

局部不均匀性对时空系统振荡频率的影响

高继华 史文茂 汤艳丰 肖骐 杨海涛

Oscillatory frequencies in spatiotemporal system with local inhomogeneity

Gao Ji-Hua Shi Wen-Mao Tang Yan-Feng Xiao Qi Yang Hai-Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 150503 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.150503

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.150503>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有限理性视野下网络交通流逐日演化规律研究

Day-to-Day dynamical evolution of network traffic flow under bounded rational view

物理学报.2016, 65(15): 150502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.150502>

部分时滞诱发 Watts-Strogatz 小世界神经元网络产生随机多共振

Stochastic multi-resonance induced by partial time delay in a Watts-Strogatz small-world neuronal network

物理学报.2016, 65(12): 120502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.120502>

多平衡态下簇发振荡产生机理及吸引子结构分析

Mechanism of bursting oscillations with multiple equilibrium states and the analysis of the structures of the attractors

物理学报.2016, 65(9): 090501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.090501>

一种基于非完整二维相空间分量置换的混沌检测方法

A chaotic signal detection method based on the component permutation of the incomplete two-dimensional phase-space

物理学报.2016, 65(7): 070502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070502>

类 Liu 系统在水声微弱信号检测中的应用研究

Application of similar Liu system in underwater weak signal detection

物理学报.2016, 65(7): 070501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070501>

局部不均匀性对时空系统振荡频率的影响*

高继华[†] 史文茂 汤艳丰 肖骐 杨海涛[‡]

(深圳大学材料学院, 深圳市特种功能材料重点实验室, 深圳 518060)

(2016年3月4日收到; 2016年5月23日收到修改稿)

以复金兹堡-朗道方程为模型, 利用数值实验方法观察了时空系统中螺旋波斑图的演化行为, 发现在局域非均匀参数条件下, 系统的螺旋波可以受到该杂质区域的影响而演化成为稳定的靶波. 研究表明, 内传的螺旋波转换为稳定靶波的必要条件是非杂质系统和杂质系统的振荡频率相等且小于系统的固有频率, 并在参数-频率空间形成一个特殊的V形区域. 进一步分析表明, 该V形区域具有左右对称、两侧靶波传播方向相反以及随杂质区域参数 α_2 的增大而向参数 β_2 减小方向平移等性质.

关键词: 复金兹堡-朗道方程, 螺旋波, 靶波

PACS: 05.45.-a, 82.40.Ck, 47.54.-r

DOI: 10.7498/aps.65.150503

1 引言

时空系统中可以产生丰富的斑图现象, 其中蕴含着有趣的自然规律, 研究和掌握这些规律具有很大的潜在应用价值. 二维时空系统中常见的两类周期性斑图有螺旋波 (spiral waves) 和靶波 (target waves), 它们虽然在形貌上非常相似, 都具有环形的周期性结构, 但是产生的条件却截然不同. 螺旋波是普遍存在于自然界中的一种时空斑图, 可以在均匀的时空系统中自发产生, 而靶波则需要中心位置波源进行持续性激励才能够稳定存在. 在很多系统中都能够观察到螺旋波, 例如: 流体中的瑞利-贝纳德 (Rayleigh-Bénard) 对流, 液晶中的伊辛-布劳克 (Ising-Bloch) 相变, 反应扩散系统中的化学波, 黏性霉菌的自组织, 心脏中的电信号, 卵细胞中钙离子波等. 在注入信号的影响下, 螺旋波可以转化为靶波, 并产生有趣的频率变化情况, 对这种频率改变的规律进行研究, 可以发现一些有趣的结论.

