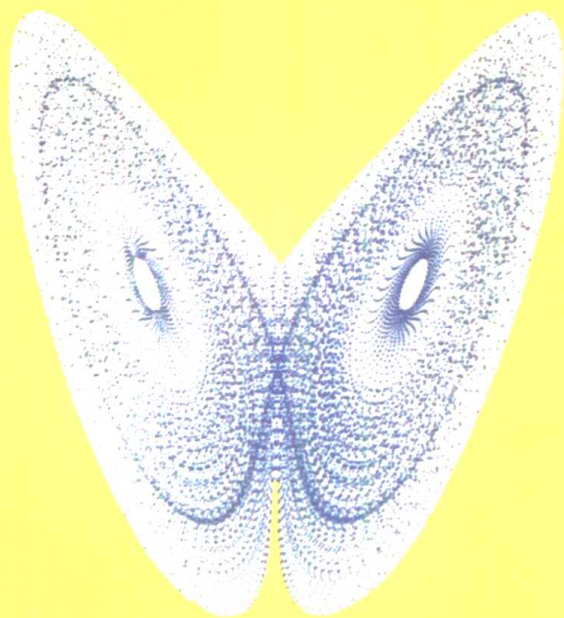


*The Essence of Chaos*

# 混沌的本质

[美] E. N. 洛伦兹 著



气象出版社

# 混沌的本质

[美] E. N. 洛伦兹 著  
刘式达 刘式适 严中伟 译  
周秀骥 审校

著作权合同登记图字：01-96-1629 号

## The Essence of Chaos

E. N. Lorenz

- Copyright ©1993 by the University of Washington Press
- Authorized translation from the English language edition published by UWP

气象出版社

## 内容简介

本书是当代世界知名的动力气象学家、混沌理论的少几位开创者之一 E. N. 洛伦兹教授在近期为总结其开创及推动混沌科学发展过程而写的一本力作。全书共分五章,全面介绍了混沌理论的基本概念,发展历程和前景展望,既是一本很有分量的学术专著,又是一本科学散文集,哲理、文学与科学融为一体,读来引人入胜。本书可供对混沌理论及现代数学、物理学感兴趣的大专院校师生、科技人员和中等文化水平的读者阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

混沌的本质/刘式达等译. -北京:气象出版社,1997. 1

ISBN 7-5029-2249-0

I. 混 II. 刘 III. 混沌学-研究 IV. 0414. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 24777 号

## 混沌的本质

[美] E. N. 洛伦兹 著

刘式达 刘式适 严中伟 译

责任编辑:俞卫平 终审:周诗健

责任技编:黄慧靖 责任校对:黄慧靖

**气象出版社**出版发行

(北京海淀区白石桥路 46 号 100081)

北京怀柔新华印刷厂印刷

\* \* \*

开本:850×1168 1/32 印张:7 字数:185 千字

1997 年 1 月第一版 1997 年 1 月第一次印刷

印数:1~2000 定价:15.00 元

ISBN 7-5029-2249-0/P·829

## 中译本出版者的话

“混沌”是近代非常引人注目的热点研究，它掀起了继相对论和量子力学以来基础科学的第三次大革命。科学中的混沌概念不同与古典哲学与日常语言中的理解，简单地说，混沌是一种确定的系统中出现的无规则的运动。混沌理论所研究的是非线性动力学混沌，目的是要揭示貌似随机的现象背后可能隐藏的简单规律，以求发现一大类复杂问题普遍遵循的共同规律。

麻省理工学院(MIT)的 E. N. Lorenz 教授由于他早在 60 年代关于混沌的开创性研究而被誉爲“混沌之父”，并提出了形象的“蝴蝶效应”。Lorenz 写过很多论文，但著作很少，这是他集中了几年精力专为广大公众所写的一本高级科普读物。当他正撰写本书英文版时我国留美学者曾旭斌博士由于工作关系，与 Lorenz 接触较多，向我社推荐出版该书中译本。我社也认为这是一本难得的好书，欣然接受了这一建议。经曾博士的多方努力，我社与华盛顿大学出版社(University of Washington Press)达成了版权协议，在此我社对华盛顿大学出版社及其版权代表 J. Lind 女士致以谢意。同时也对“大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室”(LASG)所给予的部分出版资助表示感谢。

