

学校编码: 10384

密级_____

学号: 31120081151455

廈門大學

硕士学位论文

水声信道对混沌信号非线性动力学
行为的影响

**Influence of Underwater Acoustic Channel on Nonlinear
Dynamic Behavior of Chaotic Signal**

水声信道对混沌信号非线性行为的影响

李作川

指导教师张宇教授

厦门大学

李作川

指导教师姓名: 张宇教授
专业名称: 海洋物理
论文提交日期: 2011年5月
论文答辩时间: 2011年6月

2011年6月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

在水声通信领域，由于水声信道是一个十分复杂的时变、空变、频变信道，信号在信道中的传输存在严重的传播损失和多径干扰，给水声通信和信号处理带来极大的困难。因此，滤波技术在水声信号处理中有着十分重要的应用。

由于海洋水声信道的复杂性，造成水声信号的高度复杂性以及高度非平稳性，水声信号呈现出强烈的非线性特征。因此，在水声信号处理研究中，常见的线性处理方法局限性较大，需要引入相应的非线性理论和方法。

混沌应用于水声领域，主要集中在信号的特征提取、检测和识别等方面。对于混沌信号在水声信道传输中，其自身动力学特性的变化的研究较少。本文运用非线性分析方法，研究了混沌信号经过滤波以及水声信道传输后，其非线性动力学特性的变化。为混沌理论应用于水声信号处理领域提供一个基础，对混沌载波应用于水声通信有着一定的参考价值，同时为理解混沌系统复杂的滤波行为提供了一个重要的参考工具。

本文首先阐述了混沌理论与混沌科学的发展概况，然后介绍了混沌的特性以及刻画混沌特征的分析方法。接着介绍了蔡氏混沌电路的工作原理，推导了蔡氏电路的微分方程描述，并搭建了蔡氏电路。根据蔡氏电路微分方程，通过计算机仿真以及电路实验来观察电路的混沌输出，二者结果是一致的。接着，通过数值仿真，不仅研究了 IIR(Infinite Impulse Response)滤波器对混沌信号非线性动力学特性的影响；还仿真了水池实验系统中，原始混沌信号(带宽 0-7 kHz)经过调制、滤波，再由经水池发送这一过程中，信号的非线性动力学特性的改变。仿真结果表明了，滤波和水声信道的影响都提高了混沌信号的非线性复杂特性。最后，通过水池传输实验，研究混沌信号经过滤波、换能器频响和水声信道的耦合作用下，信号的非线性动力学特性的变化。通过水池传输实验，不仅验证了滤波提高了混沌信号非线性复杂特性这一结论，而且发现了水声信道传输同样也提高了信号的非线性动力学特性。

关键词：滤波；混沌信号；蔡氏电路；非线性动力学特性；水声信号处理

Abstract

In the field of underwater acoustic communication, as acoustic channel is a complicated space-time-frequency varying channel, signal transmission inevitably exists serious loss and multipath effects, which brings great difficulty to underwater acoustic communication and signal processing.

The complexity of underwater acoustic channel causes highly complex and non-stationary acoustic signals which show strong nonlinear characteristics. In the study of underwater acoustic signal processing, commonly used linear processing method has limitations, and nonlinear theory and methods have to be introduced.

Chaos theory applied in the acoustic field mainly focused on signal feature extraction, detection, and recognition. For the chaotic signal transmission in the underwater acoustic channel, the change of the signal's dynamic characteristics has not yet been investigated. Nonlinear analysis method was used in this thesis to study nonlinear dynamic characteristic change of the chaotic signal before and after filtering and acoustic channel transmission. This study may provide a basic research for chaos theory applying in the area of underwater acoustic signal processing, have a potential value for chaotic carrier used in underwater acoustic communications, and provide an important tool for understanding the complex filter dynamics of chaotic systems.

This paper firstly introduced chaos theory and its history, and then summarized the characteristics of chaos and the related analysis methods. Secondly, we described the principle of Chua circuit and deduced the differential equation of Chua circuit. Thirdly, according to the differential equation of Chua circuit, we performed computer simulation and circuit experiment, and found out the results were consistent. Fourthly, through numerical simulation, we not only investigated the influence of IIR filter on nonlinear dynamic behaviors of chaotic signals, but also

investigated the changes of nonlinear dynamic behaviors of chaotic signals during the process includes modulation, filtering, and transmitting in the pool experimental system. Simulation results showed that the influence of underwater acoustic channel and filtering improved the nonlinear complexity of chaotic signal. At last, in the pool transmission experiment, we verified the changes of nonlinear dynamic characteristics of chaotic signals involving the coupling effects of the filter, transducer frequency response, and acoustic channel. Using the experiment, we confirmed the conclusion that filtering increased the nonlinear complexity of chaotic signal. Acoustic channel transmission was also found to affect the signal's nonlinear dynamic characteristics.

