

反应扩散系统中螺旋波的失稳*

欧阳颀

(北京大学物理系 北京 100871)

摘要 文章以反应扩散系统为例,介绍了在可激发系统与振荡系统中螺旋波产生、发展、演化的一些基本性质及规律,并讨论了作者近年来对螺旋波的各种失稳途径、时空混沌的产生机理及螺旋波控制方面所做的实验与理论工作。重点讨论了两类螺旋波失稳现象:爱克豪斯失稳与多普勒失稳。两类失稳都使系统从有规律的螺旋波态变为时空混沌(缺陷湍流)态。

关键词 螺旋波,失稳,时空混沌,缺陷湍流

SPIRAL INSTABILITIES IN A REACTION-DIFFUSION SYSTEM

OU-YANG Qi

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Using a reaction-diffusion system as an example, we introduce the basic properties of spiral waves in excitable or oscillatory media, and discuss different routes that lead from an ordered spiral state to a chaotic state. First we present some basic properties of spiral dynamic, such as its emergence, development, and transition. Then we discuss our recent experimental results on the spiral instabilities of the Belosov-Zhabotinsky reaction in a quasi-two-dimensional reaction-diffusion system. Two routes leading to spatiotemporal turbulence have been observed in the experiments. Both of them can be characterized by defect-mediated turbulence. The first instability is due to the Eckhaus instability, which generates defects at a distance from the spiral center because of its "convective" nature. The second instability creates defects in the spiral center. The mechanism of the instability is linked to the Doppler effect, when a Hopf bifurcation contributes to the spiral core, making the latter meandering.

Key words spiral waves, instability, spatiotemporal chaos, defect-mediated turbulence

1 引言

目前,非线性科学在实验研究领域主要有如下几个前沿课题:孤立子与孤波,时空混沌,斑图动力学和分形结构。在斑图动力学的研究领域中,螺旋波动力学的研究一直是最为非线性科学家关注的课题之一。原因首先是它在自然界是普遍存在的,在诸多的非线性实验系统中,都可以看到它的踪迹。例如:流体中的瑞利-贝纳尔对流^[1],液晶中的伊辛-布劳克(Ising-Bloch)相变^[2],反应扩散系统中的化学波^[3],粘性霉菌的自组织^[4],心脏中的心电信号^[5],卵细胞中钙离子波^[6]等。最近的理论与实验研究表明,螺旋波的动力学行为存在跨系统的普适性规律^[7]。研究和掌握这些规律具有很大的潜在应用价值。例如,生理学的实验表明,在心脏病人中观察到的一类叫做再进入性心率过速(reentrant

tachycardia)的现象,可能是由于心肌电信号出现螺旋波而引起的。而心颤(fibrillation)至死的过程与螺旋波的失稳有密切关系。怎样把心脏中的螺旋波肌电信号消除,是当前心脏病学研究的热点之一。目前比较成熟的方法是当心颤发生时,在患者心脏上加一个6000V左右的瞬时电压将心脏暂时打停,使得螺旋波心肌电信号消失,然后再使心脏重新起搏。这种治疗方法虽然有效,但它给患者带来很大痛苦。理论计算显示,如果能掌握螺旋波的运动规律,5mV左右的电压就可以将心脏中的螺旋波引出心脏。因此,开发新的治疗心颤的方法有待于非线性科学家对螺旋波规律的彻底了解。

非线性科学家关心螺旋波现象的另外一个重要原因,是组成螺旋波的动力学中心是一个时空拓扑

* 国家杰出青年科学基金资助项目

2000-06-07 收到初稿,2000-07-24 修回

缺陷.从数学角度看它是一个奇点.而在奇点附近的足够小区域内反应扩散方程不再适用.怎样研究此类时空缺陷的动力学问题,一直是非线性科学以至于材料科学的重要课题.但迄今为止还没有找到解决此类问题的有效办法.在不远的将来,了解这类现象的主要途径还是要依靠物理实验及数值模拟.由于数值模拟受计算机容量与速度的限制,目前还不可能研究大尺度、长时间的二维时空动力学渐近行为,物理实验还是研究缺陷动力学行为的主要手段.

