

高等学校试用教材

生物医学 信号处理

杨福生 高上凯 编

高等教育出版社

高等学校试用教材

生物医学信号处理

杨福生 高上凯 编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书由全国高等学校工科生物医学工程与仪器专业教材委员会组织编写、审定。全书共包括三大部分:基础篇、方法篇、应用篇。本书详细讨论了生物信号的特点、提取方法及处理方法。本书有一定的理论性。同时由于在讲述理论的同时,又列举了一定的实例,尤其在应用篇中提出了大量的应用实例,因此本书又具有一定的实用价值。

本书适用于生物医学工程与仪器专业的本科生及研究生作教材,也可供有关专业人员参考。

高等学校试用教材

生物医学信号处理

杨福生 高上凯 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 21 字数 520 000

1989年5月第1版 1989年5月第1次印刷

印数 0 001—1 650

ISBN 7-04-001936-1/TN·105

定价 5.85 元

前 言

生物医学信号处理是生物医学工程与仪器的专业工作者需要具备的基本知识,因此国家教委高等学校工科生物医学工程与仪器专业教材委员会把它定为第一期教材建设的项目之一。本书根据编者在清华大学多年的教学经验总结整理而成。全书共分三大部分:

第一部分是基础篇。讲述描述随机信号基本特征的方法,随机信号通过线性和非线性系统时,输入、输出间的基本关系以及检测和估计的基本原理。

第二部分是方法篇。介绍一些在生物医学信号处理中目前应用得比较广泛的方法,包括相关技术、谱估计、匹配滤波、相干平均、维纳与卡尔曼滤波、参数建模及自适应处理,并结合生物医学信号的应用举例。

第三部分是应用篇。结合几种典型的生物医学信号综合介绍各种方法的应用。选择的典型信号是:自发脑电、诱发响应、肌电和软组织超声衰减系数的测量。

在我们的教学中,第三部分不在课堂讲授,只供学生自学参考。

使用本教材时请注意以下几点:

1. 课程的先修要求是:信号与系统,数字信号处理和概率与数理统计。

2. 对不同部分,书中对参考文献的处理方案也不同,基础篇只在篇末列举了几本主要参考书。方法篇中则每一章附一参考文献清单,除列出主要参考资料外,还把所引用实例的出处做了交

AAR 80/02

待。而在应用篇中,考虑到内容是综述性质,因此每一章后都附有一个较详尽的参考文献清单,以便读者进一步参照。

3. 本书是供高年级学生和研究生兼用的教材。基础和方法两篇所需教学时间约为100学时。目前各校类似课程的学时各不相同,学时较少的院校可以删除书中若干章节(例如第三章、第十一章和第十三章),并不影响教学上的系统性。

4. 习题是教学的重要环节。基础篇和方法篇每章末都附有习题,以便学生巩固所学内容。各章习题都备有解答,采用本书为教材的教师可来函联系。方法篇的后几章中最好能配合一些上机作业。

本书由杨福生和高上凯两人共同编写,高上凯负责编写的是第十五章诱发响应的信号处理。在初稿的初审中承上海交通大学的徐俊荣教授、南京工学院的韦钰教授和西安交通大学的刘树棠副教授提出了许多宝贵意见。徐俊荣教授对书稿做了认真的复审,指出了书中不少错误和不妥之处,并提出了许多中肯的修改建议。审稿会上教材委员会的委员们又进行了认真讨论,提出不少有益意见。

由于对生物医学信号处理的课程内容目前并无统一看法,编者的水平又有限,因此本书从取材到具体叙述都必然还存在不少缺点和错误。殷切期望各方面读者的批评、指正。

编 者

1988.1

目 录

引言.....	1
---------	---

第一部分 基 础 篇

第一章 随机信号特征的描述.....	7
1.1 物理信号的分类.....	7
1.2 单一随机信号的基本特征.....	14
1.3 几种典型的随机过程.....	37
1.4 随机信号的联合特征.....	40
1.5 离散时间随机信号的特征.....	49
1.6 本章总结.....	57
习题.....	57
第二章 随机信号通过线性系统.....	61
2.1 概述.....	61
2.2 单输入单输出的线性系统.....	63
2.3 多输入多输出的线性系统.....	72
2.4 离散时间的线性系统.....	80
习题.....	86
第三章 随机信号通过非线性系统.....	92
3.1 概述.....	92
3.2 直接方法.....	93
3.3 变换方法.....	97
习题.....	107
第四章 检测方法的基本概念.....	109
4.1 概述.....	109
4.2 各种检测准则(检测判据).....	112

