



国外优秀科技著作出版专项基金资助

From Cells to Societies: Models of Complex Coherent Action

A.S.Mikhailov V.Calenbuhr

从细胞到社会

——复杂协调运动的模型

[德] 亚历山大 S. 米哈依洛夫

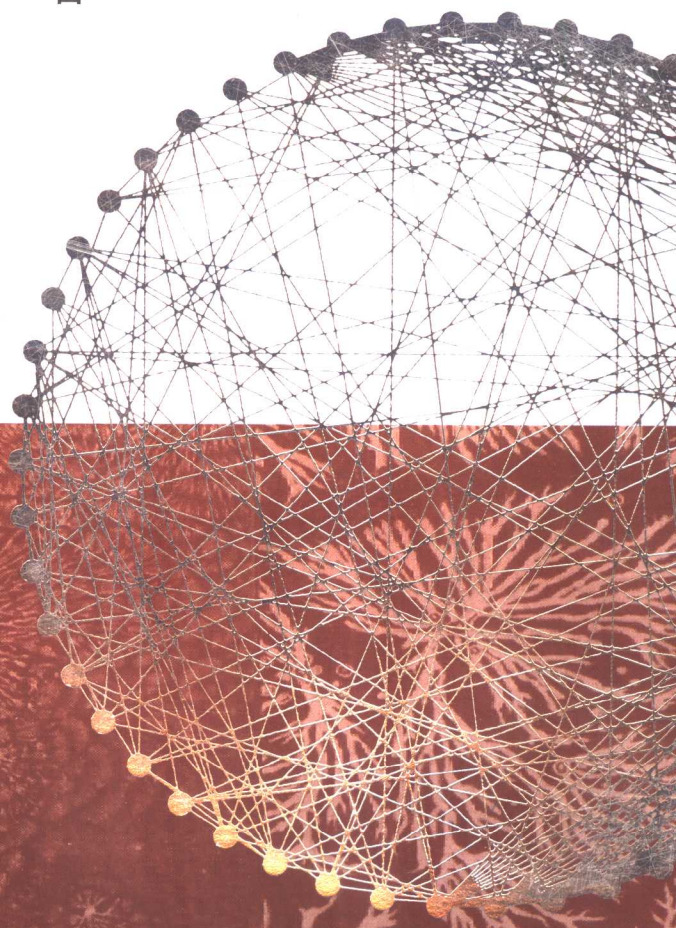
[比] 维拉·凯伦布尔

著

葛蔚 韩靖 主译



化学工业出版社





国外优秀科技著作出版专项基金资助

From Cells to Societies: Models of Complex Coherent Action

A.S.Mikhailov V.Calenbuhr

从细胞到社会 ——复杂协调运动的模型

[德] 亚历山大 S. 米哈依洛夫

[比] 维拉·凯伦布尔

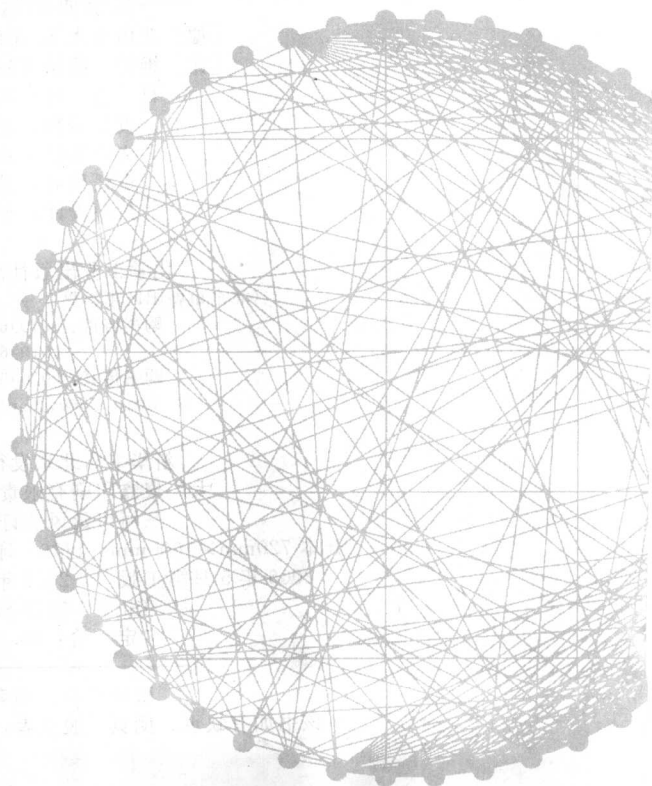
著

葛蔚 韩靖 主译



化学工业出版社

·北京·



图书在版编目 (CIP) 数据

从细胞到社会——复杂协调运动的模型/[德] 米哈依洛夫 (Mikhailov, A. S.), [比] 凯伦布尔 (Calenbuhr, V.) 著; 葛蔚, 韩靖主译. —北京: 化学工业出版社, 2006. 3
书名原文: From Cells to Societies; Models of Complex Coherent Action
ISBN 7-5025-8398-X

I. 从… II. ①米…②凯…③葛…④韩… III. 系统模型-研究 IV. N945.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 022609 号

From Cells to Societies; Models of Complex Coherent Action/by A. S. Mikhailov, V. Calenbuhr
ISBN 3-540-42164-5

Copyright © 2002 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Springer-Verlag

本书中文简体字版由 Springer-Verlag 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-3338

