

生物医学 随机 信号处理

主编 沈凤麟 陈和晏



中国科学技术大学出版社

生物医学随机信号处理

主编 沈凤麟 陈和晏



中国科学技术大学出版社

1000 2 400

图书在版编目(CIP)数据

生物医学随机信号处理/沈凤麟,陈和晏主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,
1999. 11
ISBN 7-312-01092-X

I. 生… I. ①沈… ②陈… III. ①医学-随机信号-信号处理 ②生物学-随机信号-信号
处理 IV. ①R-33 ②Q-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 66685 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 787×1092/16 印张: 35.25 字数: 880 千

1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月第 1 次印刷

印数: 1—1000 册

ISBN 7-312-01092-X/TN·36 定价: 45.00 元

作 者（以姓氏笔画为序）

沈凤麟 （中国科学技术大学,合肥）

陈和晏 （香港大学,香港）

邱 伟 （华南理工大学,广州）

潘伟丰 （郑成功大学,台南）

前 言

生物医学信号处理是发展迅速的新领域,它不但提供生物机体的各种有关数据,提高医学诊断的科学性,还为探索人类自身和生命的奥秘提供了有力的工具,其作用已从医学、生物学等领域扩展到研究人类的各学科.但是生物医学信号多是微弱、为各类背景噪声覆盖、极不稳定、具变异性的随机信号,其处理是复杂和很困难的.虽然现代信息处理技术和快速计算机提供了有力的研究工具,亦有大量研究论文发表,但是生物医学信号处理仍是有待发展和深入研究的新兴学科,同时它还是必须由多学科领域共同研究的交叉学科.

本书介绍的生物医学信号的随机处理是一种强有力的研究方法,是基于作者们多年研究心得和总结有关研究成果编写而成的,系统地介绍了现代生物医学信号的随机处理理论和方法,同时,对现代生物医学信号处理常用的检测理论、估计理论、高阶谱估计、小波变换、自适应滤波技术、识别理论等的现代信号处理技术均有详尽的介绍和分析.本书除了详细介绍国内外此领域的有关研究成果外,亦特别注意介绍有待研究的课题以及发展的趋势.本书是一本现代生物医学信号处理的专著,主要是供专业研究的科学工作者和研究人士参考,亦可作为高等学位学生的参考书.

本书的作者是中國科学技术大学、华南理工大学、郑成功大学和香港大学的教授,而部分数据由美国威斯康辛(Wisconsin)大学和爱奥华(Iowa)大学提供,谨此致谢.

由于本书作者分处各校,因此在本书的编著工作中有大量的联系工作要做,邱伟承担了学术秘书工作.

本书的主编由沈凤麟,陈和晏担任.

由于生物医学信号处理乃是迅速发展的新学科,必有许多新的研究成果需要继续加以补充,同时对本书的误漏亦希望指正.

作 者

1999年9月

目 录

前 言	(1)
第 1 章 绪论	(1)
第 2 章 生物电磁信号的起源及测量	(2)
2.1 生物电磁信号的起源	(2)
2.1.1 生物电活动的研究历史	(2)
2.1.2 膜电位	(2)
2.1.3 兴奋源	(4)
2.2 生物电信号的测量与分析	(5)
2.2.1 场电位和电流源密度的定量分析	(7)
2.2.2 生物容积导体的特性	(9)
2.3 生物电磁信号测量技术的应用	(10)
2.3.1 偶极子理论	(10)
2.3.2 心电图(Electrocardiogram, ECG)	(10)
2.3.3 心磁图(Magnetocardiogram, MCG)	(10)
2.3.4 心电图与心磁图的比较	(11)
参考文献	(12)
第 3 章 概率论及随机过程	(14)
3.1 概率论基础	(14)
3.1.1 概率定义	(14)
3.1.2 条件概率及其有关性质	(15)
3.1.3 统计独立的随机事件	(16)
3.1.4 随机变量, 概率分布函数, 概率密度函数, 几种常见的概率密度函数	(16)
3.1.5 统计独立随机变量	(20)
3.1.6 随机变量的变换	(20)
3.1.7 随机变量的数字特征	(22)
3.1.8 特征函数	(25)
3.2 高斯随机变量	(28)
3.2.1 中心极限定理	(28)
3.2.2 高斯随机变量的有关性质	(29)
3.3 随机过程	(33)
3.3.1 随机过程的定义	(33)
3.3.2 平稳与非平稳随机过程	(33)
3.3.3 随机过程的有关统计特征	(35)
3.3.4 平稳随机过程的功率谱密度、维纳-辛钦定理	(38)
3.3.5 平稳随机过程的遍历性(即“埃尔哥德性”)	(41)

