

螺旋波动力学研究新进展^{*}

Progress in the Researching of the Dynamical Behavior of Spiral Wave

李秀林¹, 袁国勇^{2,3}, 陈光旨⁴, 王光瑞⁵

Li Xiulin¹, Yuan Guoyong^{2,3}, Chen Guangzhi⁴, Wang Guangrui⁵

(1. 呼伦贝尔学院物理系, 内蒙古海拉尔 021008; 2. 河北师范大学物理学院, 河北石家庄 050016; 3. 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088; 4. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004; 5. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 8009 信箱 100088)

(1. Dept. of Phy., Hulunbuir Coll., Hailaer, Neimonggu, 021008, China; 2. Dept. of Phy., Hebei Normal Univ., Shijiazhuang, Hebei, 050016, China; 3. Dept. of Beijing Graduate, China Academy of Engi. Phy., Beijing, 100088, China; 4. Coll. of Phy. Sci. & Tech., Guangxi Univ., Nanning, Guangxi, 530004, China; 5. Inst. of Applied Phy. & Comp. Math., P.O. Box 8009, Beijing, 100088, China)

摘要: 讨论可激媒质中螺旋波的形成和其动力学行为、波头的运动和螺旋波失稳, 介绍具有 2 个稳定点的双稳可激系统中时空斑图和其相应的理论, 分析最近实验中发现的反螺旋波, 给出螺旋波时空与混沌控制与同步的几种方案. 认为螺旋波波头的运动反映了整个系统的对称性, 在不同的参数范围内, 可以观测到不同的斑图行为, 对螺旋波动力学的深入研究有望解决诸如心脏失颤等实际问题, 有望加强对非平衡热力学行为的进一步了解.

关键词: 螺旋波 反螺旋波 双稳系统 可激系统 同步与控制

中图分类号: O415; O414 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2005)03-0177-07

Abstract: Spiral wave appears generally in nature. In this paper, we discuss the formation of spiral wave and their dynamical behavior, the motion of spiral tip, spiral wave instability, and anti-spiral wave. Two stable system is also considered. At last, control and synchronization of spiral and temp-spatial chaos are also given. It is likely to deal with some real question such as ventricular fibrillation and to understand deeply physical system of non-equilibrium state.

Key words: spiral wave, anti-spiral wave, two stable system, excited system, control and synchronization

时空斑图是在空间或时间上具有某种规律性的非均匀宏观结构, 它普遍存在于自然界中. 从热力学角度观察, 自然界中的斑图可分为两类^[1]: 一类是存在于热力学平衡态条件下的斑图(例如无机化学中的晶体结构等), 这类斑图相对来讲比较简单, 可以用热力学理论去考虑, 人们对它们的形成机理已经有了比较系统、深入的了解; 另一类斑图的形成总是发生在远离热力学平衡态的情况下, 在考虑这类斑图时, 经典的热力学原理(熵增原理)需加以推广, 人们需要从动力学的角度对这类斑图形成的原因及规律进行探

讨, 在此基础发展起非线性科学的一个重要的前沿分支——斑图动力学.

螺旋波和回卷波是在远离热力学平衡态情况下形成的斑图之一, 它们在自然界中普遍存在. 一般把二维系统的叫螺旋波, 三维系统的叫回卷波. 本文主要从螺旋波的形成、支配螺旋波运动的主要规律、波头的漫游和漂移以及螺旋波的失稳等方面, 讨论了螺旋波的动力学行为, 以及反螺旋和双稳系统的一些性质, 最后给出了时空斑图、时空混沌的一些控制方法.

1 螺旋波和回卷波的研究

时空斑图的研究起源于对自然现象的思考. 有些动物, 如斑马、长颈鹿等, 身上会长着有规律的条纹斑图, 英国数学家阿伦·图灵认为^[2], 这些斑图是因为在卵细胞中存在一种物质, 由于反应扩散系统的不稳定

收稿日期: 2004-08-07

修回日期: 2005-03-26

作者简介: 李秀林(1961-), 男, 山西代县人, 副教授, 主要从事非线性动力学研究.

* 国家自然科学基金(10147201, 10247003)资助项目.

性,原来均匀态的这种物质变得不再均匀,于是自组织形成斑图.这种想法逐渐被实验和理论所证实^[3].产生各种斑图的反应扩散系统不仅仅局限于化学反应系统,它应用范围遍布许多学科.例如生态系统中捕食猎物,传染病的传播,农业人口的迁移,以及物理系统中的液晶、等离子体、流体等,其中都涉及到了反应扩散模型,从中也观测到了多彩的斑图^[4].