本文的目的是通过对反应扩散系统中螺旋波的产生、发展、演化及失稳介绍螺旋波动力学的一般规律.反应扩散系统是螺旋波得以产生的最简单的系统之一.这里需要提醒读者注意的是,反应扩散系统不只局限于化学反应系统,它的应用范围覆盖了许多学科.例如,生态系统中的捕食者-猎物(predator-prey)模型^[8]、物理系统的气体放电模型^[9]、半贫瘠地区的植物生长模型^[10]以及传染病的传播^[11]、森林火灾的蔓延^[12]、农业人口的迁移^[13]等,都可以演化成为反应扩散方程.应该说,反应扩散方程是描写自然界运动的基本方程之一.

2 螺旋波

螺旋波在反应扩散系统中按其形式可分为两类:可激发系统中的螺旋波与时序振荡系统中的螺旋波.从表面上看,前者的特点是系统中除螺旋波中心外每个空间点都作弛豫型振荡,而后者作正弦振荡.从本质上讲,两者的起因截然不同.前者形成于系统的全局失稳,后者形成于系统的局部失稳;前者属于激发波(trigger wave),后者是相波(phase wave);前者的波速受系统内反应物的扩散系数的限制,后者从原则上讲波速可以从零到无穷大.

首先解释一下可激发反应系统.最简单的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:

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

其中 u, v 为系统变量, ε 为一远小于 1 的量.等式右边第一项为反应动力学项,第二项为扩散项.由于方程中的第一式中多了一个小量 ε ,它的存在使变量 u, v 的动力学行为有了不同的时间尺度.(1)式的动力学函数在 (u, v) 坐标上的图形由图 1 给出.

$f(u, v) = 0$ 的曲线形状类似于一个倒 N 形,也就是说,给定一个 v 值,在一定区域内, u 可能有两个不同的定态值,这种情况是系统可激发的一个必要条件.下面要介绍的反应扩散系统与心脏中的心肌电信号都属于这种形式.图 1 表明在一定条件下系统存在一个唯一的均匀定态解(点 P).对这个定态解做线性稳定性分析可以证明它是渐近稳定的.也就是说,当系统受到一个小的扰动时,它会迅速回到它的均匀定态.但是由于 $f(u, v)$ 函数的特殊性质,以及变量之间的动力学时间尺度有很大差别,系统对大的扰动是不稳定的.如图 1 所示,当扰动超过一定阈值,对应于 $v < v_{\min}$ 时,由于变量 u 的动力学时间尺度远小于变量 v 的动力学时间尺度,系统首先会被很快地激发到远离定态解的区域,对应于 $f(u, v) = 0$ 曲线的另一个分支,然后慢慢沿 $f(u, v) = 0$ 曲线运动到 $v = v_{\max}$ 位置,再很快地跃迁至 $f(u, v) = 0$ 曲线的稳定分支.最后弛豫到初始位置,其路径如图 1 中虚线所示.这就是可激发系统.系统的可激发性的一个重要量度是 ε 值的大小.只有在 ε 值足够小时,系统才是可激发的,否则系统的稳定点将是一个稳定焦点,没有可激发性.

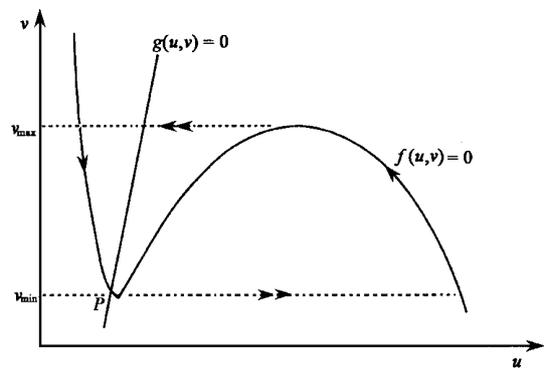


图 1 可激发系统在相空间 (u, v) 中的函数形式

一个空间均匀分布的,由可激发单元所组成的反应扩散系统可能出现行波.设想如果在空间上的某一个局限区域内系统被激发到阈值以上,反应物 u 的自催化效应使其本身的浓度在激发区猛然增加,从而使该区域与和它相邻的区域之间产生一个很大的浓度梯度.由于扩散效应,反应物 u 将会传播到与原激发区相邻的区域,并将它们拖向阈值以上,使得它们也被激发,这就形成了一个化学波锋.在波锋的背后,被激发区会逐渐弛豫到被激发前的状态.从整体上观察,系统表现为一个孤立波从激发源向外移动.如果激发源处的激发是周期性的,系统表现为一连串的行波.行波的速度取决于激发强度

