

文章编号: 1001-0920(2012)01-0022-06

一种基于能量指数的复杂网络牵制控制策略

蒋强^{1,2}, 肖建¹, 郑高¹, 张勇¹, 王梦玲^{1,3}

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 成都 610031; 2. 乐山师范学院 物理与电子工程学院, 四川 乐山 614000; 3. 斯特拉斯克莱德大学 电子与电气工程系, 格拉斯哥 G1 1QE, 英国)

摘要: 针对复杂大系统控制中, 现有牵制控制策略仅依据拓扑结构而存在的不足和控制器设计中控制参数选择简单(视为常数)的问题, 引入了能量指数的概念, 提出一种新的牵制控制策略——能量指数法. 该方法同时考虑节点对于网络的贡献力和节点的网络特性, 给出了引入能量指数后的网络动态模型描述, 并将节点能量指数用于自适应控制器设计, 得到了控制律设计新方法. 与现有方法比较, 所提方法可使系统收敛更快, 更容易实现同步, 从而表明基于能量指数的牵制策略和自适应控制器设计方法均是有效的, 在电力、交通以及传染病防治等各种复杂网络中都具有实际应用价值.

关键词: 复杂网络同步; 牵制控制; 节点选择; 能量指数

中图分类号: TP273; TP11

文献标识码: A

A pinning scheme in complex networks based on energy index

JIANG Qiang^{1,2}, XIAO Jian¹, ZHENG Gao¹, ZHANG Yong¹, WANG Meng-ling^{1,3}

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Department of Physics and Electrics Engineering, Leshan Normal University, Leshan 614000, China; 3. Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow G1 1QE, The United Kingdom. Correspondent: JIANG Qiang, E-mail: ruihe0406@163.com)

Abstract: In complex network systems, two problems in previous studies exist, one is the shortage of pinning control, the other is simply set controller's parameters as constants. Therefore, a new method, energy index pinning scheme is proposed, which both considers network's degree and single node energy. A complex system dynamic model considering energy index is obtained. Furthermore, a new method of the law of controller in designing controller is given. By the comparison with the pervious methods, better performance is obtained. Theory analysis and numerical experiment show that the proposed method is more efficient and practical.

Key words: complex networks synchronization; pinning control; node choose; energy index

1 引言

Wattz 等人发现小世界效应和 Barabasi 等人发现无标度特性掀起了复杂网络研究的热潮, 引起了物理、生物、工程、社会等各界的广泛关注, 于是, 同步问题成为复杂网络研究中的热点问题^[1-7]. 为了改善同步性能需要外加控制器, 但在实际中对所有节点加控制器是不经济的. 研究表明, 仅对网络中部分节点进行控制即可达到控制整个网络节点的目的^[2], 这就是 Grigoriev 等人提出的牵制控制思想. 牵制控制作为实现复杂网络同步最有效的方法主要面临两个问题: 控制节点选择和控制器设计. 对于后者有较多的

研究成果^[4-17], 但都集中在控制器自适应律系数是常数的情况, 且没有给出确定方法. 对于前者的研究相对较少, 目前公认的牵制策略有随机牵制和特定牵制两种. 文献 [5] 对随机选择和根据度的特定牵制策略进行了比较, 主要根据节点度的大小选择控制节点^[6]. Wang 等人^[7]通过对无标度网络研究得出, 特定牵制控制(控制度大的节点)要比随机牵制控制在控制无标度网络上更有效, 且少数度大的节点决定着网络的稳定性. Li 等人^[8]考虑了更一般的复杂网络动态模型的牵制控制问题, 并通过状态反馈控制将系统镇定在平衡点上. [9] 提出了根据度的大小来选择控制节点.

收稿日期: 2010-07-15; 修回日期: 2011-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674057); 四川省教育厅青年基金项目(09ZB028).

作者简介: 蒋强(1973—), 男, 讲师, 博士生, 从事复杂网络、非线性控制等研究; 肖建(1950—), 男, 教授, 博士, 从事智能控制系统等研究.

[10]根据网络拓扑、耦合强度和反馈增益提出了可牵制全局同步稳定的充分条件.但是,现有成果都是基于度的,只考虑了网络拓扑特性即连接矩阵,这样判断出的节点重要性是不全面的.

