

混沌学

一门新科学

[美] 詹姆斯·格莱克著



社会科学文献出版社

混 沌 学

——一门新科学

[美]詹姆斯·格莱克 著
张彦 顾肃 宋永华
贾雷 陈健 等译

社会科学文献出版社

1991·北京

James Gleick

CHAOS: MAKING A NEW SCIENCE

(本书根据“企鹅”图书公司1988年版译出)

混

混沌学

(美)詹姆斯·格莱克 著

张彦等译

社会科学文献出版社出版、发行

(北京建国门内大街5号)

新华书店经销 一二〇二工厂印刷

850×1168 1/32开本 10.25 印张 266 千字

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷

印数 0001—4600

ISBN7-80050-193-0/C·23 定价6.50元

中译本序言（一）

随着历史的进展，物理学家时而转移他们研究的重点。有位认识的物理学家在他的一篇文章中说，1900年世界是统计性的（由于统计物理的出现），1910年是相对论的（由于相对论的出现），1930年是量子化的（由于量子力学的出现），而等到1980年是非线性的！美国不久前出版的《90年代物理学展望》将“混沌”列入稀有的跨多学科分支的课题，混沌是非线性现象的核心问题。这是物理学愈分愈细分久必合的一个范例，同时也说明自然界存在的现象总有一天会得到物理学家和科学家的普遍重视。这方面的科学文献、专著也如雨后春笋遍及物理学各领域，有令人目不暇接之感。

其实物理学的定律是以非线性为开端的，如德国科学家开普勒（J. Kepler）对天体轨道的研究就是非线性系统的研究。1831年法拉第（M. Faraday）的振动水槽实验发现了水中有槽振动频率一半的分频，也就是现在观察到的分岔的滥觞。几乎同时罗素（Scott Russel）发现了流体中的孤波，嗣后又有彭加勒（H. Poincare）在天体物理的研究、瑞利（L. Rayleigh）对声及声与光的衍射的研究……而到了20世纪前后，由于放射性的发现，原子物理的兴起，物理学家的视线转向微观世界的研究，故有物理学家认为，到爱因斯坦相对论的建立为止，经典物理大厦业已完工，于是非线性问题一度被视为纯数学演算，其物理框架不包含什么新的概念。殊不知，近20年来非线性观念不是复苏，而是渗透到物理学各个领域、自然科学以及生命科学许多门类。甚至混

沌物理学的兴旺发达，犹如当年近代物理学区别于经典物理学，
以此而有独特风格。

非线性现象之所以被忽视还不限于原子物理、核物理以及粒子物理的兴起，比如量子力学的创始人早就提出所有物理现象皆是线性的即为一例。其另一重要原因是处理非线性问题在数学上比线性要复杂得多，绝大部分是非线性微子方程是不可积的；况且线性化的近似对某些问题也过得去，甚至没有必要去自找麻烦。但这类近似是有限度的。简单的例子象流体物理的基本方程本身就是非线性的(Navier-Stokes方程)，声波的线性化方程是在振幅无限小的条件下才成立。正因为如此，非线性声学更显得重要。

混沌是非线性物理或科学中当前一个最热门的问题，要了解它，了解它的发展渊源和前景，一般这方面科学家并不善于用普及和简单的语言把它的内涵说清楚。我粗粗阅览了James Gleick《混沌——一门新科学》各章节后，觉得这是一本介绍混沌入门的好书，此书旁征博引，对一些难解释的名词和概念并不是干巴巴的叙述，还带有科学史的记述，文字也优美饶有趣味性，国外之所以成为畅销书并非偶然。我国高中以上数理基础稍好的青年可以读懂它，这样就会使你对这本命名神秘的书不感到诧异，弄清其来源与应用以及何以能普适于各门自然科学以至社会科学，获得的则是更多的求知欲，对读者本人大有裨益，从而促进国内这门科学的普及化，既有实用性，又富有哲理。

魏荣爵

1990年8月

魏荣爵 我国著名物理学家、教育家，中国科学院学部委员，中国声学学会名誉理事长，南京大学声学所所长。第三届全国人大代表，第五、六、七届全国政协委员。1916年生于湖南邵阳。1945年赴美留学，在芝加哥大学与同窗好友杨振宁一同受教于著名物理学家费米，在加州大学获哲学博士学位，并受聘为研究员。1951年归国投身于新中国建设，为新中国声学事业奠基者，有许多重要建树。魏先生不断开拓研究新领域，特别是近年来在孤子和混沌方面的工作受到国际国内同行的瞩目。魏先生经常应邀到美国、欧洲讲学或作报告，为加州大学访问教授、美国声学学会高级会员，意大利第三世界科学院国际顾问委员会委员，是国际上知名的中国学者。

中译本序言（二）

《混沌学》是美国《纽约时报》科技部主任詹姆斯·格莱克根据他对这门学科的了解和对该学科创始者、爱好者200多人的谈话，收集的真实事例写出来的，它涉及《混沌学》产生的历史、事实、基本概念和基本原理，是一本很好的介绍混沌的通俗普及读物，他以严谨的科学态度和流畅生动的语言，勾画出这门以前鲜为人知的新学科概貌，帮助人们越过数学上的障碍，克服一知半解，对混沌的知识获得充实和提高。译者现将全书译出，献给我国广大读者，无疑对我国学术界活跃思想是大有裨益的。

自从1963年麻省理工学院的气象学家洛仑兹一次偶然发现的一个新现象：在一特定的方程组中、小小误差即可引起灾难性的后果。它表明确定论的系统表现出随机行为，这种新现象是以往科学理论所无法解释的。其后，又有一些科学家在许多不同的领域中发现类似的现象，引起人们的广泛兴趣，结果形成了一股新的科学潮流。

混沌理论是一门对复杂巨系统现象进行整体性研究的科学，亦是一门关于整体的科学。它在一类“紊乱”现象背后出人意料地发现惊人的规律性，这不能不引起科学界的广泛注视，我国科学家钱学森称混沌是宏观无序、微现有序的现象。

在科学史上，决定论与非决定论的关系是令人困惑的，曾引起长期的争论。在物理学中，确定论和概率论是两种基本对立的理论：单个事件服从决定论的牛顿定律，而大数现象则服从统计规律，当波尔兹曼企图跨越这道鸿沟，从动力学“推导”出热力

学进程的不可逆性的时候，受到来自泽梅罗、洛喜密脱等人的猛烈评击：决定性的牛顿力学怎么会引出非决定性的分子运动论呢？在量子力学方面，虽然对于物质的统计理论，特别是对涨落的理论，谁也没有爱因斯坦贡献那样大，但他却坚决不信上帝会掷骰子。为此，爱因斯坦与波尔为代表的哥本哈根学派争论达四十年之久。

混沌理论的创立，把表现的随机性和系统内在的决定性机制巧妙地结合起来。洛仑兹首先提出了“蝴蝶效应”。即一种对初始条件的敏感依赖性。人们风趣地把它比喻为：“今天在北京有一只白蝴蝶扇动空气，可能改变下个月在纽约的风暴”的这种效应。继而，罗尔等人又为耗散系统引入“奇怪吸引子”的概念。既然混沌是由某些本身丝毫不是随机因素的固定规则所产生，因而，许多随机现象实际上比过去所想象的更容易预测。七十年代中期费根鲍姆在以数值实验寻求最简单的非线性方程的工作中，发现了非线性系统由有序向混沌转化的常数4.6692016090。人们称之为费根鲍姆常数，它与波尔兹等物理常数一样。揭示了自然界又一奥秘。目前混沌的研究取得了令人兴奋的结果，发现了一批细微的现象，它们背后有“一类无穷嵌套的自相似性的几何结构”，而且具有相当的普适性；提出了若干带根本性的物理和数学问题；有了若干严格的数学结果；真正的物理实验也有了开始。例如：利布沙贝尔在液氮小盒中做出的湍流发生的结果等等。我们看到，被牛顿力学视为典范的行星系统，实际上在自然界只是凤毛麟角，非可积的耗散系统才是更为普遍的现实世界的原型。一个非线性世界呈现在人们的面前。《混沌学》一书使我们看到了它的普遍性。

混沌原指杂乱无章（序），中国自古有“渺渺蒙蒙不分上下，昏昏沉沉不辨内外”之说，我国古代和古希腊都认为混沌是万事万物生成之前宇宙的原始空虚状态。现在，人们则在混沌中发现

了秩序。发现自然界形成的大量奥秘所在，这是一项划时代的科学进步。然而，我们应该清醒地认识到，混沌是极其复杂的现象，严格说来，混沌理论尚未形成，离开一门独立学科的建立尚有艰苦的工作要做。我们不仅要看到它已经提出若干带根本性的富有启发性的问题，还要到看人们今天能在多大程度上解决这些问题，我们要从中找到它的发展与自己工作的连接点，并脚踏实地地进行研究。应该说它为每一个有志者提供了机会。现代科学发展表明，对复杂的整体现象进行研究，单靠某门学科是无能为力的，必须有各个领域学者的共同协作才能奏效，而这一研究工作的开展必然会对自然科学乃至社会科学产生重大影响。目前，这种影响已在物理、化学、气象学、生物学、医学、经济学以至社会学中初见端倪。

作者是记者出身，他不仅对这门新学科已经取得的成果作了熟练而生动的描述，而且详实地记载了科学家在开创这一研究领域过程中遇到的困难和挫折，以及他们的情感和喜怒哀乐。洛仑兹热衷于数学计算，曾被人们认为是不务正业，费根鲍姆在洛斯阿拉莫斯思考混沌时，许多人怀疑他能不能拿出一项正经的属于他自己的研究工作。曼德布罗特则有三十多年被相当不同的领域拒之门外，他建立自然几何的尝试被认为是异想天开。这一切都说明，科学的征途无平坦的道路可走，只有不畏艰险、勇于攀登的人，才能达到成功的顶峰。书中还有约克、斯梅尔、法默、海农、梅依等许多栩栩如生的形象，这些科学家的经历都说明，科学事业需要献身精神。我国科技工作者，尤其是肩负振兴中国科学重任的年轻一代，应勇于探索科学真理，不畏艰险，为人类作出应有的贡献。

魏宏森

1990年金秋于清华园

魏宏森 1932年生于江苏，1960年毕业于清华大学，后留校任教，现为清华大学社科系与社会研究室主任、教授，兼任中国管理科学研究院院务委员、学术委员、教授、社会系统工程研究所所长。中国系统动力学学会副理事长，北京系统工程学会副秘书长，国际系统动力学学会中国分会副主任，著有《系统科学方法论导论》、《系统科学与社会系统》、《人工智能与社会进步》等著作。

序 言

1974年，在新墨西哥小镇洛斯阿拉莫斯，一个人夜复一夜地在暮色中徘徊。沿着僻静的后街，他烟头上燃亮着的红光一闪一现，警察见了不免有些奇怪。高原上空气稀薄，时而有不速之客从天而降，他头顶星光一走就是几个小时。警察并不是唯一生疑好奇的人。在国家实验室一些物理学家也有所知晓，他们这位最新来的同事许多天来一直是按每天26小时计来安排实验的。这就是说，他的作息时间与别人的周期略有不同，缓慢地前移，同步以后又异步，异步以后又同步。对此，甚至理论部的科学家也颇感费解。

30年来，从罗伯特·奥本海默为原子弹研制计划选中这块远离尘世的新墨西哥高原之日起，洛斯阿拉莫斯国家实验室便在整个荒原上迅速拓展开来。粒子加速器、气体激光器和配套的化学工厂相继落成，成千上万的科学家、管理人员和技术人员纷至沓来，还建成了世界上最大的一个超级计算机中心。年长的科学家对那些40年代倚岩而建的木结构建筑物记忆犹新。但是在洛斯阿拉莫斯的大多数成员心目中，对那些身着学院装灯心绒裤和工作衫的男女青年来说，研制原子弹的先驱者恍如隔世之魂。理论部是实验室的思想库，称为T分部，就象计算部称为C分部，武器部称为X分部一样。在理论部工作的有100多名物理学家和数学家，他们待遇优厚，也没有大学中教课和写文章的压力。这些科学家见多识广，才华横溢，不同凡响。他们遇事不惊，难得为什么事所动心。