从细胞到社会 ——复杂协调运动的模型

[德] 亚历山大 S. 米哈依洛夫 著

[比] 维拉·凯伦布尔

葛蔚 韩靖 主译

责任编辑: 赵玉清

文字编辑: 袁海燕

责任校对: 吴静

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 17½ 字数 311 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8398-X

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

译者的话

复杂性已成为许多学科共同的挑战，因而受到了整个科学界的高度重视，但目前还没有形成统一的理论。甚至对复杂系统的定义学术界还有争论。一些学者认为开放性和远离平衡的状态使系统得以通过与外界的物质和能量交换而获得其发展的根本动力——负熵，也使非线性效应变得显著，由此出现的时空斑图（pattern）和失稳分岔等都属复杂性。而另一些学者认为系统的整体性质不是其单元性质的线性叠加而“涌现”了新的本质，或称不可还原性是复杂性的必要条件，而层级组织和演化能力是其重要的外在表现。但不管怎样，前者也是后者的重要特征和底层的产生机制，而后的雏形在前者中也有体现。

在这种意义下，化学工程面对的正是典型的复杂性。它是物质和能量的转化器，是典型的开放系统。而由于多种影响因素的耦合，实际过程中的“力”和“流”之间的关系一般是非线性的，如反应温度与反应速率的指数关系，管式换热器中流速、温度和传热系数的关系。同时工业过程的目的性和效率要求决定了大多数过程是非自发和人工强化的，因而始终运行在远离平衡的状态下（即使在稳定运行时）。多数情况下，化工系统处理或利用的是多相介质，这时复杂性更为明显。如相间滑移速度和作用力的强非线性关系，分相和界面行为、多态性和突变现象以及放大效应等。

毋庸置疑，深入研究化工复杂系统对提高化学工业的技术水平具有重要的意义，同时值得指出的是它同样具有深远的理论影响。化工系统虽然还没有生命那样明显的层级组织和演化能力，但其丰富的时空多尺度结构中蕴涵着类似的机理。而其相对简单的系统、众多不同的实例和丰富的研究积累为复杂性研究提供了宝贵的资源。通过不同的实例研究，这两者的结合有望成为复杂性研究的一个突破口，并为其他领域的研究提供借鉴和启发，充实复杂系统研究的基础。

