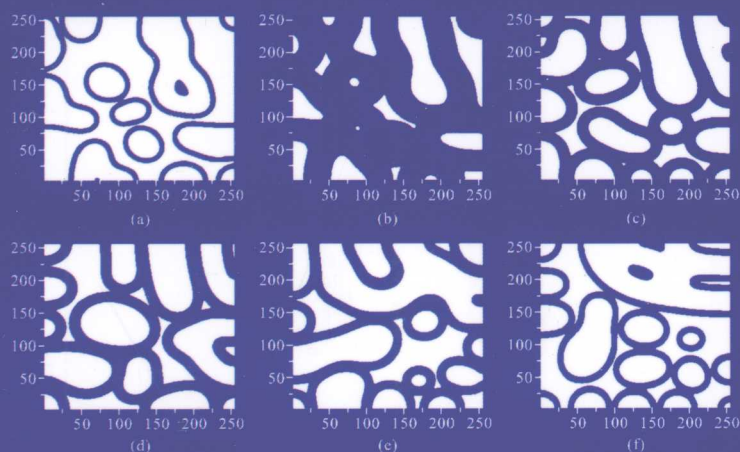




时空系统斑图 优化控制

SHI KONG XI TO



YOU HUA KONG ZHI

马军 唐军/著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

内容简介

本书主要介绍时空系统斑图优化控制理论。首先介绍时空系统斑图优化控制理论的基本概念、基本定理和基本方法。然后介绍时空系统斑图优化控制理论在工程中的应用。最后介绍时空系统斑图优化控制理论在控制工程中的应用。本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

时空系统斑图优化控制

马 军 唐 军 著

清华大学出版社

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。



清华大学出版社



YZLI0890146203

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

华中科技大学出版社

中国·武汉

本书可作为高等院校自动控制专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

0890146203

内 容 简 介

本书介绍了从低维的动力系统识别优化到反应扩散方程和耦合格子描述的空间二维系统斑图诱导控制,定义了相关统计物理量,刻画了分岔参数引起的相变,为临床预防并治疗心室纤维性颤动提供有效的理论依据,揭示了大脑皮层内螺旋波的传播机制和生物意义,为预防神经性疾病提供了有益的信息。

本书可以用作控制理论与控制工程和一般力学等相关专业研究生教材,也可供非线性动力应用和理论生物物理专业的教师和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

时空系统斑图优化控制/马 军 唐 军 著. —武汉:华中科技大学出版社,2011.11
ISBN 978-7-5609-7411-8

I. 时… II. ①马… ②唐… III. 神经网络-自动控制-动力学 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 218377 号

时空系统斑图优化控制

马 军 唐 军 著

策划编辑:张鑫锐

责任编辑:张鑫锐

封面设计:李 嫒

责任校对:李 琴

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10.25

字 数:270千字

版 次:2011年11月第1版第1次印刷

定 价:20.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

近年来,非线性科学的迅速发展使得人们对于自然界的丰富多样性和机理有了新的认识途径。从非线性科学的角度来看,物质世界的复杂性在于其内部单元以非线性规律相互作用。非线性科学应用研究已经深入到各个领域,非线性科学的主要内容包括混沌、孤立子、元胞自动机、分形等。混沌动力学研究主要应用于图像加密,基于混沌同步的保密通信和复杂系统分岔稳定性研究;孤立子研究主要侧重于光纤通信等;元胞自动机主要用来研究交通流和斑图形成;分形主要研究图样生长和金属断裂面诊断等。目前出版的非线性科学方面的丛书比较多,特别是混沌振子动力学控制和同步等。但对时空系统的相变和斑图形成研究的系列参考资料比较少。作者本人近年来一直从事非线性动力学应用方面的研究,主要侧重于 Lyapunov 稳定性理论在复杂动力系统稳定性控制、反应扩散系统和耦合神经网络同步、预防心室纤维性颤动和大脑皮层内螺旋波传播机制研究,拟通过本书的出版为相关专业的研究生和科研人员提供部分有参考价值的资料。

本书内容分为引言及 5 个章节内容 6 部分。第 1 章介绍混沌动力学理论中基于 Lyapunov 稳定性理论对非线性系统的参数结构识别和自适应同步优化控制。这对于初涉非线性动力学控制应用研究是必须的。第 2 章主要介绍反应扩散方程描述的时空系统中螺旋波的控制、稳定性分析、侧重控制方法的实验依据和物理原理。第 3 章研究极化场下螺旋波的动力学行为和破裂问题,以及在控制心颤中外刺激电流如何转化为细胞膜内电流来影响细胞膜电位,达到除颤的目的。第 4 章介绍耦合神经网络中螺旋波诱导、螺旋波破裂,以及螺旋波在大脑皮层中存在的生物意义。第 5 章介绍细胞内钙离子波的传播以及不同层螺旋波的同步问题。

本书内容从简单的低维混沌系统(包括混沌电路系统和混沌神经元模型)出发,研究引进增益系数和标度放大因子后动力系统,特别是非同阶参数对应的神经元放电模型的参数识别、分岔参数引起的完全同步到相位同步的迁移、反应扩散方程中螺旋波和时空混沌的控制,以及耦合神经网络和细胞网络中各类时空斑图诱导和相变的条件,突出物理原理和控制机理的分析,将相关学科的内容关联起来,为交叉学科领域的专家和学者提供必要的信息和参考。

在作者完成这些前期研究工作的过程中,唐国宁教授、应和平教授、张宏教授、占萌研究员、贾亚教授、陈勇教授、王青云教授和靳伍银研究员等给予了大力帮助和支持。作者在这里表示真诚的感谢。

