

生理系统分析

白噪声方法

P. Z. 马赫雷斯
V. Z. 马赫雷斯 著

科学出版社

内 容 简 介

本书是一本受到国际上生物控制论和生物医学工程学者们好评的著作。作者凭借他们在医学、数学和控制工程方面的广博知识,深入浅出地阐述了生理系统分析与建模的理论基础和实际应用。本书的独特之处是非线性生理系统辨识的维纳核方法,该方法也是作者研究成果的一部分。本书虽是研究生理系统的,但是书中论述的理论和方法同样可以应用于工程技术领域中。

全书共十二章。前三章是基础知识和传统辨识方法。第四章介绍维他里核理论及非线性系统的描述方法。第五章介绍几种实际应用的白噪声方法。第六、七章阐述估计系统核的计算方法以及对各种误差的估计。第八、九章介绍辨识试验前的准备和结构辨识。第十章详细叙述了生理系统辨识的几个应用实例。第十一章讨论了需要进行特殊处理的几类生理系统。最后一章以对话的形式讨论了辨识过程中的一些特殊问题。

本书可作为大学医学、生理、生物医学工程、自动控制等专业和有关学科领域的大学生、研究生的教材或参考书,也可供上述领域中的科学工作者和工程技术人员参考。

P. Z. Marmarelis V. Z. Marmarelis

ANALYSIS OF PHYSIOLOGICAL SYSTEMS

The White-Noise Approach

Plenum Press, 1978

生 理 系 统 分 析

白 噪 声 方 法

P. Z. 马默雷斯 著
V. Z. 马默雷斯

钟延炯 李白男 赵似兰 译

李清泉 校

责任编辑 李淑兰

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990 年 1 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1990 年 1 月 第一次印刷 印张: 18

印数: 0001—600

字数: 408 000

ISBN 7-03-001246-1/TP·77

定 价: 19.90 元

译 校 者 的 话

本书采用系统分析的观点和方法,对生理系统进行实验研究,并建立起描述这些研究对象的数学模型.书中主要阐述了运用白噪声作试验信号的系统分析方法.这些白噪声包括高斯白噪声信号、伪随机信号和等间隔跳变对称随机信号.应用白噪声作试验信号,不仅在技术、设备上比较容易实现,数学描述上比较简单,更重要的是采用它们可以较好地描述结构未知的非线性系统.这就是书中所详细介绍的维纳核理论和方法.作者和其同事们的许多卓越的生理系统试验,证明了这种方法在建立非线性生理系统的数学模型方面非常有效.

该书阐述的白噪声分析方法是针对生理系统的,但是控制理论和系统科学工作者一眼就可以看出,这些方法在处理工程系统的建模方面也同样有效,在许多方面(特别是非线性系统的描述与建模)是可以借鉴的.正因为如此,这本书受到了国际上生物控制论学家的好评.译者希望这本书对我国从事生理学、生物医学工程以及控制工程的研究人员将有所裨益.正如作者在他的前言中所提到的,本书也可作为相应专业方向的研究生课程的教材.

本书第1, 2, 3, 10章由钟延炯翻译,第4, 5, 6章由李白男翻译,第7, 9, 11, 12章由赵似兰翻译,第8章由谢劲红翻译,最后由钟延炯、李清泉整理校订.由于本书的内容跨越了生物医学、控制理论、数学等多个学科领域,因此还请中国科学院自动化研究所黄秉宪副研究员校阅了译稿,借此机会向他表示衷心的感谢.

前 言

在研究生理系统时,生物学家始终面临着一个因果关系的描述问题。这项任务通常是通过刺激响应实验来完成的。在过去,这类实验的设计一直是特定的,不完善的,自然效率也是差的。更糟的是,生物学家未能利用与此问题直接有关的一些领域中的技术进步(特别是在系统分析领域里的进步)。本书所阐述的理论和方法旨在弥补这个不足,为生物学家提供一套日常进行生理系统实验时行之有效的研究工具。

作者力图使本书的内容实用、新颖,出于这一想法,本书的许多章节对实验中要遵循的方法和步骤作了详细的叙述。作者希望,这本书对一般的中级生理学研究人員有所裨益,并希望尽量减少对深奥的数学知识的要求。尽管本书内容涉及到系统与信号分析中的现代技术,但全书的叙述还是保持在较低的数学水平,以便使不具备广博数学基础的中级生理学研究人員能够理解并掌握。这样,为了容易地进行直观简单的讨论,我们常常忽视了数学上的严谨。

