

文章编号:1671-6833(2018)04-0081-05

变时滞耦合不确定复杂网络修正函数投影同步

方 洁, 杜海明, 刘 娜

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 研究了具有不确定参数、外界干扰及时变时滞耦合的复杂动态网络的修正函数投影同步问题。基于 Lyapunov 稳定性理论和不等式变换理论, 设计了自适应鲁棒控制器, 控制器设计中不需要预先设定反馈增益, 其值随自适应律自行调节。该方法能有效地克服未知有界干扰和时变时滞的影响, 数值仿真验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 复杂动态网络; 混沌系统; 修正函数投影同步; 时变时滞耦合; 自适应控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.032

0 引言

近年来, 随着人们对复杂网络研究的深入和对其应用的不断推广, 复杂网络研究已经逐渐渗透到各个学科领域, 并取得了一系列研究成果。同步现象是一类非常普遍而重要的非线性现象, 复杂网络的同步研究是复杂网络研究的一个重要方向^[1-4]。

函数投影同步和修正函数投影同步是近几年刚刚兴起的新的混沌同步方法, 其实现同步的同步尺度因子是一个函数而不是常量, 函数尺度因子的不可预测性对提高混沌保密通信的安全性具有非常重要的潜在应用价值, 因此对混沌系统的函数投影同步研究具有重要的理论价值和现实意义^[5-9]。随着复杂网络研究的蓬勃发展, 已有学者对复杂网络的函数投影同步问题进行了研究^[10-11]。

对于很多实际的复杂网络, 总是不可避免地存在网络自身的不确定性以及外界干扰和时滞等因素。因此, 实现具有不确定参数、外界干扰和时滞的复杂网络的同步更具有实际意义。文献[12]基于 Lyapunov 稳定性理论和泰勒展开实现了具有不确定参数、外界干扰和常时滞耦合的复杂网络的函数投影同步。考虑到绝对的常时滞耦合在实际网络中可能是不存在的, 文献[13]进一步研

究了具有变时滞耦合的复杂网络的函数投影同步, 但没有考虑不确定参数和外界干扰的影响。文献[14]利用牵制控制方法, 分别对节点参数未知和拓扑结构未知的两类复杂网络, 设计了自适应控制器, 使得两类网络和其孤立节点实现函数投影同步。其目标函数是网络中的一个节点, 而且是按固定的函数尺度因子实现同步, 而不是一个函数矩阵。此外, 该研究虽然分别考虑了参数未知和拓扑结构未知的影响, 但没有考虑外界干扰的影响。

基于以上讨论, 笔者将基于 Lyapunov 稳定性理论和不等式变换理论, 设计简单的鲁棒自适应控制器, 实现具有不确定参数、外界干扰及时变时滞耦合的复杂动态网络的修正函数投影同步。实现同步的目标函数可以是一个平衡点, 周期吸引子或者混沌轨道。该方法不仅能对网络中的未知参数进行估计, 同时也能有效地克服未知有界干扰和时变时滞的影响。控制器中的反馈控制增益可随自适应律自行调节, 不需要人为设定。数值仿真验证了该方法的正确性和有效性。

1 问题描述

具有时变时滞耦合的复杂动态网络模型描述如下:

收稿日期:2017-09-01; 修订日期:2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61775198); 河南省科技攻关项目(182102210609); 河南省自然科学基金面上项目(162300410323); 河南省高等学校青年骨干教师基金(2016GGJS090)

作者简介: 方洁(1981—), 女, 河南南阳人, 郑州轻工业学院副教授, 博士, 主要从事混沌控制, 复杂网络控制研究, Email:fang0511jie@126.com.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) = & f(x_i(t)) + F(x_i(t))\theta_i + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma_1 x_j(t) + \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \Gamma_2 x_j(t - \tau(t)) + \Delta_i(t) + u_i(t), \\ & (i = 1, 2, \dots, N). \end{aligned} \tag{1}$$

