               | 习题 .....                         | 176        |
| <b>第 11 章</b> | <b>酒精作用下小鼠海马区神经元放电规律研究 .....</b> | <b>177</b> |
| 11.1          | 研究背景及意义 .....                    | 177        |
| 11.2          | 神经元电信号原理 .....                   | 178        |
| 11.3          | 锋电位的检测与分类 .....                  | 180        |
| 11.4          | 电生理及验证性实验设计方案 .....              | 181        |
| 11.5          | 急性饮酒小鼠实验数据采集与处理 .....            | 184        |
| 11.6          | 急性重度饮酒对小鼠模型电生理研究 .....           | 187        |
|               | 习题 .....                         | 189        |
| <b>第 12 章</b> | <b>小动物脑水肿模型的神经血管耦合关联研究 .....</b> | <b>190</b> |
| 12.1          | 研究背景及意义 .....                    | 190        |
| 12.2          | 神经电信号分析系统 .....                  | 192        |
| 12.3          | 光谱血氧测量系统 .....                   | 193        |
| 12.4          | 光学内源信号成像系统 .....                 | 194        |
| 12.5          | 激光散斑血流成像系统 .....                 | 197        |
| 12.6          | 光声成像系统 .....                     | 199        |
| 12.7          | 神经血管耦合研究初步结果 .....               | 202        |
|               | 习题 .....                         | 204        |
|               | 参考文献 .....                       | 205        |

# 第 1 章 生物医学信号处理概述

## 1.1 数字信号处理基本原理

### 1.1.1 生物医学信号概念

信号是运载信息的工具，是信息的载体。信号在广义上包括光信号、电信号和声信号等。例如，光谱分析技术被用于测量发光体的辐射光谱或受激发产生的荧光光谱，分析有机化合物或生物大分子的相关信息。生物电磁信号，如脑电图(Electroencephalogram, EEG)、心电图(Electrocardiogram, ECG)、脑磁图(Magnetoencephalography, MEG)等 E×G 信号，利用电场和磁场的微弱变化来进行脑功能研究和相关疾病的诊断。超声诊断(Ultrasonic Diagnosis)是将超声检测技术应用于人体，通过测量回波无创检测生理或组织结构的数据和形态来发现疾病，与 X 射线(X-ray)、CT(Computed Tomography)、磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)并称为四大医学影像技术。

生物医学信号(Biomedical Signal)是由复杂的生命个体发出的不稳定的信号，是广义信号的一个子集。例如，大脑神经系统电信号主要包括神经元锋电位信号和场电位信号，信息处理机制十分复杂。然而要研究大脑神经系统工作机制，必须同时记录神经元的锋电位信号和场电位信号。

生物医学信号处理是生物医学工程中的一个重要研究领域，也是近年来迅速发展的数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)技术的一个重要的应用方面。正是数字信号处理技术和生物医学工程的紧密结合，使得我们在生物医学信号特征的检测、提取及临床应用上有了新的手段，因而也帮助我们加深了对生命体自身的认识 and 了解。

### 1.1.2 生物医学信号处理流程

生物医学信号处理的典型过程如图 1.1 所示。大多数人体能量信号经过传感器转换为电信号  $x(t)$  (图 1.2(a))，首先经过放大器和前置模拟滤波器  $H_a(s)$  去掉一些带外成分和干扰，从而得到图 1.2(b)中的模拟信号  $x_a(t)$ 。然后以采样周期  $T$  对  $x_a(t)$  进行采样，获得时域离散信号  $x_a(nT)$ ，如图 1.2(c)所示，时域离散信号  $x_a(nT)$  是时间上离散、幅值连续的信号，而非数字信号。再对  $x_a(nT)$  进行幅值量化处理，从而得到时间和幅值都是离散的信号，即数字信号  $x(n)$  (图 1.2(d))，其中  $n$  取整数变量。因此信号的 A/D(模/数)转换过程实际上包括时域离散和幅值量化。数字信号需要被存储和缓存，便于进一步的信号处理。经过数字信号处理后，获得的信号如图 1.2(e)所示。然后经过 D/A(数/模)转换过程(图 1.2(f))重构经过滤波后的模拟信号，如图 1.2(g)所示。

图 1.1 是数字信号处理的典型过程，实际处理时并不一定包括所有过程。例如，有些温度传感器，直接串行输出数字信号，就不需要 A/D 转换；有些影像显示系统的输入为数字信号，因此不需要 D/A 转换；对于一些纯数字信号，只需要数字信号处理器及其相关算

法即可。图 1.1 中数字信号处理可以是计算机或者微处理器，通过软件编程对信号进行相关处理和变换。目前，专用芯片 (DSP) 越来越多地被用来作为嵌入式信号处理的基本器件。

