

信息科学技术学术著作丛书

时滞动力学系统的 分岔与混沌 (下册)

廖晓峰 李传东 郭松涛 著



科学出版社

信息科学技术学术著作丛书

时滞动力学系统的分岔与混沌

(下册)

廖晓峰 李传东 郭松涛 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

时滞动力学系统广泛存在于自然科学、工程和社会科学等诸多领域中。本书介绍了研究时滞动力学系统分岔的基本方法,同时涵盖目前研究的一些最近成果。本书从理论与数值模拟上系统地讨论了时滞动力学系统,尤其是时滞神经网络出现各种分岔及混沌产生的可能性,获得了一些新的理论结果。分上、下两册,共7章,下册包括三个神经元时滞系统的分岔、高阶时滞神经网络模型,以及在工程中的其他时滞动态模型和时滞混沌系统等内容。

本书可作为高等院校电子工程、计算机、控制理论与应用、应用数学等相关专业高年级本科生、研究生的教材和参考书,也可作为相关教师和科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

时滞动力学系统的分岔与混沌. 下册/廖晓峰,李传东,郭松涛著. —北京:科学出版社,2015

(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-044920-7

I. 时… II. ①廖… ②李… ③郭… III. 时滞系统-动力学系统-研究
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 126970 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

三河市骏志印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:274 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,时滞动力学系统已广泛存在于自然科学、工程技术和社会科学等诸多领域。随着计算机技术、传感器测试技术、控制理论的迅速发展,时滞反馈控制技术已在工程领域得到广泛的应用,各种时滞动力学模型从实际工程中构建出来。本书的第一作者自攻读博士学位期间至今已进行了近二十年的研究,然而自感在非线性和动力学领域,尤其是时滞动力学系统方面仍是初学者,有众多非线性现象值得继续研究。

在许多工程实际应用中,尽管时滞量很小,但常常会影响到整个系统的稳定性。因此,时滞对动力学系统的影响在许多实际工程问题中是必须考虑的重要因素。时滞动力学系统的基本特征是系统随时间的演化,不仅依赖于系统的当前状态,也依赖于其过去的状态,这就是通常所称的滞后型时滞动力学系统。当然,还有其他类型的时滞系统,如中立型时滞动力学系统和前向型时滞动力学系统。本书仅讨论滞后型时滞动力学系统,为方便起见,我们称它为时滞动力学系统。这是一类通常由时滞微分方程描述的无穷维动力学系统,而且不论时滞有多小,系统的状态空间均是无穷维的,其解空间也是无穷维的,也就是说相应的线性化系统的特征方程有无穷多个根。因此,使得时滞动力学系统与无时滞动力学系统相比在许多方面具有本质性差异,其动力学行为也完全不同,呈现出非常复杂的现象。例如,在无时滞的一阶自治非线性系统,系统的行为或者收敛于稳定的平衡点、或者周期解、或者发散,但在有时滞的一阶自治非线性系统中,不仅有收敛于稳定的平衡点,而且可能出现各种分岔,或者混沌行为。这也表明,简单的时滞动力学系统可以具有非常复杂的动力学性质。目前,在神经网络系统动力学性质的研究中,一项非常重要的工作就是利用一些典型的人工神经网络模型来揭示时滞导致的各种复杂动力学行为产生的机理,以便更好地认清神经活动的规律,尽管这些带时滞的人工神经网络模型与真实世界的神经网络相比是非常简单的。

时滞常导致系统的运动失稳,产生各种形式的分岔。在非线性和时滞动力学系统的分岔中,Hopf 分岔是普遍存在的,且是讨论得最为广泛的。研究 Hopf 分岔周期解的性质通常采用中心流形约化方法与规范型理论,中心流形约化方法在理论上比较完备,但过程繁琐且计算量大。Hopf 分岔对应于工程中的一种自激振荡现象,是非线性系统所特有的性质。产生这种机理的条件是,系统平衡点随着某个系统参数变化发生稳定性切换,而系统非线性将受扰后发散的运动会约束在有限范围内。因此,Hopf 分岔存在的必要条件可由特征根分布的分析得到,即存在某个