由于本领域相关研究发展比较快,作者本人知识水平有限,书中难免有不全面和不恰当的表述,恳请本领域专家和学者批评指正,作者将努力改进,在这里一并表示感谢。

作 者
2011 年 2 月

目 录

引言	(1)
参考文献	(3)
第 1 章 非线性动力系统混沌同步优化控制	(12)
1.1 混沌和超混沌系统自适应同步和参数识别方法	(12)
1.2 同阶参数的超混沌和混沌自适应同步举例	(14)
1.3 非同阶参数 H-R 神经元混沌放电模型参数识别	(20)
1.4 标度放大法识别非同阶参数 H-R 神经元混沌系统参数	(25)
1.5 相空间压缩控制混沌和控制机制论证	(29)
参考文献	(33)
第 2 章 反应扩散系统中螺旋波控制	(34)
2.1 反应扩散系统中螺旋波的模型与稳定性分析	(35)
2.2 开环和闭环线性反馈抑制螺旋波和时空混沌	(39)
2.3 参数扰动法控制激发介质中的螺旋波	(49)
2.4 随机相位扰动控制抑制激发介质中漫游的螺旋波	(56)
2.5 非连续局部电击消除激发系统中的螺旋波	(61)
2.6 单变量局部限幅控制螺旋波和湍流	(65)
2.7 控制复数金兹朗道方程中螺旋波和螺旋波群	(69)
参考文献	(74)
第 3 章 极化场下螺旋波的控制和转化	(79)
3.1 旋转中心力场抑制螺旋波和湍流	(79)
3.2 混沌信号调制电场中螺旋波的转变	(84)
3.3 弹性介质节律收缩诱导螺旋波破裂机制	(89)
3.4 涡旋电场中螺旋波的控制与斑图诱导	(95)
3.5 外电场极化电流内化为膜内电流对螺旋波的作用	(98)
参考文献	(103)
第 4 章 耦合神经网络中螺旋波鲁棒性与破裂	(104)
4.1 H-R 神经元规则网络中螺旋波动力学	(104)
4.2 高斯色噪声所致的螺旋波破裂	(110)

4.3 H-H 神经元规则网络中螺旋波动力学	(113)
4.4 H-H 神经元小世界网络中螺旋波的传播	(117)
4.5 乘性噪声下神经网络的螺旋波鲁棒性	(123)
参考文献	(128)
第 5 章 钙离子螺旋波动力学	(130)
5.1 细胞内钙离子交换机制	(130)
5.2 细胞内钙离子数学模型	(133)
5.3 IP_3 浓度依赖的细胞内钙离子螺旋波	(135)
5.4 细胞钙离子螺旋波的控制	(138)
5.5 钙离子交换位点离散随机分布对钙离子螺旋波的影响	(145)
5.6 耦合细胞间的钙离子螺旋波	(150)
参考文献	(155)

引言

自然界具有复杂多样性,其主要原因在于自然界内部复杂的相互作用。应用非线性动力学科学的理论和非平衡统计物理方法研究物理、化学、生物等复杂系统的新现象和有趣问题有助于人类更好地了解自然界、改造自然界。混沌理论是非线性科学的重要研究内容,运用混沌动力学研究实际物理、化学、生物和工程领域的问题具有重要的科学意义。自1990年Ott等开创性的研究工作^[1]以来,国内外在该领域的研究已经取得很大的进展,可参见部分综述和专著^[2-11]。混沌广泛存在于各类系统中,如观测到化学反应生成物的颜色和浓度无规律的振荡^[12-14]、心脏中电活动^[15-18]、大脑电活动^[19-21]和激光系统^[22-24]都表现出混沌态。在实验研究中,基于电子仿真平台设计的很多振荡电路^[25-31]可以很好地模拟混沌现象。混沌系统一般至少具有一个正的李亚普诺夫(Lyapunov)指数且系统维数是分数的。超混沌系统和时空混沌系统具有多个正的李亚普诺夫指数。混沌系统的基本特征是系统演化对初始值具有极端的敏感性,系统在相空间某些方向扩张而同时在另外一些方向收缩,在相空间展现一定尺寸的奇怪吸引子。混沌控制就是通过改变系统关键参数或者输出变量幅度使得系统输出达到稳定平衡点、周期轨道或者外界标准信号等。混沌同步包括系统之间的同步和时空系统内部的同步,系统之间的同步通常研究有限个混沌振子之间的同步。同步分为完全同步、广义同步、相位同步、滞后同步等。完全同步就是系统对应变量之间的幅度和相位历经一段暂态过程后完全相同;广义同步则是指系统对应变量之间的输出满足一定的函数关系;相位同步是指系统输出对应信号序列的相位之间随着时间推移而达到一致(类似于儿童和成人的齐步走,步调一致但步长不一样);滞后同步则表明系统输出对应信号序列在时间轴上平移一段则达到相同。混沌同步在保密通信中有重要的作用,可以用混沌系统产生的序列作为载波或者密钥^[32-38]。另一方面,永磁性同步电动机转子混沌运动的控制^[39-40]有利于延长电机的寿命、混沌激光的控制可以提高激光的性能等。而在实际控制中必须考虑到控制的可行性,如对系统参数结构的识别以及控制代价问题。低维的混沌和超混沌系统常用微分方程组或者离散映射来描述,根据其是否显含时间分为自治系统和非自治系统,一般通过计算系统的Lyapunov指数^[41-42]来判断系统是否处于混沌或超混沌态。从控制代价来看,非连续控制或间歇控制^[43-45]相对于连续控制更具有优越性;从动力学控制角度看,反馈控制和参数调节法更容易改变系统动力学特性,从而控制混沌系统和超混沌系统达到期望目标。迄今为止,很多比较有效的混沌控制方法被用来研究各类混沌系统的控制,如随机控制^[46]、退步控制(backstepping control)^[47-50]、滑模控制^[51-53]、脉冲控制^[54-55]、追踪控制^[56-58]和延迟反馈法^[59-60]等。对于系统参数值事先知道的混沌和超混沌系统,一般先对系统在平衡点附近进行稳定性分析,以便选择恰当的控制方法在比较小的代价下达到控制目标。对于任意的常微分方程描述的三变量混沌系统:

$$\dot{x} = f(x, y, z, p), \quad \dot{y} = g(x, y, z, p), \quad \dot{z} = h(x, y, z, p) \quad (0.1)$$

其中, p 为系统参数,可以求出其平衡点 (x_0, y_0, z_0) 并对上式(0.1)在平衡点附近进行泰勒级数展开,可以得到系统对应的雅可比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} \partial f / \partial x & \partial f / \partial y & \partial f / \partial z \\ \partial g / \partial x & \partial g / \partial y & \partial g / \partial z \\ \partial h / \partial x & \partial h / \partial y & \partial h / \partial z \end{bmatrix}_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0 \\ z=z_0}} \quad (0.2)$$

