

4

生物医学信号的处理和识别

天津科技翻译出版公司

生物医学工程学丛书之四

生物医学信号的处理和识别

杨福生 吕扬生 主编

天津科技翻译出版公司

内 容 简 介

该书以生物医学随机信号的统计处理为基础,讲解信号收集和预处理的基本步骤,常用的各类信号的处理技术,信号的时间—频率分析,模式识别,人工神经网络,心电信号分析,超声血流测量,生物阻抗测量等等,共 10 章。

生物医学信号的处理和识别

(生物医学工程学丛书之四)

主编 杨福生 吕扬生

责任编辑 朱金华 封面设计 张占全

天津科技翻译出版公司出版

全国新华书店发行

南开大学印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:17 字数:401 千字

1997 年 12 月第一版 1997 年 12 月第一次印刷

印数 1~1000 册

ISBN 7-5433-0218-7

R·39 定价:30.00 元

(如发现印装问题,可与出版社调换)

邮编:300192 地址:天津市南开区白堤路 244 号

前 言

生物医学信号的处理和识别是进行生物医学工程研究并进而探索生命奥秘的重要手段。它也是医学图像处理、生理系统辨识与建模等研究工作的基础。因此,国家教委的生物医学工程与仪器专业教学指导委员会把它定为本专业的核心课程之一,作为生物医学工程专业教学计划中的必修课程。

由于生物医学信号的多样性和复杂性,稳健地、有效地处理和识别这类信号是有一定难度的。本书以随机信号的统计处理为基础,首先介绍信号采集和预处理的基本步骤,然后讨论一些比较成熟而且行之有效的方法,如:相干平均、匹配滤波、维纳滤波、参数建模、自适应处理等。进而介绍一些目前正在发展中的方法,包括:以多道信号的奇异值分解为基础的空间处理技术,针对非平稳信号,把时、频两域结合起来的时间—频率表示法以及人工神经网络。考虑到模式识别与信号处理在应用中是有密切联系的,因此也介绍了模式识别的基础知识。接着以心电信号分析为结合点,作为以上各章内容的综合应用举例。最后以超声血流测量和生物阻抗测量作为本书的补充内容。前者着重说明脉冲多普勒与彩色映射成像间的联系与区别,这是近年来国内医学超声界有些争论的问题。后者是目前国内教材中讨论得较少,但有一定发展前景的课题。我们希望本书内容体系的这一安排能使本书既可作为大专院校的教学参考书,又可供科技、工程、医学各界从事生物医学工程工作的有关人员参考。

本书的第一、二、三、四章由天津大学的吕扬生教授编写;第六章由清华大学的刁颐民教授编写;第八章由华中理工大学的瞿安达教授编写;第十章由重庆大学的彭承琳、郑尔信和郑小林教授编

写;第五、七、九章由清华大学的杨福生教授编写。全书成稿前又经杨福生、吕扬生两人做了加工整理。由于作者们学识有限、编写仓促,因此文中难免有不少不妥或错误之处,希望读者多加批评指正。

天津科技翻译出版公司的周兆佳主任和天津生物医学工程学会的顾汉卿教授对本书的出版给予大力支持,谨致诚挚谢意。

杨福生 吕扬生

1997年11月

目 录

第一章 生物医学信号的统计特性	1
第一节 生物医学信号的特点	1
第二节 随机变量的统计特性	3
一、概率	3
二、联合概率与条件概率	4
三、统计独立事件	5
四、连续随机变量和概率分布函数	6
五、概率密度函数	7
六、数字特征	9
七、相关系数	10
八、正态分布	13
九、多元正态随机变量	15
第三节 随机信号的统计特性	17
一、随机信号的概率描述	17
二、随机信号的矩函数	20
三、总体自相关与时间自相关	23
四、随机信号的平稳性与遍历性	24
五、随机信号的矢量表示	28
六、平稳随机信号自相关函数的性质	31
七、平稳随机信号的功率谱密度函数	32
八、几种典型随机信号	35
九、随机信号的联合特征	39
第四节 随机信号通过线性系统	42

第二章 信号采集与预处理	45
第一节 生物医学信号处理的内容	45
第二节 信号采样和量化	49
一、均匀采样	49
二、非均匀采样	50
三、量化和量化误差	53
第三节 信号统计特性的估计	57
一、均值估计	57
二、相关估计的直接公式	59
三、相关估计的频域方法与功率谱估计	61
第四节 消除趋势函数	74
一、低通滤波方法	74
二、逐步回归法	75
三、ARIMA 模型法	77
四、季节过程	78
第五节 信号分段	78
一、自相关判据	80
二、谱误差判据	81
第三章 常用的处理技术	83
第一节 相干平均处理	83
一、基本方法	83
二、潜伏期影响	89
三、相干平均处理用于自发重复信号	91
第二节 匹配滤波器	94
一、基本原理和构成方法	94
二、神经传导速度测量用信号模型	99
三、非白噪声背景下的匹配滤波器	103
四、信号波形未知时构造匹配滤波器方法	105

