

JIAYUHUNDUNYUFAZHANGAOXINJISHU

驾驭混沌 与发展高新技术

方锦清 编著



原子能出版社

驾驭混沌与发展高新技术

方锦清 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

驾驭混沌与发展高新技术/方锦清编著. —北京:原子能出版社, 2001. 12

ISBN 7-5022-2442-4

I. 驾… II. 方… III. 混沌学—应用—自动控制—研究 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 075372 号

内 容 简 介

全球正在经历一场科学技术革命,人类迈进了知识经济及信息时代。本书论述的混沌学堪称是 20 世纪物理学的第三次革命,它不仅提供了一种崭新的方法论,使描述自然界的两种方法论(决定论与概率论)达到了和谐的统一,使人类的认识产生了一次新的飞跃;而且从自然科学拓广到技术科学、社会科学和人文科学,具有诱人的发展应用前景。

全书的主题是如何驾驭混沌和发展高新科技,着重概述了 20 世纪 90 年代取得突破的混沌控制、反控制与混沌同步(统称驾驭混沌)的主要原理和方法,阐述了它们与发展高新科技的联系,特别是由此产生的高新技术领域一些值得关注的新的生长点,例如洁净核能系统的束晕-混沌控制、混沌信息技术与保密通信、混沌医疗、激光混沌控制和混沌制导等,这些在国防和工农业等国民经济领域中将有广泛的应用潜力。

本书作者多年来从事混沌科学和混沌控制的研究,它是作者根据自己长期积累的研究成果和从事研究生教育的心得体会编写而成的。内容深入浅出,语言通俗易懂,融学术性、知识性与趣味性于一体,这将有助于广大读者开拓视野,了解这门新兴交叉学科;有助于促进与不同领域的人员和广大媒体的交流。因此,本书可供包括大专学生、研究生、企业家、管理干部在内的不同层次的广大读者阅读,也可供自然科学、社会科学和工程技术人员参考。书中大部分内容还适于高中文化程度的广大读者阅读。

原子能出版社出版 发行

责任编辑:刘 朔

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

北京朝阳科普印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 19.25 字数 477 千字

2002 年 5 月北京第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000

定价:49.00 元

序 言

作者请我为这本新书写个序言,这件事给我出了个难题。之所以难,确实有好几个方面。首先,推荐这样一本好书是义不容辞,因而不好推却。但是,要用简短的几页纸来勾画出这本大篇幅作品的轮廓,对我来说似乎不大可能。事实上,读者自己从书中目录可见其内容浩瀚,并可领略全书的大意,故此无须由我在序言中重复。最难的是,我要为一本写“混沌”这个奇妙无穷的东西的著作写序,自感有点力所不能及,故迟迟动不了笔。最后深思良久,还是决定写一点关于混沌及其控制的个人浅见,借此把这本难得的好书推荐给广大读者。

“混沌”其实是一个颇为古老的名词,让许多人特别是哲学家们感到不陌生。然而作为一个术语,它在现代数理科学中的新的和确切的含义却未见得为大多数非学术界人士所了解。从字面上看,混沌是一种飘渺不定、紊乱无序的东西,似乎不会有什么值得研究,特别是可以应用的价值。这种感觉对一般人来说,或许不无道理。可是,对于一个科学工作者来说,许多表面看来简单的事件往往都很不简单,许多直观上完全无用的概念常常都很有用处。在这类问题上,数学家们会想起“虚数”、“无理数”等名词,物理学家们会想起“负能量”、“反物质”等术语。自从洛伦兹(E. N. Lorenz)于20世纪60年代在数值实验中意外地发现了混沌奇怪吸引子和李天岩-约克(T. Y. Li-J. A. Yorke)70年代在数学分析中正式引入“混沌”(chaos)这一术语以来,“混沌”这个名字在学术界中已家喻户晓。正如过去的“无理数”不无理一样,今天的“混沌”实在不混沌。

那么,作为一个科学概念,“混沌”到底是什么?或者说,作为一个数学物理概念,“混沌”的定义是什么?当一位读者翻开他第一次接触到的任何一本关于混沌的书籍的时候,显然他会首先提出这样的问题。与接触其他科学概念不一样,经验表明这位读者在认真读完该书之后仍然会或多或少地感到迷惑:他觉得并没有能够获得一个十分完整、十分令他满意的答案。这种情况表明,一方面至今科学家和数学家们对“混沌”本身还未有最后的理解,因而写书的人没有可能甚至没有打算为读者写下一个简单明确而又完整严格的定义。另一方面也说明“混沌”这东西一定是十分奇妙,因而“妙不可言”。混沌神秘的足迹和漂亮的面纱已经吸引了成千上万科学工作者三十多年的研究和追求,然而至今还未有为它写下一个最后定论,至少不是一两页文字就能把它深奥的本质和复杂的特征刻画清楚。当然,对于从事非线性科学,特别是非线性动力系统研究的科研工作者来说,“混沌”的基本概念还是相当明确的。这是三十多年来学术界好几代人共同努力的结果。