反应扩散系统在随机初始条件下可以产生多个螺旋波稳定共存的现象, 持续注入的周期性信

号、系统边界条件的影响以及系统参数的不均匀性, 均可以将多螺旋波转换为靶波, 并产生相应的振荡频率改变. 自从别洛索夫 (Belousov) 和扎布亭斯基 (Zhabotinsky) 首先在皮氏培养皿中发现 BZ 反应的螺旋波和靶波斑图以来^[1-3], 以复金兹堡-朗道方程 (complex Ginzburg-Landau equation, CGLE) 为模型的反应扩散系统的斑图动力学行为研究便一直为人们所关注. Stich 等^[4-7] 研究了反应扩散系统中的节拍器 (pacemaker) 使系统产生稳定的靶波的机制. Vidal 和 Pagola^[8] 在实验中证实了这种自组织 (由节拍器引发的) 靶波的存在, Hagan^[9] 从理论上对这种现象进行了解释, 让我们对此有了更为深入的了解. 文献^[10, 11] 在实验中观察到了反向传播的螺旋波与靶波, Bruschi 等^[12, 13] 则是在数值模拟实验中观察到了同样的行为. 近期, Li 等^[14, 15] 研究了节拍器与产生的靶波的传播方向 (内传或外传) 的关系. 文献^[16-20] 发现了局部参数的调整可使系统在缺陷湍流状态下产生靶波, 这种方法被用于控制时空混沌. 综上所述, 对于靶波的产生机理已有较多的研究, 获得了一系列启发性的研究成果. 据本文作者调研, 通过局部参数调整

* 深圳市基础研究项目 (批准号: JCYJ 2014 0418 1819 58489) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jhgao@szu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: yanght63@szu.edu.cn

产生系统不均匀性的生成靶波, 并总结其传播方向和频率变化的规律, 这一方面的工作尚缺乏相关的研究报道. 为此, 本文以二维 CGLE 为模型, 通过改变系统局域参数将多螺旋波转化为靶波, 通过数值实验测量靶波的振荡频率, 并讨论和总结其变化规律.

2 模型和控制方法

本文所用的模型是 CGLE 方程, 它描述了系统在超临界 Hopf 分岔点附近的普适行为, 是描述非线性波动和相变现象的重要物理模型, 其系统参数虽然简单, 但却能够表现丰富多样的动力学行为^[21-28]. 方程的常见形式为

$$\partial_t A = A + (1 + i\alpha)\nabla^2 A - (1 + i\beta)|A|^2 A, \quad (1)$$

其中 A 是关于时间 t 与空间 x, y 的系统变量, 为复数; 考虑二维时空系统, 系统对空间 x, y 的二阶偏导 $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$; 实数 α, β 为系统参数, 不同参数取值可使系统处于不同的状态, 如非混沌、相湍流、双混沌和缺陷湍流等. 本文实验要求选取的系统参数可使系统出现稳定的多螺旋波, 不失一般性, 选取为 $\alpha = -1.34, \beta = 0.35$ (任意单位, 下同). 二维系统空间占据 $L \times L$ 的正方形区域, 其中系统尺寸 $L = 128$, 采用无流边界条件 (no flux boundary condition). 在此参数下可以形成的向内传播的螺旋波. 当系统获得稳定的多螺旋波斑图以后, 再在系统中加入半径 $r_0 = 5$ 的圆形参数不均匀区域作为控制信号, 然后实验观察该杂质区域对初始螺旋波斑图的影响. 加入杂质区域之后, 系统参数 α, β 的值如 (2) 式:

$$(\alpha, \beta) = \begin{cases} (\alpha_1, \beta_1), & r > r_0, \\ (\alpha_2, \beta_2), & r \leq r_0, \end{cases} \quad (2)$$

(2) 式中 $r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$, 为杂质区域的半径, 其中 x_c, y_c 是杂质区域的中心坐标; α_1, β_1 为原始系统参数, $\alpha_1 = -1.34, \beta_1 = 0.35$; α_2, β_2 为杂质区参数. 以下通过数值模拟实验调整控制参数 α_2, β_2 , 来观察系统演化所产生时空斑图的频率特征, 并发现和总结其中的规律.

3 数值模拟与分析

我们先通过引入局域不均匀性来观察原始多螺旋波所受到的影响. 局域的杂质区域放置于系统

空间的中心位置, 区域的大小由半径 r_0 来确定. 由于本文重点讨论杂质区域的参数对系统的影响, 故在不失一般性的前提条件下, 固定 $r_0 = 5$, 进行以下的数值实验研究. 当在特定杂质参数 $\alpha_2 = -1$ 和 $\beta_2 = 1$ 的情况下, 可以观察到原始的多螺旋波斑图出现以杂质区为核心的靶波, 随着时间的推移, 靶波逐渐占据了多螺旋波的区域, 最终靶波占据了整个系统空间, 如图 1 所示.