在中译本面世之际，我们要感谢本书的译者和审校者，没有他们的努力本书是难以面世的。本书第一、第二章由严中伟博士译出；第四、第五章由刘式达教授译出；第三章及附录部

分由刘式适教授译出；序言由我社郭彩丽同志译出。中国气象科学研究院名誉院长、中国科学院院士周秀骥在百忙之中担任了本书的审校工作；中国气象科学研究院史国宁研究员为中译本做了修改润色；我社俞卫平、黄慧靖两同志本着制作精品的目的，也做了大量拾遗补缺的工作。总之，没有上述诸方面的努力，本书中译本是难以达到现有水平的。

当前社会上普遍存在着科技译著出版难的现象。作为全国唯一的气象科学出版社，我社将一如既往地多出好书，将一本本优秀的国内外专著介绍给读者，以促进学术交流和科学研究。《混沌的本质》中译本的出版，就是我社在这一系列努力中最新奉献给读者的一份珍品。

**气象出版社**

1997年1月

## 序 言

1990年春天我应华盛顿大学的邀请去发表一系列的演说,作为约30年前因Jessie和John Danz\*的捐款和远见卓识而开创的系列演讲的一部分。演说的对象是普通的听众,我可以自选演说命题。

约30年前,我在天气预报的理论方面做开拓性实验时,偶然发现了一种后来被称作“混沌”的现象,这种现象表面上看是随机的,不可预报的,而事实上却是按照严格的且经常是易于表述的规则运动着。更早一些时候的研究人员偶然,只不过是在不同的情况下,也发现过这种现象,他们往往没有认识到他们所看到的东​​西,而只是简单地意识到有什么东西妨碍了他们求解方程组或在其它方面妨碍了他们完成研究工作。我的情形是个例外,我最终认识到除非我能建立一个其解表现为混沌的方程组,否则我的实验注定要失败。混沌至少在某些情况下突然变成了某种受欢迎的东西,在随后的若干年中,我发现我自己越来越把混沌看成是一种因它本身的原因而值得研究的现象。

---

\* John Danz先生是西雅图人。1961年10月,他和他的妻子Jessie Danz在华盛顿大学建立了一个永久的基金会,其基金用于华盛顿大学每年向致力于自然科学和哲学研究并在国内和国际上享有声誉的杰出学者提供资金。这个由Danz先生和夫人建立的基金会现在称为Jessie和John Danz基金会,在该基金会的资助下去华盛顿大学的学者被称为Jessie和John Danz演讲者或教授

因此,决定这些演讲应该包括什么论题是件易事,我接受了邀请,并选择了“混沌的本质”作为论题,最终形成三个演讲。第一个演讲对混沌作了定义,并用一些简单的例子阐释了混沌的基本性质,以描述开始被称作混沌的一些相关的现象——非线性、复杂性和分维性——而结束;第二个演讲把全球天气作为一个复杂的混沌个例进行了论述;最后一个演讲介绍了当今人们日益增长的混沌意识,并提出了一个通过它人们可以设计自己的混沌系统的规定,结尾给出一些哲学思考。为符合听众的兴趣,我没有罗列数学公式,除了我定义的一些术语外,也尽量避免用专业词汇。

本书与我的演讲题目相同,也是依 Danz 演讲的脉络而写的。所涉及的内容与演讲的相同,并附加了一些内容以弥合因演讲本身受口语表达的局限而不可避免地出现的许多空白。第一个演讲经扩充变为本书的第 1、第 2 和第 5 章,第二个演讲被改编成第 3 章。因最后一个演讲以海王星的发现开头,进而介绍了 Henri Poincaré 和他的助手的工作,暂时中断了我所涉及的混沌理论的介绍,因此把它列为第 4 章。

