

7-30-2020

## Pinning Control for Synchronization of HR Biological Neural Networks: Linear Active Disturbance Rejection Approach

Wei Wei

*School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;*

Wen Jiao

*School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Pinning Control for Synchronization of HR Biological Neural Networks:Linear Active Disturbance Rejection Approach

### Abstract

**Abstract:** Synchronization of a complex network whose nodes are Hindmarsh-Rose biological neurons was considered. Coupling strengths of the whole network were always taken as the tuning variables. However, *coupling strengths may not be changeable*. In addition, synchronization was affected by *different disturbances*. In view of above factors, pinning control was utilized and linear active disturbance rejection control (LADRC) was designed. By this approach, synchronization was achieved in according to synchronization errors of the controlled nodes and the couplings among nodes. In the simulations, *coupling strength was fixed at a relative small value*, and no external disturbance case and external disturbance existing case were considered. Simulation results confirm that LADRC is able to estimate and compensate disturbances in real time, which guarantee nice performance of synchronization. Compared with other reported synchronization approaches, *LADRC is less dependent of accurate model of networks, and robust enough to disturbances*.

### Keywords

complex networks, biological neuron, LADRC, synchronization

### Recommended Citation

Wei Wei, Wen Jiao. Pinning Control for Synchronization of HR Biological Neural Networks:Linear Active Disturbance Rejection Approach[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 3070-3075.

# 基于牵制控制的 HR 生物神经网络的线性自抗扰同步

魏伟, 闻娇

(北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048)

**摘要:** 考虑以 Hindmarsh-Rose 生物神经元为节点的复杂网络同步问题。鉴于同步算法通常调节节点间的耦合强度, 而耦合强度可能无法改变; 此外, 同步受到各种干扰的影响, 基于牵制控制策略, 设计线性自抗扰算法, 依据受控节点的同步偏差以及网络节点间的耦合实现网络同步。仿真中, 固定耦合强度为较小的数值, 分别获得了干扰不存在和存在时的网络同步。结果表明, 线性自抗扰控制能够实时估计和补偿干扰, 保证网络同步性能, 避免了同步算法过于依赖网络模型、抗扰性能不佳的不足。

**关键词:** 复杂网络; 生物神经元; 线性自抗扰; 同步

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 12-3070-06

## Pinning Control for Synchronization of HR Biological Neural Networks: Linear Active Disturbance Rejection Approach

Wei Wei, Wen Jiao

(School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Synchronization of a complex network whose nodes are Hindmarsh-Rose biological neurons was considered. Coupling strengths of the whole network were always taken as the tuning variables. However, *coupling strengths may not be changeable*. In addition, synchronization was affected by *different disturbances*. In view of above factors, pinning control was utilized and linear active disturbance rejection control (LADRC) was designed. By this approach, synchronization was achieved in according to synchronization errors of the controlled nodes and the couplings among nodes. In the simulations, *coupling strength was fixed at a relative small value*, and no external disturbance case and external disturbance existing case were considered. Simulation results confirm that LADRC is able to estimate and compensate disturbances in real time, which guarantee nice performance of synchronization. Compared with other reported synchronization approaches, LADRC is *less dependent of accurate model of networks, and robust enough to disturbances*.

**Keywords:** complex networks; biological neuron; LADRC; synchronization

## 引言

互联网、有(无)线通信网、电力网、生态网络、



收稿日期: 2014-08-08 修回日期: 2015-02-12;  
基金项目: 北京市自然科学基金(4132005); 北京市属  
高等学校高层次人才引进与培养计划项目  
(YETP1449); 科研基地建设—科技创新平台—现代  
商科特色项目(PXM2015\_014213\_000063);  
作者简介: 魏伟(1984-), 男, 江西, 博士, 副教授,  
研究方向为自抗扰控制及应用。