但米切尔·费根鲍姆(Mitchell Feigenbaum)是个例外。他

仅用真名发表过一篇文章，他在搞研究，却看不到任何特别的成功希望。他留着一头长发，蓬乱而厚密，象德国音乐家那样从宽宽的前额梳向脑后。他双眼炯炯有神，充满激情。他讲话总是很快，吐出的冠词和代词带有一种含糊的中欧腔，尽管他是布鲁克林人。只要一投入工作，他就全神贯注，废寝忘食。而工作之余，他就散步和思考，昼夜不分，而且夜晚是最好的时间。一天24小时似乎太紧张了。然而，通宵达旦的失眠隔几天就要发作一次，当他觉得难以支持的时候，他个人所进行的准周期试验也到了尾声。

他29岁那年已经成为著名学者之中的佼佼者，一名特别科学顾问了。科学家无论遇到什么特别困难的问题，只要能碰到他，就会向他求教。一天晚上他去上班，正好碰到实验室主任哈罗德·阿格纽(Harold Agnew)准备离去。阿格纽是个强人，奥本海默最早的门生之一。他曾经随同伊诺拉·盖伊(Enola Gay)乘坐测量飞机飞过广岛，实地拍摄该实验室第一枚原子弹爆炸后的情况。

阿格纽对费根鲍姆说：“我知道你是真正精明强干的人，既然如此，你何不去解决激光核聚变的问题呢？”

甚至费根鲍姆的朋友也拿不准，他究竟能不能拿出一项正经的属于他自己的活计来。尽管他非常乐意帮助他们解决难题，驾轻就熟地令人难以置信，但他自己对于研究任何可以得到报偿的课题似乎并不感兴趣。他思考液体和气体中的湍流。他思考时间——它是连续地向前流去呢，还是间歇跳跃象一连串井然有序的电影画面？他思考眼睛识别世间事物统一的颜色和形状的能力，而物理学家把这个世界看作一个变动不居的量子万花筒。他思考云彩，从飞机舷窗向外观察它们（直到1975年，他作科学旅行的特权因为使用过度而被官方中止），或者用实验室屋顶的拖曳天线探测它们。

西部山区城镇的云彩与充斥于东部空气中的那种变幻不定的乌黑的低飞雾霭大不相同。在洛斯阿拉莫斯，在巨大的火山口的庇荫处，云层布满天空，形态似定非定，或者象穗状花一样地静止不动；或者象脑纹一样作有规则的沟状伸展。在一个暴风雨的下午，当闪电划破长空，雷鸣接踵而至时，云彩从30英里开外涌出，滤过闪电，衬出道道反光。直至整个天空开始呈现出一幅壮观的戏剧场面，似在微妙地嘲弄着物理学家们。云彩代表了被置身于物理学主流之外的自然的那一面，既是模糊的，又是精致的，既是有结构的，又是难以预测的。费根鲍姆思考的正是这类事物，潜心静气而又无甚建树。

对于一个物理学家来说，实现激光聚变反应，弄清微观粒子的自旋、颜色和风味，探求宇宙起源，都是名正言顺的问题。而理解云彩则是气象学家份内的事。象其他物理学家一样，费根鲍姆用来描绘云彩的语言简单而生硬。他也许会说，对于所得的结果，任何一个训练有素的物理学家经深思熟虑和计算后都可以理解，至于是否赢得尊敬和诺贝尔奖则要另当别论了。对于这一类最棘手的问题，物理学家如不长期探究宇宙底蕴就不能入门，他们只好保留象“深不可测”这样的词语了。1974年，虽然在费根鲍姆的同事中几乎无人知晓，但他从事研究的正是一个深不可测的问题：混沌。

混沌始于何处？始于经典科学结束之时。因为只要世界上还有物理学家在探寻自然法则，经典物理学就会由于对各种紊乱现象的特别的无知而遭诘难。这些紊乱现象在大气中有，也出现在汹涌的大海、野生生物群体的消长和心脏的搏动与大脑的活动中。自然界无规则的一面，非连续和反常的一面，对科学来说是奥秘，甚至是怪物。