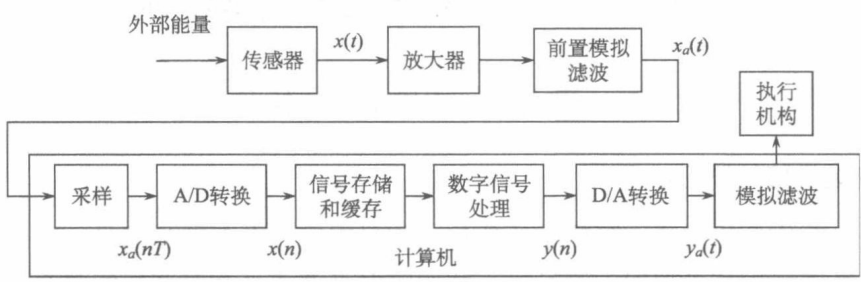


图 1.1 数字信号处理的典型过程

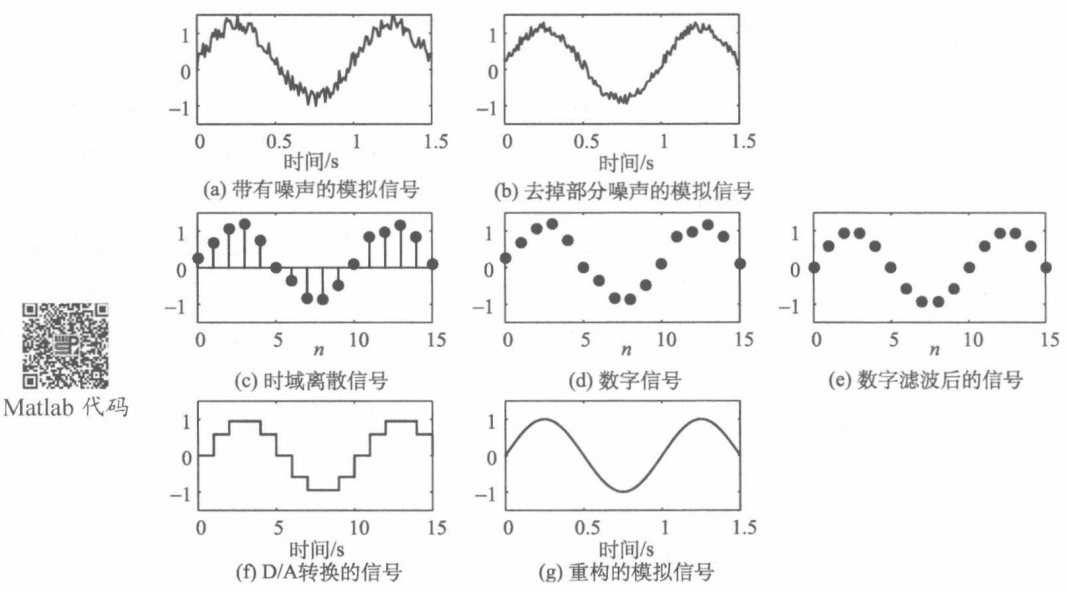


图 1.2 数字信号获取的波形示意图

1.1.3 信号处理学科概貌

生物医学信号处理的学科概貌如图 1.3 所示。对于传感器 (transducer) 获得的生物医学模拟信号，利用信号采样定理和幅值量化，将其转化为具有一定精度的数字信号。本书着重研究一维信号的处理方法，二维信号的处理又称为数字图像处理。数字信号处理中主要针对的是时域离散信号 (序列) 和处理这些信号的时域离散系统。时域离散系统理论包括离散信号的表示形式、时域离散系统的基本性质、时域离散系统和信号的频域表示。傅里叶变换和  $Z$  变换是离散系统分析的基本工具，用其研究系统函数的定义和基本性质，其中快速傅里叶变换具有重要的意义。

数字信号处理的基本方向分为数字滤波和频谱分析。在数字滤波中主要研究根据实际的参数指标设计 IIR (无限冲激响应, Infinite Impulse Response) 数字滤波器和 FIR (有限冲激响应, Finite Impulse Response) 数字滤波器，并进行软件或者硬件的实现。对信号的频谱分

析是信号处理的重要工作之一,主要包括FFT(快速傅里叶变换, Fast Fourier Transformation)滤波、高阶谱分析和时频分析。不同的滤波器设计方案、信号处理算法最终的目标都是针对生物医学信号,完成信号的采集、放大、滤波、数字化处理、算法实现、DA 输出等过程,达到滤波、变换、检测、频谱分析、模式识别、压缩、辅助诊断等目的。特别要强调的是,时域信号处理方法对于很多生物医学信号来说是高效合理的。因此本书还包括信号的时域分析和相关分析,利用差分方程与Z变换对时域系统进行描述。