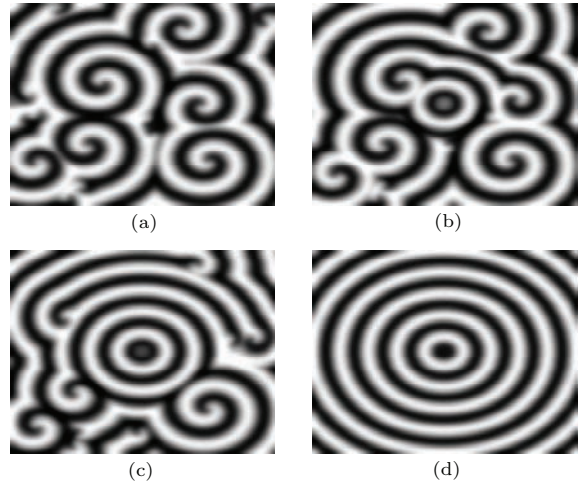


图 1 利用局域不均匀性在多螺旋波区域产生靶波的过程 (系统参数为 $\alpha_1 = -1.34, \beta_1 = 0.35$, 杂质参数为 $\alpha_2 = -1, \beta_2 = 1$) (a) 系统时间 $t = 300$ 时加入局域不均匀控制区域; (b) $t = 500$, (c) $t = 600$, (d) $t = 900$, 系统最终演化成为稳定的靶波

Fig. 1. A target wave is produced by local inhomogeneity. System parameters are $\alpha_1 = -1.34, \beta_1 = 0.35$, and parameters of the impurities are $\alpha_2 = -1, \beta_2 = 1$. (a) Local inhomogeneous parameters are introduced when $t = 300$ t.u.; (b) $t = 500$ t.u.; (c) $t = 600$ t.u.; (d) $t = 900$ t.u.; A target wave is fully produced.

局域不均匀参数对于原始的多螺旋波区域可以产生影响, 并产生稳定的靶波. 通过进一步实验观察, 我们发现不同的杂质区域参数对多螺旋波系统的影响呈多样性. 固定杂质区域的参数 $\alpha_2 = -1$, 仅通过改变 β_2 的值来观察系统的最终稳定斑图, 可以发现并不是在所有的杂质参数 β_2 条件下都能够最终产生稳定的靶波. 当 β_2 的值较大或者较小时, 系统均能够保持为螺旋波的状态, 而只有 β_2 在特定的区间才可以出现靶波. 图 2 是不同杂质参数 β_2 所对应的最终演化结果.

以上定性分析表明, 系统的不均匀性可以产生稳定的靶波, 当改变杂质参数时, 系统的最终演化结果也有相应的变化. 只有在特定的杂质参数区间, 系统才可以产生靶波, 而在此区间之外, 系统仍

