

■ [美] C. 格里博格 J. A. 约克编
■ 杨立 刘巨斌等译 ■ 刘式达 杜先之等校

混沌

对科学和社会的冲击

湖南科学技术出版社



The Impact of Chaos on Science and Society

混沌

对科学和社会的冲击

[美]C.格里博格 J.A.约克编

杨立 刘巨斌等译

刘式达 杜先之等校

湖南科学技术出版社

THE IMPACT OF CHAOS ON SCIENCE AND SOCIETY,

by Celso Grebogi and James A. Yorke

Copyright ©1997 by The United Nations University

Simplified Chinese Edition copyright:

2001 Hunan Science & Technology Press

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by The United Nations University.

湖南科学技术出版社获得本书中文简体版中国大陆地区独家出版发行权。

著作权登记号: 18-2001-054

版权所有 侵权必究

混沌对科学和社会的冲击

编者: [美] C. 格里博格 J. A. 约克

译者: 杨立 刘巨斌等

校者: 刘式达 杜先之等

责任编辑: 戴涛

出版发行: 湖南科学技术出版社

社址: 长沙市湘雅路280号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系: 本社直销科 0731-4375808

印刷: 湖南省新华印刷二厂

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂址: 邵阳市双坡岭

邮编: 422001

经销: 湖南省新华书店

出版日期: 2001年5月第1版第1次

开本: 850mm×1168mm 1/32

印张: 13.625

插页: 4

字数: 352000

书号: ISBN 7-5357-3199-6/N·93

定价: 25.00元

(版权所有·翻印必究)

序言

1991年4月15~17日,由联合国大学发起组织的“混沌对科学和社会的冲击”学术会议在东京大学召开。全世界有24名科学家参加,包括Feigenbaum, Yorke, Frisch, Ruelle等知名学者,我国的郝柏林院士和我参加了会议。由于出版组织者的变动,会议文集直到1997年才在联合国大学出版社出版。现在经杜先之教授的多方努力,湖南科学技术出版社的积极支持,会议文集的中文译本终于面世了。

很多青年同志经常问:混沌(Chaos)和分形(Fractal)是新名词,它们对科学会产生什么影响?那么该书的文章和York写的前言,多少能给读者一些启发。假如从牛顿(1643~1727)1680年在伦敦皇家学会发表《自然哲学的数学原理》算起,物理学已经历了300年。在这300年中,物理学已经完成了两次革命。第一次是以伽利略、牛顿为代表的17世纪物质、力和运动的研究;第二次是本世纪量子力学、相对论和放射性的发现。我认为混沌和分形的发现使物理学进入了复杂物理学的阶段,该阶段的研究以与人类生活、生产更加息息相关的生命科学、地球与环境科学等为主要标志。长期统治物理学的是确定论,确定论的代表论点是法国科学家拉普拉斯的名言:只要知道初条件,我就可以决定未来的一切。对确定论的首次冲击是分子运动论,它说明对大量分子的运动,不可能用经典力学给出每个分子运动的完整描述,而必须用随机的统计方法。给确定论以较大冲击的是量子力学的出现,海森伯格的测不准关系说明无法同时精确测量位置和速度这两个量,这就说明未来有些量是不能精确预测的。而混沌的发现给确定论以最大的冲击,它

告诉我们确定的系统可以出现随机的结果，因而在确定论和随机论之间搭起了桥梁，复杂物理学中出现的像天气、地震等现象看起来是随机的，无规律的，但它们却遵循确定性的方程。这就给复杂现象的研究以巨大的动力。

下面我们给出过去和现在对一些问题的认识上的差别就足以说明混沌和分形的意义：

过去我们只知道，确定的系统只有确定的结果，现在我们更知道，确定的系统也可以有不确定的结果，这是非线性动力系统的内在随机性；

过去我们只知道，离散的动力系统（映射）的迭代可以收敛到不动点，现在我们更知道，它还会收敛到混沌吸引子，若用过去的观点看，这似乎应该叫不收敛；

过去我们总认为“海岸线有多长？”的提法，“湍流中有多少涡旋？”的提法，“现在气候变暖了”的提法都是正确的，但是现在更知道这些提法都是不合适的，因为海岸线的长度、涡旋的个数、气候的冷暖都是随尺度变化而变化的；

自然现象和社会现象本来就是多种多样的，过去我们只知道定常状态、周期状态、拟周期状态，现在我们更知道又多了一种“混沌”状态；

过去一般认为一个系统周期性的输入，一定就是该周期的输出，现在我们更知道输出的周期可以有多种，包括混沌输出；

过去我们一般知道平移不变性（对称性）、旋转对称性等等，现在我们又知道随尺度变化而不变的“标度不变性”，或“标度对称性”；

过去我们习惯于从实际空间的投影——单变量的时间序列去作预测，现在我们更知道反过来从单变量时间序列重新构造原来的相空间去作预测更有效；

过去总以为复杂现象一定要用复杂的模型来描述，现在演化规则非常简单的细胞自动机（cellular automata）就可以模拟出像雪花那样美丽复杂的图像

.....