本书虽然不是化工方面的复杂性研究专著，但它所体现的从实例入手、由简到繁、由浅入深地认识和研究复杂系统的思想却对研究者非常有借鉴意义。

而且本书所讨论的复杂系统的一般特征及所采用的研究方法对研究者在这方面开展具体工作有很强的指导和参考价值。这是我们翻译此书的重要动机。

该书由参加国家自然科学基金重点项目“复杂化工过程的多尺度模拟与控制”(20336040)的部分成员和有关研究生共同翻译,他们分别来自中国科学院过程工程研究所和数学与系统科学研究院。其中第2章由赵辉、王军武翻译;第3章由王利民、许明翻译;第4章由黄晋、陈飞国翻译;第5章由侯超峰、周光正翻译;第6章由麻景森、张楠翻译;第7章由刘晓星、任瑛翻译;第8章由韩靖翻译;第9章由刘志新、韩靖翻译;辅文和第1章由葛蔚翻译。全书译文由葛蔚、韩靖负责修改和统稿并加译者注。中国科学院过程工程研究所李静海院士对本书的翻译给予了大力支持和非常有益的指导,在此表示衷心感谢。化学工业出版社的编辑为本译著的出版付出了巨大的努力,为我们提供了诸多指导与帮助,特此深表感谢。同时感谢赵晓力女士为我们高质量地完成了书稿中图表的扫录和公式的编辑工作。我们在国内外的多位同事和同学也为翻译工作提供了各种帮助,在此不一一列举,谨表诚挚谢意。最后感谢国家自然科学基金委对我们在相关领域研究工作的支持,使我们能顺利完成这项翻译工作。

由于译者的学术和语言水平所限,特别是专业背景的限制,加上时间仓促,文中还会有不妥之处,在此深表歉意,并希望读者多多批评指正。

译者

于中国科学院过程工程研究所

2006.3

序

两位著名科学家写的这本书从多个角度来说，都是 Springer 协同学丛书
的优秀新成员。它展示了如何通过相当简单的模型来获得对复杂系统行为的非
凡洞察，同时也反映了在这个多学科交叉领域的进展。在“协同学”发展的早
期，一种物理装置——激光器中原子自组织的协调运动是大家关注的前沿 [参
见我的《协同学入门》(Synergetics: An Introduction, Springer, 柏林, 海
德堡, 纽约, 1977)], 后来如 P. Tass 的著作《医学与生物学中的相复位》
(Phase Resetting in Medicine and Biology, Springer, 柏林, 海德堡, 纽约,
1999) 所见证的, 神经细胞的协调运动成为研究的焦点。这些书中讨论的单元
都受到噪声的干扰。现在 Mikhailov 和 Calenbuhr 的这本书中研究了原本会处
于混沌的单元间的自组织协调运动, 并介绍了 Kaneko、Mikhailov 和其他人重
要而令人惊奇的结果。我还要提到本书讨论的另一个非常有趣的问题: 生物细
胞中几千个反应间的协调相互作用。而对其他现象, 如鱼群的形成或蚂蚁的集
体行为, 也建立了模型。

以上只是本书研究的众多令人着迷的、涉及许多学科共性问题的课题中的
几个例子。我确信本书的读者, 无论是物理、化学或生物等不同领域的研究
生、教授或科学家, 不仅会享受到阅读的快乐, 也会发现这对他们各自的研究
有很大的启发。

赫尔曼·哈肯

斯图加特

2001 年 7 月

前言

本书将致力于讨论大量相互作用的主动单元间的功能性自组织。这样的系统中自组织的可能形式包括从物理坐标空间中的相干集体运动到其内在动力学的相互同步、相干运作组的形成，以至层级结构的出现和动力学网络的涌现。这些过程在生物和社会现象中扮演着重要角色。而尤其令人瞩目的是，它们在将要讨论的简单数学模型中已经有所体现。这些简单模型可以排成一个演进的序列，从刻画众多细胞和集群的未分化的集体动力学到按层级组织的许多相互作用网络的动力学，它已蕴涵了某些社会的性质。

本书的目的是初步介绍集体动力学。从物理、生物化学、生物学、社会学和经济学中选择了一系列模型，并将系统介绍它们的一般性质。本书将遵循理论物理的传统方式：尽管是要处理数学问题，但重点不在逻辑的构建和严格的证明。鉴于本书覆盖了广泛的主题并触及了众多的应用，要列出完整的参考文献是不现实的。所收录的文献和建议的进一步读物反映了作者的主观偏好。一般本书只列出了与应用和具体模型的修改相关的文献。

本书可以看作其中是作者 A. S. Mikhailov 先前由 Springer-Verlag 出版的两卷本《协同学基础》的延续。但这本书是独立的，读者无需熟悉那两本书。希望本书有益于对复杂系统理论的应用感兴趣的学生和研究者，包括从物理、化学和生物到信息和社会科学的众多领域。

写作此书是一个长期的项目。非常感谢支持我们这一努力的众多朋友和同事。作者 A. S. Mikhailov 特别要感谢马普学会 Fritz Haber 研究所物理化学部及其主任 G. Ertl 为其中的创造性工作提供优越条件。这本新书部分基于本人在柏林技术大学的教学讲义。在写作过程的不同阶段得到了德国 Thyssen and Volkswagen 基金，洪堡基金和 Peter and Traudl Engelhorn 基金的资金支持。