本书讨论的主要论题是采用白噪声信号的辨识生理系统,理由在于白噪声有许多优点,此外,本书也包含了正弦波分析、描述函数等传统方法。一般地说,系统辨识的现代技术很适合于生理系统的特点,对从事生理系统研究的研究生和研究人員也非常有用。本书还可用作系统生理学、生物工程和生物信号分析等课程的研究生教材。

本书第一章讨论了生理学中的系统分析问题,它包含了解决这一问题的哲理的和解析的方法。

第二章讨论了有关生理信号分析的一些结果。这些内容是研究后续各章所必需的基础。此外还包含了时域和频域的描述方法,重点是统计方法。

第三章讲述了生理系统中传统的系统辨识方法:幅值和相位测量、描述函数、谱分析以及反馈系统。

第四章介绍维他里-维纳理论和有关的方法。这一章还包括了维纳核的解释说明,这个理论对多输入系统的推广,以及与其他一些方法的对比讨论。

第五章介绍几种实际应用的白噪声方法(准白色试验信号)和它们的应用范围,还介绍了实验室用的各种白噪声发生器的设计方法,以及评价它们对系统辨识的适用性所必须的校验。

第六章讨论有效估计系统核的各种计算方法,时域和频域(快速傅里叶变换)的计算方法。

第七章讨论辨识过程中所固有的各种误差源以及如何使误差最小化。这里包含记录长度、系统噪声、带宽以及系统非线性等因素的影响。

第八章讨论实施辨识前要预先作的预备试验以及要考虑的问题,例如系统的平稳性、响应的漂移趋势、系统记忆等等。

第九章涉及结构问题,即如何辨识线性或非线性子系统的内部连接,例如串联、反馈等等。

第十章介绍白噪声方法在生理系统中的几个应用实例,包括鲶鱼视网膜、蝇视觉系统、犁头鳐的半规管、海兔腹部神经节以及龙虾心脏神经节等等。

第十一章讨论需要进行特殊处理的几类生理系统。例如具有点过程(激活势)输入和输出的神经系统,非平稳系统,具有时空输入的系统等等。

最后一章以对话形式阐述辨识过程中的一些特定问题，这也是我们和同事们之间热烈讨论的问题。

P. Z. 马默雷斯

V. Z. 马默雷斯

加利福尼亚

目 录

第一章 生理学中的系统辨识问题	1
1.0 引言	1
1.1 生理学中的系统分析问题	2
1.2 生理系统的功能和结构辨识	4
1.3 生理系统中的“黑箱”与参数辨识	9
第二章 生理信号分析	13
2.0 引言	13
2.1 生理系统数据: 确定性和随机性描述	13
2.2 某些统计工具和概念	14
2.2.1 信号的平稳性与遍历性	15
2.2.2 一些有意义的统计量	22
2.3 自相关函数与互相关函数	24
2.3.1 自相关函数与互相关函数的某些性质	27
2.3.2 由基本概率分布计算相关函数	29
2.3.3 自相关函数与互相关函数的定义小结	31
2.3.4 相关函数的应用	32
2.4 信号的频域描述	36
2.4.1 傅里叶级数(傅氏级数)	36
2.4.2 傅里叶变换(傅氏变换)	43
2.4.3 功率谱	45
2.5 高斯信号的一些性质	47
2.5.1 高斯信号的高阶矩	51
2.5.2 高斯信号的平稳性和遍历性	52
2.5.3 通过线性系统的高斯信号	52

2.5.4 高斯白噪声	52
2.6 采样速率的考虑	53
2.7 生理信号的统计估计	55
2.7.1 采样信号均值的方差	57
2.7.2 估计的置信区间	59
2.8 生理信号的滤波	62
2.8.1 相同刺激的平均响应	62
2.8.2 低频趋势的消除	64
2.8.3 数字滤波器	66
2.8.4 模拟滤波器	70
2.9 计算功率谱时的一些考虑	73
2.9.1 假频	75
2.9.2 统计误差	76
2.9.3 平滑	78
2.9.4 实际考虑	82
第三章 生理系统辨识的传统方法	83
3.0 引言	83
3.1 线性系统中的刺激-响应关系	83
3.1.1 时域	84
3.1.2 频域	88
3.2 传递函数和波德图	90
3.2.1 分析	91
3.2.2 (非)最小相位系统	99
3.2.3 综合	99
3.2.4 传递函数中的延迟	104
3.3 由刺激-响应谱求传递函数	106
3.3.1 噪声的影响	109
3.3.2 在光→ERG 生理系统中的应用	112
3.4 凝聚函数	114
3.5 多输入线性系统	117