城市交通网、政治、经济、社会关系网等诸多复杂网络在现实生活中普遍存在, 已经成为人们日常生活中不可或缺的部分。在这些网络中, 不同个体可视为网络中的一个节点, 个体间的关系可视为连接节点的边。网络节点通过连接它们的边相互作用, 共同实现网络功能。同步, 自然界普遍存在且非常重要的非线性现象在复杂网络中同样存在<sup>[1]</sup>。网络同步在保密通信、核磁共振、激光设备、超导材料

<http://www.china-simulation.com>

• 3070 •

等领域起着极为重要的作用<sup>[1]</sup>。在过去的十几年里, 数学、物理、生物、工程以及社会科学等各领域学者对复杂网络及其同步研究都产生了浓厚的兴趣<sup>[1-3]</sup>。研究人员从不同角度深入研究了复杂网络的完全同步、相同步、广义同步等<sup>[1]</sup>。动力网络主稳定函数法、Lyapunov 直接法、负反馈法、主-被动分解法、耗散耦合法等成为复杂网络同步稳定性的主要研究方法<sup>[4-5]</sup>。

然而, 与简单系统的同步相比, 复杂网络同步因网络拓扑结构以及网络节点自身的双重复杂性变得更为复杂。陆君安<sup>[6]</sup>等给出了网络同步、同步态、同步轨的更为准确的概念。牵制控制因其仅对网络中的少数节点施加控制即可获得整个网络的同步, 极大地减少了同步算法的计算量、提高了控制效率。利用自适应牵制控制获得复杂网络的同步已有众多结果<sup>[7-12]</sup>。文献[7]基于牵制控制策略, 设计分散自适应控制律调节网络耦合强度获得复杂网络的同步; Su 等<sup>[8]</sup>设计自适应牵制控制调整耦合强度以及反馈增益实现无向网络的聚类同步; Wang 等<sup>[9]</sup>针对具有输出耦合与延迟的复杂网络设计自适应输出同步控制律实时调节节点间的耦合强度获得网络同步; 文献[10-12]同样基于牵制控制策略, 设计自适应律获得网络同步。

显然, 牵制控制已有的研究成果中大多依据自适应律动态调节网络节点间的耦合强度以获得网络同步。然而, 实际网络的耦合强度不一定可调, 当网络耦合强度固定时如何设计控制律实现网络同步值得研究。同时, 陈关荣在分析复杂动态网络环境下控制理论所遇到的问题与挑战时指出<sup>[13]</sup>: 复杂网络同步中, 耦合强度较小时如何设计有效的牵制控制尚未解决。此外, 现有的同步控制算法通常存在较为复杂、难以工程实现、抗干扰性能不佳等不足, 这极大地影响了网络同步的性能。

本文考虑一类节点为 Hindmarsh-Rose (HR) 生物神经元的复杂网络的同步问题。网络节点间的耦合强度取较小( $<1$ )的数值, 基于牵制控制策略实现网络同步。同时, 利用线性自抗扰控制(Linear

Active Disturbance Rejection Control, LADRC)结构简单、易于实现且对外部干扰具有较强抑制能力的优良特性<sup>[14-16]</sup>, 设计 LADRC 为牵制控制节点的控制策略, 研究一类特殊的复杂网络的同步。

## 1 问题描述

### 1.1 以 Hindmarsh-Rose 生物神经元为节点的复杂网络模型

本文考虑以 Hindmarsh-Rose 生物神经元为节点的复杂网络的同步问题。Hindmarsh-Rose 生物神经元模型为<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x} = y + ax^2 - x^3 - z + I \\ \dot{y} = c - dx^2 - y \\ \dot{z} = \mu(b(x - x_0) - z) \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $x(t)$  为神经元膜电位;  $y(t)$  为与快速离子电流相关的恢复变量;  $z(t)$  为与慢速离子电流相关的自适应变量;  $I$  为外部激励电流。HR 生物神经元参数见表 1。