我们深深感谢 H. Haken 审阅本书手稿并给予宝贵的评论。一并感谢与 W. Alt, R. Beckers, H. Bersini, A. Coutinho, J. L. Deneubourg, L. Edelstein-Keshet, B. Hess, J. Huson, K. Kaneko, M. Kaufman, Y. Kuramoto,

D. MacKernan, O. E. Rössler, K. Showalter, W. Ebeling, L. Schimansky-Geier, E. Schöll, G. Sonnino, J. Stewart 和 F. J. Varela 的讨论, 并特别感谢 M. Hildebrand, M. Ipsen, S. C. Manrubia, P. Stange 和 D. H. Zanette 对本书的完成所做出的重要贡献。

A. S. Mikhailov

V. Calenbuhr

柏林, 布鲁塞尔

2001 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 生命游戏	5
2.1 可激发介质	5
2.2 变形虫集体	9
2.3 鱼群	13
2.4 昆虫社会	20
2.5 延伸阅读	27
第 3 章 主动运动	31
3.1 自运动的基本原理	31
3.2 外力场下的自运动	36
3.3 主动流体力学	40
3.4 交通流	49
3.5 延伸阅读	59
第 4 章 乘着噪声的翅膀	63
4.1 麦克斯韦妖和棘轮	63
4.2 在涨落场中航行	70
4.3 概率分布上的长拖尾	78
4.4 作为资源的噪声	85
4.5 延伸阅读	93
第 5 章 存在延迟和预期的动力学 ⁺	95
5.1 年龄维度	95
5.2 人口波动	98
5.3 市场崩溃模型	103
5.4 延伸阅读	108
第 6 章 相互同步	113
6.1 相互作用的钟	113

6.2	同步转变	117
6.3	噪声的影响	122
6.4	相干主动运动的噪声诱导崩溃	125
6.5	同步混沌	130
6.6	延伸阅读	135
第 7 章	动态团聚	139
7.1	逻辑斯蒂映射	139
7.2	Rössler 振子	147
7.3	神经网络	153
7.4	蛋白质机器	160
7.5	延伸阅读	171
第 8 章	层级组织	177
8.1	层级	177
8.2	Sherrington-Kirkpatrick 模型	182
8.3	摹本-动态玻璃系统的对称破缺	190
8.4	流体湍流	195
8.5	具有层级组织的集群	198
8.6	延伸阅读	202
第 9 章	网络动力学及演化	207
9.1	社会	207
9.2	图的性质	211
9.3	动态网络中的团聚与同步	221
9.4	图的演化	233
9.5	延伸阅读	242
参考文献		247
索引		262

第 1 章

绪 论

生命现象一直困扰着物理学家。困难并不是生物有机体及其过程的复杂（物理学处理复杂现象是家常便饭），而是它们为何与任何在无机世界中遇到的事物如此不同。在 1944 年出版的《什么是生命》（What is Life?）一书中薛定谔（Schrödinger）写道：“从我们对生命物质结构的一切了解，我们一定不难发现它在以一种不能归结为普通物理定律的方式运转。而那并不是基于存在什么“新的力”或生命有机体中单个原子的运动缺乏什么指导，而是因为它的构造与我们在物理实验室中测试过的任何东西都不同。”^[1]他进一步指出，从热力学观点来看，所有的生命系统都是开放的。一个开放系统能和经过它的能量流一起输出熵，从而维持它的秩序甚至演进到一个更有序的非平衡态。

薛定谔的分析激发了人们对开放系统深入的理论研究。图灵（Turing）^[2]、普里高津（Prigogine）^[3]和哈根（Haken）^[4]以及其他人的著作已揭示出这样的系统能自行组织并自发地形成复杂的空间或时空斑图。而这种行为不仅限于生物有机体，还见于物理和化学系统中。实际上，任何激光都是基于这样的原理操作的。像 Belousov-Zhabotinsky（B-Z）反应和表面催化反应这样的化学系统能呈现类似心肌和动物视网膜中的激发过程的丰富多彩的波纹。在半导体和带有气体放电的系统中能观察到形形色色的非平衡斑图的形成。