过去的三十多年是人们对混沌逐步认识和深化了解的过程。在其中前面二十多年步履艰难的探索过程中,混沌能否被人为地控制,特别是能否被人为地利用以促进生产力的发展和改善人类的生活,是一个未曾被考虑过的问题。在这一漫长的过程中,不能说从来没有过这种思想的闪烁。但是,可以说一直没有过系统成形的科学设想和提案,直到20世纪80年代末90年代初为止。

当外界条件趋于成熟时,新思想必然要发生,而且随时随地都可能发生。相信这放荡不羁的混沌是可以人为驾驭的,从而可以有目的地控制它,这种信念一时之间在好几个不同的科学

家小组里形成了——那是在 1987~1990 年间的事。初期的想法是利用或改造一些工程上卓有成效的常规自动控制手法,以达到把复杂的混沌状态引导到稳定的平衡状态上去的目的。这一方向的控制通常称为混沌控制,或控制混沌。显然,这种尝试是基于“混沌是无益的因而需要通过控制手段而把它消除掉”的信念来进行的。因为混沌一旦被控制到稳定平衡状态上去,它最后就消失了。由于在 20 世纪 70~80 年代期间人们对混沌本身的认识还未清晰,其神秘的色彩使不少人相信“混沌是既不可以控制又不可以预测”的。因此,在大多数人试图通过控制方式去驾驭混沌的初期,常规的自动控制手法经常被使用到。其中一种企图就是去消除“混沌不可控”的误解。很快,人们就发现,如果对控制手段不加特别约束的话,比如说,不要求极小化控制能量或时间的话,那么控制混沌的事情并不比稳定化一个一般的非线性动力系统困难多少。混沌确实是能控制的。

若干年之后,即到 20 世纪 90 年代中期,另一种新颖的思想又滋长起来了:难道混沌控制的目的只是简单地把它消除掉吗?难道混沌这东西总是有害无益因而不值得保留,更没有理由把它人为地产生出来或者加以强化吗?

其实人们早就发现,混沌在许多场合下不单是很自然的一种现象,而且是很有用,甚至是必不可少的东西。例如,两种不同性质的流体或溶剂,如果它们是处于混沌状态的话,它们可以自己充分地混合起来,而不需要长时间和大功率的机械搅拌。又如,混沌映象为图形甚至为动画和录像的保密通讯提供了一种快速有效而且简单经济的新途径。利用混沌性态为生物系统(如大脑思维、学习、记忆、推理以及心脏病理疗等)开辟新途径的可行性,更是为医学及生物工程研究人员所熟悉。这些情形下混沌当然就不应该被削弱,被消除,反而应该被强化,被运用,甚至被从无到有地产生出来。通过控制手段而有目的地产生混沌,这是反向控制,称为混沌的反控制。显然,称之为“混沌化”一个本来并非混沌的系统也是十分恰当的。混沌的反控制是一个全新的控制论问题,它在理论上和技术上都极富挑战性,而且在高科技的应用上具有十分广阔和诱人的前景。

显然还有许许多多有趣的课题可以谈及。但是,性子急的读者或许已经有点不耐烦了:“到此为止你还完全没有解释混沌到底是什么?它有那些主要特征?如何通过控制手段去驾驭它?特别是,如何可以通过控制手段去有目的地把它从无到有地产生出来?有了它以后又有什么用处?……”读者的这种求知心切的欲望是完全可以理解的。不过,如果我用二三页纸的篇幅就能够把这些深邃而且有趣的问题都作一个清楚明确的答复的话,案前的这本书大概就不值得一读了。事实上,所有这些问题都需要较长的篇幅来加以讨论。从下一页开始,是每一页都值得读者认真阅读的内容。如果读者能够把全书认真地过目一遍,我相信他一定可以找到十分令人满意的各种有关问题的答案。像这样一本基于多年工作,既有高级科普品味,又有自己独特的学术性和知识性的著作,十分值得推荐。

陈关荣

IEEE 院士,美国休斯顿大学教授

兼中国香港城市大学讲座教授

混沌控制与同步学术研究中心主任

于休斯顿市,2000 年春

前 言

在新世纪的春天来临之际,本书终于出版了。面对新世纪的挑战,面对世界高新科学技术的迅猛发展和经济全球化的新形势,我国正在实施“科教兴国”,掀起科技进步和创新的热潮。我十分赞同,“创新是一个民族的灵魂,是国家兴旺发达的不竭动力”,而科学技术创新将成为 21 世纪的主导力量。作为一个科学工作者责无旁贷,理应为此尽一点微薄的力量。这正是我写本书的动力和意愿所在,试图通过本书,弘扬创新精神,传播创新思想和创新知识,以创新意识的意识迎接 21 世纪发展的新挑战。