螺旋波和回卷波是非平衡斑图中最常见而又比较稳定的一种图像^[5],与靶波不同,它不需要持续的激发源,是自激的.在可激媒质或自振荡介质中都能观测到这种斑图,包括许多生物、物理、化学体系,诸如心脏、BZ反应、正在聚集的粘性霉菌、小鸡的视网膜、卵细胞以及铂催化剂表面的一氧化碳氧化等.对于心脏和BZ反应的研究尤为引人注目^[6],也是很有实际意义的.例如:20世纪90年代初科学家发现人的正常心脏里只有一个信号发生源,不断向周围发射着波(行波或靶波),而心脏病人的心脏上由于某一块心肌损伤,而出现了2个缺陷点,形成2个螺旋波中心,当螺旋波失稳后,便产生了心颤,如不及时抢救,病人将会在30s内死亡.当前世界上治疗此病的方法只有用6000V高压将心脏打停,待螺旋波消失,再用启动器将心脏启动.这种方法不仅病人十分痛苦而且很危险.深入研究螺旋波的各种性质来找到一种新的治疗方法,即用一个很小的电压将螺旋波引出心脏是很必要的.

2 可激发系统和螺旋波的形成

可激发系统可以用一个双变量反应扩散方程描述,其形式为:

$$\begin{cases} \epsilon \frac{\partial u}{\partial t} = f(u, v) + D_u \nabla^2 u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} = g(u, v) + D_v \nabla^2 v, \end{cases} \quad (1)$$

其中,等式右边第一项 $f(u, v)$ 、 $g(u, v)$ 为反应项,第二项为扩散项.系统有唯一的均匀定态解($f(u, v) = 0$ 和 $g(u, v) = 0$ 交点),它是渐近稳定的.如果 ϵ 足够的小,系统对于大的扰动是不稳定的.当扰动超过一定阈值,系统回到交点处的路线如图1虚线所示.这就是可激发系统^[3].

如果将一平行线状从中间切断并抹掉一小段,由于端点效应,长时间后,线状波会逐渐转变为螺旋波.但并不是在任何条件下,截断行波都能产生螺旋波的,可以构造一个参数 $B = \frac{2R_{tip}}{W} = \frac{2D_u}{c_0 W}$ (c_0 式中是独立脉冲的速度; R_{tip} 是螺旋波波头处的曲率半径; W 是波头附近可激波的宽度),存在着一个临界值 B_c ,

当 $B > B_c$ 时,媒质的可激性不足以克服波头大曲率部分的扩散,则截断后的行波回缩,而不产生螺旋波,在 $B < B_c$ 的情况下,媒质的可激性足够的强,能够克服回缩而产生螺旋波^[7].产生螺旋波的必要条件是必须制造缺陷点^[7].

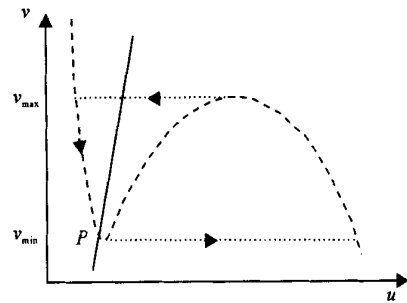


图1 可激发系统路线

Fig. 1 Phase orbit in the excitable system

—: $f(u, v)$ 的零线; - - : $g(u, v)$ 的零线; —: 大扰动下返回稳定点轨迹
—: Describe null-lines of $f(u, v)$; - - : Describe null-lines of $g(u, v)$; —: Orbit of the motion

3 螺旋波动力学及其波头的运动

在移动坐标系中重写方程(1)式,在某些近似情况下可将其转化为一个关于波速的特征值问题,最终可以获得行波波速与激发周期的关系(色散关系)和螺旋波的频率与波速的关系(本构关系),它们共同决定了螺旋波的动力学行为^[8,9].

波体与波头相比,对于螺旋波的波头研究更有意义,螺旋波的组织中心是一个点缺陷,系统的所有的动力学行为都受这个点缺陷行为的左右^[10].1973年,美国的生物化学家维夫瑞(A. T. Winfree)^[4]发表在《科学》杂志上的一篇文章的脚注中,提到螺旋波的波头并不总是围绕一固定点作圆周运动,在某些条件下可能存在很复杂的结构,维夫瑞用“漫游”一词来描述这种螺旋波波头运动的非周期性.现在的实验和数值模拟表明^[6]:在一个可激发系统中,螺旋波的波头轨迹随控制变量的不同,可能是周期性的周期运动,也可能是准周期(包括内圆滚线和外圆滚线等)或非周期运动(图2a, 2b).图2c是Barkley^[4~6,8,11]改进的FHN模型中在控制参数空间的相图,图2中 N 表示无螺旋波均匀态, RW 为周期螺旋波, MRW 为调制螺旋波.