Key words: filtering; chaotic signal; Chua circuit; nonlinear dynamic characteristics; acoustic signal processing

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	IV
Catalog	VI
第 1 章 绪 论	1
1.1 混沌科学的发展概况.....	1
1.2 混沌在水声信号处理领域的研究现状.....	4
1.3 本文的主要研究内容.....	6
第 2 章 混沌理论与混沌的特性.....	7
2.1 引言.....	7
2.2 混沌的产生及其特性.....	7
2.2.1 混沌的定义.....	7
2.2.2 Logistic 映射	8
2.2.3 对初始条件的敏感依赖性.....	11
2.3 李雅普诺夫特征指数.....	13
2.4 奇怪吸引子.....	14
2.5 庞加莱截面.....	15
2.6 分形维.....	16
2.7 通向混沌的道路.....	17
第 3 章 混沌电路	20
3.1 混沌电路概述.....	20
3.2 Chua 电路简介	21
3.3 Chua 电路原理	22
3.3.1 非线性驱动部分.....	22
3.3.2 线性振荡部分.....	25

3.3.3 实际 Chua 电路	25
3.3.4 Chua 电路的微分方程描述	26
3.4 Chua 电路实验	30
3.5 结论	33
第 4 章 仿真滤波和水声信道对混沌信号非线性特性的影响	34
4.1 实验系统的设计	34
4.2 蔡氏电路数值解	35
4.3 滤波对混沌信号动力学特性的影响	39
4.3.1 巴特沃兹滤波器微分方程	39
4.3.2 滤波对蔡氏混沌信号的影响	41
4.4 信号的调制	44
4.5 发送端信号的混沌特性分析	46
4.5.1 相空间重构	46
4.5.2 关联维分析	48
4.5.3 仿真结果	48
4.6 仿真水声信道	50
4.7 结论	55
第 5 章 水声信道对混沌信号非线性特性的影响	56
5.1 水声信道	56
5.2 水池传输实验与结果	60
5.3 接收信号的关联维分析	67
5.4 结论	69
第 6 章 总结与展望	70
参考文献	71
攻读硕士学位期间发表的论文	74
致谢	75

Catalog

Abstract	II
Catalog	VI
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Development of Chaos	1
1.2 Development of Chaos in Underwater Acoustic Signal Processing	4
1.3 Main Research Contents	6
Chapter 2 Chaos Theory and the Characteristics of Chaos	7
2.1 Foreword.....	7
2.2 Emerge of Chaos and its characteristics	7
2.2.1 Definition of Chaos	7
2.2.2 Logistic map	8
2.2.3 Sensitive dependence on initial conditions	11
2.3 Lyapunov exponent.....	13
2.4 Strange attractor	14
2.5 Poincare map	15
2.6 Fractal dimension.....	16
2.7 The route to Chaos	17
Chapter 3 Chaotic Circuit	20
3.1 Chaotic circuit overview	20
3.2 Chua circuit introduction	21
3.3 Chua circuit principle.....	22
3.3.1 Nonlinear driving part	22
3.3.2 Linear oscillation part	25
3.3.3 Experimental Chua circuit	25
3.3.4 Differential equation of Chua circuit	26

3.4 Chua circuit experiment.....	30
3.5 Conclusion	33
Chapter 4 Simulation of Influence of Filtering and Underwater Acoustic Channel on Chaotic Signal's Nonlinear Dynamic Characteristics	34
4.1 Simulation of Experimental system.....	34
4.2 Numerical solution of Chua circuit	35
4.3 Influence of filtering on chaotic signal's dynamic characteristics	39
4.3.1 Differential equation of Butterworth filters	39
4.3.2 Influence of filtering on chaotic signal	41
4.4 Signal modulation	44
4.5 Chaotic characteristic analysis of the transmitting signal	46
4.5.1 Reconstruction of phase space	46
4.5.2 Correlation dimension analysis.....	48
4.5.3 Simulation results.....	48
4.6 Simulation of underwater acoustic channel.....	50
4.7 Conclusion	55
Chapter 5 Influence of Underwater Acoustic Channel on Chaotic Signal's Nonlinear Characteristics.....	56
5.1 Underwater acoustic channel.....	56
5.2 Experimental result of the pool transmission.....	60
5.3 Correlation dimension analysis of the received signal.....	67
5.4 Conclusion	69
Chapter 6 Summary and Forecast	70
Reference.....	71
Publications during M.S. study	74
Acknowledgement.....	75

