



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101801081 A

(43) 申请公布日 2010.08.11

(21) 申请号 201010018225.1

(22) 申请日 2010.01.19

(71) 申请人 河海大学

地址 210098 江苏省南京市西康路1号

(72) 发明人 卢新彪 秦补枝

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司

32200

代理人 许方

(51) Int. Cl.

H04W 56/00 (2009.01)

H04W 84/18 (2009.01)

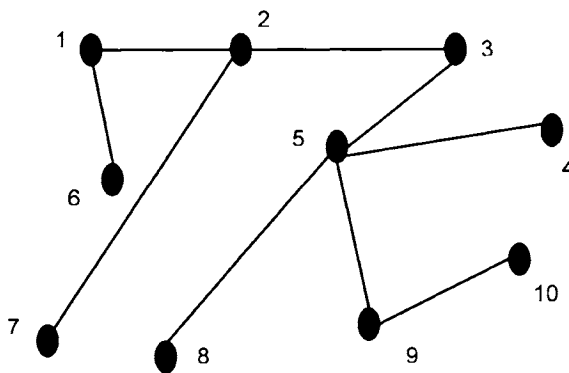
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 5 页

## (54) 发明名称

一种复杂时延网络聚类同步的方法

## (57) 摘要

本发明公布了一种复杂时延网络聚类同步的方法,对于一个给定的复杂时延网络,根据网络要达到的同步状态进行对节点进行分组,同一个组中的节点达到同一个状态,不同组中的节点达到不同的状态;对每个节点施加只依赖于局部信息的控制输入,并且节点之间的耦合强度根据该耦合强度相连节点的局部信息从时间零开始自适应增加直到网络达到聚类同步。当网络中所有的节点最大的延迟时间小于临界值时,网络能够达到聚类同步;然而当网络中所有的节点最大的延迟时间大于临界值时,网络不能够达到聚类同步。



1. 一种复杂时延网络聚类同步的方法,其特征是:对于一个给定的复杂时延网络,根据网络要达到的同步状态进行对节点进行分组,同一个组中的节点达到同一个状态,不同组中的节点达到不同的状态;对每个节点施加只依赖于局部信息的控制输入,并且节点之间的耦合强度根据该耦合强度相连节点的局部信息从时间零开始自适应增加直到网络达到聚类同步。

2. 根据权利要求1所述的一种复杂时延网络聚类同步的方法,特征在于所述的复杂时延网络即无向加权时延网络是包括混沌系统在内的复杂网络。

3. 根据权利要求1所述的一种复杂时延网络聚类同步的方法,特征在于所述只依赖于

局部信息的控制输入为:
$$u_i(t) = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}(t)(s_i(t-\tau_i) - s_j(t-\tau_j)),$$
  $i, j = 1, 2, \dots, N$ , 其中  $u_i(t)$  是

施加在节点  $i$  上只依赖于局部信息的控制输入; $t \geq 0$  表示时刻,  $\tau_i$  为节点  $i$  的延迟时间, 其中  $\tau_j$  为节点  $j$  的延迟时间,  $N$  为所述复杂时延网络中节点个数为自然数;耦合矩阵  $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{N \times N}$  表示网络的拓扑结构:如果节点  $i$  和节点  $j$  之间有连边,则  $a_{ij} > 0$ , 否则,  $a_{ij} = 0$ , 并且满足耗散耦合条件  $\sum_j a_{ij} = 0$ ,  $\mathbb{R}^{N \times N}$  是一个  $N \times N$  维的邻接矩阵; $s_i$  表示节点  $i$  的期望状态,  $s_j$  表示节点  $j$  的期望状态;

4. 根据权利要求1所述的一种复杂时延网络聚类同步的方法,特征在于所述网络中节点之间的耦合强度的自适应调整方法为:
$$\dot{a}_{ij}(t) = \beta \|x_i(t-\tau_i) - x_j(t-\tau_j)\|,$$
 其中  $\beta$  为自适应增益; $t \geq 0$  表示时刻,  $\tau_i$  为节点  $i$  的延迟时间, 其中  $\tau_j$  为节点  $j$  的延迟时间; $\dot{a}_{ij}(t)$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的耦合强度在时刻  $t$  的一次导数,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为所述复杂时延网络中节点个数为自然数。

## 一种复杂时延网络聚类同步的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于复杂网络技术领域,具体涉及无向时延加权网络的聚类同步方法。

### 背景技术

[0002] 近来,对复杂网络的研究开始更多的关注节点数量众多、连接结构复杂的网络的动力学行为。同步是其中一种重要的动力学行为。同步是指两个或者多个动态系统,通过系统之间的相互耦合,使得在不同的初始条件下各自演化的动态系统的状态逐渐接近,最后达到相同的状态。复杂网络同步化行为是复杂动力学系统中非常有现实意义和理论价值的技术问题。同步现象在耦合激光系统、生化系统和通讯网络等科研领域中普遍存在,Kaka S 等人在 2005 年发现即使是在纳米尺寸层面上的耦合振子间也能产生同步行为。