3.4 各类随机过程	(42)
3.4.1 引言	(42)
3.4.2 高斯随机过程	(42)
3.4.3 维纳过程(又称布朗运动)	(44)
3.4.4 点过程	(44)
1. 点过程定义	(44)
2. 与“点过程”相联系的“计数过程”	(46)
3. 点过程的统计特征	(46)
4. 均匀泊松(Poisson)过程(又称齐次泊松过程)	(47)
5. 增长过程	(48)
6. 增消过程	(48)
7. 普通更新过程	(49)
3.4.5 马尔柯夫过程	(50)
1. 马尔柯夫过程定义	(51)
2. 马尔柯夫过程实例	(51)
3. 马尔柯夫过程的转移概率	(51)
4. Chapman-Kolmogoroff 方程	(52)
5. 扩散方程	(52)
6. k 重马尔柯夫过程	(53)
7. 隐马尔柯夫过程	(53)
3.4.6 Martingales 过程	(54)
3.4.7 循环过程	(55)
3.5 随机过程与线性系统	(56)
3.5.1 引言	(56)
3.5.2 随机过程与变系数及常系数线性系统	(57)
1. 白噪声通过变系数系统后的一般特性	(59)
2. 白噪声通过常系数线性系统后的一般特性	(59)
3. 白噪声通过微分电路	(59)
4. 白噪声通过积分电路	(60)
3.5.3 最一般情况下线性系统的随机输出与随机输入之间的关系	(60)
3.5.4 关于线性系统随机输出的概率密度函数	(62)
附录 3.1 关于概率的公理化定义	(64)
附录 3.2 关于随机变量变换的概率密度函数	(65)
附录 3.3 关于随机过程的连续性,微分与积分	(66)
附录 3.4 其他类型的泊松过程	(67)
附录 3.5 关于增长过程概率分布的证明	(67)
附录 3.6 关于其他类型的更新过程	(68)
参考文献	(69)
第 4 章 假设检验与判决准则(检测基本理论)	(71)
4.1 引言	(71)

4.2	假设检验	(72)
4.3	贝叶斯(Bayes)平均风险最小准则	(73)
4.4	最小错误概率准则	(76)
4.5	聂孟-皮尔逊(Neyman-Pearson)准则	(77)
4.6	最大后验概率准则	(78)
4.7	极小极大准则	(79)
4.8	最佳检测器与等效检验统计量	(81)
4.9	从二元确知信号检测引出“相关接收”	(83)
4.10	检测性能与信噪比的关系、多观测样本的“累积”效应	(85)
4.11	最大信噪比准则——确知信号的匹配滤波	(89)
4.11.1	匹配滤波器的频域特性(输入噪声为白噪声)	(89)
4.11.2	匹配滤波器的时域特性(输入噪声为白噪声)	(90)
4.11.3	匹配滤波器的有关性质	(91)
4.11.4	有色噪声条件下的确知信号匹配滤波	(93)
4.12	广义匹配滤波器,预白化与最佳处理	(95)
4.13	备择假设检验	(97)
4.13.1	贝叶斯平均风险最小准则	(97)
4.13.2	最大后验概率准则	(99)
4.13.3	平均错误概率最小准则	(99)
4.13.4	备择假设检验的似然比判决规则	(99)
4.14	复合假设检验	(100)
4.14.1	复合假设检验	(100)
4.14.2	二元复合假设检验的贝叶斯平均风险最小准则、 最小错误概率准则、聂孟—皮尔逊准则	(101)
4.14.3	复合备择假设检验的判决规则	(103)
4.15	复合假设检验一例——随机参量信号检测	(105)
4.16	备择假设检验实例	(109)
4.16.1	M 元信号检测	(109)
4.16.2	M 类均值检验	(112)
4.16.3	疾病诊断	(113)
4.17	序贯假设检验	(114)
4.17.1	特点	(114)
4.17.2	判决规则及检测门限	(114)
4.17.3	平均终止判决样本数	(116)
4.17.4	序贯假设检验终止判决的必然性	(119)
4.18	在生物医学信号处理中的应用	(119)
4.18.1	生物医学信号检测的特点	(119)
4.18.2	同时消除基线漂移,50Hz 及其倍频干扰的数字滤波器	(123)
4.18.3	序贯假设检验与纤颤(Fibrillation)信号检测	(127)
附录 4.1	关于预白化最佳处理等效性的论证	(130)

