



混沌系统与 弱信号检测

聂春燕 著

清华大学出版社

混沌系统与 弱信号检测

聂春燕 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是基于混沌理论进行微弱信号检测的一本专著,主要针对混沌理论在信号检测和处理领域中的应用。

本书提出的检测方法为微弱信号检测提供新思路、新方法。书中详细分析了混沌系统的高斯化特性和混沌信号的非平稳特性;研究了基于 Melnikov 方法检测任意周期信号的混沌判据;提出了基于特定混沌系统相轨迹变化特性的微弱信号幅值检测方法,研究了与传统互(自)相关检测方法相结合进行混合测量的方案,并且分析了检测性能;提出了三种检测方法检测未知频率信号;最后,将变结构滑模方法引入到混沌理论检测信号频率方法中,构成一个带有控制项的混合系统。

本书可供理工科大学高年级本科生、研究生参考,也可供对混沌理论及其应用感兴趣的相关研究人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

混沌系统与弱信号检测/聂春燕著. —北京:清华大学出版社,2009.3

ISBN 978-7-302-19429-3

Ⅰ. 混… Ⅱ. 聂… Ⅲ. 混沌学—应用—信号检测 Ⅳ. TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 015569 号

责任编辑:王敏稚 陈志辉

责任校对:白 蕾

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:170×230 印 张:8.25 字 数:154 千字

版 次:2009 年 3 月第 1 版 印 次:2009 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:19.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:032362-01

序

混沌(chaos)是非线性系统在一定条件下表现出的特有现象。混沌理论解释了确定系统可能产生非确定结果。混沌的应用涉及数学、物理学、化学、地球科学、生物学、信息科学与技术等几乎所有自然科学,其应用领域还在不断地迅猛开拓。

微弱信号检测是测量领域中的尖端技术。由于它能测量传统观念中认为不能测到的微弱量,该技术一直受到信号检测领域的重视。

1992年Donald. L. Bix率先开展了利用Duffing方程检测微弱正弦信号的实验,随后国外又有一批学者对混沌检测问题进行了研究,涉及到的测量范围相当广泛,其测量精度也达到了较高水平。研究者们围绕着周期和谐波信号测量问题,对混沌测量系统进行了深入的研究;同时开展了混沌与常规混合测量系统的研究,采用自相关和互相关分别与混沌测量相结合的方法,降低了周期信号测量的信噪比门限。

混沌测量方法与现有的信号测量方法不同,具有极高的测量灵敏度。由于混沌系统对初始条件和参数的极度敏感,只要将被测信号加入到对其敏感的混沌系统中,就会导致该混沌系统的动力学行为发生本质的变化,这一特点决定了混沌测量方法可以应用于零均值噪声背景下微弱信号的参数估计。混沌系统的行为变化是由被测信号引起的,它必然带有该信号的全部信息,因此,通过适当的信号处理方法,就可以根据混沌系统的行为变化估计出信号的各种参数。基于混沌理论的强噪声背景下弱信号的参数估计、利用微弱信号扰动混沌系统、基于混沌理论对未知频率和幅值的检测方法以及混沌系统对微弱信号的放大作用等方面的研究突显了混沌理论在弱信号检测方面的重要作用。

聂春燕教授从事这一方向的研究十余年,本书总结了作者多年的理论研究成果,是一部很有特色的科研专著。根据当前学科理论与实际密切结合的要求,本书重点突出理论方法的基本原理和实用性,给出大量仿真实验结果和理论分析,便于读者了解混沌理论的弱信号检测方法的思想和应用,更好地解决实际问题。该书涉及的研究内容为探索混沌理论的弱信号检测提供参考。