回首过去的千年,特别是,过去的世纪,科学技术取得了前所未有的进展,人类社会经济文化生活发生了翻天覆地的巨变。一切人类文明的灿烂辉煌成就,都是在不断创新的科技进步和社会变革中实现的。“科学技术是第一生产力”是千真万确的。正如江泽民指出:“翻开科技发展的历史,我们知道,基础研究的成果为整个人类社会带来了巨大的突破和进步,也促进了应用科学的发展;而应用科学的不断发展也必然对基础科学提出更高的要求。可以说,没有量子理论,就不会有微电子技术。如果没有相对论,就没有原子弹,也不会有核电站。”很显然,量子理论和相对论的发现,已是举世公认的 20 世纪物理学第二次大革命。但是,回首历史,这些发现曾在很长的时间内不被人们所了解和应用。谁能料到,正是这些发现导致了核电、激光、电脑和信息技术等等的突飞猛进,它们给人类带来了空前的文明进步,几乎现代社会的物质文明无不与它们密切相关,它大大加速了全球信息化的进程。

当今,人类正在经历一场全球性的科学技术革命,从工业时代迈进了知识经济及信息时代的征途。本书论述的主角是混沌,混沌在这个新时代扮演什么角色呢?正如著名物理学家福克(J. Ford)1977 年在意大利召开第一次国际混沌会议上所指出的,混沌的发现“是 20 世纪物理学的第三次革命”,混沌如同相对论及量子力学一样,“相对论消除了关于绝对空间与时间的幻象;量子力学消除了关于可控测量过程的牛顿式的梦;而混沌则消除了拉普拉斯关于决定论式可预测性的幻想”,从而大大解放了人们的思想,它使描述自然界的两种方法论(决定论与概率论)长期对立的状态达到了自然和谐的统一,解开了哲学上的百年之谜,使人类的认识产生了一次新的飞跃,混沌论甚至被视为一种崭新的方法论,将成为人们深入认识客观世界和改造客观世界新的武器。

混沌学犹如任何一场世界性科技革命一样,正在猛烈冲击着当今几乎所有的自然科学,已经拓广到技术科学,甚至社会科学和人文科学,诸如经济、政治、军事、文化、艺术和音乐等众多领域,引起了十分广泛的兴趣,提供了难得的机遇,提出了空前的挑战。从 20 世纪 90 年代以来,随着国际上混沌控制与同步的突破性进展,就像一阵旋风,席卷了五洲四海。已经可以预计,混沌应用范围将涉及放射性洁净核能系统、医学生物工程(混沌医疗等)、混沌通信、混沌信息技术、混沌制导等,在国防和工农业等国民经济中将有着广泛应用的潜力,具有极其诱人的发展前景。

对于这么大的交叉科学,国内外已经出版了不少书籍,但本书比较系统地将混沌与众多领域的高新技术发展联系在一起,这也是与许多书籍的主要区别之一。

本书的形成曾经历过几个阶段,从 20 世纪 80 年代中期起一直到 90 年代,我曾几次分别给中国核工业研究生部及中国原子能科学研究所的硕士生和博士生讲授非线性科学导论、混沌学与混沌控制论及其应用等课程;1993 年夏天在中国原子能科学研究所举办了以非线性与混沌控制为主题的全国性学习班;多年来在“物理学进展”等国内外刊物发表这方面的多篇专题论述,受到同行和读者的欢迎与鼓励。本书是在中国核工业集团公司及原子能出版社支持下得以出版。书中结合自己多年的研究体会和学术成果,对国内外丰富信息的洞察与分析,以如何驾驭混沌及其开创高新技术为主题,进行了构思和选材,试图在本书里表达不同于其他专著的以下信息:

一是,自从 20 世纪 90 年代以来,非线性科学以混沌控制的应用为契机,掀起第二次全球性的研究热潮,推动着该交叉学科向应用的广度和深度发展。因此,本书正是以混沌应用为主题和重点展开讨论,其中在第一篇和第七篇特别强调了混沌现象的普遍性,以及混沌与高新技术领域的联系、应用潜力和蓬勃发展的态势,比较适合于工作繁忙及不求深入了解数学物理公式的读者先读为快。

二是,鉴于混沌科学是一种系统的创新知识,内涵十分丰富,考虑到这门科学广泛交叉的特点,本书试图从多角度、多领域、多层次进行介绍,尽可能做到文字通俗易懂,深入浅出,既有学术性,又有知识性与趣味性,以适应不同学科和大众媒体对新知识的需要,促进新知识与大众传媒的交流。读者可跳过一些较难的章节和数学方程,而不影响对全书的了解。

三是,由于超混沌和时空混沌的控制、反控制与同步都是当前该领域的前沿课题,正在国内外迅猛发展,无疑,今后新进展和新成果将层出不穷,难以预料,本书第五、六篇有意导向这些富有挑战性的研究前沿,以期开拓人们的视野,从中得到启迪。