其中, $x_i(t) = (x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{in}(t))^T \in \mathbf{R}^n$ 是第 i 个节点的状态变量; $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ 是向量函数; $F: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^{n \times m}$ 是矩阵函数; $\theta_i \in \mathbf{R}^m$ 是未知的参数向量; $\tau(t) \geq 0$ 是未知的时变耦合时滞; $\Delta_i \in \mathbf{R}^n$ 是外界干扰; $u_i(t) \in \mathbf{R}^n$ 是控制输入; c 表示耦合强度; $\Gamma_1 = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 和 $\Gamma_2 = \text{diag}(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n)$ 是内耦合矩阵, 其中 $r_i = 1$ 和 $\zeta_i = 1$ 表示第 i 个状态, 意味着两个节点通过第 i 个状态变量耦合; $A = (a_{ij})_{N \times N}$ 和 $B = (b_{ij})_{N \times N}$ 是外耦合矩阵, 表示网络的拓扑结构, 如果节点 i 和节点 j ($j \neq i$) 之间有连接, 则 $a_{ij} \neq 0, b_{ij} \neq 0$, 否则 $a_{ij} = b_{ij} = 0$ ($j \neq i$). 定义矩阵 A, B 对角线上的元素满足:

$$\begin{cases} a_{ii} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}; \\ b_{ii} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij}, \end{cases} \tag{2}$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$.

定义 1 (MFPS): 对具有模型不确定、外界干扰和时变时滞耦合的复杂动力系统 (1), 如果存在连续可微的函数矩阵 $M(t)$, 使得系统 (1) 和目标函数 $s(t)$ 满足式 (3), 则称系统 (1) 和目标函数 $s(t)$ 实现了修正函数投影同步.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e_i(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - M(t)s(t)\| = 0, \tag{3}$$

$i = 1, 2, \dots, N.$

其中, $s(t) \in \mathbf{R}^n$ 是目标函数, 满足 $\dot{s}(t) = g(s(t))$, $s(t)$ 可以是一个平衡点, 周期吸引子或者混沌轨道; $M(t) = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n)$ 为函数尺度因子矩阵.

假设 1: $\tau(t)$ 是可微函数, 且满足 $0 \leq \dot{\tau}(t) \leq 1$. 即要求时滞网络时变时滞波动较小, 是慢时变时滞系统.

假设 2: 外界干扰 $\Delta_i(t)$ 是有界的, 即存在正常数 d_i , 使得 $\|\Delta_i\| \leq d_i, i = 1, 2, \dots, N$.

引理 1^[15]: 对于任意两个向量 $X, Y \in \mathbf{R}^n$, 存在正定的矩阵 $Q \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 使得以下不等式成立: $2X^T Q Y \leq X^T Q Q^T X + Y^T Y$.

2 控制器设计

定理 1: 对给定的函数尺度因子矩阵 $M(t)$ 和

任意的初始值 $s(0), x_i(0)$, 如果假设 1 和假设 2 成立, 则在控制器 (4) 和自适应律 (5)、(6)、(7) 的作用下, 复杂网络动力系统 (1) 和目标函数 $s(t)$ 能实现修正函数投影同步.

$$\begin{aligned} u_i(t) = & -f(x_i(t)) + \dot{M}(t)s(t) + M(t)\dot{s}(t) - \\ & F(x_i(t))\hat{\theta}_i - \hat{d}_i \text{sign} e_i - \hat{q}_i e_i(t), (i = 1, 2, \dots, N). \end{aligned} \tag{4}$$

自适应律

$$\dot{\hat{\theta}}_i = k_1 F^T(x_i(t)) e_i; \tag{5}$$

$$\hat{d}_i = k_2 e_i^T \text{sign} e_i; \tag{6}$$

$$\hat{q}_i = k_3 e_i^T e_i, \tag{7}$$

其中, k_1, k_2, k_3 为任意的正常量; $\hat{\theta}_i$ 是系统 (1) 中未知参数向量 θ_i 的估计值; \hat{d}_i 是参数 d_i 的估计值; \hat{q}_i 是反馈增益; $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数.

证明: 定义误差向量

$$e_i(t) = x_i(t) - M(t)s(t), (i = 1, 2, \dots, N). \tag{8}$$

式 (8) 对时间求导可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) = & \dot{x}_i(t) - \dot{M}(t)s(t) - \dot{M}(t)s(t) \\ & (i = 1, 2, \dots, N). \end{aligned} \tag{9}$$

将 (1) 和 (2) 代入 (9) 可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) = & f(x_i(t)) + F(x_i(t))\theta_i + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma_1 e_j(t) + \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \Gamma_2 e_j(t - \tau(t)) + \Delta_i(t) + u_i(t) - \\ & M(t)\dot{s}(t) - \dot{M}(t)s(t). \end{aligned} \tag{10}$$

