



混沌修正函数 投影同步

Modified Function Projective
Synchronization of Chaotic Systems

方 洁/著



科学出版社

混沌修正函数投影同步

方 洁 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要针对近几年刚刚发展起来的一种新型混沌同步方式——修正函数投影同步展开研究. 全书共9章. 第1章介绍了混沌修正函数投影同步基本知识. 第2章构建了一个 Fang 超混沌系统并分析其动力学行为. 第3章研究了混沌系统同阶和降阶修正函数投影同步. 第4章基于单向耦合混沌同步原理, 设计了两种混沌函数投影同步响应系统. 第5章研究了同结构和异结构混沌系统的修正函数投影同步. 第6章研究了输入受限的混沌系统的修正函数投影同步. 第7章研究了混沌系统的组合函数投影同步. 第8章研究了以混沌系统作为复杂网络节点的复杂动态网络的修正函数投影同步. 第9章将混沌修正函数同步应用于保密通信, 研究了基于错位函数投影同步的混沌保密通信.

本书可作为高等院校信息科学与系统科学、控制工程、通信工程、应用数学等专业硕士研究生的教学参考书, 也可供从事信息与控制等领域工作的教师、科研人员以及有关工程技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

混沌修正函数投影同步/方洁著. —北京: 科学出版社, 2018.12

ISBN 978-7-03-060120-9

I. ①混… II. ①方… III. ①混沌理论—应用—保密—通信 IV. ①TN918.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 289550 号

责任编辑: 李静科 李 萍 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 12 月第一次印刷 印张: 10 1/2 插页: 1

字数: 208 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

混沌现象是指发生在确定性系统中的貌似随机的不规则运动,它具有内在随机性、分形性质、标度不变性、敏感依赖性等特点。混沌是非线性动力系统的固有特性,它揭示了自然界及人类社会中普遍存在的复杂性,反映了自然界有序和无序的统一、确定性与随机性的统一。混沌理论与相对论、量子力学并列为 20 世纪物理学的三大发现。近年来,混沌理论得到迅猛发展,混沌科学正在猛烈冲击着当今几乎所有的自然科学,并且扩展到工程技术领域,甚至社会科学等众多领域。这促进了各种学科之间的融合,为科学研究提供了良好的机遇,并提出了空前的挑战。

在混沌研究中,混沌同步因为在通信领域广阔的应用前景成为诸多领域研究的热点。1990 年,美国海军实验室的 Pecora 和 Carroll 提出了混沌自同步方法,首次利用驱动-响应法实现了两个混沌系统同步,从而拉开了混沌同步方法研究与应用的序幕。在随后的几十年里,混沌同步方法不断涌现,其应用领域也从物理学迅速扩大到生物学、力学、脑科学、化学、电子学、信息科学和保密通信等领域,混沌同步的理论和实验研究均取得了蓬勃发展。

混沌同步,指的是两个或两个以上从不同的初始条件出发的具有相互作用的混沌系统,经过一个暂态的过渡之后,状态或者输出按某种确定的函数关系达到一致,并且这种函数关系不对初值敏感。根据混沌同步的定义,目前已有的混沌同步方式主要有:完全同步、相位同步、广义同步、延迟同步、投影同步、组合同步、修正投影同步、函数投影同步、修正函数投影同步等。混沌修正函数投影同步是近几年刚刚发展起来的一种新型同步方式。其实现同步的同步尺度因子是一个函数矩阵,而不是常量,这意味着驱动系统和响应系统的状态变量能按照不同的函数比例关系进行同步,这种特性对加强数字保密通信的安全性具有重要意义。修正函数投影同步是一种更广义的同步概念,完全同步、投影同步、函数投影同步都是它的特例,对修正函数投影同步研究更具普遍意义。

本书是作者近年来在混沌函数投影同步控制领域研究工作的积累,主要针对近几年刚刚兴起的新的混沌同步方法——修正函数投影同步,研究了在系统不确定、受扰、输入受限等情况下实现混沌修正函数投影同步的一些方法及其保密通信应用。

本书的研究得到国家自然科学基金重点项目(61632002)、国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1804262)、国家自然科学基金面上项目(61775198,61472372)、国家自然科学基金青年项目(616003348)、河南省科技创新人才计划(杰出人才)

(174200510012, 184200510015)、河南省高校科技创新团队支持计划 (15IRTSTHN012, 19IRTSTHN013)、河南省科技攻关计划项目 (172102210066, 182102210609, 182102210160)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划 (2016GGJS090), 以及郑州轻工业大学重点学科建设资助项目的资助, 在此表示深深的感谢!