总之，混沌的提出使我们对过去认识不到的问题有了新的认识，混沌由于其对问题的认识的概念有所突破，有所深化，它成为 21 世纪的学科前

沿已成定局。但是它对科学和社会的冲击究竟有多大？参加这次会议的各位专家都各有评说。可以肯定的是，随着科学技术的发展，这种冲击必将扩大，适当时间必有客观的评价。

刘式达

2000年8月28日于北京大学

前言

关于自然界中混沌行为的知识不断增长，而确认这种行为的科学学科也日益增加，因此促使联合国大学和东京大学共同发起组织一批博学的专家来评估混沌对科学引导以及对社会认识所产生的冲击。

混沌对科学和社会的冲击所引起的专题讨论会，是联合国大学国际科学、技术前沿系列研讨会的第一届，它于1991年4月15～17日在东京大学召开。会议聚集了来自9个国家的数学家、物理学家、生物学和医学科学家、地球学家、工程师、经济师以及社会科学家等，其中许多是混沌研究中从事各学科间混沌现象研究经验交流的先驱者和世界学术带头人。

本书由研讨会的论文组成。我们相信它的出版将会帮助不同领域的人们来评估过去20多年来混沌理论发展的普遍影响。它还将进一步加强科学家之间的相互作用，他们可能发现混沌动力学在他们各自的领域中扮演着重要的角色。下面我们对每一篇文献作些简要的评述。

Ding, (丁明州), Grebogi 和 Yorke 的文章是一篇混沌动力学的综述。他们的与研究历史有关的介绍提供了论坛，在这里能够提出和评估一些重要问题。

Campbell 和 Mayer-Kress 的文章提出了采用非线性动力学来模拟社会政治问题的论点。特别是他们研究了两国或多国之间国际军备竞赛的模型。作者强调的一个重点是即使社会现象的数学模型决不会替代政治直觉和才

智，但是数学分析在进行决策过程中，可以揭示出应当考虑的关于系统的某些不可避免的结果。

关于人脑是否遵循某些确定性动力学的问题，过去已经争论多年了。事实表明某些病态情况如慢性癫痫病确实具有一定的确定性动力学行为。对于正常人脑其动力学特性的可靠的识别仍然是难以捉摸的，但是占优势的论点支持这种看法，即根据脑电图（EEG）上记录的脑电活动，就性质上来说可能是混沌的。Mandel 和 Selz 的文章以不同的见解再度提出问题。他们认为迄今所积累的神经病学的资料表明，人脑呈现出的是一种准周期动力学。他们的文章简明扼要地总结了相关的生理事实并集中深入地查阅了所引证的支持该结论的理论论点。

混沌理论界的研究者典型地采用了各种方法来解决非线性系统中所遇到的问题。这些方法一般可分为数值仿真，定性的物理考虑（physical hand-waving），以及严格的数学理论证明。正如 Ruelle 在他的文章中指出，通过这些方法的交叉研究，在过去 10 年中展现了特别富有成果的脑力工作。他的文章简明扼要，理应使那些想要找出关于混沌与数学之间复杂而微妙关系的人们感到兴趣。

这是非常确凿的事实，枪乌贼巨轴突以及其他相对简单的生物系统在适当的环境条件下呈现出混沌动力学状态。这个领域中先驱者之一，Aihara，在他的文献中以丰富的参考资料在生物学和人工网络中提供了关于混沌及其发生的简明摘要。并且，该文用实验的和数值的两方面例证作出了充分的说明。

如果谁要列出自然科学传统分领域的表，来阐明哪一门学科从混沌发展理论受益最多的话，那物理学无疑会居首位。当评估混沌对物理学的冲击或者反过来评估物理学对混沌的影响时，研讨会引发了该领域中两位专家 Feigenbaum 和 郝柏林 的评论。Feigenbaum 的文章指出物理学日常研究由于混沌的出现而受到修正的几种方式。尤其是一些研究者的思想现在对探索流体湍流的产生和化学反应的问题更加条理系统。此外，数据分析技术的武