3.5.1	双输入系统	118
3.5.2	在双输入神经系统中的应用	125
3.5.3	n 个输入的系统	126
3.6	非线性系统: 利用“描述函数”进行辨识	127
3.6.1	描述函数	128
3.6.2	描述函数在系统辨识中的应用	134
3.6.3	线性化方法	134
3.7	生理系统中的反馈作用	139
3.7.1	系统增益	140
3.7.2	关于信号处理的可靠性	141
3.7.3	信噪比	142
3.7.4	系统带宽	143
3.7.5	系统响应和稳定性	144
3.7.6	持续生理振荡	145
3.8	神经系统中的反馈分析	148
第四章	系统辨识中的白噪声方法	151
4.0	引言	151
4.1	线性系统与非线性系统——维他里级数	154
4.1.1	线性系统	155
4.1.2	非线性系统	158
4.1.3	维他里级数与泰勒级数的类比	161
4.1.4	维他里核的函数意义	164
4.2	维纳理论	165
4.2.1	系统的泛函表示	165
4.2.2	维纳级数	169
4.2.3	维纳表达式与维他里表达式的比较	171
4.2.4	维纳核的含义	176
4.2.5	串联系统的核	179
4.3	系统核的估计方法	184
4.3.1	维纳-波斯方法	184

4.3.2	Lee-Schetzen 方法(互相关方法).....	188
4.3.3	生理系统白噪声分析的一个范例	195
4.4	多输入-多输出系统	198
4.5	其他类型的白噪声方法	208
第五章 白噪声方法的适用性及准白色试验信号的应用.....		211
5.0	引言	211
5.1	有限带宽高斯白噪声 (GWN)	214
5.1.1	GWN 的一般描述及其产生	214
5.1.2	GWN 的自相关特性以及在非线性系统辨识中的应用	217
5.2	基于 m 序列的伪随机信号 (PRS)	220
5.2.1	PRS 的一般描述及其产生	221
5.2.2	PRS 的自相关特性以及在非线性系统辨识中的应用	226
5.3	等间隔跳变对称随机信号 (CSRS).....	229
5.3.1	CSRS 的一般描述及其产生	229
5.3.2	CSRS 的自相关特性以及在非线性系统辨识中的应用	230
5.3.3	分析例题	238
5.4	用于系统辨识的 GWN, PRS 和 CSRS 的 比较分析	242
5.4.1	GWN, PRS 和 CSRS 的优缺点	243
5.4.2	GWN, PRS 和 CSRS 的计算机仿真应用	245
5.5	生成的准白色试验信号的统计检验	252
5.5.1	自相关函数的检验	252
5.5.2	平稳性检验	253
5.5.3	幅度分布检验	256
5.5.4	功率谱检验	256
5.5.5	多个刺激的独立性检验	258

第六章 系统核的计算方法	261
6.0 引言	261
6.1 核量测的计算问题	261
6.2 核计算的时域方法	267
6.2.1 部分乘积的利用	267
6.2.2 刺激-响应长记录数据的处理	271
6.2.3 输入信号的量化	273
6.2.4 核计算的蒙特卡洛方法	275
6.3 频域法: 快速傅里叶变换算法的应用	275
6.3.1 频域方法及频域公式	275
6.3.2 核计算的频域分析	283
6.4 核计算的特殊情况	298
6.4.1 采用二电平或三电平输入	298
6.4.2 脉冲串输出	304
6.5 核计算的模拟(混合)方法	305
6.6 系统核的估算	308
6.7 实验结果评价	315
6.7.1 单输入系统	316
6.7.2 双输入系统	320
6.7.3 核的物理单位	321
第七章 系统核的估计误差	323
7.0 引言	323
7.1 采用 GWN 刺激信号的估计误差	323
7.1.1 有限记录长度引起的误差	323
7.1.2 有限刺激带宽引起的误差	334
7.1.3 实验限制条件引起的误差	340
7.1.4 核估计精度对系统非线性程度的依赖关系	344
7.1.5 核记忆截尾对频率响应估计的影响	346
7.1.6 在多输入的情况下, 由于其他输入存在引起的误差	349