附录 4.2 ECG 信号处理中常用的几类整系数数字滤波器	(131)
参考文献	(133)
第 5 章 估计基本理论	(136)
5.1 引言	(136)
5.2 最小均方误差估计	(136)
5.2.1 最小均方误差估计实例	(137)
5.3 线性最小均方误差估计	(138)
5.3.1 线性最小均方误差估计的一般形式	(138)
5.3.2 线性最小均方误差估计的另一种形式	(138)
5.3.3 $\hat{\theta}_{\text{lm}}$ 与 $\hat{\theta}_{\text{ms}}$ 的有关性质	(139)
5.3.4 线性最小均方误差估计实例	(140)
5.3.5 线性最小均方误差估计的递推算法	(145)
5.4 随机信号均方意义下的最佳变换—Karhunen-Loève(卡亨南-洛维)变换	(147)
5.4.1 连续随机信号的 Karhunen-Loève(KL)变换	(147)
5.4.2 连续随机信号基于 KL 变换的估计	(149)
5.4.3 离散随机序列的 KL 变换	(150)
5.4.4 KL 变换是最小均方误差意义下的一种最佳变换	(151)
5.4.5 KL 变换可看作另一种意义下的最佳变换	(153)
5.4.6 KL 变换在信号检测中的应用	(153)
5.5 最小二乘估计	(155)
5.5.1 待定参量(矢量)的最小二乘估计	(155)
5.5.2 待定参量(矢量)的加权最小二乘估计	(157)
5.5.3 最小二乘估计的递推算法	(159)
5.6 贝叶斯估计与最大后验概率估计	(160)
5.6.1 贝叶斯估计(待定参量为标量)	(160)
5.6.2 贝叶斯估计与最小均方误差估计	(161)
5.6.3 由贝叶斯估计引出最大后验概率估计	(161)
5.6.4 待定参量为矢量的贝叶斯估计	(162)
5.6.5 最大似然估计	(163)
5.7 估计的统计性质	(164)
5.7.1 基本统计性质	(164)
5.8 Cramer-Rho 不等式	(167)
5.8.1 非随机参量(标量)估计的 Cramer-Rho 不等式	(167)
5.8.2 随机参量(标量)的估计均方误差下界	(169)
5.8.3 非随机矢量的估计均方误差下界	(170)
5.8.4 随机矢量的估计均方误差下界	(172)
5.9 区间估计	(172)
5.9.1 点估计与区间估计	(172)
5.9.2 高斯随机变量均值的区间估计	(173)
5.9.3 对于高斯随机变量方差的区间估计	(174)

