

·激光技术·

异结构离散型激光时空网络的聚类同步研究

高 艳

(辽宁师范大学 物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:进行了异结构离散型时空网络的聚类同步研究。首先,利用Lyapunov定理构造合适的Lyapunov函数,从而实现了离散型时空网络与目标系统的聚类同步。其次,设计了网络中变化参量的识别函数和网络同步控制器。最后,在数值模拟中,选用具有时空混沌行为的激光相位共轭波空间扩展系统、Gibbs电光时空混沌模型、Bragg声光时空混沌模型作为三个聚类的网络节点的状态方程,以单向耦合映像格子的动力学方程作为目标系统,通过仿真模拟验证其同步原理的可行性。文中设计的同步技术既适用于同结构网络的同步也适用于异结构网络的同步,因此,具有一定的普适性。

关键词:聚类同步;时空网络;异结构;Lyapunov函数

中图分类号:O415.5

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-05-0024-08

Cluster Synchronization of Discrete Laser Time-space Network with Different Structure

GAO Yan

(College Physics Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Cluster synchronization of discrete laser time-space network with different structure is researched. Firstly, the Lyapunov theorem is used to construct a suitable Lyapunov function to realize the cluster synchronization of the discrete time-space network and the target system. Secondly, the recognition function of the variation parameter in network and the network synchronization controller are designed. Finally, the laser phase conjugate wave spatial expansion system with spatiotemporal chaos behavior, Gibbs electro-optical spatiotemporal chaos model and Bragg acousto-optic spatiotemporal chaos model are selected as the state equations of three cluster network nodes. The dynamic equation of the coupled map lattice with single phase is used as a target system, and the feasibility of the synchronization scheme is verified by numerical simulation. The designed synchronization technology is suitable to both the synchronization of the same structure networks and the synchronization of different structure networks. Therefore, it's generally suitable.

Key words: cluster synchronization; time-space network; different structure; Lyapunov function

近年来,复杂网络在物理学、数学、生物学、工程学以及社会科学等领域的应用极其广泛,而且在现实世界里也无处不在,例如万维网、电网、科学合作网、生物神经网络以及社会网络等^[1-5]。由此可见,复杂网络在众多生产技术领域占有着非常重要的地位,因此引起了研究者们对复杂网络研究的

青睐。在自然界中,复杂网络的同步现象也很常见,因此在研究复杂网络时对同步现象的研究尤为重要。

对于复杂网络同步现象的研究,最早可以追溯到 Huygens 对耦合摆的研究。在此之后,Peroca 和 Carroll 通过驱动和耦合技术使混沌系统达到了完全

同步,并且首次在电子电路中观察到了混沌同步的现象^[6-10]。此后,对同步的相关研究激起了众多领域研究者的兴趣。随着对复杂网络同步研究的深入,许多同步方法已经被学者们研究并报道,主要为以下的几个不同类型:完全同步,相位同步,滞后同步,投影同步,聚类同步等^[11]。

聚类同步是将复杂网络中的节点分成若干个聚类,具有相同动力学特征的节点构成一个聚类。聚类同步可以实现每个聚类内部节点的同步,也可以实现每个聚类内部的各个节点和某个动力学系统的同步,但不同聚类节点之间的同步是不能实现的。综上所述,聚类同步的研究具有重要的理论意义和实际的应用价值。因此,聚类同步的这种分类的特征引起了很多国内外研究者的兴趣^[12-15]。例如, Ma 等人研究了带有牵制控制的定向复杂动态网络的聚类同步^[16]。Zhang 等人研究了带有外部干扰和通讯延迟的耦合脉冲控制器的指数聚类同步^[17]。Wang 等人通过设计更新规则实现了不确定动态系统的非线性耦合时滞网络的聚类同步^[18-21]。Tang 和 Feng 等人对带有不确定节点的时滞和非时滞复杂网络,通过设计自适应更新规则,使其达到聚类同步^[22]。Wu 等人研究带有不同节点的社区网络之间的聚类投影同步和在牵制控制下的线性耦合复杂网络的聚类同步^[23-25]。Cai 等人对具有时变脉冲干扰的不确定网络的聚类同步进行了研究^[26]。Jiang 等人根据有限时间同步控制技术和 Lyapunov 稳定性定理对有限时间复杂动态网络的自适应投影同步进行了研究^[27]。Su 等人考虑了离散型自适应牵制控制动态网络的聚类同步,并针对无向网络的聚类同步提出了一个新的离散反馈控制方案^[28-30]。

以上研究成果对网络聚类同步的深入研究起到了推动作用,但也存在一些局限性^[31]。例如,上述同步研究的对象大多数是时间连续的复杂网络,结构一般都是相同的。但实际应用中,有很多网络是离散型的,而且聚类的节点也可能和目标系统具有不同的结构^[32-33]。由此可见,上述的同步原理不能普遍适用,特别是关于异结构离散型时空网络的聚类同步研究还相对较少。因此,关于复杂网络的聚类同步研究有待于提出一些新的改善方案。

基于上述讨论,文中进行了异结构离散型时空网络的聚类同步研究。利用 Lyapunov 定理构造合适的 Lyapunov 函数,从而实现了离散型时空网络与

目标系统的聚类同步。同时,设计了网络中变化参数的识别函数和网络同步控制器。在数值模拟中,选用具有时空混沌行为的激光相位共轭波空间扩展系统、Gibbs 电光时空混沌模型、Bragg 声光时空混沌模型作为三个聚类的网络节点,以单向耦合映像格子的动力学方程作为目标系统,通过仿真模拟验证其同步原理是可行的。所设计的同步技术既适用于同结构网络的同步也适用于异结构网络的同步,具有一定的普适性。