4.3 多次观察	127
4.4 多元检测	133
习题	139
第五章 参数估计的基本原理	145
5.1 概述	145
5.2 各种估计准则	149
5.3 估计的进一步举例	158
5.4 估计量的性质	167
5.5 线性估计概述	173
5.6 线性均方估计	175
5.7 递归的线性最小均方误差估计	183
5.8 最小二乘估计	190
习题	196
基础篇参考文献	204

第二部分 方 法 篇

第六章 相关技术	205
6.1 概述	205
6.2 直接估计法	206
6.3 通过快速傅氏变换(FFT)估计自相关函数	209
6.4 其他相关函数的估计	213
6.5 相关技术的应用	214
6.6 相关处理的引申	219
习题	221
参考文献	222
第七章 谱估计	223
7.1 概述	223
7.2 基本的估计算法	223
7.3 估计质量的评价	226
7.4 功率谱估计的改进	232

7.5 互谱的估计	242
7.6 谱估计时的一些实际考虑和应用实例	243
习题	247
参考文献	248
第八章 噪声中确定性波形的检测与提取	249
8.1 概述	249
8.2 白噪声背景下的匹配滤波器	250
8.3 离散时间形式的匹配滤波器	256
8.4 相关检测——似然比检验的扩展	257
8.5 非白噪声下的匹配滤波器	266
8.6 应用实例	271
8.7 相干平均法提取诱发响应	276
习题	285
参考文献	288
第九章 维纳滤波	289
9.1 概述	289
9.2 波形线性均方估计的正交原理	290
9.3 维纳-霍夫(Wiener-Hopf)积分方程	293
9.4 非因果的维纳滤波问题	294
9.5 因果的维纳滤波器	298
9.6 预测问题	304
9.7 后验维纳滤波与互补维纳滤波	307
9.8 应用实例	313
习题	314
参考文献	316
第十章 参数模型	318
10.1 概述	318
10.2 自回归模型的一些性质	321
10.3 AR 模型系数的估计(一)——自相关法	326
10.4 格形结构和后向预测	333

10.5	AR 模型系数的估计 (二)——Burg 法	344
10.6	最小二乘法——Marple 算法	346
10.7	AR 模型阶次的估计	368
10.8	ARMA 模型参数的估计	369
10.9	应用实例	382
	习题	393
	参考文献	397
第十一章	卡尔曼滤波	399
11.1	概述	399
11.2	滤波问题——纯量情况	400
11.3	一步预测——纯量情况	406
11.4	卡尔曼滤波器——矢量情况	417
11.5	应用实例	426
	习题	435
	参考文献	436
第十二章	自适应处理——随机梯度法	438
12.1	概述	438
12.2	横向结构的随机梯度法	440
12.3	应用实例	446
12.4	随机梯度法的引申	456
12.5	格形结构的随机梯度法	460
	习题	469
	参考文献	471
第十三章	自适应处理——递归的最小二乘法	472
13.1	概述	472
13.2	数学基础	479
13.3	投影算子的几个更新公式	493
13.4	前加窗情况的预测问题	504
13.5	预测误差滤波器系数的递归计算	510
13.6	联合过程的前加窗自适应处理	516

13.7 应用实例	518
13.8 横向结构滤波器的 RLS 算法	522
习题	529
参考文献	532

第三部分 应 用 篇

第十四章 自发脑电信号的处理	533
14.1 概述	533
14.2 脑电图瞬态的提取	538
14.3 准平稳分段	543
14.4 特征提取——传统方法	546
14.5 特征提取——现代方法	551
14.6 结束语	560
参考文献	561
第十五章 诱发脑电信号的处理	564
15.1 概述	564
15.2 听觉诱发响应信号的提取与处理	566
15.3 视觉诱发电位信号的处理	588
15.4 结束语	604
参考文献	604
第十六章 肌电信号的处理	607
16.1 概述	607
16.2 肌电信号的模型	611
16.3 对表面肌电做模式分类	619
16.4 肌肉力的连续估计与疲劳分析	625
16.5 针电极肌电图的信号处理	630
参考文献	640
第十七章 人体软组织超声衰减系数的测量	644
17.1 概述	644
17.2 测量的基本原理	645