[0003] 目前大多数的复杂动态网络同步研究是将网络中所有的节点控制到一个同步状态。实际上,许多复杂动态网络中的所有节点的最终状态往往不止一个,特别是在生物工程和通信工程。将网络中的节点分成若干个组,当网络中每组中的节点达到同步状态,不同组中的节点达到不同的状态,这时称网络达到了聚类同步。例如,一组机器人在对困在一座正在着火的大楼里的多人实施救助时,考虑到时间的紧急和任务的艰巨性,需要将机器人分组来完成任务。最近,对于一个给定的最近邻网络,Belykh 等人在 2008 年提出一种通过选择合适的耦合强度使得网络达到聚类同步的方法。刘曾荣等人在 2006 年引入了一个具有合作和竞争的加权耦合强度,使得一个连通网络达到聚类同步。我们在 2009 年针对强连通的复杂动态网络,设计了分布式控制策略使得网络达到聚类同步,并且聚类同步的状态是可以调控的。然而,在这些聚类同步的研究中,节点之间的耦合强度并不随外界条件的变化而变化。

[0004] 在目前大多数的网络同步研究中,网络中节点之间的耦合强度是相同的并且不随时间发生改变。据,《复杂网络理论及其应用》(清华大学出版社,汪小帆、李翔、陈关荣主编,2006 年 4 月第 1 版,第 207-211 页)介绍,对于时变耦合强度的复杂网络同步的判据,有基于李亚普诺夫稳定性的判据和基于连接图的判据。在这些判据中,网络中节点之间耦合强度的变化没有考虑与其相连节点状态的关系。然而,许多的实际网络具有随着周围环境改变而改变的耦合强度。例如,无线传感网络资料的收集和传送数据到一个中心基站时,节点需要根据资料的大小和邻居节点的状态来调节自己的状态。自适应调整节点之间耦合强度的策略在现有的复杂网络的同步中很少被研究。在 2007 年,陈天平和李智等人分别提出了网络达到同步的耦合强度自适应耦合策略。在这些研究中,自适应增益是根据全局信息来选择的。但是实际的网络中,节点之间的耦合强度往往是根据局部信息进行自适应调整的。最近,自适应控制开始被应用到复杂动态网络的同步控制中。针对这一情况,Lellis 等人在 2009 年提出节点之间的耦合强度根据相邻节点的状态而进行调整的自适应控制策略。这是建立在局部信息基础上的控制策略,使得网络的控制代价大度降低。

[0005] 复杂网络聚类同步的研究中假设网络中不存在时间延迟。然而,具有时延的网络是随处可见的。有限的数字信号传输速度和存储能力常常导致时间延迟。由于传播和扩散

速度的有限性,以及交通拥塞,生物网络和物理网络中通常存在延迟。周进等人在 2006 年给出了复杂动态时延网络达到同步的条件。然而,对于具有时变耦合强度的复杂时延网络聚类同步至今没有相关研究。

## 发明内容

[0006] 技术问题:本发明目的是针对背景技术中现有技术的缺陷和不足,提出一种复杂时延网络聚类同步的方法,该方法既能够使得复杂网络达到聚类同步,也能够仅根据局部信息精确得到网络达到聚类同步时所需要的最小的节点之间的耦合强度。

[0007] 技术方案:本发明为实现上述目的,采用如下技术方案:

[0008] 本发明一种复杂时延网络聚类同步的方法,对于一个给定的复杂时延网络,根据网络要达到的同步状态进行对节点进行分组,同一个组中的节点达到同一个状态,不同组中的节点达到不同的状态;对每个节点施加只依赖于局部信息的控制输入,并且节点之间的耦合强度根据该耦合强度相连节点的局部信息从时间零开始自适应增加直到网络达到聚类同步。

[0009] 所述的复杂时延网络即无向加权时延网络是包括混沌系统在内的复杂网络。所述

只依赖于局部信息的控制输入为:  $u_i(t) = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}(t)(s_i(t-\tau_i) - s_j(t-\tau_j))$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ , 其中

$u_i(t)$  是施加在节点  $i$  上只依赖于局部信息的控制输入;  $t \geq 0$  表示时刻,  $\tau_i$  为节点  $i$  的延迟时间, 其中  $\tau_j$  为节点  $j$  的延迟时间,  $N$  为所述复杂时延网络中节点个数为自然数; 耦合矩阵  $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{N \times N}$  表示网络的拓扑结构: 如果节点  $i$  和节点  $j$  之间有连边, 则  $a_{ij} > 0$ , 否则,  $a_{ij} = 0$ , 并且满足耗散耦合条件  $\sum_j a_{ij} = 0$ ,  $\mathbb{R}^{N \times N}$  是一个  $N \times N$  维的邻接矩阵;  $s_i$  表示节点  $i$  的期望状态,  $s_j$  表示节点  $j$  的期望状态;

