

# 不同时延的二阶多智能体系统的编队协调控制

丁丹丹

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210046)

**摘 要:**多智能体的编队协调控制可以作为 CPS (Cyber-Physical Systems, 信息物理系统) 的一个实例。多智能体之间信息传输存在通信时延, 每个智能体的信息处理存在输入时延, 历史文献中提出的具有时延的编队协调控制算法只实现了一种队形的控制, 且系统中每个智能体最后并没有定位到各自的目标位置。文中提出了另一种具有不同时延的编队协调控制器算法。本控制器算法考虑系统中每个智能体寻找目标位置的稳定部分, 并在此部分考虑时延问题, 最后使每个智能体从其初始位置移动到各自预先定义的目标位置, 并且在每个智能体都到达各自的目标位置时, 系统速度渐进一致为零。假设网络拓扑是静态有向连通图且存在一个有向生成树, 应用频域分析理论和矩阵论, 证明了使系统达到编队协调控制的分散式条件。仿真部分通过一个由四个智能体组成的系统的编队协调控制验证了文中研究结果的正确性。

**关键词:**二阶多智能体系统; 不同时延; 目标位置; 有向生成树

**中图分类号:** TP301.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2012)08-0067-05

## Formation Coordination Control of Second-order Multi-agent Systems with Heterogeneous Delays

DING Dan-dan

(College of Automation, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** Formation coordination control of multi-agent systems is an example of CPS (Cyber-Physical Systems). The control algorithms with heterogeneous communication delays and self-delays for each agent proposed in the literature publications are only formation keeping, not the goal seeking. Propose a control algorithm with heterogeneous communication delays and self-delays for each agent. In order to direct the agents to move from their initial locations to pre-defined destinations, at the same time, the velocity of the agents asymptotically converges to zero, the goal seeking stabilization part for each agent with different delays is considered in the algorithm. Suppose there is a static directed interconnected graph with a directed spanning tree, based on the frequency-domain analysis and matrix theory, distributed conditions are proved for the formation control of the system. A four-agent formation coordination control is shown in simulation to verify the theoretical result.

**Key words:** second-order multi-agent systems; heterogeneous delays; desired destinations; directed spanning trees

### 0 引言

CPS (cyber-physical systems, 信息物理系统) 的出现给复杂网络领域的研究者带来了无限机遇。CPS 是由很多具有通信、计算和决策控制功能的设备组成的智能系统, 这些设备可以通过相互作用使整个系统处于最佳状态。多智能体的编队协调控制可以作为 CPS 的一个实例<sup>[1]</sup>。

近年来, 多智能体系统的编队协调控制逐渐应用

到军事侦察、搜寻、排雷、飞行器编队协调飞行、空间探测等多个领域, 并吸引了大量的研究者, 成为多智能体系统研究中一个非常活跃的方向。

一致性问题已经被认为是编队协调控制的一个特殊实例。早期研究的是一阶多智能体系统的一致性问题, Olfati-Saber 和 Murry<sup>[2]</sup> 提出如果网络拓扑结构是强连通的, 则一阶多智能体系统可以实现一致性; Ren 和 Beard<sup>[3]</sup> 扩展了文献[2]的结果, 研究了变拓扑的一阶多智能体系统的一致性, 指出只要在一定时间段内各个网络拓扑子图的联合图包含一条有向生成树, 即可实现系统的一致性。与一阶多智能体系统相比, 二阶多智能体系统的一致性研究要复杂和困难的多。Ren 和 Atkins<sup>[4]</sup> 研究了二阶多智能体系统的一致性问题, 提出了三种控制器, 分别达到不同的控制效果, 得出的结论是: 如果网络拓扑包含有向生成树, 并且控制

收稿日期: 2011-12-14; 修回日期: 2012-03-13

基金项目: 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(08KJD510022)

作者简介: 丁丹丹(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为复杂网络在信息物理系统中的应用研究; 导师: 蒋国平, 教授, 博士生导师, 研究方向为混沌系统同步与控制、混沌信息处理与混沌通信系统设计、复杂网络理论及其应用研究。

增益满足一定的条件,则二阶多智能体系统渐进一致。

在通信网络中,由于通信线路、通信设备等影响,网络中存在时延。文献[2,5]分析了具有相同时延的一阶多智能体系统的一致性算法;文献[6,7]提出了不同时延的多智能体系统的一致性算法;文献[8]研究了具有不同时延的离散时间多智能体系统的一阶算法的一致性。以上均对一阶多智能体系统的时延问题的一致性算法进行研究,但对于具有时延的二阶多智能体系统的一致性算法的研究相对较少。文献[9,10]研究了具有输入和通信时延的二阶多智能体系统的一致性问题。在文中,讨论的是,对于有向网络拓扑图中的二阶时延多智能体系统的运动分析,尝试另一种控制器的时延问题,最后达到不同的控制效果。