与此平行的理论发展是对较为简单的动力系统中复杂行为的研究。1963 年洛伦兹（Lorenz）发现了只有三个常微分方程的模型在不外加噪声时的随机动力学^[5]。同年西奈（Sinai）表明即使弹球游戏中两个球的运动也具有内在的混沌性质^[6]。对混沌非线性动力学的研究由此兴盛起来。

计算机技术的进步使得对复杂非线性现象的深入数值模拟成为可能，因而扮演了重要角色。这种进步也使人们能够对演化过程进行系统分析。圣菲（Santa Fe）的研究组由此发起了对“人工生命”的研究。

这些不同的研究方向进而融合为今天被称为“复杂系统”的跨学科理论。它已成为目前发展最快的科学领域之一。关于复杂系统的文献数量几乎呈指数率增长，并不断有新杂志创刊和各种会议的举行。对复杂系统的各方面也都出

现了一些介绍性读物^[7~20]。

本书将专注于复杂系统理论中的一类专门问题。大致来说,它们可以被描述成与“社会”生活相关的问题。或者说,本书将考虑大量相互作用的自主体的典型集体行为。讨论将基于阐述集体行为基本性质的一系列简单数学模型。本书决定以这样的方式来组织这个序列:从原始的无分化的群体开始分析,它们只能进行相干集体运动,因而以“集群”(swarm)为特征。然后讨论单元个体已具有内在动力学的模型并考虑相互同步、相干运作组(coherently operating group)的自发形成和层级组织(hierarchical organization)的出现等。最后分析动态网络的涌现和演化。本书中使用的“集群”和“社会”是指集体动力学的一般形式。所以,金融市场行为有时像集群,而动物的免疫系统可以认为是构造了一个初级的社会。

在考察社会与生物的集体动力学时,第一个问题是如何描述群体中的个体单元。不管这样的单元代表的是单个大分子、细胞器还是细胞,它们都已如此复杂以至于不可能将所有的内在复杂性结合到模型中。幸运的是,在许多情况下单元间的作用并不体现它们所有的复杂性。因此它们可以被描述为按一套有限规则做出反应并具简单的有效动力学的“自动机”。在第2章中将给出自动机描述的例子。

反应-扩散系统的突出性质是它们的单元在空间上只是局部地相互作用(或发生反应),而它们在介质中的运动基本上是被动的,即具有扩散的本质。弱水溶液中的化学反应提供了这种情形的经典实例,其中的活性分子做随机的布朗运动并只通过直接碰撞发生反应。与之相反,很多生物有机体,甚至是微小的细菌,都能够主动地在介质中移动。因此这些有机体的运动不再只是由它们受到的会导致扩散运动的外部随机力控制,而是能达到预定的目标或通过改变其速度的方向和大小对从群体中其他成员接收到的信号做出行为反应。因此空间和时间上的物理运动变成直接由形成群体的单元控制,这是基于单元间的联络。第3章考虑了一些与主动运动相关的现象。

主动运动不一定基于个体在介质中穿行的推动力的产生。非平衡系统能够对噪声进行整流,如将它转化为定向物理运动。对拥有这种性质的简单机械——棘轮的研究近来得到了很多关注。智能粒子在涨落介质中的行进提供了噪声诱导的主动运动的另一版本。将在第4章介绍的一些系统的集体动力学能够利用噪声。

活的有机体的一个本质属性是年龄。在不同年龄,动物和昆虫会繁殖、变换不同的食物和行为方式,并最终死亡。早年经历的事件也能影响以后的行为。通过把年龄作为单元内在的一个独立坐标,本书将在第5章表明这种群体的集体动力学与集群的相干运动类似。但是,这种动力学发生在群体的内在的

“人口统计学”空间，而不是物理坐标空间。

除了年龄，生物有机体还有其他表述其内在状态的变量。有些形式的行为是非常简单的，可以被描述为沿某种内在坐标的运动。例如，萤火虫的行为是周期性地发光。具有周期性个体行为的主动自主体可以被模拟为周期振子。这些自主体间的相互作用和联络会导致整个群体的同步集体行为的涌现。第6章将讨论集体动力学的相互同步。

一类更精致的相干集体动力学中包括了单元（元素）的同步运作组（或聚类）的形成。第7章中考虑的动态团聚在具有混沌的个体动力学的单元群体中是典型的。它已经可以被看作初始未分化的群体中功能结构的自发形成。