通过计算雅可比矩阵的特征值来判定系统是否处于稳定态。如果系统施加了控制后对应的雅可比矩阵特征值小于零或者具有负实部,则系统逐渐趋于稳定,系统被控制住。如果系统的部分参数不知道或者不确定,则需要对系统的参数进行动态识别以便进一步施加控制,即采用自适应控制^[61-64]。采用自适应控制构造控制器必须依据 Lyapunov 稳定性理论。一般地,可构造包含所有系统变量和参数的正定 Lyapunov 函数 $V[x, y, z, p, u(x, y, z, p)] \geq 0$, 其中控制 u 是系统部分变量和参数的函数,对正定的 Lyapunov 函数求时间导数,使得其时间导数负定,进一步化简该时间导数则可以反解出控制器的最佳表达式。

以上方法可以推广到完全同步、广义同步和滞后同步^[64-69]的实现上,而相位同步^[70-77]则首先需要定义相位。相位同步的主要特征是系统对应变量之间的幅度可以不同,但对应相位之间一般是锁定的。对于单旋转中心的混沌系统,则直接以旋转平面内的两个变量直接定义,而对多个旋转中心的系统,如 Lorenz 混沌系统^[78]有 2 个旋转中心,则需要按照 Hilbert 变换^[79-80]来定义。对于系统输入的任意时间序列 $x_i(t)$,构建分析信号:

$$S_i(t) = x_i(t) + i \hat{x}_i(t) \quad (0.3)$$

其中, $\hat{x}_i(t)$ 是 $x_i(t)$ 序列进行 Hilbert 变换后得到的结果,变换关系为

$$\hat{x}_i(t) = -\frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (0.4)$$

其中, PV 代表柯西主值,对应的相位定义为

$$\varphi_i(t) = \arctan\left(\frac{\hat{x}_i(t)}{x_i(t)}\right) \quad (0.5)$$

在同步控制和迁移^[80]研究方面,很多工作和结果主要侧重于全同的混沌系统。实际上,混沌系统之间的参数不匹配和不确定总是存在的。因此,基于 Lyapunov 稳定性理论的自适应同步方法常常被用来研究各类混沌系统的参数识别问题^[81-85]。通常构造的正定的 Lyapunov 函数包含所有对应变量的误差、参数误差以及控制器,采用类似的方法对正定的 Lyapunov 函数求时间导数,确保其时间导数负定来得到控制器和参数观测器的优化表达形式。通过简单构造包含所有对应变量和参数误差的 Lyapunov 函数,通过反解 Lyapunov 函数对时间导数负定条件待定的参数观测器和控制器所需要的暂态过程一般是不可控制的,实际中往往需要根据不同的混沌和超混沌系统选择最佳的参数识别时间和暂态过程,这就涉及构造 Lyapunov 函数的优化问题,这可以确保选择最佳的 Lyapunov 函数,从而使得所获得的控制器作用于系统后参数很快被准确辨析出来。文献^[61-63]中在构造 Lyapunov 函数中对参数误差项引入增益系数来调节参数识别暂态过程。实际上,系统参数的识别同时取决于系统对应变量的误差,因此考虑对系统对应变量误差的调节和优化是非常重要的。另一方面,目前自适应同步控制识别混沌和超混沌系统的参数所讨论的问题在于要识别的参数的大小基本在一个数量级,而对于要识别的参数在大小差别非常大的情况没有讨论。Hindmarsh-Rose(H-R)神经元^[86-87]模型在一定的参数范围内可以描述神经元电活动的混沌行为,该模型中几个参数中最小的可以取 0.006,混沌区域内其他参数则远远大于 0.006,如其他参数通常选取 1~5。如果没有引入恰当的增益系数来控制不同量级未知参数的识别速度,则导致部分参数不能准确

识别或者识别的参数发生局部振荡现象,这将在第一章给出讨论。

时空系统比微分方程组和映射组描述的时间系统动力学行为更复杂。一般地,反应扩散方程和耦合振子网络形式可用来描述时空系统,如两变量的时空系统可以描述如下:

$$\partial u / \partial t = f(u, v, p) + D_u \nabla^2 u, \quad \partial v / \partial t = g(u, v, p) + D_v \nabla^2 v \quad (0.6)$$

$$\begin{cases} du_{ij} / dt = f(u_{ij}, v_{ij}, p) + D_u (u_{i+1j} + u_{i-1j} + u_{ij+1} + u_{ij-1} - 4u_{ij}) \\ dv_{ij} / dt = g(u_{ij}, v_{ij}, p) + D_v (v_{i+1j} + v_{i-1j} + v_{ij+1} + v_{ij-1} - 4v_{ij}) \end{cases} \quad (0.7)$$

其中, u_{ij}, v_{ij}, p, D 表示系统的变量、参数、耦合强度或扩散系数。式(0.7)的耦合方式为最近邻耦合,对应的网络为规则网络。小世界网络连接是在最近邻连接基础上增加一定概率的长程连接。在一定的参数和边界条件(无流边界条件或者周期性边界条件)下,时空系统中常可以观测到丰富的斑图^[88-94]。用自适应控制和斑图动力学研究时空斑图在信息传递和编码中的作用具有重要的科学价值。螺旋波是系统远离平衡态下出现的一种时空斑图,研究发现,心肌组织中出现的螺旋波往往与一类心脏疾病关联,心肌组织中螺旋波的破裂则引起心室纤维性颤动,从而导致心源性猝死。基于实验结果和非线性动力学理论,许多比较理想的理论模型被用来研究心肌组织细胞电活动的行波特性和相变特征^[95-112]。

心肌组织通常是可激的,心肌组织的螺旋波和激发介质中螺旋波有很大的相似性。在对预防心颤的研究中,通常以化学反应系统^[113-115]来研究螺旋波动力学以及控制问题。实验表明:铂金表面催化氧化反应^[116-118]、钙离子细胞^[119-125]和大脑皮层^[126-132]内都可以观测到螺旋波的存在。在实验上通常采用 Belousov-Zhabotinsky 反应^[113]来研究螺旋波动力学。在振荡介质中也可以观测到螺旋波的存在,理论上常常采用复数金兹朗道方程[Complex Ginzburg-Landau Equation(CGLE)]来进行理论研究^[89,133-142]。国内的一些研究小组在螺旋波控制等方面已经取得了非常重要的研究成果,这些内容将在后面各对应的章节进行评述和介绍。