文中要研究的是不同时延的二阶多智能体系统的编队协调控制算法。假设网络拓扑是静态有向连通图且存在一个有向生成树,提出另一种具有不同时延的控制器算法,使每个智能体从其初始位置移动到各自预先定义的目标位置,并且在每个智能体都到达各自的目标位置时,系统速度渐进一致为零。应用频域分析理论和矩阵论,研究确保系统达到编队协调控制问题。需要说明的一点是,文中暂不涉及智能体间的避障问题。

## 1 预备知识

对于一个多智能体系统,智能体间的信息交互可以用图来描述。令  $G = \{V, E, A\}$  表示一个有向加权图,  $G$  包括节点集合  $V = \{1, \dots, n\}$ 、边集合  $E \subseteq V \times V$  及邻接矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。一条有向边  $(j, i)$  表示节点  $i$  可接收到节点  $j$  的信息。邻接矩阵  $A$  的非对角元素定义如下:  $a_{ij} > 0 \Leftrightarrow (j, i) \in E$  及  $a_{ij} = 0 \Leftrightarrow (j, i) \notin E$ , 并设  $a_{ii} = 0, \forall i \in V$ 。

节点  $i$  的邻居集合定义为  $N_i = \{j \in V \mid (j, i) \in E\}$ , 矩阵  $D = \text{diag}\{d_i, i \in V\}$ ,  $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$  为矩阵  $A$  的第  $i$  行元素的和(称为节点  $i$  的入度), 则矩阵  $L = D - A$  为图  $G$  的拉普拉斯矩阵。所以拉普拉斯矩阵的行和为零, 一般来说, 有向图的拉普拉斯矩阵是不对称的。

对于两个节点  $i, j$ , 存在下标集合  $\{i_1, \dots, i_l\}$ , 满足  $a_{ii_1} > 0, a_{i_1 i_2} > 0, \dots, a_{i_l i} > 0$ , 则称节点  $j$  到节点  $i$  之间存在一条有向连接路径。对于有向图  $G$ , 若任意两个不同的节点  $j$  与  $i$  都存在一条从节点  $j$  到节点  $i$  的有向连接路径, 则称图  $G$  是强连通的; 如果至少有一个节点  $i$  到任意节点都存在一条有向连接路径, 则称图  $G$  包含一条有向生成树, 且称节点  $i$  为根节点。

引理 1<sup>[11]</sup> 图  $G$  的拉普拉斯矩阵  $L$  具有单一的特征值 0, 且  $L$  的其它特征值均含有正实部, 充要条件

是图  $G = \{V, E, A\}$  包含一个(有向)生成树。

## 2 具有不同时延的二阶多智能体系统的编队协调控制

### 2.1 多智能体系统模型及其具有时延的控制器

考虑一个二阶多智能体系统:

$$\begin{cases} \dot{p}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $p_i \in \mathbb{R}^2$  和  $v_i \in \mathbb{R}^2$  分别表示智能体  $i$  的位置和速度,  $u_i \in \mathbb{R}^2$  是智能体  $i$  的控制输入(又称加速度),  $i \in V = \{1, \dots, n\}$ 。

在实际的编队协调控制中, 对于二阶多智能体系统, 想要每个智能体从其初始位置移动到各自预先定义的目标位置, 并且在每个智能体都到达各自的目标位置时, 系统速度渐进一致为零。在这种情况下, 文献[4]中提出一个二阶多智能体系统的编队协调控制算法:

$$u_i = -h_i(p_i - p_i^d) - \beta_i v_i - \sum_{j \in N_i} a_{ij} [((p_i - p_i^d) - (p_j - p_j^d)) + \gamma_i(v_i - v_j)] \quad (2)$$

其中,  $h_i > 0, \beta_i > 0, \gamma_i > 0$  是系统的控制参数;  $p_i^d$  为预先定义的目标位置,  $a_{ij}$  为邻接矩阵  $A$  中的元素。

将式(2)拆分成以下的三部分:

$$\begin{aligned} u_i &= u_{i1} + u_{i2} + u_{i3} \\ u_{i1} &= -h_i(p_i - p_i^d) \\ u_{i2} &= -\beta_i v_i \\ u_{i3} &= -\sum_{j \in N_i} a_{ij} [((p_i - p_i^d) - (p_j - p_j^d)) + \gamma_i(v_i - v_j)] \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $u_{i1}$  是智能体  $i$  寻找目标位置的稳定部分,  $u_{i2}$  是智能体  $i$  的速度稳定部分,  $u_{i3}$  是多智能体之间的协调控制部分。

多智能体之间信息传输存在通信时延  $T_{ij} > 0$ , 每个智能体的信息处理存在输入时延  $T_i \geq 0$ 。考虑网络时延作用在智能体  $i$  寻找目标位置的稳定部分  $u_{i1}$  和多智能体之间的协调控制部分  $u_{i3}$  上,

$$\begin{aligned} u_{i1}(t) &= -h_i(p_i(t - T_i) - p_i^d) \\ u_{i3}(t) &= -\sum_{j \in N_i} a_{ij} [((p_i(t - T_i) - p_i^d) - (p_j(t - T_{ij} - T_i) - p_j^d)) + \gamma_i(v_i(t - T_i) - v_j(t - T_{ij} - T_i))] \end{aligned}$$