1 网络同步方案的设计

假设考虑的网络共有 N 个节点,可以分成 p 个聚类,即 $l=1,2,\dots,p$,用 B_l 表示第 l 个聚类的节点数目,且 $B_1+B_2+\dots+B_p=N$,定义 G_l 是第 l 个聚类的指标集。

则 $l=1$ 时, $G_1=\{1,2,\dots,B_1\}$

$l=2$ 时, $G_2=\{B_1+1,B_1+2,\dots,B_1+B_2\}$

\vdots

$l=l$ 时, $G_l=\{B_1+B_2+\dots+B_{l-1}+1,B_1+B_2+\dots+B_{l-1}+2,\dots,B_1+B_2+\dots+B_l\}$

\vdots

$l=p$ 时, $G_p=\{B_1+B_2+\dots+B_{p-1}+1,B_1+B_2+\dots+B_{p-1}+2,\dots,B_1+B_2+\dots+B_p\}$

聚类网络示意图如图 1 所示。

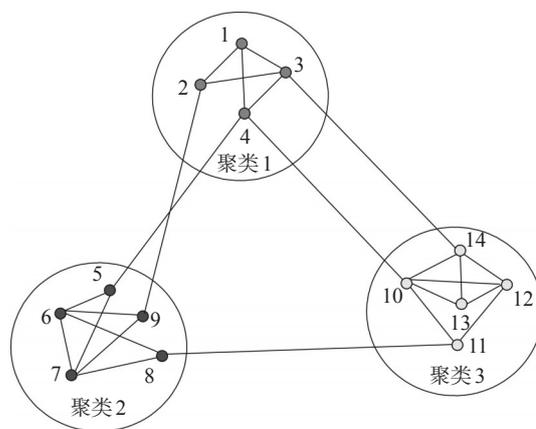


图1 聚类网络的示意图

设离散型网络的第 i 个节点方程表达式为

$$x_i(m,n+1)=f_i(x_i(m,n))+\xi_i \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j(m,n)+u_i(m,n), \quad i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

其中, m 表示空间格点的位置坐标 ($i = 1, 2, \dots, S$), S 为系统的尺寸; n 表示离散化的时间步数; $x_i(m, n) \in R^m$ 为系统的状态变量; $f(x_i(m, n))$ 为第 i 个节点的系统方程; ξ_i 为耦合强度; $u_i(m, n)$ 是网络控制器; $A = (a_{ij})_{N \times N}$ 是耦合矩阵, 其中矩阵元 a_{ij} 满足: 如果第 i 个节点与第 j 个节点存在连接 ($i \neq j$), $a_{ij} \neq 0$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。并且耦合矩阵的对角元定义为

$$a_{ii} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

设目标系统的动力学方程为

$$s_i(m, n+1) = g(s_i(m, n)) \quad (3)$$

定义网络和目标系统的误差为

$$e_i(m, n) = x_i(m, n) - s_i(m, n) \quad (4)$$

则有

$$e_i(m, n+1) = x_i(m, n+1) - s_i(m, n+1) \quad (5)$$

将式(1)和式(3)代入到式(5)中, 有下式

$$e_i(m, n+1) = f_i(x_i(m, n)) - g(s_i(m, n)) + \xi_i \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j(m, n) + u_i(m, n) \quad (6)$$

构造网络的 Lyapunov 函数如下

$$V(m, n) = |e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)| + \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| \quad (7)$$

这里的 k_i 是可以随时间变化的参量, $\hat{k}_i(m, n)$ 通过追踪得到确定的 k_i , 实现通过调节 k_i 来达到网络和目标系统的聚类同步; $\varphi_i(m, n)$ 是待定的函数, 它的演化关系设为

$$\varphi_i(m, n+1) = \varphi_i(m, n) + \sigma_i e_i(m, n) \quad (8)$$

由式(7)可以进一步获得下式

$$\begin{aligned} \Delta V = V(m, n+1) - V(m, n) = & |e_i(m, n+1) + \varphi_i(m, n+1)| + \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n+1) - k_i \right| - \\ & |e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)| - \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| \end{aligned} \quad (9)$$

将式(6)、式(8)代入到式(9)中得到下式

$$\begin{aligned} \Delta V = & |f_i(x_i(m, n)) - g(s_i(m, n)) + \\ & \xi_i \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j(m, n) + u_i(m, n) + \\ & \sigma_i e_i(m, n)| + \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n+1) - k_i \right| - \\ & |e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)| - \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| \end{aligned} \quad (10)$$

由式(4)可知

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} x_j(m, n) = \sum_{j=1}^N a_{ij} e_j(m, n) + \sum_{j=1}^N a_{ij} s_j(m, n) \quad (11)$$

将式(11)代入到式(10)中可以得到

$$\begin{aligned} \Delta V = & \left| f_i(x_i(m, n)) - g(s_i(m, n)) + \xi_i \sum_{j=1}^N a_{ij} e_j(m, n) + \right. \\ & \left. \xi_i \sum_{j=1}^N a_{ij} s_j(m, n) + u_i(m, n) + \varphi_i(m, n) + \sigma_i e_i(m, n) \right| - \\ & |e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)| + \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n+1) - k_i \right| - \\ & \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| \end{aligned} \quad (12)$$

