

自

从摆钟到混沌

生命的节律

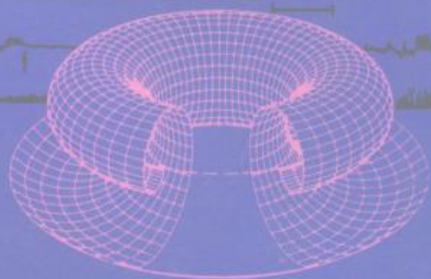
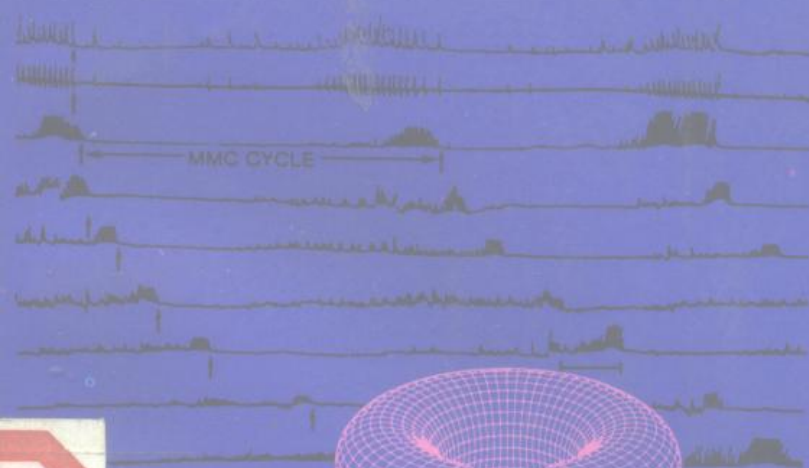
[加] 利昂·格拉斯 迈克尔·C·麦基 著

然

科

学

译



上海远东出版社

丛

从摆钟到混沌

——生命的节律

〔加〕 利昂·格拉斯 迈克尔·C·麦基 著
潘 涛 曾婉贞 潘 泓 张春意 贺向东 译
潘 涛 校

上海远东出版社

Leon Glass and Michael C. Mackey

From Clocks to Chaos

The Rhythms of Life

Princeton University Press

1988

(沪)新登字114号

从摆钟到混沌

——生命的节律

(加) 利昂·格拉斯 迈克尔·C·麦基 著

潘涛 曾婉贞 潘泓 张春意 贺向东 译

潘涛 校

上海远东出版社

(上海冠生园路393号 邮政编码: 200233)

新华书店上海发行所发行 上海东方印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 9.25 字数 240,000

1994年12月第1版 1994年12月第1次印刷

印数 1—3,000

ISBN 7-80613-001-2/N·23 定价: 12.50 元

对本书的评价

- “……在将现代动力学运用于我们对生物节律的认识方面迈出了举足轻重的一步。”

——J. A. Yorke(数学家)

- “对混沌的研究已是举世皆知的，它使得冷静的旁观者不解其玄妙。《从摆钟到混沌》正是一本释惑解疑的上乘之作。”

——M. J. Feigenbaum(物理学家)

- “这本书将对探究节律现象的广大医学研究人员大有裨益。”

——M. N. Levy(医学家)

- “当应用数学工作者阅读《从摆钟到混沌》时，生理学研究将获益匪浅；当将它广泛用于医学生理学课程中时，医学的面貌将从其目前注重结构和局部机制，彻底改变为更加全面地考察相互作用着的、复杂的动力学系统中的性态。”

——*Nature*

- “有人指出，正是在生物学中，非线性科学可能最终找到其最重要的应用。……《从摆钟到混沌》从生物学角度提供了一个目前亟需的复杂动力学引论。……本书给我们一个通过先驱者的眼光展望混沌在生物学中作用的机会。”

——*Science*

- “Glass 是理论物理学家兼生理学家，Mackey 是生理学家，他们对应用动力系统理论分析生理现象作出了重要贡献。因此，正如人们所期望的，他们的著作是一本具有权威性的参考书。”
——*Physics Today*

- “《从摆钟到混沌》是一部叙述生理振荡、可兴奋介质和混沌动力学以及怎样模拟、分析它们的著作。……我把这部书推荐给那些对如何用动力系统来研究生理过程抱有感兴趣的读者。该书亦可作为生物学中数学模型的入门读物。”
——*Bulletin of Mathematical Biology*

