

ECG 信号非线性 分析及其应用

杨小冬 著



科学出版社

ECG信号非线性 分析及其应用

王 健 著



清华大学出版社

ECG 信号非线性分析及其应用

杨小冬 著

国家自然科学基金

(60974050, 61072094, 61273143, 61271082)

教育部“新世纪优秀人才支持计划”

(NCET-08-0836, NCET-10-0765)

联合资助

教育部高等学校博士学科点专项科研基金

(20090095120013, 20110095110016)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是关于分形理论及其在生物医学信号处理中应用的专著。全书共分8章。第1章介绍心电活动生理基础及该过程中的混沌现象。第2章介绍分形、分维以及混沌动力学相关基本理论。第3章介绍生物医学信号及常用处理方法,重点介绍了多尺度多重分形理论,提出采样共振频率的概念,并指出多尺度研究的本质。第4~7章介绍多尺度多重分形在ECG、HRV、sleep EEG等生物医学信号处理中的应用,确定ECG信号非线性复杂度最强、同时对疾病最敏感的特征频率范围,并指出心跳频率、心跳动力学复杂度以及ECG敏感特征频率的内在关系。第8章对发展趋势进行总结和展望。为方便阅读和应用本书阐述的算法,书后附有部分心电信号非线性分析的MATLAB源程序。

本书叙述通俗易懂,内容新颖、全面,实验数据准确,反映了分形理论和生物医学信号处理的最新研究动态,也包含了作者近几年的研究成果。本书可供非线性科学、分形理论、信号处理、生物医学工程等领域的科技人员与教师阅读,也可作为相关学科专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

ECG信号非线性分析及其应用/杨小冬著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-035943-8

I. ①E… II. ①杨… III. ①心电图-非线性-分析 IV. ①R540.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第259754号

责任编辑:周 丹·罗 吉 曾佳佳/责任校对:刘小梅

责任印制:赵德静/封面设计:靳 瑞

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年11月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2012年11月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:270 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

分形属于非线性科学。非线性科学作为目前国内外科学研究的热点，其内容涉及确定性和随机性、有序和无序、简单和复杂等范畴和概念上的认识与深化，对整个自然科学，特别是生命科学的发展都有重大影响。非线性系统中极为重要的运动形态就是混沌，它研究的是自然界非线性过程内在随机性所具有的特殊规律性。而与混沌密切相关的分形则是指一类极其零碎而复杂、但有自相似或自仿射的体系，混沌中的奇怪吸引子就存在着无穷嵌套的自相似几何结构。

世界的本质是非线性的，人的生命活动过程也是非线性的。从系统学角度看，生命体是自然界最复杂的巨系统，由多个子系统组成，它的突出特点是构成系统的各部分之间存在数目巨大的相互作用，系统的输出与输入不成正比。其中循环系统是其最主要的子系统之一，而心脏又是循环系统的核心部分。它是由多个振子耦合而成的复杂振荡系统，给循环系统的运行提供动力。在正常情况下，窦房结的电振荡起支配作用，所以通常健康人的心律是窦性心律。心脏搏动在体表形成的电位变化称为心电图（electrocardiogram, ECG）信号。目前心电图信号的非线性特性分析是生命体系研究的一个重要领域。

心电图信号的非线性动力学分析属于信息科学、生命科学和统计

物理交叉学科。传统的医学分析方法认为，生命系统是平稳的线性系统，可采用线性分析方法予以处理。然而本质上，生命体是复杂的和非线性的。对于这样一个在组织、结构和功能上都具有极端复杂性的生理学系统，尽管人们已经了解有关它的不少知识，但未知的东西还有很多，甚至不知道它受多少个独立变量控制，还难以对其动力学行为建立有效的模型。很久以来，人们习惯于将这一复杂的研究对象进行简化和抽象，建立理想的线性模型，对其进行时域、频域或时频变换等线性分析与处理。然而长期的研究实践表明，要揭示本质上是非线性的生命活动物质世界运动规律，如果仅对其进行线性近似及相应分析，就不可能认识到生命活动过程中与非线性有关的现象。因此，引入并深化对生命活动过程的非线性分析，必然会对生物肌体各种水平的生理功能有更进一步的了解。