将式 (4) 代入式 (10) 可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) = & F(x_i(t))(\theta_i - \hat{\theta}_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma_1 e_j(t) + \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \Gamma_2 e_j(t - \tau(t)) + \Delta_i(t) - \\ & \hat{d}_i \text{sign} e_i - \hat{q}_i e_i(t). \end{aligned} \tag{11}$$

选择如下的 Lyapunov 函数

$$\begin{aligned} V(t) = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i(t)^T e_i(t) + \frac{1}{2k_1} \sum_{i=1}^N \tilde{\theta}_i^T \tilde{\theta}_i + \\ & \frac{1}{2(1-\varepsilon)} \int_{t-\tau}^t \sum_{i=1}^N e_i^T(\delta) e_i(\delta) d\delta + \\ & \frac{1}{2k_2} \sum_{i=1}^N \tilde{d}_i^2 + \frac{1}{2k_3} \sum_{i=1}^N (\hat{q}_i - q^*)^2. \end{aligned} \tag{12}$$

其中, $\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i; \tilde{d}_i = \hat{d}_i - d_i; 0 < \varepsilon < 1; q^*$ 是合适的正常量.

对 $V(t)$ 求导可得

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^N e_i^T(t) \dot{e}_i(t) + \frac{1}{2(1-\varepsilon)} \sum_{i=1}^N e_i^T(t) e_i(t) -$$

$$\begin{aligned} & \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t - \tau) \mathbf{e}_i(t - \tau) + \\ & \frac{1}{k_1} \sum_{i=1}^N \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^T \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i + \frac{1}{k_2} \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - d_i) \dot{\hat{d}}_i + \\ & \frac{1}{k_3} \sum_{i=1}^N (\hat{q}_i - q^*) \dot{\hat{q}}_i. \end{aligned} \quad (13)$$

将控制器 (4) 代入 (13) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \left[-\mathbf{F}(x_i(t)) \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \boldsymbol{\Gamma}_1 \mathbf{e}_j(t) + \right. \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \boldsymbol{\Gamma}_2 \mathbf{e}_j(t - \tau) + \Delta_i(t) - \hat{d}_i \text{sign} \mathbf{e}_i - \\ & \left. \hat{q}_i \mathbf{e}_i(t) \right] + \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \mathbf{e}_i(t) - \\ & \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t - \tau) \mathbf{e}_i(t - \tau) + \\ & \frac{1}{k_1} \sum_{i=1}^N \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^T \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i + \frac{1}{k_2} \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - d_i) \dot{\hat{d}}_i + \\ & \frac{1}{k_3} \sum_{i=1}^N (\hat{q}_i - q^*) \dot{\hat{q}}_i. \end{aligned} \quad (14)$$

将自适应律 (5) ~ (7) 代入上式可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \left[c \sum_{j=1}^N a_{ij} \boldsymbol{\Gamma}_1 \mathbf{e}_j(t) + \right. \\ & c \sum_{j=1}^N b_{ij} \boldsymbol{\Gamma}_2 \mathbf{e}_j(t - \tau) + \Delta_i(t) \left. \right] + \\ & \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \mathbf{e}_i(t) - \\ & \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)} \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t - \tau) \mathbf{e}_i(t - \tau) - \\ & \sum_{i=1}^N d_i \mathbf{e}_i^T \text{sign} \mathbf{e}_i - q^* \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i. \end{aligned} \quad (15)$$

定义 $\mathbf{e}(t) = (\mathbf{e}_1^T(t), \mathbf{e}_2^T(t), \dots, \mathbf{e}_N^T(t))^T \in \mathbf{R}^{n \times N}$,

$\mathbf{P} = (\mathbf{A} \otimes \boldsymbol{\Gamma}_1), \mathbf{Q} = (\mathbf{B} \otimes \boldsymbol{\Gamma}_2)$, 其中 \otimes 表示克罗内克积.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}(t) + c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t - \tau) + \\ & \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \Delta_i(t) + \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) - \\ & \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)} \mathbf{e}^T(t - \tau) \mathbf{e}(t - \tau) - \\ & \sum_{i=1}^N d_i \mathbf{e}_i^T \text{sign} \mathbf{e}_i - q^* \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T(t) \mathbf{e}_i(t). \end{aligned} \quad (16)$$