作者简介

利昂·格拉斯 1943年生于纽约布鲁克林,1963年毕业于布鲁克林学院化学专业,获理学士学位。之后,他在芝加哥大学继续作研究,并于1968年获哲学博士学位(博士论文题目:《简单液体中的原子运动理论》)。随后,他是机器智能与知觉(爱丁堡大学)、理论生物学(芝加哥大学)及物理学与天文学(罗切斯特大学)的博士后研究员。1975年至今,他在加拿大魁北克省蒙特利尔市麦吉尔大学任教,现为生理学教授。他是《理论生物学杂志》、《混沌:非线性科学的跨学科杂志》和《国际分岔和混沌杂志》的编委,是(加拿大)菲尔兹数学科学研究院的顾问委员以及数学生物学学会的主任委员。

他的研究涉及对生物系统中复杂动态现象的研究。主要研究领域包括视觉心理物理学、心脏和呼吸节律失常理论及模拟这些系统的微分方程与有限差分方程的动力学。已在呼吸、心血管和神经系统中复杂动力学方面发表了论文和综述110篇。他与迈克尔·C·麦基合著的《从摆钟到混沌——生命的节律》[普林斯顿大学出版社(1988)],是一本讨论应用非线性动力学解决生理学和医学问题的专著。他与P. Hunter和A. McCulloch合编的文集《心脏理论:心脏机能的生物力学、生物物理学和非线性动力学》[斯普林格出版社(1991)],对心脏动力学和机能分析提供了多种理论途径。

迈克尔·C·麦基 1942年生于堪萨斯州堪萨斯城,1963年获堪萨斯大学数学专业理学士学位,1968年获(西雅图)华盛顿大

学生理学和生物物理学专业哲学博士学位。在1971年加盟麦吉尔大学生理学系之前，他先后在马里兰州贝塞斯达的物理科学实验室、计算机研究和技术处及国立卫生研究院工作过。现为麦吉尔大学生理学兼物理学和数学教授，生理学和医学中的非线性动力学中心主任。他曾是牛津大学、西里西亚大学、不来梅大学、密歇根州立大学和玛丽·居里大学的访问教授。1985年至1988年任加拿大理论生物学学会主席。

他的研究兴趣集中于非线性动力学领域，特别集中在生物过程建模和噪声与“混沌”动力学相互作用中出现的延滞微分方程等方面。他的工作包括：血液病中细胞复制和分化的控制模型，膜离子传输和离子通道行为的动力学，商品市场的动力学以及简单神经回路的动态等。目前他的研究兴趣扩展到把来自遍历理论的现代方法，应用于热力学和统计力学基础中的基本问题。他是75篇研究论文和5本书的作者或合作者。这5本书是：《跨生物膜离子传输》，斯普林格出版社(1976)；《确定性系统的概率性质》(与A. Lasota 合著)，剑桥大学出版社(1985)；《从摆钟到混沌——生命的节律》(与L. Glass 合著)，普林斯顿大学出版社(1988)；《时间之矢：热力学性态的起源》，斯普林格出版社(1992)；《混沌、分形与噪声：动力学的随机方面》(与A. Lasota 合著)，斯普林格出版社(1993)。

中文版序

完成《从摆钟到混沌》书稿以来，六年过去了，混沌动力学概念已从一个深奥的数学概念，演变为某些非小说类和小说类畅销书的主题。最突出的例子是，在迈克尔·克赖顿(Michael Crichton) 1990年发表的科学幻想小说和同名电影《侏罗纪公园》(Jurassic Park)^①中，出现“混沌学家”(chaotician)伊恩·马尔科姆(Ian Malcolm)一角。克赖顿这样描述马尔科姆：

伊恩·马尔科姆是新一代数学家中最著名的一员，这些学者直言不讳地关注“现实世界如何运作”，他们以几种重要方式破除幽闭于学院的数学传统。其一，他们经常使用传统数学家不屑一顾的计算机；其二，他们在一个叫混沌理论的新领域里几乎专门与非线性方程打交道；其三，他们看来注意到了他们的数学描述的是现实世界中实际存在的事物；最后，似乎为了强调他们从学术界打入现实世界，他们用一位前辈数学家称之为“可悲的个性膨胀”的方式着装和言谈。事实上，他们的行为举止往往像一些摇滚舞星。

尽管人们可能对克赖顿的描述吹毛求疵，但在过去十年里，人们对把数学应用于研究自然和人造系统中复杂现象的兴趣大增，这无疑是正确的。认识到十分简单的数学模型能够说明自然系统

