

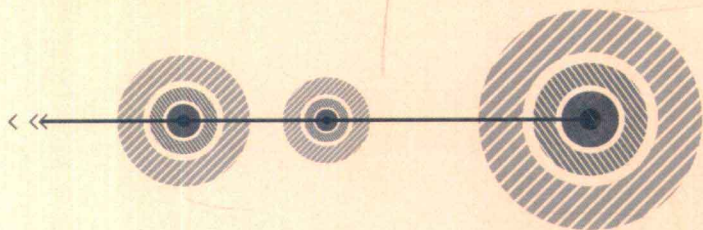
“十二五”重点图书

➔ 学术研究系列

混沌波形的相关性

——相空间轨迹与混沌序列自相关特性

陈滨 著 周正欧 审



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

“十二五”重点图书

混沌波形的相关性

——相空间轨迹与混沌序列自相关特性

陈 滨 著
周正欧 审

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书在简单介绍混沌及其研究方法和实际应用的基础上,研究了混沌的相空间轨迹结构同混沌自相关特性的联系。采用相空间方法,探讨了混沌时间序列的自相关的规律性,取得了一定的明晰、实用的研究成果:建立起混沌内部规律同其自相关的联系,论证了 APAS 定理,并指出通过 APAS 定理可以判断出自相关特性不好的序列的结构瑕疵,同时提出了针对这些瑕疵进行改良的方法,改善了序列的自相关性能。笔者进行了大量仿真对上述内容和理论作了证实。

本书还介绍了先前用弱结构法对混沌自相关特性初步改进的成果,也用 APAS 定理对弱结构法作了解释;从实用角度出发,探讨了噪声及误差对混沌自相关和改进方法的影响。

本书对于混沌信号的应用和进一步研究有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

混沌波形的相关性——相空间轨迹与混沌序列自相关特性/陈滨著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2011.12

(学术研究系列)

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2711 - 3

I. ① 混… II. ① 陈… III. ① 混沌理论—自相关函数—研究 IV. ① O415.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 258611 号

策 划 李惠萍

责任编辑 李惠萍 李晶

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×960 毫米 1/16 印张 10

字 数 173 千字

印 数 1~2000 册

定 价 19.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2711 - 3/O · 0119

XDUP 3003001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

混沌是 20 世纪物理学上的一个重要发现，它的发现吸引了诸如数学、物理、化学、天文、地理、生物、信息等领域研究人员的兴趣。

混沌及其应用已成为国内外的一个热门研究课题。

从事电子科学与技术的研究人员，正在积极地研究将混沌信号应用于通信与雷达领域中。

混沌信号具有以下特性：

- (1) 非周期、宽频谱和类噪声特性；
- (2) 其产生依赖于初始条件，且长期特性不可预测；
- (3) 易于产生和复制；
- (4) 种类繁多，数目巨大。

因此，将它作为通信与雷达的信号源对研究人员是具有很强的吸引力的。本书正是从这一点出发，广泛地收集了现有的研究成果并结合作者本人所作出的研究来探讨如何将混沌信号应用于通信与雷达中。

同步与自相关特性是实现这种应用所必须解决的问题。

关于同步问题，作者首先介绍了混沌同步的定义、类型以及同步控制的方法。针对目前常用的混沌系统，按其动力方程分为分块线性和二阶可微的两大类混沌系统，给出了同步的充分条件，并证明此条件一定可实现。从理论上表明混沌同步在通信和雷达中的应用是可行的。

混沌信号的自相关特性对通信与雷达的性能具有很重要的影响，尤其是对混沌信号在雷达领域的应用影响重大。

一些混沌信号的自相关特性好（即主峰尖细突出，极低副瓣），其模糊函数呈图钉状，很适用于具有大时带积的脉冲压缩雷达，能兼顾长作用距离和高距离分辨力。

但是，不是所有类型的混沌信号都具有良好的自相关特性，即使

自相关特性好的某些类混沌信号在进行调制后，其自相关特性也会变坏。

作者先介绍了弱结构法对混沌信号自相关特性的初步改进，使得具有弱结构性的混沌信号能在经受各种雷达调制后依然保持良好的自相关特性和模糊函数性能。但弱结构法只是从外特性上使混沌信号接近噪声特性而获得好的自相关特性。