文献[9]中提出的控制器算法是:

$$u_i(t) = -\gamma_i v_i(t) - \kappa_i \sum_{j \in N_i} a_{ij} [((v_i(t - T_i) - v_j(t - T_{ij})) + \gamma_i((p_i(t - T_i) - p_i^d) - (p_j(t - T_{ij}) - p_j^d)))]$$

其中,  $\kappa_i$  为协调控制增益。在此, 提出不同于文献[9]中的控制器算法:



$$\begin{aligned}
u_i(t) = & -h_i(p_i(t-T_i) - p_i^d) - \beta_i v_i(t) \\
& - \sum_{j \in N_i} a_{ij} [((p_i(t-T_i) - p_i^d) - (p_j(t-T_{ij}-T_i) - p_j^d)) \\
& + \gamma_i(v_i(t-T_i) - v_j(t-T_{ij}-T_i))] \quad (4)
\end{aligned}$$

将式(4)代入式(1),则具有不同时延的闭环系统为

$$\begin{aligned}
\dot{p}_i(t) &= v_i(t) \\
\dot{v}_i(t) = & -h_i(p_i(t-T_i) - p_i^d) - \beta_i v_i(t) \\
& - \sum_{j \in N_i} a_{ij} ((p_i(t-T_i) - p_i^d) - (p_j(t-T_{ij}-T_i) - p_j^d)) \\
& + \gamma_i(v_i(t-T_i) - v_j(t-T_{ij}-T_i)) \quad (5)
\end{aligned}$$

文中研究系统(5)的编队协调控制问题。

## 2.2 不同时延多智能体系统的编队协调控制

定理1 假设系统(5)有  $n$  智能体,网络拓扑图  $G = \{V, E, A\}$  是静态连通有向图,且存在一个有向生成树。如果

$$(\beta_i + 2\gamma_i d_i + c_0)T_i < \pi, \forall i \in V \quad (6)$$

其中,  $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$

$$c_0 = \sqrt{4\gamma_i^2 d_i^2 + 4(\beta_i \gamma_i - 2)d_i + \beta_i^2 - 4h_i}$$

则系统(5)达到编队协调控制,即系统(5)中每个智能体从其初始位置移动到各自预先定义的目标位置,并且在每个智能体都到达各自的目标位置时,系统速度渐进一致为零。也就是,对于所有的  $i \in V$ , 有  $\lim_{t \rightarrow \infty} v_i(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t) = p_i^d$ 。

证明:在系统(5)中,令  $\hat{p}_i(t) = p_i(t) - p_i^d, \hat{v}_i(t) = v_i(t) - 0 = v_i(t)$ ,代入系统(5)中得:

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{p}}_i(t) &= \hat{v}_i(t) \\
\dot{\hat{v}}_i(t) = & -h_i \hat{p}_i(t-T_i) - \beta_i \hat{v}_i(t) - \sum_{j \in N_i} a_{ij} [(\hat{p}_i(t-T_i) - \hat{p}_j(t-T_{ij}-T_i)) \\
& + \gamma_i(\hat{v}_i(t-T_i) - \hat{v}_j(t-T_{ij}-T_i))] \quad (7)
\end{aligned}$$

对上式进行拉普拉斯变换,得

$$\begin{aligned}
s\hat{p}_i(s) &= \hat{v}_i(s) \\
s\hat{v}_i(s) = & -h_i \hat{p}_i(s)e^{-sT_i} - \beta_i \hat{v}_i(s) - \sum_{j \in N_i} a_{ij} [(\hat{p}_i(s)e^{-sT_i} - \hat{p}_j(s)e^{-s(T_{ij}+T_i)}) \\
& + \gamma_i(\hat{v}_i(s)e^{-sT_i} - \hat{v}_j(s)e^{-s(T_{ij}+T_i)})] \quad (8)
\end{aligned}$$

其中,  $\hat{p}_i(s)$  和  $\hat{v}_i(s)$  分别是  $\hat{p}_i(t)$  和  $\hat{v}_i(t)$  的拉普拉斯变换。

定义一个  $n \times n$  矩阵  $L(s) = [l_{ij}(s)]$ , 其中

$$l_{ij}(s) = \begin{cases} -a_{ij}e^{-s(T_i+T_j)}, j \in N_i \\ (\sum_{j \in N_i} a_{ij})e^{-sT_i}, j = i \\ 0, \text{其它} \end{cases}$$

易知  $L(0) = L$ , 是图  $G$  的拉普拉斯矩阵。

将式(8)变换得

$$s\hat{p}(s) = \hat{v}(s)$$

$$s\hat{v}(s) = -H(s) \otimes I_2 \hat{p}(s) - B \otimes I_2 \hat{v}(s) - L(s) \otimes I_2 \hat{p}(s) - (\Gamma L(s)) \otimes I_2 \hat{v}(s)$$

