

第一推动丛书
综合系列

「珍藏本」

10

COMPLEXITY AND ORDER

亚马逊年度十佳科学图书
菲贝卡 (Phi Beta Kappa) 科学图书

复杂

[美] 梅拉妮·米歇尔 / 著

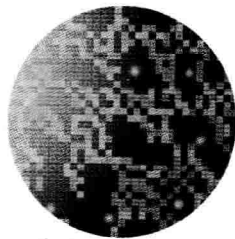
Melanie Mitchell

波特兰州立大学 (Portland State University) 计算机科学教授,
圣塔菲研究所 (Santa Fe Institute) 客座教授。

唐璐 / 译

 第一推动

CS | 湖南科学技术出版社



Complexity: A Guided Tour

复杂

[美]梅拉妮·米歇尔 / 著 唐璐 / 译



第一推动
FIRST PUSHER

CS

湖南科学技术出版社

总 序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难地进步，这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能



的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年以来，无数仁人智士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知做了艰苦卓绝的奋斗。中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力、科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越

文化的地域的差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步做一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动丛书》编委会

献给侯世达和霍兰德

前 言

还原论是^①对这个世界最自然的理解方式。它是说“如果你理解了整体的各个部分，以及把这些部分‘整合’起来的机制，你就能够理解这个整体”。只要是精神正常的人就不会反对还原论。

——侯世达 (Douglas Hofstadter),
《哥德尔、艾舍尔、巴赫——集异璧之大成》

从17世纪以来，还原论就一直在科学中占据着主导地位。还原论最早的倡议者之一笛卡儿这样描述他的科学方法：“将面临的所有问题尽可能地细分，^② 细至能用最佳的方式将其解决为止”，并且“以特定的顺序引导我的思维，从最简单和最容易理

^① “还原论是”：Hofstadter, D. R., *Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid*. New York: Basic Books, 1979, p. 312。

^② “将面临的所有问题尽可能地细分”：Descartes, R., *A Discourse on the Method*. Ian Maclean 英文翻译。Oxford: Oxford University Press, 1637/2006, p. 17。



解的对象开始，一步一步逐渐上升，直至最复杂的知识”。

从笛卡儿、牛顿等现代科学奠基者的时代，直到 20 世纪初，科学的主要目标都是用基础物理学来对一切现象进行还原论式的解释。19 世纪末许多科学家都赞同物理学家迈克耳孙 1894 年说的一句名言：“大部分大的基本原理似乎^①已经被明确建立起来了，今后的进展主要是将这些原理严格应用到值得我们注意的一些现象中去。”

此后的 30 年里，物理学又有了相对论和量子力学这样革命性发现。但 20 世纪的科学也见证了还原论梦想的破灭。虽然基础物理学和还原论对于解释极大和极小的事物取得了伟大的成就，但在对于接近人类尺度的复杂现象的解释上，它们却保持惊人的沉默。

还原论的计划在许多现象面前都止步不前：天气和气候似乎无法还原的不可预测性；生物以及威胁它们的疾病的复杂性和适应性；社会的经济、政治和文化行为；现代技术与通讯网络的发展和影响；智能的本质以及用计算机实现智能的可能前景。对复杂行为如何从简单个体的大规模组合中出现进行解释时，混沌、系统生物学、进化经济学和网络理论等新学科胜过了还原论，反还原论者的口号——“整体大于部分之和”——也随之变得越来越有影响力。

20 世纪中叶，许多科学家意识到，这类现象无法被归入单个学科，而需要在新的科学基础之上从交叉学科的角度进行理解。

^① “大部分大的基本原理似乎”：引自 Horgan, J., *The End of Science: Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1996, p. 19.

一些人开始尝试建立新的基础，这其中包括控制论、协同学、系统科学，以及最近才出现的——复杂系统科学。

1984年，来自不同学科的24位科学家和数学家在新墨西哥州圣塔菲的高原沙漠会聚一堂，讨论“科学中涌现的综合”。^①他们的目标是筹划建立一家新的研究机构，“致力于研究各种高度复杂和相互作用的系统，^②这些系统只有在交叉学科的背景下才能研究清楚”并“推动知识的统一和共担责任的意识，与目前盛行的知识界的各自为政作斗争”。就这样，圣塔菲研究所作为复杂系统的研究中心被建立起来了。

1984年我还没有听说过“复杂系统”一词，虽然头脑中已经有了类似的想法。我当时是密歇根大学计算机系的一年级研究生，研究方向是人工智能，也就是让计算机像人一样思维。事实上，我的一个目标就是理解人类如何思维——万亿个微小的脑细胞以及它们的电和化学通讯如何涌现出抽象思维、情感、创造性，甚至意识。我曾深深迷恋于物理学和还原论的目标，后来才领悟到，目前的物理学对于智能可以做的很少，即便是专门研究大脑细胞的神经科学，也无法理解思维如何从大脑活动中涌现出来。很显然还原论者对认知的研究是误入歧途——我们根本无法在单个神经元和突触的层面上理解认知。