通过对周期性螺旋波的稳定性分析,可知从周期螺旋波到调制螺旋波的转变主要来自于霍普夫分岔^[12].螺旋波波头更为精细的描述可以尝试性的建立描述波头的正则方程.调制系统参数可以实现从螺旋波到漫游波,再到湍流态的转变,不同状态下的动

力学行为是不同的, 可以用不同的物理量去描述它, 例如自关联函数、脉冲间的间隔分布等^[13]。

此外, 引入反馈(图 3)和在周期性外驱动下, 螺旋波波头会漂移, 形成更为复杂的漫游螺旋波; 在高斯白噪声和高斯白噪声脉冲的作用下, 螺旋波波头会发生随机共振, 不再一一举例^[14]。

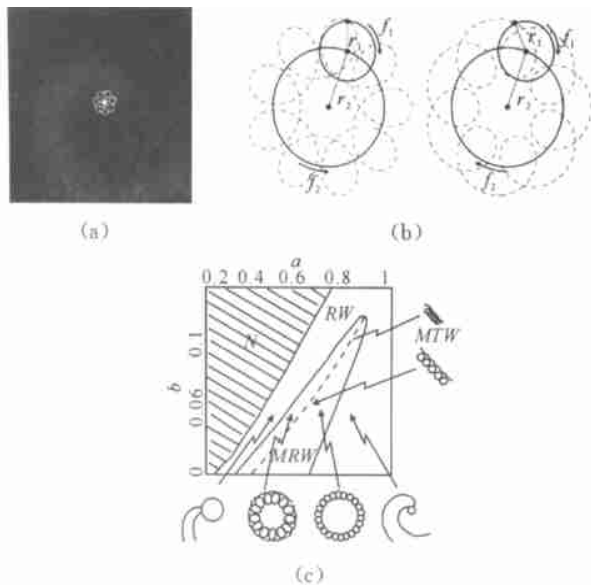


图 2 螺旋波波头运动轨迹及对应的参数相图

Fig. 2 Motive orbit of tip and the phase figure of corresponding parameter

(a)螺旋波及其运动轨迹, (b)内滚线和外滚线波头轨迹, (c)不同控制参数下的相图. (a)Spiral wave and motive orbit of the tip (white line), (b) outward and inward petals of tip motion, (c) Phase figure in different parameter

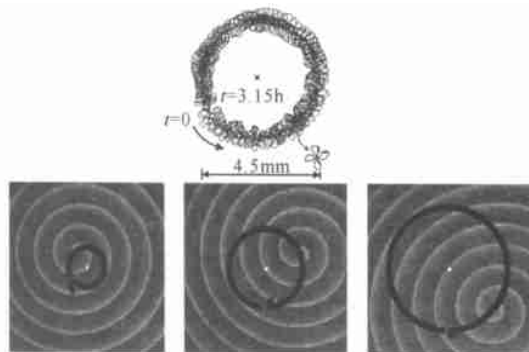


图 3 反馈控制下开放胶体反应堆中光敏感 BZ 媒质产生的漫游螺旋波波头轨迹

Fig. 3 Tip orbit of meandering spiral wave in an open gel reactor with feedback-controlled forcing

4 螺旋波的破碎^[15]

可激发系统一般可用反应——扩散方程(1)式描述, 人们称为触发变量, 为恢复变量^[3]。在不同可激系统中动力项不同, 触发变量和恢复变量代表的意义也不相同。在 BZ 反应中, 触发变量是次溴酸浓度, 恢复变量是催化剂的还原态浓度^[16]; 而在描述心肌电信

号传播时, 触发变量是膜电动势, 恢复变量是离子传导率^[17]。在某些条件下, 螺旋波会破碎, 对它们的研究有着很重要的理论和现实意义。例如: 心血管疾病是导致死亡的最普遍原因, 有很大一部分是猝死, 这主要是由于心室的失颤, 研究表明螺旋波破碎会导致失颤^[18]。这部分讨论 BZ 反应系统和心肌电信号系统中的螺旋波的破碎。在 BZ 可激系统中, 螺旋波失稳主要有 2 种^[19]: 一种是长波失稳, 首先发生在边界处, 称为爱克豪斯失稳; 另一种是首先发生在波头附近, 不断产生新的缺陷点, 每个小螺旋波都发展不起来, 最终达到湍流态, 称之为多普勒失稳(图 1)^[9]。这两种失稳可以从色散关系和本构关系中得到理解^[20](图 4)。

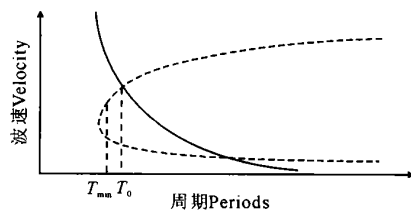


图 4 色散关系与本构关系决定螺旋波行为

Fig. 4 Dispersion and constitution relation (determining the motion of spiral wave

—: 色散关系; - - -: 本构关系。

—: Dispersion relation; - - -: Constitution relation.