但到了70年代，美国和欧洲有少数科学家开始发现一条通向混沌的道路，他们之中有数学家、物理学家、生物学家、化学家，大

家不约而同都在寻找存在于不同形式的无规则性之间的联系。生理学家从人的心脏所发生的混沌运动中发现了一种惊人的秩序，这种混沌是引起突发性的莫名其妙死亡的罪魁祸首。生态学家研究了舞毒蛾数目更迭的起伏。经济学家翻出以往股票价格资料试图进行新的分析。这种新的见解径直延伸到自然界——云的形状、闪电的路径、血管的微观网络、银河系中的星团。

当费根鲍姆在洛斯阿拉莫斯开始思考混沌学时，他是分散的、互不相识的少数科学家中的一个。在加利福利亚的伯克利，一位数学家已经成立了一个小组，致力于开创一种新的动力系统的研究。在普林斯顿大学，一位研究虫口的生物学家即将发表一份充满激情的抗辩：所有科学家都应看到，在一些简单的模型中埋藏着令人惊奇的复杂行为。在IBM公司任职的一位几何学家正在寻找一种崭新的语言，以描述参差不齐的、四分五裂的、缠绕易碎的图形之中的相似性——这是他在考虑的一个自然界的组织原理。一位法国数学物理学家则刚刚提出一个有争议的主张：液体中的湍流很可能与一种奇异的、无限自相缠绕的抽象概念有关，他把它称为奇怪吸引子。

10年后，混沌已成了一场迅速发展的运动的简称，这场运动正在重构科学大厦的基础。如今，有关混沌学的会议和杂志比比皆是。负责军备研究经费的政府决策人，中央情报局以及能源部，都为混沌学研究拨出巨款，并为处理这笔经费成立了特别机构。在每个主要大学和主要合作研究中心，许多理论科学家首先是为了研究混沌学，其次才是为了他们各自名义上的专业而聚集在一起。在洛斯阿拉莫斯，建立了一个非线性研究中心，以协调混沌学及相关问题的研究，类似的研究机构也在全国各地的大学校园里纷纷涌现。

混沌学创造了使用计算机的特殊技术以及各种特殊的图形，这些图形能够捕捉埋藏在复杂性中奇异而精细的结构。这门新科

学已编制出属于它自己的语言，一套精美的术语，如分形和分叉、间歇性和周期性、折叠手巾的微分同胚和擀面条的变换。就象在传统物理学中，夸克和胶子是物质的新要素一样，这些都是运动的新要素。对于一些物理学家来讲，混沌学是一门过程的科学，而不是状态的科学；是一门演化的科学，而不是存在的科学。

既然科学在关注着，混沌看起来无处不在。烟头上一缕青烟，徐徐上升突然猛地转悠起来。旗帜在强风中前后摆动，劈啪作响。水从龙头流下，有条不紊继而四下散开。天气的活动，飞机的飞行，汽车在高速公路上拥挤着前行，石油在地下管道中流动，在这些行为中都可以看到混沌。不管中介物是什么，这些行为都遵循新近发现的同样的定律。这种新见解已经开始改变商业经纪人对保险作决定的方式，天文学家观察太阳系的方式，政治理论家谈论导致军事冲突的紧张局势的方式。

混沌学打破了分隔不同学科的藩篱，由于它是一门关于系统整体性质的科学，一位掌管科研经费的海军官员在对他的听众——一批数学家、物理学家、生物学家和医学家发表谈话时，作出如下评论：“15年前，科学正走向日益专业化的危机。富有戏剧性的是，这种日益专业化的倾向由于混沌学而被扭转了。”混沌学提出的问题向科学中已接受的思维方式提出了挑战，它持事物普遍行为复杂性的强烈主张。第一批混沌学的理论家，开创这门新学科的科学家，具有某种共同的敏感性，他们一边着眼于模型，尤其是在相同时间内在不同尺度上出现的模型；一边品味着随机性和复杂性，品味着残边和突跳。相信混沌的人（有时他们自嘲为信奉者、皈依者或福音传播者）思索决定论和自由意志，思索进化，思索意识的本质。他们觉得他们正在扭转科学中的还原主义的倾向，还原主义对系统的分析基于系统的组成：夸克、神经细胞或染色体。他们相信他们正在寻求整体。