因此，虽然我以前没有听说过复杂系统研究，它却很快引起了我的强烈共鸣。同时我也感到，我自己的研究领域——计算机

① “科学中涌现的综合”：会议文集已结集出版：Pines, D., *Emerging Syntheses in Science*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1988。

② “致力于研究各种高度复杂和相互作用的系统”；“推动知识的统一”：G. Cowan, *Plans for the future*. 收录于 Pines, D., *Emerging Syntheses in Science*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1988, pp. 235, 237。



科学——在这里可以大有作为。受研究计算的先驱们影响，我觉得计算的思想要比操作系统、编程语言、数据库之类的东西深刻得多，计算的本质与生命和智能的内在本质有密切的关联。我很幸运，在密歇根大学，“自然系统中的计算”是系里的核心课程，与软件工程和编译器设计一样。

1989年，我攻读研究生的最后一年，我的博士导师侯世达受邀参加在新墨西哥州洛斯阿拉莫斯举行的主题为“涌现计算”的研讨会。^①他太忙了抽不出时间，因此就让我替他去。在这样高水平的会议上报告自己的工作让我既兴奋又害怕。就是在这次会议上，我第一次遇见了一大群和我抱有同样想法的人。我发现他们不仅为这样的想法取了一个名字——复杂系统——而且他们在圣塔菲附近的研究所正是我想去的地方。我决定在这里争取一个职位。

一直坚持，再加上运气，我终于获得了圣塔菲研究所（Santa Fe Institute）的邀请，在那里访问一个夏天。一个夏天又延长为一年，后来又延长了一年。最终我成为研究所的常驻研究人员。来自不同国家和学科的人们聚集在这里，一起从不同的角度来探索同样的问题。我们如何超越还原论的传统范式，对似乎无法还原的复杂系统形成新的理解？

这本书源自我为圣塔菲的乌拉姆纪念讲座（Ulam Memorial Lecture）作的演讲——这个讲座为普通听众举办，是关于复杂系统的年度系列讲座，以纪念伟大的数学家乌拉姆。我的系列演讲的题目是“复杂性科学的过去和未来”。要为非专业听众讲清楚

^① “主题为‘涌现计算’的研讨会”：会议文集已结集出版：Forrest, S., *Emergent Computation*. Cambridge, MA: MIT Press, 1991。

领域广泛的复杂性研究，让他们理解研究的现状和广阔的前景，这极具挑战性。我的角色很像是在一个幅员辽阔、文化多样的异国的导游。我们只有很短的时间来了解历史背景，参观著名景点，并感受这里的风土人情，必要时还要进行翻译以便于理解。

这本书就是由这些讲座扩充而成——就像观光指南。书中讲述的是让我也让研究复杂系统的其他人曾经或正在着迷的问题：自然界中我们认为复杂和具有适应性的系统——大脑、昆虫群落、免疫系统、细胞、全球经济、生物进化——如何通过简单规则产生出复杂和适应性的行为？相互依赖而又自私的生物是如何一起协作，以解决影响它们整体生存的问题？这些现象存在普遍规律吗？生命、智能和适应性能用机械和计算实现吗？如果能，我们又能不能建造出真正具有生命和智能的机器？如果能做到，我们又应不应该这样做呢？

我听说随着学科间的界线变得模糊，科学术语的意义也会变得模糊。研究复杂系统的人们谈论各种模糊的概念，例如自发秩序、自组织、涌现（包括“复杂性”本身）。这本书的一个主要目的就是为这些人所谈论的提供一幅清晰的图景，并探讨这些交叉学科概念和方法是否能产生出实用的科学和新的思想，以解决人类面临的各种难题，例如疾病的传播、世界自然和经济资源分配的不公平、武器扩散和冲突的增多，以及人类社会对环境和气候的影响。

这本书就像一本复杂性科学的核心思想的观光指南——它们从何而来，又将到哪里去——再加上我自己的一些见解。对于正在发展中的科学领域，其核心思想、意义以及可能导致的后果，人们的认识会（略）有不同。因此我的观点与其他专家也许会不一样。本书中一个重要的部分就是阐释这些差别，另外我也将尽



我所能介绍一下那些未知的或刚刚开始被理解的领域。正是这些使得科学引人入胜，值得去探索 and 了解。我希望能让读者也感受到这些思想的迷人魅力和探索它们的过程中那种无可比拟的兴奋感觉。

本书分为五部分。在第一部分我将介绍四个主题的历史和内容，这四个主题是复杂系统研究的基础：信息、计算、动力学和混沌、进化。在第二到第四部分我将阐述这四个主题如何在复杂性科学中被组织到一起。我将描述如何在计算机中模拟生命和进化，以及计算的概念反过来又如何被用来解释自然系统的行为。我还会介绍网络科学的发展，以及网络科学发现的社会群体、互联网、传染病和生物代谢等各种系统中存在的深刻共性。另外我还会用各种例子说明如何测量自然界中的复杂性，它又如何改变我们对生命系统的认识，以及这些新的认识能不能引导智能机器的设计。我会介绍复杂系统的各种计算机模型，以及这些模型所面临的风险。最后，书的末尾还将讨论寻找复杂性科学一般性原则的问题。