自 1952 年 Hodgkin-Huxley(H-H)开创性的研究工作^[143-145]以来,计算神经科学和相关实验研究取得了很大的发展^[146-160]。电压钳技术的发展使得实验上更容易测量和观测神经元电活动,神经元的理论研究最初主要集中在动力学行为研究,如分岔^[146],随机共振^[161-164]和同步等。神经元系统通常由很多神经元组成,神经元之间相互作用,胶质细胞对神经元的动力学也有重要的影响^[165-166]。神经元系统内部信号的传递取决于所有神经元的群体行为,通常认为神经元之间以小世界方式连接,耦合方式主要是化学突触耦合和电耦合,因此研究神经网络^[167-174]不同拓扑结构(小世界连接、规则连接、无标度连接等)下的群体行为如空间斑图演化 and 关联共振等^[175-181]有利于进一步掌握信息编码传递的规律,并为治疗某些神经性疾病提供有益的理论指导。北京航空航天大学陆启韶和王青云教授等在计算神经科学领域取得了非常重要的研究成果,如神经元动力学分岔、同步和神经网络关联共振等,综述见文献^[182]。本人基于非线性动力学理论,在神经网络螺旋波诱导、相变、通道噪声^[129-132]等对螺旋波鲁棒性影响方面做了一些初步的研究工作,将在后面章节简单介绍。

参考文献

- [1] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos[J]. Physical Review Letters, 1990, 64: 1196-1199.
- [2] Boccaletti S, Grebogi C, Lai Y C, et al. The control of chaos: theory and applications[J]. Physics Reports, 2000, 329: 103-197.
- [3] Boccaletti S, Kurths J, Osipov G, et al. The synchronization of chaotic systems[J]. Physics Report, 2002,

366:1-101.

- [4] Schöll E, Schuster H G. Handbook of Chaos Control[M]. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007.
- [5] Miguel A F Sanjuan, Celso Grebogi. Recent Progress in Controlling Chaos[M]. Singapore: World Scientific, 2010.
- [6] 王树禾. 微分方程模型与混沌[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [7] 徐云, 宋向东, 濮岚澜. 电学中的混沌[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1999.
- [8] 冯久超, 谢智刚. 混沌信号的重构及其在基于混沌的通信中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [9] 高金峰. 非线性电路与混沌[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] 聂春燕. 混沌系统与弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [11] 王青云, 石霞, 陆启韶. 神经元耦合系统的同步动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [12] Epstein I R. Oscillations and chaos in chemical systems[J]. Physica D, 1983, 7(1-3): 47-56.
- [13] Field R J, Schneider F W. Oscillating chemical reactions and nonlinear dynamics[J]. Journal of Chemical Education, 1989, 66: 195-204.
- [14] Kazimierz D, Waldemar F, Artur Z. A Novel Method of Spectral Analysis of Oscillatory Belousov-Zhabotinsky Reaction[J]. Journal of Mathematics chemistry, 2003, 33(3-4): 245-254.
- [15] Pool R. Is it healthy to be chaotic? [J]. Science, 1989, 243(4891): 604-607.
- [16] Wagner C D, Persson P B. Chaos in the cardiovascular system: an update[J]. Cardiovascular Research, 1998, 40: 257-264.
- [17] Wang H O, Chen D, Bushnell L G. Control of Bifurcations and Chaos in Heart Rhythms[C]. Proc. 36th IEEE Conf. on Decision and Control, 1997, 1: 395-400.
- [18] 裴留庆, 戴心来, 李宝东. 心脏血液耦合动力系统的混沌同步模型[J]. 中国科学(E), 1998, 28(1): 83-89.
- [19] Faure P, Korn H. Is there chaos in the brain? I. Concepts of nonlinear dynamics and methods of investigation[J]. C R Acad Sci III, 2001, 324(9): 773-793.
- [20] Korn H, Faure P. Is there chaos in the brain? II. Experimental evidence and related models[J]. C. R. Biologies, 2003, 326: 787-840.
- [21] Pikovsky A S, Rabinovich M I. A simple autogenerator with stochastic behavior[J]. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1978, 239: 301-304.
- [22] Pettiaux N P, Li R D, Mandel P. Instabilities of the degenerate optical parametric oscillator[J]. Optics Communications, 1989, 72(3): 256-260.
- [23] Oppo G L, Brambilla, Lugiato L A. Formation and evolution of roll patterns in optical parametric oscillators[J]. Physical Review A, 1994, 49: 2028-2032.
- [24] 沈柯. 光学中的混沌[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1999.
- [25] Rössler O E. An equation for hyperchaos[J]. Physics Letter A, 1979, 71(2-3): 155-157.
- [26] Kennedy M P. Chaos in the Colpitts oscillator[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I, 1994, 41(11): 771-774.
- [27] Namajunas A, Tamasevicius A. Simple RC chaotic oscillator[J]. Electronics Letters, 1996, 32(11): 945-946.
- [28] Miyoshi T, Nitani T, Inaba N. Chaotic Attractor with a Characteristic of Torus[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I, 2000, 47(6): 944-948.
- [29] Lü J H, Yu S M, Leung L, et al. Experimental verification of multidirectional multiscroll chaotic attractors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I, 2006, 53(1): 149-165.
- [30] 蒋品群, 罗晓曙, 汪秉宏, 等. 超混沌振荡器的单变量单向耦合同步及其电路实验仿真[J]. 物理学报, 2002, 51(9): 1937-1941.
- [31] Ma J, Li A B, Pu Z S, et al. A time-varying hyperchaotic system and its realization in circuit[J].