表 1 HR 生物神经元参数

参数	取值	参数	取值
$a$	2.8	$d$	-4.4
$b$	9	$\mu$	$10^{-3}$
$c$	0	$x_0$	0.56

以式(1)所示生物神经元为节点, 通过状态变量  $x$  间的耦合形成复杂网络, 节点间的耦合关系取为  $S$  函数( $v$  为常数,  $\rho_s$  为膜电位的阈值):

$$\gamma(x_j) = \frac{1}{1 + e^{-v(x_j - \rho_s)}}.$$

于是, 由 HR 生物神经元组成的复杂网络可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_x(x_i, y_i, z_i) + g_s \sigma(x_i) \sum_{j=1}^N a_{ij} \gamma(x_j) \\ \dot{y}_i = f_y(x_i, y_i, z_i) \\ \dot{z}_i = f_z(x_i, y_i, z_i) \\ 1 \leq i \leq N \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $V_s$  为逆转电位;  $g_s$  为耦合强度;  $a_{ij}$  为邻接矩阵  $A$  的元素。

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ 1 & i \neq j \end{cases};$$

$$\sigma(x_i) = V_s - x_i, f_x(x_i, y_i, z_i) = y_i + ax_i^2 - x_i^3 - z_i,$$

$$f_y(x_i, y_i, z_i) = c - dx_i^2 - y_i,$$

$$f_z(x_i, y_i, z_i) = \mu(b(x_i - x_0) - z_i).$$

将式(2)所示的复杂网络表示为如下紧凑形式:

$$\dot{\theta}_i = f(\theta_i) + \sigma(x_i) \sum_{j=1}^N g_{ij} \Gamma(\theta_j) \quad (3)$$

其中  $\theta_i = (x_i, y_i, z_i)^T, f = (f_x, f_y, f_z)^T, \Gamma(\theta_j) = (\gamma(x_j), 0, 0)^T, g_{ij} = g_s a_{ij}$ 。

### 1.2 复杂网络同步目标

以 HR 生物神经元为节点的复杂网络(3)的同步可定义为网络中所有节点的状态变量满足:

$$\theta_1(t) = \theta_2(t) = \dots = \theta_N(t) = s(t).$$

其中  $s(t)$  为独立系统

$$\dot{s} = f(s, t), s(t_0) = s_0 \quad (4)$$

的一个解, 它可为系统的平衡点、周期(拟周期)轨道或者混沌吸引子。

本文取  $s(t)$  为 HR 生物神经元的平衡点, 即以 HR 神经元的平衡点为复杂网络的同步目标, 基于牵制控制策略, 设计线性自抗扰控制算法, 使网络中的各节点到达平衡态。

### 1.3 受控的复杂网络

本文采用牵制控制策略, 仅控制网络中的部分节点以获得整个网络的同步, 受控的网络模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_x(x_i, y_i, z_i) + g_s \sigma(x_i) \sum_{j=1}^N a_{ij} \gamma(x_j) + u_p \\ \dot{y}_i = f_y(x_i, y_i, z_i) \\ \dot{z}_i = f_z(x_i, y_i, z_i) \\ 1 \leq i \leq N \\ 1 < p < l < N \end{cases} \quad (5)$$

写为紧凑形式:

$$\dot{\theta}_i = f(\theta_i) + \sigma(x_i) \sum_{j=1}^N g_{ij} \Gamma(\theta_j) + u$$

其中  $u = (u_p, 0, 0)^T$ 。

$u_p$  ( $0 < p < l < N$ ) 为牵制控制输入, 在牵制控制  $u_p$

的作用下使复杂网络达到同步。

## 2 线性自抗扰同步控制设计

牵制控制的核心是控制尽可能少的节点以获得整个网络的同步; 同时, 在受控节点上使用什么控制算法仍是一个非常重要的问题<sup>[13]</sup>。考虑到网络自身的复杂性、干扰对网络同步的影响以及控制算法的实现, 本文在牵制控制策略基础上对每个受控节点设计线性自抗扰控制算法以期获得整个网络的同步。