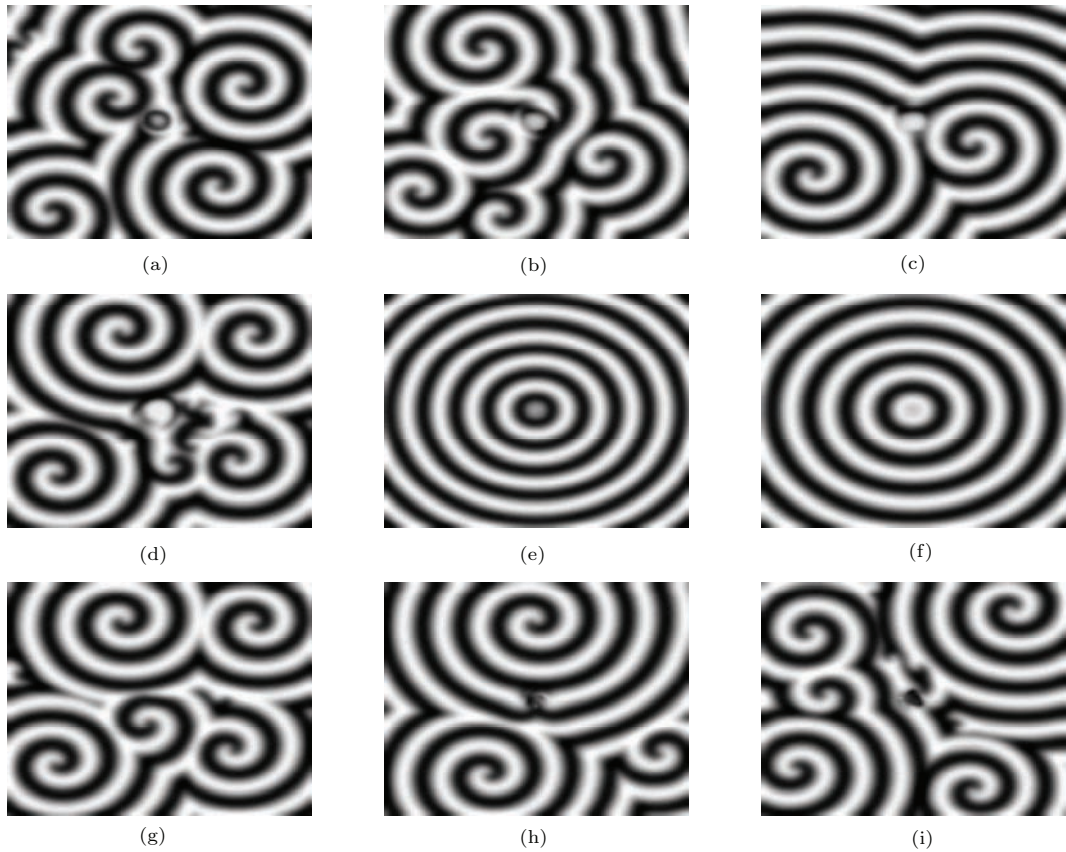


图2 不同杂质参数情形下系统的最终演化结果 (系统参数为 $\alpha_1 = -1.34$, $\beta_1 = 0.35$, 杂质参数为 $\alpha_2 = -1$) (a) $\beta_2 = -3.0$; (b) $\beta_2 = -1.2$; (c) $\beta_2 = -0.6$; (d) $\beta_2 = -0.4$; (e) $\beta_2 = -0.1$; (f) $\beta_2 = 0$; (g) $\beta_2 = 0.4$; (h) $\beta_2 = 2.2$; (i) $\beta_2 = 2.8$; 可以注意到, 在所示的杂质参数条件下只有在 (e) 和 (f) 这两个例子中, 系统的原始多螺旋波最终演化为稳定的靶波斑图

Fig. 2. Snapshots of the final evolution of the system with different impurities parameters. System parameters are $\alpha_1 = -1.34$, $\beta_1 = 0.35$, and parameters of the impurities are $\alpha_2 = -1$ and (a) $\beta_2 = -3.0$, (b) $\beta_2 = -1.2$, (c) $\beta_2 = -0.6$, (d) $\beta_2 = -0.4$, (e) $\beta_2 = -0.1$, (f) $\beta_2 = 0$, (g) $\beta_2 = 0.4$, (h) $\beta_2 = 2.2$ and (i) $\beta_2 = 2.8$, respectively. The full target waves can be only produced for the cases of (e) and (f).

然保持螺旋波状态. 仔细观察图2中多螺旋波的情形, 我们可以注意到, 虽然当 β_2 的值较大或者较小时系统未能演化成为靶波, 但是其螺旋波的形状仍然会受到杂质参数的影响, 产生微小的改变. 为了进一步研究局域非均匀性对系统最终演化结果的影响, 我们考虑测量系统振荡频率随着杂质参数的变化情况. 在CGLE方程中, 系统参数的改变可以影响到系统的固有频率, 一般情况下满足色散关系 $\omega = \beta + (\alpha - \beta)k^2$, 其中 k 是波数, ω 是旋转频率. 在本文的数值模拟中, 系统的振荡频率则需要考虑非杂质区域和杂质区域这两种情形. 在这两个区域中, 系统介质均分别以相同的频率进行振荡, 所以只需要任意取非杂质区域和杂质区域中的两个代表点进行频率测量, 就可以了解系统的整体振荡频率. 图3给出了系统振荡频率随着 β_2 的变化情况, 从中可以观察到杂质参数将系统的最终演化