- Nonlinear Dynamics, 2010, 62(3): 535-541.
- [32] Hayes S, Gerbogi C, Ott E. Communicating with chaos[J]. Physical Review Letters, 1993, 70: 3031-3034.
- [33] Parlitz A, Kocarev T, Preckel H. Encoding messages using chaotic synchronization[J]. Physical Review E, 1996, 53: 4351-4361.
- [34] Liao T L, Tsai S H. Adaptive synchronization of chaotic systems and its application to secure communications[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2000, 11 (9): 1387-1396.
- [35] Feki M. An adaptive chaos synchronization scheme applied to secure communication[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2003, 18 (13): 141-148.
- [36] Terry J R, VanWiggeren G D. Chaotic communication using generalized synchronization[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2001, 12 (1): 145-152.
- [37] Hung Y C, Hu C K. Chaotic Communication via Temporal Transfer Entropy[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(24): 244102-244106.
- [38] Li D, Li J F. A secure communication method for a high-power information signal based on chaotic masking[J]. Chinese Physics B, 2002, 11(11): 1124-1127.
- [39] Wei D Q, Luo X S. Passive adaptive control of chaos in synchronous reluctance motor[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(1): 92-97.
- [40] Wei D Q, Zhang B. Controlling chaos in permanent magnet synchronous motor based on finite-time stability theory[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(4): 1399-1403.
- [41] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, et al. Determining lyapunov exponents from a time series[J]. Physica D, 1985, 16(3): 285-317.
- [42] 何岱海, 徐健学, 陈永红. 常微分方程系统李亚普诺夫特性指数的研究[J]. 物理学报, 2000, 49 (5): 833-837.
- [43] 马军, 廖高华, 莫晓华, 等. 超混沌系统的间歇同步与控制[J]. 物理学报, 2005, 54(12): 5585-5590.
- [44] Żochowski M. Intermittent dynamical control[J]. Physica D, 2000, 145: 181-190.
- [45] Ma J, Wang Q Y, Jin W Y, et al. Control chaos in the Hindmarsh-Rose neuron by using intermittent feedback with one variable[J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(10): 3582-3585.
- [46] Fowler T B. Application of stochastic control technique to chaotic nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34: 201-205.
- [47] Wu X Q, Lu J A. Parameter identification and backstepping control of uncertain Lü system [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2003, 18(4): 721-729.
- [48] Gao Y, Kong F. Controlling beam halo-chaos via backstepping design[J]. Chinese Physics B, 2008, 17 (4): 1209-1215.
- [49] Yassen M T. Chaos control of chaotic dynamical systems using backstepping design[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2006, 27 (2): 537-548.
- [50] Bowong S, Kakmeni F M. Chaos control of uncertain chaotic systems via backstepping approach[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2006, 128 (1): 21-27.
- [51] Yau H T, Chen C K, Chen C L. Sliding mode control of chaotic system with uncertainties [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2000, 10: 1139-1147.
- [52] Jang M J, Chen C L, Tsao Y M. Sliding mode control for active magnetic bearing system with flexible rotor[J]. Journal of The Franklin Institute Engineering and Applied Mathematics, 2005, 342: 401-419.
- [53] Jang M J, Chen C L, Chen C K. Sliding mode control of hyperchaos in Rössler systems[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2002, 14 (9): 1465-1476.
- [54] Yang T, Yang C M, Yang L B. Control of Rössler system to periodic motions using impulsive control

- methods[J]. *Physics Letter A*,1997,232(5):356-361.
- [55] Osipov G V,Kozlov A K,Shalfeev V D. Impulsive control of chaos in continuous systems[J]. *Physics Letter A*,1998,247(1-2):119-128.
- [56] 陈士,谢进,陆君安,等. Rössler 混沌系统的追踪控制与同步[J]. *物理学报*,2002,51(4):749-752.
- [57] 马军,蒲忠胜,唐国宁. 控制 L. C 振子超混沌系统到达任意目标[J]. *系统仿真学报*,2004,16 (6):1336-1339.
- [58] 李春来,罗晓曙. 一类五阶超混沌电路系统的加速追踪控制与投影同步[J]. *物理学报*,2009,58(6):3759-3764.
- [59] Park J H,Kwon O M. A novel criterion for delayed feedback control of time-delay chaotic systems[J]. *Chaos,Solitons & Fractals*,2005,23:495-501.
- [60] 于洪洁,童伟君. 延迟自反馈控制 Hindmarsh-Rose 神经元的混沌运动[J]. *物理学报*,2009,58 (5):2977-2982.
- [61] Ma J,Li F,Huang L,et al. Complete synchronization,phase synchronization and parameters estimation in a realistic chaotic system[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations*,2011,16 (9):3770-3785.
- [62] 马军,苏文涛,高加振. Hindmarsh-Rose 混沌神经元自适应同步和参数识别的优化研究[J]. *物理学报*,2010,59(3):1554-1561.
- [63] Ma J,Zhang A H,Xia Y F,et al. Optimize design of adaptive synchronization controllers and parameter observers in different hyperchaotic systems[J]. *Applied Mathematics and Computation*,2010,215(9):3318-3326.
- [64] Wang Q Y,Lu Q S,Wang H X. Transition to complete synchronization via near-synchronization in two coupled chaotic neurons[J]. *Chinese Physics*,2005,14 (11):2189-2195.
- [65] Yang J Z,Zhang M. Generalized Synchronization in a Drive-Response System[J]. *Communications in Theoretical Physics*,2008,49(2):391-395.
- [66] Zhou P,Chen X F,Zhang N Y. Generalized Synchronization between Different Fractional-Order Chaotic Systems[J]. *Communications in Theoretical Physics*,2008,50 (4):931-934.
- [67] Min L Q,Chen G R,Zhang X D,et al. Approach to Generalized Synchronization with Application to Chaos-Based Secure Communication[J]. *Communications in Theoretical Physics*,2004,41 (4):632-640.
- [68] 马军,蒲忠胜,黎锁平. 一类超混沌系统的广义同步研究[J]. *电路与系统学报*,2007,12 (4):20-23.
- [69] 马铁东,张化光,王智良. 一类参数不确定统一混沌系统的脉冲滞后同步[J]. *物理学报*,2007,56(7):3796-3802.
- [70] Shuai J W,Durand D W. Phase synchronization in two coupled chaotic neurons[J]. *Physics Letter A*,1999,264(4):289-297.
- [71] Shahverdiev E M,Sivaprakasam S,Shore K A. Lag synchronization in time-delayed systems[J]. *Physics Letter A*,2002,292(6):320-324.
- [72] Li X W,Zheng Z G. Phase Synchronization of Coupled Rössler Oscillators: Amplitude Effect[J]. *Communications in Theoretical Physics*,2007,47;(2):265-269.
- [73] Zhan M,Hu G,Wang X G. Dynamic Behavior of Phase Synchronization of Chaos[J]. *Chinese Physics Letters*,2000,17(5):332-334.
- [74] 郑志刚,胡岗,周昌松,等. 耦合混沌系统的相同步:从高维混沌到低维混沌[J]. *物理学报*,2000,49 (12):2320-2327.
- [75] 莫晓华,唐国宁. 采用振幅耦合方法研究多旋转中心混沌振子的相同步[J]. *物理学报*,2004,53 (7):2080-2083.
- [76] 郝建红,李伟. 混沌吸引子在两个周期振子耦合下的相同步[J]. *物理学报*,2005,54(8):3491-3496.