系统参数值,使得系统特征方程除了一对单重共轭纯虚根外,其余特征值具有负实部,并且该参数值在对应的特征根曲线满足横截性条件时,该参数值为 Hopf 分岔点。对动力学系统而言,发生 Hopf 分岔是导致系统失稳的主要原因之一。由于系统在平衡点处线性化相应的特征方程有无穷多个根,因此特征根有三对共轭纯虚根,或者两对共轭纯虚根,或者有一对纯虚根和一个零根,或者零根是重根的情况下,在这些临界值的附近,系统可能产生复杂的余维 3、余维 2、Takens-Bogdanov 分岔等。这也是本书讨论的重点。

从 20 世纪 80 年代中期到 20 世纪末,混沌理论迅速吸引了数学、物理、工程、生态学、经济学、气象学、情报学等诸多领域学者的广泛关注,更由于混沌保密通信及混沌密码学的兴起,引发了全球的混沌热。根据英国的《不列颠百科全书》注释,英文中的“chaos”一词源于希腊的“xaos”,本意是指在万物出现之前就存在无限广阔的空虚宇宙,这一名词翻译成中文就变为“混沌”,也可写作“浑沌”。自然科学中讲的混沌运动是指确定性系统中展示的一种貌似随机的行为。这里我们仅研究几种简单的时滞系统产生混沌现象的机理。

本书深入研究了时滞动力学系统,尤其是时滞神经网络出现各种分岔,以及混沌产生的可能性,并从理论与数值模拟上详细进行讨论,获得了一些新的理论结果。全书共 7 章,包括研究时滞动力学系统 Hopf 分岔的几种方法、单个神经元时滞方程的分岔、两个神经元时滞系统的分岔、三个神经元时滞系统的分岔、高阶时滞神经网络模型,以及在工程中的其他时滞动态模型和时滞混沌系统等内容。

第 1 章主要给出研究时滞动力学系统 Hopf 分岔的几种方法。首先,介绍目前研究使用最多且方便的 Hassard 提出的方法。Hassard 的方法借助中心流形定理和规范形式理论讨论 Hopf 分岔和分岔周期解的稳定性,这种方法的结果等价于平均方法、Poincaré-Lindstedt 方法、Fredholm 选择方法和隐函数定理方法,但 Hassard 方法的优点对研究者来说在概念上更清晰明了。随后,我们讨论在科学和工程领域内已广泛应用的平均法,这里仅讨论泛函微分方程的平均法,尤其适应于非自治微分和差分方程的分析。研究在工程中广泛应用的多尺度方法,我们利用 Fredholm 选择来获得多尺度串行计算方法,将研究常微分方程周期解的 Poincaré-Lindstedt 方法推广到时滞动态系统的周期解;讨论在工程领域,尤其是研究含时滞的非线性反馈系统振荡现象的频域方法,频域方法的优点在于可以迅速和准确发现周期轨道的振幅。最后,讨论带参数的时滞泛函微分方程的规范形式,并应用于 Hopf 分岔研究中,直接计算带参数的时滞泛函微分方程的规范形式,并不计算预先的奇异性的中心流形。该方法并不需要繁琐的计算。

第 2 章研究单个神经元时滞方程产生分岔的机理。首先,给出一般的时滞神经网络模型。然后,讨论单个时滞神经网络模型,引入了单个 Gopalsamy 神经元系统,进而讨论 Gopalsamy 模型的收敛性,并获得收敛性的充分必要条件。随后,

研究带非线性激励函数的单时滞神经元系统产生 Hopf 分岔的机理,并且讨论一个典型时滞系统的 Hopf 分岔,以及带分布时滞 Gopalsamy 神经元方程的 Hopf 分岔,讨论具有反射对称性的一阶非线性时滞微分方程的分岔,进而获得一些特殊系统,如标准的双稳系统、海洋-大气耦合模型的分岔。同时,研究更一般的纯量时滞微分方程的局部和全局 Hopf 分岔并应用于一些具体例子中。最后,研究带两个时滞的纯量时滞微分方程的 Hopf 分岔。

