

江西省版权局著作权合同登记

图字:14-1998-56

Patterns in the Sand

Copyright ©1998 by Terry Bossomaier & David Green

Chinese translation copyright ©1999 by Jiangxi Education Press

Published by arrangement with Allen & Unwin

All rights reserved

图书在版编目(CIP)数据

沙地上的图案:计算机、复杂和生命/(澳)波索马特尔
(Bossomaier, T.), (澳)格林(Green, D.)著;陈禹等译. —南昌:江西
教育出版社, 1999. 10

(三思文库·科学前沿系列)

书名原文:Patterns in the Sand

ISBN 7-5392-3319-2

I. 沙… II. ①波…②格…③陈… III. 生命—复杂性理论

IV. Q1—0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 33213 号

书 名:沙地上的图案:计算机、复杂和生命

著 者:[澳]特瑞·波索马特尔 大卫·格林

译 者:陈禹等 校 者:王月瑞

责任编辑:黄明雨 特约编辑:苏福才

责任印制:万闰宝 封扉设计:李颖明

出版发行:江西教育出版社(南昌市老贡院 8 号/330003)

印 刷 者:江西科佳图书印装有限责任公司

(江西省南昌市洪城路 636 号/330009)

开 本:850mm×1168mm 1/32

印 张:7.5 字 数:140 千字

版 次:1999 年 10 月第 1 版 1999 年 10 月第 1 次印刷

标准书号:ISBN 7-5392-3319-2/Z·69

定 价:12.00 元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

序

乍一看，我们周围的世界所呈现出来的物质形式与系统千姿百态，极其繁杂，一切似乎是，我们将永远无法诠释自然。古希腊的哲学家们迎接了这一挑战，且其中的一位，德谟克利特，还提出了一个干净利索的解释方案。他认为，宇宙只不过是无尽数运行于虚无之中的原子，世界万象归因于这些原子的无限量组合方式，自然界的每一物体都是这些原子重新组合的结果。就这样，大千世界的超级复杂性给其简化为基本构造体的几项杂耍。

由德谟克利特的原子学说衍生而出的简化论世界观最终成为科学的范式。该世界观认为，大自然可以极其复杂，然而，一旦人们掌握其构成的来龙去脉，一切都将迎刃而解，这是因为，大千世界充其量不过是构成其整体的各个部分之和。这一哲学非常迷人，但简化论者一直招惹着广泛的批评，认为其已陷入“只见树木，不见森林”的误区。就拿人来说，由于人是由细胞组成的，简化论者就试图从理解细胞（含脑细胞）的作用机制入手以解释人的行为。然而，细胞只不过是一个个复杂的装满分子的袋子，因而，它

们的特性又只能从化学的角度进行解释。化学是物理学的分支，因此，对这些生物分子属性的解释又须到原子及亚原子物理学的规律上寻找。这样，心理学与生物学简化为化学，化学又依次简化为粒子物理学。如果该条推理链成立，这将意味着，所有的人类属性最终将置根于其构造成分——构成这个世界的基本粒子与场——的属性。

尽管简化论的认识方法根深蒂固，然而，科学家们大都对之持质疑态度。19世纪时物理学自身也开始对其根深蒂固的简化论观点进行纠正，因为人类所发现的越来越多的自然现象并不与简化论的模式相吻合。追溯起来，我们可从现在所称“混沌”理论的发现者——法国数学物理学家亨利·彭加勒 (Henry Poincaré) ——的著述中找出简化论的局限性。在此之前，大家普遍将复杂性假定为由参与元素的数量所引起的复合，并不希望其中涉及基本规律或原则。一个生物组织，或一片雪花，或一股湍流之所以看起来复杂，是因为我们并不知道构成该物体的所有微小单元的详细情况及其相互作用的方式。在这些系统的表相复杂性下面，一定在单个元素的水平上隐藏着简单性。混沌理论推翻了这种认识，指出，即使由极少数微小个体构成的简单系统都可灵敏地感应出最微小的干扰，从而使其以一种随意且不可预测的方式进行活动。

