



前沿科学探索书系

混沌及其秩序

走近复杂体系

百家出版社

[德]施特凡·格雷席克 著 胡凯 译

Das Chaos und seine Ordnung
Das Chaos und seine Ordnung



混沌及其秩序

走近复杂体系

〔德〕施特凡·格雷席克 著
胡 凯 译

百 家 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

混沌及其秩序:走近复杂体系/(德)格雷席克著;胡凯译.

—上海:百家出版社,2001.8

(前沿科学探索书系)/(德)本钦格尔(Benzinger, O.)主编)

ISBN 7-80656-402-0

I. 混... II. ①格... ②胡... III. 混沌学-普及读物

IV. 0415.5-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 050496 号

© 1998, resp. 1999 Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH
& Co. KG, Munich / Germany

© for the Chinese edition: 2001 Bai Jia Publishing House

版权所有 盗版必究

登记号 图字:09-2000-279 号

丛书名 前沿科学探索书系

书名 混沌及其秩序——走近复杂体系

编著者 [德] 施特凡·格雷席克

译者 胡凯

责任编辑 唐少波 丁翔华

封面设计 张宁 梁业礼

出版发行 百家出版社(上海天钥桥路 180 弄 2 号)

经销 全国新华书店

印刷 商务印书馆上海印刷股份有限公司印刷

开本 787×1092 毫米 1/32

印张 3.625 **插页** 2

字数 70000

版次 2001 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 7-80656-402-0/G·578

定价 10.00 元

导 言

仅仅是1996年和1997年的自然科学及技术出版物的数量,就超过了自有文字传播以来到第二次世界大战为止,世界上所有学者的相关著述的总和。如此大的知识量不仅使外行望而却步,就连专家也很难了解自身学科的全貌。在这种背景下,我们该如何确认哪些知识是有价值的,它们应怎样发展,会对我们产生什么影响?就显得尤为重要。因为正是自然科学与我们生活的各个方面息息相关,即便我们毫无察觉,但我们却无时无刻地要与它打交道。

本丛书旨在作为茫茫知识海洋中的航标,导引我们遨游自然科学和技术研究的最为重要的专业领域;文笔通俗易懂,重点放在基础性、关键性的知识和理论,并且自始至终刻意地省略了艰深的细节问题。

担纲本丛书写作的是一些杰出的科普作家,他们的日常工作就是用深入浅出的语言向人们讲解复杂深奥的科技内容。我感谢他们每个人,感谢他们对这一项目表现出来的自告奋勇精神和富有创造性的合作。

本书介绍的是还十分年轻的、对复杂系统的研究工作。每个人肯定都亲身体验过微小的因由引发巨大影响的事例;而“中国上空的一只蝴蝶振动双翅,美国某处便下起了



雨”的情况也确实存在。施特凡·格雷席克(Stenfan Gresschik)用十分生动而直观的例子描述这些过程,向读者展示科学家们从创造性的理论中找到的东西,以及对复杂而互相纠葛的过程施加影响的可能性。吸引子和分形的奇异世界就这样轻松地展现在读者眼前。尽管大家很难相信,但无规则性,湍流,说得简单一点,“混沌”是所有生命形式的正常状态。

奥拉夫·本钦格尔

目 录

导言	1
差之毫厘 谬之千里	1
混沌的特征	9
吸引子——系统行为的趋向	19
通向混沌之路	28
分形——大小各异的孪生儿	38
自组织	46
我们生活在混沌的世界里	57
医学界的混沌——心律不齐	57
太阳系:存在于大系统中的混沌现象	64
恼人的旋涡	71
幻变的天气——难为的预报	81
交易所——股市暴跌前的警告	89
地震——没有预兆的灾难	95
附录	101
术语释义	101
其他文献	106

差之毫厘 谬之千里

许多重要的事件都是在不经意之间发生的。

1963 年的一个早上,为躲避那台陈旧的计算机的噪音,气象工作者爱德华·洛伦兹(Edward Lorenz)来到麻省理工学院(MIT)的咖啡馆里,在那里品尝咖啡,度过了近一小时的时光。也许那时他正像那些遵循传统的研究人员一样,煞费脑筋地思索科学问题,也许他正与同事们谈论最近的那次足球比赛。而同一时间里,他的计算机正在费力地处理简单的天气预报。

