



EMERGENCE

# 涌现

从混沌到有序

[美] 约翰·霍兰 著  
陈禹等 译  
方美琪 校

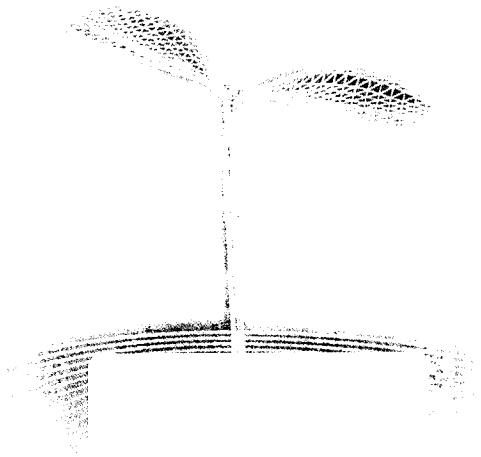
1.1

上海科学技术出版社

# 涌现

## ——从混沌到有序

[美] 约翰·霍兰 著  
陈禹等 译  
方美琪 校



上海科学技术出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

涌现：从混沌到有序 / (美) 霍兰著；陈禹等译，方美琪校。—上海：上海科学技术出版社，2001.11

(View-新视角™书系)

ISBN 7-5323-5924-7

I. 涌... II. ①霍...②陈...③方... III. 复杂性  
理论—普及读物 IV. TP301.5-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 057387 号

## ***EMERGENCE—FROM CHAOS TO ORDER***

Copyright © 1998 by John Holland

Published by arrangement with Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

In association with Brockman, Inc.

ALL RIGHTS RESERVED.

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路 450 号 邮政编码 200020)

常熟市第六印刷厂印刷

新华书店上海发行所经销

开本 850×1156 1/32 印张 9.625 字数 215 千字

2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—3000

定价：20.00 元

---

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题，  
请向本社出版科联系调换

# 序言

光阴荏苒，自从我为一般读者写的第一本书《隐秩序》（编者注：英文版）出版以来，已经过去两年了。在这段时间，我认识到写一本让普通读者能看懂的书比写一本科学专著要艰难得多。科学专著写作的核心问题在于简洁地描述从假设到结论的逻辑过程，并没有必要进行大量的详细描述；而且只要有可能，著者一般都会使用规范化的简写。相反，一本为对科学有兴趣的普通读者写的书则不应该有很多假设，过度的简洁反而会成为读者理解的障碍。所以，在撰写科学专著时曾经人为回避不用的许多方法，如隐喻、举例和其他辅助表达思想的手段，在这里都可以用来进行写作。

就我自己而言，若要在研究问题和把它写出来两者之间选择，我宁愿去做前者。在撰写《隐秩序》时，我并没有想到会这么快地再次进入这个困难重重的领域。使我产生这种想法的原因是：那些导致我着手撰写《隐秩序》的因素，很多是“一次性”的，带有很大的偶然性。然而，在完成那本书的过程中发生了许多事情，使得情况又发生了变化。

在写作的前期，我观察了很多系统和模型。在它们中间，都会从简单的元素中涌现出复杂的现象。由此导致了对这些复杂现象产生根源的讨论，即这些复

杂性的出现是不是由于数学的“不合理的应用”造成的呢？在这里我并不是怀疑数学的有用性，因为这对于应用是否“合理”而言是另外一回事。这个难题的根源在于理解数学的这样一种观点，即现在很多数学家往往强调数学是从对物理世界的思考中分离出来的一门独立学科。这个观点主要形成于 20 世纪。从这样的观点出发，数学能够提供一种如此简洁有效的对物理世界的描述，看起来就真有点奇怪了。显然，这种观点忽略了数学的来源。这些相互交织的问题使我感到困惑：究竟通过什么途径，才能为进行内涵丰富的描述和准确的预测提供简洁的表达呢？