下面考虑心肌中的螺旋波失稳机制, 这在医学上有着重要的意义: 发病时, 心肌中会产生螺旋波, 螺旋波会失稳, 失稳的机制一直是人们的研究焦点, 是人们治疗心脏失颤和猝死的理论依据^[21]。最近, Q. Ouyang 等^[9]依据 APD 与 CV 回归(resitution)曲线、组织的可激性、螺旋波的周期、波头轨道以及初始条件将心肌电信号系统中螺旋波破碎的机制归结为 6 种机制: 斜率大于 1 的回归曲线在脉冲间隔中突然改变导致的波头附近的破裂和远离波头区域的破裂; 由于双稳、滞后和 2:1 阻塞导致的螺旋波的破裂; 由于双稳和波头的多普勒漂移造成的失稳; 以及由双相作用势持续恢复曲线和超常导电速度造成的破碎。

5 双稳系统

非线性系统的一个重要特征是它的多重稳定性^[22]。对于一组固定的控制参量, 一个非线性系统可能存在着多个不同的定态, 每一个定态都是局部稳定的。在相空间中每一个定态都是一个吸引子。当系统落在这个吸引子附近的一个区域时, 它会被吸引到定态的位置上^[22]。从一个定态向另一个定态跃迁时需要给系统加一个一定强度的扰动。当跃迁完成以后, 系统在没有扰动的情况下会永远停留在第二个态上。

在不同的双稳系统中,存在着许多样式的斑图^[23]:如迷宫斑图,螺旋波和振荡斑点等.有些斑图不能通过改变控制参数从空间均匀定态达到,而只能通过给系统以特殊的扰动获得^[24].到目前为止,非线性科学的发展还没有找到处理这类多态问题的一个普适性的有效方法.线性稳定性分析只适用于相空间中一个均匀定态解附近的一个小的区域,它不考虑各均匀定态解之间由扩散引起的耦合效应^[3].可激系统中行波与螺旋波的自组织考虑了系统的全局性质,但没有涉及不同均匀定态之间的空间耦合作用.在20世纪90年代中期,A. Hagberg 等^[12, 13, 15, 25]人,在总结反应扩散系统的实验结果的基础上,提出了化学波峰的非平衡伊辛-布劳克相变的概念,并能很好地解释了一类由于双稳系统中化学波峰失稳引起的斑图的形成.

研究双稳系统的一个有效的数学模型是改进了的FHN模型,其形式为^[26]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = u - u^3 - v + \nabla^2 u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} = \epsilon(u - a_1 v - a_0) + \delta \nabla^2 v, \end{cases} \quad (2)$$

其中, a_0, a_1 决定了系统是否处于双稳系统; ϵ, δ 决定了系统是处于伊辛波峰区,还是处于布劳克波峰区.处于伊辛波峰区时,系统只能从一个稳定态向另一个稳定态传播,而在布劳克波峰区中,允许2种波峰共同存在(这两种峰态都由两稳定态连结,但它们的传播方向不同).通过定量的分析可得波峰速度和参数的关系是为^[27]:

$$c = \frac{3c}{\sqrt{2q^2} \sqrt{c^2 + 4\eta^2 q^2}} + c_\infty, c_\infty = 3a_0 / \sqrt{2} q^2,$$

其中, $\eta^2 = \epsilon \delta q^2 = a_1 + 1/2$ (图5).

通过稳定性分析可得到波峰的法向速度与波峰曲率的曲线可以近似用线性关系 $c_r = c_0 - dk + O(k^2)$ 近似表达,其中 d 可以近似取为:

$$d = \frac{1}{\alpha} + (1 - \frac{1}{\alpha}) \delta \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - \frac{c_0 - c_\infty}{c_0} (1 - \frac{2q^4}{9} (c_0 - c_\infty)^2), \quad (4)$$

其中, c_0 是平面波的波速($c_0 = c_0(\eta)$).当 $d > 0$ 时,任何对平面波速度的微扰都会随时间消失,波峰是稳定的.反过来当 $d < 0$ 时,在波峰上的一个横向微扰会被放大,平面波失去其稳定性. $d = 0$ 定义了 $\epsilon - \delta$ 参数空间确定了波峰横向失稳的相变边界线(图5).

在不同的区域存在着不同的斑图^[28]:

- (I) 深入伊辛波峰区时,会产生迷宫斑图.
- (II) 深入布劳克波峰区时(此处对于横向微扰是

稳定的),可以生成稳定地、双稳型的螺旋波斑图态.

(III) 在伊辛-布劳克相变边界:系统开始呈现复杂的动力学行为,如振荡斑点、斑点分裂与复制、缺陷湍流态.