第 3 章系统研究两个神经元时滞系统产生分岔的机理。首先,讨论一个简单的、带两个神经元时滞系统的稳定性与分岔。然后,研究时滞怎样诱导一对兴奋与抑制神经元系统产生周期性的条件。进一步讨论带分布时滞是怎样诱导兴奋与抑制神经元系统产生周期性的条件及全局 Hopf 分岔;讨论根据神经活动而建模的时滞微分系统的分岔,即模型化神经活动的时滞微分系统的分岔,重点研究 Bogdanov-Takens 分岔和 Hopf 分岔。研究带两个不同时滞的神经系统模型的稳定性与分岔,分别利用 Hassard 方法和 Poincaré-Lindstedt 方法研究上述模型产生 Hopf 分岔的条件。深入研究带多个时滞的两个耦合神经元系统的稳定性与分岔,以及分岔的相互作用,如 Hopf-Hopf 相交、Hopf-Pitchfork 相交、Takens-Bogdanov 相交等。前面均讨论的带离散时滞的情形,随后我们研究带分布时滞两个神经元系统的 Hopf 分岔,讨论带两个时滞调和振荡器的 Hopf 分岔及余维 2 分岔。最后,讨论更一般的时滞微分方程中余维 2 和余维 3 的零奇异性。

第 4 章系统研究三个神经元时滞系统的分岔。首先,讨论三个神经元且带单时滞系统的局部稳定性和 Hopf 分岔;进而讨论具有环形联接的三个神经元时滞系统的分岔;在单时滞情形,研究三个 Gopalsamy 神经元系统的 Hopf 分岔与余维 2 分岔。然后,研究具有自联接的三个神经元模型的 Hopf 分岔以及分岔周期解的稳定性。讨论在单时滞情形三个神经元模型产生 Hopf 分岔的充分必要条件。详细研究多时滞三个神经元模型的分岔,尤其是 Pitchfork 分岔、Hopf 分岔,以及它们之间的相互作用;最后,研究更一般的三个神经元时滞网络模型的稳定性与分岔。

第 5 章详细研究高阶时滞神经网络模型。首先,利用频域方法获得时滞递归神经网络产生 Hopf 分岔的条件。然后,研究时滞相互作用的神经网络产生振荡模式的条件;进而研究时滞对环形神经网络的动态行为及学习的影响,尤其是收敛性的影响、产生振荡的条件、多层网络与同步和时滞相互作用的学习等。利用 Lyapunov 泛函、时滞微分方程的对称局部 Hopf 分岔理论等研究有记忆的神元网络的同步和稳定的锁相,包括绝对同步与多稳定性、稳定的锁相和不稳定波。

第 6 章给出在工程中的一些典型时滞动态模型。首先,给出基因调控网络模型,然后对几种基因调节网络进行了分岔分析,包括引入一个常时滞基因调节网络,并进行稳定性与 Hopf 分岔分析;随后讨论几种其他基因调节网络的分岔。详

细讨论了网络拥塞控制模型,包括带弃尾的 TCP 的局部稳定性与 Hopf 分岔、某个对偶拥塞控制算法的局部 Hopf 分岔分析等。讨论带时滞生物病毒模型的稳定性与分岔分析,CD₄⁺T-细胞的 HIV 感染的时滞模型的分岔。讨论具有政策时滞的宏观经济动态模型的动态行为,尤其是它的稳定性及 Hopf 分岔(经济周期振荡产生的条件)。同时,讨论具有时滞的情感动态模型的稳定性与分岔。