将 $\sum_{j=1}^N a_{ij} e_j(m, n)$ 对角化后, 式(12)可改写为如下形式

$$\begin{aligned} \Delta V = & \left| f_i(x_i(m, n)) - g(s_i(m, n)) + (\xi_i \lambda_i + \sigma_i) e_i(m, n) + \right. \\ & \left. \xi_i \sum_{j=1}^N a_{ij} s_j(m, n) + u_i(m, n) + \varphi_i(m, n) \right| - \\ & |e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)| + \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n+1) - k_i \right| - \\ & \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| \end{aligned} \quad (13)$$

设计控制器 $u_i(m, n)$ 的形式如下

$$\begin{aligned} u_i(m, n) = & -f_i(x_i(m, n)) + g(s_i(m, n)) - \xi_i \sum_{j=1}^N a_{ij} s_j(m, n) - \\ & k_i e_i(m, n) + (\xi_i \lambda_i + \sigma_i - \hat{k}_i(m, n) - 1) \varphi_i(m, n) \end{aligned} \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)可以得到

$$\begin{aligned} \Delta V = & \left| (\xi_i \lambda_i + \sigma_i) e_i(m, n) + (\xi_i \lambda_i + \sigma_i - \hat{k}_i(m, n)) \varphi_i \cdot \right. \\ & \left. (m, n) - k_i e_i(m, n) \right| - |e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)| + \\ & \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n+1) - k_i \right| - \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| = \\ & \left| (\xi_i \lambda_i + \sigma_i - \hat{k}_i(m, n)) (e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)) + \right. \\ & \left. (\hat{k}_i(m, n) - k_i) e_i(m, n) \right| - |e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)| + \\ & \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n+1) - k_i \right| - \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| \end{aligned} \quad (15)$$

由不等式特性, 可以得到下式

$$\begin{aligned} \Delta V \leq & \left| \xi_i \lambda_i + \sigma_i - \hat{k}_i(m, n) \right| - 1 |e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)| + \\ & |e_i(m, n)| \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| + \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n+1) - k_i \right| - \\ & \delta_i \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| \end{aligned} \quad (16)$$

定义识别未知参量的函数形式为

$$\hat{k}_i(m, n+1) = k_i + D_i(m, n)(\hat{k}_i(m, n) - k_i) \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)可以得到

$$\begin{aligned} \Delta V \leq & \left(|\xi_i \lambda_i + \sigma_i - \hat{k}_i(m, n)| - 1 \right) |e_i(m, n) + \varphi_i(m, n)| + \\ & \left(|e_i(m, n)| + \delta_i |D_i(m, n)| - 1 \right) \left| \hat{k}_i(m, n) - k_i \right| \end{aligned} \quad (18)$$

显然,只要满足下式

$$\left| \xi_i \lambda_i + \sigma_i - \hat{k}_i(m, n) \right| - 1 \leq 0 \quad (19)$$

$$|e_i(m, n)| + \delta_i (|D_i(m, n)| - 1) = 0$$

就有

$$\Delta V \leq 0 \quad (20)$$

根据 Lyapunov 定理,网络和目标系统实现了聚类同步。

根据式(19)可以得到

$$|D_i(m, n)| = 1 - \frac{|e_i(m, n)|}{\delta_i} \quad (21)$$

即

$$\hat{k}_i(m, n) = k_i + \left(1 - \frac{|e_i(m, n)|}{\delta_i} \right) (\hat{k}_i(m, n) - k_i) \quad (22)$$

或者

$$\hat{k}_i(m, n) = k_i - \frac{1}{\delta_i} (1 - |e_i(m, n)|) (\hat{k}_i(m, n) - k_i) \quad (23)$$

2 数值模拟和分析

在数值仿真部分,取 $N=14$ 个节点构成时空网络,以此验证上述原理的有效性。

将 14 个节点按照图 1 所示分成三个聚类,第一个聚类含有四个节点,节点动力学方程是 Bragg 声光时空混沌模型。第二个聚类含有五个节点,节点动力学方程是具有时空混沌的激光相位共轭波空间扩展系统的状态方程。第三个聚类含有五个节点,节点动力学方程是 Gibbs 电光时空混沌模型。目标系统是单向耦合子映像格子动力学方程。

聚类 1 中, Bragg 声光时空混沌模型为

$$\begin{aligned} x_i(m, n+1) = & (1 - \varepsilon_1) \pi [r - \mu \sin^2(x_i(m, n) - V_b)] + \\ & \varepsilon_1 \pi [r - \mu \sin^2(x_i(m-1, n) - V_b)] \end{aligned} \quad (24)$$

其中,系统的参量 $r=0.5$, $\mu=1.5$, $V_b=0.25\pi$, 空间离散点间的耦合强度因子 $\varepsilon_1=0.4$ 时对应系统的时空演化如图 2 所示。

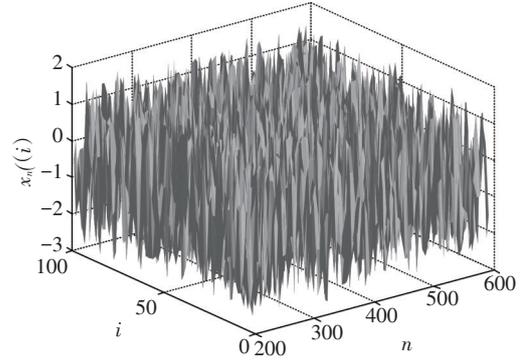


图2 Bragg 声光时空混沌模型

聚类 2 中,激光相位共轭波空间扩展系统的状态方程为

$$\begin{aligned} x_i(m, n+1) = & (1 - \varepsilon_2) \omega J_0^2[(x_i(m, n) - B)^{\frac{1}{2}}] + \\ & \varepsilon_2 \omega J_0^2[(x_i(m-1, n) - B)^{\frac{1}{2}}] \end{aligned} \quad (25)$$