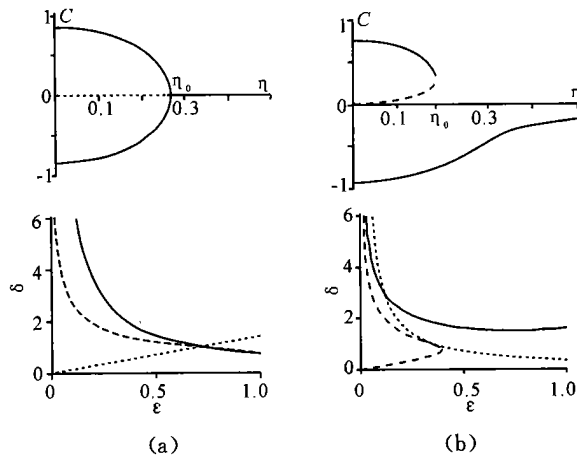


图5 波速 c 与控制参数的关系及相变相图

Fig 5 The relation of wave velocity c and controllable parameter and phase transition

(a) $a_0 = 0$, (b) $a_0 = -1.0$

—: $\delta = \alpha(\epsilon)$; - -: $\delta = \delta_m^0(\epsilon)$; — —: $\delta = \hat{\delta}(\epsilon)$

6 反螺旋波

近几年来,远离平衡态系统的时空斑图从理论上和实验上都得到了广泛的研究,在众多斑图中,对于螺旋波的研究又倍受青睐.然而,关于螺旋波传播方向问题却一直没有得到关注.直到2001年,V. K. Vanag 等^[29]在实验中观测到了反螺旋波.在相邻反螺旋波吸引域间的边界首先产生高速的新波,而后短裂,向反螺旋波的波头缓慢移动,最终在那里消失.这种现象在CGL、FHN和Oregonator模型的一定参数范围内都已经观察到^[30].

对于反螺旋波的形成机制目前还不很清楚.如果要形成反螺旋波要求体振荡频率必须大于(反螺旋)波的渐进频率^[31].

7 时空混沌的同步与控制

时空混沌是自然界中普遍存在的一种现象.螺旋波是由缺陷为中心自组织形成的一类特殊的行波^[1].对于一个稳定的螺旋波斑图态,系统中的缺陷很少,并且他们的数目不随时间变化,但是如果系统中的控制变量超过某些临界值时,螺旋波会自发地产生出新的缺陷,而每个缺陷都趋向于产生新的螺旋波^[32].因此,系统中的缺陷数目会随着时间以指数形式增加,直到系统达到一个饱和的缺陷密度.此时系统中被缺陷充满,它的长程有序现象不再存在,系统进入“湍

流”态或时空混沌态. 由于这种湍流态的出现总是伴随着系统的内缺陷数大规模增加, 而每个缺陷点都伴随着一个小的螺旋波, 有时称此类混沌现象为缺陷引起的湍流, 或螺旋波湍流. 从上面讨论可知, 在 BZ 反应中从螺旋波过渡到螺旋波湍流主要有 2 种途径: 爱克豪斯失稳和漫游失稳.

耗散系统与保守系统的混沌控制与同步得到广泛的发展, 学者们提出了许多控制和同步方法^[18]. 这些方法可以进一步推广到时空斑图和时空混沌, 螺旋波和混沌态的控制和同步, 是很有现实意义的(例如消除心脏中的螺旋波或混沌态). 以下是目前的几种方案:

(I) 利用行波微扰控制心脏中的湍流和螺旋波^[33]

$$\epsilon = \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla^2 E - E + [A - (\frac{n}{n_B})^M] \times [1 - \tan h(E - 3)] \frac{E^2}{2} + E_p(r, t), \frac{\partial n}{\partial t} = \theta(E - 1) - n, \quad (5)$$

其中, 行波微扰: $E_p(r, t) = \alpha \cos(k \cdot r - \omega t)$. 控制结果如图 6 所示, 相应的参数范围见图 7 所示.

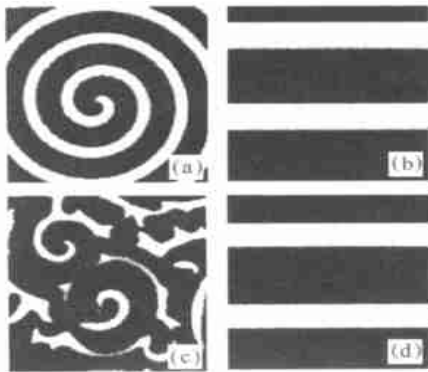


图 6 控制螺旋波和湍流态

Fig. 6 Control of spiral waves and turbulence chaos

(a), (c) 控制前的螺旋波和湍流态, (b), (d) 控制后的行波态. (a), (c) Spiral wave and turbulence before control; (b), (d) Traveling wave after control

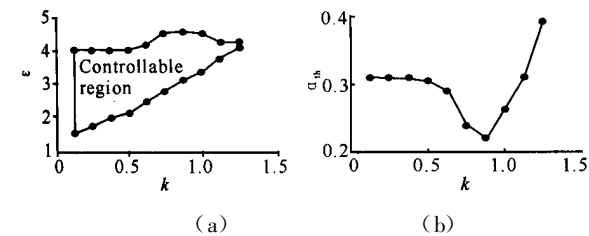


图 7 可控区及相应 k 值的可控振幅阈值

Fig. 7 Controllable parameter regions and controllable threshold of k

(a) 可控区, (b) 相应值的可控振幅阈值. (a) Controllable parameter regions, (b) The threshold of controllable amplitude vs k.