为了从本质上解释这些现象，作者提出采用相空间法对混沌信号的自相关特性进行研究，得出了一个对序列自相关特性较好的推测、判断，即 APAS 定理。作者用 APAS 定理检验了多种混沌信号，表明用 APAS 定理可以判断一个混沌信号自相关特性的好坏，还可以根据 APAS 定理找出自相关特性不好的序列的相空间结构的缺点。改正这些缺点可使其自相关特性变好。作者同时指出，这些改良后的混沌信号具有好的自相关特性，但在经过某些调制后有些调制混沌信号自相关特性仍可变差。

综上所述，本书较全面和深入地介绍、探讨了混沌信号在通信和雷达应用中已解决和尚待解决的问题，为混沌信号的应用打下了良好的基础，具有重要的学术价值与应用价值。

周正欧

2011 年 11 月

前 言

混沌现象和机理存在于几乎所有物质世界以及人类社会中，对事物乃至人类行为、社会的演化都起着一定的作用。混沌现象无处不在，大至宇宙，小至基本粒子，无不受混沌理论的支配。在现代的科学中普遍存在着混沌现象，混沌打破了不同学科之间的界线，它是涉及系统总体本质的一门新兴科学。混沌外表虽然类似随机现象，但不同于随机现象，混沌内部往往存在固有的确定的规律性。

随着对混沌的深入研究，混沌日益广泛地应用到各个领域。但对混沌的一些基础特性方面的研究，比如对混沌自相关特性的研究，还存在不足。信号的自相关特性是对信号相关程度的一种度量，是信号在一个方面的性能的重要表征，在现代科学的各个领域，比如在信号检测方面，有着广泛和至关重要的作用。

不同混沌序列的自相关特性往往是不同的，就是同一混沌序列，其不同调制下的自相关特性往往也不同。之前的研究难以找到其中的规律，难以建立混沌内部规律性同其自相关特性之间的有效联系，从而难以判断和找到自相关有问题的混沌信号内在结构上的瑕疵，也无法对其相关特性进行有效的选择和改良。这对混沌的分析和应用带来了很大的问题，也反映了把复杂多样的混沌内部固有规律同其统计特性联系起来确是有待解决的研究难题。

本书内容延续了作者在电子科技大学的研究课题——“混沌在时变参数保密通信及雷达波形设计中的应用基础研究”^[2]，是对混沌自相关特性的进一步研究。书中综合了作者近期发表的一系列论文^[3-10]的研究成果。采用相空间方法，把相空间轨迹同自相关特性联系起来，在探讨混沌时间序列的自相关的规律性方面取得了一定的明晰、实用的研究成果：建立起混沌内部规律同其自相关的联系，论证了 APAS 定理，指出通过 APAS 定理可以判断出自相关特性不好的序列的结构瑕疵，还可以针对这些瑕疵进行改良，提高序列的自相关性。为运用非线性系统的结构性研究非线性序列的一些特性，比如自相关特性，开辟了新的思路。

本书内容具体安排如下：

第一章，介绍了混沌及其特点，阐述了混沌研究的目的及意义、混沌研究的发展历程以及混沌研究的一些方法。针对本书的研究内容，着重介绍了相空

间表征方法以及混沌的多样性。

第二章，简单介绍了混沌的一些应用，比如混沌控制和同步，以及混沌在通信和雷达领域的应用。

第三章，介绍了混沌的自相关函数及其应用，混沌自相关存在的问题，以及目前在这方面研究的缺乏。指出用传统方法研究混沌自相关是困难的。

第四章，比较了混沌和噪声的异同，提出了用弱结构的方法初步解决混沌自相关的问题，对弱结构法的作用及目前存在的问题作了介绍。

第五章，针对混沌的内在有序性，采用相空间法研究混沌序列的自相关特性。对相空间与自相关的联系作了论述，论证得到了明晰、实用的 Autocorrelation Phase - space Axis Symmetric (APAS) 定理，并用此来处理混沌自相关特性不稳定的问题，包括对混沌自相关特性的判定和改良。