在撰写本书过程中, 作者得到了郑州轻工业大学电工理论与新技术科研团队王慰教授、王延峰教授、姜利英教授、吴青娥教授、邓玮教授、孙军伟副教授、刘娜讲师、张培讲师, 研究生朱飞、娄新杰的帮助, 在此表示衷心的感谢! 同时感谢科学出版社的编辑们为本书的出版付出的辛勤劳动!

在撰写本书过程中, 作者参阅了国内外的许多同类著作和相关文献, 并引用了他们的成果和论述. 作者在此对书中所引文献的所有作者表示衷心的感谢!

限于水平, 书中不妥之处, 敬请读者指正.

作 者

2018 年 4 月

目 录

第 1 章	混沌同步概述	1
1.1	混沌与混沌同步	1
1.2	混沌函数投影同步	2
1.3	混沌同步控制方法	4
1.4	基于混沌同步的保密通信	6
第 2 章	混沌系统构建及动力学分析	9
2.1	引言	9
2.2	Fang 超混沌系统分析	9
2.2.1	Fang 超混沌系统	9
2.2.2	Fang 系统的基本动力学特性	11
2.3	超混沌系统电路实现	18
2.4	结论	21
第 3 章	基于状态反馈的混沌同阶和降阶修正函数投影同步	22
3.1	引言	22
3.2	具有未知参数的同阶混沌系统修正函数投影同步	22
3.2.1	问题描述	22
3.2.2	自适应状态反馈控制器设计	23
3.2.3	数值仿真	25
3.3	具有未知参数的混沌系统降阶修正函数投影同步	30
3.3.1	问题描述	30
3.3.2	自适应状态反馈控制器设计	31
3.3.3	数值仿真	33
3.4	结论	41
第 4 章	耦合混沌系统自适应修正函数投影同步	42
4.1	引言	42
4.2	问题描述	42
4.3	数值仿真	47
4.4	结论	51
第 5 章	混沌系统滑模自适应修正函数投影同步	52
5.1	引言	52

5.2	同结构混沌系统滑模控制器设计	52
5.2.1	问题描述	52
5.2.2	鲁棒自适应滑模控制器设计	54
5.2.3	数值仿真	58
5.3	异结构混沌系统滑模控制器设计	64
5.3.1	问题描述	64
5.3.2	鲁棒自适应滑模控制器设计	65
5.3.3	数值仿真	68
5.4	结论	73
第 6 章	输入受限的混沌系统修正函数投影同步	75
6.1	引言	75
6.2	问题描述	75
6.3	扇区已知的受扰混沌系统修正函数投影同步	77
6.3.1	鲁棒自适应滑模控制器设计	77
6.3.2	数值仿真	81
6.4	扇区未知的受扰混沌系统修正函数投影同步	86
6.4.1	鲁棒自适应滑模控制器设计	86
6.4.2	数值仿真	91
6.5	结论	95
第 7 章	混沌系统组合函数投影同步	96
7.1	引言	96
7.2	受扰混沌系统组合函数投影同步	96
7.2.1	问题描述	96
7.2.2	自适应状态反馈控制器设计	97
7.2.3	数值仿真	99
7.3	受扰混沌系统双重组合函数投影同步	103
7.3.1	问题描述	103
7.3.2	自适应反馈控制器设计	106
7.3.3	数值仿真	108
7.4	结论	112
第 8 章	复杂网络的修正函数投影同步	113
8.1	引言	113
8.2	变时滞耦合复杂网络修正函数投影同步	114
8.2.1	问题描述	114
8.2.2	控制器设计	115

8.2.3	数值仿真	118
8.3	多时滞耦合复杂网络修正函数投影同步	120
8.3.1	问题描述	120
8.3.2	同步控制器设计	121
8.3.3	数值仿真	124
8.4	结论	130
第 9 章	混沌修正函数投影同步在保密通信中的应用	131
9.1	引言	131
9.2	基于修正函数投影同步和参数调制的混沌保密通信	132
9.2.1	系统描述及保密通信原理	132
9.2.2	非线性状态反馈控制器设计	133
9.2.3	数值仿真	136
9.2.4	安全性分析	137
9.3	错位修正函数投影同步及保密通信实现	138
9.3.1	问题描述	138
9.3.2	Fang 超混沌系统的错位修正函数投影同步实现	139
9.3.3	数值仿真	143
9.3.4	混沌遮掩调制保密通信	144
9.3.5	安全性和实用性分析	147
9.4	结论	147
参考文献		149
彩图		