第 7 章详细讨论几种典型的时滞系统产生混沌的机理。首先,对混沌研究的历史进行回顾,然后给出混沌的几种定义,以及混沌的判据与准则。讨论带分段线性函数的一阶时滞系统产生混沌的机理;带分段线性函数的时滞系统产生多涡卷混沌的机理。讨论带连续函数的一阶时滞系统产生的机理,包括带非单调激励函数的单个神经元时滞方程的混沌,以及一个原型时滞动态系统的混沌。讨论惯性时滞神经网络产生混沌现象的机理,包括带时滞的单个惯性神经元模型和带时滞两个惯性神经元系统的混沌行为。讨论时滞经济动态模型以及带分布时滞 Chen 系统产生混沌的机理。

本书的编写工作得到了国家自然科学基金项目“无线传感器网络定位算法鲁棒性及安全性研究”(61170249)、“云计算框架下大规模科学计算安全外包协议研究”(61472331)、“脉冲时刻依赖状态的脉冲时滞控制系统的分析与设计”(61374078)、“基于优化协作的可充电传感器网络的能量分配和移动数据收集机制研究”(61373179)、“基于优化协作与绿色计算的无线传感器网络感知数据的可控移动收集机制研究”(61170248),高等学校博士学科点专项科研基金(优先发展领域)“移动计算环境下数据收集、分发及其安全性研究”,长江学者奖励计划经费和重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室基金(2007DA10512711206)资助,在此表示感谢!

第一作者感谢他的博士生导师电子科技大学的虞厥邦教授,是虞教授把作者引入了非线性动力学的研究领域,从虞教授那里作者学到了严谨的治学态度和不断追求的精神,多年来虞老师一直都关心着作者的成长,并鼓励鞭策作者不断努力。对于恩师,学生从内心深处感谢他,并祝他健康长寿!

感谢加州大学伯克利分校的蔡绍棠教授,他对作者多篇论文的审阅与指导。感谢香港城市大学的陈关荣教授(IEEE Fellow、欧洲科学院院士)、冯刚教授(IEEE Fellow)、党创寅教授和黄国和副教授的邀请访问及合作研究。感谢香港中文大学王钧教授(IEEE Fellow)多年的支持帮助!感谢国内外的同行的支持帮助!

在本书的完成过程中,硕士毕业生赵樵、田勇、任晓霞、李华青、解咪咪、雷新雨、王小鉴、穆南锬为书的初稿输入做了大量工作。另外,书中参考了很多国内外专家和同行学者的论文,在此一并表示衷心感谢!

特别感谢我的夫人冉玖宏女士以及儿子廖星冉的支持、理解与帮助!谨以此

书献给他们!

由于作者学术水平及能力的限制,书中错误与不足之处在所难免,敬请专家和读者批评指正!



2014 年 12 月于重庆

目 录

上 册

第 1 章 研究时滞动力学系统 Hopf 分岔的几种方法	1
第 2 章 单个神经元时滞方程的分岔	54
第 3 章 两个神经元时滞系统的分岔	117

下 册

前言

第 4 章 三个神经元时滞系统的分岔	215
4.1 三维神经元时滞系统的稳定性与分岔	215
4.1.1 引言	215
4.1.2 固定时滞的稳定性	216
4.1.3 依赖于时滞的稳定性	223
4.1.4 讨论	226
4.2 环形联接的三阶神经元时滞模型的分岔	226
4.2.1 模型的引入与线性稳定性分析	226
4.2.2 中心流形缩减与 Hopf 分岔稳定分析	230
4.3 三个 Gopalsamy 神经元系统的分岔	237
4.3.1 模型的引入与依赖于时滞的全局稳定性	237
4.3.2 线性稳定性与 Hopf 分岔的存在性分析	240
4.3.3 Hopf 分岔周期解的方向、周期和稳定性	244
4.3.4 共振余维 2 分岔	248
4.4 带单时滞且有自联接的三个神经元模型	251
4.4.1 模型的引入、稳定性与 Hopf 分岔	251
4.4.2 Hopf 分岔方向与稳定性	255
4.5 单时滞三个神经元模型的 Hopf 分岔的充分必要条件	258
4.5.1 模型的引入与一些准备工作	258
4.5.2 Hopf 分岔的充分必要条件	260
4.6 多时滞三个神经元模型的分岔	263
4.6.1 引言	263