第六章，用前面得到的 APAS 定理，对各种混沌序列、噪声序列，甚至是一般的其他序列的自相关特性进行了检验，也对序列的相空间结构缺陷作了鉴别，另一方面，验证了 APAS 定理的正确性。

第七章，根据 APAS 定理，提出了改良序列自相关特性的方法，用此方法对自相关特性不好的各种混沌序列、噪声序列，甚至是一般的其他序列的自相关特性进行了改良，取得了很好的效果，表明此方法是简单、实用和有效的。本章还从实用角度出发，探讨了数模转换(ADC)和噪声对自相关特性的影响，研究表明 ADC 和噪声对自相关特性的影响是比较小的，对本书提出的改良自相关的方法影响也很小。

第八章，总结了本书采用的相空间法研究混沌序列自相关的作用和意义，提出了我们下一步的研究计划：相空间法对混沌序列调制自相关特性的研究。调制自相关更加多样和复杂，研究难度更大，但信号往往是经过了调制才来使用的，因此，混沌调制自相关的研究具有很重要的实际意义。

感谢笔者的导师周正欧教授、刘光祜教授、张玉兴教授在笔者的研究过程中给予的悉心指导，同时感谢何子述教授、洪时中教授对笔者的帮助。也要感谢西安电子科技大学出版社李惠萍等同志为本论著的出版所做的细致的工作。

限于笔者的能力，书中难免存在不足之处，敬请同行、专家批评、指正。

陈 滨

2011 年 9 月

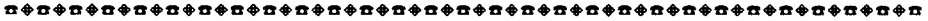
目 录

第一章 混沌简介	1
1.1 绪言	1
1.2 混沌基础	1
1.2.1 混沌及其研究的历史发展	1
1.2.2 混沌研究的目的和意义	6
1.3 混沌的基本理论	7
1.3.1 混沌的定义	7
1.3.2 混沌的主要特征	9
1.3.3 混沌的类型	10
1.3.4 混沌的分析方法	11
1.4 混沌的相空间表征方法	15
1.4.1 相空间重构	15
1.4.2 最小嵌入维数的确定	16
1.4.3 正确重构相空间	18
1.4.4 本书研究自相关所需的相空间重构参数	18
1.5 混沌系统的多样性和复杂性	20
1.5.1 连续混沌动力系统的多样性	20
1.5.2 离散混沌系统的多样性	22
1.5.3 通往混沌的道路是多样的	29
1.6 混沌的有序和无序	33
第二章 混沌的部分应用	34
2.1 混沌同步	34
2.1.1 混沌同步的定义	34
2.1.2 混沌同步的类型	35
2.1.3 混沌同步的一般判据	36
2.1.4 混沌同步的控制方法	37
2.2 混沌时变参数同步	41
2.2.1 两大类混沌系统同步理论基础	42
2.2.2 Chua 电路	50
2.2.3 用 Chua 电路检验定理 2.3	52

2.2.4	时变参数混沌同步理论	53
2.2.5	时变参数混沌同步的验证	55
2.3	混沌在通信领域的研究现状	58
2.4	混沌在雷达领域的研究现状	59
第三章	混沌信号的自相关特性及其应用	61
3.1	混沌信号的自相关特性	61
3.2	混沌信号的自相关特性的应用	62
3.3	混沌信号的自相关特性存在的问题	65
3.3.1	不同混沌序列的自相关特性的差异性	65
3.3.2	在不同调制下自相关特性的差异	66
3.3.3	同噪声信号的比较	72
3.4	自相关问题对混沌信号应用的影响	72
3.5	传统方法研究混沌自相关的困难	72
3.5.1	统计方法研究混沌自相关的困难	72
3.5.2	传统解析方法研究混沌自相关的困难	74
第四章	弱结构法对混沌信号自相关特性的初步改进	75
4.1	混沌和噪声的异同	75
4.2	使混沌系统具有弱结构性	77
4.3	弱结构的混沌信号的特性	78
4.3.1	弱结构的混沌信号	78
4.3.2	MSPL 序列统计特性	81
4.3.3	本身的自相关特性	82
4.3.4	调制后的自相关特性	84
4.4	同噪声信号的比较	86
4.5	弱结构法的意义及存在问题	87
第五章	相空间法及其对混沌信号自相关特性的研究	88
5.1	采用相空间法研究混沌自相关特性的原因	88
5.2	相空间和自相关的联系及 APAS 定理	88
5.2.1	相空间和自相关的联系	88
5.2.2	APAS 定理	90
5.3	相空间法研究混沌自相关特性的实质和意义	92
第六章	对相空间法得出结论的检验	93
6.1	用各种不同信号进行检验	93