近 20 年来，基于混沌和分形理论的发展，国内外研究人员对生命循环系统的核心部分——心电活动的非线性分析做了深入研究。除了用李雅普诺夫指数、关联维数、科尔莫戈罗夫熵以及多重分形奇异谱参数等对心电信号进行分析并取得重要进展外，最近在短时心率变异性（HRV）信号和高频心电图（HFECG）信号数据的非线性参数探索上也得到了较为满意的结果。这些在临床观察疗效和早期诊断等方面具有广泛而重要的应用价值。

本书是作者在国内本领域权威期刊上发表的一系列学术论文基础上进一步加工、深化而成的，也是对已有研究成果的全面总结。主要围绕多重分形在心电分析领域的最新进展，对该领域的基础理论研究及应用进行阐述，内容如下（第 3~8 章）：首先提出新的多重分形

复杂度检测参数。通过定性描述 ECG 质量指数谱的整体弯曲程度揭示分形结构复杂性,该参数反映了谱曲线上所有相邻点奇异强度差异的非线性累积,参数值越大,表明信号具有越强的非线性复杂度。然后,将多尺度方法用于多重分形研究。认为多尺度分析的本质就是改变原始信号的采样频率(称之为粗粒化采样频率),对其在时间领域上进行多层次和多样化分析。而对序列“粗粒化”后的各个局域再分别计算多重分形参数,研究该参数随频率尺度因子分布,则是从空间领域上进行探索。以上即为对生理信号的“时空分析”。研究发现,与计算的数据长度和最大粗粒化尺度因子无关,信号的多重分形奇异谱或质量指数谱参数值随尺度因子有一个空间分布,近似呈现中间大、两边小的特点,在某一固定的尺度因子范围内,参数(绝对)值达到最大。进而可根据频率与尺度因子的换算关系,得到与之相对应的粗粒化采样频率和信号特征频率。进一步,我们设计小鼠药物实验,更深入研究 ECG 信号的敏感频率范围。通过小鼠药物实验,模拟心脏电活动过程中不同的生理、病理条件,详细分析各种情况下质量指数谱曲率参数随尺度因子分布,确定 ECG 信号非线性复杂程度最强和对疾病最敏感的特征频率范围。该特征频率可为临床上多种心脏疾病的发病机制、免疫及药物治疗等研究提供重要参考。

另外,本书还深入探讨了上述研究方法在其他生理信号(HRV、sleep EEG)分析中的应用,进一步证明可以在健康人与不同疾病、年龄以及各种睡眠状态的人之间做出很好的区分。通过研究,旨在提高非线性参数分析的有效性,并为其在多重分形领域及医学信息检测中的应用做出贡献。

本书在基本理论部分（第 1 章和第 2 章）借鉴了已出版的若干分形理论的教材、专著（见列出的参考文献），原著者们丰硕的研究成果和学术贡献是我们学术思想的重要源泉，在此向相关研究人员表示衷心感谢。本书得到南京大学宁新宝教授的悉心指导和帮助，南京邮电大学王俊副教授、南京大学何爱军副教授、卞春华副教授在本书编写过程中也提出了许多宝贵意见和建议，在此一并表示感谢。

书中涉及的研究内容得到多项国家自然科学基金、教育部“新世纪优秀人才支持计划”、教育部高等学校博士学科点专项科研基金等的部分资助。

心电信号非线性分析是一个发展迅速、多学科交叉的新颖研究方向，其理论及应用均有很多问题尚待进一步研究和探讨，有些内容远未完善。由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请同行专家和读者批评指正。

作 者

2012 年 9 月于中国矿业大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 确定论和概率论	1
1.2 心脏电活动	4
1.2.1 生物电现象	4
1.2.2 体表心电图	7
1.2.3 心电图导联	10
1.3 混沌	12
1.3.1 混沌研究的历史	13
1.3.2 混沌的定义	15
1.3.3 混沌运动的特性	17
1.3.4 混沌的研究方法	22
1.4 心脏电活动与混沌	24
1.5 心电信号混沌研究与本书内容安排	28
1.5.1 心电信号混沌研究	28
1.5.2 本书主要内容安排	32
参考文献	34