当我意识到这些问题可以不用一大堆规范化的工具去讨论时，撰写这样一本书的冲动就油然而生。当向一个普通听众解释遇到的问题以及面临的困难时，必须扩展讨论的领域和视野。如果局限于利用某种特定的规范性工具，这些丰富多彩的感受就很容易被忽视。就这样，我又一次进入了这个具有挑战性的领域，尽管有时它并不像基础研究工作那么富有新的启迪。这一工作的成果就是摆在你面前的这本书。我对自己所付出的努力并不后悔，不过对自己最终能够完成这项工作不免还是觉得有些吃惊。

《涌现》是一本比《隐秩序》更个性化的书，这并不是因为这本书很少援引别人的观点，而是因为它确实花费了我更多的时间来认真研究这些观点。我是以科学方法为导引，特别是在跨学科的科学方法的导引之下，来表达自己的观点。我并不认为这些观点是反传统的——很多有跨学科倾向的科学家都会同意这

些观点。不过，这些观点都是用我自己的术语表达出来的。此外，我还叙述了一些自己的个人经历，它们使得这本书更加个性化。

与《隐秩序》的情况相同，密歇根大学的BACH小组\*审阅了本书的绝大多数观点。而且，和盖尔曼(Murray Gell-Mann)的谈话使我始终关注着更为广泛的课题。圣菲研究所(Santa Fe Institute, SFI)依然是一个令人激动的地方，它为我提供的机会和讨论是我在其他地方都未曾遇到过的。科学发展得如此之快，正在把范围广阔的关于复杂性的新观点和新理论整合到更大的科学框架中。

每一个读过富尔顿(Alice Fulton)的诗歌或散文的人都会看到她对我的强烈影响，这种影响体现在我对诗歌和科学之间关系的理解方面。特别的，有关诗歌的一章很大程度上依赖于这些年来和富尔顿的谈话，虽然她对表述中的某些部分可能有所保留。

丹内特(Daniel Dennett)很早就提醒过我研究还原论的问题将会很棘手，我始终十分认真地对待这些警告。他还是我和布罗克曼(John Brockman，代理商)之间的牵线人。

在我要结束表达谢意之前，还要补充两方面的感谢，感谢那些为这本书的出版付出了巨大努力的人们。一类感谢是简单和直接的，另一类是复杂的，恰好适合这本书的主题——复杂性。

第一种感谢，即简单的那种类型，包括对惠勒(Vivian Wheeler)的。作为一名文字编辑，她的业务水平很高。她为这本书的出版付出了巨大的努力，把

那些冗长的段落改写成了简洁明快的、吸引人的散文诗。

另一类感谢则比较复杂: 如果在我的弗雷德赫城堡旁没有密歇根湖宁静的、长长的地平线和瞬息变幻的景色, 我想这本书是不可能和读者见面的。玛丽雅·霍兰 (Maurita Holland) 是使弗雷德赫存在的一个重要因素, 她给我的生活带来了许多其他的快乐, 也为本书的出版付出了很多心血。她多次阅读了本书不同阶段的草稿。我不知道她是如何能够保持鲜明的观点和无穷的能力, 为我提出明晰化的建议。不过, 她确实是使我试图将科学呈现在更多读者面前的一个巨大动力。我很庆幸能有这样一个永远的伴侣!

约翰·霍兰

1997年7月于弗雷德赫

---

\*BACH小组: 包括伯克斯 (Art Burks)、阿克塞尔罗德 (Bob Axelrod) 和科恩 (Michael Cohen)。该小组是由西蒙 (Carl Simon) 和摩洛 (Rick Riolo) 发起的。

# 目 录

序言	
第一章 启程之前	1
走向何方	4
模型	12
研究道路上的困难	15
取得的进展	16
第二章 游戏与数字	19
西洋跳棋和神经网络	23
模型中的秘密	25
棋类游戏及规则	27
数字	28
积木块	29
计算机模型	31
第三章 地图、对策论和计算机建模	33
博弈和对策论	39
涌现——初露端倪	49
动态模型	52
计算机模型——进一步的研究	56
第四章 西洋跳棋	61
困难何在	63
塞缪尔是如何做的	65
对走法的估价	68
由估价到策略	71
学习的过程	71
使学习过程运转起来	73