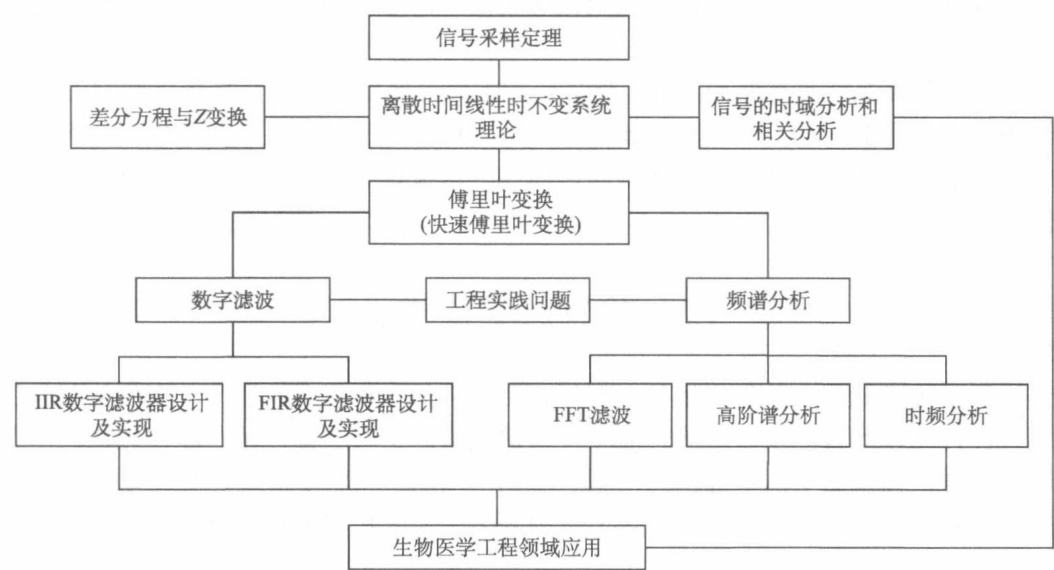


图 1.3 生物医学信号处理的学科概貌

1.1.4 数字信号处理的特点

数字信号处理系统具有以下一些明显的优点。

(1)精度高, 可靠性强。模拟元器件的精度很难达到  $10^{-3}$  以上, 而数字系统只要 14 位字长就可达到  $10^{-4}$  的精度。在高精度系统中, 有时只能采用数字系统。同时数字系统只有定义为 0、1 的两个跳变电平, 而模拟器件具有一定的温度系数, 连续变换的电平容易受到外界和自身温度、噪声、电磁感应等因素的影响, 可靠性差。

(2)灵活性高, 容易大规模集成。数字系统可以存储相关参数, 通过软件程序设计, 实现系统参数的选择, 而不需要像模拟系统一样只能通过改变硬件实现。随着芯片加工技术的发展, 数字处理芯片也朝着高集成化方向发展, 单个芯片完成的功能越来越多。比如, STM32 系列的单片机, 将 A/D、D/A、PWM 等功能全部集成在芯片上, 由软件程序完成, 大大提高了独立元器件的可靠性。再如, 高度集成的脑电采集芯片, 将滤波、放大、信号处理集成在一起, 只需要连接相关的电极, 辅以计算机上的数据处理软件, 就可以完成脑电信号的采集任务。

(3)多任务功能。医学上信号的采集和处理朝着多参数、实时方向发展。数字处理器件具有多通道、多任务处理能力, 能同时或者分时复用采集和处理相关的信号, 这对于模拟系统是难以实现的。处理器核心运算速度的提高, 架构的改进, 意味着多任务功能的提升。

中断是数字系统实时响应外部信号输入的重要手段。

(4) 可获得较高性能指标。如采用计算机设计有限长冲激响应数字滤波器, 则可实现准确的线性相位特性。采用最优化法设计滤波器, 可以尽可能拟合相关的技术指标。

(5) 低功耗模式。数字芯片的特点是 CPU 具有多种低功耗模式, 保证了采用数字信号器件作为核心的电子设备具有较长的工作时间。

(6) 二维与多维信号处理。对于图片(二维)、医学影像(三维)、视频(四维)等二维与多维信号的处理, 模拟系统效率较低, 甚至无法实现, 而专用的数字信号处理芯片, 有效地解决了这些问题。

数字信号处理系统也有其局限性, 例如, 增加了系统的复杂性, 受到 A/D 转换的采样频率的限制, 不同器件对电源电压的要求不同, 软件编写较为复杂, 成本较高。但是, 数字信号处理的突出优点, 使其在生物医学、通信、语音识别、图像处理、安防、仪器中得到广泛的应用。