由于在那个时代,计算机的工作速度还很慢,洛伦兹只给他的计算机安装了 3 个用以联系温度、风速和热流数据的公式。当然,现实中的天气情况要复杂得多,然而我们的科学家无法长年累月地等待计算机的分析结果。

因为那时的计算机不仅噪音大,工作速度慢,而且准确度不高,所以洛伦兹并不信任计算机打印出来的结果。因此,他启动计算机程序时输入的初始值并不是前一天的最终结果数值,而是一个中间值。这样,计算机将对一段时间里的气温进行两次计算。当然,如果两个天气图像不一致的话,那显然说明在什么地方发生差错了。那天早晨,洛伦兹将 0.506 作为初始值输入计算机后——那是计算机在前一天给出的中间值,就去享受他的咖



啡了。

然而当他回来的时候，令人匪夷所思的事情发生了。尽管在一开始对天气的预测与前一天得出的结果一致，但惊人的差异马上就出现了，因为两条计算曲线相似之处都消失了。奇怪的是，这并不是因为计算机的运算出了差错，因为当洛伦兹再次用 0.506 启动程序时，计算机仍旧得出了相同的结果。

究竟是什么地方发生错误了呢？洛伦兹是个聪明人，他马上就得出了正确的结论：计算机自己进行运算时所使用的初始值精确到小数点后 6 位，而洛伦兹输入的中间值只有 3 位小数。这就是说，精确的中间值应该是 0.506127，而不是 0.506！这万分之一的误差——这种误差大约相当于多了一阵轻柔的微风——很快就使天气预报变成一片混乱。这就是我们今天所熟知的“蝴蝶效应”，也就是：即使是细微的影响也会使天气发生急剧的改变。（说得更具文学性一点：在中国，一只蝴蝶轻轻地扇动一下翅膀，可能会在大洋彼岸掀起一阵飓风。）

对气象工作者来说，那一天是黑暗的日子。洛伦兹意识到：“如果大气层真的这样活动的话，那么要想作出长期气象预报就根本不可能了。”我们自己的痛苦经历能够证明洛伦兹的见解是多么有道理。在今天，即使拥有遍布世界的、密集的测量网，以及超级计算机和精制的模型，气象预报的可信度也只局限于对一周以内天气的预测。尽管昨天电视里的那个“小丑”说今天阳光灿烂，但我们却会被夏日的雷暴雨浇个正着。我们中有些人不时



会刻薄地写道，“明天的天气会和今天的一样”，这种说法比气象工作者的预报更具可信性。当然，这种想法未免太夸张了一点。

但是那一天的经历并非只对气象工作者有意义。起初，洛伦兹的结论并不为他的同事们所认可，因为他们将错误归咎于计算机（“那些计算机本来就不可靠”）或所使用的数学方法（“根本就无法用几个等式来模拟天气情况”）。但是，它冲破了束缚人们思维的堤坝，并为新的研究领域的开辟奠定了基石。在以后的日子里，科学家们发现，和天气一样，许多迥异的领域都对初始条件具有敏感的依赖性。例如：交易所行情在几个月的时间内保持稳定，却在一瞬间突然崩溃，成千上万的股民面临破产。所谓的专家（那些碰巧被摄入镜头的人），会用“心理因素”来解释实际上他们自己也不明白的股市狂泻的原因。又比如在澳大利亚，因为有人喜欢打猎就放养了几只兔子，但几十年后几百万只兔子却将地表啃得光秃秃的。而花上几个小时测量水龙头滴水间隔时间的研究人员，发现的也是最狂野且没有规律的节奏。

科学家们立即用“混沌”（Chaos）这个词——来形容这些系统没有规律和无法预测的运作方式。对我们来说，“混沌”概念的提出引起的激动和兴奋是令人诧异的，因为“因由小，效果大”根本不是什么新的见解。在日常生活中，我们每天都会碰到这样的例子：路上的一次错误转向会使我们迷失方向并迟到半个小时。当然也有正面的例子。想必大家都在报纸上读到过关于某些幸运儿的