第 1 章 绪 论

混沌理论是 20 世纪科学最重要的发现之一，被誉为继相对论和量子力学后物理学的第三次革命。它突破了确定性理论与随机理论之间的壁垒，揭示了自然界以及人类社会普遍存在的复杂性，是有序和无序的统一、确定性和随机性的统一。

混沌科学是随着现代科学技术的迅猛发展，尤其是在计算机技术的出现和普遍应用下发展起来的新兴交叉学科^[1]。它是研究确定性的非线性动力学系统产生混沌的机理、特征的表达，从有序到无序的演化及其反演化的规律与控制的科学。混沌学是一门关于过程的科学，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^[2]。用心观察，可以发现混沌现象充满在我们生活的现实世界中，大至天体运动，小至微观粒子，无不受混沌理论的支配。如漏水的自来水龙头滴水的周期存在混沌、气候的不可预测性、行星内部的运动以及各个学科如数学、物理、化学、生物等等也存在着混沌现象。

著名物理学家 Ford J 曾经说过：“相对论消除了关于绝对空间与时间的幻想，量子力学消除了关于可控测量的牛顿式的梦；而混沌科学的出现则彻底消除了拉普拉斯关于绝对论式可预测性的幻想”^[3]。在这三大革命中，混沌革命把表现的随机性和系统内在的决定机制巧妙地结合起来，大大拓宽了人们的视野。它在日常生活中，在自然科学及社会的领域中，覆盖面之广、跨学科之大、综合性之强、发展前景及影响之深远，都是空前的。

1.1 混沌科学的发展概况

早在公元前 560 年左右，中国古代思想家老子就有了关于“道可道非常道”之说，并初步提出了关于宇宙起源于混沌的哲学思想。公元前 450 年左右，中国古代哲学家庄子也曾说过“南海之帝为倏，北海之帝为忽，中央之帝为混沌”。庄子所说的倏、忽，就是迅速灵敏。混沌有无知愚昧的意思，分别代表三个皇帝，而混沌竟在中央。应当说，庄子说的是政治，隐喻的是哲学。因此，是庄

子最早把混沌的思想引入政治学的研究之中。他的“中央之帝为混沌”的思想则是对人类行为的混沌性态的认识的最早的哲学观点。

现代科学意义上的混沌的发现，可以追溯到 19 世纪末 20 世纪初，庞加莱 (Poincare H, 1854-1912) 在研究三体问题时遇到了混沌问题。1903 年庞加莱在他的《科学与方法》一书中提出了庞加莱猜想。他把动力学系统和拓扑学有机地结合起来，并指出三体问题中，在一定的范围内，其解是随机的。实际上这是一种保守系统中的混沌，而他也因此成为世界上最先了解混沌存在可能性的第一人^[1]。

1954 年前苏联概率论大师柯尔莫戈洛夫 (Kolmogorov A N) 在探索概率论起源的过程中注意到了哈密顿 (Hamilton) 函数中条件微小变化时周期运动的保持^[4]，该思想为 KAM 定理奠定了基础。到 1963 年和 1962 年分别经阿诺尔德 (Arnold V I) 和莫塞尔 (Moser J) 证明，这项研究被称为 KAM (Kolmogorov-Arnold-Moser) 定理。KAM 定理说明了保守系统在长期的演化过程中是怎样出现混沌态的。为保守系统也有混沌的理论铺平了道路。

与此同时，1963 年美国气象学家洛伦兹在《大气科学》杂志发表的著名论文《决定论非周期流》 (Deterministic Nonperiodic Flow) 中讨论了天气预报的困难和大气湍流现象，给出了三个变量的自治方程，即著名的洛伦兹方程^[5]：

$$\begin{cases} \dot{x} = -\sigma(x - y) \\ \dot{y} = -xz + rx - y \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases} \quad (1.1)$$

文中，他指出在气候不能精确重演与无法长期天气预报之间必然存有一定的联系，即非周期性与不可预见性之间的联系。同时，他还提出描述了“对初始条件的敏感依赖性”这一混沌的基本性质。也就是著名的“蝴蝶效应”，最早来自洛伦兹的一次科学演讲“可预报性：在巴西的一只蝴蝶翅膀的拍打能够在美国德克萨斯州产生一个龙卷风吗？”^[6]。相比于 KAM 定理，洛伦兹方程讨论的是耗散系统，从不同的角度说明了耗散系统是如何产生混沌态的。