6.1.1	用低维混沌信号检验	93
6.1.2	用高维混沌信号检验	101
6.1.3	用空时混沌信号检验	106
6.1.4	用噪声信号检验	107
6.1.5	用其他信号检验	108
6.1.6	用弱结构混沌信号检验	108
6.2	本章小结	109
第七章 相空间法对混沌信号自相关特性的改进		110
7.1	相空间法改进自相关特性的机理	110
7.2	改良方法	110
7.3	对改良方法的检验	112
7.3.1	用低维混沌信号检验	112
7.3.2	用高维混沌信号检验	125
7.3.3	用空时混沌信号检验	134
7.3.4	用其他信号检验	137
7.4	ADC 和噪声对自相关特性以及改良方法的影响	138
7.4.1	ADC 和噪声对自相关特性的影响	138
7.4.2	ADC 和噪声对改良方法的影响	140
7.5	本章结论	142
第八章 研究的意义和需要进一步解决的问题		143
8.1	相空间法研究混沌自相关特性的结论和意义	143
8.2	今后需要进一步解决的问题	143
参考文献		146

第一章 混沌简介



1.1 绪 言

混沌现象和机理无处不在,存在于几乎所有物质世界以及人类社会中。随着混沌研究的深入以及混沌日益广泛地应用到各个领域,对混沌的一些基础性方面的研究的不足已凸显出来,比如,对混沌自相关特性的研究。信号的自相关特性是对信号相关程度的一种度量,是信号在一个方面的性能的重要表征,在现代科学的各个领域,比如在信号检测方面有着广泛和至关重要的作用。不同混沌序列的自相关特性往往是不同的,就是同一混沌序列,其不同调制下的自相关特性往往也不同。之前的研究难以找出混沌自相关特性有好有坏的规律性,给混沌应用带来了一定的困难。

混沌外表虽然类似随机现象,但它又不同于随机现象,混沌内部往往存在固有的确定的规律性。以往对混沌自相关的研究往往对混沌内在的规律性重视不够,难以建立混沌自相关同其内在规律的联系,导致研究遇到了困难。这也反映了由于混沌几乎无穷的复杂性,导致了综合研究复杂多样的混沌内部的固有规律是一个艰难的研究课题。

以下对混沌作一个简单的介绍。

1.2 混沌基础

1.2.1 混沌及其研究的历史发展

现实世界一般不是有序、稳定和平衡的,一切系统都含有不断起伏着的子系统,有时其一个微小的起伏或涨落都有可能演变成巨大的波澜,使原系统的运行状态完全改变。在这个奇异时刻,根本无法预知变化将向何处去——是分解形成混沌状态,还是跃变到一个新的更加细分的有序态。混沌沟通了有序与无序、确定与随机之间的联系,有序态和混沌态之间的共存和互演开拓了一个全新的视野。

混沌(Chaos)是确定性系统中出现的极其复杂的、类似随机的现象。这里,“确定性系统”是指混沌系统由确定的动力学方程所描述。“随机”是指混沌本身具有内随机性,表现为系统长期行为的不可预测性^[1-24]。混沌现象表明了确定性与随机性两者是相通的,体现了两者既对立又统一的关系,即确定性内在地包含随机性,随机性隐含着确定性。混沌是有序中产生的无序运动状态,无序来自有序,无序中蕴涵着有序。混沌不等于混乱,是一种貌似无序的复杂有序现象^[1]。混沌系统的最大特点就在于系统的演化对初始条件十分敏感,因此从长期意义上讲,系统的未来行为是不可预测的。