5.10	样本的概率密度函数估计	(174)
5.10.1	基本思路	(174)
5.10.2	Parzen 窗函数法	(175)
5.10.3	k_N 近邻法	(177)
5.11	频率估计	(177)
5.11.1	频率估计的 Tretter 模型(强信噪比)观测样本序列	(177)
5.11.2	频率估计的 Kay 模型	(180)
5.11.3	频率估计的刘模型	(181)
5.11.4	三种频率估计的比较	(184)
5.12	心电信号中工频干扰估计	(185)
5.12.1	估计前的预处理	(185)
5.12.2	几种工频干扰估计方法	(186)
5.12.3	心电地图仪中的工频干扰估计	(189)
附录 5.1	$\hat{\theta}_{ms}, \hat{\theta}_{lms}, \hat{\theta}_{msp}, \hat{\theta}_{ls}, \hat{\theta}_{ml}$ 相等的条件	(191)
附录 5.2	估计误差矩阵的界	(192)
附录 5.3	线性观测样本方程下的最大似然估计与线性最小均方误差估计	(193)
附录 5.4	(5.12.13)式的证明	(196)
	参考文献	(197)
第 6 章	维纳滤波与卡尔曼滤波	(199)
6.1	引言	(199)
6.2	连续信号的维纳滤波	(199)
6.2.1	非平稳随机过程的维纳滤波	(199)
6.2.2	广义平稳随机过程的维纳滤波	(200)
6.2.3	非因果广义平稳维纳-霍甫积分方程的解	(201)
6.2.4	因果广义平稳维纳-霍甫积分方程的解	(202)
6.2.5	计算实例	(204)
6.3	离散维纳滤波	(205)
6.3.1	非平稳非因果离散维纳滤波	(205)
6.3.2	广义平稳非因果离散维纳滤波	(205)
6.3.3	广义平稳因果离散维纳滤波	(207)
6.3.4	有限观测样本广义平稳因果离散维纳滤波	(207)
6.4	矢量情况下的离散维纳滤波	(208)
6.5	时空多通道离散维纳滤波	(209)
6.6	线性变换等效离散维纳滤波	(211)
6.6.1	等效对角线维纳滤波的线性变换	(211)
6.7	离散维纳滤波计算与应用实例	(212)
6.8	卡尔曼滤波	(214)
6.8.1	广义平稳条件下的卡尔曼滤波(标量状态变量)	(214)
6.8.2	广义平稳条件下的卡尔曼预测(标量状态变量)	(217)
6.8.3	卡尔曼滤波与预测之间的关系(广义平稳标量状态)	(218)

6.8.4	非广义平稳状态矢量的卡尔曼滤波	(219)
6.8.5	非广义平稳状态矢量的卡尔曼预测	(222)
6.8.6	递推的发散问题	(223)
6.8.7	计算实例	(224)
附录 6.1	平稳随机序列自相关函数的 Z 变换	(225)
附录 6.2	平稳随机序列互相关函数的 Z 变换	(227)
附录 6.3	线性系统的状态方程与观测方程	(227)
附录 6.4	正交投影	(232)
附录 6.5	其他模型的卡尔曼滤波	(234)
参考文献		(236)
第 7 章	波形检测	(237)
7.1	引言	(237)
7.2	基于特征点提取的波形检测	(237)
7.2.1	基于波峰定位的 QRS 波形检测	(237)
7.2.2	R 波波峰定位的改进	(240)
7.2.3	9 种 QRS 波不同检测方法的比较	(241)
7.3	基于模板匹配的波形检测	(246)
7.3.1	模板“相关”的波形检测	(246)
7.3.2	模板“形态特征匹配”的波形检测	(250)
7.3.3	“轮廓限围”(Contour Limiting)波形检测	(256)
7.4	其他波形检测方法	(257)
参考文献		(258)
第 8 章	时间序列分析与现代谱估计	(261)
8.1	引言	(261)
8.2	Wold 分解定理	(261)
8.3	平稳随机序列的线性模型	(262)
8.3.1	广义平稳随机序列的滑动平均模型(Moving Average Model MA)	(262)
8.3.2	广义平稳随机序列的自回归模型(Autoregressive Model AR)	(262)
8.3.3	广义平稳随机序列的自回归滑动平均模型(ARMA)	(263)
8.3.4	MA, AR, ARMA 模型广义平稳随机序列的功率谱密度	(263)
8.3.5	3 种模型广义平稳随机序列的自相关函数	(263)
8.4	广义平稳随机序列线性模型的拟合	(265)
8.4.1	AR 模型的参数估计 Yule-Walker 方程	(265)
8.4.2	Levison-Durbin 递推算法	(265)
8.4.3	格型(Lattice)递推算法	(268)
8.4.4	最小二乘算法	(271)
8.4.5	ARMA 模型的参数估计 Yule-Walker 扩展方程	(271)
8.4.6	模型阶数的估计	(272)
8.5	非平稳随机序列的 ARIMA 模型	(276)
8.6	随机序列的“最大熵”与“模型拟合”功率谱估计	(276)