石要武

2008年12月于吉林大学

前 言

传统的微弱信号时域检测方法,输入信噪比门限受到一定限制,很难进一步降低,基于混沌的检测方法弥补了传统方法的不足,检测性能达到了很低的信噪比。本书针对此问题进行讨论。在分析混沌基本特点的基础上,给出了常用的混沌系统数学模型并且作了详细分析。同时研究了特定混沌系统(Duffing 系统)的高斯化特性,利用此特点可以将混沌系统作为信号处理系统中的预滤波环节,提高信号输出信噪比性能。混沌信号在已往的应用中常被当作平稳信号进行处理,大大影响了测量结果。本书从摄动法和时频分析方法出发对混沌信号进行详细分析,论证了混沌信号的非平稳特性,为混沌信号更好地应用在其他领域中奠定了理论基础。在以往常用的混沌判别方法基础上,提出了基于 Melnicov 方法测量任意周期信号混沌判据的一般表达式,同时讨论了含有初相位角的混沌判据的应用问题。在以上混沌理论研究的基础上,着重研究了已知频率信号幅值的检测问题,基于特定混沌系统 Duffing 振子的相轨迹变化对参数的敏感性,提出了将传统的互(自)相关方法与混沌系统相结合构成混合测量系统的方案,探讨了多种噪声背景下的检测性能,其输入信噪比检测门限明显优于以往时域检测方法以及单独采用混沌的检测方法。对于未知频率信号的检测问题,本书基于混沌 Duffing 振子系统,提出了优化理论搜寻方差方法、滑模控制混沌相轨迹方法以及基于 Duffing 混沌系统的随机共振三种检测方法,并分析了检测性能。至此,全书从分析混沌系统的特性到推导混沌现象的判据,最后完成了已知和未知频率信号幅值的检测工作。

本书主要是针对混沌在信号检测和处理领域中的应用而编写的,因此,书中着重介绍混沌的基本理论知识及其应用,由于对混沌系统的进一步数学理论推导及论证在其他许多相关书籍中已有大量的介绍,本书并不进行详细阐述,而是详细介绍特定混沌系统在弱信号检测中的应用。混沌理论的应用目前大部分处于研究和探索阶段,尤其在信号检测方面还是一项崭新的技术,很多研究都处于仿真阶段,有很多有待解决和完善的问题。写作本书的一个目的就是吸引更多的对混沌感兴趣的研究者,通过大家的共同努力来解决这些问题。

本书是作者近几年从事基于混沌理论进行弱信号检测研究的一个总结,包含几年来所做的研究成果。本研究得到了国家自然科学基金(No. 69872012)的资助。在本书的写作过程中,得到了吉林大学石要武教授的支持和帮助,在此表示衷

目 录

第 1 章 混沌引论	1
1.1 混沌研究革新了科学观和方法论	1
1.2 混沌理论的发展及应用	2
1.3 弱信号检测的意义	5
1.4 混沌检测微弱信号方法的现状	6
1.5 本书主要内容	7
第 2 章 混沌基本特性及混沌动力学模型	9
2.1 混沌基本理论及特点	9
2.1.1 混沌含义的几种解释	9
2.1.2 通向混沌的途径	11
2.1.3 混沌的基本特征	12
2.2 典型混沌系统动力学模型	13
2.2.1 Duffing 系统数学模型及分析	14
2.2.2 Lorenz 数学模型及分析	16
2.2.3 Logistic 数学模型及分析	17
第 3 章 特定混沌系统和混沌信号的特性分析	21
3.1 基于 Wigner 分布特定混沌系统特性分析	21
3.1.1 Wigner 分布及特定混沌系统时频特性	21
3.1.2 Duffing 混沌系统带通滤波特性分析	24
3.2 特定混沌系统高斯化特性研究	24
3.2.1 Duffing 混沌系统高斯化特性理论分析	25
3.2.2 Duffing 混沌系统的高斯化特性检验	27
3.3 非平稳信号的特性分析方法	29
3.3.1 非平稳信号的基本特性	29
3.3.2 非平稳信号的时变谱特征	30