^① 这部影片于1993年6月公演，讲述用发掘出的古爬行动物骨头中的DNA培育出了恐龙，是一部引起世界范围轰动的科幻巨片。——译者注

中复杂的、“混乱的”节律,极大地推动了对现实世界的潜在数学模型的鉴别及刻划的尝试。我们这本书力图介绍正在生物科学和医学中运用的最有前途的思想。

虽然我们在书中提出了许多问题,可这些问题中的大多数尚未得到解决。实际上,许多涉及人体在健康和在疾病状况下复杂周期性起源至为关键的问题,至今仍旧扑朔迷离,进展缓慢。进展缓慢的一个原因或许在于,西方大多数科研院所,在现行高度条块化的学术环境中难以组织跨学科研究。

生命系统的非线性动力学研究需要跨学科研究。道理很简单:受过良好生物学和医学训练的人难得有扎实的数学根基,而数学基础扎实的人却很少熟悉生物学。医学的研究甚至更加困难——不是医生就不会了解人体在健康和疾病状况下的奇妙节律。

我们欢迎我们的书译成中文出版,因为,中国学者对非线性动力学有着持久的兴趣,他们在这一领域取得了重要进展。而且,在如今的物理科学领域中,有许多数学技能极好的中国大学生,目前正致力于非线性动力学在普通数学和物理学科之外的应用。生物节律和人体节律的表征通常不需要复杂的技术,用测量电活动和机械活动的比较简单的传感器就容易实现。对此类数据组的精心收集(它是理论分析的出发点)工作目前仍处在初级阶段。我们希望我们的中国同行,在这些新兴领域中把握上述思想的重要性,能够用这些方法去解决人体复杂节律提出的众多诱人课题。

我们向本书的译者潘涛、曾婉贞、潘泓、张春意、贺向东致以诚挚的谢意。我们还感谢郝柏林研究员和朱照宣教授在敦请上海远东出版社出版中译本过程中所起的重要作用。

利昂·格拉斯
迈克尔·C·麦基
1993年6月

序

本书介绍数学在正常与病理生物节律研究方面的实际应用。对于想从理论高度深入理解与探索生物节律的生物学、医学、物理学和数学工作者来说，本书是值得一读的。

为了突出主要的概念，我们在书中讨论了许多生物学实例和精心选择的若干数学模型。选用这些例子，旨在阐明不同机体组织中存在的形形色色的动力学过程。目前还不大可能对所列举的大多数生物学例子作出非常确切的理论解释，因而也就不能期望这些数学模型是真实生物系统的精确描述。我们力求强调主要原理并以尽可能简明的方式来论述，至于书中采用的简化模型是否与更加复杂而逼真的模型具有相同的动力学特性，将随着今后研究工作的深入而逐步得到解答。

我们几乎仅用微积分程度的数学知识来解说那些高深的概念，以便非数学工作者也能看懂。为此我们尽量不用方程式，只要有可能，我们就用生理学实例和图形来说明和解释有关概念。章节之间时常相互参照，不过每一章基本上是各自独立的，可不按顺序阅读。数学基础知识不足的读者，最好返阅第2章和第3章，仔细阅读那些生疏概念的阐释。在“数学附录”里，我们举例说明某些数学方法的应用细节，同时给出在具体场合应用这些方法的若干问题。

由于理论应用的可能性极为广泛，所以很难列出详尽无遗的参考文献。实际上我们对每一个论题均指明了主要的参考文献，以利读者据此进一步查找相关的文献资料。为了保持正文的流畅，

所有注释都集中在每章末尾的“注释和参考文献”一节中。

多年来我们从与学生、同事的讨论和合作中获益匪浅，我们尤其感谢 J. Bélair, P. Dörmer, A. Goldberger, C. Graves, M. R. Guevara, U. an der Heiden, S. A. Kauffman, J. Keener, A. Lasota, J. G. Milton, R. Perez, G. A. Petrillo, A. Shrier, T. Trippenbach 和 A. T. Winfree 等。J. G. Milton, S. Strogatz, J. Tyson 和 A. T. Winfree 等对书中有关表述提出过许多中肯的建议；J. G. Milton 协助拟出主要标题；B. Gavin 绘制插图；S. James 帮助打字。我们还要感谢普林斯顿大学出版社 Judith May 和 Alice Calaprice 对本书出版的帮助和指点。

本书部分章节是 L. 格拉斯在作为加利福尼亚大学圣迭戈分校访问学者时，M. C. 麦基在作为牛津大学和不来梅大学客座教授时写就的。我们感谢 H. Abarbanel 和 A. Mandell (圣迭戈)，J. D. Murray (牛津) 和 H. Schwegler (不来梅) 在此期间的热情接待。最后，感谢自然科学和工程研究学会(加拿大)、加拿大心脏学会和加拿大肺脏基金会等为我们提供研究资金。