(II) 利用周期力消除螺旋波^[34]

选用的模型是心肌细胞的 Aliev-Panfiov 模型, 控制方案显示如下:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -k(e - a)(e - 1) - er + \nabla^2 e + F \sin(\omega t),$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} = [e + \mu_1 r / (\mu_2 + e)] [-r - ke(e - b - 1)], \quad (6)$$

控制过程及结果显示如图 8 所示.

(III) 用弱空间微扰控制时空混沌和螺旋波^[26]

所考虑的系统是标准化的 Maxwell-Bloch 方程, 采用的控制方案是:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \sigma(i\delta - 1)E + \sigma P + i\nabla^2 E,$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -(i\delta + 1)P + RE - ED,$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -bD + \frac{1}{2}(EP^* + E^*P), \quad (7)$$

控制参量选取:

$$R = R_0[1 + \alpha f(r)], f(r) = e^{ik \cdot r},$$

图 9 显示消除时空混沌的过程, 图 10 显示消除螺旋波的过程.

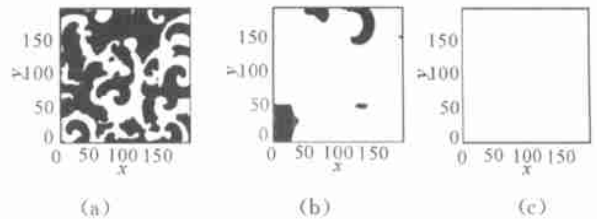


图 8 可控混沌的消除

Fig. 8 Elimination of spatiotemporal chaos

(a) $t = 0$, (b) $t = 100$, (c) $t = 300$

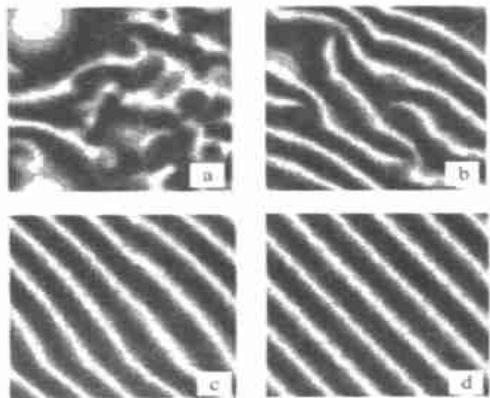


图 9 消除时空混沌的过程(a~d)

Fig. 9 The process of eliminating spatiotemporal chaos (a~d)

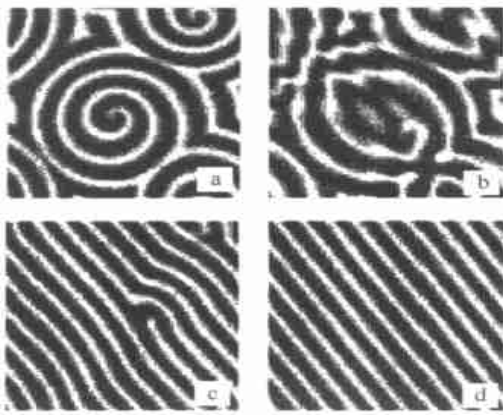


图 10 消除螺旋波的过程(a~d)

Fig 10 The process of eliminating spiral wave (a~d)

(IV) 延迟反馈控制化学混沌^[27]

采用的模型是:

$$\partial_t u = -\frac{u(u-1)}{e}(u - \frac{v+b}{a}) + D \nabla^2 u,$$

$$\partial_t v = f(u) - v, u < 1/3 \rightarrow f(u) = 0;$$

$$1/3 \leq u \leq 1 \rightarrow f(u) = 1 - 6.75u(u-1)^2;$$

$$u > 1 \rightarrow f(u) = 1.$$

可以采用以下几种控制方案:

① 加在一点上的局部反馈

$$\partial_t u = -\frac{-1u(u-1)}{e}(u - \frac{v+b}{a}) +$$

$$D \nabla^2 u + \gamma [u(t) - u(t-\tau)] \delta_l,$$

$$\partial_t v = f(u) - v.$$

② 加在所有点上的局部反馈

$$\partial_t u = -\frac{-1u(u-1)}{e}(u - \frac{v+b}{a}) + D \nabla^2 u +$$

$$\gamma [u_i(t) - u_i(t-\tau)], \partial_t v = f(u) - v.$$

③ 加在所有点上的全程反馈

$$\partial_t u = -\frac{-1u(u-1)}{e}(u - \frac{v+b}{a}) + D \nabla^2 u +$$

$$\gamma [\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(t-\tau)], \partial_t v = f(u) - v.$$

图 11 显示了加在所有点上的局部反馈控制的结果.