第三节 信号模型.....	107
一、语音产生模型	108
二、信号的成形滤波器	114
三、信号模型的时域表示式	117
第四节 维纳滤波器.....	120
一、滤波器的最优化问题	120
二、非因果性时间离散维纳滤波器	122
三、因果性时间离散维纳滤波器	123
四、维纳滤波器输出误差与输入信号的正交性	126
五、后验维纳滤波	127
第五节 参数模型.....	128
一、自回归信号的规范方程	129
二、自回归模型与维纳一步预测器的关系	130
三、列文逊算法	131
四、格形结构和伯格算法	135
五、AR 模型阶次估计	138
六、ARMA 模型参数估计	141
第六节 自适应滤波器.....	146
一、自适应的概念	146
二、LMS 自适应滤波器	147
三、自适应消噪声	153
四、分离窄带信号和信号的谱线增强	156
第七节 信号同态分析.....	159
一、同态处理系统	159
二、复倒谱的基本性质	162
三、最小(大)相位序列的复倒谱	166
四、同态解卷积	167
五、把信号分解为最小相位序列和最大相位序列	169

第四章 矩阵滤波和多维信号的空间

处理技术	173
第一节 概述	173
第二节 SVD 的定义、定理和性质	175
一、定义	175
二、SVD 的基本性质	179
第三节 SVD 用于信号处理算法的改进	180
第四节 根据信号结构特性进行信号滤波	183
一、根据功率谱为非负函数的性质	184
二、利用自相关阵秩有限及托布尼兹—亨格尔型 性质	186
第五节 多维信号的主成分分析	191
一、转移矩阵 A 的 SVD	192
二、体表电位的主成分分析	194
第六节 方向能量的概念及信源分解	199
一、方向能量和 SVD	199
二、利用 SVD 分解信源	202
三、信源分解定理的几何解释与定理的条件	207
四、胎儿心电提取的效果	212
第七节 SVD 算法	213
一、在 $R^{p \times p}$ 空间中的 H 矩阵和 G 矩阵	213
二、Kogbetliantz 算法	215
第八节 SVD 的递推算法	218
一、利用新息更新的算法	218
二、基于幂乘的逐个确定奇异矢量的算法	219
三、基于多项式变换的算法	220

一、模式与模式识别的概念	291
二、模式识别的方法和步骤	292
三、数据、距离与特征	295
第二节 统计决策理论	298
一、几种常用的决策规则	298
二、正态分布时的统计决策	302
第三节 线性判别函数	307
一、Fisher 准则函数	308
二、感知准则函数	313
三、最小平方误差准则函数	315
第四节 近邻法	317
第五节 特征的选择与提取	320
一、特征提取	322
二、特征选择	327
第六节 聚类分析	332
一、基于概率密度函数的聚类方法	332
二、基于样本间相似性度量的聚类方法	334
三、分级聚类方法	336
第七章 人工神经网络简介	339
第一节 概述	339
第二节 多层前向感知机及其误差反传算法	343
一、感知机	343
二、多层前向感知机	345
三、误差后向传播算法	347
四、存在问题	350
五、应用举例	351
第三节 Hopfield 网络	352

一、概述	352
二、基本网络与动态方程组	353
三、应用举例	355
四、Hopfield 法存在的问题	357
第四节 生物医学信号处理中的应用	358
一、信号分析与模式分类	358
二、图像分析	363
三、疾病诊断	364
四、一些总的看法	365
第五节 高阶神经网络	370
一、概述	370
二、学习方法	372
三、概念的扩展	374
四、应用举例	375
第八章 心电信号处理	378
第一节 心电信号的特点	378
一、心电信号的形成	378
二、心电信号的特点及畸变	379
第二节 心电信号的噪声抑制与基线纠漂	385
一、低通滤波	385
二、自适应滤波抑制工频干扰	386
三、基线漂移的纠正	391
第三节 心电信号的分析与诊断	400
一、QRS 波的检测	401
二、心电波形分析	408
三、心电诊断	419
四、希氏束信号、高频心电信号、心室晚电位信号	

的提取	424
五、胎儿心电信号的检测	431
第四节 心电数据压缩	439
一、几种简单的数据直接压缩算法	440
二、扇形数据压缩算法	445
三、正交变换算法	448
第九章 用超声方法测量血流速度	452
第一节 概述	452
第二节 基于多普勒原理的血流速度测量	453
一、连续波多普勒血流速度测量的基本原理	453
二、脉冲波多普勒超声血流仪	454
三、方向信息的取得	458
第三节 彩色血流映射成像	464
一、MTI 技术	465
二、相位检测	466
三、自相关法定相位差	468
第四节 彩超与脉冲多普勒	471
第五节 超声血流测量的一些新进展	474
一、互相关法	474
二、宽带极大似然估计法	478
三、其它问题	484
第六节 总结	485
第十章 生物阻抗法	488
第一节 概述	488
第二节 阻抗法的基本原理	489
第三节 用阻抗法测量肢体细胞内外液分布	493