四是,驾驭混沌,范围宽广,应用潜力大,越来越多地与高新技术的发展联系在一起,成为高新技术领域新的生长点,它是非线性科学的一个应用学科,与非线性科学一起构成了 21 世纪新的科学与技术的发展方向之一,其研究、开发、应用工作任重道远。从目前预计,在新世纪上半叶,人类自由“驾驭混沌,造福人类”为期不远了。若本书能在我国起到一点点推波助澜的作用,我亦感到心满意足了。

本人学识有限,成书几经变化,书中疏漏或不妥之处在所难免,热忱欢迎广大读者和同行不吝赐教,批评指正。

最后,我对支持我工作的所有国内外同行,特别向 Ilya Prigogine、Guanrong Chen(陈关荣) L. E. Reichl, L. M. Pecora, U. Parlitz, L. O. Chua, T. L. Vincent, Xinghuo Yu、邢修三、汪秉宏、张锁春、罗晓曙等各位教授和朋友们,多年来为我提供了许多宝贵的资料和建议或合作,向资助本课题研究的国家自然科学基金委员会、国家人事部留学人员处、中国核工业科学基金委员会和国际原子能机构等,向支持本书出版的中国核工业集团公司、中国原子能科学研究所、原子能出版社及其编辑深表衷心的感谢!同时,深深感谢我的家人长期以来对我工作的理解、支持和关爱。

方锦清

写于中国原子能科学研究所

2000 年 6 月 20 日,北京

改写于 2001 年春节

目 录

序

前 言

第一篇 导论——基础与创新

内容提要 1

第一章 混沌现象的普遍性与高新技术的联系 2

1.1 引言——漫话“混沌” 2

1.2 蝴蝶效应与天气长期难测 4

1.3 束晕混沌与洁净核能系统 7

1.4 激光混沌与“星球大战”计划 10

1.5 电路混沌与通信保密技术 14

1.6 地壳分维与地震震级预测 16

1.7 化学混沌与控制化工反应 19

1.8 生命混沌与生物医学工程 21

1.9 经济混沌与自由市场竞争 23

1.10 聚变核能与等离子体湍流之谜 24

1.11 军赛混沌与国际紧张局势分析 25

1.12 混沌科学与音乐艺术统一 27

参考文献 28

第二章 混沌的普适性及刻画方法 30

2.1 混沌的定义及基本特性 30

2.2 通向混沌的道路及普适性 32

2.3 李雅普诺夫指数——混沌的特征量 35

2.4 分维——混沌的几何特征量 37

2.5 测度熵与 K 熵 41

参考文献 42

第三章 混沌控制的一些基本概念 43

3.1 混沌类型、控制任务及控制方法分类 43

3.2 混沌控制与同步的一种统一描述形式 45

3.3 混沌控制与一般控制的比较 46

3.4 可控性和可观测性 48

3.5 控制器和观测器 50

参考文献	50
第二篇 时间混沌控制的原理和方法	
内容提要	52
第四章 参数小微扰法	54
4.1 参数小微扰法(OGY 方法)	55
4.2 首次控制混沌的实验及 OGY 方法的改进	58
4.3 具有延迟坐标的 OGY 方法	58
4.4 应用延迟坐标完善 OGY 方法	60
4.5 打靶法	61
4.6 参数共振微扰法与外部周期微扰法	62
参考文献	64
第五章 变量反馈法	66
5.1 偶然正比反馈技术及其改进法	66
5.2 连续变量反馈法	69
5.3 延迟反馈法	71
5.4 自适应延迟反馈法	74
5.5 变量脉冲反馈法	75
5.6 简单线性反馈法	76
5.7 关于非线性反馈法	78
参考文献	78
第六章 非反馈控制法之一:最小能量控制法	79
6.1 最小能量控制法的基本思想	79
6.2 广义能量函数构造方法	79
6.3 控制算法的步骤	80
6.4 控制实例	80
6.5 控制混沌的一种统一的物理机制	82
参考文献	83
第七章 非反馈控制法之二:传输与迁移控制法	85
7.1 基本概念和理论基础	85
7.2 数值研究	86
7.3 开闭环控制法	87
7.4 开环加闭环控制法的有关定理	88
7.5 EMCM 应用实例之一	89
7.6 EMCM 应用实例之二	90
7.7 OPCL 控制应用实例	92
7.8 方法评述	95
参考文献	95

第八章 系统变量变换控制法	96
8.1 引言	96
8.2 变换控制原理与方法	96
8.3 数值模拟实例	97
8.4 从信息熵分析混沌控制的机理	99
参考文献	99
第九章 自适应控制法	100
9.1 一般概念和分类	100
9.2 直接自适应方法控制混沌	102
9.3 间接自适应方法控制混沌	104
9.4 讨论	106
参考文献	107
第三篇 混沌反控制的基本原理和方法	
内容提要	108
第十章 外部噪声驱动混沌的反控制(混沌化)	109
10.1 白噪声对混沌的控制和反控制	109
10.2 色噪声实现对混沌的控制和反控制	111
参考文献	113
第十一章 混沌化的微扰延迟反馈法及其他方法	115
11.1 一个稳定的线性微分方程的混沌化	115
11.2 一般稳定的线性微分系统的混沌化	116
11.3 稳定的非线性微分系统的混沌化	117
11.4 离散系统的混沌反控制	118
11.5 维持混沌的小微扰方法	120
参考文献	122
第四篇 混沌同步的原理和方法	
内容提要	123
第十二章 混沌同步的分类和基本概念	124
12.1 引言	124
12.2 混沌同步的定义和类型	125
12.3 混沌同步的几何特性:同步超平面及同步流形	127
12.4 同步流形的推广	129
12.5 非自治系统的混沌同步	129
12.6 部分替代(PR)方法	130
12.7 偶然驱动(OD)	130
12.8 同步替换	130