其中,  $\hat{p}(s) = [\hat{p}_1(s)^T, \hat{p}_2(s)^T, \dots, \hat{p}_n(s)^T]^T$ ,  $\hat{v}(s) = [\hat{v}_1(s)^T, \hat{v}_2(s)^T, \dots, \hat{v}_n(s)^T]^T$ ,  $\otimes$  表示 Kronecker 乘积,  $I_2$  是  $2 \times 2$  阶单位矩阵,  $H(s) = \text{diag}\{h_i e^{-sT_i}, i \in V\}$ ,  $B = \text{diag}\{\beta_i, i \in V\}$  和  $\Gamma = \text{diag}\{\gamma_i, i \in V\}$ 。

因此,得到关于  $\hat{p}(t) = [\hat{p}_1(t)^T, \hat{p}_2(t)^T, \dots, \hat{p}_n(t)^T]^T$  的特征方程:

$$\det[(s^2 I_n + s(B + \Gamma L(s)) + H(s) + L(s)) \otimes I_2] = 0 \quad (9)$$

根据 Kronecker 乘子的性质,上式等价于

$$\det(s^2 I_n + s(B + \Gamma L(s)) + H(s) + L(s)) = 0 \quad (10)$$

令

$$C(s) = \sqrt{\Gamma^2 L^2(s) + 2(B\Gamma - 2I_n)L(s) + B^2 - 4H(s)}$$

则特征方程(10)的特征根为

$$s_1 I_n = -\frac{1}{2}(B + \Gamma L(s) + C(s)), s_2 I_n = -\frac{1}{2}(B + \Gamma L(s) - C(s))$$

其中,  $s_1, s_2$  为特征根。

因此,特征方程(10)等价于

$$\det(sI_n + \frac{1}{2}(B + \Gamma L(s) + C(s))) = 0 \quad (11)$$

$$\text{或 } \det(sI_n + \frac{1}{2}(B + \Gamma L(s) - C(s))) = 0 \quad (12)$$

先分析方程(11)的根:

$$\text{令 } M(s) = \det(sI_n + \frac{1}{2}(B + \Gamma L(s) + C(s)))$$

当  $s = 0$  时,  $M(0) = \det(sI_n + \frac{1}{2}(B + \Gamma L(0) + C(0)))$ 。由于  $L(0) = L$ , 图  $G = \{V, E, A\}$  存在一个有向生成树,根据引理1可知矩阵  $L$  满足  $\text{rank}(L) = n - 1$ 。则  $M(0) = \det(\frac{1}{2}(B + \sqrt{B^2 - 4H(s)}))$ , 因为  $H(s) = \text{diag}\{h_i e^{-sT_i}, i \in V\}$ ,  $B = \text{diag}\{\beta_i, i \in V\}$  和  $h_i > 0, \beta_i > 0$ , 所以  $M(0) \neq 0$ , 即  $M(s)$  在  $s = 0$  处没有根。

现在,定义  $F(s) = \det(I_n + \frac{1}{2s}(B + \Gamma L(s) + C(s)))$ , 下面将证明  $F(s)$  的零点都在左半开复平面内。

$$\text{令 } Q(s) = \frac{1}{2s}(B + \Gamma L(s) + C(s)),$$

$$\text{则 } Q(j\omega) = \frac{1}{2j\omega}(B + \Gamma L(j\omega) + C(j\omega))$$

根据广义 Nyquist 判据<sup>[12]</sup>, 如果对于所有的  $\omega \in$

$R$ , 矩阵  $Q(j\omega)$  的特征值  $\lambda(Q(j\omega))$  的 Nyquist 曲线不包含  $-1 + j0$  点, 则  $F(s)$  的零点都在左半开复平面内。

下面应用 Greshgorin 圆盘定理, 估计矩阵  $Q(j\omega)$  的特征值  $\lambda(Q(j\omega))$  的范围:

$$\lambda(Q(j\omega)) \in \bigcup_{i \in V} Q_i \quad (13)$$

其中,

$$Q_i = \left\{ \rho : \rho \in \mathbb{C}, \left| \rho - \frac{1}{2}(\beta_i + \gamma_i d_i + c_i) \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega} \right| \leq \left| \frac{1}{2}(\beta_i + \gamma_i d_i + c_i) \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega} \right| \right\},$$

其中,  $c_i = \sqrt{\gamma_i^2 d_i^2 + 2(\beta_i \gamma_i - 2)d_i + \beta_i^2 - 4h_i}$ ,

圆盘  $Q_i$  的中心为:

$$Q_n(j\omega) = \frac{1}{2}(\beta_i + \gamma_i d_i + c_i) \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega}$$

当圆盘的中心  $Q_n(j\omega)$  的 Nyquist 曲线随着  $\omega \in R$  变化时, 圆盘  $Q_i$  也跟着相应变化。假设复平面的原点为  $O$ , 复平面原点  $O$  与圆心  $Q_n(j\omega)$  连线的延长线交于圆盘  $Q_i$  的边界圆周于点  $W_i(j\omega)$ 。则点  $W_i(j\omega)$  的轨迹为:

$$W_i(j\omega) = \frac{1}{2}(\beta_i + 2\gamma_i d_i + c_n) \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega} \quad (14)$$