7.2 采用 PRS 刺激时的估计误差	354
7.3 用 CSRS 刺激时的估计误差	355
7.3.1 反褶积误差 (θ 误差)	356
7.3.2 统计涨落误差 (σ 误差)	360
7.3.3 近似正交性误差	371
7.3.4 错误的功率水平误差	374
7.3.5 有限过渡时间误差	376
7.3.6 计算误差	381
7.3.7 一般误差的处理	387
7.3.8 反褶积及统计涨落误差的最小化——基本误差 方程	388
7.4 污染噪声引起的误差	393
7.4.1 输出端的噪声	394
7.4.2 内部噪声	399
7.4.3 输入端的噪声	400
第八章 辨识实验的预备试验与分析	404
8.0 引言	404
8.1 系统输入、输出和工作区的确定	406
8.2 检验系统的平稳性和噪声条件	408
8.2.1 系统平稳性	409
8.2.2 噪声条件	410
8.3 响应中漂移数据的消除	411
8.3.1 用拟合最小二乘多项式消除趋势项	411
8.3.2 响应的高通滤波	413
8.4 系统记忆和带宽的测量	413
8.5 对系统非线性程度的量测	418
8.6 刺激-响应数据的记录和数字化	424
8.6.1 假频对核估计的影响	427
8.6.2 数字化对核估计的影响	428
8.7 高斯白噪声带宽和记录长度的选择	429

8.8 CSRS 的步长和记录长度的最佳选择	432
第九章 黑箱一瞥	438
9.0 引言	438
9.1 含串联结构的生理系统分析	439
9.1.1 线性系统后接零记忆非线性	447
9.1.2 线性系统前接零记忆非线性	447
9.1.3 生理系统的应用举例	448
9.2 零记忆系统	452
9.3 系统的组合	455
9.3.1 单位系统	456
9.3.2 和系统	456
9.3.3 串联系统	457
9.3.4 反馈系统	457
9.3.5 生理系统的应用举例	459
第十章 白噪声方法在神经系统中的应用	467
10.0 引言	467
10.1 白噪声方法用于神经系统时的实际考虑	467
10.1.1 刺激的动态范围	467
10.1.2 系统响应的平稳性	468
10.1.3 低频限制	469
10.1.4 细胞内记录	469
10.1.5 神经系统建模	469
10.2 利用高斯白噪声刺激辨识单输入神经系统	470
10.2.1 连续输入输出系统: 光 $\rightarrow$ 水平细胞	470
10.2.2 连续输入和离散输出的系统: 水平细胞 $\rightarrow$ 神经节细胞	474
10.3 利用 GWN 刺激辨识双输入神经系统	480
10.3.1 连续输入和输出系统: 点状和环状光 $\rightarrow$ 水平细胞	480
10.3.2 连续输入和离散输出的系统: 二光点 $\rightarrow$ 水平	

运动检测纤维	483
10.4 利用伪随机二电平刺激信号辨识单输入生理系统	490
10.5 利用 CSRS 刺激辨识单输入神经系统	494
10.6 另一些辨识方法在具有离散输入或离散输出的神经系统中的应用	500
10.6.1 连续输入和离散输出系统	500
10.6.2 离散输入和连续输出系统	502
第十一章 需要特殊处理的生理系统	505
11.0 引言	505
11.1 具有点过程输入输出的生理系统	505
11.1.1 连续-离散系统	508
11.1.2 离散-连续系统	510
11.1.3 离散-离散系统	512
11.2 具有时空输入的系统	514
11.3 非平稳系统	523
11.4 有非白色随机输入的系统	525
第十二章 结束语	530
参考文献	536
有关文献	542
索引	549

第一章 生理学中的系统辨识问题

有些话对那些不爱思考的人来说总是有一点言过其实。

John Maynard Keynes

1.0 引言

尽管生命科学的认识论有着明显的多层次结构，从细胞层次一直延伸到人类的行为层次。可是迄今为止，主攻方向仍集中在这种结构的各个特定层次上，例如集中在分子、细胞或人类行为等层次上，这就把各层次之间的相互依赖关系忽略掉了，新近的研究方法属于系统分析的范畴。此外，在每个特定层次内所采用的大部分方法论（同样可用于其它层次），也属于系统分析的范畴。由此可见，作为方法论的一个工具，系统分析在生理系统的多层次结构中既有纵向部分，也有横向部分分量。