4.6.2	Pitchfork 分岔	264
4.6.3	Pitchfork 分岔和 Hopf 分岔相互作用	269
4.7	一般的三个神经元时滞网络模型	276
4.7.1	模型的引入、稳定性分析与 Hopf 分岔	276
4.7.2	无自联接模型的稳定性分析	284
4.7.3	无自联接三个神经网络有大时滞情形的周期解的全局存在性	288
第5章	高阶时滞神经网络模型	295
5.1	时滞递归神经网络的 Hopf 分岔分析	295
5.1.1	问题的阐述	295
5.1.2	Hopf 分岔的存在性	297
5.1.3	分岔周期解的稳定性分析	303
5.1.4	数值例子	307
5.2	带时滞相互作用的神经网络的振荡模式	307
5.2.1	模型与时滞的临界值	307
5.2.2	分岔的方向、模式和稳定性	312
5.2.3	一些例子	315
5.3	时滞对环形神经网络的动态行为与学习的影响	318
5.3.1	收敛性的影响	318
5.3.2	环形神经网络的振荡	320
5.3.3	多层网络与同步	325
5.3.4	时滞相互作用的学习	328
5.4	有记忆的神经网络的同步和稳定的锁相	330
5.4.1	引言与模型的引入	330
5.4.2	绝对同步与多稳定性	331
5.4.3	去同步:稳定的锁相和不稳定波	335
第6章	在工程中的其他时滞动态模型	340
6.1	基因调控网络模型	340
6.1.1	布尔网络模型	340
6.1.2	线性组合模型	340
6.1.3	加权矩阵模型	341
6.1.4	互信息关联模型	341
6.1.5	贝叶斯网络模型	342
6.1.6	微分方程模型	342
6.2	几种基因调节网络的分岔分析	343
6.2.1	一个常时滞基因调节网络的引入	343

6.2.2 稳定性和 Hopf 分岔分析	344
6.2.3 Hopf 分岔的方向与稳定性	347
6.2.4 几种其他基因调节网络模型	348
6.3 网络拥塞控制模型	355
6.3.1 带弃尾的 TCP 的局部稳定性与 Hopf 分岔	355
6.3.2 某个对偶拥塞控制算法的局部分岔分析	358
6.4 生物病毒模型	361
6.4.1 模型的引入	361
6.4.2 稳定性分析及仿真	363
6.4.3 计算机模拟	368
6.4.4 CD ₄ ⁺ T 细胞的 HIV 感染的时滞模型	370
6.5 宏观经济动态模型	372
6.5.1 模型的引入	372
6.5.2 模型的动态行为分析	373
6.6 情感动态模型	375
6.6.1 模型的引入	375
6.6.2 模型的稳定性与分岔分析	376
第 7 章 时滞混沌系统	379
7.1 混沌研究的历史回顾	379
7.2 混沌的定义与判定	380
7.2.1 混沌的定义	380
7.2.2 混沌研究的判据与准则	381
7.3 带分段线性函数一阶时滞系统的混沌	386
7.3.1 模型及局部稳定性域	386
7.3.2 分岔和复杂的动态行为	387
7.3.3 带分段线性函数的多涡卷时滞混沌系统	392
7.4 带连续函数的一阶时滞系统的混沌	393
7.4.1 带非单调激活函数的单个神经元时滞方程	393
7.4.2 一个原型时滞动态系统的混沌行为	395
7.5 惯性时滞神经网络的混沌现象	398
7.5.1 带时滞的单个惯性神经元模型	398
7.5.2 带时滞两个惯性神经元系统的混沌行为	399
7.6 时滞经济动态模型的混沌行为	401
7.7 带分布时滞 Chen 系统的混沌行为	404
参考文献	409

(TP-7036.01)

www.sciencep.com

工程技术分社
电 话: 010-64023167
E-mail: weiyongjie@mail.sciencep.com

销售分类建议: 电子工程、计算机、控制理论与应用、应用数学

ISBN 978-7-03-044920-7



9 787030 449207 >

定 价: 95.00 元