扩张状态观测器为 2 阶时, 线性自抗扰控制算法为:

$$\begin{cases} u = \frac{u_0 - z_2}{b_0} \\ u_0 = k_p(r - z_1) \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(y - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = \beta_2(y - z_1) \end{cases} \quad (6)$$

其中  $r$  为期望的输出,  $k_p, b_0$  为控制增益,  $\beta_1, \beta_2$  为扩张状态观测器参数。

依据 1.2 节所述网络同步目标, 可得以 HR 生物神经元为节点的复杂网络同步控制结构见图 1。

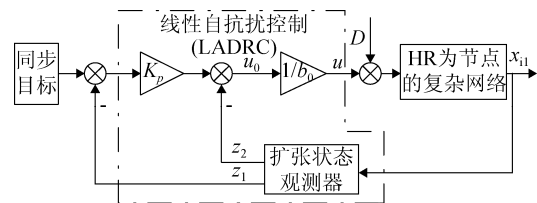


图 1 线性自抗扰同步控制结构

图中,  $D$  为系统的外部干扰, 被控复杂网络节点的输出  $y$  为  $x_{i1}$ 。当系统干扰不存在时, 线性自抗扰控制的扰动估计部分不作用; 当干扰存在时, 线性自抗扰控制的扰动估计部分实时估计并补偿扰动对同步性能的影响, 以确保良好的同步效果。

## 3 仿真研究

根据前述同步目标及同步控制设计方法, 利用 Matlab/Simulink 环境对以 HR 生物神经元为节点的复杂网络同步进行仿真研究。仿真中, 取网络节点

个数为 4, 固定神经元节点间的耦合强度, 以 1 个神经元为牵制控制节点, 仅控制该节点获得整个网络的同步。为考察线性自抗扰控制抵抗扰动、保证网络同步性能的能力, 仿真中考虑干扰不存在和干扰存在 2 种情况, 分别观察复杂网络的同步效果。仿真参数取值见表 2。

仿真时间为 5000 ms, 同步目标为 HR 生物神经元的平衡点  $\theta_r = (0, 0, 5)^T$ 。做两组实验: 第 I 组在没有任何干扰的情况下进行; 第 II 组加入正弦干扰, 验证线性自抗扰同步对扰动的抑制能力。

实验 I: 没有干扰时复杂网络的线性自抗扰同步。

仿真中复杂网络参数及控制参数见表 2, 同步效果见图 2。

表 2 复杂网络同步参数( $i=1,2,3,4$ )

参数	取值	参数	取值
$V_s$	2	$d_1$	-4.4
$v$	10	$d_2$	-4.8
$\rho_s$	-0.25	$d_3$	-5.3
$g_s$	0.44	$d_4$	-5.8
$I_i$	2.6	$k_p$	0.4
$x_i(0)$	6/8/4/1	$\beta_1$	8
$y_i(0)$	6/8/4/1	$\beta_2$	16
$z_i(0)$	6/8/4/1	$b_0$	0.04