第 1 章 混沌同步概述

1.1 混沌与混沌同步

混沌是自然界及人类社会中的一种普遍现象,它是在一个确定性系统中出现的一种貌似不规则的、内在的随机性运动,反映了自然界有序和无序的统一,确定性与随机性的统一^[1-5].混沌理论经过几十年的发展,已不再是独立存在的科学,它与其他各门科学互相促进、互相依靠,由此派生出许多交叉学科,如混沌气象学、混沌经济学、混沌数学等.混沌科学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,甚至社会科学等众多领域,极大地拓宽了人们的视野.目前,国内外研究人员关注的方向和研究的重点主要有如下几个方面.①典型混沌系统的实际应用,即如何将典型的混沌系统: Lorenz 系统、Chua 电路、Duffing 振子、Rossler 系统、Hénon 映射、Logistic 映射、Tent 映射等应用于各种混沌研究领域.②开发新的混沌系统.对新混沌系统的开发和研究,可以挖掘混沌信号产生的本质,拓展混沌研究的范围,以便更好地应用到各个领域.构建新混沌系统的主要方法有典型混沌系统的改进和构建新型的超混沌系统.③时滞混沌系统开发和同步研究.④混沌同步控制的研究.

迄今,基于混沌系统对初始值极端敏感以及在混沌奇怪吸引子内存在无穷多的不稳定周期轨道、平衡点、恒定态及非周期轨道等各种可能运动形态,如何抑制和利用混沌,使得已有的混沌研究成果能服务于人类,是我们迫切要解决的问题.对混沌进行控制和利用的目标总体上有三种类型:混沌控制、混沌同步和混沌反控制.其中混沌同步由于其在生物学、电子学、信息科学和保密通信中的应用前景,引起了中外学者的广泛关注^[1-6].

同步现象普遍存在于自然界及实验室里.早在 17 世纪,惠更斯 (Huygens) 就实现了两个钟摆的完全同步振荡.自此,科学工作者在随后的几百年里广泛和深入地研究了各个学科领域中的同步问题,但这些研究无论是同步对象、同步概念还是同步方法大都是建立在周期运动的基础上.由于混沌运动具有对初始值极端敏感的特性,初始值的微小变化就会导致混沌系统完全不同的行为,因此长期以来学术界认为混沌运动不能实现同步,直到美国海军实验室学者 Pecora 和 Carroll 于 1990 年在国际上首次提出混沌自同步原理^[7],并在电子线路上首次观察到混沌同步现象后,混沌同步的研究才引起广泛关注并迅速发展成为混沌科学研究领域的一个热点

问题. 在随后的几十年里, 混沌同步方法不断涌现, 其应用领域也从物理学迅速扩大到生物学、力学、脑科学、化学、电子学、信息科学和保密通信等领域, 混沌同步的理论和实验研究均取得了蓬勃发展.