(V) 局部耦合可激媒质的时空图案同步^[35]

实验方案:

$$I_i(r, t) = I_0 \Theta H(\Theta),$$

$$\Theta_{1,2}(r, t) = 1 \pm k [v_1(r, t) - v_2(r, t)].$$

数值结果所采用的模型和方案:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = \nabla^2 u_1 + \frac{1}{8} \{ u_1 - u_1^2 - [fv_1 +$$

$$\phi_1(r, t)] \frac{u_1 - q}{u_1 + q},$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} = u_1 - v_1,$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = \nabla^2 u_2 + \frac{1}{8} \{ u_2 - u_2^2 - [fv_2 +$$

$$\phi_2(r, t)] \frac{u_2 - q}{u_2 + q},$$

$$\frac{\partial v_2}{\partial t} = u_2 - v_2$$

其中, $\phi_i(r, t)$ 正比于 $I_i(r, t)$.

实验和数值上的同步过程显示如图 12 所示.

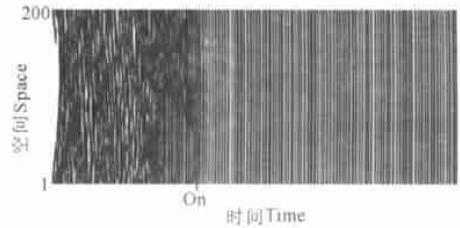


图 11 加在所有点上的全程反馈控制

Fig 11 Global feedback control superposed on all sites

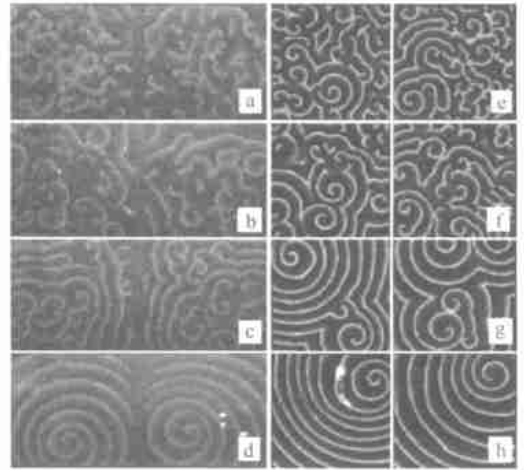


图 12 实验和模型的同步过程

Fig 12 Synchronous process of the experiment and the model
a~d. 实验, e~h. 模型. a~d. Experiment result, e~h. Numeric results from the model

8 结束语

螺旋波斑图是自然界中普遍存在的一种图样,也是研究非平衡自组织行为的一个很好的领域. 在一行波上制造一个缺陷点,在一定条件下就可以发展起来一个完整的螺旋波. 螺旋波的动力学行为是由色散关系和本构关系共同决定的. 螺旋波波头在整个螺旋波运动中起着重要的作用,螺旋波波头的运动反映了整个系统的对称性. 一般来讲可以按波头的运动,将螺旋波分为刚性旋转(周期)波、漫游波. 螺旋波失稳在一定程度上会产生破坏作用,讨论失稳机制相当重要. 在化学反应中,现在发现有 2 种失稳机制: 爱克豪斯失稳、多谱勒失稳; 在研究心肌电信号及心脏失颤、猝死过程中,人们发现了导致失稳的多种机制.

最近,实验中发现了反螺旋波,这种螺旋波的可

激区是从边界向内传到波头处,最后在波头处消失.本文给出初步的理解和数值模拟结果.双稳系统是人们研究可激系统的另一大类,在不同的参数范围内,可以观测到不同的斑图行为,这些可以从非平衡伊辛-布劳克相变和横向失稳得到理解.螺旋波和时空混沌湍流的控制是很有意义的,可以将耗散系统和保守系统的控制方法加以推广,本文中给出几种典型的控制和同步方案.