由假设 1 和假设 2 可得 $\frac{1}{2} \leq \frac{1 - \dot{\tau}(t)}{2(1 - \varepsilon)}$,

$\mathbf{e}_i^T \Delta_i(t) \leq d_i \mathbf{e}_i^T \text{sign} \mathbf{e}_i$, 因此

$$\dot{V}(t) \leq c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}(t) + c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t - \tau) +$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{b^2 - 4ac} \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) - \\ & \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(t - \tau) \mathbf{e}(t - \tau) - q^* \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t). \end{aligned} \quad (17)$$

由引理 1 可得

$$c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t - \tau) \leq \frac{1}{2} c^2 \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \mathbf{e}(t) + \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(t - \tau) \mathbf{e}(t - \tau) \text{ 于是, 有}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & c \mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}(t) + \frac{1}{2} c^2 \mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{e}(t) + \\ & \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) - q^* \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) \leq \\ & \left[\lambda_{\max} \left(\frac{1}{2} c^2 \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} + c \mathbf{P} \right) + \right. \\ & \left. \frac{1}{2(1 - \varepsilon)} - q^* \right] \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t). \end{aligned} \quad (18)$$

由此, 可以通过选取适当的 q^* , 使

$$q^* \geq \lambda_{\max} \left(\frac{1}{2} c^2 \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} + c \mathbf{P} \right) + \frac{1}{2(1 - \varepsilon)}, \quad (19)$$

即可得 $\dot{V}(t) \leq -\mathbf{e}(t)^T \mathbf{e}(t)$. 由 Lyapunov-Krasovskii 稳定性定理可得当 $t \rightarrow \infty$ 时 $\mathbf{e}_i(t) \rightarrow 0$, 即复杂网络动力系统 (1) 和目标函数 $s(t)$ 实现了修正函数投影同步, 定理证毕.

注 1: 当 $\tau(t)$ 是常量时, 也满足 $0 \leq \dot{\tau}(t) \leq 1$, 所以定理 1 对具有常时滞耦合的复杂网络的修正函数投影同步也是适用的.

注 2: 因为控制器 (4) 中不连续的符号函数 $\text{sign} \mathbf{e}_i$ 会产生不期望的抖振, 在实际中可用双曲正切函数 $\tanh(\xi \mathbf{e}_i)$, $\xi > 0$ 代替符号函数来消弱抖振现象. 不连续控制器可通过带自动积分限幅功能的控制元件实现. 最后的控制输入为:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(t) = & -\mathbf{f}(x_i(t)) + \dot{\mathbf{M}}(t) s(t) + \mathbf{M}(t) \dot{s}(t) - \\ & \mathbf{F}(x_i(t)) \hat{\boldsymbol{\theta}}_i - \hat{d}_i \tanh(\xi \mathbf{e}_i) - \hat{q}_i \mathbf{e}_i(t), \\ & (i = 1, 2, \dots, N). \end{aligned} \quad (20)$$

3 数值仿真

以 Chen 混沌系统为目标函数来证明所提方案的有效性. Chen 混沌系统描述如下:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = r_1 s_2 - r_1 s_1; \\ \dot{s}_2 = -s_1 s_3 + (r_3 - r_1) s_1 + r_3 s_2; \\ \dot{s}_3 = -r_2 s_3 + s_1 s_2, \end{cases}$$

其中, s_1, s_2, s_3 为状态变量, r_1, r_2, r_3 为系统参数. 当 $r_1 = 35, r_2 = 3, r_3 = 28$ 时, 该系统处于混沌状态.

复杂动态网络描述如下:

$$\begin{bmatrix} x_{i1}(t) \\ x_{i2}(t) \\ x_{i3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_{i2}(t) - x_{i3}(t) \\ x_{i1}(t) \\ x_{i1}(t)x_{i3}(t) + 0.2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ x_{i2}(t) & 0 \\ 0 & -x_{i3}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{i1} \\ \theta_{i2} \end{bmatrix} + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma_1 x_j(t) + c \sum_{j=1}^N b_{ij} \Gamma_2 x_j(t - \tau(t)) + \Delta_i(t) + u_i(t).$$