库也已经大大地随着非线性动力学的新方法而丰富起来，从而揭示出前所不能的潜在规律的信息。另一方面，已有的物理技术也强烈地影响着混沌动力学的研究，正如 Feigenbaum 自己在倍周期分叉的工作上就引用了从物理学相变原理中来的重整化群方法。

郝柏林的文章从混沌作为一个科学名词的历史起源开始综述，接着讨论了在科学中两套描述体系即确定性与随机性。他也触及了量子混沌和符号动力学这样的内容。为了深入地论述过去 20 年来混沌的影响和发展，他提到他的小组所编目的大量文献，包括 200 多种书和 7000 多篇论文。在认识混沌以前，研究者对一些看上去像随机运动的现象置之不理，如明确定义的系统——非线性电路以及简单的机械系统——强迫动摆，而一旦相信了混沌存在之后，物理学家们即开始在整个宇宙中注意到混沌。

量子混沌这个术语使用不当。该名词实际上想要指的是经典混沌的量子力学印迹，也就是说量子力学系统其经典对应呈现出混沌动力学。Ikeda 的文章评述了这个激动人心的领域中的一个方向，即量子混沌有可能作为不可逆性和耗散的根源。他的文章对有兴趣详细研读该课题的人们来说是有价值的。

混沌这个词如果单独使用，是典型的关于系统的不稳定的瞬时行为。这一点显然是不够的，当人们面对着要了解发展充分的湍流而其特点具有空间和时间的复杂性时，Kaneko 沿着这个方向已经迈开了一步，而他的同事们研究了包含大量耦合的混沌子系统，即所谓耦合映像点阵 (CML)。Kaneko 对本书的贡献是他总结了该领域中的最近进展，特别是对有可能将 CML 应用于生物系统的模型建立和信息处理等，作了详细说明。

正如郝柏林在文章中指出，生态学家 Robert May 已经在某种程度上使物理学家从他们的 300 年确定性老梦中惊醒过来。因为 May 早期对一个简单的叫做 Logistic 映射的生态模型的研究，已经对复杂生态模型的理解取得了很大的进展。问题是这个理论认识如何联系真实世界？这就是 Kendall, Schaffer, Tidd 和 Olsen 的文章中所提出的论点。他们提供的第一个有趣的结果表明，与质

朴的直觉相反，在生态系统中混沌的出现可以加强物种的生命力，使其在面对区域的和局部的扰动时得以生存。文章中所描述的另一结果是关于麻疹传染病的动力学原因；他们提出患病人口的变化，在经历一个多年周期后，可以认为是一种激变诱发的间歇现象。在这篇引起兴趣的文章中还有其他一些推测的意见。

本文集的另外一篇文献，由该领域的学术带头人，从生物学和医学科学展望的角度写成。经过了过去十余年，Glass 及其同事们已协调一致地在运用动力学方法来了解复杂的生理学现象方面开辟了一片新土地。在这篇文章中他主要集中精力研究动态病的理论和实践，这种动态病是以不规则时序表征身体病态情况的。我们感到最惊人的是他在心脏学学科上有关理论和实验密切关联的生动描述。正如他认为，“这样一种理论和实验的交织，在生物学科学上是少有的，而且也清楚地表明非线性动力学与医学问题的关联。”

有两篇文章是关于地球科学的，它们覆盖了气象学和地震学。Speranza 回顾了气象学中混沌的长久历史，它是最先识别混沌现象的领域之一。他断定尽管有这样早的开始，但混沌对气象学的冲击仍停留在整个学科的一个有限的理论区域。他的分析指出了一些途径，其中一些新的解决中尺度系统的数学方法（译注：相对于过大或过小尺度系统讲），当用于大气动力学时可望混沌理论对气象学科产生较大的影响。Keilis - Borok 评估了混沌对地震研究和预测的冲击，他断言即使在现阶段混沌理论的应用性还远不清楚，但非线性动力学和混沌的概念可能已具有重要的意义。

混沌对工程冲击的评估文章出自 Bishop。文中他强调在如同防止一条船倾覆这样的工程应用中，扮演临界角色的不是混沌吸引子而是混沌鞍点，它引起混沌的过渡，从而构成整体工程完整性的一个最重要的一环。他从自己对非线性分析的经验得出结论，认为混沌动力学的新观念及其关联的总的几何概念，无疑对工程问题的分析将会有深远的影响。