其中,  $c_n = \sqrt{4\gamma_i^2 d_i^2 + 4(\beta_i \gamma_i - 2)d_i + \beta_i^2 - 4h_i}$ ,

在继续证明之前, 需要用到下面的引理。

引理 2<sup>[13]</sup> 对于所有的  $\omega \in R$ , 凸包  $Co(0 \cup \{W_i(j\omega), i \in V\})$  包含圆盘  $Q_i$  的集合  $\bigcup_{i \in V} Q_i$ 。

引理 3<sup>[14]</sup> 假设

$$E_i(j\omega) = k_i \frac{e^{-j\omega T_i}}{j\omega}, i \in V \quad (15)$$

其中,  $k_i = \frac{\pi}{2T_i}$ , 时延  $T_i$  为非负数。则对于  $\forall \delta \in [0, 1)$ , 当  $n \geq 2, \omega \in R$  时, 凸包  $\delta Co(0 \cup \{E_i(j\omega), i \in V\})$  不包含  $-1 + j0$  点。

下面继续证明定理 1。

根据式(14)和式(15), 令

$$W_i(j\omega) = \delta_i E_i(j\omega), \text{ 其中, } \delta_i = \frac{T_i}{\pi}(\beta_i + 2\gamma_i d_i + c_n)$$

根据定理 1 的条件式(6), 可知  $\delta_i < 1$ 。

令  $\delta = \max\{\delta_i, i \in V\}$ , 显然有  $\delta < 1$ , 则下式成立,  $Co(0 \cup \{W_i(j\omega), i \in V\}) \subseteq \delta Co(0 \cup \{E_i(j\omega), i \in V\})$ , 根据引理 2, 得  $\bigcup_{i \in V} Q_i \subseteq Co(0 \cup \{W_i(j\omega), i \in V\})$ , 则  $\bigcup_{i \in V} Q_i \subseteq \delta Co(0 \cup \{E_i(j\omega), i \in V\})$ , 根据引理 3, 知  $(-1, j0) \notin \delta Co(0 \cup \{E_i(j\omega), i \in V\})$ , 所以  $(-1, j0) \notin \bigcup_{i \in V} Q_i$ 。

由式(13)可知  $\lambda(Q(j\omega)) \in \bigcup_{i \in V} Q_i$ , 所以矩阵  $Q(j\omega)$  的特征值  $\lambda(Q(j\omega))$  的 Nyquist 曲线不包含  $-$

$1 + j0$  点, 根据广义 Nyquist 判据,  $F(s)$  的零点都在左半开复平面内, 即方程(10)的所有特征根都有负实部。

同理可证, 方程(12)的所有特征根都有负实部。

因此, 根据 Kronecker 乘子的性质, 关于  $\hat{p}(t) = [\hat{p}_1(t)^T, \hat{p}_2(t)^T, \dots, \hat{p}_n(t)^T]^T$  的特征方程(9)的所有特征根都具有负实部。所以, 对于所有的  $i \in V$ , 有  $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{v}_i(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{p}_i(t) = 0$ , 即有  $\lim_{t \rightarrow \infty} v_i(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t) = p_i^d$ 。

因此, 系统(5)中每个智能体从其初始位置移动到各自预先定义的目标位置, 并且在每个智能体都到达各自的目标位置时, 系统速度渐进一致为零。系统(5)达到编队协调控制。定理 1 得证。

注 1: 定理 1 中的条件式(6)是使系统(5)达到编队协调控制的分散式条件, 该条件只用到了每个智能体的局部信息。

注 2: 定理 1 中的条件式(6)只与输入时延  $T_i$  有关, 而与通信时延  $T_{ij}$  无关。

### 3 计算机仿真

本节应用计算机 Matlab 数值仿真验证定理 1 的正确性, 假设二阶多智能体系统(5)由 4 个智能体组成, 其网络拓扑图如图 1 所示。可看出图 1 中至少包含一个有向生成树。则其有向边的权值为:  $a_{13} = 1.5, a_{21} = 2.0, a_{32} = 2.5, a_{41} = 3$ ; 通信时延  $T_{ij}: T_{13} = 0.5s, T_{21} = 0.4s, T_{32} = 0.3s, T_{41} = 0.2s$ ; 对于所有的  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ , 选取控制参数  $h_i = 2, \beta_i = 2, \gamma_i = 1$ 。