第 2 章 分形基本理论	38
2.1 分形概念的产生	38
2.2 分形的基本概念	39
2.2.1 分形的定义	39
2.2.2 自相似性	40
2.2.3 标度不变性	41
2.2.4 分形的分类	42
2.3 分维	44
2.3.1 经典维数	44
2.3.2 容量维数	45
2.3.3 信息维数	46
2.3.4 李雅普诺夫维数	48
2.3.5 关联维数	48
2.3.6 广义维数	52
2.4 相空间和时间系列的相空间重构	55
2.5 庞加莱截面	60
2.6 李雅普诺夫指数	62
2.6.1 Oseledec 的乘性各态遍历原理	63
2.6.2 从时间系列计算 Lyapunov 指数	64
2.7 科尔莫戈罗夫熵	67
2.8 多重分形	69
2.8.1 多分维	70
2.8.2 多重分形的理论方法	71

2.9 康托尔集合	74
2.9.1 单标度 Cantor 集合	74
2.9.2 双标度 Cantor 集合	75
参考文献	80
第3章 ECG 信号多尺度多重分形研究	83
3.1 ECG 与生物医学信号	83
3.2 生物医学信号的特点及主要处理方法	83
3.2.1 生物医学信号分类	83
3.2.2 生物医学信号特点	84
3.2.3 生物医学信号处理方法	85
3.3 研究意义	88
3.3.1 国内外研究现状及发展动态	88
3.3.2 存在问题	91
3.4 HFECG 信号及采样共振	93
3.4.1 HFECG 信号	93
3.4.2 采样共振	94
3.5 主要研究方法	95
3.5.1 HFECG 信号特征频率	95
3.5.2 主要研究方法	99
参考文献	99
第4章 人体 HFECG 信号奇异谱面积多尺度分析	104
4.1 主要研究思路	105
4.2 理论基础	106

4.2.1	多重分形奇异谱	106
4.2.2	多重分形奇异谱面积	109
4.2.3	离散度	110
4.3	实验设计	112
4.3.1	实验对象	112
4.3.2	实验装置和数据处理	112
4.4	分析与结果	113
4.4.1	多尺度分析	113
4.4.2	实验结果	115
4.4.3	进一步研究	119
4.5	本章小结	122
	参考文献	123
第 5 章	人体 HFECG 信号质量指数谱多尺度分析	127
5.1	主要研究思路	128
5.2	多重分形理论	129
5.2.1	质量指数谱和奇异谱	129
5.2.2	质量指数谱的曲率和面积	132
5.2.3	Cantor 集验证	133
5.3	实验设计	135
5.3.1	实验对象	135
5.3.2	实验装置和数据处理	135
5.4	分析与结果	136
5.4.1	多尺度分析	136

5.4.2 实验结果	138
5.4.3 几种方法的比较	142
5.5 本章小结	143
参考文献	144
第 6 章 小鼠加药 HFECG 信号质量指数谱多尺度分析	148
6.1 主要研究思路	149
6.2 理论基础	152
6.2.1 质量指数谱	152
6.2.2 理论验证	155
6.3 实验设计	157
6.3.1 实验对象	157
6.3.2 实验装置和数据处理	157
6.4 分析与结果	158
6.4.1 多尺度分析	158
6.4.2 实验结果	161
6.4.3 分类结果的统计分析	164
6.5 本章小结	167
参考文献	169
第 7 章 质量指数谱在其他生理信号分析中的应用	172
7.1 研究内容	173
7.2 实验数据描述	174
7.3 $K_{\tau(q)}$ 在生理信号分析中的应用	175
7.3.1 常规 ECG 数据分析	175

7.3.2	HRV 数据分析	178
7.3.3	EEG 数据分析	180
7.4	本章小结	182
	参考文献	183
第 8 章	总结与展望	187
8.1	引言	187
8.2	研究工作总结	189
8.3	展望及进一步工作	193
8.3.1	多参数联合分析	193
8.3.2	符号动力学理论	195
8.4	本章小结	197
	参考文献	198
附录	部分心电信号非线性分析的 MATLAB 源程序	199
程序 1	ECG 信号小波滤波的 MATLAB 源程序	199
程序 2	计算 Cantor 集和 $\Delta\alpha$ 的 MATLAB 源程序	201
程序 3	计算质量指数 τ_q 和广义维数 D_q 的 MATLAB 源程序	210