这仅仅是个开始。其他形式的复杂性相继被发现，在这里，混沌的随意主宰为更具建设性的活动所取代。激光及超导体表明，无限量的独立元素可集体协作，一切好像是，它们似给一种看不见的手导引着发挥效力，甚至一小

盘热水也能自发地排列成六角形对流细胞的图案。人们用“协作”、“自组织”等词汇来描述这种展示大范围内协作行为的复杂系统中的连贯活动。有时，简单的、尚未激活元素的聚集会以独立的、令人惊异甚至具有创造性的不可预测方式进行活动。在系统达到某种不稳定状态时，内在的微小变化往往会导致极其重大的后果。这种不稳定可给系统要么导致灾难，要么使其变异至更为复杂的状态。

那么，科学家们如何才能理解这些复杂系统呢？复杂性的难点是，人们似乎永远不可能从总体上掌握其本质。没有两个或两个以上一模一样的云彩、行星环或生物机体。然而，随着电子计算机的发展，研究人员可对复杂行为的诸多方面进行研究。他们开始注意到完全不同的复杂系统在结构及行为上的相似性，这种普遍的数学模式甚至在混沌系统中都可分辨出来。一切似乎是，在物理学的规则之外，另外存在着某种复杂性的普遍规律。

于是，一种全新的文化开始在研究此类复杂系统的科学家中兴起，在处理原始的、不可复原的、简单的微分子观念的基础上建立了简化论的模式，该模式旨在以其最微小部分的组合活动来解释复杂系统。他们没有舍本求末，而是寻找初始的、不可复原的复杂微分子作为例证，其中之一就是分形。分形为一种从某种意义上说无限不规则的几何体（正如德漠克利特的原子为无限简单一样），但其具有非常精细且可组织的数学描述，因而可非常有效地用以模拟复杂性。经常引用的例子是大不列颠海岸线，该海岸线曲折蜿蜒，但在某种意义上具有简单的下伏比例关系的。

确，从数据上为自然景观的映象进行分形要比对其直接分形（这是简化论的方法）便宜得多，而自然界的分形图案又随处可见，譬如说海岸线、山脉、森林及河谷等。

另一重要概念是网络。网络是以某种方式连系起来且彼此间或大或小地产生影响的群体。我们可将网络类比于大脑的结构、生物系统的进化与市场的运作等。它们常见于磁性材料及免疫系统，也发生于蚁群、基因的相互作用之中，最著名的例证是因特网与万维网。就定义而言，网络不能简化至其构成元素，因为，赋予网络可分辨属性的正是它的内在联系。在这里，研究人员又一次看到普遍规律在起作用，他们看到，系统中的自组织与混沌就像外汇市场、雨林及沙地上的图案一样千差万别。他们的工作凝聚成一个灿烂的前景：曾经不可理解也完全无可追溯的大自然（甚至人类的行动）的各个方面也许可用一种全新的数学原则进行精确的模拟。

特瑞·波索马特尔与大卫·格林（Terry Bossomaier & David Green）便是投身于这种全新研究领域的科学家。他们的知识超越了传统学科疆界的疆界，他们一起为复杂性的研究带来了生物学、计算、神经网络及数学的背景。在对复杂性理论所作的一些狂妄论断大胆质疑的同时，他们得出，我们正临界于一个全新的科学，该科学为我们诠释自然提供了全方位的提示。在本书中，他们描写出许多复杂性理论家的专业知识发生作用的日常例证。他们的陈述毫不含糊地表明，该学科并不仅仅是一个宏伟蓝图或范例的突破，而且也是脚踏实地的实际应用。例如，他们谈到事