与扩散速度.由于系统的可激发性是由变量 u 的自催化效应引起的,而变量 u 与 v 的相互作用使得系统恢复到原来状态,人们称 u 为触发变量(trigger variable), v 为恢复变量(recovery variable).不同可激发系统中的触发变量与恢复变量各不相同.在下面将要介绍的别洛乌索夫-扎布亨斯基(Belousov-Zhabotinsky, 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.在另外一些系统,如神经肌肉组织(心肌)中电信号的传播,触发变量是膜电动势,恢复变量是离子传导率;在粘性霉菌自组织形成的行波中,触发变量是 cAMP,恢复变量是膜感受器.在宏观世界里,流行病的传播也是行波形式,这时触发变量是病原,恢复变量是免疫力.在宇宙世界里,螺旋状星系也可以看成是一种行波的自组织现象.在这个过程中,触发变量是分子云密度,恢复变量是分子云温度.

在二维系统中,如果激发源是一个点,系统会形成一个环状化学波向外扩张.如果这个点激发源是周期性的,则可能观察到环状系列行波,或叫靶波(target waves).如果激发源是一条线,系统会形成一个平行线状波.波的行进方向与线的方向垂直.那么螺旋波是怎样产生的呢?作这样一个假想实验:首先制造一个线状波,然后将线波从中间切断并抹掉一小段,也就是说在线波上造两个端点.现在考察这时行波的动力学行为.如图 2 所示,在远离端点的区域,线波波锋的邻近点受左右两个方向上扩散而来的触发变量的影响,比较容易受激发,因而波速较高;而在端点区域,线波波锋的邻近点只受到来自一个方向上的触发变量的激发,激发强度相对弱小,因而波速较慢.这样,从总体上看,当线波向前移动时,端点的相对位置会有一个滞后.这个滞后使得线波在端点附近弯曲,线波的局部运动方向发生变化[见图 2(b)].由于这种端点效应总是存在,随着时间的增长,线状波会逐渐转变为螺旋波,图 2 表示了这个动力学过程.在这里有两点需要进一步说明:第一,螺旋波与靶波不同,它不需要一个周期性的激发源,因而它是自维持的;第二,螺旋波的组织中心是一个点缺陷,系统所有的动力学行为都受这个点缺陷行

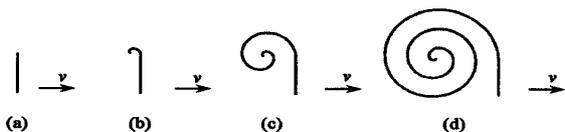


图 2 可激发系统中螺旋波产生的示意图

为的左右.另外,在一个系统中制造一个缺陷比较容易,但是系统中一旦产生了缺陷就很难将其消除.研究螺旋波动力学规律的一个重要目的,就是要寻找消除螺旋波组织中心(点缺陷)的有效途径.前面讲过,这对心脏病研究将会产生重要影响.

在一些情况下,螺旋波也可以在振荡系统中观察到.振荡系统中行波的起因是周期振荡的时空相位差,因此在振荡系统中的行波又称相波.在霍普夫分岔附近,一个反应扩散系统的化学振荡可用如下公式描述:

$$C = C_0 + A(r, T) \exp(i\omega t + \phi_0) + c.c.. \quad (2)$$

其中 T 是描写振荡振幅 A 的慢变量, ϕ_0 是相位角, $c.c.$ 代表前项的共轭复数.上式中的振幅 A 满足金兹伯格-朗道(Ginzburg-Landau)方程.它的形式经过无量纲标度变换后写为:

$$\frac{\partial A}{\partial T} = [(1 + i\beta) \nabla^2 + 1 - (1 + i\gamma) |A|^2] A. \quad (3)$$

(3) 式存在平面波解:

$$A = F \exp[i(q \cdot r - \omega t)], \quad (4)$$

其中 $F^2 = 1 - q^2$, $\omega = \gamma + (\beta - \nu) q^2$.如果在平面上引入一个点缺陷,平面波会转化为螺旋波,道理与可激发系统中的螺旋波类似,只是缺陷附近波速减慢的原因是由于相扩散引起的.