8.6.1	传统的功率谱估计	(276)
8.6.2	最大熵功率谱估计	(278)
8.6.3	最大熵功率谱估计与 AR 模型拟合的等价关系	(279)
8.6.4	最大熵功率谱估计与预测误差滤波的关系	(280)
8.6.5	有约束的使熵为最大的功率谱估计	(280)
8.6.6	AR,MA,ARMA 模型拟合功率谱估计	(281)
8.7	Pisarenko 谐波分解法	(282)
8.8	Prony 扩展谐波分解法	(285)
8.9	最大似然功率谱估计	(286)
8.9.1	最大似然功率谱估计	(286)
8.9.2	$\hat{P}_{ML}$ 与 $\hat{P}_{ME}$ 之间的关系	(288)
8.10	子空间 MUSIC 方法	(289)
8.10.1	子空间方法原理	(289)
8.10.2	Pisarenko 谐波分解与“子空间”方法	(292)
8.10.3	MUSIC (Multiple Signal Classification)	(293)
8.11	子空间最小范数方法	(294)
8.12	子空间 ESPRIT 方法	(295)
8.12.1	原始的 ESPRIT 方法	(295)
8.12.2	最小二乘 ESPRIT	(297)
8.13	有色噪声下的子空间	(298)
8.14	频率波数谱与零延迟波数谱	(298)
8.14.1	频率波数谱	(298)
8.14.2	零延迟波数谱	(299)
8.15	倒谱(Cepstrum)	(300)
8.16	在生物医学信号处理中的应用	(300)
8.16.1	应用总况	(300)
8.16.2	由母腹心电分析胎儿心率变异	(303)
8.16.3	癫痫 EEG 信号的时延估计	(303)
8.16.4	EEG 信号基于 AR 模型的压缩	(304)
8.16.5	关于脑电的可预测性	(305)
8.16.6	心电地图(BSPM)的零延迟波数谱	(305)
附录 8.1	Wold 分解定理的证明	(306)
附录 8.2	随机序列的非线性模型与混合回归模型	(308)
附录 8.3	最小交叉熵功率谱估计	(309)
附录 8.4	功率谱估计实用的分辨率估计	(312)
附录 8.5	线性空间与线性子空间	(313)
附录 8.6	多通道 AR 谱估计	(314)
参考文献		(315)
第 9 章	高阶累量、高阶累量谱及其应用	(320)
9.1	引言	(320)

9.2	高阶累量、高阶累量与高阶矩、高阶累量的性质	(321)
9.2.1	高阶累量的定义	(321)
9.2.2	随机过程的高阶累量	(322)
9.2.3	高阶累量与高阶矩	(322)
9.2.4	高阶累量的基本性质	(323)
9.3	高斯过程的高阶累量	(325)
9.4	高阶累量谱	(325)
9.4.1	高阶累量谱的定义	(325)
9.4.2	3 阶谱与 4 阶谱	(325)
9.4.3	离散确定信号的 3 阶谱与 4 阶谱	(326)
9.5	3 阶累量谱的基本性质	(326)
9.6	高阶累量与线性系统辨识	(327)
9.6.1	基于自相关函数的线性系统辨识的模型多重性问题	(327)
9.6.2	线性时不变系统输出与输入的累量与累量谱	(328)
9.6.3	累量对角切片	(330)
9.6.4	高阶累量与线性系统辨识	(330)
9.7	基于高阶谱的信号重构	(336)
9.7.1	引言	(336)
9.7.2	信号频谱与高阶谱的关系	(336)
9.7.3	基于双谱的信号相位谱重构	(337)
9.7.4	基于三谱的信号相位谱重构	(339)
9.7.5	基于双谱的信号幅值重构	(340)
9.7.6	基于倒谱的信号重构	(341)
9.8	循环平稳序列与累量	(342)
9.8.1	循环平稳随机序列	(343)
9.8.2	时变矩与时变累量	(344)
9.8.3	循环矩函数与循环累量函数	(344)
9.8.4	循环平稳序列的频域分析	(345)
9.9	Wigner 高阶矩谱	(346)
9.9.1	Wigner 高阶矩谱的引出	(346)
9.9.2	Wigner 双谱	(346)
9.9.3	随机过程的 Wigner 高阶矩谱与 Wigner 高阶累量谱	(347)
9.10	高阶累量在生物医学信号处理中的应用	(347)
9.10.1	在 EEG 信号处理中的应用(应用实例之一)	(348)
9.10.2	在 VEP 信号处理中的应用(应用实例之二)	(350)
9.10.3	正常人与精神病患者的脑电双谱分析(应用实例之三)	(351)
9.10.4	Wigner 双谱在心音信号处理中的应用(应用实例之四)	(351)
附录 9.1	累量谱估计	(352)
参考文献		(353)
第 10 章	小波理论及其应用	(356)