故与罪犯的责任，或传染病的流传——两个例子旨在说明，日益增生的社会复杂性可以引起日益上涨的社会难题与不稳定因素。

我在作学生时常听说两大前沿科学，一个非常大（宇宙学），另一个非常小（粒子物理学）。今天，第三个前沿已经出现，它同样富有挑战性，也同样重要，它就是“非常复杂”。科学史上有许多场合使用“革命”这一词汇，然而，真正的科学革命实际上是相当罕见的，且往往涉及此种或彼种理论的突进。复杂性的革命已经定名，因为它所提供的远非几个有趣的例证。它改变了科学家们解决其学科难题的方法。它提供给我们全新的工具与观念，也为一些陈旧的谜题提供了新鲜的谜底。人类一直知道，作为物质的宇宙是复杂的——复杂得非凡，复杂得壮观——但只到今天我们才开始理解这种复杂性是多么的机敏与昂贵。

保罗·戴维斯

1997 年于阿德莱德

前 言

本书浓缩了有关复杂性问题的多年实践经验。在神经系统、环境处理以及生物学和计算机领域所付出的不懈努力使我们明白相互作用以及可以产生复杂性的其他一些机制是何等重要！我们殷切希望能与尊敬的读者分享这一既博大精深又令人向往的新生知识领域所带来的巨大兴奋。

作为长期以来一直把计算机技术应用于生物学的科学家，我们多年来对计算机与日俱增的重要性感触颇深。计算机既是一种非常实用的工具，又不失为对现实世界诸多领域的一种隐喻。尽管看起来可能有些奇怪，但生物学与计算机技术已成为联系非常紧密的两门学科。计算技术使我们对生物学有了更多的了解，计算机科学家从观察自然界同计算技术和信息处理技术的诸多联系中也获益匪浅。我们将在本书的不同章节中不厌其烦地努力阐述这一紧密联系。

复杂性是一个极其丰富的研究领域，几乎可以将所有传统知识领域中的思想、观点、方法和现象有机地组合到一起。与同领域的一些畅销书相比，本书并没有局限于介

绍从事专门研究的科学家的个人情况，但也不会像百科全书般面面俱到。当然，有很多问题我们只能一笔带过，或者根本无法述及。

本书的重点在于揭示复杂性的真谛及其对我们日常生活的影响。书中运用了大量具体、翔实的示例——从海星到忙碌奔波的推销员，从汽车事故到大脑的工作流程。希望读者们能从书中对一些主要问题获得满意的答案。如果本书能帮助您以新的见解去审视大千世界，我们便没有枉费笔墨了。最后，我们诚邀有志于更加深入地了解世界复杂性的读者们通过“Complexity On-line”浏览网上资源和信息。通过我们的网络服务器即可获得此类服务，我们的互联网网址是：<http://life.csu.edu.au>。

特瑞·波索马沃尔

大卫·格林

于 1997 年 12 月

目 录

序.....	(1)
前言.....	(7)
第一章 复杂性的处理.....	(1)
第二章 计算	(13)
第三章 殊途同归复杂性	(37)
第四章 自然界的不平衡	(59)
第五章 自然界的本质	(83)
第六章 良好关系的重要性.....	(107)
第七章 沙地上的图案.....	(117)
第八章 计算机的影响和后果.....	(141)
第九章 因特网：高速公路还是羊肠小道.....	(161)
第十章 复杂性与生命.....	(179)
参考文献.....	(207)
词汇表.....	(209)

第一章 复杂性的处理

1961年5月5日，在佛罗里达州的卡纳维拉尔角，美国的第一次载人航天飞行正整装待发。发射场上，艾伦·B·什帕德早已在“红宝石”火箭头部的“水星号”太空舱内就位。本次的飞行时间很短，火箭升空后只在太空边界处作低轨道飞行，然后立即返回地球。

然而事情进展得并不顺利，工程师们多次终止倒计时，逐个检查系统的潜在问题。这么做的根源在于，每个人都极度害怕此次飞行会失败，因为俄国人在4月份已成功地将加加林送进太空，这给美国的载人航天飞行实验带来巨大压力。美国的火箭曾当众发生过爆炸，如果这次载人飞行发生同样的灾难，那么，美国的威望和信誉就会像火箭一样一去不再复返。

因此，每位技术人员都害怕出错，更没有人希望自己成为导致灾难的罪魁祸首。他们反复检查各自负责的系统的每个细节，直到每个系统都被确定为“正常”，火箭才可升空。换句话说，万一漏检了什么，也没有人敢站出来承认是自己的过错。

尽管飞行将只持续 15 分钟，但什帕德在密封的太空舱里已足足等候了四个小时。此时，他的生理功能已经成为最主要的问题，早晨喝的咖啡经过消化后就要喷涌欲出。没有人知道他将体内的液体突然释放到太空服里会发生什么。由于害怕流体造成电线短路，什帕德不得不忍受着生理问题所带来的煎熬。但他最担心的却是火灾，六年后阿波罗号飞船的纯氧舱起火，三名宇航员便因此而丧生。

他的意志力已经达到了极限，此时仪器竟也失灵，大量的生物及医学数据无影无踪。在更多的问题尚未暴露之前，发射急急忙忙地开始了。经过漫漫的等待，美国的第一艘载人飞船终于踏上了征程。¹

这个故事旨在说明，太空船恰如其分地反映了本书所要致力的复杂系统。只有成千上万个不同的系统都正常运转，太空船才能飞行。尽管仔细检查每一细节会减少各部件产生故障的机率，但飞船有成千上万个部件，因此整艘飞船上的某个部件发生问题的可能性仍然高得令人担忧。

我们熟悉的另一个复杂系统的例子是家用电器。当今的电子电器更加趋于可靠，比如，如今的许多电视机都能做到多年不出故障。这种可靠性是电子技术进步的结果。早期的电视机由几十个真空管组成，而这些电子管像灯泡一样使用一段时间后就会失效，因此不得不经常请维修人员前来修理。可靠性不强的真空管给最初的计算机带来了更加严重的问题。一台电视毕竟只有几十个电子管，而早期的计算机则有几千个电子管。当时建立该装置时整个房间都布满电子管和电线，而其性能却并不比现在的袖珍计

算器强多少。此类计算机故障频繁，需要不停地更换电子管，这对机器的正常工作构成了巨大的挑战。

计算机编程也是个类似的例子。程序可能是极其复杂的，一个较大型的软件可能会包含数千行代码。在计算机科学的早期发展阶段，程序员需要坐下来仔细地设计整个程序，并在纸上写下草稿，然后，这种手写的程序会被打成穿孔卡片——每张卡片一行代码。即使是一般的程序，它的代码卡片也会有足足一盒子。如果要运行程序，你还得把卡片盒送到计算中心，第二天才能去取输出结果。而结果不可避免地会出现错误，于是你又得花费一下午的时间，凝神注视着代码，找出并排除错误的根源，而后更新一些代码卡片，使计算工作得以继续。

编程中的一条主要规则是：一条新代码中的错误数量会随着行数的增加而呈指数式的增长。代码片段越短，编程就越准确。这一点乍一看毫无道理，因为，不管程序的剩余部分有多长，每条代码中的错误数量应该是相同的。但在实际上，新加入的每一行代码都会以一种隐蔽的，而且往往是错误的方式与已有的程序发生相互作用，从而造成难以察觉的错误。如今，这条规则已在实践中被广泛地应用：每当程序员要增加新的程序内容时，就会先编码，然后测试，接着马上进行修改，其整个过程只用几分钟的时间。但在早期，增加这点内容需要花费几个月的艰苦劳动。在下文中，我们将会讨论到计算机科学中一个新的发展趋势，这一趋势不仅发展得很快，而且在生产中硕果累累。为便于存储和处理，要把数据及其处理过程作为整体封装起

来。显然，这一做法对复杂性的处理是至关重要的。

如同工程师们采取各种措施来降低出错风险一样，程序员也开发减少编码错误的技术。工程师们习惯于将一个复杂机器分成若干个子系统，程序员则将程序划分成若干模块。在与其他模块进行连接之前，每个模块都可以独立进行开发及测试。当你像搭积木一样反复使用模块时，这一做法就显得特别有效。世界上第一位程序员亚达·拉弗雷斯（Ada Lovelace）早在 19 世纪就意识到这一做法的发展潜力，并编写出 Babbage 分析机的程序。²

第一台数字式计算机于二战后开发成功。当时的程序都是用被称为机器代码的语言写成的。这些代码是机器的直接操作指令，极端繁琐且令人费解。程序中充满着诸如“把寄存器 1 中的数字移至寄存器 2”之类的模糊指令。之后，计算机技术出现了很大的发展，人们开始对一些反复使用的指令组进行命名。这一方法导致了编译器这种特殊程序的产生，它可将所有常规指令的名称转化为正确的机器代码。大家所熟悉的程序设计语言就此应运而生。

工程师们采用许多措施来避免灾难性事故的发生。最常见的是采用显示系统运作情况的监视器，如我们十分熟悉的汽车里程计和油量表。而像飞机或飞船这样复杂的机器，需要的传感器数量要比汽车多出好几倍。传感器有其优点，即问题在发展成灾难性事故前就能被察觉到，但是每个传感器自身也是一个必须正常运作的新系统。在航天飞行中最常见的问题之一就出在故障指示灯上。

另一种措施就是在各部件与整体系统之间建立容错机

制，这样系统在正常预测范围之外仍能正常运转。缺少容错机制将带来不可估量的危险，一个活生生的例子就是“挑战者号”的灾难。该航天飞机在升空不久即发生爆炸，导致七名宇航员遇难。事故的原因是助推器的O形密封圈失效，因为它们在低于设定的容许温度工作时出现了脆裂。

冗余机制是又一种消除部件故障的方法。如果该系统较为关键，你可以对之进行复制。例如航天飞机上就配备三台计算机。

如果没有上面这些措施或其他更多预防措施的话，飞机或太空飞行这样颇具挑战性的工作是不可能得以进行的。况且，即便采取了所有这些措施，仍还没有克服最大的问题：不同系统间的相互作用会导致复杂性的产生。只须打开汽车车盖看一眼就可知道，里面所有复杂部件的组合设计得多么完美！改动任何部件都会影响到整个系统的运作。如果扩大汽化器的容量，则排气管就显得过小，而拆去排气管又会导致电线过热。

然而，尽管有这些技术与预防措施，我们许多人还是经历过这样的事：在计算机出现故障时沮丧地盯着屏幕，无所适从。要么是死机，要么是你花费时间与精力劳作过的文件不翼而飞——无论如何，这种情况通常叫人烦恼无比。对于这些问题我们往往无能为力，因为我们知道，计算机是极其复杂的机器。有时，计算机的行为显得莫名其妙，如安装新的软件包后，原本稳定可靠的程序却突然启动。不过，今天的数字式计算机仍然是以指令为基础的简单装置，远没有生物的大脑那样复杂。死机或其他令人沮丧的故障

通常是因程序内部出现错误造成的，有时候则缘于程序间的相互作用。这些问题可能只在单机上出现，也可能波及整个因特网。

系统间的相互作用极其复杂，而且往往无法预见。这就是为什么一些完全意料之外的情形，如什帕德的不雅举动，会在航天飞行中出现。这也是任何系统的设计者都要遇到的最大难题。汽车车盖下的发动机及其他部件的组合并不是一夜之间设计完成的，它是人类数十年来从事汽车开发、设计的结果。