3.3.3	非平稳特性检验方法	30
3.4	混沌信号的非平稳统计特性分析	31
3.4.1	混沌信号与随机信号特性分析	32
3.4.2	基于摄动法的混沌信号统计特性分析	32
3.4.3	混沌信号统计特性表征方法	34
3.5	混沌信号非平稳特性仿真分析	35
3.6	基于小波方法的混沌信号的去噪	36
3.6.1	混沌信号去噪方法	37
3.6.2	混沌信号的小波去噪原理	37
3.6.3	仿真实验及分析	39
第4章	混沌判别方法及混沌系统判据	41
4.1	混沌系统的混沌状态判别方法	41
4.2	混沌时间序列的判别分析	44
4.2.1	建立数学模型	44
4.2.2	基于混合判别方法的时间序列信号分析	45
4.3	基于 Melnikov 方法特定混沌系统的混沌判据	50
4.3.1	Duffing 系统的混沌判据	51
4.3.2	检测任意周期信号的 Duffing 系统混沌判据	52
4.3.3	应用实例分析	54
4.3.4	含有初相位策动力的混沌判据	56
4.3.5	高斯白噪声对混沌判据阈值影响分析	59
第5章	基于特定混沌系统相轨迹变化的微弱正弦信号幅值检测方法	63
5.1	基于特定 Duffing 混沌系统的微弱信号幅值检测	63
5.1.1	数学模型与仿真模型建立	64
5.1.2	基于 Duffing 混沌系统检测弱信号幅值的原理	66
5.1.3	仿真实验及分析	69
5.2	基于相关方法与混沌混合测量微弱信号幅值的检测方法	72
5.2.1	互相关方法与混沌建立混合测量方法	72
5.2.2	自相关方法与混沌建立混合测量方法	74
5.3	各种类型噪声的统计特性	75
5.4	各种噪声背景下混合测量方法检测性能分析	80
5.4.1	噪声对混沌相轨迹变化的影响	80

5.4.2	高斯白噪声背景下检测性能分析	81
5.4.3	非高斯色噪声背景下检测性能分析	82
5.4.4	α 稳定分布噪声背景下检测性能分析	82
5.4.5	非平稳 $1/f$ 噪声背景下检测性能分析	84
5.4.6	纳伏级信号检测性能分析	85
第 6 章	基于 Duffing 混沌系统的未知频率信号的检测方法	89
6.1	基于优化理论搜索方差的信号频率检测方法	89
6.1.1	数学模型的建立及频率检测的基本原理	89
6.1.2	基于最优理论方法测量频率的研究背景	90
6.1.3	优化理论及最优搜索方差方法分析	91
6.1.4	仿真实验结果及分析	94
6.2	基于滑模变结构控制混沌的未知频率检测方法	95
6.2.1	滑模变结构控制基本原理	95
6.2.2	基于控制方法的未知频率检测的理论依据	97
6.2.3	仿真实验及分析	98
6.3	基于 Duffing 方程的随机共振检测未知频率方法	99
6.3.1	随机共振技术原理	99
6.3.2	基于 Duffing 方程的随机共振检测模型及分析	101
6.3.3	仿真实验及分析	102
6.3.4	基于 Duffing 振子的两种检测未知频率方法对比分析	103
第 7 章	混沌相关术语和常见混沌模型	105
7.1	混沌相关术语	105
7.2	常见混沌模型	110
参考文献		118

第1章 混沌引论

人们在自然界及各工程学科中都发现了混沌现象,并加以研究。20世纪80年代以后,横跨几乎所有自然科学和技术学科的混沌理论初步建立起来,如混沌时间序列分析、预测理论和1990年混沌控制的突破性进展,由此带来的理论、实验、应用研究的蓬勃发展为混沌的各种应用提供了必要条件,人们不再回避和抵制混沌现象,而是积极开展将混沌造福于人类的各种可能性研究。20世纪90年代以后,混沌理论及其在各领域的应用研究成为科学界的热点研究,吸引了诸学科科研工作者的注意,成为当今举世瞩目的学术热点。混沌理论探讨了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。对于非线性系统,人们以往认为确定性激励只能引起确定性响应,随机性激励只能引起随机性响应,而混沌现象的发现使人们惊奇地看到,确定性激励也可以引起随机性响应,这对人们的传统观念是一个冲击,使得过去认为已成定论的观念今天看来有重新认识的必要,并且使得长期以来似乎是难以解决的一些问题,从混沌的角度考虑有了解决的可能。混沌的发现是人们对自然界认识的一个突破,大大拓宽了人们的视野,加深了对客观世界的认识。