结果分为三个部分: 在 β_2 较小的A区, 非杂质区域的频率小于杂质区域的频率; 在 β_2 较大的B区和C区, 非杂质区域与杂质区域的频率相同. B区与C区的区别是: B区非杂质区域与杂质区域的频率相等, 均出现了低于非杂质区域固有频率的情形; 而在C区两者的频率均等于非杂质区域的固有频率. 在图3所示的 $-0.17 \leq \beta_2 \leq -0.02$ 系统参数条件下, 我们可以获得三个区域的具体范围, 并可以进一步分析三个区域中的细节. 当固定杂质区域参数为 $\alpha_2 = -1$ 时, 通过调整控制参数 β_2 的数值, 可以发现: A区域的范围是 $\beta_2 < -0.17$, 在此参数范围内系统在杂质区的频率明显大于非杂质区, 并且随着 β_2 的增大逐渐减小. 而非杂质区域的频率则相对稳定, 在原系统的固有频率 (0.0155 Hz) 上下小范围波动, 基本上不受杂质区域的影响, 系统的最终演化斑图为多螺旋波, 对应于图2(a)—(d)的情

形. C 区域的范围是 $\beta_2 > -0.02$, 在此范围内杂质区域与非杂质区域的振荡频率在测量误差范围内相等, 均在原系统固有频率上下小范围内波动, 系统的最终演化斑图与 A 区相同, 也为多螺旋波, 对应于图 2(g)—(i) 的情形. 当系统处于图 3 中所示的 B 区, 在这个区域内杂质区与非杂质区的频率相等, 均随着 β_2 的增大出现先减小后增大的 V 型变化. 通过对系统演化的最终斑图进行观察, 发现也正是在 B 区域可以获得稳定靶波, 因此 B 区域也可称为靶波区域. 这个区域具有特殊性, 无论是在非杂质区域还是杂质区域, 它们共同的振荡频率均低于系统固有的振荡频率, 因此值得进行进一步的观察和讨论. 图 4 是 B 区附近非杂质区域振荡频率随着 β_2 的变化情况, 可以看出, 在 $\beta_c \approx -0.1$ 时, 系统的振荡频率为零, 数值模拟发现在这个参数条件下可以得到定态靶波, 系统所有的空间位置均不发生振荡现象. 而在临界参数 β_c 的两侧系统频率的变化函数接近于直线, 通过线性拟合方法获得 V 型区域左右直线边的斜率分别为 -0.12 和 0.12 , 频率函数的斜率在数值上具有对称性.

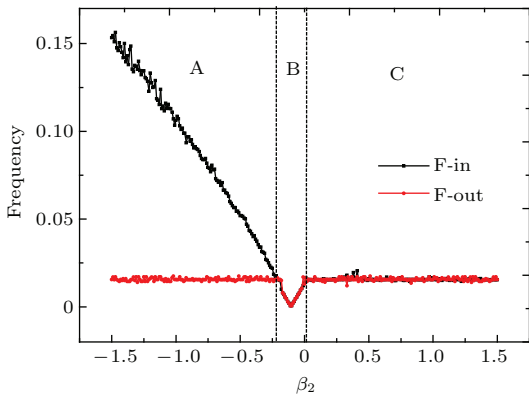


图 3 (网刊彩色) 系统频率随参数 β_2 的变化情况. 系统参数为 $\alpha_1 = -1.34$, $\beta_1 = 0.35$, 杂质参数为 $\alpha_2 = -1$; 图中 F -in 黑色点线图代表杂质区域的频率, F -out 红色点线图代表非杂质区域的频率; 由图可以分析出三个明显的区域, 其中仅在 B 系统的最终演化结果为靶波, 而在 A 区和 C 区系统最终表现为多螺旋波.

Fig. 3. (color online) System frequencies versus β_2 . System parameters are $\alpha_1 = -1.34$, $\beta_1 = 0.35$, and parameter of impurities is $\alpha_2 = -1$. Here black spots represent the frequency of impurities area, red spots represent the frequency of non-controlled area. The figure is divided into three areas, and the multi-spiral patterns can be evolved into a target wave in area B, while areas A and C remain multi-spiral patterns.