参考文献:

- [1] Walgraef D. Spatio-Temporal Pattern Formation[M] . New York: Springer-Verlag, 1996. 1-15.
- [2] Murray J D. Mathematical Biology[M] . Berlin: Springer-Verlag, 1989. 435-480.
- [3] 欧阳颀. 反应扩散系统中的斑图动力学[M] . 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- [4] Winfree A T. Scroll-shaped wave of chemical activity in three dimensions[J] . Science, 1973, (181): 937-939.
- [5] Barkley D, Kness M, Tucheman L S. Spiral-wave dynamics in a simple model of excitable media: The transition from simple to compound rotation[J] . Phys Rev A, 1990, (42): 2489-2492.
- [6] Barkley D. A model for fast computer simulation of wave in excitable media[J] . Physica D, 1991, (49): 61-76.
- [7] Gottwald G, Kramer L. On propagation failure in 1 and 2-dimensional excitable media[J] . Chaos, 2004, 14: 855-865.
- [8] Barkley D. Euclidean symmetry and the dynamics of rotating spiral waves[J] . Phys Rev Lett, 1994, (72): 164-167.
- [9] Ouyang Q. Transition from spirals to Defect-Mediated turbulence driven by a dopplec instability[J] . Phys Rev Lett, 2000, (84): 1047-1050.
- [10] Otani N. A primary mechanism for spiral wave meandry[J] . Chaos, 2002, 12: 829-842.
- [11] Barkley D. From labyrinthine patterns to spiral turbulence[J] . Phys Rev Lett, 1992, (68): 2090-2093.
- [12] Hagberg A, Meron E. From labyrinthine patterns to spiral turbulence[J] . Rev Lett, 1994, (72): 2494-2497.
- [13] Hagberg A, Meron E. Complex patterns in reaction-diffusion systems: "a tale of two front instabilities"[J] . Chaos, 1994, (4): 477-489.
- [14] Zhu Z M, Xin H. Dynamics of spiral waves under the modulations of noise pulse[J] . Phys Rev E, 2001, 056124(64): 1-5.
- [15] Hagberg A, Meron E. Pattern formation in nongradient reaction-diffusion systems the effects of front bifurcations[J] . Nonlinearity, 1994, (7): 805-844.
- [16] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M] . 北京: 清华大学出版社, 1986. 257-259.
- [17] Fitz Hugh. Impulse and physiological states in theoretical models of nerve membrane[J] . Biophys J, 1961, 1: 445-466.
- [18] 王光瑞, 于熙岭, 陈式刚. 混沌的控制、同步及利用[M] . 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [19] 欧阳颀. 反应扩散系统中螺旋波的失稳[J] . 物理学报, 2000, 30: 30-33.
- [20] Kaplan R. Chemical Waves and Patterns[M] . Dordrecht: Kluwer Academic, 1995. 221-260.
- [21] Starmer C F, Romashko D N, Reddy R S. Proarrhythmic potential of potassium channel blockage; numerical studies of polymorphic tachyarrhythmias[J] . Circulation, 1995, 92: 595-605.
- [22] Bascones R, Garcia Ojalvo. Pulse propagation sustained by noise in arrays of bistable electronic circuits[J] . J Phys Rev E, 2002, 061108(65): 1-5.
- [23] Lee K J, McCormick W D, Ouyang Q, et al. Pattern formation by interacting chemical fronts[J] . Science, 1993, 261: 192-195.
- [24] Pearson J. Complex pattern in a simple system[J] . Science, 1993, 261: 189-192.
- [25] Elphick C, Hagberg A, Meron E. Dynamic front transitions and Spiral-Vortex nucleation[J] . Phys Rev E, 1995, (51): 3052-3058.
- [26] Wang P Y, Xie P. Eliminating spatiotemporal chaos and spiral waves by weak spatial perturbations[J] . Phys Rev E, 2000, (61): 5120-5123.
- [27] Pamananda P, Hudson J L. Controlling spatiotemporal chemical chaos using delayed feedback[J] . Phys Rev E, 2001, 037201(64): 1-4.
- [28] Hagberg A, Meron E. Complex patterns in reaction-diffusion systems: a tale of two front instabilities[J] . Chaos, 1994, 4: 477-489.
- [29] Vanag V K, Epstein I R. Inwardly rotating spiral waves in a reaction-diffusion system[J] . Science, 2001, 294: 835-839.
- [30] Aransen I S, Kramer L. The world of the complex Ginzburg-Landau equation[J] . Rev Mod Phys, 2002, 74: 99-143.
- [31] Gong Y, Christini D J. Antispiral waves in reaction-diffusion system. [J] . Phys Rev Lett, 2003, 088302(90): 1-4.
- [32] Or-Guil M, Krishnan J, Kevrekidis I G, et al. Pulse bifurcations and instabilities in an excitable medium; computations in finite ring domains[J] . Phys Rev E, 2001, 046212(64): 1-9.
- [33] Wang P Y, Xie P, Yin H W. Control of spiral waves and turbulent states in a cardiac model by traveling-wave perturbations [J] . Chinese Physics, 2003, 12: 674-679.
- [34] Sakaguchi H, Fujimoto T. Elimination of spiral chaos by periodic force for the Aliev-Panfilov model[J] . Phys Rev E, 2003, 067202(67): 1-3.
- [35] Hilolebrand M, Cui J, Mihaluk E, et al. Synchronization of spatiotemporal pattern in locally coupled excitable media[J] . Phys Rev E, 2003, 026205(68): 1-5.

(责任编辑: 黎贞崇)