我之所以下决心把这些演讲改写为一本书是因为尽管混沌的个别参考文献是数学的分支或某个新的学科,但我坚信混沌连同其许多相关的概念——奇异吸引子、域边界、倍周期分岔等等——能够被那些没有专门的数学或其它科学教育背景的读者很容易地理解和喜欢。与在演讲中一样,在本书中我也是用非专业的语言来讲述混沌的故事,除此之外,为避开冗长的词组显得过分重复,我还介绍和定义了一系列的标准术语。有关的数学方程组及其推导都放在一个附录中,你不用读它就完全可以理解正文,但它可以使那些有数学专长的读

者对本书更感兴趣。

当然,在正文中除了非常专业的数学,也不可能一点数学都没有。例如:两个滑板沿着一个斜面下滑 30 米,开始时相差 10 厘米,最后相差 10 米,这一图例说明可以被看作是一种数学观察;于是,所描绘的事情的语言表达就成为一种数学陈述。总之,图例说明中用了很多较简单的数学,其中的大部分是数学推导的最终结果,接着,它们被转化成计算程序。不过,读者既不需要面对公式也不需要面对程序就能够得到说明中所包含的信息。

在本书的撰写过程中,我得到了许多人的帮助。首先我必须感谢 Danz 基金会,没有他们主办演讲,我可能永远也走不出这第一步。同样我必须感谢华盛顿大学选择我作为演讲人。我深切地感谢美国国家科学基金会大气科学部的气候动力学计划和该计划的现任领导 Jay Fein,感谢他们这许多年来支持我研究混沌及其在大气中的应用,并且,非常直接地,使我有可能是为本书所举的例子写出大量的计算机程序并完成计算。我非常地感谢 Joel Sloman 为本书打字以及不仅是在最后一遍手稿还包括在数不清的中间校次中所提供的帮助,感谢 Diana Spieger 为排除计算机系统上的各种障碍所给予的一贯帮助,也感谢 Jane McNabb 代替我作了大量的管理工作。

感谢芝加哥大学的 Dave Fultz 提供了他的转盘实验的照片,并感谢他和美国气象学会慧许我复制引用。同时也感谢国家大气研究中心的 Robert Dattore 和 Wilbur Spangler 准备了足够长的磁带,其中包含新加坡的多年高空天气记录,并使之付诸应用。



这里我必须特别褒奖 Merry Caston, 她逐页检查了我的全部手稿, 并提出了许多中肯的意见, 因此才使我在书中加入了许多进一步阐述的材料和其它一些修正意见。还有许多人, 我与他们有过短暂的或有时是广泛的讨论, 我所写的文字或表达的观点也受到他们的影响。在这种联系中我必须特别提到 Robert Cornett, James Curry, Robert Devaney, Alan Faller, Robert Hilborn, Philip Merilees, Tim Palmer, Bruce Street, Yoshisuke Ueda, J. Michael Wallace 和 James Yorke。还有一些人可能也对我有影响, 我却没有注意到, 另外还有一些没留姓名的审阅者, 我只能说他们的名字都应被包括在这里, 我对他们一并致谢。

最后, 我非常感谢我的妻子 Jane, 在本书的撰写过程中, 她自始至终给予我精神上的支持, 并为寻找混沌资料而陪着我一起走过无数旅途。还要感谢我的孩子 Nancy, Edward 和 Cheryl, 他们分别是律师、经济学家和心理学家, 他们成功地充当了聪明的外行人的角色, 在他们的详细检查下, 我的手稿才得以逐步完善。

Edward N. Lorenz

# 混沌的本质

## 目 录

### 中译本出版者的话

### 序 言

### 第一章 混沌一瞥

貌似随机 .....	(1)
弹球和蝴蝶 .....	(4)
缺乏韵律 .....	(13)
认准混沌 .....	(18)

### 第二章 混沌之旅

运行中的混沌 .....	(22)
混沌的核心 .....	(36)
破裂的核心 .....	(48)
另一类混沌 .....	(52)
混沌忽隐忽现 .....	(60)