10.1	引言	(356)
10.2	时频分析:短时富里叶变换	(357)
10.2.1	一般富里叶变换的问题	(357)
10.2.2	短时富里叶变换	(357)
10.2.3	短时富里叶反变换	(358)
10.2.4	短时富里叶变换的问题	(359)
10.3	Wigner 变换 Wigner Ville 分布	(359)
10.3.1	Wigner 变换与 Wigner Ville 分布的定义	(360)
10.3.2	Wigner 变换的基本性质	(361)
10.3.3	离散信号的 Wigner 变换	(365)
10.3.4	随机信号的时频变换	(365)
10.4	信号时频变换的期望性质及其类型	(366)
10.4.1	时频变换的期望性质	(366)
10.4.2	不同类型的时频变换	(368)
10.5	积分小波变换(连续小波变换)	(370)
10.5.1	关于小波变换的引言	(370)
10.5.2	积分小波变换(连续小波变换)	(370)
10.5.3	小波变换的时频分辨特性	(371)
10.5.4	积分小波变换的反演	(372)
10.5.5	二进制小波变换及其反演	(373)
10.5.6	框架与 Riesz 基	(375)
10.5.7	正交小波与半正交小波	(376)
10.6	多分辨(多尺度)分析	(377)
10.6.1	多分辨(多尺度)分析	(377)
10.6.2	尺度函数	(378)
10.6.3	$V_1 = V_0 + W_0$ 成立的充分必要条件	(379)
10.7	多分辨分析的“对偶原理”	(382)
10.7.1	多分辨分析的“对偶原理”	(382)
10.7.2	多分辨分析的“分解与重构”	(386)
10.8	多分辨分析的构造	(387)
10.8.1	“两尺度序列”及其有关性质	(388)
10.8.2	有限两尺度序列的尺度函数	(388)
10.8.3	允许的“两尺度序列”	(389)
10.8.4	紧支撑递推“尺度函数”	(389)
10.8.5	最小支撑尺度函数	(390)
10.8.6	对偶的“多分辨分析”的构造	(392)
10.8.7	规范正交尺度函数的构造	(393)
10.8.8	紧支撑正交小波函数的构造	(394)
10.8.9	紧支撑正交尺度函数的两尺度序列	(397)
10.9	正交小波包	(397)