17.3 存在问题	651
17.4 衰减系数成象的可行性	655
参考文献	658

引 言

生物医学信号处理是国内外近年来迅速发展的数字信号处理应用的一个方面。信号处理的任务是从物理观察中提取针对研究目的的信息。在生物医学研究中有各种待提取和处理的信号。有由生理过程自发产生的主动信号,例如心电(ECG)、脑电(EEG)、肌电(EMG)、眼电(EOG)、胃电(EGG)等电生理信号和体温、血压、脉搏、呼吸等非电生理信号。它们是对人体进行诊断、监护和治疗的重要依据。还有外界施加于人体、把人体作为通道、用以进行探查的被动信号,如超声波、同位素、X射线等。这时,关于生理、病理状况的信息将通过被动信号的某些参数来携带。例如,用超声波对人体进行探查时(不论回波法或多普勒法),待测信息(如脏器的组织结构、血流速度)将通过回波信号的幅度、频率或相位来表现。由于生命机理的复杂性,生物系统是一个很复杂的系统。因此,如何从这些信号中提取所需信息是一项困难而又重要的课题,也是研究生命科学的一种有力工具。

研究生物系统常根据生理功能把它归纳成几个基本系统——如循环系统、神经系统、呼吸系统、消化系统等——来进行。每一个基本系统实际上又是一些复杂的生物物理和生物化学过程的综合表现。而且,这些基本系统还互相交织、渗透和影响着。因此,生物信号是一种相当复杂的信号,其主要特点是随机性和噪声背景都比较强。

1. 随机性强是指影响生物信号的因素很多,它们所遵循的规律又尚未被人类清楚地认识。因此,生物信号一般不可能用确定的数学函数来描述。它的规律主要从大量统计结果中呈现出来。

必须借助统计处理技术来检测、辨识随机信号和估计它的特征。未被认识的因素对信号的影响使信号表现出较明显的变异性。不但因人而异,而且同一个人在不同时刻也不同。信号的变异性使得从观察结果中总结信号的特征和规律更加困难;而且,某些情况下,有意义的信息又恰恰蕴含在变异性之中。因此,变异性是处理生物医学信号时必须考虑的问题。必须注意判别变异是由样本数据不足造成的假象,还是确实反映着某一客观规律。

生物医学信号作为随机信号的一个特点是它的非平稳性,即信号的统计特性随时间而变。这主要是因为生物系统在外在因素的影响下具有适应能力,使得信号的统计特征自动变化。例如,心电节律随运动而变,脑电节律随精神状态而变,都是例子。非平稳信号至今尚无统一且一般的处理方法。当信号的非平稳性变化不太快时,可以把它作为分段平稳的准平稳信号来处理;如果信号具有周期重复的节律性(许多自发的生物电信号都有这一特点),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。更具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。

2. 噪声背景强。所谓噪声是指不是研究对象的信号在观察中的表现。一般,电生理信号总是伴随着由于肢体动作、精神紧张等而带来的伪迹,而且还常混有较强的工频共模干扰,诱发的脑电(不论视觉或听觉诱发)总是伴随着较强的自发脑电;母腹电极上取得的胎儿心电常被比它强一个数量级的母亲心电所淹没。超声回波之类的被动信号则常被其他部分(不在研究范围内的)反射杂波所干扰。因此,生物医学信号的另一个特点是噪声背景比较强。从比较强的噪声背景中提取所需要的信号是另一个困难所在。