本文引入能量指数的概念,提出了更具一般性的基于能量指数的复杂网络牵制策略.同时考虑节点特性和网络特性,将节点能量指数用于自适应控制器设计,建立了控制器与节点、网络间的直接联系,解决了之前忽略的控制参数确定问题.

2 复杂网络牵制控制问题描述

考虑通用复杂动态网络模型^[3]

$$\begin{aligned} \dot{X}_i &= F(X_i) + \varsigma \sum_{j=1, j \neq i}^N R_{ij} H(X_j - X_i), \\ i &= 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: \dot{X}_i 为第 i 节点的状态方程; $\dot{X} = F(X)$ 为各节点的动力学行为; ς 为网络节点间的耦合强度; R_{ij} 为网络节点的耦合矩阵,反映网络的拓扑结构,是对称阵且每行和为零; H 为节点内连矩阵; N 为网络节点数.则有

$$R_{ij} = R_{ji}, \quad (2)$$

$$R_{ii} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N R_{ji}. \quad (3)$$

于是,复杂网络(1)可改写为

$$\dot{X}_i = F(X_i) + \varsigma \sum_{j=1}^N R_{ij} H X_j, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

定义 1 若式(1)满足如下条件:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|X(t) - S(t)\|_2 = 0, \quad (5)$$

则网络同步.其中: $X(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_N(t)]^T$; $S(t)$ 为同步状态,也称同步映射,可以是平衡点、周期轨道和混沌吸引子等.假设 $\delta \in (0, 1)$, 令 $l = \lceil \delta N \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ 为提取实数 δN 的整数部分, l 为网络中需要增加控制器的节点数量.复杂网络的牵制控制可以描述为

$$\begin{aligned} \dot{X}_i &= F(X_i) + \varsigma \sum_{j=1}^N R_{ij} H X_j - u_i, \quad i = 1, 2, \dots, l; \\ \dot{X}_k &= F(X_k) + \varsigma \sum_{j=1}^N R_{kj} H X_j, \quad k = l+1, l+2, \dots, N; \end{aligned} \quad (6)$$

其中 u_i 为第 i 节点的控制量.偏差描述为

$$e_i(t) = x_i(t) - s(t). \quad (7)$$

3 能量指数牵制策略

3.1 能量指数法

定义 2 节点的初始能量来源于网络本身,对于工程网络而言可以是节点的设计容量,如电力网络

节点的容量对于社会网络而言可以是节点的职位、学历等指标的加权.

假设 1 复杂网络的外连接矩阵 R_{ij} 是对称阵,且满足式(3),耦合强度 ς 是正常数,节点的初始能量 \bar{P}_{ii} 为已知.

定义 3 复杂网络节点的能量指数为

$$p_i = p_{ii} + \sum_{j=1}^l \varsigma p_{jj}, \quad 1 \leq i \leq N. \quad (8)$$

其中: p_i 为第 i 节点的网络能量指数; p_{ii} 为第 i 节点的规则化能量,有

$$p_{ii} = \frac{|\bar{p}_{ii}|}{\bar{p}_{\text{sum}}}, \quad (9)$$

\bar{p}_{ii} 为第 i 节点的初始能量,如果节点向网络提供能量,则 \bar{p}_{ii} 为正,否则为负, \bar{p}_{sum} 为网络的总能量; ς 为网络耦合强度; l 为第 i 节点的度.这是一种综合了节点自身网络特性和节点在网络中度的特性,更一般地选择重要节点的方法,适合于各种对称复杂网络.

由式(8)可知,复杂网络节点的能量指数 p_i 越大,该节点在网络中贡献越大.根据能量指数的大小选择牵制控制节点并对其进行相应控制,能更好地实现复杂网络各个节点的同步,节点的能量指数也是设计控制器的重要参数.

3.2 同步控制器设计

复杂网络同步控制器通常包含线性控制器和自适应控制器.下面分别讨论.

3.2.1 线性控制器设计及其稳定性分析

线性同步控制器通常设计为^[2-3,9] $u_i = k_i e(t)$, k_i 为常数,且没有给出选择依据.本文设计控制器为

$$u_i = p_i k_f e(t). \quad (10)$$

其中: $p_i k_f$ 为反馈增益, k_f 为反馈增益调节参数.这里引入节点能量指数 p_i , 其根据节点而变化的特性体现了针对不同节点采取不同控制力的思想.利用 Kronecker 积重写复杂网络(6), 得到

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [1_N \otimes f]x(t) + \varsigma R \otimes Hx - \\ &\quad \sigma \otimes p_i k_f [x(t) - 1_N \otimes s(t)], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= [1_N \otimes f]x(t) - 1_N \otimes f(s(t)) + \\ &\quad \varsigma R \otimes H e(t) - \sigma \otimes p_i k_f e(t), \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $e(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_N(t)]^T$.

假设 2 存在一个非负常数 α , 对于任意 t 满足

$$\begin{aligned} \|f(x(t)) - f(s(t))\|_2 &\leq \alpha \|x(t) - s(t)\|_2, \\ \forall x, s &\in R^n. \end{aligned} \quad (13)$$

定理 1 如果假设 2 成立, 且当复杂网络(11)的偏差动态系统满足条件

$$1_N \otimes \alpha + \varsigma R \otimes H - \sigma \otimes K < 0, \quad (14)$$

其中

$$K = \text{diag} \left[\underbrace{p_1 k_f, p_2 k_f, \dots, p_l k_f}_{l}, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{N-l} \right] \quad (15)$$

时关于初值指数稳定,则复杂网络系统是牵制同步的.

证明 考虑候选 Lyapunov 函数

$$V(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i^T(t) e_i(t), \quad (16)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \\ & \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N \dot{e}_i^T(t) e_i(t) + e_i^T(t) \dot{e}_i(t) \right) = \sum_{i=1}^N e_i^T(t) \dot{e}_i(t) = \\ & e^T(t) ([1_N \otimes f] x(t) - 1_N \otimes f(s(t))) + \\ & e^T(t) (\varsigma R \otimes H - \sigma \otimes K) e(t) \leq \\ & e^T(t) (1_N \otimes \alpha + \varsigma R \otimes H - \sigma \otimes K) e(t), \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $e(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_N(t)]^T$. 显然 $\bar{V} < 0$. \square

3.2.2 自适应控制器设计及稳定性分析

现有成果对复杂网络自适应控制器的设计通常采用固定常数^[4-12], 即

$$v_i = \begin{cases} -k_i e_i, & k_i = r_i \|e_i\|_2^2, \quad 1 \leq i \leq l; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (18)$$

其中 r_i 为反馈系数, 通常为常数. 得到网络动态偏差系统为

$$\dot{e}_i = \begin{cases} f(x_i(t)) - f(s(t)) + \sum_{j=1}^N \varsigma R H e_j - k_i e_i, & 1 \leq i \leq l; \\ f(x_i(t)) - f(s(t)) + \sum_{j=1}^N \varsigma R H e_j, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (19)$$

其中 $\dot{k}_i = r_i \|e_i\|_2^2, \quad 1 \leq i \leq l$.

早期的研究未给出 r_i 的选择依据, 均简单地视为常数. 本文给出了选择标准, 在设计自适应控制律时, 将能反映节点在网络中重要性差异的参数——节点能量指数作为控制律, 得到新的自适应控制器为

$$u_i = \begin{cases} q_i (x(t) - s(t)), & 1 \leq i \leq l; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (20)$$

其中: $\dot{q}_i = p_i k_f \|x(t) - s(t)\|_2^2$ 为自适应律, p_i 为节点能量指数. 这样即可建立自适应控制器与网络节点的直接关系. 重写式 (18), 得到引入能量指数后自适应控制动态偏差系统为

$$\dot{e}_i = \begin{cases} f(x_i(t)) - f(s(t)) + \sum_{j=1}^N \varsigma R H e_j - q_i e_i, & 1 \leq i \leq l; \\ f(x_i(t)) - f(s(t)) + \sum_{j=1}^N \varsigma R H e_j, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (21)$$

其中 $\dot{q}_i = p_i k_f \|e_i\|_2^2, \quad 1 \leq i \leq l$.

定理 2 若假设 2 成立且有界, 则在自适应控制 (19) 的作用下, 复杂网络自适应动态偏差系统 (20) 是关于平衡态渐近稳定的, 即复杂系统 (4) 牵制同步.

证明 假设候选 Lyapunov 函数

$$v = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i^T e_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \frac{(q_i - L)^2}{p_i k_f}, \quad (22)$$

$\dot{v} =$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N e_i^T \left(f(x_i) - f(s) + \sum_{j=1}^N \varsigma R_{ij} H e_j - q_i e_i \right) + \\ & \sum_{i=1}^l (q_i - L) \|e_i\|_2^2 \leq \\ & \sum_{i=1}^N e_i^T \left(\alpha e_i + \sum_{j=1}^N \varsigma R_{ij} H e_j - q_i e_i \right) + \\ & \sum_{i=1}^l (q_i - L) \|e_i\|_2^2 = \\ & \sum_{i=1}^N e_i^T \left(\alpha e_i + \sum_{j=1}^N \varsigma R_{ij} H e_j \right) - \sum_{i=1}^l e_i^T L e_i = e^T \Gamma e. \end{aligned} \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned} e &= (e_1, e_2, \dots, e_N)^T, \quad \Gamma = (Q + Q^T)/2, \\ Q &= (\alpha - L) \otimes 1_N + \varsigma R \otimes H. \end{aligned}$$

可以找到足够大的 L 使得矩阵 Γ 负定, 即 $\dot{v} < 0$, 因此网络 (20) 是指数稳定的, 即复杂网络系统 (4) 在自适应控制下实现同步. \square

注 1 对于式 (21), 有 $\lim_{e_i \rightarrow \infty} v \rightarrow +\infty$ 成立, 由式 (22) 总能找到一个 L 使得矩阵 Γ 负定, 所以系统 (20) 是全局指数稳定的.

4 仿真实证

通过两个例子来表明节点能量指数牵制策略的有效性.

4.1 线性星形网络

星形网络是一种规则网络, 如图 1 所示. 假设 $\varsigma = 1, \bar{p}_{ii} = 1, i = 1, 2, \dots, N$, 中心节点编号为 1, 用 ω_i 表示第 i 节点的度, 可以得到 $\omega_1 = 6, \omega_2 = \omega_3 = \dots = \omega_7 = 1$. 则根据式 (8) 和 (9) 可得

$$\begin{aligned} p_{ii} &= 1/7, \quad i = 1, 2, \dots, 7; \\ p_1 &= p_{11} + \sum_{j=2}^7 p_{jj} = \frac{1}{7} + \sum_{j=2}^7 \frac{1}{7} = 1; \\ p_j &= p_{jj} + \sum_{i=1}^1 p_{ii} = \frac{1}{7} + \frac{1}{7} = \frac{2}{7}, \quad j = 2, 3, \dots, 7. \end{aligned} \quad (24)$$

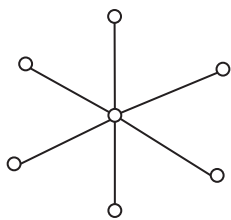


图1 星形网络连接图

由式(23)可见,节点1是该网络中最重要的节点,其他节点重要性相同.假设每个节点都代表线性系统,可以得到如下网络模型^[10,17]:

$$\dot{x}_i(t) = x_i(t) + \varsigma \sum_{j=1, j \neq i}^l (x_j(t) - x_i(t)), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (25)$$

根据式(24)可以得到该复杂网络系统的偏差动态系统为

$$\dot{e}_i(t) = e_i(t) + \varsigma \sum_{j=1, j \neq i}^l (e_j(t) - e_i(t)), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (26)$$

根据式(23),选择节点1作为牵制控制节点对系统实施线性反馈控制.根据定理1,将参数带入式(16)得到

$$\alpha + R_1 H - K < 0. \quad (27)$$

其中: $H = 1, p_1 = 1, \alpha$ 为非负数.令 $d = 4$,式(26)可改写为

$$k_1 > \alpha + 6. \quad (28)$$

根据式(27),取反馈系数 k_1 为10,并将系统参数值代入式(24),初始值 $x(0) = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]$.仿真过程如下:

Step1: 在不加控制的情况下,系统动态过程如图2所示.从图2结果可以看出,星形网络系统(24)不能自同步,且不稳定.