在整个 60 年代，人们大量地采用工程、数学和计算机技术来解决生命科学中的课题，然而所取得的有意义的成果却远未达到这种努力所期望的目标。因此，在 70 年代初，人们对于自然科学的方法论如此大规模地涌入生理学和医学的有效性，理所当然地产生了怀疑。不过，尽管人们在 60 年代里犯了过于热心的错误，但仍得到了一个不可避免的有力的结论，那就是包括人体在内的生命系统是一个由相互动态作用的许多部分组成的复杂集合体。要有效地研究这种复杂集合体是不可能用零敲碎打的方式来完成的，而只能把它当作一

个有机的整体来处理。这就需要采用高级的系统分析技术。

1.1 生理学中的系统分析问题

在讨论生理系统时,我们将反复使用系统、部件和信号这三个概念。

系统是相互联系和相互作用的“部件”的一个组合,我们把这个组合看成是试图达到某个目的的一个整体。譬如视网膜,在一定的近似程度上,可以看作是一些相互联系和相互作用的神经元的组合,它的目的是将投射在它上面的光图形转换成送入大脑的神经节的响应矩阵。

部件是一种概念实体,它有着某些可测尺度。我们用“变量”来实现这个量测量的数学描述。在上面的例子中细胞是部件,而它的电作用则是变量。

信号是某些随时间变化的量的数学描述。例如,在上述视网膜例子中,神经元电位随时间的变化就是信号。当且仅当一个系统中的两个部件存在相互联系(如两个神经元之间存在神经键或其它形式的联系)时,该系统中的一个部件的测量上的变化才可能显示另一个部件在量度上的变化。这里所说的系统中的两个部件之间的相互联系可以理解为“通道”,它允许“时间上的生理变化”这样的信号从系统中的一个部件流向另一个部件。

很明显,一个系统与其他系统的部件(或系统)总存在相互联系。流经这种“边界通道”上的可能信号称之为系统的“输入”或“输出”,至于是“输入”还是“输出”,则由每个“边界通道”上的信号的相应流向来决定:当“流”向指向系统则该“信号”称作“输入”(刺激);而当“流”向背向系统则称作“输出”(响应)。

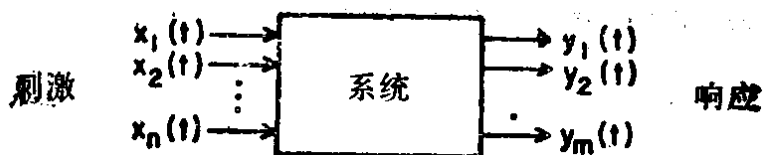


图 1.1 多输入-多输出系统

按照上述的系统概念,我们可以将系统用图 1.1 表示.一般地说,在多数情况下系统有着多个输入(即可以施加多个刺激)和多个输出(即可能有多个可记录的响应).但是根据因果律的观点,注意到刺激 $x_i(t)$ (经由系统)变换为响应 $y(t)$ 的描述,我们就可以研究每一个响应.就是说我们有

$$y_k(t) = F[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] \quad (1.1)$$

即任一个响应可以是所有输入的(或是由所有输入导致的)函数.我们再次回到上面提到过的视网膜的例子,可以想到神经节细胞的响应能用所有投射在视网膜上的输入(光、温度、循环效应及来自视网膜外的其他神经元输入等等)来描述,而且,视网膜其余所有神经元的响应也可以这样描述.另一方面,我们当然也可以根据光感受器的响应加上所有其它输入来描述神经节响应,而光感受器响应又可根据这些视网膜的输入(光、温度等)来描述;因此,神经节响应是可由这些加到“视网膜系统”的输入来完全描述的,这就阐明了由式 (1.1) 所代表的系统概念.

当我们研究一个系统,并试图辨识式 (1.1) 中的函数变换 F 时,就需要用实验方法来测量所有影响这个系统的外来变量(在视网膜的例中就是光、温度、血流等系统输入).很明显,这在实际中是不可能或者很难实现的.因此,要做的事就是根据各个输入对每个特定响应的作用,忽略其中的大多数输入而集中在少数几个主要输入上.我们常常可以近似估计那些被忽略的输入的相对影响.这些“次要”的输入被称作“噪声”,而且实际上可完全略去不计.