混沌机理存在于几乎所有的物质世界以及人类社会中,对事物乃至人类行为、社会的演化都起着一定的作用。混沌现象无处不在,大至宇宙,小至基本粒子,无不受混沌理论的支配。客观世界存在混沌,如数学、物理、化学、生物学等;主观世界同样存在混沌,如哲学、经济学、社会学、音乐、体育等等。因此,科学家认为,在现代的科学中普遍存在着混沌现象,它打破了不同学科之间的界线,它是涉及系统总体本质的一门新兴科学。人们通过对混沌的研究,提出了一些新问题,向传统的科学提出了挑战。

近代科学由于以研究自然界的秩序和规律为其宗旨,所以数百年来把混沌现象排除在外。因而,自然界中大量的混沌现象就被科学家们遗忘了。而笛卡儿和康德却是例外,尽管他们只是把混沌看成浑然一体,混乱不堪的东西,但是他们认为有序的宇宙正是从这样的混沌之中发展起来的。在这期间值得一提的就是康德,他的星云假说认为,太阳系是由处于混沌状态的原始星云演化而来的,并指出:“我在把宇宙追溯到最简单的混沌状态以后,没有用别的力,而只是用了引力和斥力这两种力来说明大自然的有秩序的发展。”因此,康德是考察宇宙从混沌到有序的演化的第一人。

19世纪中期,自然科学家首先讨论混沌问题的是在热力学领域。大家知道,当达到热力学平衡时,系统内部中的每一点的温度、压强、浓度、化学势等均无差别,处处相同,熵极大,即分子的混乱度极高。可见,热力学的平衡态实际上是一种传统意义上的混沌态。与此同时,科学家们还探讨了布朗运动、丁铎尔现象、反应体系中反应基因的无规则碰撞等这些微观状态,发现它们与混沌有关,都是混沌无序的状态,就连根深蒂固的牛顿力学也受到了它的冲击。

众所周知,300多年前,牛顿的万有引力定律和他的三大力学定律将天体的运动和地球上物体的运动统一起来了。牛顿的这一科学贡献曾被视为近代科学的典范。

随着科学的发展,人们进一步认识到,牛顿力学的真理性受到了一定范围的限制。19世纪末20世纪初,人们发现牛顿力学不能反映高速运动的规律,

一切接近光速的运动应当用爱因斯坦的相对论方程来计算, 光速 c 便成为牛顿力学应用的第一个限制。在此前后, 人们又发现, 微观粒子的运动并不遵守牛顿力学的规律, 在微观世界中应当用量子力学中的薛定谔方程来代替牛顿力学方程, 普朗克常数 h 就成了牛顿力学的第二个限制。

科学史上, 最早的混沌研究可以追溯到 19 世纪的法国数学物理学家庞加莱 (J. H. Poincare) [1, 24]。他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, 发现三体引力相互作用能产生惊人的复杂行为, 确定性动力学方程的某些解具有不可预见性 [1, 12, 24]。即在简单力学规则下, 无法精确计算三个或三个以上天体的运动, 意识到简单规则下多体引发的混沌运动的复杂性。实际上, 这就是混沌现象。这一发现使庞加莱成为公认的混沌理论的开创者 [21]。他为混沌动力学理论贡献了一系列重要概念, 如奇异点、分岔等, 还提出了参数微扰、庞加莱截面法等混沌研究方法。1903 年, 他在《科学与方法》上把动力学系统与拓扑学结合起来, 指出了混沌存在的可能性, 同时, 庞加莱还意识到不可预测的偶然性起源于不稳定性。在庞加莱之后, 很多科学家在各自的研究领域为混沌的建立进行了知识积累 [24]。

20 世纪五六十年代, 混沌理论研究取得了重大突破 [24]。前苏联概率论大师 A. N. Kolmogorov 发现, 如果把一个充分接近可积 Hamilton 系统的不可积系统当作可积 Hamilton 系统的扰动来处理, 在小扰动条件下, 系统的运动图像与可积系统基本一致; 而扰动较大时, 系统的图像发生了本质变化, 产生了混沌现象。随后他的学生 V. I. Arnol'd 及瑞士数学家 J. Moser 分别给出了较弱条件下的证明。人们将这些结论综合起来称为 KAM 定理, 该定理被公认是混沌学理论创建的历史性标志 [24]。这也是一个多世纪以来, 人们利用微扰方法处理不可积系统所取得的第一次突破性进展, 成为现代混沌学的一个开端 [1, 24]。1963 年, 美国气象学家 E. N. Lorenz 在有关耗散系统的研究中取得了现代混沌学研究的第二个突破性进展 [1, 23-24]。他在对一个由确定的三阶常微分方程组描述的大气对流模型的研究中发现, 系统的长期行为对初值的微小变化具有高度的敏感依赖性, 这就是有趣的“蝴蝶效应”。这一结果表明, 长期的天气预报是不可能的 [23]。根据这一结果, Lorenz 在流体对流模型数值解的不确定性论文《确定性的非周期流》中揭示了混沌系统的不可预测性 [23, 24], 从而为耗散系统的混沌研究开辟了崭新的道路 [1]。