一、引言	493
二、原理	494
三、实验系统及测试结果	496
第四节 用阻抗法测量体内某些容积的变化.....	501
一、基本原理	502
二、测量方法与电极配置	503
三、应用	507
第五节 测量生物组织介电特性的六环电极系统.....	517
一、六环电极的构造与原理	517
二、测试系统	520
三、六环电极系统的应用实验	522

第一章

生物医学信号的统计特性

第一节 生物医学信号 的特点

本书讨论生物医学信号的分析 and 处理。一般地说,在处理信号时,首先需要了解处理对象的性质,以便选择适当的处理方法,因此首先讨论生物医学信号的普遍性质是恰当的。

在信号处理领域中,把信号分为确定性信号和随机性信号两大类型。能够用某种(包括显式的或隐式的)数学关系描述的、可以准确再现的信号,被称为确定性信号。而那些只能用统计方法描述的、不能准确再现的信号则被称为随机性信号。实际上,“准确”一词应该用“精度”来限定,例如市电电压有效值在 $220\text{V} \pm 10\%$ 范围内变动,因此,在 $\pm 10\%$ 的精度下,电压有效值 220V 属准确预测值。但当要求精度为

$\pm 1\%$ 时,准确预测已不可能,市电电压值就是一个随机变量。从这个意义上,确定性信号与随机性信号之间并没有严格的界限。

生物医学信号来源于生物体,有些是生理过程自发产生的,例如,心电信号、肌电信号、血压、体温等。另一些信号是外界施加于生物体,生物体响应后再产生出来的,例如,超声信号、同位素信号、X射线信号等。生物体是一个庞大而复杂的系统,按生理功能分类,它可细分为许多基本系统,如:循环系统、神经系统等等。它们的生理活动相互影响,相互渗透地交织在一起,而其中存在的联系,制约关系以及活动规律均还没有被我们清楚地认识。因而,生物医学信号表现出明显的随机性,一般不能用数学函数来准确表达,它们的规律主要从大量的统计结果中反映出来。

通常人们处理信号是为了寻找某个特定的规律。在研究中,可以通过控制研究工作的环境和条件而突出这种规律。对于生物体,人们尽管也努力这样做,但由于生物体的各个基本系统之间的有机联系,在维持正常生理活动的条件下,很难控制;加以对这些联系的认识不足,选择的控制条件未必有效。因而,在生物医学信号中存在着严重的因受试对象的非目的活动形成的背景噪声。例如,电生理信号中经常混杂着肌电干扰,诱发脑电中经常伴随着较强的自发脑电等,而且噪声常常超过信号。因而,从噪声中提取有用信号是生物医学信号处理面临的重要课题。

生物体具有适应外界环境的能力,当外界环境改变时,生物系统的参数会自动调整,信号的统计特性会随之改变,造成了生物医学信号的非平稳性质。有关生物体适应能力的大量信息恰恰蕴藏在信号的非平稳性中。可是,目前处理非平稳信号的方法不很有效,仍然有待进一步开发。

本章首先讨论生物医学信号的数学表达方法和它的基本统计特性,为今后的进一步讨论奠定基础。

第二节 随机变量的统计特性

有一类生物医学信号,如心率,一次观测结果仅有一个参数。当然这个数在多次观测中是随机变动着的。这类信号就可以用一个随机变量来表达。这是一种最简单的信号,本节首先从这种信号的统计描述开始讨论。

一、概率

我们把对信号的一次观测称为一次试验,一次试验取得一种结果称为一个事件。就用 A 表示随机变量(信号),用 a 表示试验结果, $A = a_i$ 代表一个随机事件,该事件可表示成:

$$A_i: \quad A = a_i \quad (1-2-1)$$

例如,心率为 64,就是一个事件,表示成 $A_i: A = 64$ 。一般心率用整数表示。因而,心率是一个离散随机变量。

如果进行了 N 次试验,事件 A_i 出现了 n_i 次,于是事件 A_i 出现的相对频率为 f_i ,

$$f_i = \frac{n_i}{N} \quad (1-2-2)$$

相对频率 f_i 在试验次数无限增大的条件下的极限为事件 A_i 的概率 $P(A_i)$ 。

$$P(A_i) = P(A = a_i) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_i}{N} \quad (1-2-3)$$

不难看出,它具有性质

$$1 \geq P(A_i) \geq 0 \quad (1-2-4)$$

两个不可能同时出现的事件(例如心率为 64 次/分和心率为 59 次/分是不会同时出现的)为不相容事件。现用 A_i 与 A_j 表示,那么, A_i 或 A_j 出现的概率: