

临界：智能的设计原则（知乎傅渥成作品）（知乎「盐」系列）

作者：傅渥成

目录

[关于本书](#)

[「盐」系列电子书出版序](#)

[序·赵思家](#)

[自序·迷宫的十字路口](#)

[第一章 集体智慧和模仿游戏](#)

[从沙堆到生命](#)

[森林大火、恐怖主义和反脆弱](#)

[临界的鸟群：集体行为中的临界现象](#)

[模仿游戏：信息论、进化和集体智慧的起源](#)

[第二章 临界的大脑](#)

[我们真的需要一个临界的大脑吗？](#)

[意识和机器学习](#)

[第三章 黑客和物理学家](#)

[黑客和物理学家](#)

[幂律与互联网产品的「黏性」](#)

[第四章 寻找隐藏的关联](#)

[超越幂律](#)

[临界性：批评和自我批评](#)

[后记](#)

[注释](#)

关于本书

《临界：智能设计的原则》（知乎傅渥成作品）/傅渥成

出品人 周源

编辑 梅莹 刘强 湖玛

设计 郝小好

策划 成远

联系我们 weekly@zhihu.com

本电子书版权为北京智者天下科技有限公司所有，未经书面授权，不得在任何地区以任何方式反编译或节录本书内容。

ZHI-BN9-0053-0000150929-1

DNA-BN: ECFD-N000000670053

最后修订：2015 年 09 月 29 日

出版：浙江出版集团数字传媒有限公司

浙江 杭州 体育场路 347 号

互联网出版许可证：新出网证（浙）字 10 号

电子邮箱： cb@bookdna.cn

网址： www.bookdna.cn

本书电子版如有错讹，祈识者指正，以便新版修订。

Zhejiang Publishing United Group Media CO., LTD, 2013

No.347 Tiyuchang Road, Hangzhou 310006 P.R.C.

service@bookdna.net

www.bookdna.net

「盐」系列电子书出版序

知乎创始人 周源

我们和这个世界，有一种天然的媒介，那就是存在于我们大脑里，没有被分享过的信息。如果有某种方式把每个人的知识、经验和见解都汇集起来，会不会像从信息海洋中源源不断地提取出知识之盐一样，极大地丰富很多人生活的味道？

这个问题，令人兴奋。知乎创立至今，诞生了一种新的知识生产方式，对世界的提问和回答，像是对一个无序的世界进行了一次次重构 ---- 把彼此大脑里没有分享过的知识、经验和见解搬上了互联网，组成了一个全新的网络。而那些最有知识、经验和见解的人，就像盐，给这个世界带来味道。

您即将展开的这本书，属于知乎的「盐系列」丛书。我们希望这些作品保存一种海的味道，因为在知乎看来，每一位认真的知友，都是知识海洋中析出的智慧之盐。我们希望这一系列的每一本书，都可以为您透析世界的一个组成部分，亦或给您的生活增光添味。

读这书时，请别忘记，它诞生自一个有味道的人。

序·赵思家

「物理真美啊。」

「那当然，它可是我们科学里的女王。」

对我来说，科学就是找规律。

在极繁的世界里，找到它的极简「设计原则」。

然而，一直以脑洞大开作为人生使命的我，也从来没有想过，「证明我妈是我妈」这种问题居然能够用物理模型来描述。

现在好像大家都在说模型：股票模型的目的是预测近期股票的走势；天文学家可以通过计算机的模拟，推算出过去的夜空，得知千年以前的某一天月亮和星星的位置；而神经科学做的模型，旨在模拟人的大脑，让它能够像人类一样看、听、学习、思考、交流.....

但话又说回来，到底什么是模型？说实话，我也不知道是不是存在一个精准的定义。模型（model）这个词使用得相当广泛，站在 T 台上就是模特（model），放在存库里就是型号（model），所以当我们说到理论模型和模拟模型时，只能依赖于列举各种各样的「模型」来正确理解「模型」的概念。

傅渥成前辈的这本新书，就提供了各种各样有趣的「模型」，让你从新的角度来看日常生活中大大小小的细节。

从西藏坛城沙画到黄石公园的森林大火，再到恐怖组织的活动；从鸟群的行为到大脑的行为，从黑客精神到互联网产品的黏性，从我们每天用的语言到金融市场；真令人感叹，物理学家们简直像是在脑门儿上装了探测仪一样，到处寻找隐藏的关联，简直就是团战「连连看」嘛！

有时候看到一个东西，感叹「哎呀，看起来像是活的一样」。那到底是什么让它像是一个活的呢？生命有什么特殊的特征，让人看着觉得「有生命」？

我是学认知神经科学的，就拿我昨天才看到的一篇神经科学的论文举例吧。当我们准备做一个动作（譬如，按按钮）时，相应的肌肉会收到神经信号：「激活！（动起来！）」。照理来说，它就应该立马接受命令然后该怎么动就怎么动。可是少年，记住要透过现象看本质。长久以来神经科学家观察到，在准备动作之时，肌肉里的相关运动神经会先被抑制（inhibited）。为什么不直接听话地做该做的，而是要先抑制呢？这是不是多此一举了呢？这篇论文给出的解释是：想象我们在一间闹哄哄的教室里，一个学生被老师点名起来回答问题，在这个学生开始说话之前，老师会要求所有学生，包括这位马上要回答问题的学生，安静下来，当教室安静时，这位学生才开始发言，大家就都能听到了。一样的道理，肌肉们就像是一个个叽叽喳喳的学生，被选上要去动作的肌肉就是那个被点名的学生，为了确保它的「声音」嘹亮且清晰，就要让旁边嘈杂的同类安静下来；同时也会减少「学生误以为被点，随便起来回答问题」的乌龙情况：不会老师看你一眼，你就腾的一声起来回答问题。

这听起来好像是虽然有些多此一举，倒也并不怎么复杂，可要是真要设计一个机器人手臂，让它做各种人类的动作（例如端茶杯、写字、切菜、弹竖琴）都和我们人类的一样「自然」、「灵活」，却完全不是一件容易的事儿：要么太多错误了，会使得动作不流畅，磕磕碰碰；要么完全没有错，可又太机械，不自然。之所以出现这样的问题，可能就是因为忽视了一些看似多此一举、实则至关重要、必不可少简单的简单的小机制们。

和「俯卧撑」前辈搭上话，是半年多前无意间看到他的一篇专栏《鸟群的统计物理：模型与模拟》。当时我刚刚开始读神经科学博士，开始用模型模拟人脑是如何学习语言和音乐的。当时看到前辈这篇浅显易懂、干货满满的专栏，心中那种激动，就如同在一个语言不通的地方，遇到一个会说成都话的老外.....

昨天晚饭时收到前辈的邮件，说他的新书里有一大章节是关于大脑的。之后我老激动地把这本书当成睡前读物读完了。手上拿的这本书的第二部分关于「大脑的临界性」，在我看来，是针对生物群体系统模型讨论的「升华」。我这么说不仅仅是因为我是学神经科学的，有「先入为主」的偏好，更重要的是，模拟动物的群体行为，虽然本身就非常有趣，但模型的精彩之处正是在于，它能够从不同的层面、规模、角度，以突破常规的想法来定义「个体」。一只大雁是一群大雁的单位，它们的集群行为是飞行中不同的队列，而一个小小的神经细胞就是大脑的单位，它们的集群行为，引用这本书里的话「.....人类并不是被训练成智能解决某些简单问题的机器，而是能够用同样的一个机器（我们的大脑）尝试去解决各种不同的问题.....」。很多人问过我，神经科学和人工智能最大的不同在哪里？这，就是两者的本质区别 ---- 我们设计一个物体、工具，一定是针对「已知」的目的去设计、优化的；而大脑却是个「万能工具」，为了解决看见世界后的每一瞬会出现的新的「未知」任务。

单靠我们人类现在制作工具的「设计原理」，是走不进真正的智能的。那如何能够用现有的工具往智能前进呢？现在看来，很可行的方向就是去发现生命本身的设计原理。在现在这一刻我们可能还不知道这个原理为什么这么设计，甚至不知道是不是发现了真正的「原理」。但找规律，然后模仿，是「学习」的第一步。

每次看到前辈的专栏和微信公众号名字----「生命的设计原则」----我都在心里感叹这名字取得太好了。生命的美丽，在于无论多小多简，都如「专业设计」一般精妙无比，却又像是造物主有强迫症似的不允许出现任何一件复制品。

无论你来自哪个专业领域，只要你的兜里还对这个极繁的世界有着好奇心，都应该了解什么是模型（model）；至少该试一试。那么，这一本书一定是个非常好的开始。

赵思家

2015年8月10日于雨蒙蒙的国王十字火车站，伦敦

因为各种科普书籍的存在，哪怕是不熟悉物理学的朋友，对「相对论」「量子力学」这些名字也常常不会太陌生。「薛定谔的猫」已经不只是一个思想实验，更是我们流行文化的一部分。大家也因此都知道物理学可以用来研究小到「基本粒子」、大到「宇宙」的各时间、空间尺度上的许多问题。其实物理学家关心的问题还有很多，只不过遗憾的是大家常常会忽略物理学家的看法——例如，智能是什么？集体智慧是什么？我们大脑中的意识又是什么？在公众看来，这些问题首先应该是哲学的问题；其次应该是生命科学尤其是神经科学的问题；又或者它应该是一个工程技术方面的问题，例如我们常常需要设计一些具有「智能」特征的系统。

物理学家对这些问题同样非常感兴趣。我曾经在上了一本电子书《写在物理边上》中写过一节《「智能」起源的一种可能性¹》，里面提到物理学家 AD Wissner-Gross 在 Physical Review Letter 上发表的一篇题为「因果熵力（Causal Entropic Force）」的文章。文中用路径积分的方法构造出一种力的形式，这种力可以把粒子驱动到「最智能」的位置上去。这种方法与人工智能的 AIXI 模型²是相似的。在因果熵力的构造中，最智能的位置意味着「在未来总可以有最多可能的选择」；在 AIXI 模型中，智能被定义成「在任意环境中找到最优解的能力」³。这些表达看似复杂，不过却很容易理解，我们在玩游戏时的优化目标与这些「智能」的定义形式非常类似。想象我们在玩一个控制小球的游戏，小球受到随机力的驱动，会在跷跷板上向左或者向右移动，你通过触摸屏可以去抵消这种随机力所产生的效果。假设跷跷板的长度是有限的，小球滚到边缘时游戏结束。很容易可以想到，如果跷跷板左倾，小球即将或者已经朝着左侧运动，我们只要视情况给小球施加一个向右运动的力。最安全的游戏策略就是永远想办法让小球稳定在木板的中段。因为这个「游戏」的设置非常简单，所以我们可以较容易地了解到系统演化的全部信息。根据这些信息，我们可以得到合适的驱动力大小，在这种驱动力的作用下，小球可以不断做出「正确」的选择，让游戏不断继续下去。

可问题马上就出现了：如果在一个复杂系统中，当我们无法得到系统演化的全部信息时，我们应该怎样进行最「智能」的决策？又或者当类似的游戏有多人参与时，例如上述游戏的一个「多人对战」版，我们并不能期待周围存在一个稳定的环境，因为还有许许多多的玩家在尝试防止自己控制的小球掉落，而更重要的是，每个人对小球运动的控制又会对跷跷板的平衡造成影响。每个玩家的目标并不相同，甚至有的玩家还有可能故意让其它人控制的小球失去平衡。当不同的玩家抱着不同的目标时，互相影响、互相博弈，系统究竟会往什么方向演化呢？对于集体行为问题，是否可能存在于一个最优化的状态，从而可以让整个群体变得「最智能」呢？这种群体智能与大脑的智能或者人工智能又有怎样的联系呢？在不同的系统中，怎样给出「在未来总可以有最多可能的选择」或「在任意环境中找到最优解的能力」的准确定义和定量描述呢？我想，在这些问题的讨论上，物理学家有其得天独厚的优势，从物理学的角度，他们常常可以为解决这些问题给出一些必要的线索。



图 0 - 与机器学习领域相关的一些学科的交叉关系（原图作者：Pascal Vincent）。⁴

我自己的研究兴趣是统计物理，但在这本电子书中，我想主要想关注与「智能」有关的问题。在我看来，「智能」至少包括以下三个层次：第一层次智能就像在跷跷板上控制小球，基于小球运动情况的简单信息，将小球一直控制在未来选择最多（既可能向左滑落、又可能向右滑落）的「临界点」上；第二层次智能需要整合多方面的信息，例如在复杂多变的环境或者与其它个体的激烈博弈和相互作用中进行选择，比如对行人行走路线的选择就需要考虑到其他人（或者其它交通工具和障碍物）的位置和运动情况及时作出调整，我们大脑的神经网络也是这样一个需要不断针对各种输入信息进行整合的复杂系统；第三层次智能则应当涉及到「意识」，这里的「意识」是指自我意识，简而言之，当我们在熙熙攘攘的人流中行走时，我们能「意识」到我们正在避开其他人，当我们不断接收视觉信号的时候，我们不但能根据我们所看到的一切准确避开各种障碍物、走向我们的目的地，更重要的是，我们还可以意识到自己正在「观看」和「行走」。这几个层次上的「智能」或者「意识」虽然仔细分析起来有所不同，但对于我们设计一个真正意义上的「智能系统」都有很重要的意义。如果我们想要理解生命怎样做出「智能」的选择，就需要对神经系统的许多特性有更深入的了解；而如果希望设计一些广义的「智能」系统，我们则需要更多工程和应用等方面（如最优化、控制论、人工智能等）的经验。物理学家分析这些问题时，其出发点通常是统计物理。一方面，我们已经提到，一种对智能的理解即为「在未来总可以有最多可能的选择」，而这种选择的多样性可以用某种「熵」来刻画；另一方面，因为「智能」的系统常常由大量基本单元所构成（例如

鸟群由成百上千只鸟所构成、大脑由近百亿个神经元所构成），这种特点与许多典型的统计物理体系（气体分子、磁系统及各种软物质体系等）又有了相似之处。从统计物理的角度来看，这些与「智能」有关的谜题之间存在着紧密的内在联系，而统计物理很可能是解决这些问题的某种「万能钥匙」，它让我可以试着勇敢地站在谜题交错的「迷宫的十字路口」。受益于此，本书所讨论的问题总是可以与人工智能、神经科学、统计学、信息论等学科建立起联系：有些问题是统计物理与机器学习问题的交叉，而有的则是统计物理与神经科学问题的交叉，还有的问题是统计物理与信息论的交叉。我一直在尝试着将自己的研究方向和感兴趣的很多不同的问题联系起来，本书中的内容就是我的这种尝试的一个简单汇报。这本电子书一共分成四章，其中前两章的内容偏理论，后两章的内容偏实践。虽然整本书大体上有一个逻辑顺序，但不同的章节之间的联系其实是比较弱的，读者可以根据自己的背景和兴趣，打乱这本书的编排顺序，从中任意选出感兴趣的章节阅读。

本书的前两章分别讨论的是集体智慧和大脑的智能两个不同的问题。其中第一章主要介绍集体智能的设计原则。作为背景，首先简要介绍了临界和幂律的概念，然后介绍了许多自然现象（如森林大火）和社会现象（如恐怖袭击）中的「临界性」。以此为基础，讨论了动物集体行为中「集体智能」的各种现象以及可能的形成原理。接下来，本书的第二章主要讨论与大脑的临界性有关的问题，书中不但讨论了大脑中神经网络结构与我们的「智能」之间的关系，并且还将这些讨论延伸到了与机器学习和人工智能的相关问题中，简要地分析了大脑的结构与「意识」的产生和神经网络算法之间的联系。

本书的后两章主要谈各种应用问题。由于「幂律」正是临界性的一个重要的表现，本书第三章简要介绍了对复杂系统问题进行建模的有关方法；为了让更多的读者对本书的内容产生兴趣，本章尝试从互联网产品设计和推广、社区运营等问题的角度出发进行了一些简单的讨论。而本书的第四章则讨论了一些试图「超越幂律」的时间序列分析方法，尝试从服从幂律分布的时间序列中提取其它有价值的信息，例如对语言、地震等问题中「隐藏的关联」的统计分析、对突变前的预警信号的捕捉等等。

在这本电子书中，几乎所有的主要结论和想法都来自于其他学者的论文或者学术报告，我所做的只是用自己的方式把这些内容串在一起。类似的科普书籍还有很多，例如《复杂》⁵《失控》⁶《混沌》⁷《链接》《爆发》⁸《同步》⁹等等，这些书同样站在迷宫的十字路口，而每一本都尝试着从不同的角度来看这些不同学科所共同关注的问题。事实上，从「临界」的角度，已故的物理学家 Per Bak 曾经写过一本《大自然如何工作》¹⁰。他是自组织临界领域的开创者之一，并且他早就敏锐地发现我们的大脑就像处于临界态的沙堆。我的这本电子书也是从同样的角度切入，幸运的是我有机会看到更多在这一领域不断推进的许许多多新的研究进展。当然，问题也因此产生，因为讨论的内容范围实在很广，这就让整本书内容的组织成了一个大问题。我建议大家把这本书看成一个「笔记」，或者关于某一类研究的「选本」。鲁迅曾在《「题未定」草》中说过：「选本所显示的，往往并非作者的特色，倒是选者的眼光。眼光愈锐利，见识愈深广，选本固然愈准确，但可惜的是大抵眼光如豆，抹杀了作者真相的居多，这才是一个『文人浩劫』。」我虽极力希望避免出现鲁迅先生所说的「文人浩劫」，但毕竟能力和水平有限，对很多研究的引用恐怕有不恰当之处，再加上我自己的有些联想和讨论未必足够准确，或许错漏之处在所难免。读者如果对某些问题想有更深入的了解，还是应该去找到我所引用的论文原文进行阅读。本书中重点介绍的内容主要是我自己近期更为关注的领域，如神经科学和集体行为，而金融市场、人类动力学和生态系统中的一些例子，在本书中的讨论则比较简略，很可能不能让对相关领域有兴趣的朋友过瘾，如果读者对这些领域有更深入的理解，欢迎与我联系并向我推荐一些有意思的书籍和论文。

因为我希望这本书能有尽可能多的读者，并且为了保证电子书在各电子书销售和阅读平台上有相对稳定的表现，所以本书中几乎没有出现公式；显然，没有公式会让准确讲解的难度变大，这对我而言是一种挑战，我把这看成在训练我自己的「费曼技巧」¹¹。读者由于背景的各不相同，对不同的内容可能早已有了或深或浅的理解：如果有的章节的讨论显得有些陌生，请一定将这些部分先跳过去；觉得有的章节还有些意思的话，可以再看看我所引用的一些参考文献；如果觉得有的章节的讨论还太肤浅，或是觉得还可以有其他更好的讲解方式，欢迎读者与我联系并讨论。在阅读时，我并不希望有读者从我的书中产生过于「哲学」的联想，而是更希望读者从自己熟悉的角度和方法去重新考虑和分析我所提到的这些问题。我希望这本电子书可以起到抛砖引玉的作用，也非常希望有机会针对本书中提到的各类问题跟大家讨论和合作。我也非常期待听到来自文科或工程背景的朋友、金融或互联网领域的从业人员、物理学以外的其他科研领域的研究者、甚至一些低年级本科生或更年轻的朋友们对本书所讨论内容的疑惑或不同见解。

本书的写作和修改过程中得到了很多朋友的帮助。早在本书的准备阶段，我在参加盐 Club 时跟建筑师袁牧老师在讨论的时候，他提到曾读过我的《写在物理边上》，但感觉整本书的组织有些问题，到后面有些越来越弱的感觉。这主要是因为之

前一次我的经验实在不足，没有能让新写的诸多内容跟此前在知乎上的回答保持较好的组织结构。这次在写作时，我一直主动避免这样的问题，因此很多内容的写作虽然基于我平时的笔记和我自己「生命的设计原则」微信公众号的推送，但在组织成电子书时，都有大规模的改动。有许多朋友在平时与我的交流和讨论中激发了我的灵感和提供了各种帮助，在此一并表示感谢。在此，我要特别感谢少女 SysyCode 在她的知乎专栏「画画有什么用」中提前为本书做的广告。除此之外，在这本电子书的写作过程中，我请了几位好朋友对本书的内容进行了审读和批评，在此特别感谢曹海元、郭瑞东、田凯文、徐建峰、易子立、赵思家和 Appcell 等几位朋友为本书的草稿所提的各种数百条批注或修改意见；尤其是《日常神经科学》的作者赵思家少女，她在百忙之中为本书写了一个远比我的更有趣的序言，还给我提出了许多很好的建议。他们的建议让这本书在学术性和易读性之间找到了一个更好的平衡。在他们的督促下，我对本书的结构和逻辑顺序进行了更合理的调整，增补了更多对插图的描述，并重新组织了不少章节的语言，希望修改后的版本可以更加简洁易读。如果说这本书尚有些可取之处的话，我想应该完全归功于他们的帮助----当然，我的决定权也是很重要的。因时间有限，最终我没有能完全按照他们的意见逐句修改，有些段落重写之后又可能引入新的错误。如果书中的讨论有任何不妥之处，我想我应该负全部的责任。如果读者有其他更好的意见或者建议，或者这本书的有关讨论让你想起来你所熟悉的其他问题，请千万不要犹豫与我联系。不管是通过电子邮件、知乎的私信，或者关注本人的微信公众号后通过后台与本人交流，都是非常欢迎的。再次感谢大家。



傅渥成

fuwocheng1024@gmail.com [12](#)

2015年6月27日 初稿

2015年8月31日 修改

第一章 集体智慧和模仿游戏



图 1 - 《纸牌屋》第三季的剧照¹。剧中的西藏僧人正在用沙粒描绘精美的坛城沙画。

坛城沙画是藏传佛教中的一种极为精细又极具宗教色彩的艺术活动。僧人们花费数日乃至数月的时间，用彩色的沙粒描画极为精美的宗教图案。而如此令人赞叹不已的图案并非用于装饰或者展示，而是在完成之后，将沙粒重新扫在一起，装进容器并最终让它们随着河流流走。在美剧《纸牌屋》第三季中对这一过程有比较详细的展示，总统 Underwood 还没来得及仔细看一眼沙画的绘制过程，就发现那些喇嘛们已经离开了。

绘制精美的沙画然后擦掉，是一个有意思的比喻，具有很强的佛教色彩。我不懂佛法，猜想大概是说一切都是虚空，一切都是无常，要破除我执的意味。当我初次看到这么精美的图案被擦除时，真是觉得太可惜了。不过作为一个学过热力学第二定律的人，又会觉得这样做是没错的，即使没有人人为的力量去擦掉这样精美的图案，过不了多久，随着熵的增加，这样精美的图案总会被破坏掉。当僧侣们创作沙画时，从最初的构图到最终细节的雕琢，随着图案复杂性的提高，他们亲自消耗着能量来与热力学第二定律对抗，说到底这是一个不难理解的过程。

难以理解的过程是「生命的产生」。如果说一切的无常和最终的虚空是因为热力学第二定律而产生的话，为什么会出现如此有序的生命呢？如果说生命像坛城沙画，那么这种精美和有序又是如何产生的呢？难道是「神」像聚精会神地绘制沙画图像的僧人一样深入每个细节，精雕细琢，一步一花描绘了美丽的生命画卷吗？----好像并不是这样的，如果我们看着一个婴儿成长为成人的过程，我们会发现这是比沙画更神奇更复杂的过程，上帝（如果存在的话）不需要给孩子的手和脚套上模子，孩子的家长也不必这样做，孩子自然地就会长大。如果一定要用沙画来进行类比，这至少是一个能自己长大的「沙画」。当然，更不必说发育成熟的「沙画」还得要能繁殖。换句话说，生命的「沙画」只需设定少量的规则，不断自己迭代、繁殖、突变、空间运动、竞争，就可以呈现出我们眼前所见到的复杂世界，不需要事事都像绘制沙画的僧人那样费心费力。正是通过这些简单的规则，形成了我们眼前见到的种种有序，并且将这种有序不断维持下去。

（一）沙堆的比喻

我们首先从那些看起来与沙画相似的图案说起。事实上，通过迭代、进化等方式就可以形成各种类似沙画的复杂图案。我们可以有很多种看似不同的途径来「绘制」相似的图形，例如：通过迭代（各种迭代函数系统），可以产生出复杂而漂亮的分形图案，而动物内的气管和血管，植物的树冠和根系等的形成和生长过程本身就利用了这种分形的性质；而在空间博弈中，不同的物种抢占有限的空间资源，它们相互合作、背叛，在一定的参数范围内，最终在空间中也可以形成空间混沌、动态分形和进化「万花筒」。通过一些简单的规则（复数运算、格点间相互作用等）我们就可以「计算出」这些图案，这些图案还可以不断迭代，不断演化，因此某种程度上非常像生命。



图 2 - 三种「迭代」产生类似沙画图案的方法。第一幅图是著名的 Julia 分形²，第二幅图是 Nowak 等人用博弈论产生的「进化万花筒」³，第三幅图是通过类似「自组织临界」的沙堆模型的方法「生长」出来的⁴。

「计算」可能就是生命的本质。Mathematica 的创始人 Stephen Wolfram 是一个「计算主义」者，他的著作《一种新科学》始终保持着这样一种理念：我们所生活的世界是计算的，而元胞自动机（cellular automaton）正是可以用于描述这种计算的最简单的模型。从元胞自动机开始的一些模拟有可能蕴含了理解复杂性问题的钥匙，尽管这个模型非常简单，它依然可以表现出周期、混沌或者分形（fractal）结构等各种有意思的情况。

欢迎访问：电子书学习和下载网站（<https://www.shgis.cn>）

文档名称：《临界：智能的设计原则》傅渥成 著.epub

请登录 <https://shgis.cn/post/239.html> 下载完整文档。

手机端请扫码查看：