1964 年伊依 (Henon M) 发表了论文《A Two-dimensional Mapping with A

Strange Attractor》，文中给出了下面的 Henon 映射^[7]：

$$\begin{cases} x_{n+1} = 1 + by_n - ax_n^2 \\ y_{n+1} = x_n \end{cases} \quad (1.2)$$

该方程组是一个自由度为 2 的不可积的哈密顿系统，然而通过调节参数 a、b，发现其系统运动轨道在相空间中的分布越来越随机。Henon 因此得到了一个简单的吸引子，并用他建立的“热引力崩坍”理论解释了太阳系的稳定性问题。

1971 年法国物理学家茹厄勒(Ruelle D)和荷兰数学家塔肯斯(Takens F)发现了耗散系统中存在着特别复杂的新型吸引子，证明了与这种吸引子有关的运动即为混沌，他们将其命名为“奇怪吸引子”。这一概念，提出用混沌来描述湍流形成机理的新观点^[8]。这对揭示湍流的本质有着很大的启发。

1975 年美籍华人学者李天岩和美国数学家约克(Yorke J)在美国《数学月刊》发表了题为“周期 3 蕴涵混沌”的著名论文^[9]，提出了著名的 Li-Yorke 定理。深刻揭示了从有序到混沌的演化过程。自此，“混沌”一词便正式出现在科学词汇中。

1976 年美国数学生态学家梅(May R)^[10]提出在生态学中的一些简单的确定性的数学模型中能产生随机的行为。重点讨论了著名的 Logistic 方程

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) \quad (1.3)$$

该方程看似简单，且是确定性的。然而通过改变参数 μ 在一定范围变化时，它却具有复杂的动力学行为，其中包括了分岔和混沌，促进了不同领域混沌学研究的互相交叉、联合。

1977 年第一次国际混沌会议在意大利召开，标志着混沌学在国际科学界正式诞生^[11]。

1978 年和 1979 年费根鲍姆(Feigenbaum M J)等人在梅的基础上独立地发现了倍周期分岔现象中的标度性和普适常数^[12]，建立了关于一维映射混沌现象的普适理论，从而使混沌在现代科学中具有坚实的理论基础。

1983 年美国伯克利分校蔡少棠教授(Chua L O)发明了 Chua(蔡氏)电路^[29]，促进了现代非线性电路理论的发展；1990 年，混沌同步电路的研究再次把非线性电路研究推向一个高潮。

90 年代以来,混沌科学与其他科学相互交错、渗透、促进、综合发展。混沌科学打破了各门学科的界限,它是关于系统整体性质的科学,并在各个领域,如信息科学与技术、经济与管理,尤其是在经济学、人脑科学、通信、激光工程中都有着广泛的应用。

1.2 混沌在水声信号处理领域的研究现状

非线性动力学分析方法是混沌信号处理中的一种重要方法。从系统论的观点看,系统的行为可以用状态向量来表示,系统的信息包含在状态向量中^[17]。而非线性动力学分析方法能够从观测到的时间序列中获取关于系统的信息。假设系统运行在一个低维吸引子上,根据 Takens 理论^[8],通过选择一个合适的时延,将时间序列嵌入到一个较高维的相空间中,嵌入空间将保留原始相空间的一些信息。通过这样一个分析方法,从一个时间序列中不易直接获得的信息,在嵌入空间中就有可能清晰的反映出来,一些看似无规则的信号,通过非线性动力学分析方法,就可以明显的观测其规律。

根据水声学理论,水声信号的产生和传播是一个十分复杂的过程。由于水声信号的高度复杂性以及高度非平稳性,水声信号呈现出强烈的非线性行为。长期以来,人们在对水声信号进行处理的过程中,往往强调其平稳性、随机性和线性,而忽视了其非平稳性和非线性特征^[13]。因此,在当前水声信号处理研究中,由于常见的线性处理方法局限性较大,需要引入非线性理论和方法。但是,与线性理论相比,非线性分析方法更复杂,其工程实现也较为复杂。尽管如此,随着混沌学、分形学等非线性理论的日趋发展,经过多年的研究和探索,水声领域中的混沌研究已取得了长足的进展。近年来研究表明,水声信号存在着一定程度的混沌行为^[14-16],如混响、舰船辐射噪声等。以下是国内外在混沌理论应用于水声信号处理领域的研究现状:

Zhu 等人^[18]基于混沌信号在实验及实际传输中的测量的实际考虑,研究了滤波对混沌符号动力学特性的影响。通过数值分析与实际实验表明了滤波引起混沌信号分形维数的增加,其动力学特性变得更加复杂。