需要注意的问题	75
权重改变引起的涌现结果	77
小结	84
<b>第五章 神经网络</b>	91
神经元的特征	94
为神经元建模	97
固定阈值的神经网络	99
区别与局限	102
有关神经元的更多特征	103
带环路的网络	107
无限期的记忆	108
三角形的识别——一个例子	112
综合	120
对比	122
继续前进	124
<b>第六章 普适理论</b>	125
基于主体的模型	128
计算机的参与	129
涌现和非线性	132
普适理论的基本要求	133
<b>第七章 受限生成过程</b>	137
机制	142
相互作用和连接	144
元胞自动机	147
<b>第八章 西洋跳棋程序和其他受限生成过程模型</b>	155
塞缪尔的西洋跳棋程序	158
中枢神经系统模型	167
复制猫	169

<b>第九章 变易</b> .....	173
具有可变结构的受限生成过程模型.....	175
示例.....	187
遗传算法和可变结构的受限生成过程模型.....	195
关于涌现的进一步理解.....	198
<b>第十章 层次描述和还原方法</b> .....	203
层次.....	206
如何组装元胞自动机.....	210
<b>第十一章 隐喻和创新</b> .....	219
科学中的创新和创造.....	222
对隐喻的初步探讨.....	226
隐喻和模型的关系.....	228
创新的培育.....	229
小结.....	236
诗歌和物理学.....	238
<b>第十二章 结束语</b> .....	241
作为总结的“结束语”.....	242
作为继续研究起点的“结束语”.....	252
综合.....	256
关于涌现的进一步研究.....	258
涌现的目标.....	261
涌现研究的远期目标.....	267
<b>参考文献</b> .....	271
<b>索引</b> .....	275
<b>译校者后记</b> .....	289

第一章

# 启程之前



当杰克把一粒种子种到地里时，一棵美丽的蔓藤葡出现了，慢慢地它变为一棵成熟的巨大的葡萄树。在孩提时代，我们往往觉得杰克奇妙的豆苗和日常其他类似的事物，如秋天的落叶、发芽的种子都是不可思议的。长大以后，这些有关种子的奇妙现象仍然令我们着迷。一些小而结实的种子竟能够长成巨大的红杉、日常的雏菊和豆苗这样复杂和独具特色的结构！这些正是涌现现象的体现：复杂的事物是从小而简单的事物中发展而来的。现在我们已经知道，是种子中的基因使生化作用按照某种规则一步步地展开，从而决定了有机体的成长和发育。但是，对于这个复杂的过程，我们目前仅仅弄清楚了其中的一些片段。实际上，只有完全弄清楚基因是通过怎样的一系列相互作用，使得一粒种子或一个受精卵逐步发育成一个成熟的有机体，我们才能算真正了解基因和染色体。总之，我们只有弄清楚涌现现象，才会真正弄清楚生命和有机体本身。

当我们研究其他与上述生物发育似乎毫不相关的领域，例如棋类游戏时，会发现类似的涌现现象，它以另外一种形式展现在我们面前。当一系列规则确定之后，就会形成一种非常复杂的游戏。国际象棋就是由简单的二十几条规则限定的，然而，经过了几百年精心研究之后，人类至今还是能够不断地在游戏中发现新的走法。就像小小的种子成长为各式各样复杂的



生物体一样,为数不多的一组游戏规则会衍生出极其复杂的棋局。

在其他不同的领域中也有类似的情况,如牛顿万有引力定律或者麦克斯韦描述电磁现象的方程,它们与游戏的定义有着许多共同之处。牛顿定律与麦克斯韦方程相当于游戏的“规则”,由这些规则限定的“运动”能够利用数学工具推导出来。在观察这些运动的过程中,我们又能发现新的方程;利用新发现的方程,再加上各种数学方法,就能预测出事物发展变化的趋势。这就像在游戏中,我们可以揭示由创始者允许的所有可能的结果。牛顿不会想到他的定律将会导致“引力助推器”的发明,从而使人类可以借助其他行星的引力将空间探测器抛到其他外层行星的轨道上;麦克斯韦也不会预料到,他的方程会帮助人们研制出精巧的电子控制系统,而这种控制系统是制造现代电子设备绝对必要的条件。就像杰克的豆苗一样,这些方程揭示了无数的奇迹。实际上,我们对整个物质世界的理解,大部分都是从少数基本的方程出发的,而这些方程的核心则是以牛顿和麦克斯韦理论为基础。