要理解书中内容无需数学或科学的背景知识，在涉及的时候我会小心地循序渐进。我希望这本书对专家和非专业读者都会有价值。虽然讨论不是技术性的，我还是会尽力做到言而有物。注释中给出了引文的出处和讨论的附加内容，以及为想深入学习的读者准备的科学文献索引。

你对复杂性科学感到好奇吗？想不想探索一番呢？让我们出发吧。

致 谢

受圣塔菲研究所（SFI）邀请主持复杂系统暑期学校和为乌拉姆纪念讲座演讲的经历激发了我写这本书的念头，在此向圣塔菲研究所表示感谢。同时也要感谢 SFI 多年来为我提供了极具启发而且富有成效的科学氛围。SFI 大家庭中的众多科学家慷慨地分享了他们的思想，给了我很多灵感，这里无法将他们一一列举，在此向他们全体表示感谢。还要感谢 SFI 的工作人员，我在研究所工作期间，他们真诚友善地给予了我帮助。

感谢 Bob Axelrod、Liz Bradley、Jim Brown、Jim Crutchfield、Doyle Farmer、Stephanie Forrest、Bob French、Douglas Hofstadter、John Holland、Greg Huber、Ralf Juengling、Garrett Kenyon、Tom Kepler、David Krakauer、Will Landecker、Manuel Marques-Pita、Dan McShea、John Miller、Jack Mitchell、Norma Mitchell、Cris Moore、David Moser、Mark Newman、Norman Packard、Lee Segel、Cosma Shalizi、Eric Smith、Kendall Springer、J. Clint Sprott、Mick Thomure、Andreas Wagner、Chris Wood。他们热情地为我答疑，对书稿提出意见，并帮助我对书的内容有了更清晰的认识。当



然，如果书中有任何不当之处，作者文责自负。

还要感谢牛津的编辑 Kirk Jensen 和 Peter Prescott 对我自始至终的支持和超凡的耐心，以及牛津的 Keith Faivre 和 Tisse Takagi 给予的帮助。感谢谷歌学术、谷歌图书、亚马逊网站以及经常不怎么公道但又极为有用的维基百科，它们使得学术搜索变得极为便利。

我要将这本书献给侯世达和霍兰德，他们对我的工作和生活给予了如此多的启发和鼓励。能得到他们的教诲和友爱是我三生有幸。

最后，感谢我的家人：我的父母 Jack 和 Norma Mitchell、兄弟 Jonathan Mitchell 以及我的丈夫 Kendall Springer，感谢他们给予我的爱和支持。感谢 Jacob 和 Nicholas Springer，虽然他们的到来延误了这本书的写作，但他们也给我们的生活带来了新的欢乐和惹人喜爱的复杂性。

目 录

> 前 言	1
> 致 谢	1
> 第一部分 背景和历史	
> 第 1 章 复杂性是什么	3
昆虫群落	5
大脑	6
免疫系统	9
经济	11
万维网	13
复杂系统的共性	13
如何度量复杂性	15
> 第 2 章 动力学、混沌和预测	17
动力系统理论的起源	18
对预测的重新认识	23
线性兔子和非线性兔子	27



逻辑斯蒂映射	33
混沌的共性	42
混沌思想带来的革命	48
> 第3章 信息	50
信息是什么	51
能量、功、熵	52
麦克斯韦妖	54
统计力学提要	59
微观态与宏观态	62
香农信息	65
> 第4章 计算	70
什么是计算? 什么可以计算	72
希尔伯特问题和哥德尔定理	72
图灵机和不可计算性	76
定义为图灵机的明确程序	80
通用图灵机	80
图灵对判定问题的解决	82
哥德尔和图灵的命运	85
> 第5章 进化	88
达尔文之前的进化观念	90
达尔文理论的起源	93
孟德尔和遗传律	99
现代综合	102
对现代综合的挑战	105
> 第6章 遗传学概要	111
> 第7章 度量复杂性	118
用大小度量复杂性	121
用熵度量复杂性	121
用算法信息量度量复杂性	123

用逻辑深度度量复杂性	125
用热力学深度度量复杂性	127
用计算能力度量复杂性	128
统计复杂性	128
用分形维度度量复杂性	130
用层次性度量复杂性	137
> 第二部分 计算机中的生命和进化	
> 第 8 章 自我复制的计算机程序	143
生命是什么	143
计算机中的自我复制	145
自我复制程序的深层意义	150
DNA 的自我复制	151
冯·诺依曼的自复制自动机	152
冯·诺依曼	154
> 第 9 章 遗传算法	159
遗传算法菜谱	161
遗传算法的应用	162
进化的罗比，易拉罐清扫机器人	164
GA 演化的策略是如何解决这个问题的	171
GA 是如何演化出好的技巧的	176
> 第三部分 大写的计算	
> 第 10 章 元胞自动机、生命和宇宙	181
自然界中的计算	181
元胞自动机	182
生命游戏	186
四类元胞机	189