20 世纪 70 年代, 混沌学作为一门新的科学正式诞生。1971 年, D. Ruelle 和 F. Takes 通过严密的数学分析独立地发现了奇怪吸引子, 并提出利用奇怪吸引子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 [1, 24]。1975 年, 美籍中国学者李天岩及其导师 J. A. Yorke 在一篇题为《周期 3 意味着混沌》 [1] 的著名论文中, 给出了在闭区间连续自映射的混沌定

义,深刻揭示了从有序到混沌的演变过程,并正式引入了“混沌”一词,从而为这一新兴研究领域确立了核心概念,为各个学科研究混沌现象树立了一面统一的旗帜^[1, 24]。1977年,第一次国际混沌会议在意大利召开,标志着混沌科学的诞生^[24]。

20世纪80年代,混沌的理论得到了进一步发展。在这期间, Lyapunov 指数、分数维、吸引子等一系列刻画混沌的概念先后被确定下来^[1, 21, 24]。1980年 Takes 等人提出了根据时间序列重构系统动力学结构的延迟坐标法,为混沌时间序列的建模预测奠定了理论基础^[24]。1982年, Gukenheimer 利用 Lyapunov 指数发展了区分混沌与真正随机运动的算法。1983年, Ford 利用遍历理论,得出混沌产生于通常被称为确定性系统的原因在于“数学上所要求的无限精度与物理系统所提供的有限精度之间的矛盾”^[24]。1984年,郝柏林的《混沌》一书在新加坡出版,为混沌科学的发展起了一定的推动作用^[12, 24]。1986年,中国第一届混沌会议在桂林召开,中国科学家徐京华首次提出三种神经细胞的复合网络,并证明它存在混沌^[24]。

随着对混沌研究的不断深入,人们在对混沌现象、产生机制等进行探索的同时,也在关注混沌应用的研究。20世纪90年代初,国际上混沌控制与同步^[1, 25]有了突破性的进展,激发了混沌理论与应用研究的蓬勃发展,从而使混沌的应用出现了契机^[1, 13, 24]。由于混沌的奇异特性,特别是对初始条件极其微小变化的高度敏感性及不稳定性,即所谓“差之毫厘失之千里”的缘故,使得混沌系统的长期运动具有不可预测性。所以,一直以来,人们认为混沌是有害的,不可控的、不可靠的,在实际中总是尽量避免混沌^[12]。同时,混沌系统及混沌现象的奇异和复杂性也尚未被彻底理解,人们一直认为混沌系统不能人为地控制和诱导。直到1990年,美国科学家 Ott, Grebogi, Yorke 基于参数扰动方法提出了参数小微扰法(即 OGY 方法),才第一次实现了混沌控制^[1, 11-24]。后来,一些传统的控制方法引入到混沌控制中,并获得了一些有益的成果。这些方法不仅提供了混沌控制的途径,更重要的是,为混沌控制走向实际应用奠定了坚实的基础^[1]。最早混沌控制的目的是消除混沌,但在一些实际问题中,混沌态本身就是很有用的运动形态,甚至是我们追求的目标。例如,当粒子在固体表面上通过扩散实现掺杂时,强混沌的运动形态有利于掺杂的速度和质量:在研究心脏的振动规律时人们发现,混沌信号正是健康的标志等等^[1]。既然混沌对人类也有着正面的作用,研究如何在保持系统混沌特征的同时又能控制其轨道行为就成为一个有用的课题,这就引出了混沌同步的概念。从总体上说,混沌同步属于混沌控制的范畴,所不同的是其控制的目标态是混沌^[1]。首例混沌同步现象是由美国学者 Pecora 和 Carroll 于20世纪90年代初期在电子学线路设计实验中实现的,并将其成功应用于保密通信中^[1, 11, 21]。在此之前,由于混沌