报道：他们因为在去机场的路上堵车而幸运地没有赶上半途坠毁的飞机。为什么偏偏在科学界有人认为可以对系统的未来作出长期预测呢？为什么我们直到现在才意识到“混沌”的存在呢？

我们会有这种想法，在一定程度上必然是因为在没有遇到“混沌”之前科学已经取得了极大的成功。从最早的自然研究者开始，人们就认为世界是有规律的，是可以预知的。很久以前，古埃及人就发现天体的运动具有周期性。公元前 585 年，古希腊哲学家米利都(Milet)的泰勒斯(Thales)甚至正确预测了日食的发生。17 世纪，牛顿对古代的传统科学做了进一步的发展。据说他是在苹果落到他头上后总结出三大力学定理的。这以后又有了“物体的加速度与施加于其上的作用力成正比”的定理。这样，学者们不仅知道行星和苹果的运动方式，而且还了解了促使它们运动的原因。

在以后的几个世纪里，自然科学家和数学家逐步发展了牛顿的设想。电学和磁学的秘密渐渐地被揭开了。微分方程式告诉熟练的数学家们，物体在将来的随意运动状态，所有必须填入方程式的只不过是作用力和物体的初始状态，即任意某个时刻物体的位置和速度。尽管大多数的微分方程式我们无法解开，但是这看起来只不过是数学问题而已。在 18 世纪和 19 世纪，很少有学者会怀疑世界万物发展的可预测性。

比埃尔·西蒙·德·拉普拉斯(Pierre Simon de Laplace)也许是最能代表那个时代人们想法的人。拉普拉



斯是那个时代少有的全能天才之一。他不仅是一位著名的哲学家和数学家,而且他还进一步发展了概率运算。拉普拉斯相信,“在某一时刻能够领悟宇宙各组成部分之间全部关系的智者,能够预言过去和将来所有时刻的一切位置、运动和一般关系”。

对他而言,世界就好像一个巨大的钟表机构。当然它太复杂了——因为它由太多的部分组成,以至于人们无法完全认清它,但是只要有准确的梗概了解和足够快的计算速度,原则上它是可以预测的。也许还值得一提的是,拉普拉斯所说的“智者”指的并不是神。事实上他是个无神论者,在他的世界里是不需要神灵的。而人类也没有自由贯彻自己意志的余地,因为我们自己最终也只不过是遵循自然法则的各组成部分构成的。

尽管这一决定性的世界观使敏感的人们感到震惊,但是直到 19 世纪末,人们还很少有理由对此产生怀疑。而且,建立在自然科学基础上的技术也有力地证实了这一论断:18 世纪发明的蒸汽机的效率比人力和牲畜的效率 high 得多。如果不考虑蒸汽机有时也会发生爆炸的情况,它们的工作寿命也与估计的一样。铁路的出现使人们拥有比过去一切时期都更灵活的移动能力。最终,人类甚至学会了借助工具来实现飞行的梦想。

在这些成功面前,持怀疑态度的人如亨利·彭加勒(Henri Poincaré)被大大地忽视了。19 世纪末,彭加勒参加了一个由瑞典国王奥斯卡二世(Oskar II)举办的比赛。那时他提出了一个问题:太阳系是否稳定?这个问



题听上去很简单,因为我们的地球毕竟已经围绕太阳运行了几十亿年,就是月亮也像我们的祖先几千年前所记录的那样仍然陪伴在我们的身边。但从数学角度看,这个问题决不是老套乏味的:两个互相环绕的天体的运动方程可以精确地解开——也就是说存在描述这两个天体运动的方程式——但是如果涉及的是 3 个天体,这样的解决方法就不存在了。必须一步步地进行数字运算,而这正是像赫拉克力士(Herkules)的 12 项使命那样艰巨的任务(今天这项工作是由计算机完成的)。人们在特定的时刻观察天体,接着估算它们在一段极短的时间内的运动情况,然后确定它们新的位置并周而复始地重复上述的工作。