混沌同步, 从广义角度讲, 也属于混沌控制的范畴, 其目标是将两个或两个以上从不同的初始条件出发的具有相互作用的混沌系统, 经过一个暂态的过渡之后, 状态或者输出按某种确定的函数关系达到一致并且这种函数关系不对初始值敏感. 根据混沌同步的定义, 目前已有的混沌同步方式主要有: 完全同步、相位同步、广义同步、延迟同步、投影同步、修正投影同步、函数投影同步等. 完全同步^[8,9] 是研究最早和最多的一类混沌同步. 完全同步是指结构相同、参数相同的两个完全相同的混沌系统在控制信号的作用下, 双方的运动轨迹随时间演化逐渐趋于一致并保持同步. 要实现完全同步, 要求驱动系统和响应系统必须完全相同, 但是在实际中很难产生两个完全相同的混沌系统, 因此有学者提出了条件相对宽松的广义同步^[10,11], 即达到混沌同步时, 响应系统的状态变量和驱动系统的状态变量之间存在确定的函数关系. 与广义同步和完全同步不同, 相位同步描述的是两个系统之间的相位关系, 即实现同步时, 驱动系统和响应系统的相位一致^[12,13]. 相位同步反映的是混沌系统中的协同行为. 延迟现象是实际工程应用中不可避免的因素, 延迟同步指驱动系统和响应系统状态之间存在一个特定的时间差, 即同步的两个混沌系统之间存在相位滞后^[14,15]. 投影同步是 1999 年 Mainieri 等在研究部分线性混沌系统时观察到的一种新的同步现象^[16]. 实现投影同步时, 驱动系统和响应系统的状态输出不仅相位锁定, 而且各对应状态的振幅还按某一固定的比例关系演化. 由于投影同步应用于混沌保密通信时, 可以把二进制数扩展到 M 进制以实现更快的传输, 因此已有很多学者对投影同步进行了深入研究. 随后, 一些学者在投影同步的基础上, 提出了一些改进的投影同步方法——修正投影同步^[17-21]. 修正投影同步方法结合了广义同步和投影同步的特点, 能够使驱动系统与响应系统的所有状态向量都按照不同的比例因子投影同步, 且相位锁定. 同相位同步、反相位同步、完全同步以及投影同步都是修正投影同步的特例.

1.2 混沌函数投影同步

函数投影同步是指驱动系统和响应系统的状态按照一个给定的比例函数进行同步, 函数投影同步是投影同步的拓广, 是一种更为广义的同步方式. 相对于投影同步和修正投影同步, 函数投影同步的同步尺度因子是一个函数, 而不是常量, 这意味着驱动系统和响应系统能按照一定的函数比例关系进行同步, 这种特性对加强数字保密通信的安全性具有重要意义. 自函数投影同步提出以来, 已有多位学者对这种同步方式进行了研究^[22-33]. 最近, 文献 [34,35] 又将修正投影同步和函数投影

同步相结合,提出了一种新的同步方式——修正函数投影同步,即驱动系统按照期望的函数比例因子矩阵同步到响应系统.修正函数投影同步是一种更广义的同步概念,当其函数比例因子矩阵取常数矩阵时,即为修正投影同步;当函数比例因子矩阵中各函数比例因子表达式相同时,即为函数投影同步.修正函数投影同步具有不可预测的函数比例因子,能更有效地提高保密通信的安全性,因此它在保密通信中有着非常诱人的应用前景.自混沌修正函数投影同步提出以来,其研究已引起了中外学者的广泛兴趣^[36-45].

考虑具有如下形式的混沌驱动系统和响应系统

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1.1)$$

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{y}, \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y})) \quad (1.2)$$

其中 $\mathbf{x}$ 为驱动系统的状态向量, $\mathbf{x} = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T \in R^n$; $\mathbf{y}$ 为响应系统的状态向量, $\mathbf{y} = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T \in R^n$; $\mathbf{f}, \mathbf{g} \in R^n$ 为可微连续函数向量; $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 为待设计的控制向量, $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (u_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}), u_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \dots, u_n(\mathbf{x}, \mathbf{y}))^T$.

定义 1.1 对系统 (1.1) 和系统 (1.2) 构成的驱动-响应系统, 如果存在合适的控制器 $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 使得从任意初始值出发的系统 (1.1) 和系统 (1.2) 满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{y}(t) - \mathbf{M}(t)\mathbf{x}(t)\| = 0 \quad (1.3)$$

或

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}(t) - \mathbf{M}(t)\mathbf{y}(t)\| = 0 \quad (1.4)$$

则称系统 (1.1) 和系统 (1.2) 实现了修正函数投影同步, 其中 $\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t) - \mathbf{M}(t)\mathbf{x}(t)$ 或 $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{M}(t)\mathbf{y}(t)$ 为系统 (1.1) 和系统 (1.2) 之间的修正函数投影同步误差, $\mathbf{e}(t) = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T$; $\mathbf{M}(t) \in R^{n \times n}$ 是函数比例因子矩阵, $\mathbf{M}(t) = \text{diag}(m_1(t), m_2(t), \dots, m_n(t))$, $m_i(t) \neq 0$ 为函数比例因子, $m_i(t)$ 是连续可微有界函数.