系统频率随杂质参数的变化函数出现 V 形结构, 频率先减小, 在下降为零后再增大, 而且减小和增大的速度是相同的, 这在图 4 中体现为 V 形区

域左右直线边的斜率具有对称性. 这就给了我们一个启发, 在临界控制参数 β_c 附近之所以会出现系统频率从减小到增大的变化, 实际上是由于在这里出现了靶波传播方向的改变. 为了验证这个猜想, 图 5 分别选取了 V 形区域两边的参数进行实验, 发现确实出现了靶波传播方向的改变. 在 V 型区域的左边即 $-0.17 \leq \beta_2 \leq -0.11$ 波是由内向外传播的, 而区域的右边即 $-0.10 \leq \beta_2 \leq -0.02$ 波是由外向内传播的.

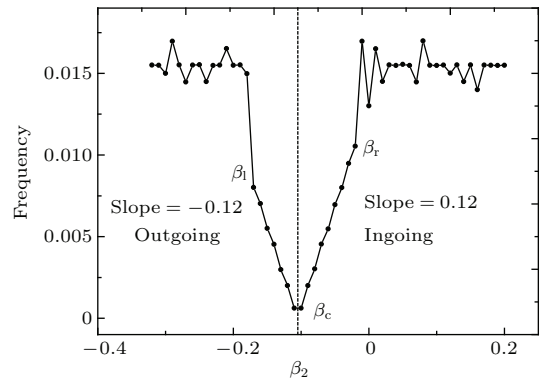


图 4 系统频率随参数 β_2 的变化情况. 系统参数为 $\alpha_1 = -1.34$, $\beta_1 = 0.35$, 杂质参数为 $\alpha_2 = -1$; 图中仅给出了非杂质区域的振荡频率.

Fig. 4. System frequencies versus β_2 . System parameters are $\alpha_1 = -1.34$, $\beta_1 = 0.35$, and parameter of impurities is $\alpha_2 = -1$. In this figure, only the frequencies of non-controlled area are plotted.

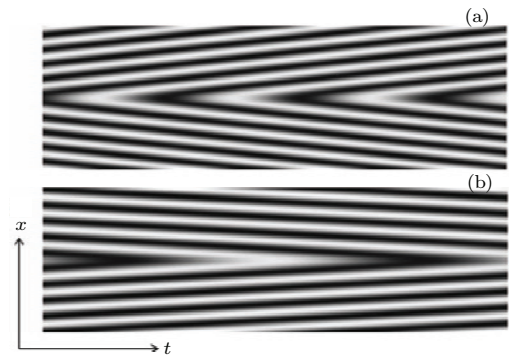


图 5 系统的演化情况. 系统参数为 $\alpha_1 = -1.34$, $\beta_1 = 0.35$, 杂质参数为 $\alpha_2 = -1$; (a) $\beta_2 = -0.16$, 位于图 4 中 V 形区域的左边, 系统最终形成了由内向外传播的靶波; (b) $\beta_2 = -0.08$, 位于 V 形区域的右边, 系统最终形成了由外向内传播的靶波.

Fig. 5. The evolutions of the system. System parameters are $\alpha_1 = -1.34$, $\beta_1 = 0.35$, and parameter of impurities is $\alpha_2 = -1$. (a) $\beta_2 = -0.16$, outwardly propagating target, which is corresponding to the left side of the V-shaped area, is observed; (b) $\beta_2 = -0.08$, inwardly propagating target, which is corresponding to the right side of the V-shaped area, is observed.

为了更加准确地描述V形区域在参数区的位置,引入三个参数 β_1 , β_c , β_r , 它们分别代表了V形区域的左中右三个点的参数值(如图4所示), 并且 $\beta_1 \leq \beta_2 \leq \beta_r$ 表示V形区域的宽度. 调整杂质区域参数 α_2 , 可以观察V形区域的变化情况, 如图6所示. 我们可以观察到, 随着参数 α_2 的增加, β_1 , β_c , β_r 呈递减的趋势, 而区域的宽度并无明显变化.