其中, J_0 表示零级 Bessel 函数; ε_2 是系统的空间离散点间的耦合强度因子。当 $\omega=28$, $B=1$, $\varepsilon_2=0.1$ 时,系统为时空混沌状态,其时空演化如图 3 所示。

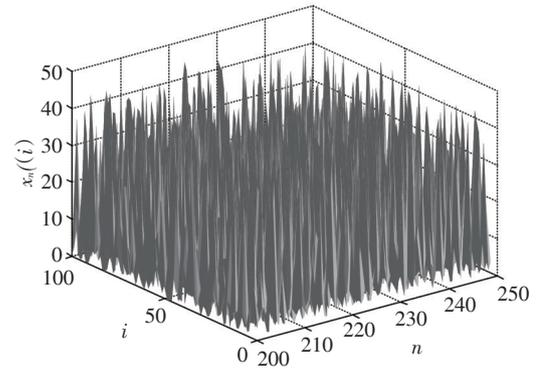


图3 激光相位共轭波空间扩展系统混沌模型

聚类 3 中, Gibbs 电光时空混沌模型为

$$\begin{aligned} x_i(m, n+1) = & (1 - \varepsilon_3) A \sin^2(x_i(m, n) - x_b) + \\ & \varepsilon_3 A \sin^2(x_i(m-1, n) - x_b) \end{aligned} \quad (26)$$

其中,系统参量 $A=3$; $x_b=0.85\pi$, 空间离散点间的耦合强度因子 $\varepsilon_3=0.4$ 时对应系统的时空演化如图 4 所示。

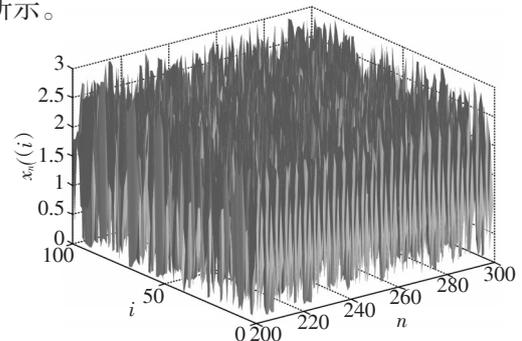


图4 Gibbs 电光时空混沌模型

目标系统为单向耦合子映像格子动力学方程为

$$x_i(m, n + 1) = (1 - \varepsilon_4)[b(e^{-ax_i^2(m, n)} - x_i^2(m, n))] + \varepsilon_4[b(e^{-ax_i^2(m-1, n)} - x_i^2(m-1, n))] \quad (27)$$

其中,系统参量 $a = 10$, $b = 0.8$, 系统的空间离散点间的耦合强度因子 $\varepsilon_4 = 0.4$ 时,单向耦合映像格子的时空演化如图5所示。

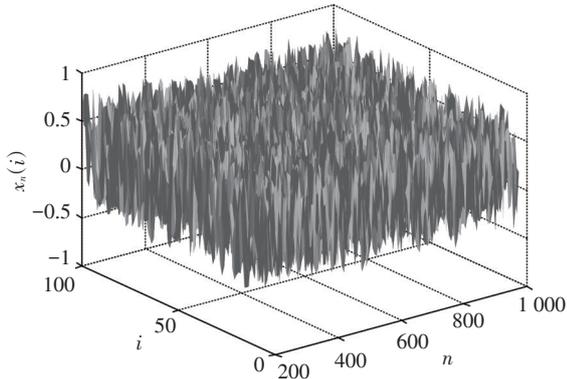


图5 单向耦合映像格子的时空演化

按照图1中三个聚类的网络示意图可以写出各个节点的连接方式的耦合矩阵 $A = (a_{ij})_{14 \times 14}$ 为

$$A = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -4 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -4 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -3 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & -4 \end{bmatrix} \quad (28)$$

文中设计控制器的形式如下

$$u_i(m, n) = -f_i(x_i(m, n)) + g(s_i(m, n)) - \xi_i \sum_{j=1}^N a_{ij} s_j(m, n) - k_i e_i(m, n) + (\xi_i \lambda_i + \sigma_i - \hat{k}_i(m, n) - 1) \varphi_i(m, n) \quad (29)$$

含有未知参量的识别函数 $\hat{k}_i(m, n)$ 按着式(22)可表示为

$$\hat{k}_i(m, n) = k_i + \frac{1}{\delta_i} (1 - |e_i(m, n)|) (\hat{k}_i(m, n) - k_i) \quad (30)$$

其中,识别函数的初值定义为随机值,可调参数取值为 $k_i = 0.5$ 和 $\delta_i = 2$ 。

在仿真模拟的过程中,网络节点的状态方程和

目标系统的空间坐标被分为 $m = 100$ 个格点,所有网络节点的状态方程和目标系统状态变量的初值都在 $(-1, 1)$ 区间内随机取值。未知参量的初值在 $(-2, 3)$ 区间内随机取值。网络节点的状态方程和目标系统满足周期性边界条件为: $x_i(1, n) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 14$), $x_i(102, n) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 14$); $s_i(1, n) = 0$, $s_i(102, n) = 0$; $k_i(1, n) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 14$), $k_i(102, n) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 14$)。