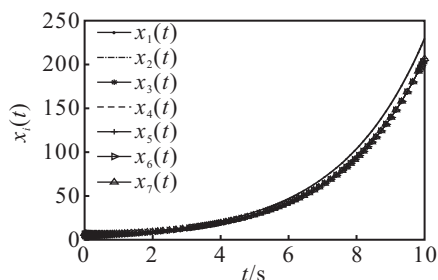


图2 无控制系统同步过程

Step2: 对该系统根据定理1选择节点1作为牵制控制节点,并实施线性反馈控制,控制系数根据定理1确定,仿真结果如图3所示.由图3可见,对节点1施加线性反馈控制后系统(24)同步且稳定.

Step3: 将同样的控制器加到非关键节点上,仿真

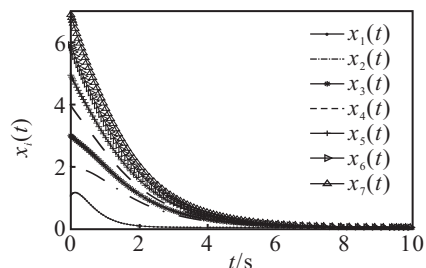


图3 对中心节点实施控制的系统同步过程

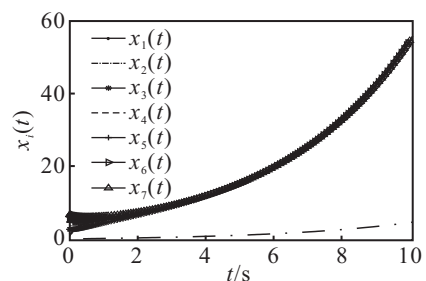


图4 对非重要节点实施同样控制的系统同步过程

结果如图4所示.由图4可见,系统(24)是不稳定的.

实验表明,在对复杂网络实施牵制控制时,牵制节点的选择很重要,同时也表明定理1是有效的.

4.2 非线性动态网络

由于混沌系统对于初值的敏感性,该系统很难实现同步控制.本文以10节点的Lorenz混沌系统为例,各节点的状态方程描述为^[11-12]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(x_2 - x_1) \\ cx_1 - x_1x_3 - x_2 \\ x_1x_2 - bx_3 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

当 $a = 10, b = 3/8, c = 28$ 时,系统处于混沌状态.将式(28)分解,并重写复杂网络系统(4)为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ \dot{x}_{i2} \\ \dot{x}_{i3} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ x_{i3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -x_{i1}x_{i3} \\ x_{i1}x_{i2} \end{bmatrix} + \varsigma \sum_{j=1}^N R_{ij} H \begin{bmatrix} x_{j1} \\ x_{j2} \\ x_{j3} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (30)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix}.$$

采用自适应控制器(19), $\varsigma = 1, H = \text{diag}[1, 1, 1], \delta = 0.5, k_f = 1$,节点能量 p_{ii} 和网络连接矩阵 R_{ij} 分别为

$$p_{ii} = [0.72477 \ 0.48071 \ 0.59575 \ 0.47518 \ 0.39299 \ \rightarrow \leftarrow 0.55496 \ 0.88704 \ 0.18679 \ 0.62224 \ 0.43253],$$

表 1 节点的度与节点的能量指数

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
节点度	2	2	5	1	3	2	1	1	3	2
能量指数	1.205 5	0.961 4	0.988 7	1.200	0.988 7	1.035 7	1.611 8	0.911 6	1.218 0	0.913 2

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -5 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix}$$

根据连接矩阵可以确定各节点的度,并根据定义 2 计算出节点的能量指数如表 1 所示.

仿真过程如下:

Step 1: 根据按照度的大小选择牵制节点,采用现有自适应控制器设计方法对表 1 中度大的前 5 个节点进行控制,得到仿真结果如图 5 所示.