注 1.1 当上面误差定义中的函数比例因子矩阵 $\mathbf{M} = \sigma \mathbf{I}$ ($\sigma \in R$), 其中 $\mathbf{I}$ 为 $n \times n$ 的单位矩阵时, 此定义就为投影同步. 特别地, 当 $\sigma = 1$ 和 $\sigma = -1$ 时, 修正函数投影同步就分别被简化为完全同步和反同步; 当 $m_1, m_2, \dots, m_n$ 为常值, 且其中至少有一个 $m_i \neq m_j$ ($i \neq j$) 时, 此定义为修正投影同步; 当 $m_1 = m_2 = \dots = m_n$ 且 m_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为连续函数时, 此定义为函数投影同步.

注 1.2 如果函数比例因子矩阵 $\mathbf{M} = 0$ ($\mathbf{M} \in R^{n \times n}$), 则混沌同步问题转化为混沌控制问题.

注 1.3 混沌修正函数投影同步的定义有两种表示形式, 如式 (1.3) 和式 (1.4), 在后面的章节中我们可以只定义其中的任意一种, 然后进行讨论.

1.3 混沌同步控制方法

混沌同步,从广义角度讲,也属于一种混沌控制,就是将系统引导到需要的混沌轨道上去。所以,混沌同步实际上代表着对混沌之“利”的利用。迄今,人们已在混沌同步领域做出了大量的研究,近年来关于这方面的研究又呈现出新的研究趋势,主要表现为:①研究对象由低维混沌系统向高维超混沌系统转变,由连续混沌系统向离散混沌系统转变;②新的同步方法不断提出,如利用模糊控制实现同步、自适应控制实现同步、神经网络实现同步、基于遗传算法实现同步等;③为了更切合实际应用,研究对象由确定的混沌系统向不确定混沌系统转变,同结构混沌同步研究转向异结构混沌同步研究,理想条件下的混沌同步转向非理想条件下的混沌同步研究。

实现混沌同步,主要就是运用各种控制方法,通过设计合适的同步控制器,实现结构相同或者结构不同的混沌系统同步。关于混沌同步的研究已经取得了相当丰富的研究成果,已有的混沌同步控制方法归纳起来有以下几类:驱动-响应同步法、主动-被动同步法、线性和非线性反馈法、耦合同步法、自适应同步控制法、脉冲同步法、滑模同步控制法、智能同步控制法等。现将一些主要方法介绍如下。

(1) 驱动-响应同步法和主动-被动同步法。

驱动-响应同步法是 Pecora 和 Carroll 在 1990 年最先提出的一种混沌同步方法,简称 PC 同步法,或称替换同步法,该同步法已经应用到许多典型的混沌系统同步中,如 Lorenz 系统、Chua 电路和 Lure 系统等。PC 同步法最大的特点是:实现同步的两个非线性动力学系统之间存在驱动-响应关系,即响应系统的行为受制于驱动系统,而驱动系统的行为与响应系统无关。PC 同步法的缺点是其只适用于多变量可分解和能复制的动力学系统。然而在实际应用中,由于生物的、物理的或内在的原因,在某些情况下,系统无法分解为两个部分,这样就无法构造响应系统。鉴于此,Kocarev 及 Parlitz 提出了改进的同步方法,即主动-被动同步法。该法采取十分灵活的一般分解法,更具有普及性,适用于大部分混沌和超混沌同步。该法的最大优点就是可以自由选择驱动信号的函数,几乎不受任何限制,因而该方法更具有普遍性和灵活性以及更高的安全性和同步性能。

(2) 线性和非线性反馈法。

线性反馈法就是利用响应系统与驱动系统的误差信号,再施加反馈控制增益信号使得响应系统跟踪驱动系统,从而实现响应系统与驱动系统的同步。线性反馈法无论是理论还是实际操作都是比较容易分析与实现的,因此利用线性反馈法实现两个等同结构的混沌系统同步研究也愈加受到关注和重视。此方法的缺点就是:高增益在工程实际中实现难度大;有时在同步过程中出现非同步的现象,因而同步的

稳定性能不是很好;复杂的系统利用线性反馈法无法实现同步. 为了避免这些缺点, 采用非线性反馈法来实现两个混沌系统的同步. 非线性反馈法就是取反馈项为非线性项, 同时考虑非线性项与系统的非线性特征有关, 再利用渐近稳定性理论来论证可行性. 非线性反馈法可以体现原系统的所有状态量, 非常有利于保密通信的应用.