## 1.2 生物医学传感器

生物医学传感器是一种将能量从一种形式转换成另一种形式的器件。在生物医学信号处理领域, 传感器的目的是传递信息而不是传递能量。一般来说, 传感器作为输入器件, 将非电信号转换为电信号; 电极例外, 它是将离子活动转换为电能量。传感器的输出一般是能够被检测到的电压(或者电流)信号。常用的生物医学传感器按照使用方式可以分为以下几类。

### 1. 体表传感器

生物医学传感器的发展方向是无创、非接触、无干扰。体表传感器定义为与生物组织表面物理接触, 实现无创测量的传感器。体表传感器包括体表电极和非电量测量传感器。

生物电信号直接测量的传感器, 主要包括各种电极, 体表电极是一种可以将离子电流变为电子电流的传感器件, 可以测量的信号包括体表心电、脑电、肌电。脑电的测量比较复杂, 一般采用 16 导联、32 导联方法, 包括与上位机的接口和相应的处理软件。用户需要在实验设计、后期信号的特征识别等方面开展相应的处理工作。

体表压力传感器将体表的压力信号转换为电信号, 如测量血压、脉搏波、眼压的传感器。在生物体上开展光声研究的超声传感器, 可以检测生物体内由于光作用诱发的超声信号, 经过信号的放大、滤波、数据采集、信号处理、图像重建算法、控制信号输出, 无创获得生物体内部组织信息的空间分布图像。

体表光电传感器将体表测量获得的光信号转换为电信号, 如动脉血氧饱和度检测、脑血氧饱和度检测、肌血氧饱和度检测、癌变组织血氧饱和度检测等。由于血液中 Hb 和 HbO<sub>2</sub> 对波长在 600~900nm 的光具有独特的吸收光谱, 因此可以用该波段的光测量生物组织的血氧参数。光在经过生物体吸收和散射后幅值非常微小, 同时易受到背景光的干扰, 所以光电采集时可以采用锁相放大技术。血氧参数的计算算法大都采用相对变化值, 通过定标则可以获得绝对数值。

体表温度传感器可以有效地获得体表的温度, 从而通过建立相关的分析模型, 确定温度与疾病的关联关系。人体核心温度作为一个重要的生理指标, 越来越受到临床的关注。

## 2. 植入式传感器

植入式传感器分为固定式和非固定式两种。固定式传感器是一种能埋植于人体内部的传感检测装置,可以直接获取处于自然状态下的生物组织的信息。生物相容性和稳定性是植入式传感器需要解决的重要问题。植入式传感器可以测量 pH、血压和体液参数,如感应式血糖测量仪,当患者在测量仪前挥动被植入传感器的臂膀时,测量仪借助磁感应脉冲读出患者的血糖值。植入式传感器也可以替代人体丢失的感知器官,如将人造视网膜植入眼球的后部;将传感器放置在截肢患者的膝盖部位,代替破坏的神经系统等。各类腔穴传感器,因为需要进入人体内部,这里也定义为固定式植入式传感器。

非固定式传感器如吞服式无线电胶囊内窥镜,该胶囊可以获得消化道器官中的各类生理、生化图像信息,分析消化道的机能。胶囊内窥镜可以携带图像传感器(CCD)、无线发射装置、生理参数传感器、组织采样舱室、喷洒药物舱室等。需要完成信号的采集、放大、传输、后处理等信号处理工作。

## 3. 微创式传感器

微创式传感器是测量时造成生物体创伤较小的传感器。肿瘤热消融治疗时的微波治疗针上的温度传感器,通过分析温度对微波治疗功率进行控制,对治疗效果进行评估。微细光电学纤维内窥镜,可柔软、能动地进入血管、胆管、胰管等微小管腔,检测并获得分辨率较高的图像。一种轻便的血糖无损检测系统,其原理是利用人体间隙渗出液(Suction Effusion Fluid, SEF)中葡萄糖浓度与血液中的葡萄糖浓度变化同步,通过一个吸收单元吸取 SEF,送到葡萄糖传感器后,输出值用计算机进行处理得到葡萄糖浓度值。在动物实验上,采用微距双光纤探头,检测组织在进行射频毁损过程中的近红外光谱信息,采用信号处理算法提取光谱中包含的特征信息,从而对射频毁损的组织体积、形状进行评估。颅内压(ICP)和颅内温度(ICT)测量装置,也是一种典型的微创测量方式。