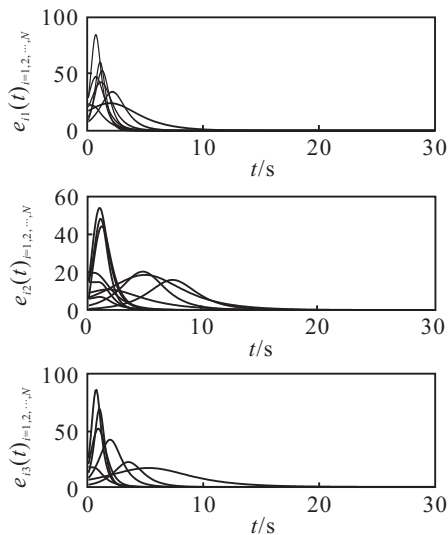


图 5 根据节点度牵制策略、采用式 (17) 的控制方法实施控制系统同步过程

Step 2: 采用能量指数法选择牵制节点(即表 1 中能量指数较大的 5 个节点),控制器设计仍采用现有方法,仿真结果如图 6 所示.

Step 3: 采用能量指数法选择牵制节点,并采用本文提出的能量指数设计控制器方法进行自适应控制,仿真结果如图 7 所示.

从仿真结果可以看出,当考虑节点对于网络的贡献差异时,根据能量指数法选择牵制节点比根据节点度选择节点的控制效果好,根据能量指数法设计控制器的控制效果也优于主观选取自适应律系数法. 所

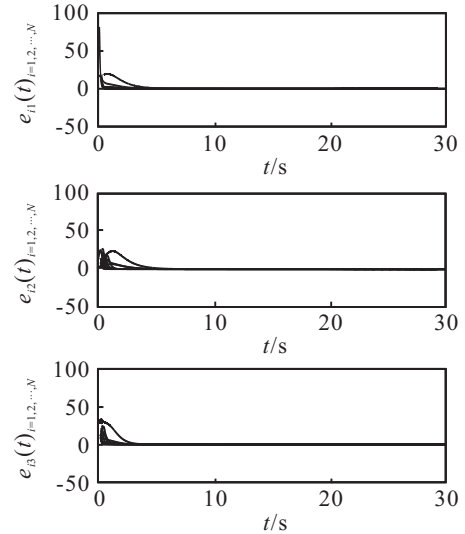


图 6 根据节点能量指数牵制策略、采用式 (17) 的控制方法实施控制系统同步过程

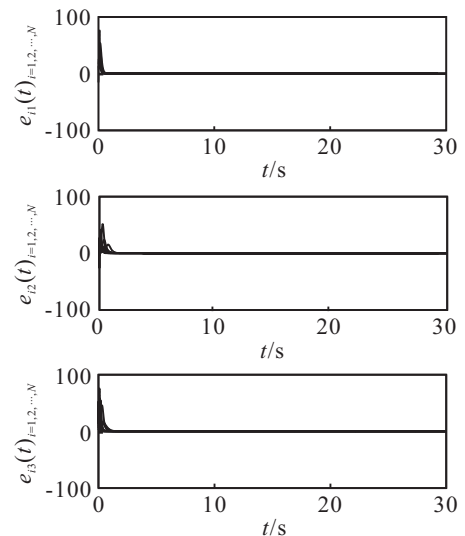


图 7 根据节点能量指数牵制策略、采用式 (19) 的控制方法实施控制系统同步过程

以,根据牵制节点对网络贡献的大小并采用与其相应的自适应控制律是有效的.

5 结 论

本文针对已有成果中仅根据拓扑特性判断节点重要性的不足和将控制器自适应律在设计中简单视为常数的缺陷,引入反映节点对于网络贡献大小的节点能量,并提出了能量指数的概念,给出了更一般的选择有效控制节点的方法——能量指数法.该方法同时考虑了节点对网络的贡献力和节点的网络特性,是一种更全面的牵制策略.进一步将节点能量指数用于自适应控制器设计,得到了反馈控制系数和自适应控

制律的确定方法,解决了控制律设计为常数的理论不足问题.通过实验分析可见,基于能量指数法的牵制策略能更有效地实现同步,方法理论简洁实用,仅增加一个参数即可解决该领域研究中一直被忽视的问题.牵制控制节点在网络中所占的具体比例是需要进一步研究的问题.