12.9 非线性函数的驱动信号	131
参考文献	132
第十三章 驱动-响应同步法与一般分解法	134
13.1 首次混沌同步实验方案	134
13.2 混沌同步电路分析	135
13.3 混沌同步电路的改进方案	135
13.4 判别混沌同步的李雅普诺夫函数法	137
13.5 高级级联混沌同步	137
13.6 一般分解法:主动-被动同步法	137
参考文献	140
第十四章 耦合同步法	142
14.1 耦合混沌同步的理论	143
14.2 两个耦合的混沌激光同步的实验	144
14.3 脉冲耦合振子的同步与失同步	148
14.4 蔡电路耦合的混沌同步	149
参考文献	150
第十五章 变量反馈同步法	151
15.1 连续变量反馈同步法	151
15.2 偶然正比反馈同步法	153
15.3 非线性变量反馈同步法	154
参考文献	156
第十六章 混沌自适应同步法和外部随机驱动法	158
16.1 自适应同步方法	158
16.2 外部随机驱动法	159
参考文献	162
第五篇 超混沌的控制与同步	
内容提要	163
第十七章 超混沌的控制与同步	164
17.1 超混沌广义同步的基本原理	164
17.2 超混沌的同步实验	165
17.3 变量脉冲反馈控制法	165
17.4 延长信号等效关联时间的控制法	167
17.5 BK 耦合理论——单标量信号驱动法	171
17.6 一般分解法实现超混沌同步	172
17.7 外部随机驱动法	173
17.8 单向耦合法——超混沌电路同步实验	176
17.9 非线性反馈法	180

参考文献	180
第六篇 时空混沌的控制与同步	
内容提要	182
第十八章 小微扰控制法	184
18.1 参数小微扰法	184
18.2 空间小微扰法	186
18.3 实验应用	188
参考文献	190
第十九章 变量耦合同步法	191
19.1 线性单向耦合同步法	191
19.2 非线性双向耦合法实现广义时空混沌同步法	194
参考文献	194
第二十章 非线性控制法及其他方法	195
20.1 非线性反馈法	195
20.2 开关流形控制法	201
20.3 非线性扩散控制	204
20.4 非线性延迟反馈控制与同步	204
20.5 相空间压缩法和变量脉冲反馈联合控制法	205
20.6 时空混沌的非线性广义同步法	206
参考文献	207
第七篇 驾驭混沌,开创高新科技	
——在高新技术中的应用发展前景	
内容提要	210
第二十一章 在强流加速器驱动的放射性洁净核能中的应用	
——束晕-混沌产生的物理机制及控制策略	211
21.1 世纪能源的挑战与洁净核能系统面临的困难	211
21.2 强流加速器中产生束晕-混沌现象的物理机制	212
21.3 束晕-混沌的控制策略之一:非线性反馈控制	215
21.4 束晕-混沌的控制策略之二:小波反馈控制	219
21.5 小波反馈函数的推广形式及多周期离散控制束晕-混沌	223
21.6 束晕-混沌的变结构控制法	225
参考文献	228
第二十二章 混沌通信与混沌信息技术	230
22.1 传统现代通信与混沌通信的比较	230
22.2 混沌保密技术之一——混沌遮掩	231

22.3 混沌保密通信技术之二——混沌开关或参数调制	239
22.4 混沌保密通信技术之三——混沌调制	242
22.5 评论与展望	249
参考文献	251
第二十三章 在生物医学工程中的应用	254
23.1 心脏混沌的控制模型与动物试验	254
23.2 心房纤维性颤动的控制	256
23.3 癫痫病与混沌反控制的试验	260
23.4 肿瘤-抗癌模型与恶性肿瘤化疗中的最优控制	262
参考文献	264
第二十四章 非线性激光耦合系统的混沌控制及其应用	265
24.1 引言	265
24.2 应用改进分解法求解非线性问题	265
24.3 单介质激光系统的混沌特性	266
24.4 多介质激光系统的动力学特性(Hopf 分岔)	270
24.5 非线性激光系统的时空混沌控制	271
24.6 激光混沌控制的应用	274
参考文献	275
第八篇 探索与驾驭复杂性	
内容提要	277
第二十五章 复杂性问题与驾驭复杂性	278
25.1 引言	278
25.2 复杂性产生的总根源与新世纪面临的挑战	279
25.3 复杂性的若干基本特征和可能的物理机制	281
25.4 混沌和湍流系统典型的复杂性	284
25.5 原子能科学技术的复杂性问题	286
25.6 有关复杂性的“定义”	287
25.7 刻画复杂性的重要方法之一	288
25.8 复杂性的一个典范:形式语言的语法复杂性	289
25.9 复杂性研究展望	291
参考文献	291
未尽的结语兼致谢	293