其中, τ 是时变时滞耦合, 控制器可依据定理 1 设计如下:

$$\begin{cases} u_{i1}(t) = x_{i2}(t) + x_{i3}(t) + m_1(t)\dot{s}_1(t) + \dot{m}_1(t)s_1(t) - \hat{d}_i \text{sign} e_{i1} - \hat{q}_i e_{i1}(t); \\ u_{i2}(t) = -x_{i1}(t) + m_2(t)\dot{s}_2(t) + \dot{m}_2(t)s_2(t) - x_{i2}(t)\hat{\theta}_{i1} - \hat{d}_i \text{sign} e_{i2} - \hat{q}_i e_{i2}(t); \\ u_{i3}(t) = -x_{i1}(t)x_{i3}(t) - 0.2 + m_3(t)\dot{s}_3(t) + \dot{m}_3(t)s_3(t) + x_{i3}(t)\hat{\theta}_{i2} - \hat{d}_i \text{sign} e_{i3} - \hat{q}_i e_{i3}(t), \end{cases}$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$.

自适应律为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_i = k_1 F^T(x_i(t)) e_i; \\ \dot{\hat{d}}_i = k_2 e_i^T \text{sign} e_i; \\ \dot{\hat{q}}_i = k_3 e_i^T e_i. \end{cases}$$

在数值仿真中, 设定 $c = 0.1, N = 5, \Gamma_1 = \Gamma_2 = I_{3 \times 3}$. 外耦合矩阵:

$$A = B = \begin{pmatrix} -3 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & -3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -4 \end{pmatrix}.$$

外界扰动 $\Delta_d = [0.3 \cos t, 0.2 \sin t, 0.5 \sin t]$, 函数尺度因子矩阵 $M(t) = \text{diag}(2 + \sin(\pi t/5), 3 - \cos(\pi t), 3 + \sin(2\pi t/10))$, $k_1 = 4, k_2 = 8, k_3 = 5$, 时变耦合时滞 $\tau(t) = \frac{e^t}{2 + e^t}$, 可得 $\dot{\tau}(t) =$

$$\frac{2e^t}{(2 + e^t)^2} \in (0, \frac{1}{2}], \text{ 假设 1 满足.}$$

仿真结果如图 1~3 所示. 图 1 为同步误差曲线图. 图 2 为参数 θ_{i1} 和 θ_{i2} 的估计值. 图 3 为外界干扰值 d_i 和反馈增益 q_i 随时间进化曲线. 由仿真结果可知, 误差信号经过短时间的震荡后衰减

到零, 即复杂动态网络和目标函数实现了修正函数投影同步并实现了对未知参数的估计. 仿真结果证明了理论分析的正确性.