图6~图19所展示的是聚类中各节点与目标系统的误差随时间和空间变化的结果。

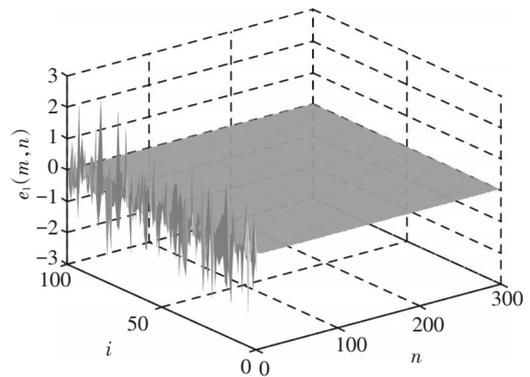


图6 误差变量 $e_1(m, n)$ 的时空演化

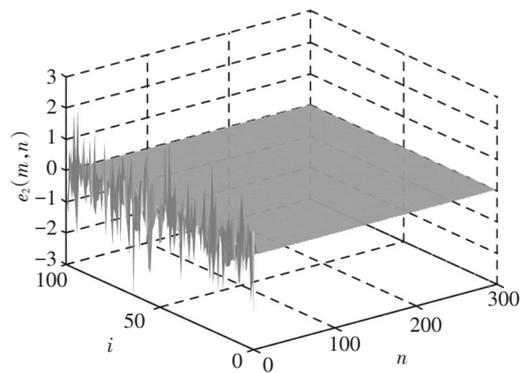


图7 误差变量 $e_2(m, n)$ 的时空演化

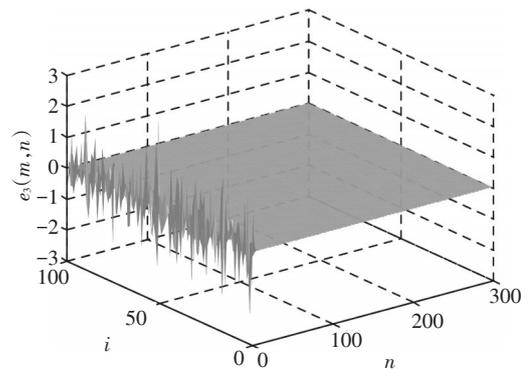


图8 误差变量 $e_3(m, n)$ 的时空演化

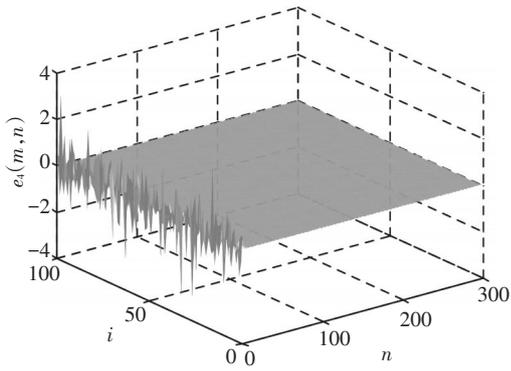


图9 误差变量 $e_4(m,n)$ 的时空演化

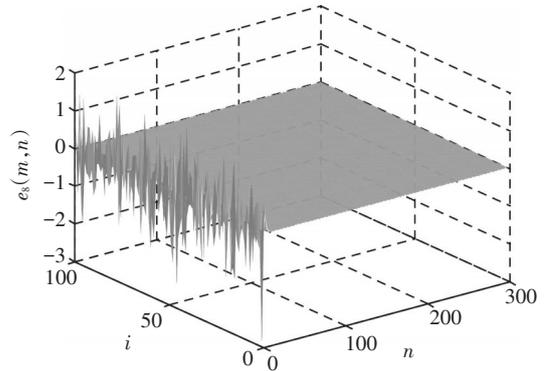


图13 误差变量 $e_8(m,n)$ 的时空演化

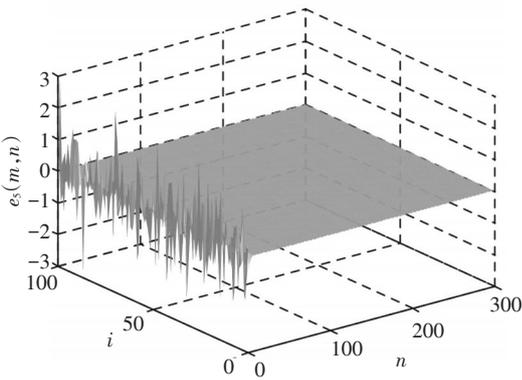


图10 误差变量 $e_5(m,n)$ 的时空演化

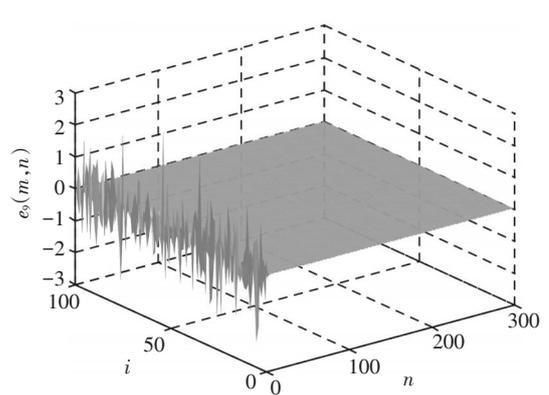


图14 误差变量 $e_9(m,n)$ 的时空演化