## 4. 非接触式传感器

传感器与人体非接触的检测方法,是最易被患者和医生所接受的。非接触的检测设备很多,如 CT、磁共振等。近红外乳腺诊断设备采用了非接触式传感器——高灵敏度 CCD,获得乳房组织表面的红外图像,通过信号处理进行比对,获得乳房组织内部的信息。

## 5. 体外传感器

体外传感器主要包括各种生化分析传感器,如 DNA 芯片应用已知序列的核酸探针进行杂交,对未知核酸序列进行检测,成为分子生物学中常用的研究手段之一。光谱分析仪器在生物医学检测中也得到了广泛的应用,如组织成分的分析、特征谱的检测等。

# 1.3 A/D 转换器的性能指标

A/D 转换器是完成模拟信号转换为数字信号的器件,数据采集卡是完成模拟信号向计算机传输的主要器件。National Instrument 提供了全系列的数据采集卡,同时提供 LabVIEW 作为上位机开发、接口软件,采用 LabVIEW 可以快速开发出针对 NI 采集卡的程序。

数据采集系统的最主要性能指标有两个:精度和速度。对任何信号的测量都要保证一定的精度要求,而 A/D 转换的速度逐渐成为数字信号处理系统的瓶颈。进行 A/D 转换时,我们需要知道每次同时测量的信号的通道数,信号的最大和最小幅值范围,信号的最高频

率, 信号是否需要频谱分析等。因此综合考虑性价比, 数据采集卡在选择时需要考虑下列指标。

(1) 分辨率(resolution)。分辨率是指 A/D 转换器可以分辨输入信号的最小变化量, 用最低有效值(Least Significant Bit, LSB)占系统满度的百分比来表示, 也可以用系统可分辨的实际电压数值来表示。数据采集系统的分辨率由模数转换器的位数来决定。因此, 系统分辨率习惯上用 A/D 转换结果的位数表示, 较为常用的有 8 位、10 位、12 位等。

(2) 精度(accuracy)。精度定义为各输入代码所对应模拟量的实际值与理论值之差的最大值。精度是零位误差、增益误差、积分线性误差、微分线性误差、温度漂移等综合因素引起的总误差。分辨率与精度的高低并不总是一致的, 精度反映的是系统实际值与理论值之间的偏差, 而分辨率是指相邻数值的最小间隔。

(3) 量程(full scale range)。量程是指数据采集系统能采集的模拟输入信号的范围, 如 0~5V、0~10V、-5~5V 和 -10~10V 等。采集系统的量程主要由模数转换器的输入范围决定, 同时输入范围也和 A/D 系统的位数相关。

(4) 采集速率(sampling data rate)。采集速率是指单位时间内采集系统的通过速率、吞吐率等, 是指在满足系统精度指标的前提下, 系统对输入模拟信号在单位时间内所完成的采集次数; 或系统每个通道、每秒钟可采集的采样数目, 通常单位是 MS/s。

(5) 数据输出速率(output data rate)。数据输出速率是指单位时间内采集系统的模数转换器输出转换结果(数字输出信号)的次数。数据输出速率也称为输出更新率或通过率(throughput rate)。

(6) 动态范围。动态范围是指某个物理量的变化范围。信号的动态范围是指信号的最大幅值和最小幅值之比的分贝数。数据采集系统的动态范围通常定义为所允许输入的最大幅值和最小幅值之比的百分数。最大允许输入幅值是指使数据采集系统的放大器发生饱和或者使模数转换器发生溢出的最小幅值。最小允许输入幅值一般用等效输入噪声电平来代替。对具有最大动态范围特性的信号进行高精度采集时, 还要用到瞬时动态范围的概念。瞬时动态范围是指某一刻系统所能采集到的信号的不同频率分量幅值之比的最大值, 即幅度最大频率分量的幅值与幅度最小频率分量的幅值之比的分贝数。

(7) 非线性失真。非线性失真也称谐波失真(harmonic distortion)。当给系统输入一个频率为  $f$  的正弦波时, 其输出中出现很多频率为  $kf$  的频率分量现象, 称为非线性失真。谐波失真系数用来衡量系统产生非线性失真的程度。

## 1.4 处理结果显示

生物医学信号处理的目的在于利用结果辅助研究者获得更多的生物组织信息, 结果的输出以曲线、图像为主要手段。

曲线图是一种最为常用的信号表示方式, 主要描述一个参数随着另一个参数的变化趋势。图 1.4 表示在组织热凝固实验中光学参数  $\mu_s'$  和温度之间的关系曲线, 由于生物组织的温度与生物组织的热凝固程度相关, 因此曲线直观地表明通过光学参数  $\mu_s'$  可以反映生物组织的热凝固程度。图 1.5 给出了椎骨组织 CT 值与光谱斜率(Slope)的线性关系曲线, 可以用 Slope 代替 CT 值来识别椎骨组织的不同部位。