[0010] 所述网络中节点之间的耦合强度的自适应调整方法为:

$\dot{a}_{ij}(t) = \beta \|x_i(t-\tau_i) - x_j(t-\tau_j)\|$ , 其中  $\beta$  为自适应增益;  $t \geq 0$  表示时刻,  $\tau_i$  为节点  $i$  的延迟时间, 其中  $\tau_j$  为节点  $j$  的延迟时间;  $\dot{a}_{ij}(t)$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的耦合强度在时刻  $t$  的一次导数,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为所述复杂时延网络中节点个数为自然数。

[0011] 有益效果:

[0012] 本发明通过增加只依赖节点局部信息的控制器, 使得复杂时延网络达到聚类同步, 同时网络中节点之间的耦合强度也仅依赖于其局部信息。因此, 该方法容易在实际网络中使用。

## 附图说明

[0013] 图 1 是一个 10 个节点的无向加权网络的拓扑图。

[0014] 图 2 是单个节点为混沌的洛伦兹系统示意图。

[0015] 图 3 是节点的最大时间延迟  $\tau_{\max} = 0.2$  秒时, 节点状态随时间的变化图。

[0016] 图 4 是节点的最大时间延迟  $\tau_{\max} = 0.2$  秒时, 节点之间的耦合强度随时间的变化图。

[0017] 图 5 是节点的最大时间延迟  $\tau_{\max} = 0.23$  秒时, 节点状态随着时间的变化图。

[0018] 图 6 是节点的最大时间延迟  $\tau_{\max} = 0.23$  秒时, 节点之间的耦合强度随时间的变化图。

### 具体实施方式

[0019] 下面结合附图对发明的技术方案进行详细说明:

[0020] 本发明一种复杂时延网络聚类同步的方法, 对于一个给定的复杂网络, 根据网络要达到的同步状态进行对节点进行分组, 同一个组中的节点达到同一个状态; 不同组中的节点达到不同的状态。对每个节点施加只依赖于局部信息的控制输入, 并且节点之间的耦合强度根据该耦合强度相连节点的局部信息从时间零开始自适应增加直到网络达到聚类同步。

[0021] 考虑一个网络由  $N$  个线性耦合的相同节点组成, 并且每个节点为  $n$ - 维动态系统。节点  $i$  的状态方程为

$$[0022] \quad \dot{x}_i = f(x_i(t), t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}(t)(x_j(t-\tau_j) - x_i(t-\tau_i)) + u_i(t). \quad (1)$$

[0023] 其中这里,  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in \mathbb{R}^n$  为节点  $i$  的状态变量; 耦合矩阵  $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{N \times N}$  表示网络的拓扑结构; 如果节点  $i$  和节点  $j$  之间有连边, 则  $a_{ij} > 0$ ; 否则,  $a_{ij} = 0$ ; 并且满足耗散耦合条件  $\sum_j a_{ij} = 0$ 。  $\mathbb{R}^{N \times N}$  是一个  $N \times N$  维的邻接矩阵。  $\tau_i$  为节点  $i$  的延迟时间。  $u_i(t)$  是施加在节点  $i$  上的控制输入。

[0024] 在不考虑反馈控制和节点之间相互耦合的情况下, 单个节点的动力学可以写为

$$[0025] \quad \dot{y}(t) = f(y(t), t) \quad (2)$$

[0026] 其中  $y(t)$  为单个节点的状态,  $\dot{y}(t)$  为节点状态在时刻  $t$  的一次导数,  $t \geq 0$  表示时刻,  $f(y(t), t)$  表示以  $y(t)$  和  $t$  为变量的函数。

[0027] 假设网络中的  $N$  个节点最终达到  $M$  个同步状态, 整个所有的节点分成  $M$  个组,  $M$  为所述网络分组的个数为自然数。不失一般性, 这些组所包含的节点分别为  $G_1 = \{1, 2, \dots, N_1\}$ ,  $G_2 = \{N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2\}$ ,  $\dots$ ,  $G_M = \{N_1+\dots+N_{M-1}+1, \dots, N\}$ , 其中  $N_1+N_2+\dots+N_M = N$ ,  $N_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) 为第  $i$  组的节点个数为自然数。

[0028] 我们的控制目标是使得当  $t \rightarrow +\infty$ , 节点  $i$  在时刻  $t$  的状态为  $s_i(t) = (s_{i1}(t), \dots, s_{in}(t))^T$ , 它的具体定义为:

$$[0029] \quad \begin{cases} x_1(t) = x_2(t) = \dots = x_{N_1}(t) = s_i(t) & i = 1, \dots, N_1 \\ x_{N_1+1}(t) = x_{N_1+2}(t) = \dots = x_{N_1+N_2}(t) = s_i(t) & i = N_1+1, \dots, N_1+N_2 \\ \vdots \\ x_{N_1+\dots+N_{M-1}+1}(t) = x_{N_1+\dots+N_{M-1}+2}(t) = \dots = x_N(t) = s_i(t) & i = N_1+\dots+N_{M-1}+1, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