从集群到社会方向上的下一步是层级组织的出现，这在第8章中讨论。特别是，本书将表明动态团聚形成的相干运作组往往具有层级秩序，因此这样的系统可以被看作一种“玻璃”。而且，本书将给出役使和一套结构间有效作用层级形成的实例。

社会的主导结构是个体和它们的相干运作组形成的网络。这些动态网络形成、演化和相互作用。通过各种动态网络的形成，社会能够自我组织以执行一些必需的功能。它还能通过对网络结构的适当调整来应对环境的变化。第9章采用简单的数学模型阐述了这种行为。

第 2 章

生命游戏

生命是如此的复杂多变以至于单纯用数学模型来描述它有时被认为是不可可能的。但是仍然有许多成功的描述生物及社会系统的模型。这些模型共同的特点是它们将一个单独的有机体、细胞或动物处理成是一个“自动机”。自动机本质上就是一个“黑箱”，它接收信息并根据固定的规则产生输出。因此自动机可以通过确定一系列映射规则来描述，这些规则说明输入信号的各种组合应当产生哪种相应的输出。

从数学上看，这些自动机一般是离散的。但也可以考虑有渐变的输入和输出信号以及描述连续时间演化的自动机，甚至还有描述随机动力学的自动机。

构建了模拟生物有机体中个体行为的自动机后，就可以建立一个由许多这类自动机构成的群。群的成员间通过产生、发送和接收信号进行联络。在本章中将对几个有代表性的例子进行建模和讨论。第一个例子是关于可激发介质的，比如心肌组织，它的细胞之间通过电信号进行联络。采用 Wiener 和 Rosenblueth 的方法，可以看到具有简单作用规则的可激发自动机如何产生复杂的旋转螺旋波。在后一节中将着重讨论群居的变形虫“阿米巴”（amoebae）——盘基网柄菌 *Dictyostelium discoideum*。单个变形虫具有与可激发细胞类似的性质，虽然它们之间是通过发送化学信号进行联络的。而新的重要性质是，它们还可以根据所接收到的化学信号在介质中做相应的缓慢移动。然后还要考虑复现鱼群集体运动的自动机模型。最后一节将讨论用自动机群模拟的蚂蚁社会。

2.1 可激发介质

人们对激发波的研究已经有很久的历史了。1876 年 Romanes 在对水母的研究中就已经发现：它们的伞盖组织可以对外界刺激做出反应并且可以传递收缩波^[21]。在此研究的基础上，1908 年 Mayer 从水母的伞盖上切下了一个完整的环圈，发现通过适当的刺激，他可以诱导出能沿这个环圈传播数小时甚至数

天的收缩波^[22]。后来人们很快意识到，心肌也具有类似的应激性。Mines 和 Garey 在 1913 年和 1914 年分别在鱼外耳组织的切环^[23]和大海龟心室组织的切环^[25]上发现了持续传递的收缩波。在有了心电活动的记录手段之后，由电波引起的局部肌肉收缩得到了进一步的观察。

Lewis^[24]在 1925 年详细描述了心脏中的激发波。在正常的生理状况下，组成窦房结的一组细胞大约每秒钟产生一次激发波。这种同心波在心脏中的散播保证了它的正常跳动。对心脏激发波的传播速度的测量发现它们基本上是不变的。同时发现组织单元在受到激发后会在一段时间内拒绝响应电刺激（被称作不应期）。另外还观察到：在某些病理状态下，这种具有正常传播方式的波会被在心脏内快速循环的波代替。

尽管实验取得了成功，那时还没有适当的理论模型来描述这类可激发物质。而单个心肌细胞的激发周期中隐藏的电化学机理也是在很久以后才认识到的。到 1946 年，终于建立了一种数学理论来解释所观察到的激发波的主要性质，并可用来描述激发波的循环和旋转螺线波的生成。这个模型是由数学家 Norbert Wiener 和心脏病专家 Arthuro Rosenblueth 共同提出的。