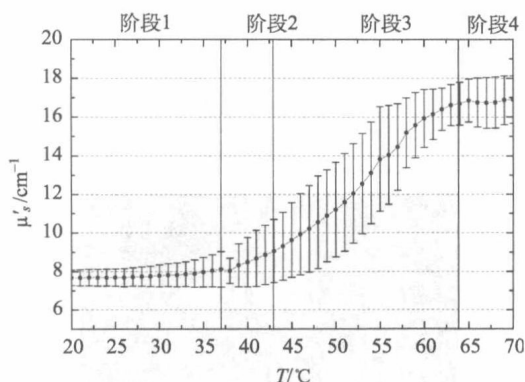


图 1.4 离体猪肝的热凝固过程

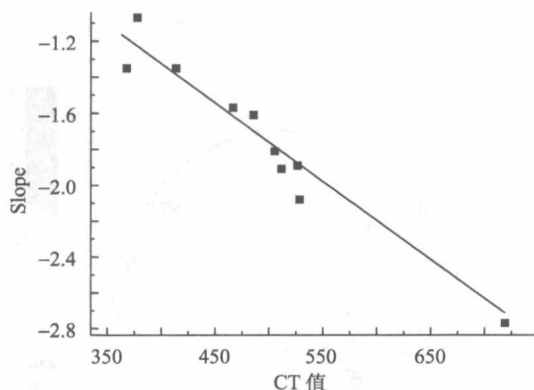


图 1.5 椎骨组织 CT 值和光谱斜率 Slope 关系曲线

柱形图可以用来表示不同组别信号的变化趋势。图 1.6 为 5 例实验对象观看 3D 电视前后全部 16 个通道脑电  $\beta$  波段平均相对能量变化情况(平均值 $\pm$ 标准偏差)(FFT=快速傅里叶变换, BW=观看前, AW=观看后)。由图 1.6 可见, 经过 FFT 提取的观看前后  $\beta$  波段的相对能量全部减小。

图 1.7 给出了在体(in vivo)测量的猫椎骨组织的约化散射系数值。图 1.7 可以看出皮质骨(A)690nm 的约化散射系数为  $12\text{cm}^{-1}\sim 16\text{cm}^{-1}$ ; 松质骨(B)690nm 的约化散射系数为  $6\text{cm}^{-1}\sim 10\text{cm}^{-1}$ , 明显小于皮质骨的数值; 而脊髓组织(C)690nm 的约化散射系数为  $18\text{cm}^{-1}\sim 20\text{cm}^{-1}$ 。

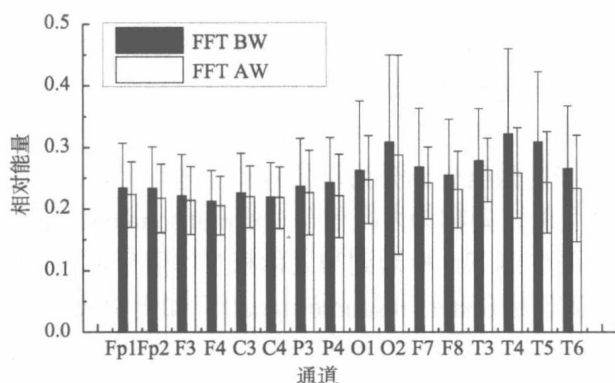


图 1.6 脑电的柱形图

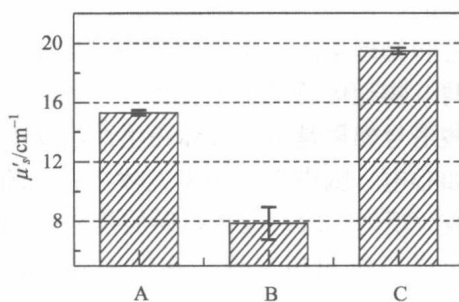


图 1.7 不同椎骨组织的  $\mu_s'$  结果示意图

图像是最为人所接受的结果显示方式, 在本书中所说的信号处理若没有特别指明则不包括数字图像处理的特殊算法, 如分割、三维重建等。但是信号处理的结果, 可以以图像的形式进行显示, 最为典型的是脑电地形图(EEG)。

脑电地形图是一种用图像来表达脑电变化的技术, 通过色彩的空间位置分布, 直观地获取大脑神经信号, 对病变进行定位。可以通过脑电地形图, 描述脑电的空间分布, 如图 1.8 所示, 在某种刺激和诱导下, 其信号源能量主要集中于脑的左枕叶部位。再如, 进行大脑组织光场分布研究时, 通过图 1.9 可以看到光源-检测器所构成检测装置的有效检测范围, 脑组织 MRI 图像提供了空间位置信息, 不同颜色的区域表明了检测范围的概率,