### 第三章 混沌天气

从预报上说:两种流体一种处理 .....	(68)
从气象上说:一种流体两种处理 .....	(71)
不能完成的实验 .....	(76)
来自转盘的声音 .....	(77)
500万个变量的动力系统 .....	(86)
结论 .....	(93)

### 第四章 迎战混沌

序言 .....	(102)
识别 .....	(105)

被遗忘的角落 .....	(112)
探索 .....	(121)
奇怪吸引子 .....	(127)
混沌的普遍性 .....	(137)
建造你自己的混沌 .....	(142)
随机性是混沌吗 .....	(148)
<b>第五章 其它混沌</b>	
非线性 .....	(152)
复杂性 .....	(155)
分形性 .....	(159)
<b>附录 1 蝴蝶效应</b> .....	(171)
可预报性:在巴西一只蝴蝶翅膀的拍打能够在美国得克 萨斯州产生一个陆龙卷吗? .....	(172)
<b>附录 2 数学漫游</b>	
数值积分 .....	(175)
蝴蝶 .....	(178)
滑雪坡道 .....	(179)
体积守恒的混沌 .....	(181)
Hill 的简化问题 .....	(182)
Logistic 方程 .....	(184)
Lyapunov 指数和维数 .....	(186)
同宿性和马蹄 .....	(189)
<b>附录 3 简明词汇</b> .....	(196)
简明词汇汉文索引 .....	(205)
<b>参考文献</b> .....	(208)

# 第一章 混沌一瞥

## 貌似随机

词语并不是活的东西，它们不会呼吸，不会行走，也不会彼此相爱。然而，就像它们所服务的人类一样，它们能够经历独特的生命史。语言中一个词诞生时可能只有一个含义，但在其演化过程中它还可能获得多种既相关联又相区别的新含义。这些新含义经常是老含义很自然的延伸。我们小时候都学过“热”和“冷”这两个词

的含义；而当我们长大后却发现“热烈的追求”、“冰冷的安慰”，或者“火辣辣的拒绝”、“冷淡的接待”并非是一些可测量或估算其温度的物质或物体。在另一些例子中更新的含义则是一些专门术语。同样在童年时代，我们学过“喝”的含义；而长大后听人说“你们喝多了”时，我们会明白这绝对不是在说我们刚灌下一杯橙汁。事实上，如果当有人对别人说我们爱喝贪杯时，他大概不是想简单地说明我们好饮烈酒，而是想指出我们暴饮过度以至影响健康和行为。

“混沌”一词也是如此。这个古老的词最初表示完全缺乏具体形态或系统排列，而如今则常用来表示某种应该有的秩序却没有出现。尽管这个词十分古老，但这个大家熟悉的词并没有濒临死亡；相反，由于它近年来获得了若干既相关联又相区别的专门的含义，它的重要性已凌驾于许多其它普通词汇之上。

这一术语多年来已被众多科学家用来表示这样或那样的随机性，这并不令人惊讶。最近一个例子是诺贝尔奖获得者、物理学家 I. Prigogine (普里高津) 及其同事 I. Stengers (斯坦格) 所撰写的力作《从混沌到有序》\*。他们研究许多无序系统自发地获得有序结构的方式，如无定形的液体如何在冷却时固化形成精致的晶体。一两代人以前，数学家 N. Wiener (维纳) 有时甚至会用这个单词的复数形式，来强调说明诸如一群随机分布的气体分子或云中杂乱无章的水滴群这样的系统。

这种用法仍在延续。但自 70 年代中期以来，这一术语已越来越多地以其新获得的某种含义出现在科学文献里。可以肯定，目前存在多种新的混沌定义。在本书中我们把目光集中于其中一种。有许多随时间而发生某种变化的过程，如钟摆的摆动、山石的滚落和岸边海浪的破碎。它们中的一部分或许包括滚石和碎浪而钟摆除

\* 英语 cold comfort, 指毫不起作用的安慰——校者注

\*\* 该书由上海译文出版社 1987 年译成中文出版——校者注

外,其变化并非随机却貌似随机。我用混沌这个术语来泛指这样的过程——它们看起来是随机发生的而实际上其行为却由精确的法则决定。这一用法恐怕是当前科技著作中最常遇到的,而探讨这种意义上的混沌的科学家们已不再感到有必要说得那么清楚。