第1章 绪 论

1.1 确定论和概率论

自 17 世纪后期英国伟大的自然科学家牛顿提出关于宏观物体机械运动的动力学理论以来，人类对自然规律的认识逐渐形成了两种从认识论上根本对立的描述体系：确定论描述和概率论描述。确定论描述是“一一对应”关系，以天体力学为代表，认为对于任何一个研究对象或系统，只要能够列出描述该系统运动规律的动力学方程，加上初始条件，原则上就可以求解出该系统在任何时刻的运动状态，如位移、速度和加速度，由此就确定了该体系过去与未来的变化规律。早在 18 世纪法国著名数学家拉普拉斯就有一段名言：“设想有一位智者在一瞬间得知激励大自然的所有的力，以及组成它的所有物体的相互位置，如果这位智者如此博大精深，他能对这样众多的数据进行分析，把宇宙间最庞大的物体和最轻微的原子的运动凝聚到一个公式之中，那么，对他来说，没有什么事情是不确定的，未来和过去一样，他都可以算得一清二楚。”这就是说，只要有一个宇宙方程，就可以知道宇宙的一切。这段话把确定性（决定性）理论的中心思想发挥得淋漓尽致。

概率论描述以热力学、流体力学为代表,引入随机过程的概念,在研究多体系统或复杂系统的运动行为方面卓有成效。这是一种“多一对应”的关系,即一个平衡态对应瞬息万变的诸多微观状态,它又可以是许多非平衡态的归宿,其体系本身的变化是无法用平衡态来判断的。由于这种随机性是动力系统受到外界诸多因素影响而产生的,且人们对其中某些因素的作用,甚至因素本身是什么也不知道,这种特性并非是动力系统本身所固有的,称为外在随机性。外在随机性表示系统在任何时刻,即使是很短的时间内,其状态也是不确定的,因而是不可预测的,只能对系统的状态进行统计描述,并给出它的概率分布规律。

确定性与有序性、可逆性、可预测性相联系,随机性与无序性、不可逆性和不可预测性相联系。自然界究竟是必然的还是偶然的?长久以来,这一争论一直没有停止过。牛顿以来的自然科学传统,比较推崇确定论描述,而把概率论描述作为在知识不完备情况下“不得已而为之”的补充。然而,把概率论还原为确定论的尝试却一直未能成功。人们曾以为确定论与概率论之间有不可逾越的鸿沟,可是当对复杂系统进行整体研究时看到:尽管描述该系统的动力学模型是不包含任何随机因素的完全确定的微分方程或离散变量的映射,但在一定条件下,却会表现出类似布朗运动的随机行为。而且,这种运动形态表现出对初值细微变化的极端敏感性,使得该确定论系统的长时间演化行为必须借助概率论方法来描述。这种随机性的出现并非来自外部干扰,而是产生于系统内部的非线性,因而被称为“内在随机性”。内在随机性是系统在短期内按确定的规律演化且有一个可预报期限,只

是在足够长的时间后系统才变为不确定。同时，这种随机性又是“表观”的，因为在随机性中蕴涵着规律和有序。当系统表现出这样一种既不是完全确定，又不是完全随机的形态时，我们现在称它处于“混沌态”。

“混沌”（chaos）作为非线性动力学中的一个学术术语，是由美国马里兰大学的数学家李天岩（T. Y. Li）和他的老师约克（J. A. Yorke）引进的。1975年12月，《美国数学月刊》发表了题为“周期3意味着混沌”（*period three implies chaos*）的文章^[1]，从此，“混沌”就成为非线性的确定论系统所表现出的随机行为的总称。混沌理论则要研究确定论系统的这种表观随机性，并探究它与系统的确定性机制是如何沟通的。混沌动力学的发展，正在缩小确定论与概率论这两个对立体系之间的鸿沟，在它们之间架起由此及彼的桥梁。

混沌广泛存在于各种自然现象之中，大至宇宙，小至基本粒子，无不受混沌理论的支配^[2,3]。人们通过对混沌的研究，提出了一些新的问题。在生物体系中，混沌更是无处不在。因为从系统学角度看，人（或其他一些高等动物）大概是自然界中最复杂的系统，其中每一个子系统都具有很复杂的结构和内部相互作用，许多相互作用至今仍不十分清楚。无论从分子水平来看，还是从细胞水平或组织、器官水平看，都是如此。有人甚至认为，蛋白质的进化也具有混沌特性。循环系统是生命体系最主要的子系统之一，而心脏又是循环系统的核心部分。下面就从人体心脏电活动开始谈起。