- [77] 刘勇. 耦合系统的混沌相位同步[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 749-755.
- [78] Lorenz E. Deterministic nonperiodic flow[J]. Journal of Atmospheric Science, 1963, 20: 130-141.
- [79] Pikovsky A S, Roseblum M, Kurths J. Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences [M]. UK: Cambridge University Press, 2001.
- [80] Gao J, Zheng Z G, He D H, et al. Transition to Phase Synchronization Through Generalized Synchronization[J]. Chinese Physics Letters, 2003, 20 (7): 999-1002.
- [81] D'anjou A, Sarasola C, Torrealdea F J, et al. Parameter-adaptive identical synchronization disclosing Lorenz chaotic masking[J]. Physical Review E, 2001, 63: 046213.
- [82] Chen C L, Feng G, Guan X P. Parameter identification based synchronization for a class of chaotic systems with offset vectors[J]. Physics Letter A, 2004, 330 (1-2): 65-74.
- [83] Lü L, Li Y, Guo Z A. Parameter identification and synchronization of spatiotemporal chaos in uncertain Gray-Scott system[J]. Science in China Series G, 2008, 52 (11): 1638-1646.
- [84] Wang Z L. Anti-synchronization in two non-identical hyperchaotic systems with known or unknown parameters[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations, 2009, 14 (5): 2366-2372.
- [85] 李农, 李建芬, 蔡理, 等. 不确定 Chua's 电路的参数辨识与自适应同步[J]. 物理学报, 2008, 57 (12): 7500-7505.
- [86] Hindmarsh J L, Rose R M. A model of the nerve impulse using two first-order differential equations[J]. Nature (London), 1982, 276: 162-164.
- [87] Hindmarsh J L, Rose R M. A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series, 1984, 221(1222): 87-102.
- [88] Winfree A T. When Time Breaks Down[M]. Princeton: Princeton University Press, 1987.
- [89] Cross M C, Hohenberg P C. Pattern formation outside of equilibrium[J]. Reviews of Modern Physics, 1993, 65: 851-1112.
- [90] Winfree A T. The Geometry of Biological Time[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [91] Bär M, Gottschalk N, Ertl G. Spiral waves in a surface reaction: model calculations[J]. Journal of Chemical Physics, 1994, 100 (2): 1202.
- [92] Mikhailov A S, Showalter K. Control of waves, patterns and turbulence in chemical systems [J]. Physics Reports, 2006, 425(2-3): 79-194.
- [93] Zhou L Q, Jia X, Ouyang Q. Experimental and numerical studies of noise-induced coherent patterns in a subexcitable system[J]. Physical Review Letters, 2002, 88 (13): 138301-138304.
- [94] Hou Z H, Xin H W. Noise-sustained spiral waves: effect of spatial and temporal memory[J]. Physical Review Letters, 1998, 89 (28): 280601.
- [95] Panfilov A, Holden A V. Spatio-temporal chaos in a model of cardiac electric activity[J]. International Journal of Bifurcation & Chaos, 1991, 1: 219-225.
- [96] Courtemanche M, Winfree A T. Re-entrant rotating waves in Beeler-Reuter based model of two-dimensional cardiac conduction[J]. International Journal of Bifurcation & Chaos, 1991, 1: 431-444.
- [97] Samie F H, Josem J. Mechanisms underlying ventricular tachycardia and its transition to ventricular fibrillation in the structurally normal heart[J]. Cardiovascular Research, 2001, 50(2): 242-250.
- [98] Sinha S, Pande A, Pandit R. Defibrillation via the elimination of spiral turbulence in a model for ventricular fibrillation[J]. Physical Review Letters, 2001, 86: 3678-3681.
- [99] Xie F G, Qu Z L, Garfinkel A, et al. Electrical refractory period restitution and spiral wave reentry in simulated cardiac tissue[J]. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 2002, 283 (1): H448-H460.

- [100] Davidenko J, Pertsov A, Salomonsz R, et al. Stationary and drifting spiral waves of excitation in isolated cardiac muscle[J]. *Nature*(London), 1992, 355: 349-351.
- [101] Holden A V, Zhang H. Modelling propagation and re-entry in anisotropic and smoothly heterogeneous cardiac tissue[J]. *Journal of the Chemical Society: Faraday Transactions*, 1993, 89: 2833-2837.
- [102] Zhang H, Holden A V. Chaotic meandering of spiral waves in the FitzHugh-Nagumo system[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 1995, 5 (3-4): 661-670.
- [103] Zhang H, Patel N. Spiral wave breakdown in an excitable medium model of cardiac tissue[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 1995, 5(3-4): 635-643.
- [104] Gray R A, Jalife J, Panfilov A V, et al. Mechanisms of cardiac fibrillation[J]. *Science*, 1995, 270(5239): 1222-1225.
- [105] Aliev R R, Panfilov A V. A simple two-variable model of cardiac excitation[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 1996, 7 (3): 293-301.
- [106] Holden A V. The restless heart of a spiral[J]. *Nature*, 1997, 387(6634): 655-657.
- [107] Beaumont J, Davidenko N, Davidenko J M, et al. Spiral Waves in Two-Dimensional Models of Ventricular Muscle: Formation of a Stationary Core[J]. *Biophysical Journal*, 1998, 75(1): 1-14.
- [108] Holden A V. Cardiac physiology: a last wave from the dying heart[J]. *Nature* (London), 1998, 392 (6671): 20-21.
- [109] Chen P S, Garfinkel A, Weiss J N. Computerized mapping of fibrillation in normal ventricular myocardium[J]. *Chaos*, 1998, 8(1): 127-136.
- [110] Roth B J. Meandering of spiral waves in anisotropic cardiac tissue[J]. *Physica D*, 2001, 150 (1-2): 127-136.
- [111] Kremmydas G P, Holden A V. Spiral-wave meandering in reaction-diffusion models of ventricular muscle[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2002, 13 (8): 1659-1669.
- [112] Nash M P, Panfilov A V. Electromechanical model of excitable tissue to study reentrant cardiac arrhythmias[J]. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2004, 85 (2-3): 501-522.
- [113] Zaikin A N, Zhabotinsky A M. Concentration wave propagation in two-dimensional liquid phase self oscillating system[J]. *Nature*(London), 1970, 225: 535-537.
- [114] Jakubith S, Rotermund H H, Engel W, et al. Spatiotemporal concentration patterns in a surface reaction: Propagating and standing waves, rotating spirals, and turbulence[J]. *Physical Review Letters*, 1990, 65: 3013-3016.
- [115] Kapral R, Showalter K. *Chemical Waves and Patterns*[M]. Dordrecht: Kluwer, 1994.
- [116] Oertzen A V, Rotermund H H, Mikhailov A S. Standing Wave Patterns in the CO Oxidation Reaction on a Pt(110) Surface: Experiments and Modeling[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2000, 104 (14): 3155-3178.
- [117] Nettesheim S, von Oertzen A, Rotermund H H. Reaction diffusion patterns in the catalytic CO-oxidation on Pt(110): Front propagation and spiral waves[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1994, 98 (12): 9977.
- [118] Lechleiter J, Girard S, Peralta E, et al. Spiral calcium wave propagation and annihilation in *Xenopus laevis* oocytes[J]. *Science*, 1991, 252 (5002): 123-126.
- [119] McKenzie A, Sneyd J. On the Formation and Breakup of Spiral Waves of Calcium[J]. *International Journal of Bifurcations and Chaos*, 1998, 8(10): 2003-2012.
- [120] Lechleiter J D, John L M, Camacho P. Ca^{2+} wave dispersion and spiral wave entrainment in *Xenopus laevis* oocytes overexpressing Ca^{2+} ATPases[J]. *Biophysical Chemistry*, 1998, 72 (1): 123-129.
- [121] Chudin E, Goldhaber J, Garfinkel A. Intracellular Ca^{2+} dynamics and the stability of ventricular