蒙特利尔

1987年8月

目 录

作者简介

中文版序

序

第 1 章 导言：生命的节律	1
1.1 数学概念	2
1.2 生物振荡器的数学模型	6
1.3 对生理节律的扰动	9
1.4 空间振荡	13
1.5 动态病	15
注释和参考文献	16
第 2 章 生理系统中的定态、振荡和混沌	18
2.1 变量、方程和定性分析	18
2.2 定态	20
2.3 极限环和相平面	21
2.4 局部稳定性、分岔和结构稳定性	24
2.5 有限差分方程中的分岔和混沌	25
2.6 小结	33
注释和参考文献	33
第 3 章 噪声和混沌	35
3.1 泊松过程和无规行走	35
3.2 噪声与混沌的比较	41
3.3 混沌的识别	47
3.4 奇怪吸引子、维数和李雅普诺夫数	49
3.5 小结	54
注释和参考文献	55

第 4 章 生物振荡的数学模型	57
4.1 起搏点振荡	57
4.2 中枢模式发生器	63
4.3 相互抑制	64
4.4 顺序去抑制	66
4.5 负反馈系统	68
4.6 延时混合反馈系统中的振荡	73
4.7 小结	79
注释和参考文献	79
第 5 章 生理节律的起始和终止	83
5.1 接入进行中振荡	83
5.2 软激励	86
5.3 硬激励	91
5.4 极限环的湮灭: 黑洞.....	95
5.5 小结	97
注释和参考文献	97
第 6 章 生物振荡器的单脉冲扰动	100
6.1 实验结果综述	100
6.2 累积-发放模型中的相位重置.....	104
6.3 极限环振荡的相位重置	107
6.4 多种系统中的相位重置	112
6.5 拓扑理论应用中的实际问题	115
6.6 小结	119
注释和参考文献	120
第 7 章 生物振荡器的周期性刺激	123
7.1 实验结果综述	123
7.2 数学概念	127
7.3 累积-发放模型的周期性迫动.....	133
7.4 极限环振荡器的锁相	137
7.5 人体节律的锁相	140

7.6	小结	146
	注释和参考文献	147
第 8 章	空间振荡	150
8.1	一维组织中波的传播	150
8.2	环状组织中波的传播	161
8.3	二维组织中的波和螺线波	163
8.4	三维组织中的组织化中心	165
8.5	纤颤及其他疾病	168
8.6	小结	174
	注释和参考文献	174
第 9 章	动态病	179
9.1	动态病的识别	179
9.2	动态病数学模型的建立	182
9.3	动态病生物学模型的建立	183
9.4	诊断和治疗	183
9.5	小结	186
	注释和参考文献	187
	跋	189
	数学附录	190
A.1	微分方程	190
A.2	有限差分方程	201
A.3	习题	212
	注释和参考文献	214
	主题索引	217
	参考文献	237
	译后记	278
	译者简介	282

第 1 章 导言：生命的节律

生理节律(physiological rhythms)对生命至关重要。有些节律贯穿整个生命过程的始终,即使是短暂的中断也会导致死亡。另有一些受意识控制或不受意识控制的节律则出现在个体生命的各个不同时期。节律之间、节律与外部环境之间都存在着相互作用。节律的变化越出正常范围,或者出现以前根本不存在的新的节律,均与机体疾病有关。

要认识生理节律的机制,就要找到把数学和生理学综合在一起的方法。数学的一个叫做非线性动力学(nonlinear dynamics)的分支正当此任。非线性动力学是庞加莱(Poincaré)^①在上个世纪末奠定的基础,它在过去 25 年中已经取得了长足的进展。不过,令人遗憾的是,由于非线性动力学往往以一种适合于数学专业高年级学生的面目出现,使得专业生理学工作者很难理解和掌握。好在生理学中与之极有关系的许多核心思想,可以通过具体的生理学例子来表述和解说。因此,本书打算以非数学工作者易于领会的方式,对非线性动力学的最新进展在生理学中的应用作一个入门性的介绍。然而,我们也希望具备一定数学基础的读者能够找到他们感兴趣的许多生理学实例,希望某些读者为促进未来的研究,在我们介绍的内容中找到尚未充分认识的生理学现象。本章我们将勾勒出本书的大致轮廓,并且用给出的若干生理学例子来归纳其主题。