噪声与信号的结合方式对处理方法有根本性影响。通常总是把两者看成加法性地结合着[观察信号 $x(t)$ = 信号 $s(t)$ + 噪声

$n(t)$ 。如果两者的频谱不相交叠,则常规的频域滤波是提取信号的惯用措施。但是,对于生物医学信号,信号和噪声往往占据着大致相同的频带,这时就要采用一些特殊方法,按照某种最优意义提取信号。^②50年代建立起来的维纳滤波理论和60年代建立起来的卡尔曼滤波理论都是在最小均方误差意义下从噪声中检测或提取随机信号的线性最优方法。后者是一种递归算法,更能适应信号的非平稳特性。但是,不论维纳滤波还是卡尔曼滤波,都是以信号和噪声的一、二阶统计特性是已知的为前提。实际工作中这一前提往往不具备。这样就发展出后验维纳滤波等处理方法。近年来,由于自适应处理技术可以在没有先验统计知识的情况下经过递归运算来逼近最优解,更能适应非平稳情况,因而很受重视。以它为核心的自适应噪声抵消、自适应谱线增强、自适应系统辨识等在生物医学信号处理上都有人引用。母腹电极上胎儿心电信号的提取、心电图工频干扰的抑制、强的非白噪声背景中窄带随机信号的提取和动态谱估计是其中较有成效的例子。自适应处理技术从处理器结构上看可以分成抽头延迟线(也叫横向滤波)结构和格形结构两类;从处理算法上看可以分成随机梯度法和最小二乘法两类。80年代以来发展起来的各种快速的递归最小二乘算法,由于比随机梯度法收敛速度快、数值性能好,因而在微型机上实时应用有一定前景。

然而,信号与噪声的结合未必总是加法性的。例如,经反射取得的信号往往会引入乘法性的反射系数因子;信号通过信道时会被信道的冲激响应所卷积,从而引起失真。对这些情况,简单的线性滤波不能取得良好结果;需要采用广义线性滤波,或叫同态滤波。在乘法性情况下,只要取对数便可使两项因子变成加法性结合;在卷积情况下,先做傅氏变换并取其幅频特性,然后再取对数便成为加法性的。这时便有可能采用线性滤波进行处理。最后再经逆变换取得最后结果。这些方法在心电图、诱发响应等的处理

中都有应用。

处理随机信号的另一重要途径是为它建立所谓“参数模型”，即把随机信号 $s(t)$ 看成由白噪声 $w(t)$ 激励某一线性系统所产生(图1)。这样便可以用随机信号通过线性系统的各种分析方法来研究

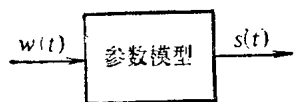


图 1

$s(t)$ 的性质。参数模型既反映信号的随机性一面(激励白噪是不可预测的),又反映信号在一定程度上的可预测性(模型具有确定性参数),因而是研究随机信号的有用工具。

最后还要指出,强调生物医学信号的随机性,并不是说它完全不含有确定性因素。“确定性”与“随机性”,正象“必然性”和“偶然性”一样,是辩证统一的。当人们对信号在某些方面所遵循的规律比较清楚后,偶然性变成必然性,被认识了的部分就可以作为确定性的问题对待。因此,在生物医学信号的分析处理中一些针对确定性信号的处理方法也常被人们引用。匹配滤波是检测被噪声淹没的确定性信号的有效手段,相干平均是从噪声背景中提取未知的确定性信号的常用工具。此外,提取确定性的广义指数波的 Prony 法和 Pisarenko 法以及对确定性和随机性信号都可应用的最小二乘法都是例子。本书在介绍随机信号处理方法的同时,对这些确定性信号的分析处理问题也将给予充分重视。

总之,生物医学信号的处理需要采用一些较先进的处理方法。60年代以来生产了一些专用的医学数据处理机。但这些专用处理机所具有的专用程序数目有限,主要是直方图分析、相干平均、相关分析以及运用周期图做谱分析等。仅仅依靠这些方法,还远不能满足生物医学信号处理的需要。本课程的任务是介绍一些进一步的处理方法,并结合生物医学信号说明方法的应用。主要内容大致分为三个部分:

1. 基础篇 介绍分析随机信号的基础知识。包括:随机信号

特征的描述,随机信号通过线性和非线性系统的分析方法以及检测和估计的一般原理。

2. 方法篇 结合生物医学信号,介绍一些常用的统计处理方法。包括:相关技术、谱估计、匹配滤波、相干平均、最优线性滤波(维纳滤波与卡尔曼滤波)、参数模型以及自适应处理等。

3. 应用篇 以某几种典型的生物医学信号(例如脑电、肌电等)为例,综合介绍以上各种处理方法的具体应用。

生物医学信号处理固然是研究生命科学的有力工具,但是片面强调它的作用也是不恰当的。分析方法必须和事物的机理密切联系起来才有生命力。从这一意义上看,把信号处理技术和对生命机理的研究更自觉地结合起来十分重要。