1.1 混沌研究革新了科学观和方法论

混沌研究表明,自然界虽然存在一类确定性动力系统,它们只有周期运动,但它们只是测度为零的罕见情形,绝大多数非线性动力学系统,既有周期运动,又有混沌运动,虽然并非所有的非线性系统都有混沌运动,但事实表明混沌是非线性系统的普遍行为。混沌既包含无序又包含有序,混沌既不具有周期性和其他明显对称性的有序态,也不是绝对的无序,而可以认为是必须用奇怪吸引子来刻画的复杂有序,是一种蕴含在无序中的有序。所以,在混沌运动中有序和无序是可以互补的。赫柏林院士给这一现象命名为“混沌序”。可见,混沌系统及至客观世界应是有序和无序的统一体。

混沌研究提示:世界是确定的、必然的、有序的,但同时又是随机、偶然的、无序的,有序的运动会产生无序,无序的运动又包含着更高层次的有序。现实世界就是确定性和随机性、必然性和偶然性、有序和无序的辩证统一。

混沌研究对传统方法论的变革有重大贡献,其中最突出的是从还原论到系统论的转变。经典的还原论认为:整体的或高层次的性质可以还原为部分的或低层次性质。认识了部分或低层次,通过加和即可认识整体或高层次,此即为分析累加还原法。这是从伽利略、牛顿以来三百多年学术界的主体方法。随着近代科学的发展,包括对混沌现象的探索,还原论到处碰壁。20世纪50年代,系统论思想开始形成,主张把研究的对象作为一个系统来处理。在此系统中,整体或高层次性质不可能还原为部分或低层次性质,研究这些整体性质必须用系统论方法。混沌是系统的一种整体行为,混沌研究的成果成了系统论的有力佐证。整体观和系统论正随着混沌学一起扩展到各现代学科领域,为现代科学的革命性变革从方法论的角度做准备。

混沌研究给科学方法论带来的转变概括为4条:①从还原论向整体论的转变,②从线性向非线性的转变,③从轻视非解析方法到重视的转变,④科学兴趣从简单性向复杂性的转变。

近期内混沌必将成为解释自然过程和社会过程的最理想模型,并将影响到人们的世界观和人生观。过去是通过决定论和欧氏几何学来认识世界,而今是通过复杂性科学和分形几何学来认识世界。

1.2 混沌理论的发展及应用

混沌是发生在特定系统中貌似随机的不规则运动。按传统观点,当确定性系统的参数不带随机性时,对确定性激励的响应也必定是确定性的。但现已证实:满足一定条件的非线性动力学系统受规则激励后也会产生貌似无规则、永不重复的混沌现象。

混沌的理论基础是19世纪创立的。公认地发现混沌的第一位学者是法国数学、物理学家 Poincaré。他在研究三体问题时,从动力学和拓扑的全局思想出发,指出可能存在混沌特性。1960年前后, A. N. Kolmogorov、V. Z. Arnold、J. Morse 深入研究了 Hamilton 系统中的运动稳定性,得出了著名的 KAM 定理,为混沌理论奠定了基础。1963年,气象学家 Lorenz 发表了著名论文《确定性非周期流》,为混沌理论贡献了 Lorenz attractor(洛伦兹吸引子)这个词。1964年, M. Henon 发现了 Henon 吸引子。1971年, D. Ruelle 和 F. Takens 将 strange attractor(奇怪吸引子)的概念引入耗散系统,他们的著名论文《论湍流的本质》在学术界第一个提出用混沌来描述湍流形成的机理,这一工作由 J. P. Gollub 等人的实验结果所支持,对 Smale 马蹄吸引子的研究起到了一定的推动作用。1973年,日本京都大学 Y. Ueda 在研究非线性振动时,发现了 Ueda 吸引子。1975年,华人李天岩和他的导