第一篇 导论——基础与创新

内 容 提 要

混沌是自然界及人类社会中的一种普遍现象,它是在一个确定论系统中出现的一种貌似不规则的、内在的随机性运动,展示了事物的复杂性。混沌实际上并不“混”,既非纯粹的“无序”,又非纯粹的“有序”,而是两者的统一,即有序与无序的统一,确定性与随机性的统一,具有内在的规律性和普适性,内部包含着丰富的信息资源及可开发应用的潜能。

本书的安排是,先在认识混沌现象与高新技术领域的联系,及其某些规律之后,讨论如何驾驭混沌,分别介绍混沌控制、反控制和混沌同步的原理、方法、类型,以及它们在实验室及工程中目前应用研究的概况,特别是发展高新技术领域可能的应用前景。

第一篇在简单漫话“混沌”史之后,着重从一些领域中典型的混沌现象与高新技术的联系,诸如,混沌与长期天气的预报、束晕-混沌现象与强流加速器驱动的洁净核能系统、混沌与秘密通讯及信息技术、混沌与太空武器、混沌与生物医学工程技术、混沌与地震震级的预测、混沌与化工反应的控制、自由市场经济竞争、国际紧张局势的分析,甚至与音乐艺术等等的关系,说明“混沌”既不是几只“珍禽异兽”,也非高深莫测的怪物,而是与大自然、自然科学、人文科学和人类社会密切联系的普遍现象,它已经成为国内外关注的最广的交叉领域,并为高新技术提供新的生长点。为此,首先有必要了解混沌和驾驭混沌的意义,然后概述对“混沌”的一些科学界定,定量地刻画“混沌特性”的特征量及一些基本概念,从而为书后讨论“如何”驾驭混沌及其应用奠定一定的理论基础,以启迪创新的思维。

第一章 混沌现象的普遍性与高新技术的联系

1.1 引言——漫话“混沌”

“混沌”或“浑沌”一词,从古至今,毫不陌生。英文、德文、法文都叫 Chaos,俄文为 хаос,该词来源于希腊文 $\chi\alpha\omicron\varsigma$ 。国内外古时候的“混沌”含义都是一种“混乱无序”自然状态的意思。我国古代和古希腊的思想家的观点是,从“混沌”看宇宙,宇宙就是从毫无秩序的一片混沌中发展起来的,在时间和空间方面是无限的样子,可以认为,古代的“混沌”概念是一种朴素的宇宙起源学说。现在看到的宇宙和刚刚诞生的宇宙大不一样,因为它经历了大约 120 亿年的时空演化。现代宇宙学中有一种理论至今认同宇宙起源于混沌状态,例如,在著名的真空爱因斯坦方程中就有一个解呈现了混沌行为,从理论上已经证明了这点。《论衡·天篇》称太古时期是“混沌相联,视之不见,听之不闻”,后来,“盘古开天地,万八千岁,天地开辟,阳清为天,阴浊为地”,于是天和地就从混沌中分离出来了。同时,古人还对混沌的行为作了一定的描述,其中最有趣的是在《庄子》一书“应帝王内篇”的最后一篇写道:“南海之帝为倏,北海之帝为忽,中央之帝为浑沌。倏与忽时相遇与浑沌之地,浑沌待之甚善,倏与忽谋报浑沌之德,曰‘人皆有七窍,以视听食息。此独无有,尝试凿之’。日凿一窍,七日而浑沌死”。瞧!竟将混沌推崇为一个“中央之帝”,不仅十分“慈善”,而且处于“中央”显赫位置。混沌在此就并非混乱无序的意思了,似乎妙指(至少隐含着)混沌的某种“特性”,有着某种普遍性的东西,使人领悟到混沌非寻常一般也!但是究竟混沌是什么?由于无法考证,大诗人屈原提出了一系列“天问”:“遂古之初,谁传道之?上下未形,何由考之?”“明明暗暗,惟时何为?阴阳三合,何本何化?”,这些深奥的问题自然当时无法回答,却留给后人耐人寻味的启迪。