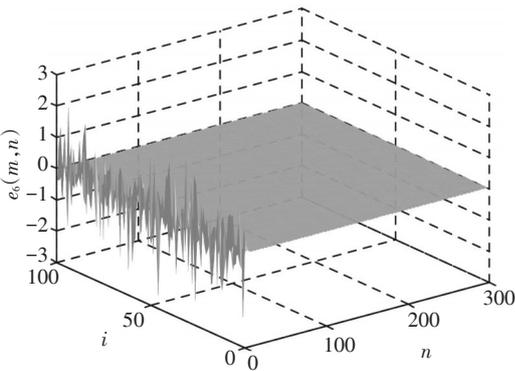


图11 误差变量 $e_6(m,n)$ 的时空演化

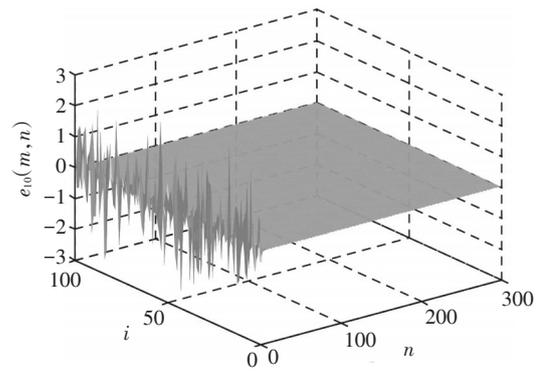


图15 误差变量 $e_{10}(m,n)$ 的时空演化

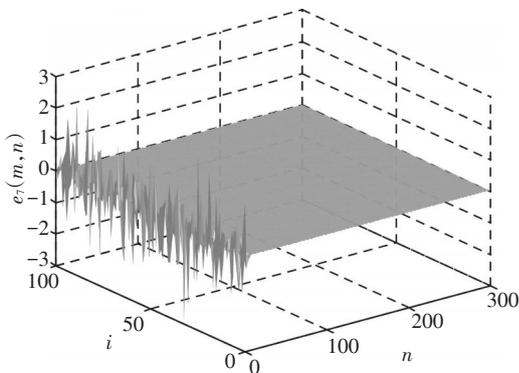


图12 误差变量 $e_7(m,n)$ 的时空演化

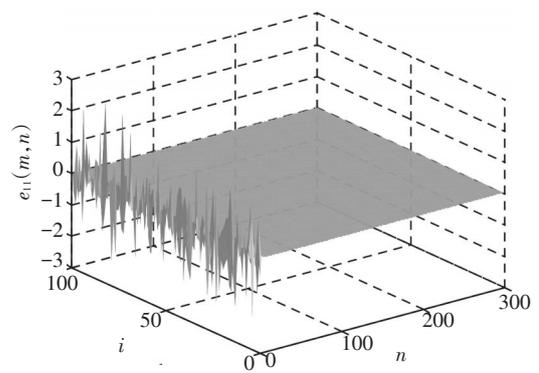
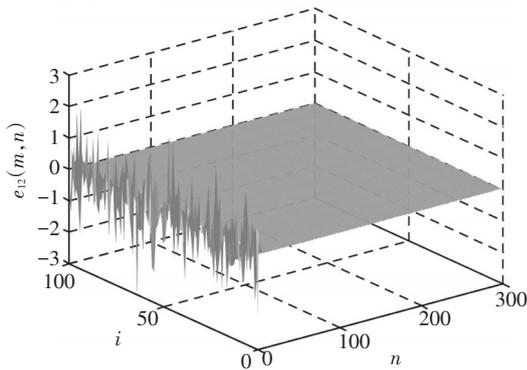
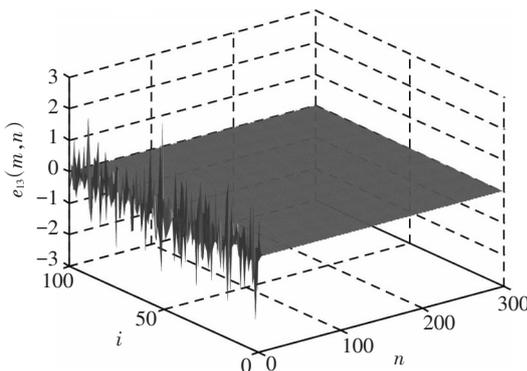
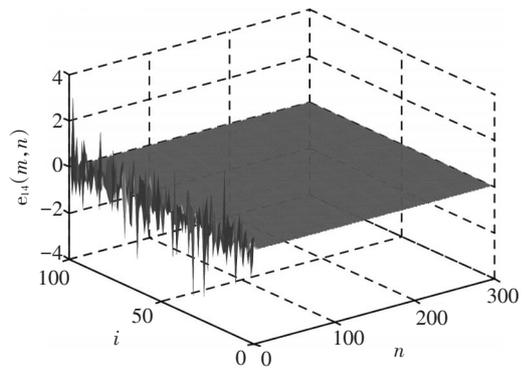
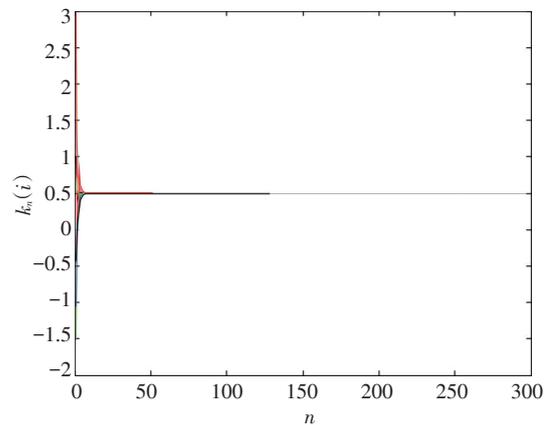


图16 误差变量 $e_{11}(m,n)$ 的时空演化

图17 误差变量 $e_{12}(m, n)$ 的时空演化图18 误差变量 $e_{13}(m, n)$ 的时空演化图19 误差变量 $e_{14}(m, n)$ 的时空演化