(3) 耦合同步法.

20 世纪 80 年代, Gaponov-Grekhov 在研究流体湍流时发现了基于相互耦合的混沌同步方法. 耦合同步是指将驱动系统中的全部或部分变量耦合到响应系统中, 使响应系统受到耦合后与驱动系统实现同步的一种方法. 混沌系统的耦合方式可以分为单向耦合和双向耦合两种. 由 A 系统的变量去耦合 B 系统或 A, B 两系统的变量相互耦合. 其中耦合的变量数目可以是部分的或全部的变量, 视不同情形而定. 驱动-响应同步方案可以视为相互耦合同步方法的一种特例. 耦合同步的研究结果表明, 对于有些混沌系统, 只需通过单变量耦合便可实现同步, 对于有些混沌系统, 则需要两个甚至多个变量耦合才能实现同步. 耦合的变量数目越多, 同步能力就越强. 如果是全部变量耦合, 只要耦合系数足够大, 则所有的混沌系统就能实现同步. 耦合系统的同步现象, 不论从理论上还是从实验上都在深入研究中, 具有极其丰富的内容和广阔的应用前景.

(4) 自适应同步控制法.

不确定性干扰是实际混沌系统不可避免存在的因素. 对于存在不确定性的混沌系统, 如果采用常规的控制方法, 可能会达不到理想的控制效果. 自适应控制是处理不确定系统的一个重要方法, 其能修正自己的特性以适应对象和扰动的动态特性变化. 与常规反馈控制一样, 自适应控制也是一种基于数学物理模型的控制方法. 自从 20 世纪 50 年代末, 第一个自适应控制系统被提出以来, 自适应控制已经广泛地应用到各种控制领域. 由于自适应控制对时变参数具有良好的自适应能力, 近年来中外学者已把自适应控制原理广泛地应用在参数不确定混沌系统的控制与同步中. 自适应控制虽然对系统的参数时变具有良好的控制效果, 但也存在一定的缺陷, 即它要求控制对象具有特定的数学模型, 自适应控制器的设计取决于这个数学模型, 而在实际应用中, 许多控制系统难以获得精确的数学模型, 即所谓灰色系统, 这将限制自适应控制方法的应用. 目前的混沌同步控制方法中, 大都将自适应控制方法和其他控制方法相结合使用.

(5) 脉冲同步法.

脉冲同步的基本思想就是把驱动系统的状态信号化为多个脉冲去驱动响应系统达到同步的目的. 在脉冲同步保密通信的应用中, 传输的信号是带有脉冲的混沌信号, 因此难以破译, 具有更好的保密性, 是一种比较好的混沌同步方法. 当然, 现阶段脉冲同步法还未真正深入研究, 但它潜在的优点, 如具有较强鲁棒性, 必然是今后的热点研究问题之一.

(6) 滑模同步控制法.

滑模同步控制的基本原理就是构造合适的滑模面,使驱动系统和响应系统的误差系统状态轨迹到达并保持在滑动面上,使得误差系统趋于渐近稳定,从而实现驱动系统与响应系统的同步.滑模同步控制策略与常规同步控制方法的根本区别在于控制的不连续性,即一种使系统“结构”随时间变化的开关特性.由于滑动模态可以按需要设计,且与对象参数及扰动无关,因此滑模控制具有鲁棒性强、响应速度快、无须系统在线辨识、对扰动及参数变化不灵敏、物理实现简单等优点.近年来已有很多中外学者将滑模同步控制法引入具有不确定性混沌系统的控制与同步研究中.滑模同步控制法的缺点是,实际滑模切换装置的不连续开关特性将会引起系统的抖振现象,从而降低混沌系统的同步稳定性.抖振问题已成为滑模变结构控制在实际系统中应用的突出障碍.近年来,为了消除滑模控制带来的抖振,研究者已做了大量的工作,并提出了一些消减抖振的方法^[46]:①准滑动模态方法(a.连续函数近似法;b.边界层的设计);②趋近律方法;③滤波方法;④观测器方法;⑤动态滑模方法;⑥模糊方法;⑦神经网络方法;⑧遗传算法优化方法;⑨切换增益方法;⑩扇形区域方法;⑪其他方法.所有这些方法在一定程度上大大削弱了滑模变结构控制的抖振的影响.上述每种方法都有自己的优点和局限性,在实际应用中,应该针对具体的问题具体分析.