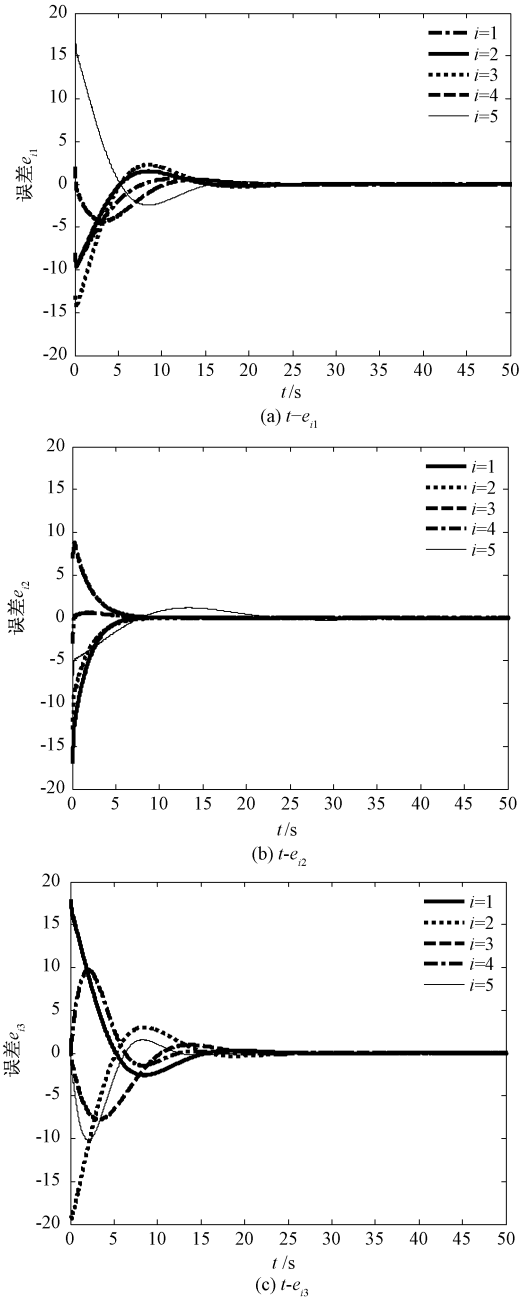


图 1 同步误差曲线

Fig.1 The time evolution of synchronization errors

4 结论

研究了复杂动态网络的修正函数投影同步问题, 考虑了实际网络中不可避免的模型不确定、外界干扰及时变时滞耦合的影响. 通过构造合适的 Lyapunov 函数, 证明了同步误差系统的稳定性. 该同步控制方法能有效地克服未知有界干扰和时

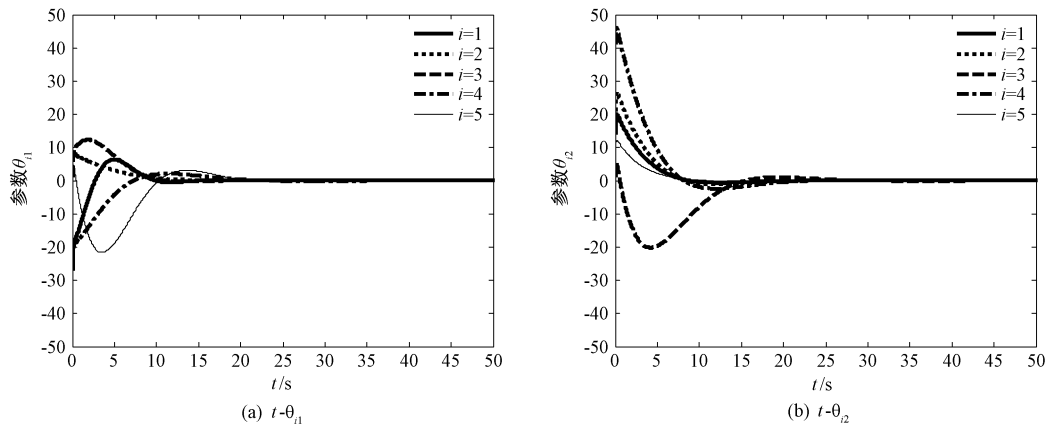


图2 参数 θ_{11} 和 θ_{12} 的估计值

Fig.2 The estimated parameters θ_{11} and θ_{12}

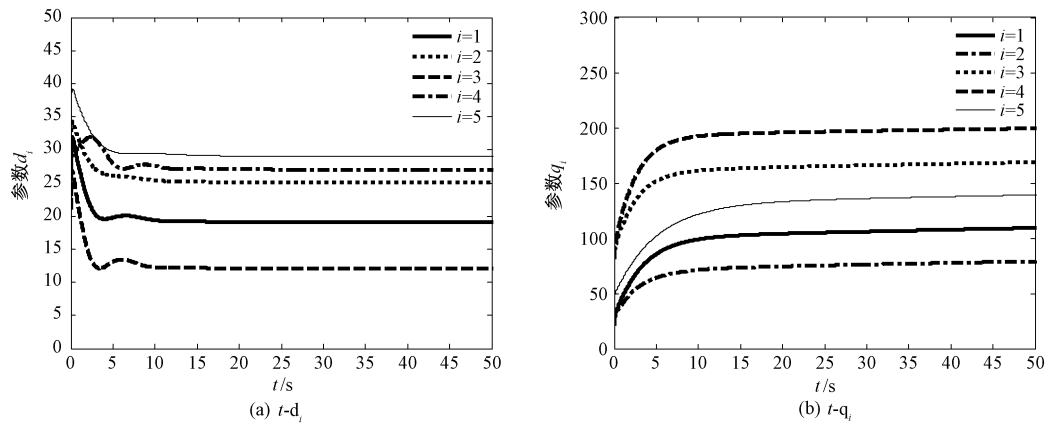


图3 参数 d_i 和 q_i 的时间进化曲线

Fig.3 The time evolution of parameters d_i and q_i

滞耦合的影响,对具有常时滞耦合和时变时滞耦合的复杂动态网络均适用.以Chen混沌系统为目标函数进行数值仿真,仿真结果证明了该方法的有效性.

参考文献:

[1] LIU X W, CHEN T P. Synchronization analysis for nonlinearly-coupled complex networks with a symmetrical coupling matrix[J]. Physica A, 2008, 387(16/17):4429-4439.