师 J. Yorke 联合发表了《周期三蕴含混沌》的文章,第一次引入 chaos 这个词,其实在此之前的 Sarkovsky 序列已经很好地说明了他们的论点,只是未被人所知。1976 年, R. May 用综述文章《具有复杂过程的简单数学模型》说明非常简单的一维迭代映射也能产生复杂的周期倍化和混沌运动。1977 年夏天,物理学家 J. Ford 和 G. Casati 在意大利组织了关于混沌研究的第一次国际性会议,进一步营造了混沌研究的氛围,促进了混沌研究的世界性热潮。1978 年,才华横溢的美国物理学家 M. J. Feigenbaum 发现了一大类系统中普适常数,引入了重整群思想,从而把混沌学研究从定性分析推进到定量计算阶段。这个结果在 1981 年,由美国麻省理工学院 P. S. Linsay 试验所证实。这一年,莫斯科国立大学的 Alekseev Yukobson 将符号动力学应用于混沌研究。F. Takens 提出了判定奇怪吸引子的实验方法,而 P. J. Holmes 转述并发展的 Melnikov 理论分析方法可用于判别二维系统中稳定流形和不稳定流形是否相交,也即判别是否出现混沌。1982 年至 1983 年, Takens、Packard、Farmer 等人根据 Whitney 拓扑嵌入定理提出重构动力学轨道相空间的延迟坐标法。物理学家 M. Berry 提出了“混沌学”这个名称,并逐渐被科学界所接受。Grassberger 和 Procaccia 运用相空间重构法从实验数据时间序列计算出实验系统的奇怪吸引子的统计特性,如分数维、Lyapunov 指数。1988 年,中国学者郝伯林、郑伟谋将符号动力学从一维系统推广到二维系统,为混沌理论的发展做出了贡献。1990 年美国马里兰大学的 Ott、Grebogi 和 Yorke 提出了著名的控制混沌的 OGY 方法,将混沌研究推向了应用领域。可见,研究者们对混沌的理论进行了深入的研究,为我们提出了如何利用混沌理论进行应用研究的重要课题。

混沌是自然界中的一大类现象,它比有序更为普遍。在现实的世界中,绝大部分现象不是有序的,而是无序的。目前对混沌研究在各领域都展现出其独特的魅力。在许多非线性系统中,包括差分方程、微分方程和积分方程等描述的非线性系统中,都已经发现存在混沌,但与实际应用有较大距离,大部分研究处于仿真阶段,但已经看出了一些应用价值,例如 Lorenz 方程,它指出了长期天气预报的困难,这一点可以用“蝴蝶效应”加以形象地说明;又例如非线性振动系统、非线性电路系统、聚集光纤与深海中的声射线传播以及大量的其他物理系统也存在混沌。近年来,混沌理论的应用得到了迅速发展,在许多方面都取得了一定的成果。如通信技术方面,混沌信号类随机性以及产生方式简单等特点,使其在保密通信方面显示出得天独厚的优越性。混沌遮掩利用混沌波作为载波,对信源进行加密和混沌同步实现掩盖通信,但是这种方法要求混沌信号的带宽要能够掩盖信息信号,如果不能满足这个条件,被加密的信息信号很容易通过线性滤波被提取出来。

混沌理论在医学方面也得到应用,现有研究表明,心动周期信号具有混沌特征,研究发现对估计某些疾病的严重性来说,混沌特征参数是现有的功率谱参数

更敏感的指标。国内外将混沌理论用于医学研究的报道主要限于脑电、心电方面的研究,以及在心脑血管学、流体力学方面的应用。我国学者近年在医学上的一些研究成果指出人们大脑处于积极状况时,脑电图的波形是混沌的,当人们睡眠或不思考问题时,脑电图显示周期性波形,由此进一步研究构成了神经元动作的模型。

在模式识别方面,可利用混沌轨迹对初始条件的敏感依赖性这一特点,通过混沌动力学系统构成模式识别系统。

在图像数据压缩方面,把复杂的模式作为简单的混沌动力学系统的吸引子再现出来。把复杂的图像数据用一组能产生混沌吸引子的简单动力学方程代替。此时只需要记忆存储这组动力学方程组的参数,相对于原始图像数据,数据量大大地减少了,从而实现了图像数据压缩。

岩体声发射中也存在混沌,岩体受力时发生变形或断裂,以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射。岩体在变形与破坏过程中伴随能量释放,在岩体能量释放由有序向无序转化过程中产生混沌,在完全无序、极度混沌的状态下,形成“雪崩”,岩体完全破坏。说明混沌动力学能较好地反映岩体的声发射特征。

混沌现象除了被应用于信号处理中还广泛应用于其他领域,如混沌控制与混沌保密通信等。随着人们对混沌理论研究的进一步深入,混沌理论与许多工程领域相互结合,产生各种新颖的理论和新技术。例如,混沌生物工程学、混沌图像处理技术、混沌控制理论、混沌噪音理论、混沌经济学、计算机非线性分析理论和技术等,此外,还有混沌艺术、混沌音乐、混沌医学等崭新的学科领域。混沌理论作为一门新兴的理论,越来越受到人们的重视,它的应用领域不断地扩大和深入。随着混沌科学和相应科学的不断发展,混沌理论的应用将具有极其广阔的前景。