从猫群到复杂性网络

一位沮丧的大学校长把学校描述成像放牧猫群一样难于管理（猫是不合群且难于约束的动物，让它们规规矩矩简直是不可能的）。但并不是只有独立、复杂的猫群才具有不可预测性。艾萨克·牛顿就曾抱怨说，一想到月亮就让他头疼。原因何在？也许是他在努力思索之后，仍无法得出太阳、月亮和地球三者之间的运动方程式。但他根本没有想到（几百年后已被证实），他的努力注定会失败，因为所谓的三体问题在通常意义下是无解的。太阳、月亮和地球的关系就是其中的一个特例。

要制造混沌，你也不需用许多只猫。事实上，一只小猫和一个绒线球就足够了！当小猫围着房子追赶线球时，线球会散开，滚到桌子和椅子底下，缠绕在一起。每当球碰到障碍时，由于其不是完整的球形，它可能会弹向一个意

想不到的角度。除非我们能找出绒线头，否则就无法得知绒线滚动的起点和终点。我们可尝试在一个范围内沿着复杂的路线不停地来回走动，而每次的路径都要稍加改变。我们可称之为“迭代法”，即通过重复简单动作来制造复杂性。

蜘蛛网是另一种由简单个体造就的复杂模式。当蜘蛛爬动时，就形成了复杂的路线，而最后结出的网则记录下蜘蛛的爬行路线。我们可由此而得出一个以后会经常提及的观点，即复杂性不见存于个体（不管其是动物、植物还是矿物质）水平，而见存于以时空的视角所能观察到的更大的场景之中。我们可以看到蜘蛛网上清楚的图案，但绒线球的滚动却根本没有形成明确的图案。不同的图案、盘根错节的路线以及复杂多变的结构，都是复杂性的特点。

什么是复杂性？

从根本上说，复杂性是世界的组成方式。正如上面的例子所展示的，当很多事物组合在一起时，它们之间的相互作用就可能极其复杂，比如说飞机上的子系统。正是这些相互作用使由多个部件组成的事物变得真正复杂起来。

如果你在台球桌上滚动一个球，那么，任何一名优秀的台球选手都能预测出它的行进路线。如果每次滚动两个球，那仍然是一个简单的问题，只要分别计算每个球的路径就可以了。当然，这里也存在着两个球互相碰撞的可能性。但是，如果再加进几个球，那么跟踪球的轨迹和碰撞就将变得十分困难，而要预测出所有球的状态几乎是不可能的。

现在，假设我们同时滚动 100 个球，由于这么多的球总会彼此碰撞，计算单个球的轨迹就完全不可能。这样一个系统在个体水平上根本是无法预测的，既无简单的图式，也很难记录它们的准确位置。然而，如果我们想知道的只是整张台球桌的情形，而不是每个球的轨迹的话，则这个多球问题又会变得非常简单。我们不再需要精确地追踪每个球的轨迹，而只要观察整体的行为，把无数的相互作用平均化，就可以作出一些有价值的预测，如球的平均速度，碰撞的平均间隔时间及在桌面上的平均分布。

这里我们还要引入复杂性的一个重要概念：涌现。以上所描述的平均性质（行为）是由无数个体相互作用涌现出来的整体属性，它在某种意义上忽略了个体之间的区别。台球模型是气体运动理论的出发点，例如，在一个含有众多微粒（原子，分子等）的容器中，各种速度的粒子碰撞着容器壁，彼此间也互相碰撞。就气体种类、容器形状、器壁性质等而言，只有温度这一属性是稳定不变的，我们称之为宏观性质。我们不能从考察个别微粒出发而导出或测定这一性质。不幸的是，宏观性质的涌现就像复杂性一样难以去下定义。宏观涌现是复杂性的主要特性之一，即可以通过一系列简单的过程得出不可预见的整体特性。本书中可以看到许多类似例子。最终，我们会对何谓复杂性有一个说法，但确实很难为其作出正式的定义。

温度也是宏观性质的一个极好例证。温度是什么？虽然我们可以对其加以宏观测定，且各种物理现象也都与温度有关，但若从分子的角度来看，温度就不再存在。我们