经济原理的传统知识把经济时序的起伏归因于随机的外扰动。只是在最近，人们对经济数据中非线性存在和经济系统的可能的确定性机制才予以严重关注。经济学家以及其他人士已经提出许多方法来建立一个不论是由决定性源或随机性源所产生的给定时间系列。Boldrin 在他的文献中简要地总结了这些发展的目前情况。他指出许多经济学家受到混沌理论在物理科学中成功的激励，已经作出贡献建立起动态时间序列分析技术的基础。但是这种技术对实际数据的应用还不能产生满意的结果。不管怎样，非线性动力学和混沌的发现已经提供一个新的角度来评价老的资料以及一个新的前景来发展经济学理论。

Mayntz 的文章讨论了自然科学理论和社会科学理论之间的关系。她深表怀疑的是在理论交换中的一种倾向即从自然科学中借来一些概念把它重新措辞用以表示众所周知的社会现象。她认为这个过程没有导致新的认识。

最后，Ueda 的文章论及了奇怪吸引子和混沌的起源。这是一篇他勇敢奋斗的个人报道，他为了实现他确信的非同一般的想法，抵制住传统和误解的强大阻力。这对任何一个对混沌发展史感兴趣的读者来说都是一篇精彩惊人的文章。

以 Feigenbaum 为主席的专家们针对混沌对科学和社会的冲击，展开了交叉学科间的讨论。讨论的要点记录在本论文集的最后一章中。

最后，本书的文献体现了许多学科的广阔领域，而本书自身又强调了过去 20 年来我们已经亲眼目睹的混沌动力学研究的迅猛发展，并且揭示了混沌对自然和社会正在开始产生影响的前景。

Celso Grebogi 和 James A. Yorke, College Park

Mingzhou Ding (丁明州), Boca Raton

Water Shearer, New York

C. 格里博格博士 美国马里兰大学的数学教授、该校杰出的研究员,美国自然科学学会会员。曾获得 Senior Humboldt 奖、Toshiba Chair 奖和 Fulbright 学会奖。

J.A. 约克博士 美国马里兰大学著名的数学教授,自然科学技术学院的负责人。曾在 1980 年获得 Guggenheim 学会奖,是广为人知的“混沌”一词的创造者。

目 录

前言	(1)
1. 混沌动力学	(1)
2. 混沌与政治：非线性动力学在社会 - 政治问题 上的应用	(18)
3. 脑电图是一种奇怪的吸引子吗？脑干神经元放 电方式与脑电图的节律	(60)
4. 混沌对数学的冲击	(93)
5. 神经网络中的混沌	(106)
6. 混沌对物理学的冲击	(124)
7. 混沌和物理学	(130)
8. 不可逆性与量子混沌	(142)
9. 高维混沌的冲击：动力系统复杂性的进一步发 展	(171)
10. 混沌对生物学的冲击——前景美好的研究领 域	(186)
11. 动态疾病——非线性动力学和混沌对心病学 与内科学的冲击	(218)
12. 混沌对气象学的冲击	(231)
13. 地震预报问题中的混沌概念	(241)
14. 混沌对工程领域的冲击	(254)
15. 混沌对经济理论的冲击	(274)
16. 社会中的混沌现象：混沌理论对社会学冲击 的思考	(296)
17. 奇怪吸引子和混沌的起源	(322)

18. 混沌对地球物理学的冲击	(353)
小组讨论：混沌对科学和社会的冲击	(371)
开幕词	(398)
原著作者名单	(400)
索引	(402)
后记	(417)
译者名单	(419)

丁明州, Celso Grebogi 和 James A. Yorke

摘 要

本文讨论混沌动力学的基本概念及近年来的发展,其目的是为今后可能提出与讨论的重要问题提供论坛。另外,在本文关于历史的评述中将明显地看到:近 20 年来,混沌动力学在数学领域以外的深远意义已被普遍认识。其实在此以前,从上个世纪末以来,就已有持续发展。这个发展是以 Poincaré, Birkhoff 及 Kolmogorov 的名字为永恒标志。他们的播种工作,为今天我们所目睹混沌动力学的研究与应用的迅猛发展奠定了基础。

一、引言

早在上世纪中叶,Maxwell^[1]已经认识到物理系统可能对初始值敏感。但直到 Poincaré 的工作以前并不存在对混沌动力学的系统研究。1881 ~ 1886 年期间, Poincaré 在一系列论文中^[2]分析和命名了动力学系统所显示的定性特征,从此就成为该领域的学者的基本知识的一部分。Poincaré 的贡献的影响可以进一步从如下事实看出:尽管从他那个时代以来,已经取得了巨大进步,但在一个世纪前引起他们的兴趣的很多问题,至今仍然是研究的前