多年来对混沌理论的研究,极大活跃了人们的思维。过去被人们认为确定论的和可逆的某些力学方程具有内在的随机性和不可逆性。确定的方程可以得出不确定的结果,这就打破了确定论和随机论二者描述体系之间的鸿沟,给传统科学带来很大冲击,同时也促进了其他学科的进一步发展。反过来,其他学科的发展也促进了对混沌的深入研究。随着混沌理论的成熟,当前对混沌理论的研究逐渐向应用领域过渡。从目前混沌理论的发展来看,混沌与其他学科相互交错、促进、渗透,使混沌不仅在电子学、信息科学、地质学,还在医学、经济学等诸多领域得到广泛的应用。最初对混沌的研究主要是为了在实际应用中避免混沌现象的出现或通过产生抑制信号控制混沌信号。近年来关于混沌应用的报道大量涌现表明,人们已从单纯研究混沌现象转向开发和驾驭混沌的种种特性以解决一些实际工程技术问题。

1.3 弱信号检测的意义

微弱电压的测量在雷达、声纳、振动测量、故障诊断、通信、物理学、系统辨识等领域有着极其广泛的应用。信息时代需要获取信息,信号检测则是人们获取信息的一个重要手段。目前在许多领域中具有广泛的应用,如生物医学、地球科学、电化学等。其检测对象是用常规方法和传统方法不能检测到的微弱量,如弱光、弱声、微电流等。随着科学技术的发展,微弱信号进行检测的需求日益迫切,是发展高新技术、探索及发现新的自然规律的重要手段,对推动相关领域的发展具有重要意义。微弱信号检测在某种意义上说是一种专门与噪声斗争的技术,是从噪声中提取有用信号的一门新兴学科。对于微弱信号检测,噪声几乎是无处不在,总是与信号共存。微弱信号幅值极小,测量时又受传感器和测量仪器本身噪声的限制,表现出的总体效果是待检测的信号往往被强噪声信号所淹没。噪声是影响信号质量的重要因素,正确处理微弱信号和噪声问题,可以提高信号传输和处理的质量。

当被测信号非常微弱时,容易被噪声淹没,对它们的检测往往变得十分困难。影响微弱信号检测的最主要因素是噪声的干扰。在采用良好技术措施的条件下,这些干扰主要来自传感器和测量仪器本身。尤其是在微弱信号检测中,如何降低输入信号信噪比门限一直为人们所重视。1962年第一台锁相放大器的问世,使人们将淹没在噪声中的信号的提取成为现实。从此以后,随着各种崭新的检测理论和方法的不断涌现,各种性能优良测量仪器的研制成功,微弱信号(如电压)的测量下限不断降低。时至今日,人们对正弦电压的检测下限已达到 $10\text{nV} \sim 100\text{nV}$ 的水平,对直流电压的检测下限更进一步达到了 10^{-11}V 的量级。随着人类科学技术水平的不断提高,尤其是光学、量子力学、生物医学、化学等领域研究的不断深入,人们又进一步提出了纳伏甚至亚纳伏正弦信号测量的迫切要求。这些研究成果的出现,广泛地应用于物理、化学、电化学、机械、生物医学、地质勘探、水声探测、雷达等各个领域,极大地推动了整个科学技术的迅速发展。在众多的微弱电压信号检测中,尤以微弱正弦信号的检测最为重要。自从19世纪末傅里叶级数和傅里叶变换理论问世以来,人们就对正弦信号的检测给予了高度的重视,并把它列为信号处理的核心问题之一。由于正弦过程结构的特殊性,对正弦信号检测理论和方法的研究不仅有着重大的理论意义,而且在雷达、声纳、振动测量、故障诊断、通信、物理学、生物医学、系统辨识等领域有着极其广泛的应用^[1,3]。微弱信号检测的方法从噪声的角度来看,可分为滤除噪声和抑制噪声两类。添加噪声的方法利用了非线性系统的随机共振理论,尽管其计算量小、检测速度快,但目前只限于对微弱信号进行定性的分析。对于时域方法,不论模拟测量系统还是数字测量系统,都需要有