3 螺旋波动力学

BZ 反应是最早发现螺旋波现象的反应系统^[3].虽然对 BZ 反应中的螺旋波的研究始于 70 年代初,但迄今为止大多数工作都只局限于封闭系统,此类实验结果只可能对螺旋波作定性描述,而对其渐近行为及相变规律的了解与掌握没有实质性帮助.在二维开放系统中,对螺旋波的渐近行为与相变的实验研究始于 80 年代末到 90 年代初^[14-16],这些实验结果很好地验证了一些螺旋波动力学理论的预测,并进一步推动了此领域的理论发展.

图 3 给出了在开放空间反应器中观察到的几个螺旋波的例子.实验系统为 BZ 反应.控制参量为系统中硫酸与溴酸钠的浓度.图中黑色与白色部分分别代表系统在还原态与氧化态.行波以一定速度向外运动.其动力学行为可以用螺旋波的波长 λ 、周期 T 与波速 C 描述.在 BZ 反应中,我们可以调节硫酸浓度得到可激发螺旋波或相螺旋波.

在实验中,如果用 $\Delta = [H_2SO_4][NaBrO_3]$ 作为

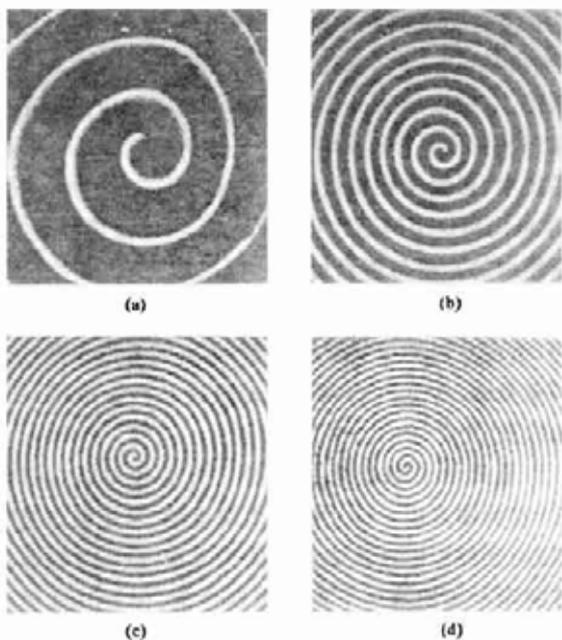


图3 实验中观察到的螺旋波

[(a), (b) 为可激发螺旋波; (c), (d) 为相螺旋波]

控制参量,并定义无量纲控制参量 $\mu = (\Delta - \Delta_c) / \Delta_c$ ($\Delta_c = 0.022 \text{ mol}^2 / \text{L}^2$), 则所有实验观测到的螺旋波周期 T 与控制参量在对数坐标上都落到一条直线上,也就是说,螺旋波周期与控制参量存在幂率关系:

$$T = T_0 \mu^{-1}, \quad (5)$$

这里 $T_0 = 41.5 \pm 2.5 \text{ s}$. 这是实验得到的第一个标度律.

螺旋波自组织选择的波长 λ 是系统最明显的空间尺度. 在既没有任何反应物浓度做参考,也没有做任何坐标重组的情况下,实验中螺旋波的波长 λ 与它的周期 T 的关系在对数坐标下都落在同一条直线下. 由测量得到如下关系:

$$\lambda = (139 \pm 5) \cdot T^{0.51 \pm 0.02}, \quad (6)$$

这里 λ 的单位是 μm , T 的单位是 s . 从这个测量可以推测螺旋波系统应有如下不依赖于具体实验控制参量的标度关系:

$$\lambda \propto T^{1/2}. \quad (7)$$

这是实验所得到的第二个标度率. 这个标度规律对于研究螺旋波自组织机制有重要意义. 因为它意味着 λ / T 是一个常数,而这个常数的量纲与扩散系数相同. 这表明螺旋波的动力学行为主要由扩散过程控制. 由此可以定义一个无量纲数 M , 并称之为螺旋波扩散数:

$$M \equiv \lambda^2 / DT, \quad (8)$$

其中 D 为反应系统中触发变量的扩散系数. 对于

BZ 反应,这个数值在 50 - 100 之间.