彭加勒凭借其著作《关于三体问题和动力学等式》而获奖。尽管他在著作中没有指出太阳系会解体,但是他证实了由 3 个天体构成的系统就可能是不稳定的了——更不用说我们的太阳系那样更复杂的系统了。就像洛伦兹 70 年后所发现的,这位法国科学家意识到了初始条件的重要性:“初始条件的细小差异可能会最终导致迥异的结果……想要作出预测是不可能的,我们只能接受随机的结果。”对“我们的地球决不可能在未来的某一天从木星旁滑过,飘入宇宙之中”的说法,我们不应该太肯定。彭加勒可以被看作是“混沌”——就是关于那些因为不知道其确切的初始条件,而无法预测其运动方式的体系——论断的鼻祖。但是,他的革命性见解并没有为他带来相应的荣誉,因为与他同时代的人几乎没有注意他



的论点。只有在洛伦兹的观点为人所知后，人们才重新回忆起他。

然而混沌理论扮演的决不只是新兴科学领域的角色，它还影响着人们对研究方法是否具有科学性的理解。在今天，一项研究结果只有被证实能够得以再现——也就是说，任何一个其他的研究者重复这个实验时也能得出相同的结果，才会被“科学协会”所承认。但是问题在于，在现实中显然没有两个实验是一模一样的。温度和压力总是很容易出现偏差，机器设备在细节方面也大不相同——在医学界，待诊治的病人之间的差异也许更大。科学家们过去不会（现在也不会）过多地注意这些差异。他们至少相信强有力的“因果关系原则”：即使实验条件各不相同，但是它们至少是相似的。相似的条件应该导致相似的结果。但在许多系统中，细微的差异会完全改变结果。因为可再现性标准的存在，一些研究结果只能被认为缺乏科学性而被扔进字纸篓。

科学的另一基础支柱是“简化处理”。我们的世界太复杂了，以至于我们无法将其作为一个整体来分析。就是再简单的物体也是由亿万个原子组成的，每个微粒都与周围的环境相互影响，相互作用。即使是拥有最高效的计算机的最好的科学家也无法完整地把握这张错综复杂的网。所以，科学家将问题不断地简化和分解，直到他们能掌握问题的全貌为止。

一位物理学家在计算网球飞行轨迹的时候，他所注意的并不是那个包裹着棉毛纤维的橡胶球。他不关心网



球场上的热流,更不用说太阳、月亮和星星的重力了。所有的这些细节问题只会使计算变得更加烦琐。相反,他将网球看作是一个与球体等质的、同样受到重力影响的质点。如此一来,他就将问题简化成他认为是重要的几个方面。这样,简单化的问题许多学生都能解答。当然,物理学家们都知道,网球并不等同于质点,网球的飞行和质点的飞行也是不一样的。但对此他们又会用“因果关系原则”来回答:“它们是相似的,所以它们的运动方式也是相似的。”

混沌理论指出,简化处理的合理性是有限的。就好像一条手臂离开了身体的其他部分就无法发挥作用一样,如果我们忽视了环境因素,许多系统的运作就可能会得出全新的结果——即使我们忽略的只是蝴蝶翅膀的震颤。

混沌的特征

如果想将我们的世界划分成可预测的和不可预测的两部分,我们应该从哪里入手呢?在这方面,“线性”和“非线性”这两个概念扮演着极其重要的角色。打个比方,就让我们将周末从柏林开车去汉堡的豪克·穆勒先生,作为我们的考察对象吧。因为不愿碰上塞车,所以他早早地就出发了。清晨 5 时整,他驶上了高速公路。豪克知道到汉堡的距离大约有 300 千米。于是他惬意地靠在驾驶座上,踩足油门,将车速提升至每小时 120 千米。120 千米/小时,豪克觉得这个行驶速度正合适。短短几秒钟的时间里,他已经计算出只要两个半小时他就能到达汉堡了。于是,他用汽车电话告诉他的女友——她当然很恼火豪克这么早吵醒她,因为她还睡着呢——“早上好,乌塔,我大约 7 时半到你那里。”

那么豪克的计算究竟有多大的把握呢?和洛伦兹的天气预报一样,豪克对行车的初始条件只有大概的了解。速度计并不能精确地标识速度,一般情况下读数总比实际速度高出几个百分点。况且,300 千米的路程也只不过是大概的估测而已。那么,如果速度计显示的时速比实际速度快 2 千米的话,就像洛伦兹的天气预报那样——豪克会不会直到晚上或甚至直至下个星期才赶到