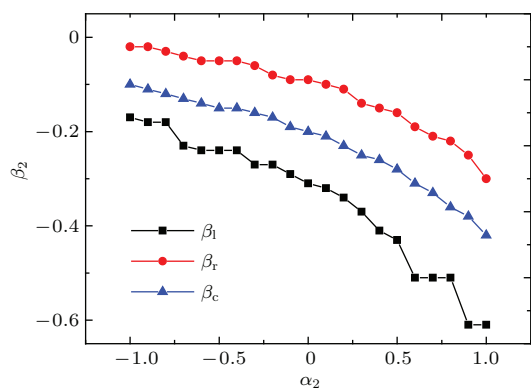


图6 (网刊彩色) β_1 , β_c , β_r 随 α_2 的变化情况

Fig. 6. (color online) β_1 , β_c , β_r versus α_2 .

4 结 论

本文研究了时空系统中的局域不均匀性对螺旋波的影响, 通过加入具有不同系统参数的杂质区域, 系统中原有的螺旋波可以被转换为稳定的靶波. 通过对杂质区域的参数进行改变, 可以归纳得到三种结果. 只有当杂质区域的参数处于特定范围, 系统才能最终演化为稳定的靶波. 本文通过分析不同杂质参数时系统振荡频率的变化情况, 发现螺旋波转换为靶波的条件是非杂质系统和杂质系统的振荡频率相等且小于系统的固有频率, 并在参数-频率空间形成一个特殊区域, 称之为V形区域. 该区域具有三个特点: 1) V形两边的斜率绝对值相等, 具有左右对称性; 2) V形区域两边产生的靶波传播方向相反, 其中区域左边($\beta_1 \leq \beta_2 \leq \beta_c$)形成的靶波由内向外传播, 区域右边($\beta_c \leq \beta_2 \leq \beta_r$)形成的靶波由外向内传播; 3) V形区域随着杂质区域参数 α_2 的增大向 β_2 减小的方向平移, 区域的宽度基本保持不变. 此外, 本文还通过大量的数值实验, 在不同的杂质区域半径下都观察到了类似的V形区域, 且杂质区域尺寸的改变并不影响 β_1 , β_c , β_r 的值. 出于篇幅的考虑, 这些数据分析结果没有在此一一列举. 时空系统中的振荡现象理论研究, 在

信号传播、模式竞争等领域都具有潜在的应用价值. 本文对于靶波稳定性条件的数值实验和理论分析可以为这些领域提供更多的支持, 并期望对相关应用领域研究提供启发和思路, 以获得突破性的应用成果.

参考文献

- [1] Zaikin A N, Zhabotinsky A M 1970 *Nature* **225** 535
- [2] Ross J, Muller S C, Vidal C 1988 *Science* **240** 460
- [3] Wolff J, Papanthanasou A G, Kevrekidis I G, Rotermund H H, Ertl G 2001 *Science* **294** 134
- [4] Stich M, Mikhailov A S 2006 *Physica D* **215** 38
- [5] Stich M, Mikhailov A S 2002 *Phys. Chem.* **216** 512
- [6] Stich M, Ipsen M, Mikhailov A S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 4406
- [7] Stich M, Mikhailov A S, Kuramoto Y 2009 *Phys. Rev. E* **79** 026110
- [8] Vidal C, Pagola A 1989 *Phys. Chem.* **93** 2711
- [9] Hagan P S 1981 *Adv. Appl. Math* **2** 400
- [10] Vanag V K, Epstein I R 2001 *Science* **294** 835
- [11] Shao X, Wu Y, Zhang J, Wang H, Ouyang Q 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 198304
- [12] Bruschi L, Nicola E M, Bar M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 089801
- [13] Nicola E M, Bruschi L, Bar M 2004 *Phys. Chem. B* **108** 14733
- [14] Li B W, Ying H P, Yang J S, Gao X 2010 *Phys. Lett. A* **374** 3752
- [15] Li B W, Gao X, Deng Z G, Ying H P, Zhang H 2010 *Euro. Phys. Lett.* **91** 34001
- [16] Jiang M, Wang X, Ouyang Q, Zhang H 2004 *Phys. Rev. E* **69** 056202
- [17] He X, Zhang H, Hu B, Cao Z, Zheng B, Hu G 2007 *New J. Phys.* **9** 66
- [18] Li B W, Zhang H, Ying H P, Chen W Q, Hu G 2008 *Phys. Rev. E* **77** 056207
- [19] Gao J H, Zhan M 2007 *Phys. Lett. A* **371** 96
- [20] Luo J, Zhan M 2008 *Phys. Lett. A* **372** 2415
- [21] Mikhailov A S, Showalter K 2006 *Phys. Rep.* **42** 79
- [22] Goryachev A, Kapral R 1996 *Phys. Rev. E* **54** 5469
- [23] Aranson I S, Kramer L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 99
- [24] Gao J H, Xie W M, Gao J Z, Yang H P, Ge Z C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 130506 (in Chinese) [高继华, 谢伟苗, 高加振, 杨海朋, 戈早川 2012 物理学报 **61** 130506]
- [25] Kuramoto Y 1984 *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence* (New York: Springer)
- [26] Cross M, Hohenberg P 1993 *Rev. Mod. Phys.* **65** 851
- [27] Xie L L, Gao J Z, Xie W M, Gao J H 2011 *Chin. Phys. B* **20** 110503
- [28] Gao J H, Wang Y, Zhang C, Yang H P, Ge Z C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 020503 (in Chinese) [高继华, 王宇, 张超, 杨海朋, 戈早川 2014 物理学报 **63** 020503]