4 螺旋波的爱克豪斯失稳

爱克豪斯失稳是相螺旋波的失稳. 当硫酸浓度较高时 ($> 0.5 \text{ M}$), 系统的螺旋波为相螺旋波. 这类失稳是作者在 1996 年发现的^[15]. 目前我们正在做更加系统的研究. 在 BZ 反应系统中, 如果不断增加控制参量硫酸浓度, 螺旋波的爱克豪斯失稳就可能发生. 在失稳前螺旋波是稳定的, 见图 4(a). 继续增加控制参量, 使其越过一个临界值, 系统经历爱克豪斯失稳. 这时系统中的螺旋波出现了一个长波调制, 见图 4(b). 调制波也是以螺旋波形式存在. 它的振幅随时间不断增大. 但是由于存在载波(原螺旋波), 调制波会被不断地推向系统之外. 这种左右摇摆的情况相当于流体系统中的“运流”现象. 如果运流速度大于调制波振幅的增长速度, 在有限系统内不会观察到螺旋波破裂现象. 一个日常生活中经常看见的运流的例子是一根点燃的香烟. 在一个没有空气对流的房间里, 烟在离开烟头时是一条直线, 离烟头稍远一点时开始有一点左右摇摆. 这种左右摇摆的幅度随着烟离烟头的距离很快加大, 并变得越来越复杂, 最后变成湍流态. 实际上烟的微扰源在烟头上, 当微扰被放大时, 它同时被带得远离烟头. 如果说观察者只注意离开烟头一定距离内烟的动力学行为, 他们不会观察到湍流态. 在香烟的例子中, 将微扰带走的原因是浮力. 对于一个行波, 将微扰带离微扰源的是行波本身, 其情形可以类比于涨潮时的海浪对海面漂浮物的作用. 在一个反应扩散系统中, 虽然系统中不存在对流运动, 但由于行波的存在, 微扰还是可以由运流效应被带着离开微扰源. 继续增加控制参量, 在离螺旋波中心一定距离以外的区域会观察到行波解体, 见图 4(c). 在这些地方, 每一行波都断裂成许多小的片断, 每一个片断的端点都是一个新形成的点缺陷. 这些缺陷点都试图自组织形成以它为中心的新的螺旋波. 但由于缺陷点在这些区域内密度很高, 每一个点缺陷自组织形成的螺旋波都不超过一个波长的距离, 这些螺旋波在空间与时间上都没有长程关联, 因此被称之为化学湍流态. 这种湍流态的形成是由于原来的螺旋波不断产生出新的点缺陷引起的, 所以它属于缺陷引起的湍流 (defect-mediated turbulence). 这时, 整个系统被分成两个动力学行为截然不同的区域: 在离螺旋波中心一定距离内的区域, 螺旋波是稳定的, 系统有一个

时空有序结构;在螺旋波稳定区外,系统是无序的,它由密度很高的点缺陷组成.由于每个点缺陷的行为都受它邻近点缺陷的影响,它的运动轨迹是全然无序的.这些缺陷点试图进入螺旋波稳定区,但总是被螺旋波稳定区内不断送出的行波推向稳定区外,这就是系统的运流特点.如果继续增加系统的控制参量,螺旋波的稳定半径会不断减少.当控制参量超过另一个阈值时,系统由运流失稳过渡到绝对失稳,见图 4(d).在绝对失稳时所有的螺旋波态,不论它的半径多小,都是不稳定的.系统完全由密度很高的点缺陷控制,每个点缺陷都做无序运动.

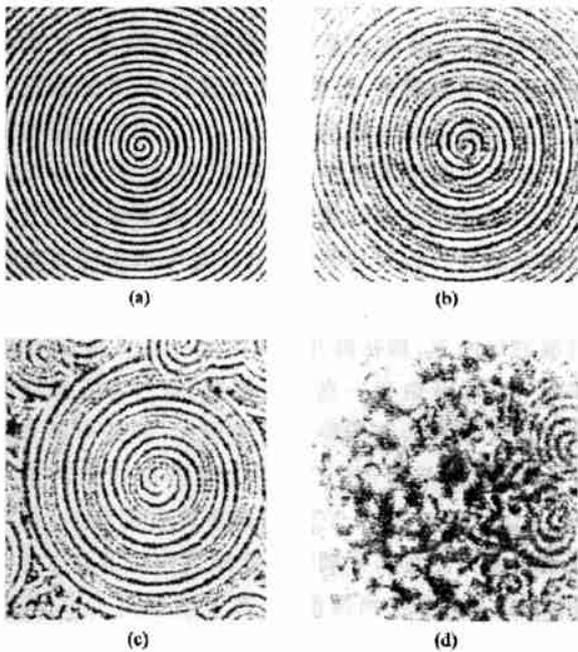


图 4 螺旋波的爱克豪斯失稳
(a) 稳定螺旋波;(b) 调制螺旋波;(c) 运流失稳;(d) 绝对失稳

爱克豪斯失稳是系统从有序的螺旋波态到无序的缺陷湍流态的一种失稳机制.它属于相螺旋波的失稳.人们知道心脏中的心肌电信号的传播属于可激发系统的行波,因此爱克豪斯失稳不能解释心脏中的心颤现象.