[0030] 为了达到上述的控制目标, 所施加的控制输入为:

$$[0031] \quad u_i(t) = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}(t)(s_i(t-\tau_i) - s_j(t-\tau_j)), \quad i=1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

[0032] 网络中节点之间的耦合强度的自适应调整策略为:

$$[0033] \quad \dot{a}_{ij}(t) = \beta \|x_i(t-\tau_i) - x_j(t-\tau_j)\| \quad (5)$$

[0034] 其中  $\beta$  为自适应增益。

[0035] 实施例：在图 1 中，网络共有 10 个节点和 9 条边。假设将网络中的节点分成 3 组，每组中的节点分别为 4 个、3 个和 3 个，具体为： $G_1 = \{1, 2, 5, 8\}$ ， $G_2 = \{3, 9, 10\}$  和  $G_3 = \{4, 6, 7\}$ 。每组中的节点在时间  $t$  时刻的期望状态取为该组中所有节点的算术平均值，即：

$$[0036] \begin{cases} s_1(t) = s_2(t) = s_5(t) = s_8(t) = (x_1(t) + x_2(t) + x_5(t) + x_8(t))/4 \\ s_3(t) = s_9(t) = s_{10}(t) = (x_3(t) + x_9(t) + x_{10}(t))/3 \\ s_4(t) = s_6(t) = s_7(t) = (x_4(t) + x_6(t) + x_7(t))/3 \end{cases} \quad (6)$$

[0037] 网络中单个节点的状态取为典型的洛伦兹系统，其动力学方程为：

$$[0038] \begin{cases} \dot{y}_1(t) = -10y_1(t) + 10y_2(t) \\ \dot{y}_2(t) = 28y_1(t) - y_2(t) - y_1(t)y_3(t) \\ \dot{y}_3(t) = y_1(t)y_2(t) - 8y_3(t)/3 \end{cases} \quad (7)$$

[0039] 此时，洛伦兹系统是混沌的如图 2 所示。当 (1) 中的控制输入取为 (4)，并且其中的期望状态为 (6)。假设网络中节点之间的耦合强度在时间  $t \leq 0$  时均取为 0，自适应增益  $\beta = 0.2$ 。每个节点的延迟在  $[0, \tau_{\max}]$  中随机选取。在图 3 和图 4 中节点的最大时间延迟  $\tau_{\max} = 0.2$  秒时。图 3 描述每个节点状态随着时间变化的规律。节点状态的初始值随机分布在  $[-5, 5]$  上。从图 3 最上面的一幅小图，不难发现，当时间  $t > 23$  秒，4 个第一组的节点状态的第一分量为一条实线，3 个第二组的节点状态的第一分量为一条虚线；3 个第三组的节点状态的第一分量为一条点线。这就意味着在时间  $t > 23$  秒后，网络中所有的节点达到 3 个状态，即实现了在这一状态分量上的聚类同步。同理，从图 3 中间的一幅小图可以发现，当时间  $t > 21$  秒后，网络中所有的节点状态的第二分量达到 3 个状态，即实现在该状态分量上的聚类同步。从图 3 最下面的一幅小图可以发现，当时间  $t > 22$  秒后，网络中所有的节点状态的第三分量达到 3 个状态，即实现在该状态分量上的聚类同步。因此，当时间  $t > 23$  秒后，网络中节点的所有分量均达到 3 个状态，从而实现了聚类同步。图 4 是图 3 中的网络中节点之间的耦合强度在三个分量上的变化情况。图 4 中最上面的一幅小图表明了节点之间耦合强度的第一分量首先从零开始迅速的增长，然后增长速度逐渐减小，在时间  $t > 23$  秒后不再变化。由于开始时节点状态的第一分量是随机选取的，所以节点状态的第一分量与期望状态的差距比较大，导致 (5) 的右端数值大，即节点之间耦合强度第一分量的变化率比较大。随着时间的增加，从图 3 的最上面的一幅小图可以看出，同一组中的节点状态的第一分量逐渐接近，即接近于 (6) 定义的节点状态第一分量的期望值，导致 (5) 的右端随着时间增加而逐渐减小，最后在时间  $t > 23$  秒后变为 0，即节点之间耦合强度的第一分量不再变化。对于节点之间耦合强度的第二分量和第三分量分别在  $t > 21$  秒和  $t > 22$  秒后不再变化。因此，在时间  $t > 23$  秒后，节点之间耦合强度的所有分量均不再变化，与图 3 中在时间  $t > 23$  秒后，网络达到聚类同步正好一致。此时，我们就得到了网络达到聚类同步时，节点之间耦合强度所有分量的最小值，为我们实际使用网络提供依据。