(7) 智能同步控制法.

智能控制技术以智能控制理论、计算机技术、人工智能和运筹学等为基础,适用于被控对象和环境具有未知或不确定因素,或者其数学模型难以建立,或者其运行环境、工况发生不可预测的变化等场合.尽管智能控制体系的形成只有十几年的历史,理论还远未成熟,但现有的应用成果和理论发展都表明智能控制正成为自动控制的前沿学科之一.近年来,已有不少学者将智能控制技术中人工智能系统、专家系统、模糊系统、神经网络系统及遗传算法等应用于具有高度不确定性的混沌系统的同步控制中,显示出良好的自适应性、鲁棒性及容错性.但由于函数投影同步的复杂性,如何将智能同步控制法与混沌函数投影同步相结合目前还未有人涉足.

1.4 基于混沌同步的保密通信

混沌保密通信的研究起步于 20 世纪 90 年代.随着混沌动力学系统在物理、数学和电子工程中的研究进展,混沌保密通信作为通信研究中的一个新领域,也迅速发展起来.目前,已有的混沌保密通信研究方案,大多数只是进行实验仿真研究,而应用研究还处于刚刚起步阶段,目前各国学者都在竞相研究新的混沌系统理论和混沌保密通信应用技术,以期望取得国际领先水平的混沌保密通信研究成果.混沌在保密通信中的应用优势主要有如下三点:①混沌信号的不可预测性、宽频谱性、隐

蔽性及高度复杂性等都特别适用于保密通信; ②在混沌同步保密通信中的密钥不唯一, 提高了抗破译性能; ③区别于传统静态加密方式, 混沌加密是一种动态加密, 进一步提高了保密性. 混沌应用于保密通信, 主要有三种方式: 第一种是直接利用混沌系统进行保密通信; 第二种是利用混沌同步进行保密通信; 第三种是利用混沌映射自身的复杂性构造密码, 以达到对信息加密的目的.

混沌同步现象的发现为混沌在通信领域中的应用研究奠定了基础, 混沌同步已成为混沌保密通信的关键技术. 混沌同步应用于保密通信系统主要包括三个技术: 一是构造混沌系统; 二是设计合适的混沌同步控制器; 三是传输信号的加密解密. 只要处理好这三个技术, 就能实现信号的保密传输. 目前基于混沌同步原理的保密通信方式主要有以下几种^[47].

(1) 混沌遮掩.

混沌遮掩保密通信是最早提出来的混沌通信方式, 其原理是以混沌同步为前提, 通信时, 发送端将信息信号作为小信号叠加在混沌载波上形成混合信号, 然后将该混合信号通过信道发送到接收端, 实现同步后, 在接收端从接收到的混沌载波里减去相对应的混沌同步信号, 即可得到所传输的信息信号. 混沌遮掩保密通信要求同步系统具有一定的稳健性, 即在混沌载波上附加一个小信号, 不会影响接收系统和发送系统的同步性能. 混沌遮掩保密通信既可以传输模拟信号也可以传递数字信号, 其原理图如图 1.1 所示.

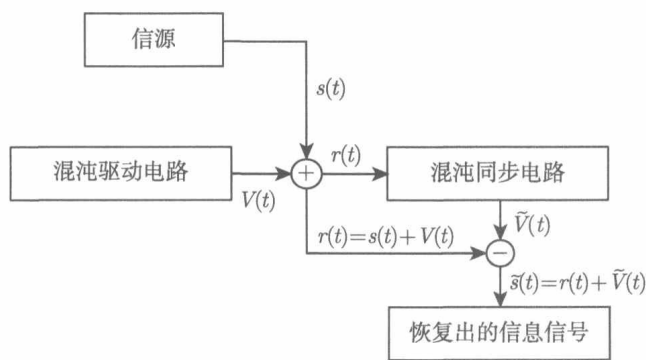


图 1.1 混沌遮掩保密通信原理图

(2) 混沌调制.