涌现的本质就是由小生大,由简入繁。这种特征也使得涌现变成一种神秘的、似乎似是而非的现象。这种现象往往带有“暴发致富”的味道。然而,涌现确实是我们周围世界普遍存在的一种现象。日常的一些活动,如耕种,就依赖于涌现的一些基本经验——比如,必须知道影响种子发芽的各种条件。同时,人们的创造性活动,从对企业和政府进行改革到创建新的科学理论,所有这一切也都涉及到受控制的涌现现象。

在生活中的每一个地方,我们都面临着复杂适应系统中的涌现现象——蚁群、神经网络系统、人体免疫系统、因特网和全球经济系统等。在这些复杂系统中,整体的行为要比其各个



部分的行为复杂得多。在对这些复杂系统中涌现属性的理解方面,至今存在着许多深奥的待解决的问题,这些问题与人类的生存状况密切相关:整个生物系统是如何按照物理、化学的规律涌现出来的?我们是否能将人类的意识解释为某些物理系统的一种涌现属性?只有弄清楚涌现现象的普遍原理,我们才会真正弄清楚对这些问题给出的种种解答是否全面。本书的中心思想,就是要提供具有充分说服力的证据,以便证明,对于这方面进行的科学研究将大大加深我们对涌现现象的了解。

## 走向何方

尽管涌现是普遍存在的现象,而且相当重要,但它至今仍是一个奇妙的令人难以理解的问题,人们对它更多的还是感到好奇,而没有进行过细致的分析。我们目前所了解的关于涌现的知识,主要是通过一些例子得来的。在许多领域我们常常只是凭借以往的经验行事。例如,为了使种子发芽就要将它放入潮湿的土壤里。当然,我们今天对涌现的理解,要比孩子们利用霜精去理解秋天神奇的色彩要好一些。孩子们的解释激发了我们的想象,但其结果从根本上说往往是不能令人信服的。当然,我们的本能是寻找一种更深层的解释,这种解释可能会深入到复杂的生物分子的相互作用中去,这种相互作用将能够引起秋天所发生的种种变化,这也正是分子生物学家深思的问题。这种更深层次的解释,一旦被人们掌握,无疑会不可避免地大大推动人们的想象。但是,问题在于,需要研究的仅仅就是解释这些问题的具体机制吗?

像涌现这么复杂的问题,不可能只是服从一种简单的定义,我也无法提供这样的定义。但是,为研究这一问题,我可以提供一些标识,用来划出特定领域,以便进行相应的研究。



首先,我将把我们的研究领域限制在那些在规则和规律方面富有启发的系统。这方面主要的例子包括游戏、人们已充分理解其组成的物质系统(如由原子组成的分子)和用科学理论(如牛顿万有引力定律)定义的概念系统。当然,涌现现象也会在那些至今几乎还没有什么规律可循的领域中发生,如道德伦理系统、民族进化、思维中的概念扩展。我们在书中讨论的大部分观点都是与这样的系统相关联的,但精确地把这些观点应用于这些系统,则还需要对存在于这些系统中控制涌现发展的规律作进一步的研究。

当然,“涌现”这个概念还可能科学有效地应用于其他方面。但是在上述这一由规则制约的领域中,它就已经复杂得足以花费我们几乎全部的时间去研究了。本书将一遍又一遍地反复证明,少数规则和规律就能产生令人惊讶的、错综复杂的系统。这种复杂性不仅来源于系统随机模式本身,而且也与从局部到整体的过渡密切相关。就像在一幅点彩派画家的作品里那样,除了这些点本身之外,还可以从中看出特定的模式,它们确实是存在的。此外,这些系统是变化的,即动态的。它们隔一段时间就会改变,尽管规律本身不会改变,然而规律所决定的事物却会变化。在棋类游戏中不断变化的每一个棋局,或者在牛顿万有引力定律支配下不断变化其运行轨迹的棒球、行星和银河系,都说明了这一点。处处都显示着:少数规则和规律生成了复杂的系统,而且以不断变化的形式引起永恒的新奇和新的涌现现象。实际上,只有我们弄清楚了系统中涌现现象的规律,才会真正了解这些复杂系统。