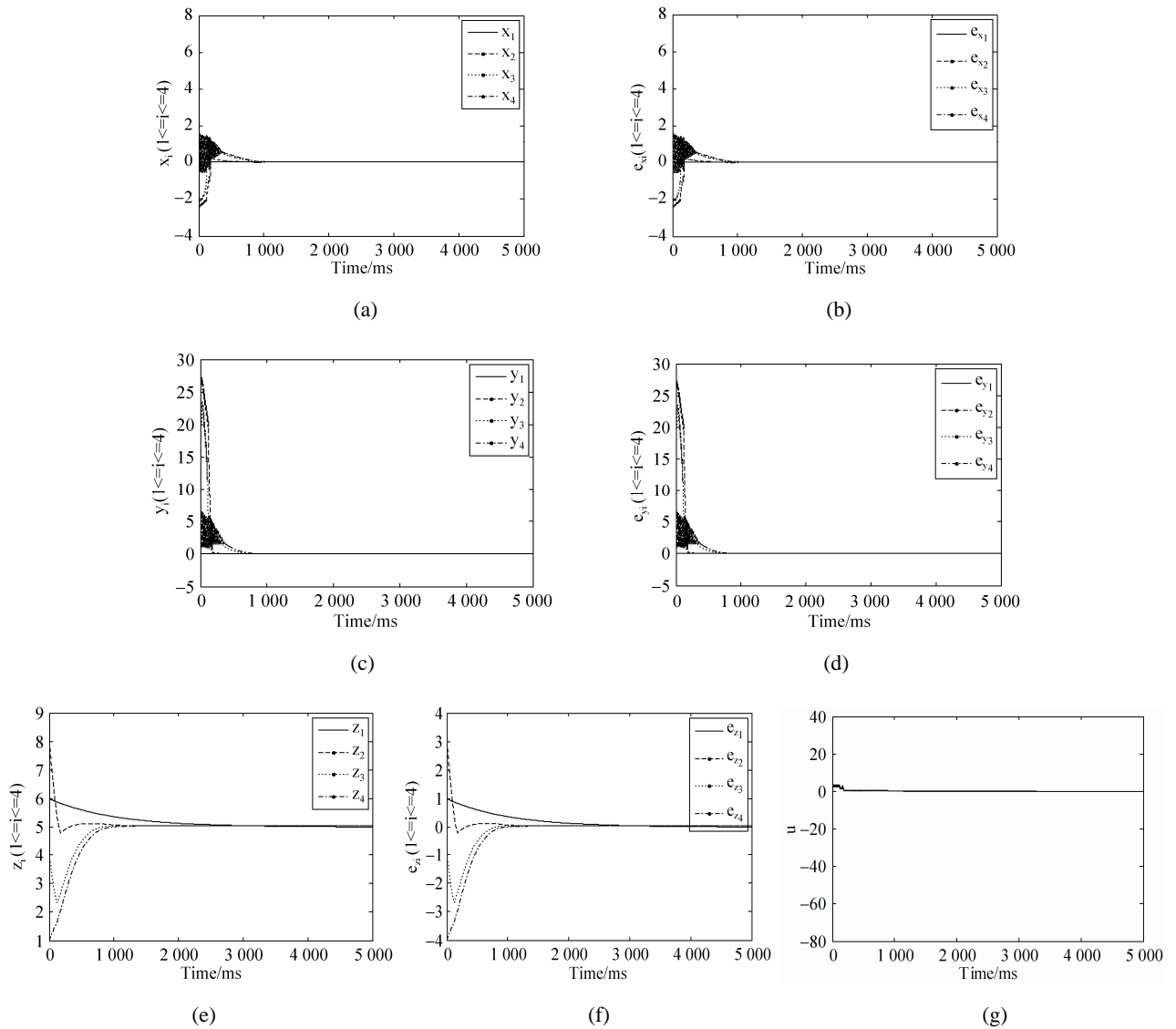


图 2 节点为 HR 生物神经元的复杂网络同步效果(无干扰时)



由图 2 可见, 无干扰时, 线性自抗扰控制可获得良好的网络同步效果。

实验 II: 正弦干扰存在时复杂网络的线性自抗扰同步。

为检验线性自抗扰控制对干扰的抑制能力, 在仿真中加入正弦干扰  $D(t) = \sin(t)$  (如图 3 所示), 网络同步结构如图 1 所示。仿真中, 复杂网络参数及控制参数仍为表 2 中所示数值, 同步效果如图 4 所示。