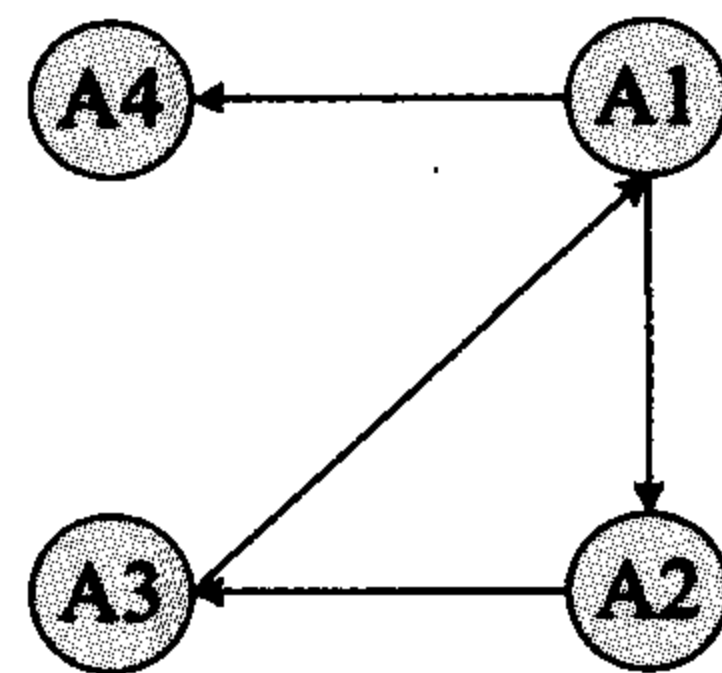


图 1 系统(5)网络拓扑图

由定理 1 中的条件式(6)得:  $T_1 \in [0, 0.4342), T_2 \in [0, 0.3319), T_3 \in [0, 0.2712), T_4 \in [0, 0.2300)$ , 则选取输入时延  $T_i: T_1 = 0.3s, T_2 = 0.3s, T_3 = 0.2s, T_4 = 0.2s$ 。

根据图 1 中的队形, 则预先定义的目标位置  $p_i^d$  为:  $p_1^d = [16, 16]^T, p_2^d = [16, 9]^T, p_3^d = [9, 9]^T, p_4^d = [9, 16]^T$ 。各个智能体的位置和速度的初值随机生成。

仿真结果如下:

从图 2 中可看出系统(5)中每个智能体从其初始位置移动到各自预先定义的目标位置, 并且在每个智能体都到达各自的目标位置时, 从图 3 中可看出系统(5)中所有智能体的速度渐进一致为零。则系统(5)