汉堡呢？

这是很容易估算的。豪克行驶的里程是与时间成正比的，说得确切一点，它等于时间与速度的乘积。科学家将这种联系称为线性关系，马上我们计算出，如果真实的时速是 118 千米而不是 120 千米的话，豪克只会比预期的时间迟到 3 分钟。这样，就算他的女友住在巴黎或巴塞罗那，我们也能用同样的方法计算出他到达目的地的时间。尽管迟到的时间会长一些，但它仍与行驶时间成正比并可以被精确地预测。对于所有线性系统来说，细小的偏差只会造成细微的影响，而这种影响是可以估算的，比如：我们的收入与工作时间的长短成正比；并排放置在平静的河面上的两艘纸船会长时间地并肩行进，因为水流在相邻的两点的速度几乎是一样的；而金属弹簧或橡皮筋的拉力大约与其拉伸的程度成比例。如果将这些以线性方式运作的现象归纳起来，我们就能预知大千世界有序的那部分。

为什么打台球那么难

但我们也熟悉另一些系统，在那些系统中，微小的变化可能产生极大的影响。比如，如果我们试图在每次掷色子时都掷出相同的点数（最好让我们说每次都掷出个 6 点吧），那最终我们会发现，掷出的结果根本就是随机的。又比如，我们试图将一支铅笔笔尖朝下平衡在台面上，最终它每次都会倒向不同的方向。可惜，许多系统都是这样缺乏对外界变化的抵抗能力。就让我们来回忆一

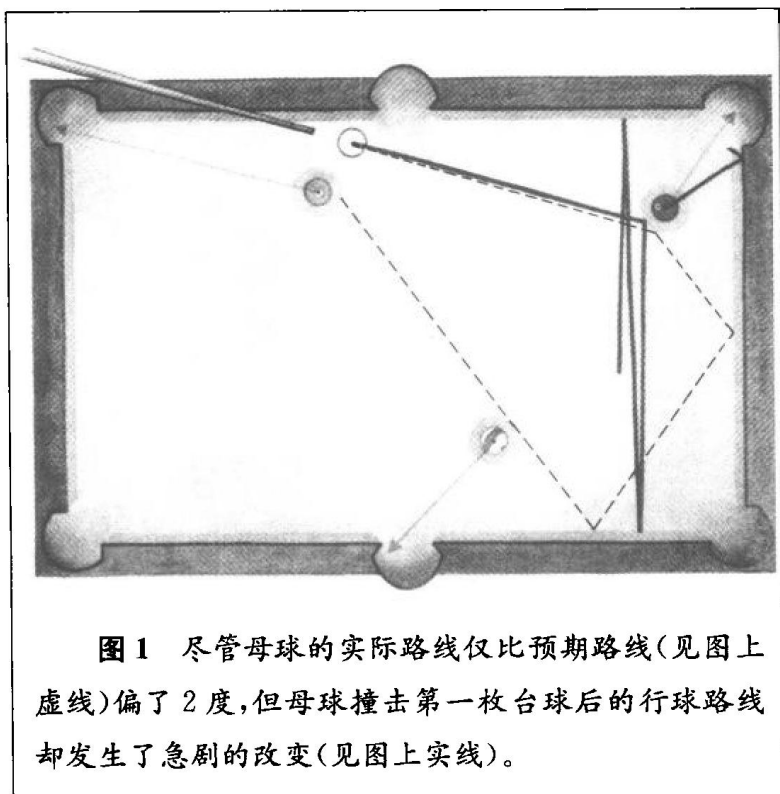


图1 尽管母球的实际路线仅比预期路线(见图上虚线)偏了2度,但母球撞击第一枚台球后的行球路线却发生了急剧的改变(见图上实线)。

下上次那场(令人沮丧的)台球赛吧。原则上台球是一项简单的游戏,只要对不过几米的行球路线和可能的碰撞作出估计就行了。但为什么就连职业选手也觉得控制球的碰撞是相当困难的事呢?是因为手的颤抖吗?或者还是因为打球前喝了点啤酒的缘故?

当然不能排除这些原因。但请设想我们观察的是一位冷静的选手。他离取得冠军仅一步之遥并精确计算了母球的行球路线。如果一切顺利的话,母球将滚动1米