古埃及和古希腊与我国古代一样,也有上述宇宙起源于混沌的类似观点,如古希腊诗人赫西俄德在《神谱》中说:“万物之前先有混沌,然后才产生宽阔的大地”。德谟克利特认为世界是由杂乱无序的原子偶然碰撞结合而产生的,迄今关于由种种“碰撞”形成宇宙的观点依然存在。对西方文化一直起着重要影响的《圣经》,在《旧约全书》创世纪开篇第一句就讲到混沌:“起初上帝创造天地。地是空虚混沌,肃面黑暗;……”。如此等等,统观中外古哲学家对整个世界的认识,他们大致有一种共识,整个宇宙是由“一片混沌”中演化出来的,虽然对“混沌”的概念没有明确的定义,但认为混沌是一种自然发展状态、一种时空演化形态、乃至是宇宙间一种“至高无上”的普遍的客观存在,它与人类的生存环境和万物有着内在的联系,隐含着某种的规律性东西。既然混沌如此重要,难怪经过几代人的孜孜探索,才诞生了现代混沌的科学知识。

在中外的神话故事、文学、艺术、宗教典籍,以及近代科学与技术等各领域,“混沌”这个玄妙时髦的词汇,众说纷纭,屡见不鲜。它在不同地域、不同文化背景、不同层次及日常生活中的内涵不尽相同。但是,从现代科学技术观点理解“混沌”一词,已有比较明确的科学含义,例如,它与“无序”相联系,和“有序”相比较而存在,全球经过几代科学家的努力,已经取得了重大发展。在这里我们所谈的“混沌”,可以通俗说,混沌是一种表面上的“乱七八糟”,而从科学和技术的含义上来理解,它是在一个确定性系统中出现的一种貌似不规则的、内在的无规律运动,或内在的随机运动,即不是纯粹的“有序”,也非纯粹的“无序”,而是两者的统一,即有序与

无序的统一,确定性与随机性的统一,其内部包含一层层嵌套的自相似几何结构,所谓分形特性,维数是一个分数,而不是整数,具有一定的规律性和普适性。可以提供丰富的信息资源,极具可能开发应用的巨大潜力。

在自然界和现实世界中,混沌的发现既令人惊喜,又使人烦恼。惊喜的是它伴随而来绚丽多彩、千姿百态的大千世界,烦恼的是它又那么瞬息万变,充满复杂,难以驾驭。究竟它的奥秘在哪里?现在知道,奥秘主要来源于万物内部和相互之间的非线性关系。在大自然和世界上非线性关系是普遍存在的,通常的线性关系则是简单特殊的情形。“混沌”是非线性系统表现出来的共同行为。世界上非线性系统比比皆是:小到原子世界,大到宇宙,不论是自然科学,还是社会科学,也不论是工程技术领域,还是文化艺术部门,乃至集团部门和人际关系,各种各样的非线性系统,概不例外。从科学技术领域看,令人吃惊和感兴趣的是,描述混沌现象的一些典型数学物理方程,竟然可以概括一大类非线性系统的共同行为特性,具有普适性。例如,深入研究单摆运动规律知道,它能囊括从激光到超导等一大批高新科技领域中的问题,混沌研究与很多高新技术的发展有着极其密切的联系。

科学史上,最早了解混沌行为可以追溯到 19 世纪法国数学家、物理学家和天文学家庞加莱(J. H. Poincare),他最重要的工作之一是在研究保守系统天体力学时,以太阳系的三体运动问题为背景,提出了“天体力学的新方法”以及关于轨道稳定性问题,不仅证明了天体运动存在周期轨道,而且发现了三体引力相互作用可以产生惊人的复杂性,一个确定性动力学方程的某些解具有不可预见性,这实质上就是现在所讲的“混沌现象”。由于当时数学知识的不足,经历漫长的道路,一直到 20 世纪五六十年代,混沌理论才在天体力学领域里取得第一次突破性进展,提出了所谓 KAM 定理,该定理被公认为是创建混沌学理论的历史性标记。这个定理是前苏联概率论大师 A. N. Kolmogorov 和他的学生 V. I. Arnold 及瑞士数学家 J. Moser 三人名字的首位字母命名的,这是一个多世纪以来人们用微扰方法处理不可积系统所取得的最成功的结果,成为现代混沌学的第一个开端。1963 年美国气象学家 E. N. Lorenz 取得了现代混沌学研究的第二个突破性进展,他在大气对流模型的计算机数值计算中,发现了所谓的“蝴蝶效应”,即系统长期行为对初值微小变化的高度敏感依赖性,所谓“差之毫厘,失之千里”,产生确定性系统的非周期性和长期行为的不可预测性等混沌特性,从而对耗散系统中的混沌研究开辟了崭新的道路。1971 年法国数学物理学家 D. Ruelle 和荷兰的 F. Takens 首先提出用混沌来描述湍流形成机理的新观点,发现了第一条通向混沌的道路,为解开湍流的百年之谜指出了方向。1975 年,华人李天岩和他的导师 J. Yorke 联名发表了一篇论文《周期 3 则乱七八糟(蕴含混沌)》,著名的 Li-Yorke 定理描述了混沌的数学特征,率先引入“混沌”一词,这篇论文以其通俗性和趣味性在数学物理学界引起了广泛兴趣,在混沌学的研究中独树一帜。与此同时,法国数学家、分形学创始人 B. Mandelbrot 对混沌的几何特性的研究作出了杰出的贡献,他于 1973 年提出了分形几何学,为探索种种不规则的回转曲折的相空间提供了理想工具。同时,在 70 年代美国物理学家 M. J. Feigenbaum 发现了著名的 Feigenbaum 常数,把混沌学研究从定性分析推进到了定量计算的阶段,成为现代混沌学研究的一个重要里程碑。