[0040] 当进一步的增加延迟时间，在图 5 和图 6 中，节点的最大时间延迟取为  $\tau_{\max} = 0.23$  秒。从图 5 中不难发现，虽然同一组中的节点状态接近一致，但是并不能达到同步。图 6 显示了网络中节点之间耦合强度一直增长。这意味着 (5) 的右端不为零，即网络不能达到聚类同步。

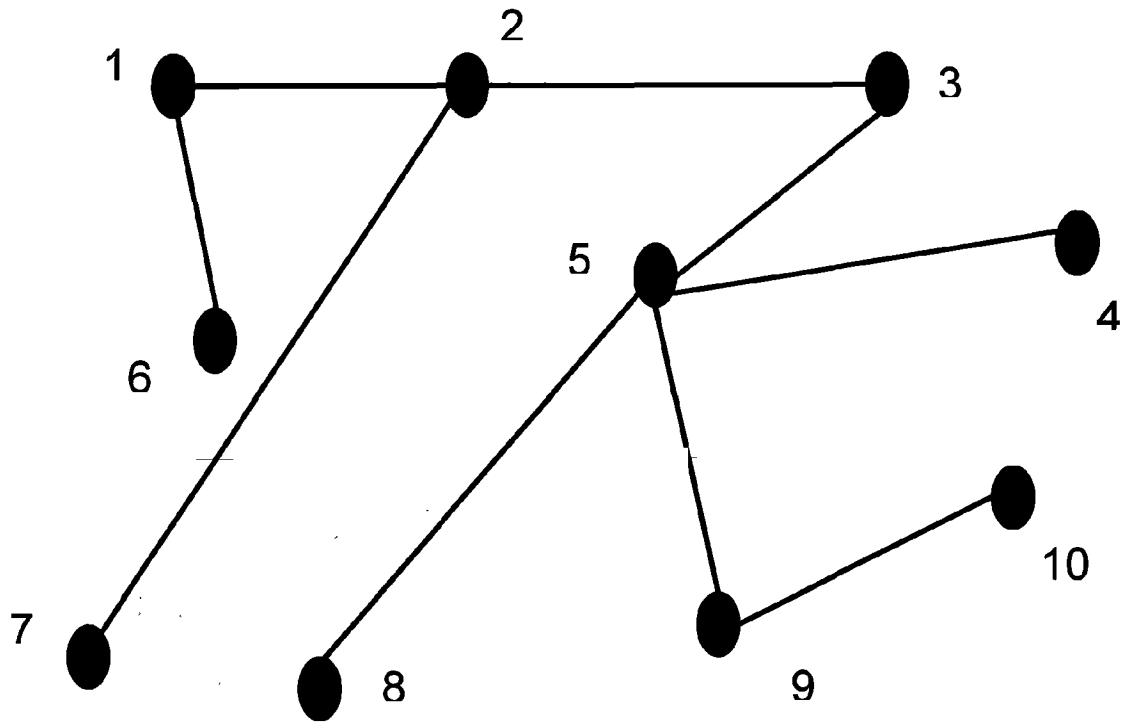


图 1