这门新科学最热烈的拥护者走得如此远，他们说，20世纪科

学载入史册的将只有三件事：相对论、量子力学和混沌学。他们认为，混沌学已经成为物理学在本世纪的第三次伟大革命。象前面两次革命一样，混沌学摒弃了牛顿物理学的信条，正如一位物理学家讲的那样：“相对论粉碎了牛顿学说绝对空间和绝对时间的错觉，量子力学粉碎了牛顿学说测量过程可控的幻象，而混沌学粉碎了拉普拉斯决定论预测的梦想。”在这三大革命之中。混沌学引起的这场革命适用于我们身边这个亲眼目睹的、朝夕相处的世界，适用于人类范围的事物。这样，每日的经历和世界本来的图景都成了科学探索的合理的目标。长久以来，人们已经隐约察觉到，关于世界，理论物理学离开人类直觉太远了。这种看法孰优孰劣谁也不知道。但是那些认为物理学或许已经走进死胡同的人，现在希望从混沌学找到出路。

就物理学本身而言，混沌研究始于一潭死水。20世纪大多数年代，物理学的主流是粒子物理学，即在越来越高的能量，越来越小的尺度，越来越短的时间探测构造物质的基本单元。在粒子物理学之外，物理学要建立自然界基本作用力和宇宙起源的理论。但是，一些年轻的物理学家对这些被奉为金科玉律的科学导向感到越来越不满意。进展开始放慢，给新粒子命名徒劳而无功，理论体系也似乎乱了套。随着混沌学的来临，年轻一代物理学家相信，变革整个物理学的帷幕正在拉开。他们感到，物理学已被高能粒子和量子力学的令人眼花缭乱的抽象概念统治得太久了。

斯蒂芬·豪金(Stephen Hawking)这位身居剑桥牛顿讲座席位的宇宙学家，1980年在题为《理论物理学到尽头了吗？》的讲演中对自己的科学作总结时，充当了物理学的代言人，他说：“我们都知道，物理学定律支配着我们日常生活经验着的一切……正因为理论物理达到如此水平，以致花费大量金钱和设备去进行一个结果未卜的科学实验是值得的。”

然而，豪金也认识到，基于粒子物理学来理解自然定律留下

了一个悬而未决的问题，即怎样把这些定律应用到除了最简单系统以外的任何系统中去。可预测性在云室里是一回事，在加速器中跑完全程后两个粒子在这里相撞。而在最简单的流体搅拌机中，或在地球大气中，或在人们大脑中，则完全是另一回事。

豪金的物理学足以获得诺贝尔奖和大量实验经费，通常被称为一场革命。寻找普遍图式的梦想——如大统一理论或者说“普适理论”，似乎有过近乎成功的时刻。物理学回溯能量和物质发展的全部历史，除了开天辟地那一瞬间。但战后的粒子物理学是一场革命吗？抑或仅仅是把由爱因斯坦、玻尔和其他相对论量子力学奠基者们所设置的框架完备起来？毫无疑问，从原子弹到晶体管，物理学的成就改变了20世纪的图景。然而，粒子物理学或许太狭窄了。从这个领域出现一种能够改变普通公众理解世界的方式的新理论思想之日起，已经过去两代人了。

无须回答关于自然的一些最基本问题，豪金阐述的物理学似乎能完成自己的使命。生命如何发展而来？湍流是什么？尤其重要的是，在一个由熵无情支配着的，正在朝着紊乱和荒废而去的宇宙里，秩序是从哪里来的？与此同时，耳濡目染的事物，象流体和力学系统是如此司空见惯，以致于物理学家认为它们都是不言自明的。然而事实并非如此。

当混沌中的革命到来的时候，第一流物理学家们发现，回到人类范围的自然现象并没有使他们感到尴尬。他们不仅研究星系，也研究云彩。他们不仅在“克雷”计算机上进行有成效的计算，也使用“麦金多什”计算机。关于一个小球在桌上跳跃的奇异动力学的文章，早先登在杂志上是与量子物理学的文章并列在一起的。现在我们看到，这个最简单不过的系统也产生了一个对可预测性而言是特别棘手的难题。然而，秩序也在这些系统中自发地出现——混沌与秩序相伴随行。在关于个体（一个水分子、心脏组织的一个细胞、一个神经元）和关于群体（数百万个体的集合）的知识