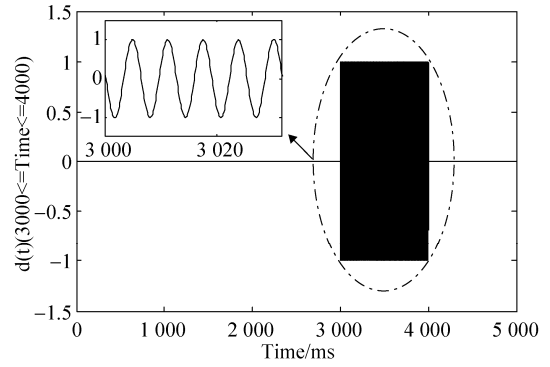


图 3 正弦干扰

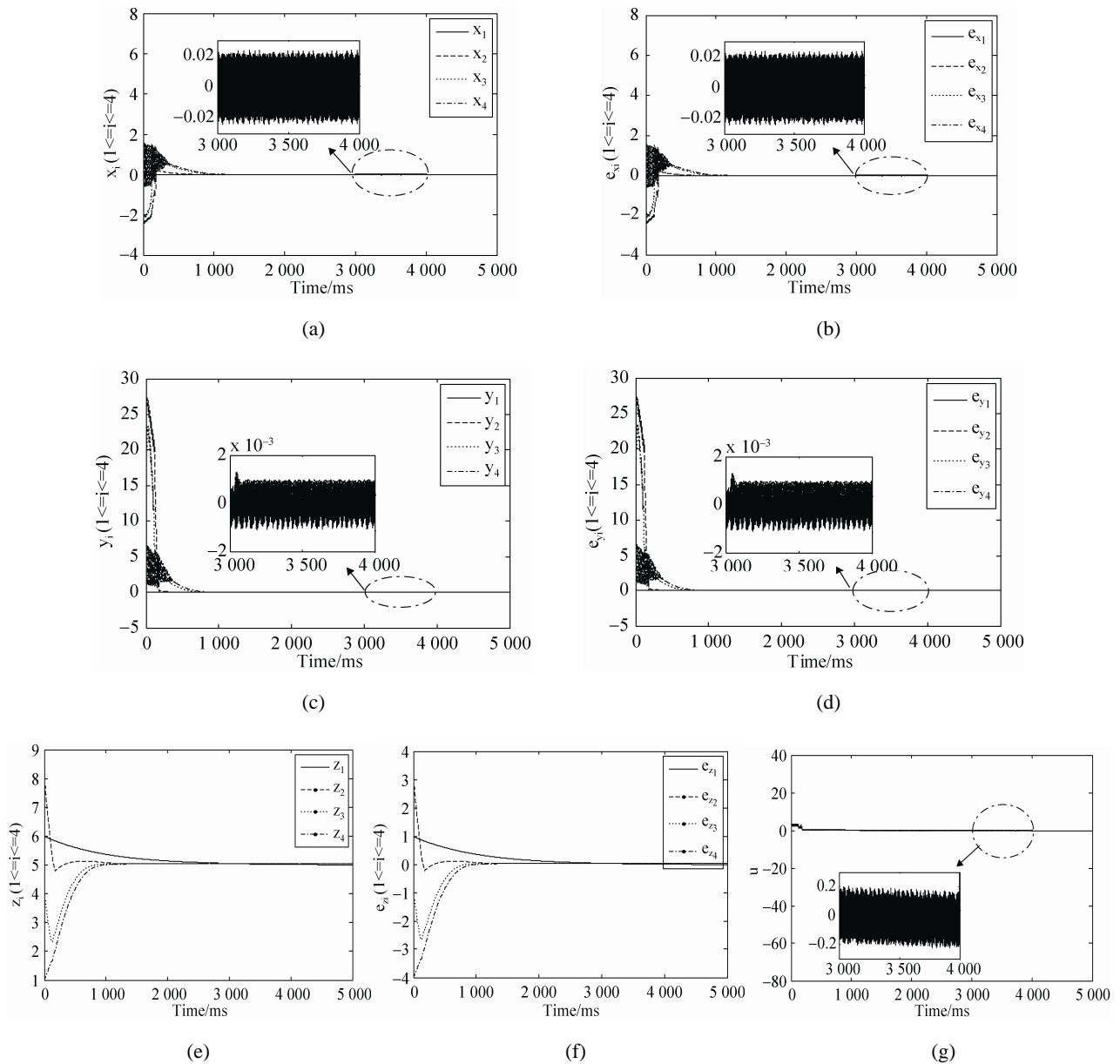


图 4 节点为 HR 生物神经元的复杂网络同步效果(正弦干扰存在时)