在研究涌现现象的过程中,可识别的特征和模式是关键的部分。除非一种现象是可以识别的并且重复发生,否则我是不会称这种现象为涌现现象的;在这种情况下,我通常说这种现



象是有规律的。一种现象是有规律的，并不意味着它容易认识和解释。即使某种现象的基础规律及其动态变化都弄得很清楚了，认识和解释这种现象还可能会是很困难的。在国际象棋中，人们为了了解对弈中的某些定势整整研究了好几个世纪。例如，如何有效地排列“兵”。一旦找到了某些定势，这些定势就会帮助对弈者大大提高获胜的可能性。类似的，为了获取由牛顿万有引力定律发展出来的动态变化模式，我们已经花费了几个世纪的时间去研究，如在探索行星时使用的引力助推器，直到现在我们仍然还在研究。

弄清楚控制系统的演化规律及它们之间的相互关系，将使我们更有希望理解复杂系统中的涌现现象。其中关键的一步就是要从偶发的、不相干的细节中找出基本规律。例如，我们可以通过桌球碰撞的理想化形式，来洞察大气中分子碰撞的运动规律。通过这些相互碰撞的分子，得出一些可测量的变化规律，如大气的温度和压力等(关于这方面的问题还将在第九章中详细介绍)。或者，我们也可以用一种数学方法描述博弈，以研究政治谈判中存在的复杂性。我们称这个过程为建模。

尽管人们常常认为建立模型在创立科学理论中的地位并不是决定性的，然而我的观点恰恰相反。每当一位科学家建立一整套描述世界的方程时，如牛顿和麦克斯韦方程，总是要构建一个模型。每个模型都会集中描述世界的某一个被限定的方面，而将其他方面看成是偶然发生的。如果设想的模型很恰当，它将对可能出现的情况作出预报或设计相应的对策，并且揭示新的可能性。正因为在对复杂系统的研究中建模起到了非常重要的作用，在下一部分我们将讲述有关建模的知识。在第二章中，我们将通过仔细研究那些历史上由我们祖先构建的游戏和地图模型，更加详细地讨论科学的建模方法。在第三章中，





我们将通过更加仔细地观察可由计算机实现的游戏和复杂系统的模型，进一步对动态过程进行研究。读者将会看到，在阅读本书的过程中，建模将是一再出现的主题。

虽然组成系统的元素及其属性往往是简单的，但是由于它们具备适应和学习的能力，由它们引起的各种各样涌现现象却是综合的，从而使组合变得十分复杂。在第四章中，我们将研究一个具有自学习功能的西洋跳棋程序。尽管从涌现问题成为热点以来又有许多关于这方面的工作，但这个程序是如此的引人入胜，它一直使许多后来的工作相形见绌。这个程序通过学习居然战胜了它的设计者！很显然这是一个产出大于投入的案例。它通过自身组成元素所发生的一些小的由经验积累而引起的变化来实现这一功能，而且它最终会将其能力扩展到一场锦标赛级别的水平。这个程序完全可以还原成决定它的规则（指令）本身，因此它没有什么需要隐藏的；然而这个程序产生的行为并不是简单地通过观察那些规则就可以预测到的。

无法预料、出其不意，这是涌现的一个重要方面，这看来是很具诱惑力的。意外通常是与一个基于规则的系统所显示出的一些异常行为相联系的，它常常起到一种心理上的引导作用，将人们的注意力引到涌现现象上去。然而，我并不认为出其不意是支撑这一领域研究的一个重要因素。总之，我认为涌现不是一种类似“旁观者的眼睛”的现象，人们一经弄清那种现象就会走开。

如果把涌现行为的产生者看成是主体的话，我们就能够更好地理解是什么超越了旁观者的眼睛而存在着。对于基于主体的涌现的经典描述是1979年霍夫施塔特（Douglas Hofstadter）提出的，他将蚁群作为这种涌现的隐喻。不管这些独立的主体——蚂蚁的能力多么有限，整个蚁群在探索和开拓其周围环境