从图中可以看出,在网络节点的状态方程和目标系统状态变量随机取初值的情况下,在时间 $n=10$ 之前误差有明显的波动,但在此之后非常短暂的时间内,误差快速的趋于零,表明时空网络达到了聚类同步。

仿真模拟发现,100个空间格点的不确定参量 $k_n(i)$ 随时间变化的趋势大致相似。图20展示的是任取空间格点 $m=30$ 时各个节点的未知参量随时间的变化规律。

图20 不确定参量 $k_n(i)$ 随时间的变化

由图可以看出,由于初值不同,未知参量经过一段时间的波动之后,当时间在 $n=10$ 附近时未知参量 $k_n(i)$ 最终趋于定值 $k_n(i)=0.5$,并且在以后的时间里一直保持稳定状态。因此,通过式(22)可以对未知参量 $k_n(i)$ 进行有效的识别。在数值仿真中发现,当式(16)成立时,通过调节参量 ξ_i 、 δ_i 以及 σ_i ,可以实现时空网络的聚类同步和未知参量的识别。

3 结论

研究了异结构离散型时空网络的聚类同步问题。通过构造 Lyapunov 函数设计了网络同步控制器的表达形式,同时得到了未知参量的更新规则,并且对未知参量进行了识别。选用具有时空混沌行为的激光相位共轭波空间扩展系统、Gibbs 电光时空混沌模型、Bragg 声光时空混沌模型作为三个聚类的网络节点,以单向耦合映像格子的动力学方程作为目标系统为例进行仿真模拟,验证了聚类同步的有效性。仿真结果表明,对含有不同类型节点的时空网络加入控制器,经过一段时间的演化,并且通过调节参量 ξ_i 、 δ_i 以及 σ_i ,在时间 $n=10$ 附近时未知参量 $k_n(i)$ 最终趋于定值 $k_n(i)=0.5$,与此同时,网络和目标系统之间的误差趋于零,从而表明,异结构离散型时空网络的聚类同步可以实现。

参考文献

- [1] STROGATZ S H. Exploring complex networks[J]. Nature, 2001, 410(8):268-276.

- [2] PAGAN G A I, AIELLO M. The power grid as a complex network: a survey[J]. *Physica A*, 2013, 392(11):2688-2700.
- [3] TANG J J, WANG Y H, LIU F. Characterizing traffic time series based on complex network theory[J]. *Physica A*, 2013, 392(18):4192-4201.
- [4] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684):440-442.
- [5] Barabási A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439):509-512.
- [6] CAI G L, JIANG S Q, CAI S M, et al. Cluster synchronization of uncertain complex networks with desynchronizing impulse[J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(12):109-116.
- [7] CAI G L, YAO Q, SHAO H J. Global synchronization of weighted cellular neural network with time-varying coupling delays[J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, 2012, 17(17): 3843-3847.
- [8] CAI G L, SHAO H J. Synchronization-based approach for parameters identification in delayed chaotic network[J]. *Chin Phys B*, 2010, 19(6):060507.
- [9] CAI S, HAO J, HE Q, et al. New results on synchronization of chaotic systems with time-varying delays via intermittent control[J]. *Nonlinear Dynam*, 2012, 67(1): 393-402.
- [10] YU C B, QIN J H, GAO H J. Cluster synchronization in directed networks of partial-state coupled linear systems under pinning control[J]. *Automatica*, 2014, 50(9): 2341-2349.
- [11] MA Q, LU J W. Cluster synchronization for directed complex dynamical networks via pinning control[J]. *Neurocomputing*, 2013, 101(3):354-360.
- [12] ZHANG W B, TANG Y, FANG J A, et al. Exponential cluster synchronization of impulsive delayed genetic oscillators with external disturbances[J]. *Chaos*, 2011, 21(4): 043137.
- [13] WANG Y L, CAO J D. Cluster synchronization in nonlinearly coupled delayed networks of non-identical dynamic systems[J]. *Nonlinear Anal Real World Appl*, 2013, 14(14):842-851.
- [14] ZHANG J B, MA Z J, ZHANG G. Cluster synchronization induced by one-node clusters in networks with asymmetric negative couplings[J]. *Chaos*, 2013, 23(4):043128.
- [15] TANG Z, FENG J W. Adaptive cluster synchronization for non delayed and delayed coupling complex networks with non identical nodes[J]. *Abstr Appl Anal*, 2013, 2013(2013):233-242.
- [16] WU Z Y, FU X C. Cluster projective synchronization between community networks with non identical nodes[J]. *Phys A*, 2012, 391(391):6190-6198.
- [17] WU W, ZHOU W J, CHEN T P. Cluster synchronization of linearly coupled complex networks under pinning control[J]. *IEEE Trans Circuits Syst Part I: Regul. Pap*, 2009, 56(4):829-839.
- [18] CAO G L, JIANG S Q, CAI S M, et al. Cluster synchronization of overlapping uncertain complex networks with time-varying impulse disturbances[J]. *Nonlinear Dyn*, 2015, 80(1):503-513.
- [19] JIANG S Q, CAI G L, CAI S M, et al. Adaptive cluster general projective synchronization of complex dynamic networks in finite time[J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 2015, 28(1-3):194-200.
- [20] SU H S, RONG Z H, CHEN M Z Q, et al. Decentralized adaptive pinning control for cluster synchronization of complex dynamical networks[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2010, 43(1):417-420.
- [21] SU H S, RONG Z H, CHEN M Z Q, et al. Pinning control or cluster synchronization of complex dynamical networks [J]. *IEEE Trans Cybern*, 2013, 43(1):394-399.
- [22] BAGARELLO F, FRING A. Non-self-adjoint model of a two-dimensional non commutative space with an unbounded metric[J]. *Phys Rev A*, 2013, 88(4):109-112.
- [23] CAI S M, ZHOU P P, LIU Z R. Pinning synchronization of hybrid-coupled directed delayed dynamical network via intermittent control[J]. *Chaos*, 2014, 24(3):033102.
- [24] LI H, NING Z, YIN Y, et al. Synchronization and state estimation for singular complex dynamical networks with time-varying delays[J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, 2013, 18(18):194-208.
- [25] WANG L H, DING W, CHEN D. Synchronization schemes of a class of fuzzy cellular neural networks based on adaptive control[J]. *Phys Lett A*, 2010, 374(13):1440-1449.
- [26] CAI G L, YAO Q, SHAO H J. Global synchronization of weighted cellular neural network with time-varying coupling delays[J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, 2012, 17(17):3843-3847.
- [26] SUN Y Z, LI W, RUAN J. Finite-time generalized outer synchronization between two different complex networks [J]. *Commun Theor Phys*, 2012, 58(11):697-703.
- [26] YANG Y Q, CAO J D. Exponential synchronization of the complex dynamical networks with a coupling delay and impulsive effects[J]. *Nonlinear Anal RWA*, 2010, 11(3): 1650-1659.
- [27] TAURO C B, TAMARI F A, GLEISTER P M. Synchronization in lattice-embedded scale-free networks[J]. *Physica*