[2] 梁义,王兴元. 结点含时滞的具有零和非零时滞耦合的复杂网络混沌同步[J]. 物理学报, 2013, 62(1): 018901.

[3] 柳爽,吕翎,李钢. 一类不确定复杂网络的滑模追踪同步[J]. 物理学报,2012, 61(16): 160507.

[4] CHEN G R. Problems and challenges in control theory under complex dynamical network environments[J]. Acta automatica sinica,2013, 39(4):312-321.

[5] 方洁,姜长生,邓玮. 混沌修正函数投影同步研究及

其在保密通信中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(5): 61-65.

[6] AGRAWAL S K, DAS S. Function projective synchronization between four dimensional chaotic systems with uncertain parameters using modified adaptive control method[J]. Journal of process control, 2014, 24(5): 517-530.

[7] FU G Y. Robust adaptive modified function projective synchronization of different hyperchaotic systems subject to external disturbance[J]. Commun nonlinear sci numer simulat, 2012, 17(6):2602-2608.

[8] SUDHEER K S, SABIR M. Adaptive modified function projective synchronization of multiple time-delayed chaotic Rossler system[J]. Physics letters A, 2011, 375(8):1176-1178.

[9] WU X J, WANG H, LU H T. Hyperchaotic secure communication via generalized function projective synchronization[J]. Nonlinear analysis: real world applications, 2011,12(2): 1288-1299.

The Method of Degradation Feature Extraction of Rolling Bearing Based on MEMD and Multivariate Multiscale Entropy

LI Lingjun, JIN Bing, MA Yanli, HAN Jie, HAO Wangsheng

(School of Mechanical Enginnering, Zhengzhou University ,Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The method of extracting degradation features was proposed based on MEMD and MMSE to solve the fault signals of roller bearing and degradation condition, which was characteristic of non-stationarity and hard to recognize. The character of MEMD was adopted to catch different scales of signals effectively during the process of multiscale, which made complexity of different degradation condition distinguished better than other methods. Firstly, multichannel signals corresponding to various degradation condition of roller bearing were decomposed adaptively using MEMD; then, the reconstructed signals by multiscale IMF was dealt with MSE analysis. The results showed that the proposed method could efficiently evaluate the degradation trend of roller bearing by analyzing the experimental signals.

Key words: MEMD; MMSE; multiscale; roller bearing; degradation trend

(上接第 85 页)

[10] DU H Y. Function projective synchronization in drive-response dynamical networks with non-identical nodes [J]. Chaos, solitons & fractals, 2011, 44 (7): 510 – 514.

[11] WU X J, LU H T. Generalized function projective (lag, anticipated and complete) synchronization between two different complex networks with nonidentical nodes[J]. Commun nonlinear science and numerical simulation, 2012, 17(7): 3005 – 3021.

[12] WANG S G, ZHENG S. Adaptive function projective synchronization of uncertain complex dynamical networks with disturbance[J]. Chin Phys B, 2013, 22 (7): 070503.

[13] DU H Y, SHI P, Lü N. Function projective synchronization in complex dynamical networks with time delay via hybrid feedback control[J]. Nonlinear analysis: real world applications, 2013, 14(2): 1182 – 1190.

[14] 李德奎,连玉平,张建刚. 时变时滞耦合复杂网络的函数投影同步[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41 (2): 207 – 214.

[15] GAO Y B, SUN B H, LU G P. Modified function projective lag synchronization of chaotic systems with disturbance estimations[J]. Applied mathematical modelling, 2013, 37(3): 4993 – 5000.

Modified Function Projective Synchronization of Uncertain Complex Dynamical Networks with Time-varying Coupling Delay

FANG Jie, DU Haiming, LIU Na

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This paper investigated the modified function projective synchronization of complex dynamical networks with uncertain parameters, external disturbance and time-varying coupling delay. Based on Lyapunov stability theory and some inequality techniques, the adaptive robust controller was designed, by which the drive and response systems could realize synchronize to a desired scaling function matrix and estimate the unknown parameters. The feedback control gains were determined by adaptive updated laws. The controller could overcome the effects of the external disturbances and time-varying coupling delay effectively. Numerical simulations illustrated the effectiveness of the proposed method.

Key words: complex dynamical networks; chaotic system; modified function projective synchronization; time-varying coupling delay; adaptive control