混沌调制的基本原理是将信息信号加密后调制到发送端系统中的某个状态变量, 混沌电路产生的混沌载波信号中含有信息信号, 实现同步后, 在接收端提取出相应的状态变量, 解调出所发送的信息. 同步混沌调制保密通信原理如图 1.2 所示. 在发送端, 信息信号 s 通过一个可逆变换 C , 调制到混沌驱动电路的状态分量中; 在接收端, 实现混沌同步后, 检测相应的状态分量 $\tilde{I}$ 并进行反变换 C^{-1} 恢复出信

息信号. 与混沌遮掩相比, 混沌调制将信息信号直接耦合到混沌系统中, 整个混沌信号谱都用来隐藏信息, 所以提高了对参数变化的敏感性, 保密性有所提高.

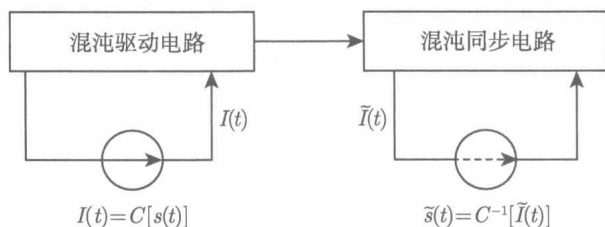


图 1.2 混沌调制保密通信原理图

(3) 混沌切换.

混沌切换是一种基于混沌同步传输数字信号的方法. 其原理是发送端和接收端拥有对应类型和数目的多个混沌系统, 根据所传送的信号, 选择不同的混沌系统或不同的混沌电路参数产生载波信号, 在信道中传输的信号由代表不同的混沌系统的混沌信号组成, 接收端在一个码元周期里, 只有一个系统可以实现混沌同步, 同时解码, 由此恢复出发送端发送的信息. 图 1.3 为二进制的混沌切换保密通信原理示意图.

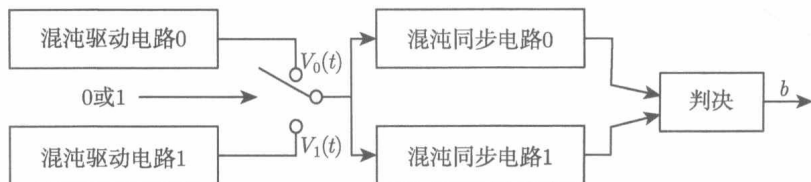


图 1.3 混沌切换保密通信原理图

第2章 混沌系统构建及动力学分析

2.1 引言

自混沌理论被提出以来,混沌科学在电子学、信息学、数学、物理及工程应用领域都得到了极大的发展.开发新的混沌系统,并研究其动力学特性,可以挖掘混沌信号产生的本质,拓展混沌研究的范围,以便更好地应用到各个不同领域.相比于具有一个正的 Lyapunov 指数的低维混沌系统,超混沌系统因具有两个或两个以上正的 Lyapunov 指数,具有比一般混沌系统更复杂的动力学行为,这使其在保密通信及信息安全等领域中具有更高的开发价值和应用前景.因此,研究如何构成超混沌系统,并将其应用于工程实际具有重要的理论价值和现实意义.目前构建新的超混沌系统的主要方法有:①通过对典型混沌系统的改进^[48-51],如改变典型混沌系统的非线性项,增加状态量,或者将两个典型的混沌系统复合等方式,得到新的超混沌系统;②基于产生超混沌系统要满足的必要条件构建新型的超混沌系统^[52-56].

本章在前人工作的基础上,主要研究了两个方面的内容.首先,基于产生超混沌系统要满足的两个必要条件构建了一个新的四维超混沌系统并将其命名为 Fang 超混沌系统.其次,对该系统进行了理论推导和数值模拟,研究了该系统的基本动力学特性,并分析了参数改变时系统的动力学行为的变化,从多方面验证了该系统的混沌行为.该系统具有 5 个参数,系统处于混沌状态时参数变化范围较大,具有非常丰富的动力学行为,有利于应用到混沌加密系统中.

2.2 Fang 超混沌系统分析

2.2.1 Fang 超混沌系统

超混沌系统的产生必须满足两个必要条件:①对于自治系统而言,至少是四维的;②至少有两个正的 Lyapunov 指数且所有 Lyapunov 指数之和小于零.基于上述两个必要条件,构造四维超混沌系统 (Fang 超混沌系统) 如下:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) + 3.5w \\ \dot{y} &= dx - cy - xz^2 + 3.5w \\ \dot{z} &= -bz + (x + y)x \\ \dot{w} &= rw - \frac{1}{3}(x + y)z\end{aligned}\tag{2.1}$$