达到编队协调控制。系统仿真结果与定理1结论一致。

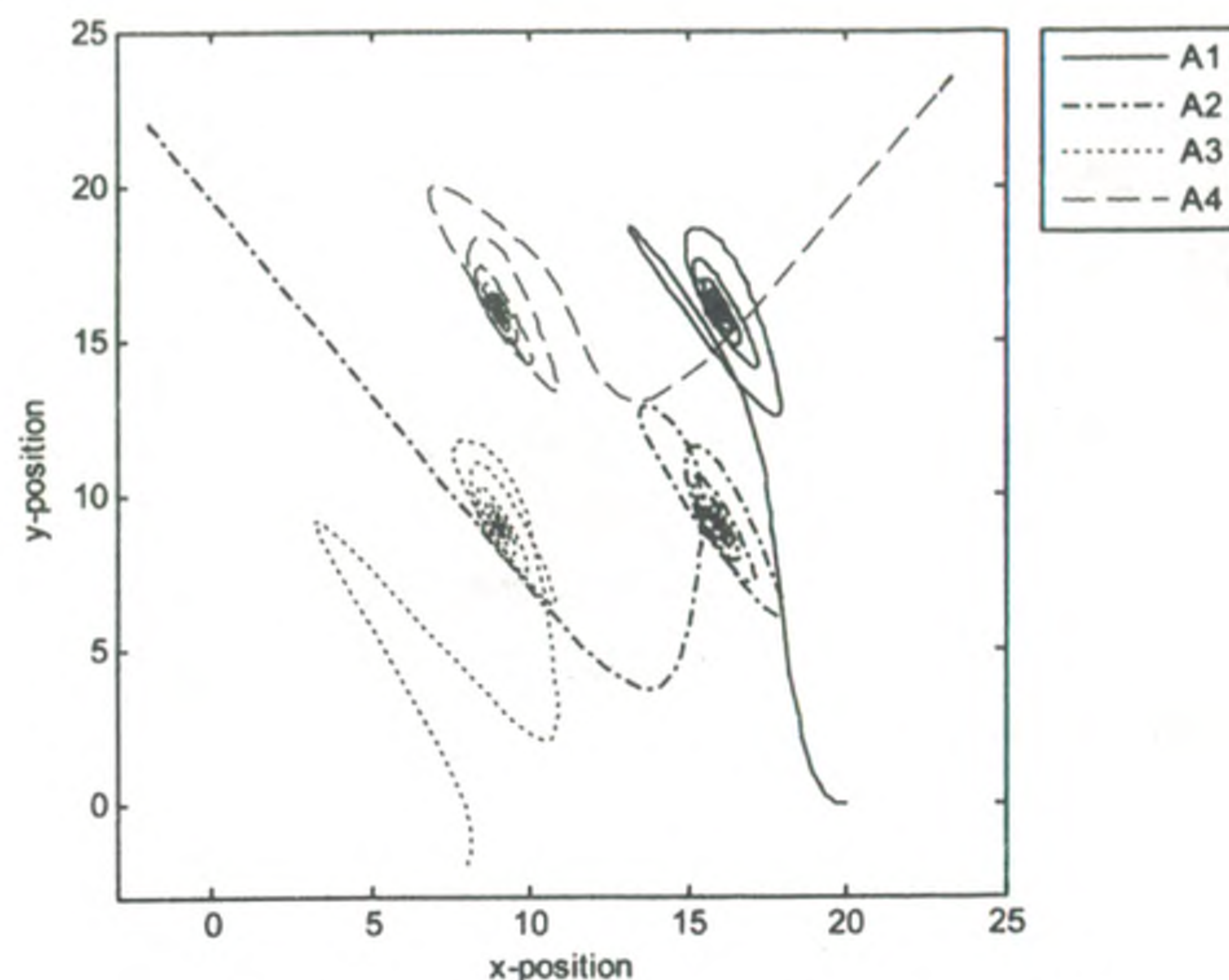


图2 系统(5)中每个智能体的运动轨迹

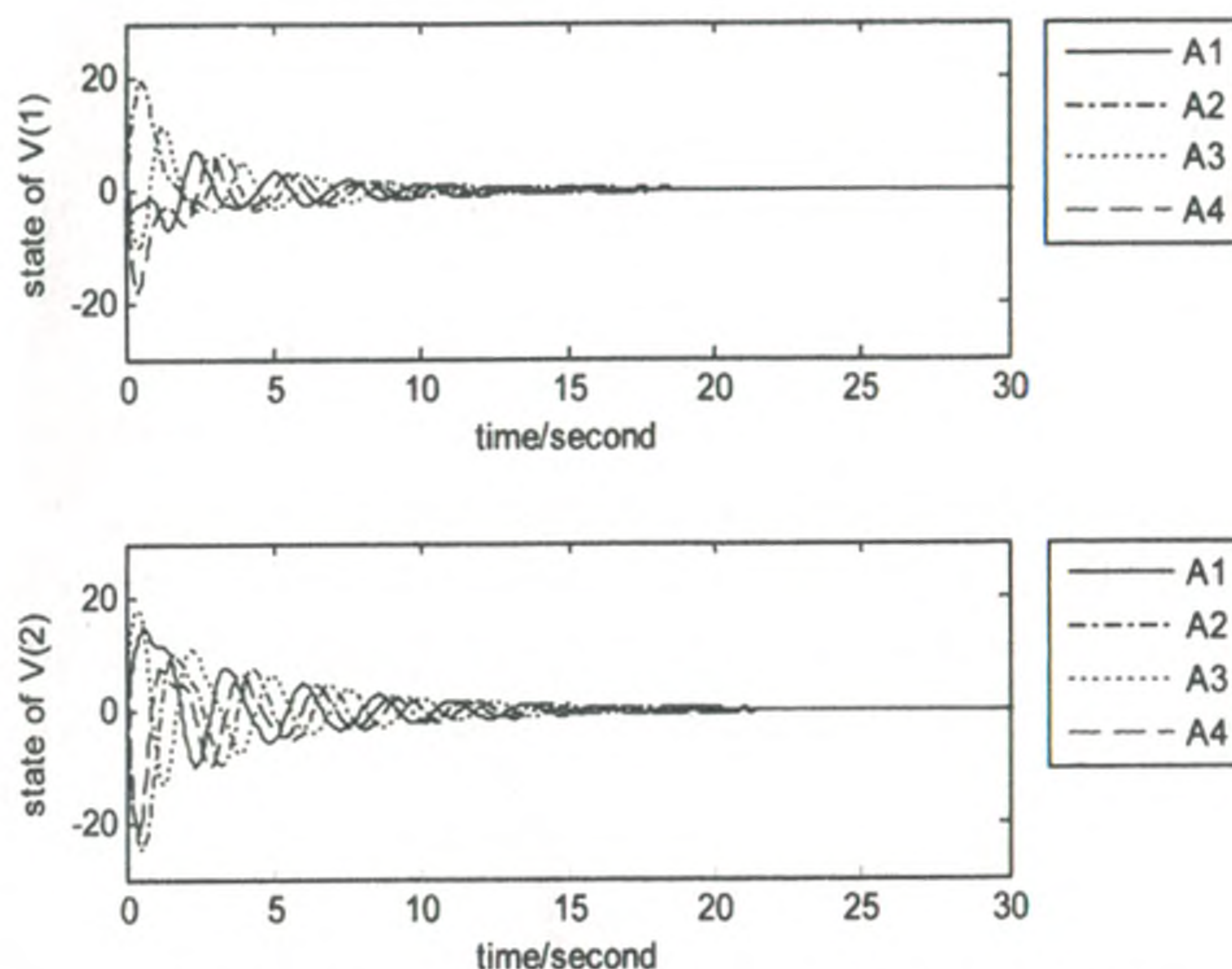


图3 系统(5)中每个智能体的速度变化情况

#### 4 结束语

文中研究了不同时延的二阶多智能体系统的编队协调控制算法。智能体之间信息传输存在通信时延,每个智能体的信息处理存在输入时延,提出另一种具有不同时延的控制器算法,使每个智能体从其初始位置移动到各自预先定义的目标位置,并且在每个智能体都到达各自的目标位置时,系统速度渐进一致为零。假设网络拓扑是静态有向连通图且存在一个有向生成树,应用频域分析理论和矩阵论,证明了使系统达到编队协调控制的分散式条件,该条件只用到了每个智能体的局部信息,且只与输入时延有关,而与通信时延无关。最后应用计算机仿真验证文中方法的正确性。