- 2010, 5(1): 15-25.
- [5] 张粉英, 张勇. 非线性光学效应及其应用[J]. 物理与工程, 2004, 14(2): 35-39.
- [6] 杜凯. 高品质三元量子点的制备与非线性光学性能研究[D]. 合肥: 解放军电子工程学院, 2014.
- [7] ELLINGSON R J, BEARD M C, JHONSON. Highly efficient multiple exciton generation in colloidal PbSe and PbS quantum dots[J]. Nano Letters, 2014, 5(5): 865-871.
- [8] GARLAND J C, TANNER D B. Electrical transport and optic properties of inhomogeneous media AIP conf[J]. Proc, 1978: 40.
- [9] DU K, MU X Y, YU D B, et al. Synthesis and non-linear optical properties of high quality ternary Cd,Pb_{1-x}Se quantum dots[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1549-1553.
- [10] HE J, LIU S Y, ZHONG M Z, et al. Two-photon Absorption in ZnO/ZnS core-shell quantum dots[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(2): 250.
- [11] MA Guo-hong, SUN Wan-xin, TANG Sing-hai, et al. Size and dielectric dependence of the third-order nonlinear optical response of Au nano-crystals embedded in matrices[J]. Opt Lett, 2002, 27(12): 1043-1045.
- [12] 杜凯, 王峰, 张金花, 等. 高品质三元 CdSe_{0.5}S_{0.5} 量子点的控制合成和非线性光学性能研究[J]. 材料导报, 2014, 28(23): 214.
- [13] WEI S, SAMPATHI J, GUO Z, et al. Nanoporous PMMA-quantum dots nanocomposite fibers toward biomedical applications[J]. Polymer, 2011, 52: 5817-5829.
- [14] AI Xi-cheng, FEI H Sh, YANG Y Q. Polar enhancement of the nonlinear optical properties of Fe₂O₃ microcrystallites[J]. J Luminescence, 1994(60): 364-367.
- [15] AI Xi-cheng, FEI H Sh, YANG Y Q. Polar enhancement of the nonlinear optical properties of Fe₂O₃ microcrystallites[J]. J Luminescence, 1994(60): 364-367.
- [16] ZHONG J S, XIANG W D, ZHAO H J. Synthesis, characterization and third-order nonlinear optical properties of copper quantum dots embedded in sodium borosilicate glass [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 537: 269.

(上接第4页)

- [6] 张良, 刘红霞. 长波红外连续变焦光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1279-1281.
- [7] 贾星蕊, 李训牛, 王海洋, 等. 大变倍比长波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2012, 34(8): 463-466.
- [8] 程伟宁. 中长波共孔径光学系统设计[J]. 光电技术应用, 2016, 31(3): 1-3.
- [9] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 153-163.
- [10] 陈卫宁, 杨洪涛, 刘伟, 等. 变焦凸轮曲线的优化设计方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1535-1539.

(上接第31页)

- A, 2012, 391(3): 834-842.
- [28] WANG S G, YAO H X, ZHENG S. A novel criterion for cluster synchronization of complex dynamical networks with coupling time-varying delays[J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simul, 2012, 17(7): 2997-3004.
- [29] Lü L, LI Y, FAN X, et al. Outer synchronization between uncertain complex networks based on back stepping design [J]. Nonlinear Dyn, 2013, 73(1-2): 767-773.
- [30] LENG H, WU Z Y. Cluster synchronization of community network with distributed time delays via impulsive control [J]. Chinese Physics B, 2016, 15(11): 159-166.
- [31] FAN H, ZHAO Y, FENG J. Cluster synchronization in non-linearly coupled impulsive networks with non-identical nodes and time-varying delays[J]. Let Control Theory & Applications, 2016, 10(7): 762-771.
- [32] DONG H, YE D, FENG J, et al. Almost sure cluster synchronization of Markovian switching complex networks with stochastic noise via decentralized adaptive pinning control[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 87(2): 727-739.
- [33] WANG Y, MA Z, CAO J, et al. Adaptive cluster synchronization in directed networks with nonidentical nonlinear dynamics[J]. Complexity, 2016, 21: 380-387.