- tachycardia[J]. Biophysical Journal,1999,77(6):2930-2941.
- [122] Sakaguchi H, Wofo P. Chaotic pulse transmission and spiral formation in a calcium oscillation model[J]. Physical Review E,2008,77:042902.
- [123] Tang J, Jia Y, Ma J, et al. Numerical study of IP_3 -dependent Ca^{2+} spiral waves in xenopus oocytes[J]. Europhysics Letters,2008,83:68001.
- [124] Tang J, Yang L J, Ma J, et al. Ca^{2+} spiral waves in a spatially discrete and random medium[J]. European Biophysics Journal with Biophysics Letters,2009,38 (8):1061-1068.
- [125] Tang J, Jia Y, Ma J, et al. Theoretical Study on Drift of Ca^{2+} Spiral Waves Controlled by Electric Field [J]. Communications in Theoretical Physics,2009,51 (05):941-946.
- [126] Huang X Y, Troy W C, Yang Q C, et al. Spiral waves in disinhibited mammalian cortex[J]. The Journal of Neuroscience,2004,24(44):9897-9902.
- [127] Schiff S J, Huang X Y, Wu J Y, et al. Dynamical Evolution of Spatiotemporal Patterns in Mammalian Middle Cortex[J]. Physical Review Letters,2007,98 (17):178102.
- [128] Wu J Y, Huang X Y, Zhang C. Propagating Waves of Activity in the Neocortex: What They Are, What They Do[J]. Neuroscientist,2008,14(5):487-502.
- [129] Ma J, Zhang A H, Tang J, et al. Collective behaviors of spiral wave in the networks of Hodgkin-Huxley neurons in presence of channel noise[J]. Journal of Biological Systems,2010,18 (1):243-259.
- [130] Ma J, Tang J, Zhang A H, et al. Robustness and Breakup of spiral wave in a two-dimensional lattice networks of neurons[J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy,2010,53(4):672-679.
- [131] Ma J, Yang L J, Wu Y, et al. Spiral wave in the small-world networks of Hodgkin-Huxley neurons[J]. Communications in Theoretical Physics,2010,54 (3):583-588.
- [132] Ma J, Wang C N, Jin W Y, et al. Transition from spiral wave to target wave and other coherent structures in the networks of Hodgkin-Huxley Neurons[J]. Applied Mathematics and Computation, 2010,217(8):3844-3852.
- [133] Aranson I S, Hugues C, Tang L H. Spiral motion in a noisy complex Ginzburg-Landau equation[J]. Physical Review Letters,1997,80:2646.
- [134] Ipsen M, Sørensen P G. Finite wavelength instabilities in a slow mode coupled complex Ginzburg-Landau equation[J]. Physical Review Letters,2000,84:2389-2392.
- [135] Ipsen M, Kramer L, Sørensen P G. Amplitude equations for description of chemical reaction-diffusion systems[J]. Physics Reports,2000,337:193-235.
- [136] Aranson I S, Kramer L. The world of the complex Ginzburg-Landau equation[J]. Reviews of Modern Physics,2002,74:99.
- [137] Wang H L, Ouyang Q. Effect of colored noises on spatiotemporal chaos in the complex Ginzburg-Landau equation[J]. Physical Review E,2002,65:46206.
- [138] Liu S D, Liu S K, Fu Z T, et al. The Hopf bifurcation and spiral wave solution of the complex Ginzburg-Landau equation[J]. Chaos, Solitons & Fractals,2002,13 (7):1377-1381.
- [139] Jiang M X, Wang X N, Ouyang Q, et al. Spatiotemporal chaos control with a target wave in the complex Ginzburg-Landau equation system[J]. Physical Review E,2004,69:056202.
- [140] Ma J, Gao J H, Wang C N, et al. Control spiral and multi-spiral wave in the Complex Ginzburg-Landau Equation[J]. Chaos, Solitons & Fractals,2008,38(2):521-530.
- [141] Ma J, Jia Y, Tang J, et al. Parameter fluctuation-induced pattern transition in the Complex Ginzburg-Landau equation[J]. International Journal of Modern Physics B,2010,24 (23):4481-4500.
- [142] Zhang S L, Hu B B, Zhang H. Analytical approach to the drift of the tips of spiral waves in the complex