沿。

一个典型的动力系统能够表现出各种类型的瞬时特性，为了理解一种类型的特性与其他特性的区别，可以首先考虑一个平面上的简单的连续系统。根据 Poincaré-Bendixson 定理，我们知道如果一个自治的常微分方程的一个解是有界的，不趋近于一个平衡点，那么它的轨迹必然以螺旋形式趋近一个周期轨道（极限环）。然而这样的二维自治系统不可能出现混沌。高维自治的常微分方程和平面上的自治的离散系统能够出现包括混沌在内的更加丰富得多的动力特性。一个高维系统的例子是天体力学中的三体问题，对它的研究与太阳系是否稳定这类重要问题有直接的关系。Poincaré 指出三体问题通常是不可积的，在一些非常特殊的点附近，他称为同宿点，相空间轨迹必然是非常复杂的。这一观察结果可认为正是动力系统中具有混沌特征的第一征兆。探索在这样一个同宿点附近有什么情况发生已开展了多年。早在本世纪初，Birkhoff^[3]已迈出了重要的一步。他的结果提供了在同宿点附近一个更详细的动力学描述。Cartwright 和 Littlewood^[4]在他们研究 Van der pol 方程中偶然碰到了同样的同宿点现象。Levinson^[5]简化了 Cartwright 和 Littlewood 的一些工作，并提供了简化的 Van der pol 方程的复杂特征的一个更精细的描述。Smale^[6]将他们与他的马蹄映射相连，解释了他们的结果。马蹄映射（一个长方形与它被折叠成马蹄形的自身的映像相交所产生的一种映射）存在一个混沌的不变集合，他指出这样的马蹄必然能在同宿点附近发现，而且嵌入在这样的马蹄内有无穷多的周期点（有不同的周期）和无穷多存留在马蹄内的不规则振荡轨迹，这些轨迹不会稳定到周期态。接着就证明了许多非线性系统中都存在马蹄，如 Duffing 方程、Van der pol 方程，以及在一些典型的映射中，如 Hénon 映射。在大约同一时期，Peixoto^[7]作出了一项重大贡献，他在微分方程研究中，引入了拓扑空间的概念，使两个定性等价的系统有了精确的含义。与这些工作同时进行的还有俄罗斯数学学派的工作，最著名的有 Kolmogorov 和他的学生们^[8~10]。我们将在以下

的几节中进一步评述他们的贡献。

马蹄的存在本质上并不意味着能观察到混沌特性。马蹄自身的不变集合是不稳定的。有趣的是虽然混沌吸引子看起来总是包含有同宿点,但同宿点的存在并不能保证吸引子是混沌的。因为在这些区域也存在周期吸引子。证明在能够模拟物理系统的非线性映射中,存在混沌吸引子仍然是一个引人注目,但又是很困难的未解问题。在一个典型映射中已经取得了进展,例如一维二次映射,在一系列具有正测度的参数值范围内具有混沌吸引子^[11]。最近 Carleson 和 Benedicks^[12]证明对有充分小的 Jacobian 的 Hénon 映射也有类似的结果。

在一个系统中存在混沌轨道会有明显的分叉并能间接地观察到,即使轨道不是吸引的。当一个系统有多个吸引子时,在有关吸引域的边界能够呈现非常复杂的图案。对于平面上的可逆的映射,他们的边界是分形的。这使得初值在边界附近时,预测最终状态异常困难。一般来说,这样的边界包含有马蹄,因而包含有无穷多不稳态的周期轨道。在一个动力系统中仍然有其他的非吸引混沌集合,这表明它们是瞬变混沌。实际上这样的瞬变混沌和它的特征对正确认识系统是重要的。因此,一般地说,对实验和数值系统研究吸引的和非吸引的混沌集合的特征是一个重要的问题。

二、混沌的测定

A. 熵

当轨道的初始值不能精确地知道时,沿着轨道前进,解的指数形式发散意味着信息的丢失。熵是用来测定在单位时间内丢失了多少个存储单元的信息。根据概念的不同也根据轨道信息丢失平均值的算法的不同,熵的定义不同。

在信息论中,信息熵的定义是 Shannon^[13]在 1948 年引入的。在动力系统中熵的使用是由 Kolmogorov^[14]与 Sinai 的部分合作中