下一步的研究工作可包括以下几点:

- (1)在交互切换拓扑环境下,二阶多智能体系统的编队协调控制;
- (2)考虑智能体之间的避障问题;
- (3)系统达到编队协调控制的时间与控制参数间

的定性关系。

#### 参考文献:

- [1] 蒋国平,樊春霞,宋玉蓉,等.复杂动态网络同步控制及其在信息物理系统中的应用[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2010,30(4):41-51.
- [2] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [3] Ren W, Beard R W. Consensus seeking in multi-agent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.
- [4] Ren W, Atkins E. Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange[J]. International Journal of Robust Nonlinear Control, 2007, 17(10-11): 1002-1033.
- [5] 俞辉,蹇继贵,王永骥.多智能体时滞网络的加权平均一致性[J].控制与决策,2007,22(5):558-562.
- [6] Wang W, Slotins J. Contraction analysis of time-delayed communications and group cooperation[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2006, 51(4): 712-717.
- [7] Yang H Y, Zhang S Y. Consensus of Multi-agent Moving Systems with Heterogeneous Communication Delays[J]. Int. J. Systems, Control and Communications, 2009(1): 43-48.
- [8] Tian Y, Liu C. Consensus of multi-agent systems with diverse input and communication delays[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2008, 53(9): 2122-2128.
- [9] Liu C L, Tian Y P. Formation Control of Second-order Dynamic Agents with Heterogeneous Communication Delays[C]//Proceedings of the 27th Chinese Control Conference. Kunming, Yunnan, China: [s. n.], 2008.
- [10] Liu C L, Liu F. Consensus Problem of Second-order Multi-agent System with Input Delay and Communication Delay[C]//Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai, China: [s. n.], 2011.
- [11] Ren W, Beard R W, McLain T W. Coordination variables and consensus building in multiple vehicle systems[C]//Cooperative Control: A Post-workshop Volume 2003 Block Island Workshop on Cooperative Control. Berlin: Springer, 2005: 171-188.
- [12] Desoer C A, Wang Y T. On the generalized Nyquist stability criterion[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1980, 25(2): 187-196.
- [13] Yang H Y, Zhu X L, Zhang S Y. Consensus of Second-order Delayed Multi-agent Systems with Leader-following[J]. European Journal of Control, 2010(2): 1-12.
- [14] Tian Y, Yang H. Stability of Distributed Congestion Control with Diverse Communication Delays[C]//Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, P. R. China: [s. n.], 2004.



作者:	邓慧挺, 毛宇光
作者单位:	南京航空航天大学计算机科学与技术学院, 江苏南京210016
刊名:	计算机技术与发展
英文刊名:	Computer Technology and Development
年, 卷(期):	2012(8)

参考文献(14条)

1. 蒋国平;樊春霞;宋玉蓉 复杂动态网络同步控制及其在信息物理系统中的应用[期刊论文]-南京邮电大学学报(自然科学版) 2010(04)
2. Olfat-Saber R;Murray R M Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[外文期刊] 2004(09)
3. Ren W;Beard R W Consensus seeking in multi-agent systems under dynamically changing interaction topologies[外文期刊] 2005(05)
4. Ren W;Atkins E Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange 2007(10-11)
5. 俞晖;蹇继贵;王永刚 多智能体时滞网络的加权平均一致性[期刊论文]-控制与决策 2007(05)
6. Wang W;Slotins J Contraction analysis of time-delayed communications and group cooperation[外文期刊] 2006(04)
7. Yang H Y;Zhang S Y Consensus of Multi-agent Moving Systems with Heterogeneous Communication Delays 2009(01)
8. Tian Y;Liu C Consensus of multi-agent systems with diverse input and communication delays[外文期刊] 2008(09)
9. Liu C L;Tian Y P Formation Control of Second-order Dynamic Agents with Heterogeneous Communication Delays 2008
10. Liu C L;Liu F Consensus Problem of Second-order Multi-agent System with Input Delay and Communication Delay 2011
11. Ren W;Beard R W;McLain T W Coordination variables and consensus building in multiple vehicle systems 2005
12. Desoer C A;Wang Y J On the generalized Nyquist stability criterion 1980(02)
13. Yang H Y;Zhu X L;Zhang S Y Consensus of Second-order Delayed Multi-agent Systems with Leader-following 2010(02)
14. Tian Y;Yang H Stability of Distributed Congestion Control with Diverse Communication Delays 2004

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfx201208017.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfx201208017.aspx)