- Ginzburg-Landau equation[J]. *Physical Review E*, 2003, 67: 016214.
- [143] Hodgkin A L, Huxley A F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve[J]. *The Journal of Physiology (London)*, 1952, 117(4): 500-544.
- [144] Hodgkin A L, Huxley A F. Ions through the Membrane of the Giant Axon of Loligo[J]. *The Journal of Physiology (London)*, 1952, 116: 473-496.
- [145] Hodgkin A L, Huxley A F. The dual effect of membrane potential on sodium conductance in the giant axon of Loligo[J]. *The Journal of Physiology (London)*, 1952, 116: 497-506.
- [146] Troy W C. The bifurcation in the Hodgkin-Huxley equations[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1978, 36: 73-83.
- [147] Rinzel J, Miller R N. Numerical calculation of stable and unstable solutions to the Hodgkin-Huxley equations[J]. *Mathematical Biosciences*, 1980, 49: 27-59.
- [148] Pappone P A. Voltage-clamp experiments in normal and denervated mammalian skeletal muscle fibres [J]. *The Journal of Physiology (London)*, 1980, 280: 377-410.
- [149] Morris C, Lecar H. Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber[J]. *Biophysical Journal*, 1981, 35(1): 193-213.
- [150] Chay T R, Keizer J. Minimal model for membrane oscillations in the pancreatic beta-cell[J]. *Biophysical Journal*, 1983, 42(2): 181-190.
- [151] Gammaitoni L, Hänggi P, Jung P, et al. Stochastic resonance[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1988, 70: 223-288.
- [152] Guckenheimer J, Labouriau I S. Bifurcation of the Hodgkin and Huxley equations: a new twist[J]. *Bulletin of Mathematical Biology*, 1993, 55: 937-952.
- [153] Wang W, Perez G, Cerderia H A. Dynamical behavior of the firings in a coupled neuronal system[J]. *Physical Review E*, 1993, 47(4): 2893-2898.
- [154] Chow C C, White J A. Spontaneous action potentials due to channel fluctuations[J]. *Biophysical Journal*, 1996, 71: 3013-3021.
- [155] Wang J, Ge J M, Fei X Y. Two-parameters Hopf bifurcation in the Hodgkin-Huxley model[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2005, 23(3): 973-980.
- [156] Gurkiewicz M, Korngreen A. A Numerical Approach to Ion Channel Modelling Using Whole-Cell Voltage-Clamp Recordings and a Genetic Algorithm[J]. *PLoS Computational Biology*, 2007, 3(8): e169.
- [157] Milesescu L S, Yamanishia T, Ptak K. Real-Time Kinetic Modeling of Voltage-Gated Ion Channels Using Dynamic Clamp[J]. *Biophysical Journal*, 2008, 95(1): 66-87.
- [158] Yang Z Q, Lu Q S. Different types of bursting in Chay neuronal model[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2008, 51(6): 687-698.
- [159] Chen Y, Yu L C, Qin S M, et al. Detection of subthreshold pulses in neurons with channel noise[J]. *Physical Review E*, 2008, 78: 051909.
- [160] Engel T A, Helbig B, Russell D F. Coherent stochastic oscillations enhance signal detection in spiking neurons[J]. *Physical Review E*, 2009, 80: 021919.
- [161] Hu G, Ditzinger T, Ning C N, et al. Stochastic resonance without external periodic force[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71: 807-810.
- [162] Wang W, Wang Z D. Internal-noise-enhanced signal transduction in neuronal systems [J]. *Physical Review E*, 1997, 55: 7379-7384.
- [163] Wang W, Chen G, Wang Z D. 40-Hz coherent oscillations in neuronal systems[J]. *Physical Review E*, 1997, 56: 3728-3731.
- [164] Perc M. Stochastic resonance on excitable small-world networks via a pacemaker[J]. *Physical Review*

- E,2007,76 (6):066203.
- [165] Nadkarni S, Jung P. Spontaneous Oscillations of Dressed Neurons: A New Mechanism for Epilepsy? [J]. Physical Review Letters,2003,91:268101.
 - [166] Garbo A D,Barbi M,Chillemi S,et al. Calcium signalling in astrocytes and modulation of neural activity [J]. BioSystems,2007,89:74-83.
 - [167] He D H, Hu G, Zhan M, et al. Pattern formation of spiral waves in an inhomogeneous medium with small-world connections[J]. Physical Review E,2002,65:055204.
 - [168] Wang M S, Hou Z H, Xin H W. Ordering spatiotemporal chaos in small-world neuron networks[J]. ChemPhysChem,2006,7:579.
 - [169] Sinha S,Saramäki J,Kaski K. Emergence of self-sustained patterns in small-world excitable media[J]. Physical Review E,2007,76:015101R.
 - [170] Wei D Q, Luo X S, Qin Y H. Random long-range connections induce activity of complex Hindmarsh-Rose neural network[J]. Physica A,2008,387 (8-9):2155-2160.
 - [171] Ma J, Jia Y, Tang J, et al. Breakup of spiral waves in the coupled Hindmarsh-Rose neurons [J]. Chinese Physics Letters,2008,25(12):4325-4328.
 - [172] Jr R E, Brunnet L G. Multistability in networks of Hindmarsh-Rose neurons[J]. Physical Review E, 2008,78:061917.
 - [173] Ma J, Ying H P, Liu Y, et al. Development and transition of Spiral wave in the coupled Hindmarsh-Rose neurons in two-dimensional space[J]. Chinese Physics B,2009,18:98-105.
 - [174] Wang Q Y, Perc M, Duan Z S, et al. Synchronization transitions on scale-free neuronal networks due to finite information transmission delays[J]. Physical Review E,2009,80:026206.
 - [175] Perc M. Spatial decoherence induced by small-world connectivity in excitable media[J]. New Journal of Physics,2005,7:252.
 - [176] Perc M. Spatial coherence resonance in excitable media[J]. Physical Review E,2005,72:016207.
 - [177] Perc M. Effects of small-world connectivity on noise-induced temporal and spatial order in neural media [J]. Chaos, Solitons & Fractals,2007,31(2):280-291.
 - [178] Wei D Q, Luo X S. Coherence Resonance and Noise-Induced Synchronization in Hindmarsh-Rose Neural Network with Different Topologies[J]. Communications in Theoretical Physics,2007,48 (4):759-762.
 - [179] Wang Q Y, Huang L, Chen G R, et al. Patterns formation and firing synchronization in networks of map neurons[J]. New Journal of Physics,2007,9:383.
 - [180] Wang Q Y, Perc M, Duan Z S, et al. Delay-enhanced coherence of spiral waves in noisy Hodgkin-Huxley neuronal networks[J]. Physics Letter A,2008,372(35):5681-5687.
 - [181] Sun X J, Perc M, Lu Q S, et al. Spatial coherence resonance on diffusive and small-world networks of Hodgkin-Huxley neurons[J]. Chaos,2008,18 (2):023102.
 - [182] 陆启韶,刘深泉,刘锋,等. 生物神经网络系统动力学与功能研究[J]. 力学进展,2008,38(6):766-793.