低噪声前置放大器,而前置放大器是整个测量电路噪声的主要来源,因此输入信噪比门限都很高,很难进一步降低。

本书是在这种背景下提出了基于混沌理论检测微弱正弦信号的方法。进一步降低输入信噪比检测门限,是目前信号处理领域中非常热门的课题。传统的测量系统一般都以线性理论为主,而混沌检测方法所利用的是非线性、不稳定、非平衡和敏感性基本特征。基于混沌的信息检测技术就是从不稳定和非平衡中提取信息,利用这种检测思想进行测量和信号处理可以有效降低检测门限,具有独特的优点。

1.4 混沌检测微弱信号方法的现状

自从 20 世纪 60 年代出现 Boxcar 积分器以来,微弱信号的时域处理,一直没有特别有效的改进方法。文献[7]提出了多重自相关函数时域检测法,该方法在正弦信号频率未知的条件下可有效提高信号的检测能力。传统的自相关检测法将输入信号和延迟时间后的输入信号通过自相关运算,用信号和噪声、噪声和噪声之间不相关的特性达到提高输出信噪比的目的。当处理噪声和被测信号的频带有重合的混合信号时,传统方法在滤去噪声的同时,有用信号也受到损失。伴随着混沌理论在现代科学各领域中的深入研究与广泛应用,人们将混沌理论用于微弱信号的检测,并根据研究与应用中不同类型的背景噪声形成了用混沌进行微弱信号检测的理论与方法^[8~10]。此方法可以从频带重叠的混合信号中检测出待检信号,设备结构简单、仪器成本低。

混沌包含丰富的内部结构,蕴含着丰富的动力学信息。从 20 世纪 90 年代起,经过十多年的发展,发表了一些基于混沌理论的信号处理的研究论文,混沌检测作为一种新的信号测量方法,取得了一些令人瞩目的研究成果,展示了它极其广阔的发展前景。但是将混沌理论应用于微弱信号检测,探索实现微弱正弦信号检测的新途径的研究论文相对却很少^[5,6]。虽然混沌现象的研究不断深入,但混沌理论应用于信号检测仍然有许多问题有待解决。

目前,有关混沌测量的研究大部分尚处于仿真阶段。起初人们很难想像一个极不稳定的混沌系统能够进行精确的测量,但生物学研究发现感觉器官就是极不稳定的混沌系统,其检测灵敏度远远超出目前的科技水平,由此可以设想,如果将混沌理论用于测量可以取得突破性的成果。事实证明对于某些非线性动力系统,其参数的摄动会引起周期解发生本质的变化,混沌系统对小信号的敏感性以及对噪声的免疫力,使它在信号检测中具有很大潜力。本书作者的研究也证明了这种检测方法的可行性和有效性^[11]。文献[12~13]提出了微弱正弦信号幅值和相位

的估计方法。文献[12]用 Floquet 指数定量描述混沌系统的初值敏感性(SDIC),但需要预先进行非线性标定,而且还要依据先验实验数据获得修正公式。文献[13]利用层流相长度定量描述 SDIC,需要基于信号的先验知识获得经验公式,利用足够多的实验数据找出经验公式中的最佳匹配参数,建立处于临界分岔状态处系统动力学行为的特征指数与待测信号的信号参量之间的关系,实现对信号参量的估计。优点是对系统动力学行为判别准确,信号参量估计精度高,原理简单。缺点是两种方法都依赖信号的先验知识,局限了其应用领域以及信号参量估计。采用非线性最小二乘算法(NLLS),运算量大幅度提高,由于非线性最小二乘算法不一定保证估计值达到全局最优解,因此该方法不便于工程实现。

非线性系统混沌现象的应用在信号检测、分析和处理中扮演着越来越重要的角色。混沌测量是从不稳定、非平衡的状态中提取信息、处理信息,是全新的测量概念。一些学者对此已进行了探讨。经过几年深入的理论和实践探索,混沌理论和测量方法得到了丰富和发展。近年来我们课题组对混沌检测方法在噪声抑制范围和输入信噪比门限方面不断地进行研究,基于混沌系统对噪声的免疫力以及对小信号的敏感性,根据系统相轨迹,从混沌向周期态的相变实现了在强噪声背景中微弱信号的检测^[14],并且实现了任意噪声背景下的微弱信号的测量。