20 世纪七八十年代掀起了全球的“混沌热”,1977 年在意大利召开的第一次国际混沌会议,标志着混沌学正式诞生。大会主持人之一著名物理学家 J. Ford 在会上指出,混沌学是 20 世纪物理学的第三次革命,与前两次革命相似,混沌学如同相对论及量子力学一样,冲破了牛顿力学的禁锢,“相对论消除了关于绝对空间与时间的幻象;量子力学消除了关于可控测量过

程的牛顿式的梦；而混沌则消除了拉普拉斯关于决定论式可预测性的幻想”，从而大大解放了人们的思想，它使描述自然界的两种对立的方法论（决定论与概率论）达到了和谐而完美的统一，解开了哲学上的百年悬案和湍流发端之谜，混沌论甚至被视为一种崭新方法论，正在成为人们深入认识世界和改造世界新的有力工具。

20 世纪 80 年代以来，许多学者将混沌学研究几乎与所有的自然科学交叉，开始向工程技术领域和社会经济领域渗透，形成蓬勃发展的喜人态势。

20 世纪 90 年代初以美国科学家 Ott, Grebogi, Yorke 和 Pecora, Carroll 为代表，分别在取得了混沌控制与混沌同步的突破性进展后，就像一阵旋风吹遍五洲四海，在全世界又掀起了“混沌控制热”。它同任何一场科技革命一样，正在猛烈冲击着当今几乎所有的自然科学，并且拓展到工程技术领域，甚至社会科学、经济、政治、文化、艺术和音乐等众多领域，引起了十分广泛的兴趣，使各种学科之间的融合达到了一种新的境地，提供了极好的机遇，并提出了空前的挑战。美国《纽约时报》科技部主任格莱克在其全球畅销书《混沌：开创新科学》中对混沌的意义和可能影响作了精彩的评说，认为“其覆盖面广及自然科学与社会科学的几乎各个领域，它不仅改变了天文学家看待太阳系的方式，而且开始改变企业保险决策的方式，改变分析紧张局势导致武装冲突的方式等等。混沌学正在促使整个现代知识体系成为统一的新科学”。现在掀起以混沌控制应用为广阔舞台的高新技术研究热潮，这必将推动 21 世纪的人类物质文明和精神文明的进一步发展，造福于人类。

1.2 蝴蝶效应与天气长期难测

“蝴蝶效应”是近代混沌的开拓者之一、美国著名的气象学家洛伦兹(L. E. Lorenz)描述混沌的一种奇怪特征时所用的一个生动的比喻，即混沌的行为对初始条件的微小变化具有高度的敏感性，所谓“差之毫厘，失之千里”，常言道“天有不测风云”，可以夸张地说，昆明植物园内一只美丽蝴蝶翅膀的轻轻扇动，就可能导导致台湾海峡甚至美洲加勒比海沿岸天气的剧烈变化，也许由风和日丽的朗朗天气，瞬间转变为暴风骤雨，其中仅仅“差之毫厘”的蝴蝶翅膀微微地一扇，却能导致最终“失之千里”完全不可预测的天气变化，这就是所谓的“蝴蝶效应”的涵义。而以他命名的“洛伦兹吸引子”也恰似一只展翅的蝴蝶，因此，蝴蝶效应再贴切生动不过了。

天气预报是最令人关注的一件事情。能否真正做到对天气的长期的准确预报，一直是一个有争论的重大的科学命题。因为天气与人们的日常生活、生产和科技等各项活动息息相关。特别是当今信息时代，气象部门向各地提供准确可靠的气象信息具有更加重大的意义。人们总是抱着一个美好的愿望：希望有朝一日科学技术能达到这么一个高度，不仅能准确地对天气进行短中期的准确预报，而且能作长期准确的预报。当然要是能依人们的意愿随心地驾驭“老天”，造福人类，那就太好了。正是这两点，成为人类长期征服大自然的两大难题。

现代气象学虽然诞生已有 160 多年了，各国气象部门对天气的短期预报成绩卓著，但是迄今对 2~10 天的中期预报准确率不高，至于对于 10 天以上的长期和超长期的预报就感到十分困难和根本做不到了。前苏联南北极科研所气象学家吉斯认为：“苏联和其他国家都编制月、季等长期预报，但是预报质量不高，原因是至今还不了解是哪些因素确定着大气环流和天气状况，在编制预报时不知道如何考虑这些因素”。美国气象预报的水平又是如何呢？根据美国气象学会 1979 年的评估结果，他们预报 12 小时以内 1000 公里以上天气系统的变化有较高水平；能经常在 24 小时预报出强风暴、大雨、灾害性风等的大致区域，但是报不出龙卷风的准