行为的最大特点是运动轨迹对初始条件的极大敏感性,使得任何两条相邻的轨道都要以指数规律互相分离直至变得完全互不相关。长期以来,人们认为重构相同的完全同步的混沌系统是不可能的。混沌同步的发现打破了这个禁锢,极大地推动了混沌同步的理论研究,从而拉开了混沌应用研究的序幕^[24]。

正如日本著名统计物理学家久保在 1978 年所指出的:“在非平衡非线性的研究中,混沌问题揭示了新的一页。”美国一个国家科学机构把混沌问题列为当代科学研究的前沿之一。混沌科学最热心的倡导者、美国海军部官员施莱辛格(Shlesinger M)说:“20 世纪科学将永远铭记的只有三件事:相对论、量子力学与混沌。”物理学家福特(Ford J.)认为混沌就是 20 世纪物理学第三次最大的革命。

与牛顿力学的应用经受相对论和量子力学革命性的突破有所不同,这次革命的实质就在于混沌是直接用于研究人们所感知的真实宇宙,用在与人类本身的尺度大小差不多的对象中所发生的过程。人们研究混沌时所探索的目标就处在日常生活经验与这个世界的真实图像之中。

众所周知,牛顿力学所描绘的世界是一幅静态的、简单的、可逆的、确定性的、永恒不变的自然图景,形成了一种关于“存在”的机械自然观。而人们真正面临的世界却是地质变迁、生物进化、社会变革这样一幅动态的、复杂的、不可逆的、随机性的、千变万化的自然图景,形成的是关于“演化”的自然观。因此,混沌是一种关于过程的科学而不是关于状态的科学,是关于演化的科学而不是关于存在的科学。十几年间,科学界以极大的热情投入到混沌理论与混沌控制试验应用的研究中。虽然步履维艰,但已经取得了一些突破性的进展^[1-24]。例如,美国宇航总署的科学家们使用非常少的残余氢燃料把一个 ISEE-3/ICE 飞行装置送到五千万英里之外,从而实现了“第一次科学彗星的对接”。他们指出,“这一项功绩归咎于天体力学中三体问题对于微小扰动的极端敏感性,而这在非混沌系统中是不可能的,因为那种系统需要巨大的控制量才能获得巨大的功效”。这些成绩的取得也给了混沌控制的应用前景一个充分的肯定。

目前,混沌及其应用已成为国内外的一个热门研究课题,并为高科技提供了新的生长点和发展空间^[1]。诸如:基于混沌及其同步的保密通信和混沌信息技术将在信息时代产生深刻的影响;强流加速器驱动的放射性洁净核能系统,比常规核电更安全、更干净、更便宜,而控制强流束产生的束晕—混沌已经成为强流离子束应用中的关键技术之一;混沌理论在生物医学工程中对探索生物复杂性、人脑奥秘,控制心脏系统和“动态病”治疗等提供了新思路和新方法;混沌还大大提高了激光输出功率,改善了激光性能,使激光应用更加广阔,等等^[1]。伴随着科学技术的进步,混沌与混沌控制在国防和国民经济领域将展示

出越来越大的应用潜力^[1]。

1.2.2 混沌研究的目的和意义

混沌在现代科学技术中占有重要的地位。一方面，混沌理论及混沌现象是非线性科学研究中的重要组成部分之一^[1-24]。另一方面，正如混沌科学的倡导者之一 M. Sbliesinger 和物理学家 J. Ford 所说的，混沌的发现是 20 世纪物理学上继相对论与量子力学后的第三次革命^[1]。“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^[1]。也就是说，混沌动力学的建立，使描述客观世界的两大理论体系——确定论和随机论长期对立的状态达到了自然和谐的统一，找到了由此及彼的桥梁；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，对有序与无序、确定与随机之间关系的认识更加深刻；启示人们认识事物的复杂性，揭示出自然界及人类社会中普遍存在的复杂性、有序与无序的统一、确定性与随机性的统一^[1-24]。目前，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的新武器^[1]。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的影响作了精彩的评说，“其覆盖面几乎广及自然科学与社会科学的每个领域。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”^[1]。