5 多普勒失稳

在扎布亨斯基第一次发现 BZ 反应系统中的螺旋波现象以后不久,美国的生物化学家维夫瑞(Winfrey)在他发表在《Science》上的一篇文章的脚注中,提到螺旋波的端点并不总是围绕一个固定点作周期性圆周运动^[17].在对螺旋波端点的行为作了仔细观察后,维夫瑞发现螺旋波端点的运动轨迹在

某些条件下可能存在很复杂的结构.维夫瑞用“漫游(meandering)”一词描述这种螺旋波端点运动的非周期性.在这以后的十几年里,无论是实验还是数字模拟都没有回答下面的问题:在一个均匀的反应扩散系统中,可激发螺旋波端点的轨迹是怎样的?直到 90 年代初这个问题才得到了一个比较圆满的答案.更精细的实验与更系统的数值模拟都表明,在一个可激发系统中,螺旋波的端点轨迹随控制变量的不同,可能是周期性的圆周运动,也可能是准周期或非周期运动.常见的准周期运动轨迹是内圆滚线或外圆滚线^[16,18].

最简单的螺旋波是如图 3 所示的周期态螺旋波,它的端点沿一个小圆作周期运动.当控制参量改变时,这种周期性螺旋波可能失去稳定性.这时螺旋波的端点运动轨迹不再是周期性的,而被其他更为复杂的端点运动取代.在分岔点附近,人们首先观察到的是内圆滚线轨迹或外圆滚线轨迹.远离分岔点时,系统可能出现更为复杂的端点运动轨迹.图 5(a)是一个外圆滚型螺旋波斑图的例子,图 5(b)给出了这个螺旋波端点运动轨迹的示意图.由于历史

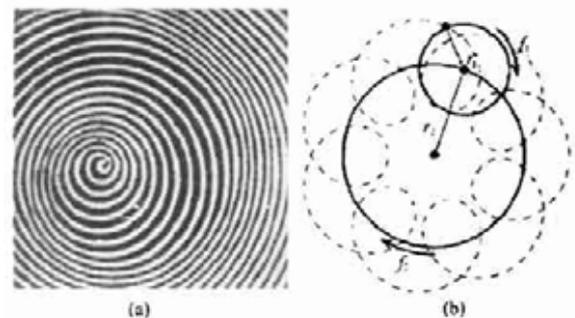


图 5 外圆滚型螺旋波
(a) 螺旋波;(b) 螺旋波端点轨迹示意

原因,所有具有复杂端点运动轨迹的螺旋波都被称为漫游螺旋波,虽然在大多数情况下复杂螺旋波端点的运动轨迹都不是“漫游”,而是遵循某种规律.人们知道,圆滚线由两个半径不同的圆以不同频率做圆周运动组成.半径为 r_1 的初级圆围绕半径为 r_2 的圆滚圆以 f_2 频率运动,同时以 f_1 频率自旋.在初级圆上的一点的运动轨迹即为圆滚线.当初级圆的自旋方向与圆滚圆的运动方向相反时有内圆滚线;当初级圆的自旋方向与圆滚圆的运动方向相同时有外圆滚线.当螺旋波的端点做“漫游”运动时,由于多普勒效应,在螺旋波端点运动方向前面的行波被压缩,在螺旋波端点运动方向后面的行波被伸长.这时螺旋波的周期和波长就不再是一个定值.每一个局

部空间的振荡周期与波长都会随时间变化.当圆滚线的圆滚半径足够大时,多普勒效应开始变得明显起来.如果把图 5(a) 中最大局部波长用线连接起来,则可得到一个大的螺旋波轨迹,叫做超螺旋波轨迹.