^① 庞加莱(Jules Henri Poincaré, 1854~1912),法国数学家。——译者注

1.1 数学概念

对生理现象进行观测所得到的结果通常是时间的函数。为了刻划这些时间序列(time series)的特性, 现已建立了四个基本数学概念: 定态、振荡、混沌和噪声。

自从贝纳尔(Bernard)^①, 坎农(Cannon)^② 及其他人所作的开拓性研究以来, 纵然不是很有必要, 生理学教科书开篇就讨论稳态仍已变成了一种时尚。稳态(homeostasis)指的是, 对于诸如血糖、血气、电解质、渗透性、血压和pH值等变量, 体内环境相对恒定。生理学的稳态概念可与数学中的定态概念相联系。定态(steady states)指数学方程的定常解。阐明这些变量被约束在一定范围内的机制, 构成了生理学研究的主要内容。作为稳态机制的示例, 我们来考察麻醉犬对短时轻微出血的反应(图 1.1)。在出血以后, 反

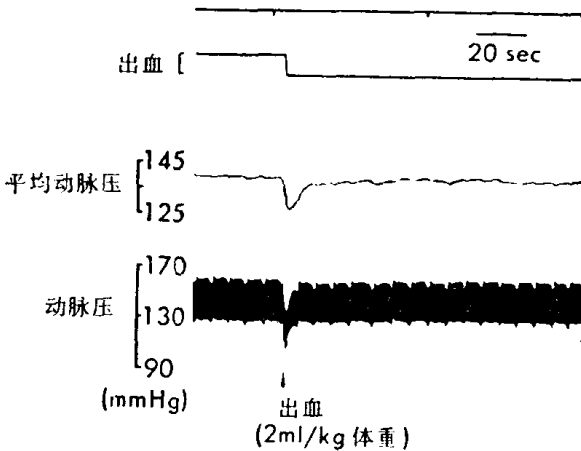


图 1.1 用戊巴比妥钠麻醉的狗, 动脉压和平均动脉压对短时轻微出血的反应[引自 Hosomi 和 Hayashida (1984)]。

① 贝纳尔(Claude Bernard, 1813~1878), 法国生理学家。——译者注

② 坎农(Walter Bradford Cannon, 1871~1945), 美国生理学家。——译者注

射机制被激活,它在几秒内便使血压恢复到接近平衡状态。

众所周知,尽管平均血压保持相对稳定,但心脏的收缩却近似为周期性的。从心电图即可看到心脏的周期性电活动。图 1.2 所

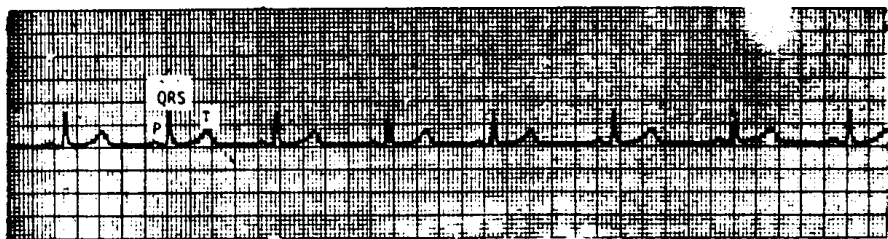


图 1.2 正常心电图。P波对应于心房去极化, QRS 波群对应于心室去极化, T波对应于心室复极化。水平和垂直方向的一小格分别相当于 0.2 秒 (sec) 和 0.5 毫伏 (mV) [引自 Goldberger 和 Goldberger(1986)]。

示为一正常心电图的例子。我们同样也很熟悉心搏、呼吸、生殖以及正常睡眠-清醒周期(sleep-wake cycle)等节律。但是,其他许多系统中的振荡就不那么明显了,比如胰岛素和黄体生成素的释放,肠和输尿管中的蠕动波,皮层和自主神经系统的电活动以及外周血管和瞳孔的收缩等等,它们具有同等重要的生理学意义。生理振荡与数学方程的周期解有关。

当然我们都知道,任何生理参数的精确测量,决不可能给出绝对平稳的或周期性的时间序列。即使是假定为平稳或周期性的系统,也总存在着围绕固定水平或周期的涨落现象。此外,还有些系统显得相当不规则,以致于很难把它们同任何潜在的平稳或周期性过程相联系。生理多变性(physiological variability)的一个可能原因,就是变动起伏的环境。当人们在饮食、锻炼和休息的时候,血糖和胰岛素水平以一种特定的方式与之相适应(图 1.3)。血压对活动和体位的变化也作出类似的反应。生理节律本身还会干扰别的节律,比如吸气期间心搏会加快,即所谓的呼吸性窦性心律不齐。尽管这种多变性在理论上并不一定容易研究,但是它的起因倒往往不难理解。