本书对混沌的理论研究主要集中于以下三个方面:第一,提出特定 Duffing 混沌系统是低频混沌系统,并且具有高斯化作用,在实际应用中可以作预滤波器^[6];第二,提出混沌信号具有非平稳特性^[15],在此基础上研究混沌的判据;第三,基于混沌理论的特性,提出任意噪声背景下的微弱正弦信号的未知幅值和未知频率检测方法^[16~18]。本书探讨基于混沌检测的理论方法,同时将其与实际应用相结合,扩大混沌理论在信号处理中的应用。

利用特定的混沌系统进行微弱正弦信号参量的检测是行之有效的方法,如何利用特定混沌系统的特性,以便取得更好的检测效果,还需要做进一步的研究。本书针对特定混沌系统,重点研究 Duffing 混沌系统的特性、混沌信号的非平稳特性以及特定 Duffing 混沌系统在微弱正弦信号参量检测中的应用。混沌理论在信号检测中的应用仍然存在许多需要探索和研究的问题,只有解决好这些问题,才能将其应用到实际工程中,更好解决实际问题。

1.5 本书主要内容

本书探讨的主要是针对现有的微弱信号处理方法的输入信噪比一直没有得到很好改善而展开的研究。虽然现有频域方法的输入信噪比门限比时域方法有所降低,但是它主要检测背景噪声是平稳、高斯分布的微弱信号,同时还需要大量

先验概率分布知识等条件,才能估计出待检测信号的参量。而本书提出的混沌检测微弱信号参量的方法不涉及噪声的分布特性,采用先验知识少,在各种噪声背景下都可以检测弱信号,而且与现有的弱信号处理方法比较,具有更低的输入信噪比。

混沌理论应用于信号检测的研究越来越受到关注,我们相信基于混沌理论的信号检测将会形成混沌应用的一个分支,基于混沌理论的检测技术在信号处理领域中以其独特的优势必将具有广阔的应用前景。

第2章 混沌基本特性及混沌动力学模型

混沌并非无序,简单确定的系统不仅可以产生简单确定的行为,还可以产生貌似随机的不确定行为,即混沌行为。混沌状态下的系统具有对初始条件敏感的特性,具有长期不可预测性。混沌理论的飞速发展为自然科学、工程技术等诸多领域提供了一种全新而有效的研究手段。

混沌理论使人们认识到随机输入并不是造成系统输出不规则性的唯一根源,具有纯确定性运动方程的某些非线性系统也能产生非常不规则的运动,即混沌运动。

2.1 混沌基本理论及特点

2.1.1 混沌含义的几种解释

混沌作为20世纪科学领域中的重大发现和重大成就之一,引起了各个科学领域专家的高度重视,并取得了很多成果。突变论的创始人Thom认为“混沌”一词不可能有严格的数学定义。迄今为止,混沌一词还没有一个公认的普遍适用的数学定义。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,显然不足以描述在各学科领域中的应用性。专家们的观点是——Haken:“混沌行为来源于决定性方程的无规运动”;Feigenbaum:“确定系统的内在随机运动”;Lorenz:“确定性非周期流”;赫柏林:“没有周期性的有序”;钱学森:“混沌是宏观无序、微观有序的现象”……综上所述,我们可以做出如下的理解:混沌是指确定的宏观的非线性系统在一定条件下所呈现的不确定的或不可预测的随机现象;是确定性与不确定性、规则性与非规则性或有序性与无序性融为一体的现象;其不可确定性或无序随机性不是来源于外部干扰,而是来源于内部的“非线性交叉耦合作用机制”,这种“非线性交叉耦合作用”的数学表示是动力学方程中的非线性项,正是由于这种“交叉”作用,非线性系统在一定的临界性条件下才表现出混沌现象,才导致其对初值的敏感性,才导致内在的不稳定性。

因此目前在不同的学科领域里对混沌的定义有不同的理解和表达方法,体现出在各自领域中的应用特点。