在某些控制参量条件下,当调制螺旋波端点的圆滚线轨迹足够大时,调制螺旋波会失稳并产生化学湍流现象.与上节所述的爱克豪斯失稳现象不同,这类失稳起源于螺旋波中心的一个小的区域.当失稳发生时,螺旋波的端点附近会产生出一对点缺陷来,新产生的点缺陷自组织形成新的螺旋波,而它们的端点又产生出一对新的点缺陷.随着时间的增加,系统中的点缺陷数目迅速增加以至饱和.系统进入时空混沌状态.图 6 是这类失稳现象的一个实验观测结果.

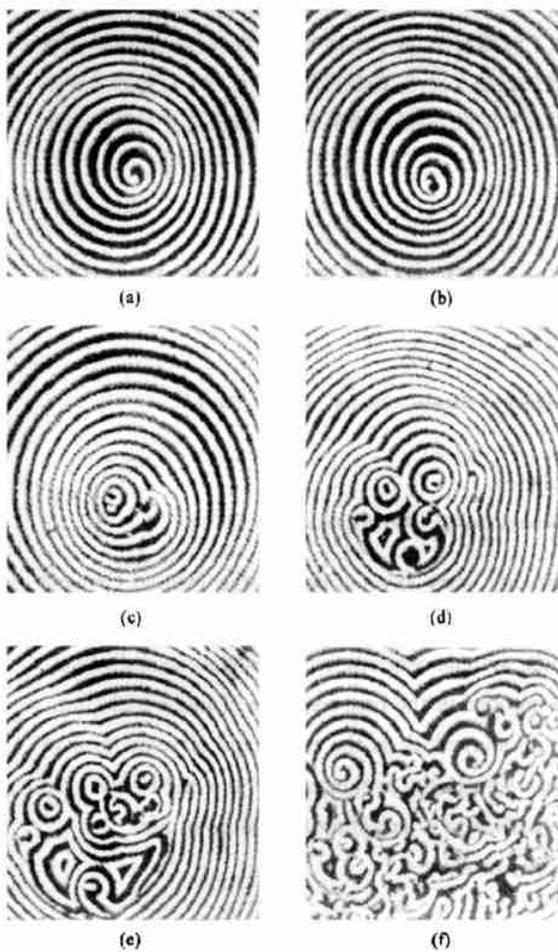


图 6 螺旋波的多普勒失稳

解释图 6 所示的失稳现象的最好理论是多普勒失稳^[19].理论分析表明,螺旋波的动力学行为服从色散关系,即螺旋波的波速与螺旋波周期的关系.对于一个具体的可激发系统,系统的螺旋波周期存在

着一个最小值.当螺旋波周期小于此最小值时,系统不再支持螺旋波.一般来讲,周期螺旋波的周期总是大于色散关系所决定的临界周期,这就保证了螺旋波的稳定性.在一些特殊情况下,色散关系所决定的临界周期会很接近于螺旋波的周期.这时如果变化系统的控制参量,使系统从周期螺旋波变为调制螺旋波.随着调制螺旋波端点轨迹的圆滚半径的增长,多普勒效应逐渐明显.在螺旋波端点运动方向前面的行波被压缩,螺旋波的周期在这些区域内变短;在螺旋波端点运动方向后面的行波被伸长,螺旋波周期在这些区域内变长.因而在行波被压缩的区域内,螺旋波的局部周期会降低到临界周期以下.这时,这些局部区域内的螺旋波会变得不稳定,产生出两个点缺陷来,见图 6(b).每一个新产生的点缺陷会各自以自己为中心组织成新的螺旋波.这些螺旋波出于同样的机理又产生出新的缺陷点来[图 6(c)].这种正反馈过程将一直持续下去[图 6(d),(e),(f)],一直到整个系统被缺陷饱和.

6 讨论

经过 30 多年的努力,非线性科学家已经对反应扩散系统中的螺旋波动力学行为有了大致的掌握.现在的基础研究正在向更深入的层次发展.例如:三维系统中的螺旋波结构及动力学.在二维系统中,螺旋波的组织中心是一个点缺陷,它的拓扑性质非常简单.在三维系统中,螺旋波组织中心为为一条线.理论分析与数值模拟表明,这个线缺陷可能存在复杂的拓扑结构与运动形式.这些因素对螺旋波的稳定性有很大影响.