混沌现象广泛地存在于现实世界中，涉及数学、物理、化学、天文学、地理学、生物学等各领域^[1-24]。同时，混沌具有对初始值极端敏感，功率谱连续等特性^[1-24]。混沌在现实生活中到底是有害还是有益？混沌是否可以控制？有何应用价值及发展前景？这些都促使人们去思考。

自 20 世纪 70 年代以来，混沌和有关奇怪吸引子的理论有了很大的发展，并直接影响到数学、物理学中的许多分支，具有重要的实际意义。在力学方面，以往总是把牛顿力学和“决定论”联系在一起，只要初始条件和受力状态确定，以后的运动就完全确定了。然而由于运动具有内在随机性，使其由牛顿运动定律所确定的“初态”变得不可预测，它只有某种统计特性。在分析力学方面，过去主要是通过建立一般系统的力学方程来进行求解，或当大多数方程无法积分时，只能研究其解的各种性质。然而混沌理论指出了这类非线性系统发展和研究的新途径。混沌理论明确指出，高维非线性系统的方程不仅不能积分，而且其解对初值有敏感的依赖性。因此，还得用类似于统计力学的观点去处理。在流体力学中，湍流是一种极为复杂的现象，它的产生机理长期以来一直是一个悬而未决的难题。其困难的部分原因在于它同时存在着许多长度标度，即缺少

单个的特征长度。1971年茹厄勒和塔肯斯最早用奇怪吸引子理论来阐明湍流发生机制，其机制为不动点→极限环→2维环面→奇怪吸引子(湍流)，被称为茹厄勒—塔肯斯道路。他们的观点至今未得到承认，这是因为有人认为混沌理论目前还只能处理有限的低维的常微分方程，而真正的湍流则出现在3维空间中。并且流体运动的 Navier - Stokes 方程的动态与简化的常微分方程组的性质很不一样，用混沌解决湍流问题还为时尚早，但这种通向湍流的道路(还有费根包姆倍周期分岔道路、皮姆—曼恩威勒阵发混沌道路等)很有可能为湍流研究打开了一条新的思路。在非线性振动理论方面，大家知道，即使在周期性的激励下，非线性系统也会出现随机运动，那么在随机力的作用下，非线性系统又会出现哪些动态呢？这里的随机力(又称噪声或涨落力)是指它的作用与宏观变量相比是很小的，并且它反映了微观运动对宏观变量在演化过程中的杂乱无章的作用。因此，以往人们总是期望这种随机力对宏观运动的影响是小的，并作为一种消极的干扰来处理。然而，自20世纪70年代以来的非线性科学和统计物理的最新发展表明，一个小的随机力并不仅仅对原有的确定性方程结果产生微小的改变，而且它能出人意料地产生很多重要的影响。在一定的非线性条件下，它能对系统演化起决定性的作用，甚至能改变宏观系统的未来命运。另外，这种无规则的随机干扰并不总是对宏观秩序起消极破坏作用，在一定条件下它在产生相干运动和建立“序”上起着十分积极的创造性的作用。所以，揭示非线性条件下随机力所产生的各种重要效应，进而研究这类效应产生的条件、机制及其应用便成为目前非线性科学和统计物理发展的一个重要任务。

混沌牵涉到现实世界的方方面面，对现实世界造成了广泛而重要的影响，因此，我们无法逃避混沌，研究混沌是必须的。但混沌表现出来的状态、混沌的种类、产生机制和产生条件都很复杂，这就增加了我们研究的难度，同时也对混沌的应用设置了障碍。

但混沌复杂性却同混沌的一个重要特点——内部固有结构性有着紧密的联系。因此，利用混沌的内部固有结构性来研究混沌，是一个有效的方法^[2-10]，也是本书研究混沌自相关的一个关键的方法^[3-10]。

1.3 混沌的基本理论

1.3.1 混沌的定义

迄今为止，关于混沌还没有严格而被普遍接受的数学定义^[1, 16]。最早的混沌定义是由李天岩和 J. A. Yorke 在 1975 年发表的一篇《周期 3 意味着混沌》的