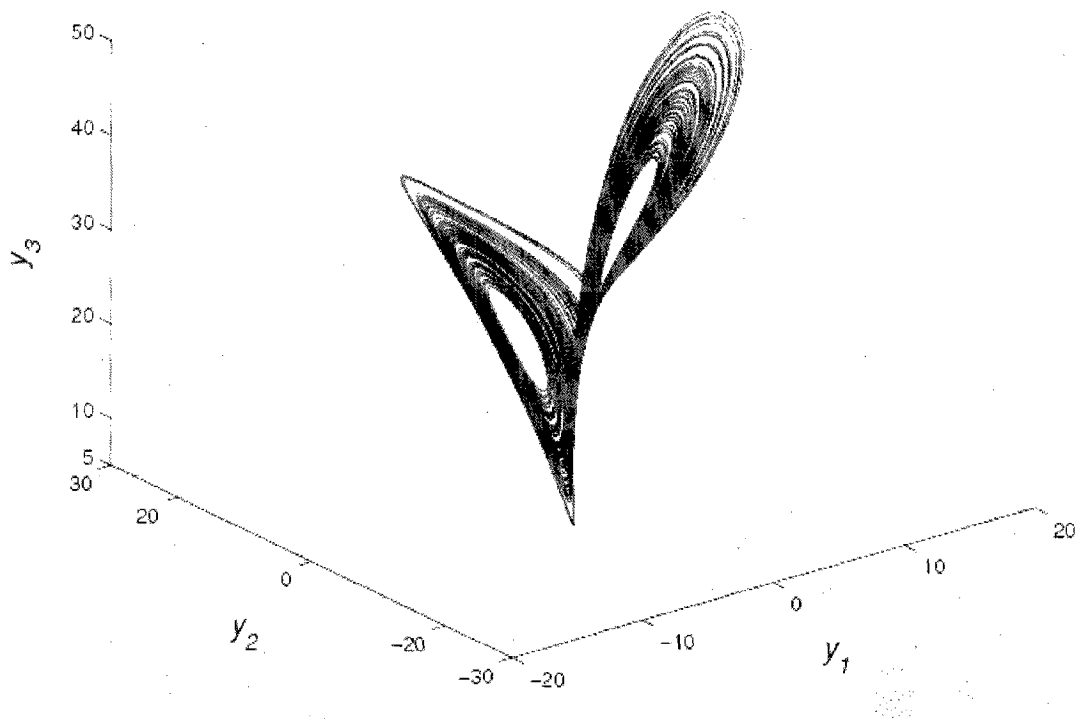


图 2

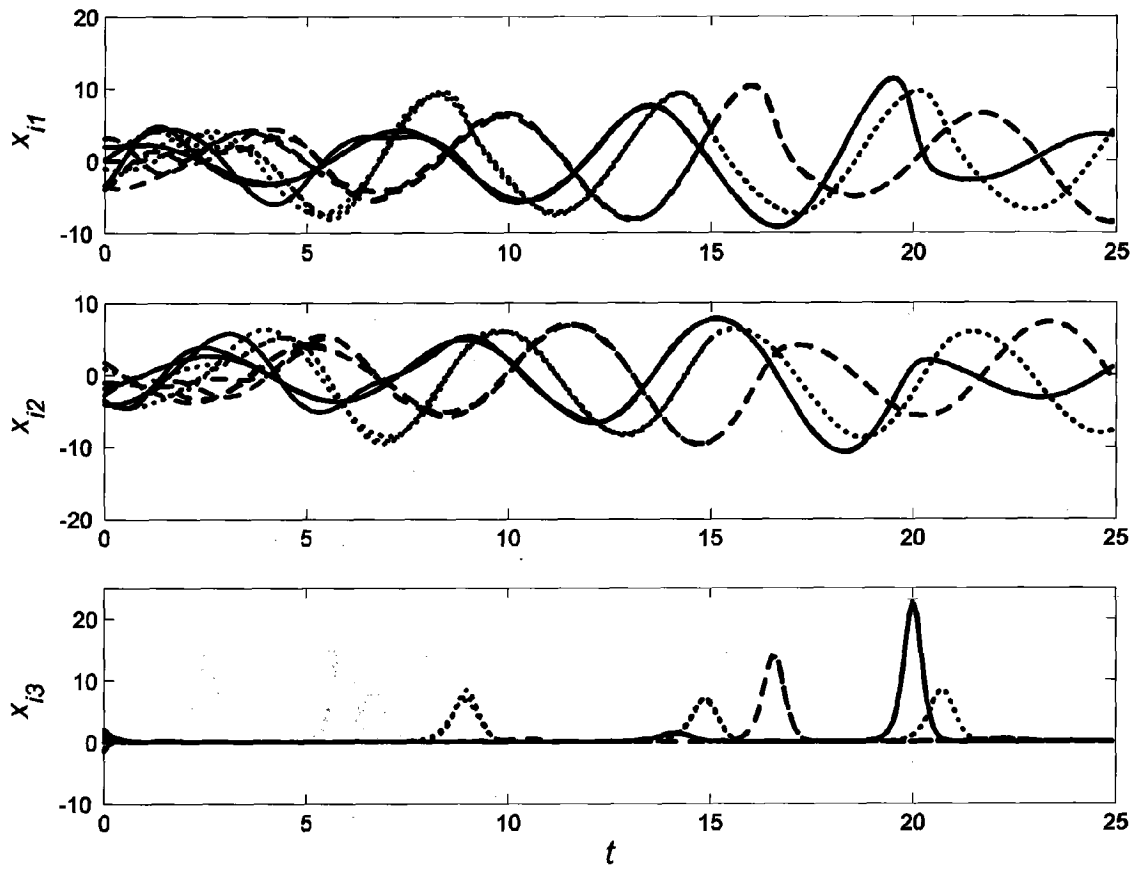


图 3



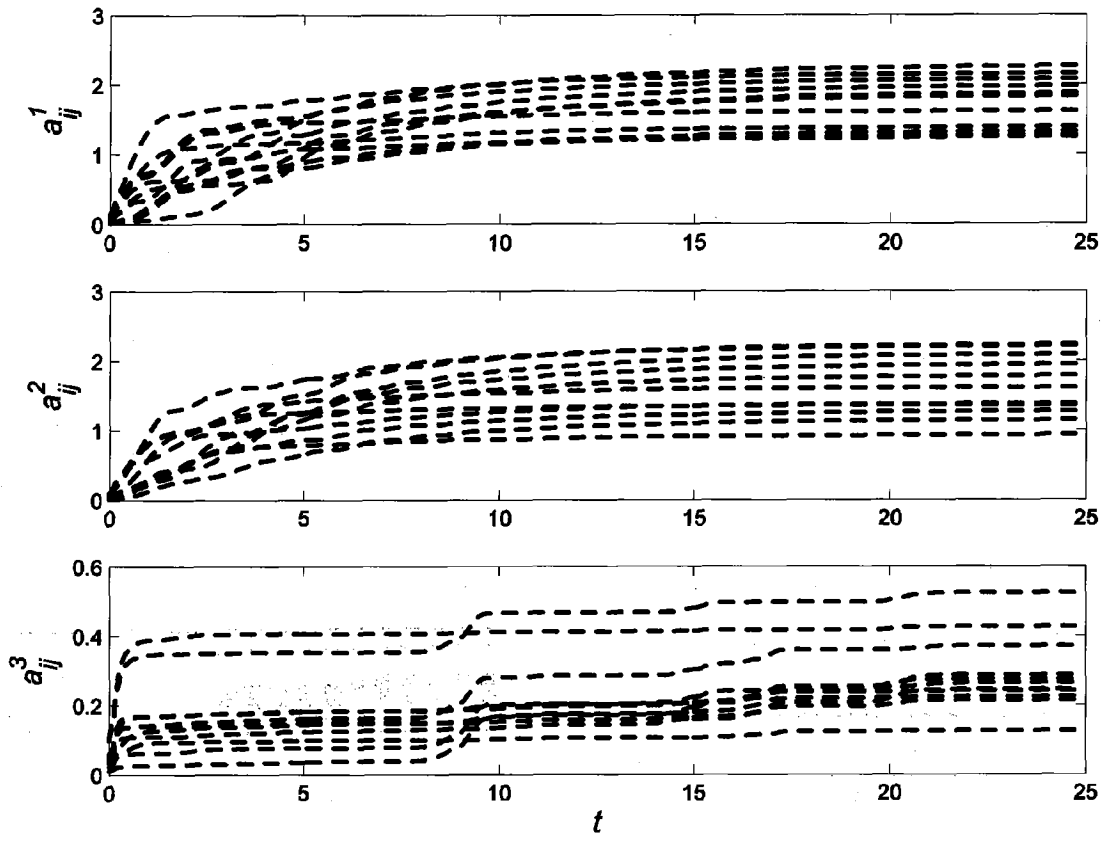