在浏览当今各种学说时,我们要记住,一些新提法可能会相互混淆。有时所描述的现象是一些在空间上貌似随机分布的东西而非时间上的随机发展,例如点缀在田原的野花。另有一些情形,其分布或发展正是其内在本质而非貌似随机,例如编织在东方地毯上的图案。更麻烦的是,有一些其它术语,特别像非线性、复杂性和分形性,经常会在某种或某些意义上被用作混沌的同义词。我在后面文章中略述这几个相关的措辞。

J. Gleick(格雷克)在其畅销书《混沌:开创一门新科学》\*中解释了混沌的几种新含义。他认为混沌理论对科学思想的影响最终将可与相对论和量子力学相匹敌。且不论这一预言能否成真,这门“新科学”确已毫无疑问地带着某些优势进入了角逐。可以作为混沌范例的系统十分常见,毋需用望远镜或显微镜即可鉴别,不用慢转速或高速摄影机就能把它们记录下来。据认为是混沌的现象包括简单的日常小事如树叶掉落或旗帜飘扬,也包括复杂得多的过程如气候起伏或生命过程。

我用到“可以作为”和“据认为是”这样的词,是因为上述现象中的某些方面并不十分符合我所描述的混沌,即貌似随机。真实物理系统一般都至少包含一些真正的随机性。就是报时钟里看起来很规则地摆动着的钟摆也会受到气流或墙面振动的轻微扰动,扰动可由屋里走动的人造成,也可由附近街道穿行的汽车造成。如果混沌是那些仅仅看起来像而实质上不是随机的事情,那么,它就不能包括那些多少带点随机性的日常现象而仅局限于数学抽象了吗?如此一来,岂非大大削减了混沌的普遍意义?

\* 该书于1990年由上海译文出版社翻译出版——译者注

为避免上述不必要的限制,可以拓宽混沌的定义,让它包括那些弱随机的现象,只要这些现象中看起来明显得多的那部分随机性不是其微弱的真随机性的副产品即可。这就是说,现实世界中看起来具有随机行为的那些过程——或许可以落叶或飘扬的旗帜为例——应当被视为符合混沌条件,因为即使其中任何真随机性消失了,它们依然是貌似随机的。

实践中要清除一个系统的真随机性再考察其结果是不可能的。但我们经常可通过理论来猜测之。实际现象的大多数理论研究都是近似研究。科学家在研究简单的单摆运动(这恰好还不是一个混沌系统)时,很可能忽略任何外来的随机扰动和气流,而把这些因素留给更加实际的工程师去考虑。通常,他或她还会忽略掉维持单摆摆动的发条装置及其内在的摩擦力和其它所有不方便的因素。由此得到的简明系统仅是一个模型,一个完全可处理的模型。如果一个接近实际而没有系统内在随机性的模型仍然具有貌似随机的行为,就可以称这个真实物理系统是混沌的。

### 弹球和蝴蝶

我那多少有点通俗化的定义可能抓住了混沌的本质,但许多数学家会为之惊诧不已。其它行业的大多数人或许还不了解数学是多么依赖于定义。一个命题的陈述是否正确往往就取决于其中各个用词是怎样定义的。显然,要就某种现象发展一套严谨的理论,就先给出有关现象的毫不含糊的定义。

目前这个通俗定义确实是含糊的,因为“随机性”本身就有两种很不同的定义。然而,正如我们即将看到的,只需指定其中一种恰当的定义,就很容易消除这个缺陷。更为严重的问题在于那个简单的表述“貌似随机”,它很不严格,因为对某人看来是相似的事情在另一人看来不一定也相似。让我们试着给混沌下个便于操作的定义,同时又要保留那个通俗定义的精髓。