另一个具有潜在应用价值的研究方向是对螺旋波的运动行为做实时控制,目的是控制并消除心脏中的螺旋波.研究内容包括螺旋波的探测,寻找用有限个探针的信号在心脏中确定螺旋波端点位置的方法,用小附加电场改变螺旋波运动方向的途径等.作者所在的北京大学物理系非线性实验室正在开展这些方面的研究,并取得了一定的结果.

参 考 文 献

- [1] Ecke R E, Yu Y, Mainieri R *et al.* Science, 1995, 269: 1704
- [2] Frisch T, Rica S, Coulet P *et al.* Phys. Rev. Lett., 1994, 72: 1471
- [3] Zaikin A N, Zhabotinsky A M. Nature, 1970, 225: 535
- [4] Lee K J, Cox E C, Goldstein R E. Phys. Rev. Lett., 1996, 76: 1174

- [5] Glass L. *Physics Today* ,1996(8) :40
- [6] Comacho P, Lechleiter J D. *Science* ,1993 ,260 :226
- [7] Belmonte A, Ouyang Q, Flesselles J M. J. *Phys. II France* , 1997 ,7 :1425
- [8] Murray J D. *Mathematical Biology* .Berlin :Spring-Verlag ,1989
- [9] Ammelt E, Astrov Y A, Purwins H G. *Phys. Rev. E* ,1997 ,55 : 6731
- [10] Klausmeier C A. *Science* ,1999 ,284 :1826
- [11] Mendez V. *Phys. Rev. E* ,1998 ,57 :3622
- [12] Mandez V, Llebot J E. *Phys. Rev. E* ,1997 ,56 :6557
- [13] Fort J, Mendez V. *Phys. Rev. E* ,1999 ,60 :5894
- [14] Skinner G S, Swinney H L. *Physica D* ,1991 ,48 :1
- [15] Ouyang Q, Fellesselles J M. *Nature* ,1996 ,379 :143
- [16] Li G, Ouyang Q, Petrov V *et al.* *Phys. Rev. Lett.* ,1996 ,77 : 2105
- [17] Winfree A T. *Science* ,1973 ,181 :937
- [18] Barkley D. *Phys. Rev. Lett.* ,1992 ,68 :2090

解读生命密码*

——人类基因组计划

戴 闻

(中国科学院理化技术研究所 北京 100080)

曾宗浩

(中国科学院生物物理研究所 北京 100101)

摘 要 DNA 测序技术的自动化使得人类基因组测序工作在启动 10 年后就已接近完成.从物理学的角度来看,生物体是工作在单分子水平上的多层次综合的信息、能量和物质加工转换系统.关于生物生长发育和遗传的信息记录在线型分子——核酸的碱基序列中.每个基因是编码一个蛋白质的核酸片段.这些蛋白质分子是分子机器的主要零部件.首次人类基因组测序的完成,只是生命密码破译的开始,而不是结束.年轻的物理学家应积极地参与揭示生命本质的活动.

关键词 遗传,基因组,核酸,蛋白质,分子机器

TOWARDS UNDERSTANDING LIFE'S SECRET——THE HUMAN GENOME PROJECT

DAI Wen

(*Institute of Physical and Chemical Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

ZENG Zong-Hao

(*Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract Since the automation of DNA sequencing technology, after about a decade the Human Genome Project is going to be fulfilled within the next year. From a physical point of view, an organism is an assembly of multiple levels of information, energy and material transformation systems working on the single molecule level. Information about the organism's development and heredity is encoded in the base sequence of linear molecules: nucleic acids. Each gene is a piece of nucleic acids encoding a protein, which is the main type of component of molecular machines. The complete sequencing of human genome signals the beginning, not the end of the road towards decoding life's secret. Young physicists should actively participate in exploring the nature of life.

Key words inheritance, genome, nucleic acid, protein, molecular machine

经过多国科学家的共同努力,启动于 1990 年的人类基因组计划(human genome project, HGP)取得了战略性进展——获得了人类基因组的“工作草图”.在此之前,已有 22 和 21 号染色体的测序工作宣布完成.人类基因组的测序工作已进入尾声,预计 2001 年即可全部结束.

自古以来,生物就因其具有“活”的特征,而让我们的先辈们大为困惑,也使生物学成了现代科学的热点.所谓“活”,就是能够生长、繁殖、进化.为什么生物的各种特征能够世代相传呢?通过对可观察的

* 2000 - 07 - 13 收到初稿,2000 - 09 - 07 修回