10.9.1 正交小波包	(397)
10.9.2 基于正交小波包的“多分辨分析”	(399)
10.10 基于小波变换的信号 Lipschitz 指数分析	(400)
10.10.1 信号的 Lipschitz 指数定义及其含义	(400)
10.10.2 基于小波变换的 Lipschitz 指数分析	(401)
10.11 在生物医学信号处理中的应用	(404)
10.11.1 在心电信号处理中的应用	(404)
10.11.2 在脑电信号处理中的应用	(405)
10.11.3 在其他方面的应用	(405)
附录 10.1 基数 B 样条函数	(406)
附录 10.2 两尺度符号 $P(z)$ 及 $Q(z)$ 的若干其他性质	(407)
附录 10.3 关于线性相位“两尺度序列”	(409)
附录 10.4 关于规范正交函数的若干性质	(410)
附录 10.5 紧支撑正交尺度函数的两尺度序列定理	(411)
附录 10.6 关于小波包频谱的性质	(412)
参考文献	(413)
第 11 章 自适应信号处理及其应用	(416)
11.1 引言	(416)
11.2 LMS 自适应滤波器	(416)
11.2.1 最陡下降算法	(418)
11.2.2 LMS 自适应滤波算法	(422)
11.2.3 LMS 算法对非平稳信号的跟踪能力	(424)
11.2.4 几种 LMS 的改进算法	(425)
11.3 递推最小二乘(RLS)自适应算法	(430)
11.3.1 RLS 算法的导出	(430)
11.3.2 RLS 算法的性能	(434)
11.4 自适应滤波器的格型算法及其他	(435)
11.4.1 梯度格型滤波器	(435)
11.4.2 格型算法的性能	(437)
11.4.3 其他自适应滤波器	(438)
11.5 自适应滤波器在生物医学信号处理中的应用	(439)
11.5.1 自适应噪声消除器	(440)
11.5.2 自适应信号增强器	(443)
11.5.3 时间序列自适应滤波器	(452)
参考文献	(456)
第 12 章 识别理论及其应用	(459)
12.1 引言	(459)
12.2 线性判别函数	(460)
12.3 广义线性判别函数	(461)
12.4 线性识别准则	(462)

12.4.1	适用于线性可分的感知准则函数	(462)
12.4.2	适用于一般情况的最小错分样本准则函数	(464)
12.4.3	最小平方误差准则函数	(467)
12.4.4	最小均方误差准则函数	(469)
12.4.5	最小距离识别器	(469)
12.4.6	熵准则降维线性识别	(471)
12.4.7	Fisher 准则降维	(472)
12.4.8	多类识别问题	(474)
12.5	二次识别函数	(477)
12.6	聚类	(477)
12.6.1	最邻近规则聚类	(478)
12.6.2	最大最小距离准则聚类	(478)
12.6.3	M 均值算法——最小离散准则	(478)
12.6.4	近邻函数准则	(479)
12.7	特征量的选取	(481)
12.7.1	引言	(481)
12.7.2	分离性量度的一般要求	(481)
12.7.3	基于距离的分离性量度	(482)
12.7.4	基于特征量概率特性的分离性量度	(483)
12.7.5	基于熵函数的分离性量度	(485)
12.7.6	特征量的选取	(486)
12.8	模糊模式识别	(487)
12.8.1	模糊集合论	(488)
12.8.2	隶属函数	(492)
12.8.3	模糊识别准则	(495)
12.9	句法模式识别	(498)
12.10	BSPM 的特征量提取与识别	(501)
12.10.1	时序等电位图的基本特征	(502)
12.10.2	BSPM 的环特征	(505)
12.10.3	BSPM 的积分图特征	(509)
12.10.4	BSPM 的 ZDWS 特征量	(510)
12.10.5	正常人与心梗患者 BSPM 的识别	(511)
12.11	其他信息	(512)
附录 12.1	关于模糊集合的其他运算	(513)
参考文献	参考文献	(516)
第 13 章	正向心电与反向心电	(519)
13.1	引言	(519)
13.2	正向心电	(520)
13.2.1	正向心电的数学模型(微分形式)	(520)
13.2.2	正向心电的数学模型(积分形式)	(522)

13.2.3	正向心电的数学模型(离散形式)	(524)
13.2.4	等效的生物电流源	(526)
13.2.5	正向心电模拟的构成	(527)
13.2.6	正向心电模拟面临的研究课题	(529)
13.3	反向心电	(530)
13.3.1	反向心电的根本困难	(530)
13.3.2	多极模型	(531)
13.3.3	“模值待定”的电偶矩模型	(534)
13.3.4	“启—闭”电偶矩模型	(534)
13.3.5	移动电偶矩模型	(534)
13.3.6	自由电偶矩模型	(535)
13.3.7	由体表电位反推心表电位	(535)
13.3.8	反向心电计算上的困难	(537)
13.3.9	反向心电研究面临的问题	(537)
	参考文献	(538)
	总附录	(542)
A1	关于矩阵(及矢量)的求导运算	(542)
A2	Chebyshev 不等式	(545)