非常直观。

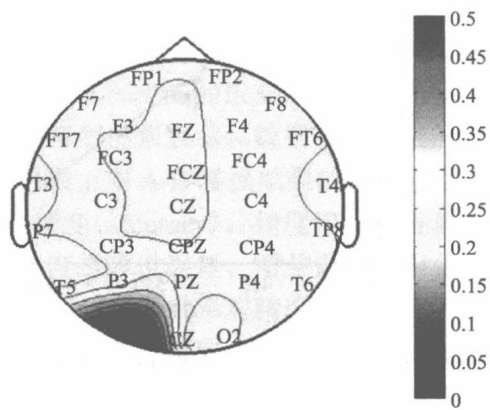


图 1.8 脑电地形图

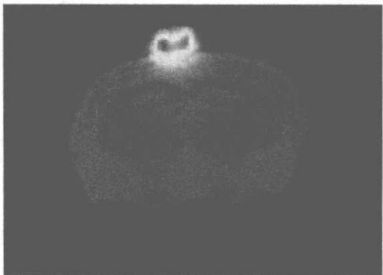


图 1.9 光场分布研究

与工程学科的闭环控制相一致，生物医学信号处理过程大都是一种闭环控制。但是不同的是，生物医学工程领域中的闭环控制，大都是由人来完成的。医生根据信号处理的数据、曲线、图像等信息，获得对生物信息的认知，从而决定进一步的方案。生物医学信号处理的任务是辅助医生工作，而不是替代医生，这一点尤为重要。

## 1.5 生物医学信号概述

生物体中每时每刻都存在着大量的生命信息，由于整个生命过程都在不断地实现着物理的、化学的及生物的变化，因此所产生的信息是极其复杂的。这些信息可以分为化学信息和物理信息。化学信息是指生物组织发生化学变化时产生的信息，它属于生物化学的范畴。物理信息是指生物体各个器官运动时所产生的信息，分为电信号和非电信号两类。这些信号如果是由于人体在生命活动中自发产生的，则称为内源信号 (internal source signal)，如心电、脑电等。如果人体在有源的外界系统探测下，检测到与人体相互作用后被人体吸收、反射、散射或者折射的信号，则称为外源信号 (external source signal)，如光学成像、X射线成像和超声等。感生信号 (induced signal or evoked signal) 要求施感信号 (inducing signal) 与检测到的信号性质不同，人体和探测系统皆是有源的，如磁共振成像和光声成像 (optical acoustic imaging)。

生物医学信号具有如下几个特点。

### 1. 信号弱

表 1.1 给出了部分生物医学信号的幅值和频率范围。

### 2. 噪声强

噪声在生物医学工程领域被定义为研究者不关心的信号，包括干扰和噪声。例如，在采集脑电的时候，会伴随着眼电、肌电等信号的干扰，而且常混有很强的工频干扰；诱发脑电中常常伴随着较强的自发脑电信号；从母体中提取的胎儿心电信号常被较强的母亲心电所淹没。这些都为信号处理带来了较大的困难。

表 1.1 部分生物医学信号的幅值、频率范围

| 被测信号       | 幅度范围         | 频率范围       |
|------------|--------------|------------|
| 心电(体表电极)   | 50μV~5mV     | 0.05~100Hz |
| 脑电(头皮电极)   | 10~300μV     | 0.5~100Hz  |
| 肌电(针电极)    | 20μV~10mV    | 0~10kHz    |
| 视网膜电位      | 0~1mV        | 0.1~40Hz   |
| 眼电         | 0.05~5mV     | 0.1~50Hz   |
| 血压(动脉直接)   | 10~400mmHg   | 0~50Hz     |
| (动脉间接)     | 25~400mmHg   | 0~60Hz     |
| (静脉)       | 0~50mmHg     | 0~50Hz     |
| 心音图(压电拾音器) | 80dB         | 5~2000Hz   |
| 神经电位(表面电极) | 0.01~3mV     | 0~10kHz    |
| 呼吸率        | 2~50 次/min   | 0.1~10Hz   |
| 呼吸流速       | 0~600L/min   | 0~40Hz     |
| 心输出量       | 3~10L/min    |            |
| 心率         | 45~180 次/min | 0.75~3Hz   |
| 体温         | 35~42℃       |            |
| 皮肤电阻       | 1~500kΩ      |            |
| 人体电阻       | 100~2000Ω    |            |