Carroll 等^[19]研究了 IIR 滤波器以及 FIR 滤波器对混沌信号的特性的影响,

通过测量其分形维数，来区分这两种滤波器。

Leung 等人^[20]在 1990 年考察了海杂波的相关维数第一次提出 X 波段海杂波具有混沌特性，并用 G-P(Grassberger-Procaccia)算法计算出海杂波相关维数在 6-9 之间。1992 年他们计算了海杂波的最大李雅普诺夫(Lapynov)指数，结果为一正值，证明了海杂波的混沌特性。

Melvin 等人^[21]利用双谱对海洋声信号进行研究，发现以舰船辐射噪声为主的信号中含有环境噪声所不具有的非线性成分。

Frison 等人研究了浅海海洋环境噪声的非线性行为，计算得到 9 个李雅普诺夫指数，发现最大的李雅普诺夫指数为正，显示出海洋环境噪声的非线性特征^[15]。

Smironv 等人^[22,23]详细研究了深海声线传播模型的非线性动力学，深入分析了引起非线性行为的各种因素(内波、中尺度不均匀环境、声线传播时间变化等)，发现在未受扰动信道中的声线传播时间是初始条件和传播距离的函数，而且具有一定的尺度规律。

在国内，徐丰等^[17]研究了舰船辐射信号的混沌特征提取，构造了合适的用于舰船目标检测的实用检测统计量。

蔡志明等^[24]研究了水池混响、湖水混响以及海洋混响的非线性动力学特性，测得的混响最大李雅普诺夫指数为正且小于 0.3，研究表明了混响在低于 4 维的动力学空间中可展现不自交的动力学轨道，为混沌的非线性动力学建模与信号处理奠定了基础。

陈向东等^[25]在相空间中研究了舰船辐射噪声的非线性特性，结果发现舰船辐射噪声具有介于高斯白噪声与洛仑兹吸引子之间的空间几何特性，并发现同类目标之间具有相似性，不同类目标之间具有可分性的特点，为水声目标的识别与非线性研究提供了一个新的思路。

章新华等^[15]在进行舰船辐射噪声混沌现象的研究中发现舰船噪声信号的确存在混沌吸引子，且不同类别的信号有不同的吸引子维数，这一结果为水声信号处理、水下目标检测以及识别分类提供了新的手段。

从上述国内外学者在混沌理论应用于水声信号的研究中可以看出，用非线性

性动力学分析方法来分析水声信号是一个重要且有效的手段。将非线性动力学分析方法应用于水声领域，具有广阔的应用前景。

1.3 本文的主要研究内容

目前，混沌在信号处理中的工程应用较多集中在混沌特征提取、信号合成、混沌分离等方面。在水声信号处理研究领域，则主要集中在信号的特征提取、检测和识别等方面^[27,28]。对于混沌信号在水声信道传输中，其非线性动力学特性的变化研究较少。本文主要研究了混沌信号经过滤波以及水声信道传输后，其非线性动力学行为的变化。为混沌理论应用于水声信号处理领域提供一个新的应用，对混沌载波应用于水声通信有着一定的参考价值，同时为理解混沌系统复杂的滤波行为提供了一个重要的参考工具。

本文的主要内容安排如下：

第二章从混沌的定义出发来系统地阐述混沌理论。通过著名的逻辑斯蒂映射，逐步深入地介绍混沌的许多特殊性质，并研究了刻画混沌特征的重要参数以及计算方法。最后介绍了非线性系统进入混沌的多种道路。

第三章详细介绍了实验系统的核心组成部分——蔡氏混沌电路。详细介绍了蔡氏电路的工作原理和其微分方程描述。介绍了电路实验中，蔡氏电路能够产生混沌行为的工作参数，并给出电路实验结果。

第四章首先介绍了实验系统的仿真实现。并在计算机上仿真蔡氏电路的数值解，观察其回归映射。仿真研究了 IIR 滤波器对混沌信号复杂特性的影响。通过对原始混沌信号进行调制、滤波来仿真水池发送端信号，并计算其分形维数，最后，仿真水声信道对混沌信号的影响，研究这一过程中信号非线性动力学特性的变化。

第五章简要阐述了水声信道的复杂特性，然后将前述的分析方法运用于实际的水池实验。将蔡氏混沌电路信号经过调制、滤波，并经过水声信道传输。在接收端接收信号，并运用非线性动力学方法对信号进行分析、比较。通过实验分析来研究水声信道对混沌信号动力学特性的影响。

第六章总结了全文的工作内容，指出了本文工作的不足和有待改善的地方，并对今后的进一步工作做了简要阐述。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库