根据狭义的随机性定义,一个随机序列应满足:随时可能发生的任何事件在下一个时刻也可能发生。通常这也可理解为:某特定事件在下一时刻发生的概率等于其在此后任一时刻发生的概率。一个常用来解释随机性的例子是掷硬币。在此,可能事件只有两种:正面或反面,它们都可能在下次就发生。假如过程确实是随机的,那下次投掷出现正面的概率(比方说百分之五十或任何其它值)应精确地等于任一次投掷同一硬币而出现正面的概率;这一概率不会变,除非因投掷力量过大而使硬币变了形。如果已知这一概率,那么即使知道上次投掷结果,也不会增加我们猜对下次结果的机会。

诚然,在尚不知道某块硬币的正面概率时,我们可通过充分多次投掷结果来推测它。如果多次投掷后我们发现出现正面的机会为百分之五十五,那我们就可怀疑那枚硬币有偏向性;正面的概率过去是、现在是、将来也必是百分之五十五,而非我们原来所期望的百分之五十。

硬币是完全随机的例子。当人们考虑随机数或想用随机数发生器时,往往就是想要实现这种随机性。在广义的随机性定义下,一个随机序列应满足:下个时刻可能出现某些事件中的任一个;这并不要求过去可能发生的任何事件也可在下一个时刻发生。下个时刻的可能事件与刚发生过的事件有关。类似掷硬币且本质上也属于机会性游戏的另一例子是洗纸牌。可以认为洗牌过程是随机的,因为即使洗牌手想作假——比如说他试图在每次交叉洗牌时把牌正好分成两半再使各半的每一张牌交叉顺序叠置——他也不大可能精确地控制其手指肌肉来实现,除非他是游戏机构中的洗牌老手。但是,如果把下次事件理解为下次交叉洗牌的结果,那该过程就不是完全随机的,因为一次交叉洗牌不可能把一副牌中某种给定的顺序改变为任一其它顺序。作为特例,一次洗牌不可能完全颠倒牌序,尽管充分多次连续洗牌自然可形成各种牌序。

在确定性序列中下个时刻只可能发生一件事,就是说其演变



由精确的法则决定。因此，广义的随机性与缺乏确定性是同一个意思，这也正是我用貌似随机描述混沌时想借用的含义。

掷币和洗牌是间断时间上发生的过程——即一次接一次地掷或洗。对于像公路上车速这样的连续变化量而言，下次事件这样的概念就没有意义了。然而仍可定义广义的随机性。我们可以说：未来任一给定时刻可能发生的事情不止一种，比如车速就不止一种。在此可以预料的是：那个未来时刻离目前越近，将发生的各种可能性的范围也越小——正如在堵塞的交通中嘎然停止的小车可能会在过10秒钟后超速行驶，但不可能过1秒钟就如此。数学家发现引入完全随机连续过程的概念是有益的。但它在自然界究竟像什么却是难以描述的。

动力系统这个专业称谓是指随时间确定性地变化的系统，例如钟摆、滚石和碎浪的数学模型，以及那些具有微弱随机性的变化系统——或许可用现实的单摆、滚石和碎浪作例子。至少对模型而言，系统的状态可由一个或几个变量的数值来确定。对单摆模型，摆锤的位置和速度两个变量就足够了，其中速度可正可负，要视摆锤移动方向而定。对滚石模型，位置和速度仍是必需的。但若要使模型更切合实际一些，就必须增加一些变量以描述滚石的旋转方向和转动。碎浪更为复杂，其较完善的模型将不得不包含几十、或者更可能的是几百个变量。

回头再来讨论混沌，可以说它是确定性的行为；或者，若考虑它出现在稍微有点随机性的实际系统中，也可以说它是近似于确定性的，然而却不是看起来像确定性的。这就是说，现有状态完全或几乎完全决定未来，但却不是看上去如此。确定性行为又怎能貌似随机呢？假如真正同样的状态能出现两次以上，那末随后必然会出现的同样状态就不可能看起来有很大不同。真正发生的事情是：出现了两个几乎（但非完全）一样的状态，它们看起来十分相似，但其后的状态却不必彼此相似，从而观测到了明显不同的演变。在某些动力系统中，两个几乎一致的状态经过充分长时间后会变得毫