注：1mmHg=1.33322×10<sup>2</sup>Pa。

噪声的来源包括生理信号变异性(physiological variability)、环境干扰(运动, motion)等。生理信号变异性噪声是生物医学信号处理中重要的噪声来源，如果实验设计不合理而产生这样的噪声，所有的结果都将不准确。如采用不同时间间隔(在此称为刺激频率)的光刺激人眼，想要研究刺激频率对人体脑电改变的影响，是否会导致与刺激频率接近的脑电信号的增强。结果显示相关频率的脑电得到了增强，但同时其他频率的信号也得到了增强，这些增强是由于光刺激而产生的还是由于频率刺激而产生的，就无法得到验证，从而需要进一步实验的比对。人体不自觉的运动(呼吸、眨眼等)所导致的环境干扰是另一个重要的干扰来源，因此与人体相接触的传感器的设计尤为重要。

3. 频率范围一般较低

表 1.1 给出了部分生物医学信号的频率范围，可以看到信号的频率一般较低，特别是信号的频率重叠，无法采用经典的频分滤波器进行区分。因此在信号的获取、放大、处理时要充分考虑信号的频率响应特性。

4. 随机性强

随机性强主要是因为生理数据的时间变异性和个体差异性。生物医学信号是随机信号，很难用确定的数学函数式进行描述，只有通过大量统计结果获得它的规律，因此必须借助统计处理技术来处理随机信号和估计其特征。而且它往往是非平稳的，即信号的统计特征(如均值、方差等)随时间的变化而改变。因此在信号处理时往往进行相应的理想化和简化。若信号非平稳性变化不太快，则可以把它作为分段平稳的准平稳信号来处理；若信号具有周期重复的节律性，只是周期和各周期的波形有一定程度的随机变异，则可以作为周期平

稳的重复性信号来处理。更一般性的方法是采用自适应处理技术，使处理的参数自动跟随信号的非平稳性而变化。

## 1.6 信号处理的典型工具

数字信号处理的应用越来越广泛，因此出现了很多帮助初学者快速学习和完成信号采集、处理任务的软件和硬件工具包(箱)。在软件领域主要有 Matlab 及其所包含的信号处理工具箱(Signal Processing Toolbox)和其他相关工具箱；硬件部分包括基于 DSP 和单片机的专用信号处理芯片。近期，随着人工智能的广泛应用，Python 语言也成为信号处理的一种重要手段。

### 1.6.1 Matlab 信号处理工具箱

Matlab 是一种基于矩阵的运算语言，经过多年的发展集成了大量数学工具，其中包括信号处理工具箱。这些工具主要完成的任务如下。

离散时间信号和系统的分析，可以采用函数定义各种典型离散序列；完成序列的基本运算，包括序列的移位、翻转、和、积、累加、差分、时间尺度变换、卷积和等。

采用 Matlab 工具箱中现成函数完成  $Z$  变换的基本运算、逆变换、系统函数  $H(z)$  的频率响应函数、绘制系统函数  $H(z)$  的零极点图，从而完成利用系统函数  $H(z)$  对系统的稳定性等特性进行分析。

采用 Matlab 基本语句，可以练习编写快速傅里叶变换(FFT)程序，也可以采用工具箱中的 FFT 函数完成序列傅里叶变换和傅里叶反变换的计算。前者的编写在于对傅里叶变换基本原理的理解，从而为开发嵌入式系统的 FFT 程序打下基础。后者效率较高，可以作为频谱分析程序中的一部分采用。

滤波器的结构会影响滤波器的性能，利用 Matlab 编写程序可以完成直接型、级联型、并联型滤波器系统函数相互之间的转换；可以根据参数，实现冲激响应不变法和双线性变化法的计算机仿真，采用窗函数法设计 FIR 数字低通滤波器，采用模拟滤波器设计 IIR 数字低通滤波器，从而实现各种频带滤波器的计算机设计。

EEGLAB 是美国加州大学神经计算研究所开发的用于 EEG 处理的工具箱，可以处理连续的和事件相关的 EEG、MEG 和其他电生理数据(electrophysiological data)，采用的方法有独立成分分析(Independent Compoment Analysis, ICA)、时域/频域分析(time/frequency analysis)、伪影去除(artifact rejection)、事件相关统计(event-related statistics)及其他可视化模型。EEGLAB 提供了交互式图像操作界面，特别是为研究者提供了可扩展的、开放的编程平台。

FDATool(Filter Design & Analysis Tool)是 Matlab 信号处理工具箱中面向对象的滤波器设计分析工具箱，FDATool 几乎可以设计所有的滤波器。FDATool 界面主要包括滤波器参数设计和滤波器各种频率分析两部分，操作界面简单，但使用者必须掌握扎实的滤波器基础知识，包括滤波器类型、设计方法、滤波器阶数、各种频率特性参数和窗函数的选择与确定。