参考文献(References)

- [1] 方锦清,汪小帆,郑志刚,等.一门崭新的交叉科学:网络科学(下篇)[J].物理学进展,2007,27(4):362-448.
(Fang J Q, Wang X F, Zheng Z G, et al. New interdisciplinary science: Network science(2)[J]. Progress in Physics, 2007, 27(4): 361-448.)
- [2] Grigoriev R O, Cross M C, Schuster H G. Pinning control of spatiotemporal chaos[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(15): 2795-2798.
- [3] Arenas A, Diaz-Guilera A, Kurths J, et al. Synchronization in complex networks[J]. Physics Reports, 2008, 469: 93-153.
- [4] He G M, Yang J Y. Adaptive synchronization in nonlinearly coupled dynamical networks[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 38: 1254-1259.
- [5] Zou Y, Chen G. Choosing effective controlled nodes for scale-free networks synchronization[J]. Physica A, 2009, 388(14): 2931-2940.
- [6] Wang L, Dai H P, Dong H, et al. Adaptive synchronization of weighted complex dynamical networks through pinning[J]. The European Physical J B, 2008, 61: 335-342.
- [7] Wang X F, Chen G R. Pinning control of scale-free dynamical networks[J]. Physica A, 2002, 310(3/4): 521-531.
- [8] Li X, Wang X F, Chen G R. Pinning a complex dynamical networks to its equilibrium[J]. IEEE Trans on Circuits and System, 2004, 51(10): 2074-2087.
- [9] Yu W W, Chen G R, Lu J H. On pinning synchronization of complex dynamical networks[J]. Automatica, 2009, 45: 429-435.
- [10] Porfiri M, Bernardo M D. Criteria for global pinning controllability of complex networks[J]. Automatica, 2008, 44: 3100-3106.
- [11] Zheng S, Bi Q S, Cai G L. Adaptive projective synchronization in complex networks with time-varying coupling delay[J]. Physical Letters A, 2009, 373: 1553-1559.
- [12] Zhou J, Lu J A, Lu J. Pinning adaptive synchronization of a general complex dynamical network[J]. Automatica, 2008, 44: 996-1003.
- [13] Tu L L, Lu J A. Delay dependent synchronization in general complex delayed dynamical networks[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2009, 57: 28-36.
- [14] Guo W L, Austin F, Chen S H, et al. Pinning synchronization of the complex networks with non-delayed and delayed coupling[J]. Physical Letters A, 2009, 373: 1565-1572.
- [15] Porfiri M, Fiorilli F. Node-to-node pinning control of complex networks[J]. Chaos, 2009, 19: 1-11.
- [16] Sun W, Chen S H, Guo W L. Adaptive global synchronization of a general complex dynamical network with non-delayed and delayed coupling[J]. Physical Letters A, 2008, 372: 6340-6346.
- [17] 徐德刚. 基于复杂网络理论的复杂系统同步控制研究[D]. 杭州: 浙江大学控制科学与工程系, 2007.
(Xu D G. Research on synchronization control of complex systems based on complex networks theory[D]. Hangzhou: Department of Control Science & Engineering, Zhejiang University, 2007.)

(上接第21页)

- [12] 杨海东,鄂加强.自适应变尺度混沌免疫优化算法及其应用[J].控制理论与应用,2009,26(10):1069-1074.
(Yang H D, E J Q. An adaptive chaos immune optimization algorithm with mutative scale and its application[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(10): 1069-1074.)
- [13] Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization. Computer Journal, 1965, 7(4): 308-313.
- [14] Anne Auger, Nikolaus Hansen. Performance evaluation of an advanced local search evolutionary algorithm[C]. Proc of 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Edinburgh, 2005: 1777-1784.
- [15] 孙一康.带钢热连轧的模型与控制[M].北京:冶金工业出版社,2002:29-183.
(Sun Y K. The model and control of hot strip mill[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 29-183.)
- [16] 李勇,刘建昌,王昱.改进权重自适应GA及冷连轧轧制规程多目标优化[J].控制理论与应用,2009,26(6):687-693.
(Li Y, Liu J C, Wang Y. An improved adaptive weight approach GA for optimizing multi-objective rolling schedules in a tandem cold rolling [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(6): 687-693.)