由图 4 可见, 即使存在干扰, 线性自抗扰控制仍能实时地估计并抑制扰动, 保证良好的网络同步效果。

## 4 结论

基于牵制控制策略, 本文考虑了一类以 HR 生物神经元为节点的复杂网络的同步问题。固定网络节点间的耦合强度为较小的数值, 利用抗干扰性能优异的线性自抗扰控制获得了一类特殊的复杂网络的同步。需要指出的是采用牵制控制策略获得复杂网络的同步, 受控节点和未受控节点到达同步状态的速度不同。网络节点间的耦合强度直接影响到未受控网络节点到达同步状态的速度。本文研究了耦合强度较小、不可变且外部干扰存在时的网络有效同步问题, 为获得复杂网络同步提供了一种更为实际的参考方案。

## 参考文献:

- [1] 吕金虎. 复杂网络的同步: 理论、方法、应用与展望[J]. 力学进展, 2008, 38(6): 713-722.
- [2] Zhou Jin, Lu Junan, Lü Jinhui. Pinning adaptive synchronization of a general complex dynamical network [J]. *Automatica* (S0005-1098), 2008, 44(4): 996-1003.
- [3] Lü, Jinhui, Chen, Guanrong. A time-varying complex dynamical network model and its controlled synchronization criteria [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control* (S0018-9286), 2005, 50(6): 841-846.
- [4] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [5] 郭盈盈. 基于 V 稳定性理论的复杂网络稳定性分析与牵制控制方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [6] 陈娟, 陆君安, 周进. 复杂网络同步态与孤立节点解的关系 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(12): 2111-2120.
- [7] Yu Wenwu, Pietro Delellis, Chen Guangrong, *et al.* Distributed adaptive control of synchronization in complex networks [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control* (S0018-9286), 2012, 57(8): 2153-2158.
- [8] Su Housheng, Rong Zhihai, Michael Z Q, *et al.* Decentralized adaptive pinning control for cluster synchronization of complex dynamical networks [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics* (S1083-4419), 2013, 43(1): 394-399.
- [9] Wang Jinliang, Wu Huaining. Adaptive output synchronization of complex delayed dynamical networks with output coupling [J]. *Neurocomputing* (S0925-2312), 2014, 142(10): 174-181.
- [10] Zhu Darui, Liu Chongxin, Yan Bingnan. Modeling and adaptive pinning synchronization control for a chaotic-motion motor in complex network [J]. *Physics Letters A* (S0375-9601), 2014, 378(5): 514-518.
- [11] Xiao Jingwen, Wang Zhiwei, Miao Wentuan, *et al.* Adaptive pinning control for the projective synchronization of drive-response dynamical networks [J]. *Applied Mathematics and Computation* (S0096-3003), 2012, 219(5): 2780-2788.
- [12] Nian Fuzong, Zhao Qianchuan. Pinning synchronization with low energy cost [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* (S1007-5704), 2014, 19(4): 930-940.
- [13] 陈关荣. 复杂动态网络环境下控制理论遇到的问题与挑战 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(4): 312-321.
- [14] 黄一, 薛文超, 赵春哲. 自抗扰控制纵横谈 [J]. *系统科学与数学*, 2011, 31(9): 1111-1129.
- [15] 高志强. 自抗扰控制思想探究 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1498-1510.
- [16] Gao Zhiqiang. Engineering cybernetics: 60 years in the making [J]. *Control Theory and Technology* (S2095-6983), 2014, 12(2): 97-109.
- [17] Paolo Checco, Marco Righero, Mario Biey, *et al.* Synchronization in networks of Hindmarsh-Rose neurons [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs* (S1549-7747), 2008, 55(12): 1274-1278.