图 4

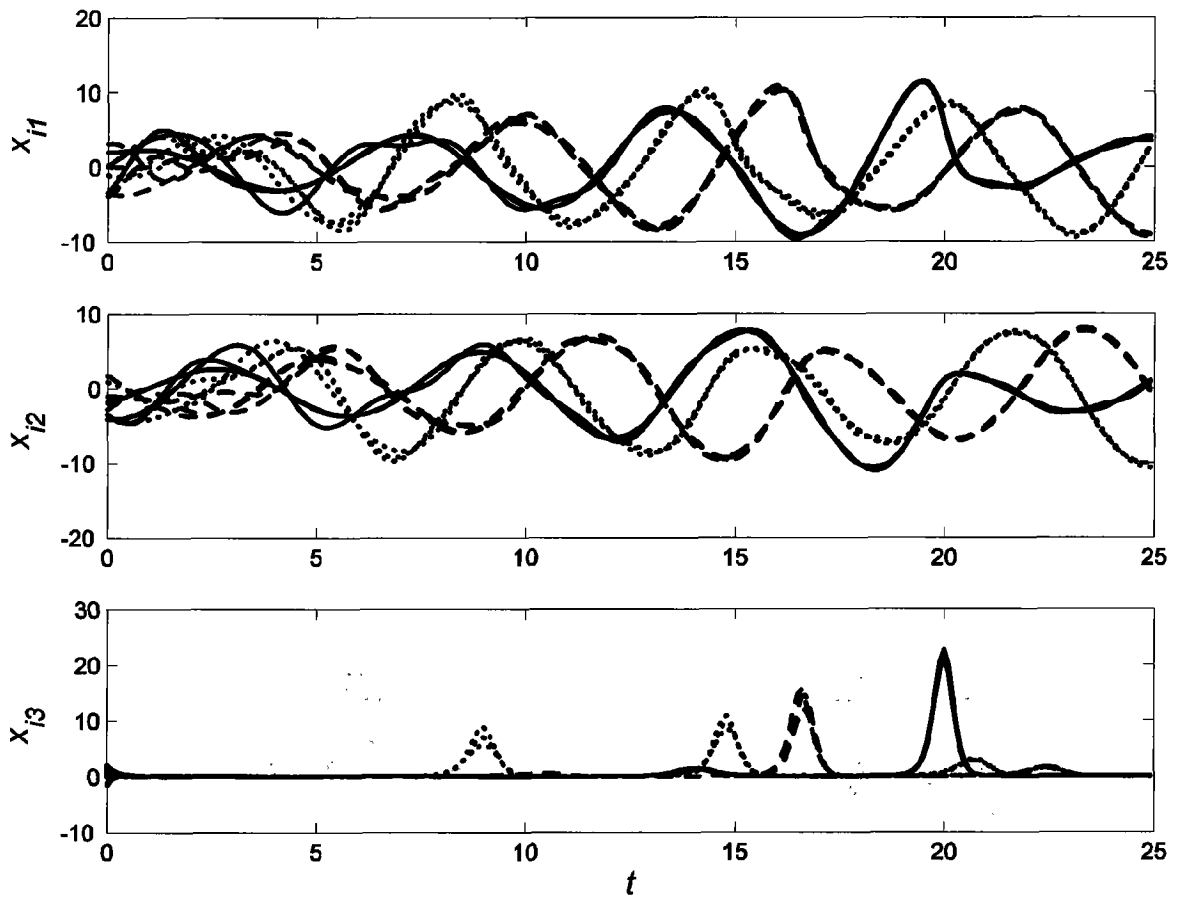


图 5

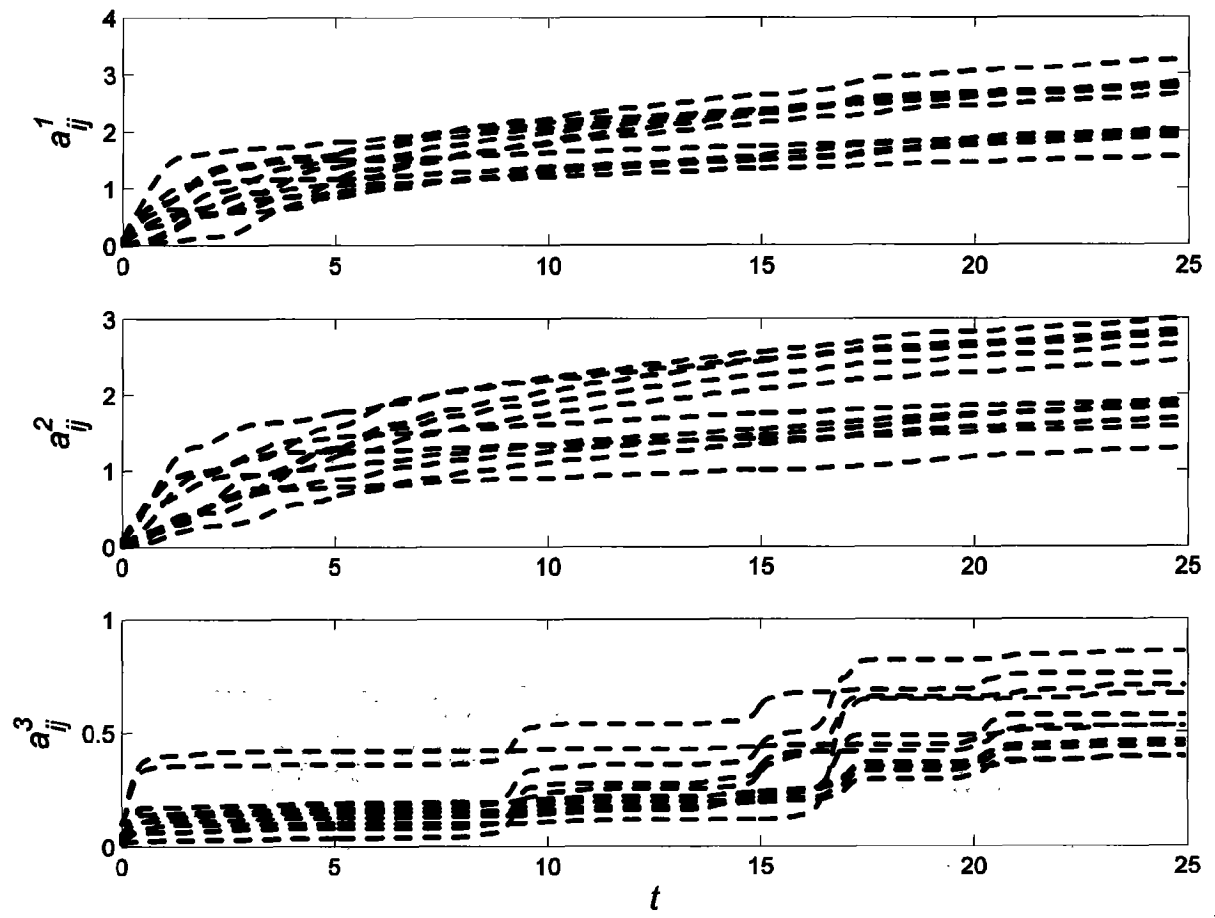


图 6