Oscillatory frequencies in spatiotemporal system with local inhomogeneity*

Gao Ji-Hua[†] Shi Wen-Mao Tang Yan-Feng Xiao Qi Yang Hai-Tao[‡]

(Key Laboratory of Special Functional Materials of Shenzhen, College of Materials, Shenzhen University,
Shenzhen 518060, China)

(Received 4 March 2016; revised manuscript received 23 May 2016)

Abstract

Target waves usually emit concentric circular waves, whereas spiral waves rotate around a central core (topological defect) region, the two forms of waves are closely related due to the similarity of their spatial structures. Spiral waves can be generated spontaneously in a homogeneous system, while target waves usually cannot be self-sustained in the same system. Therefore, spiral waves can be found in diverse natural systems, and target waves can be produced from the spirals with special boundary configurations or central pacemakers. The pacemaker of target wave is an oscillatory source or medium inhomogeneity. To model the inhomogeneity in some realistic situations, we introduce local parameter shifts and simulate the transition from spiral waves to target waves. In this research, the evolution of the spiral waves in the complex Ginzburg-Landau equation is investigated by numerical simulations, and the multi-spiral patterns can be transformed into stable target waves with local inhomogeneous parameter shifts in a two-dimensional (2D) spatiotemporal system. The detailed study shows that the initial multi-spiral waves can be influenced by introducing inhomogeneity in the local area of the system space, and the oscillatory frequency of the system plays an important role in changing the pattern. A successful transition from inwardly propagating spirals to target waves can be observed when the oscillatory frequencies of non-controlled and local inhomogeneous region, which have equal values, are both less than the inherent frequency of system. When we inspect the relationship between oscillatory frequencies and the characteristics of the inhomogeneous region, an intriguing V-shaped line is found in parameter-frequency diagram, and the V-shaped area presents three features. Firstly, the left and right sides of the V-shaped area are symmetrical. Secondly, the propagating directions of target waves from the left and right sides are opposite. An inwardly propagating target wave is formed on the left side of the V-shaped area, and an outwardly propagating target wave stably exists on the right side of the line. Thirdly, as local inhomogeneous parameter α_2 increases, the V-shaped area moves towards the local inhomogeneous parameter β_2 and decreases simultaneously, and the width of the V-shaped area remains approximately the same. To our knowledge, this V-shaped line is a novel observation, hence the changes of the system frequencies are thought to be provoking. This work presents the numerical experiments and theoretical analyses for the stable conditions of target waves, and therefore provides the ideas in the applications of signal propagation and mode competition.

Keywords: complex Ginzburg-Landau equation, spiral wave, target wave

PACS: 05.45.-a, 82.40.Ck, 47.54.-r

DOI: 10.7498/aps.65.150503

* Project supported by the Shenzhen Science and Technology Research Fund (Grant No. JCYJ 2014 0418 1819 58489).

[†] Corresponding author. E-mail: jhgao@szu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: yanght63@szu.edu.cn