Wiener 的想法很简单：虽然人们不知道单个细胞的详细机理，但仍然可以将它们看作自动机。可激发的生物介质，如心脏组织可以被描述成由这类理想的可激发单元组成的网络。每个单元必然处于下面三种状态之一：平静、激发和恢复（不应期）。处于平静状态的单元在外界扰动的作用下转变成激发状态，然后这个单元保持激发状态，在经过一段较短的时间后转变成恢复状态，并在恢复状态中保持一段固定的时间。在恢复状态中的单元对外界扰动没有任何响应，只有当恢复期结束后单元重新转变为平静状态时才能再次被激发。图 2.1 示意了单个单元的激发周期。

一个处于激发状态的单元会激发周围所有处于静止状态的单元。因此在一系列这样的单元上施加一个局部的扰动可以产生激发波的传播。尽管系统是由许多彼此独立的单元构成，Wiener 和 Rosenblueth 还是将它们作为连续的介质来处理。在连续介质的假设下，激发波的传播表现为移动的激发区域构成的

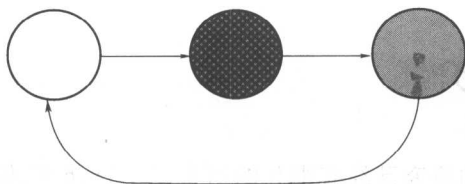
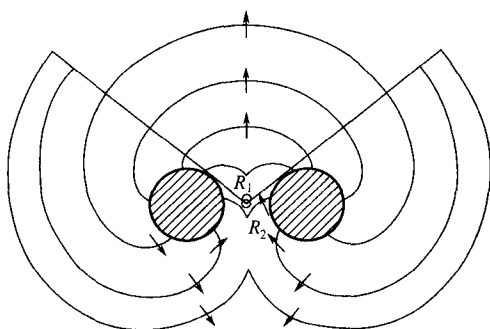


图 2.1 一个可激发单元的示意

一个超过临界值的扰动的到来激发该单元从平静态（白色）转入激发态（深灰色）。此后单元进入不应期状态（浅灰色），然后再回到平静态

图 2.2 两个相对旋转的螺旋波^[26]

波前和紧随其后的不应区。确定激发区波前曲线的每个微小单元都沿其法向以固定的速度随时间移动。波前沿着介质的边界传播并与之垂直。

可激发介质中还可能存在障碍物，例如在介质中切一个孔或者生成一块不能激发到的区域^①。Wiener 和 Rosenblueth 考虑了不同形状的障碍物周围激发波的传播情况。在他们的理论中，激发波不能脱离障碍物的边界，因此激发波必须沿着障碍物的边界以螺线状传播。图 2.2 描绘了在两个相同尺寸的小孔周围沿相反方向旋转的两组螺线波^[26]。图中只显示了激发波前的情形。

在数值模拟中，Wiener-Rosenblueth 模型可以被表示成局部相连的自动机（或称元胞自动机）的一个阵列。下面，来看一下 Zykov 和 Mikhailov^[27] 在 1986 年提出的元胞自动机模型^[28]。考虑有这样一个二维方形网络，网格节点由可激发单元构成。每一个节点可以用它的 (i, j) 坐标表示 $(i, j = 1, 2, 3, \dots, N)$ 。在某一离散的時刻 n 时，节点状态可以用变量 ϕ_{ij}^n 和 s_{ij}^n 来表示。其中第一个变量 ϕ 代表一个可激发单元的几种离散的状态（即“相”）。 $\phi = 0$ 代表单元处于平静态， $0 < \phi < \tau_e$ 代表此单元处于激发态（ τ_e 是激发态持续的时间），而 $\tau_e < \phi < \tau_e + \tau_r$ 代表此单元处于恢复期（或不应期， τ_r 是恢复期持续的时间）。另一个变量 s 代表此单元从周围单元接受的信号累积量。当这个量超过某一阈值 h 之后，单元从平静态转变成激发态。

对于某一确定的单元 (i, j) ，它所受到的外界信号的输入可以由周围相邻单元输出信号的和得到。假设所有处于激发状态的单元都会输出一定的信号。为了考虑时域上信号的累积，可认为后一个时间步上外界信号的输入中应加上前一个时间步上的输入乘上一个小于 1 的系数 g [式 (2.1)]。即

$$s_{ij}^{n+1} = gs_{ij}^n + \sum_{k,l} C(i-k, j-l) \theta_{kl}^n \quad (2.1)$$

① 心肌中激发波传播的障碍物主要是贯穿在心肌中的血管和由心肌梗塞形成的死去的小块心肌组织。