

# 分布式事件触发的多单摆系统一致性跟踪控制

陈雪,姜玉莲\*

(长春工业大学 电气与电子工程学院,吉林 长春 130012)

**摘要:**针对直流电机驱动的多单摆网络系统,研究基于事件触发和分布式协同设计一致性跟踪控制器,不仅提高了系统的通信效率和能源利用率,节省了硬件资源,而且解决了有向通信网络拓扑结构下的分布式协调跟踪问题。首先,给出了直流电机驱动非线性多单摆网络系统的线性化动力学模型,并将每个单摆系统作为一个智能体,整个多单摆网络系统即多智能体系统;然后,利用多智能体思想,提出了仅需单摆系统自身及其邻居节点信息的分布式事件触发机制,设计分布式一致性跟踪控制器,并分析其稳定性,证明了每个智能体的触发时间间隔都为正实数,多单摆网络系统在此控制协议下避免 Zeno 行为且可以实现分布式跟踪控制目标;最后,通过仿真实验验证了所提分布式触发机制和协调跟踪控制协议的有效性。

**关键词:**多单摆网络系统;事件触发;一致性;跟踪控制;多智能体

中图分类号:TP18

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2020)09-0177-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2020.09.032

## Consensus Tracking Control of Multiple Simple-pendulum Network System Based on Distributed Event Triggering Mechanism

CHEN Xue, JIANG Yu-lian\*

(School of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Consensus tracking controller is designed based on event triggering and distributed collaboration for the multiple simple-pendulum network system driven by DC motors. It improves the communication efficiency and energy utilization of the system, saves hardware resources, and solves the distributed consensus tracking problem under the of directed communication networks. Firstly, the linearized dynamic model of nonlinear multiple simple-pendulum network system driven by DC motor is given, and each single pendulum system as an agent, the entire multiple simple-pendulums network system is a multi-agent system. Then, based on the idea of multi-agent, a distributed event triggering mechanism is proposed which only needs the information of the single pendulum system and its neighbors, the distributed consensus tracking controller is designed and the system stability is analyzed. It is proved that the trigger interval of each agent is strictly positive. The Zeno behavior can be excluded and the multiple simple-pendulum network system can achieve the distributed tracking object. Finally, simulation experiment is proved to verify the effectiveness of the distributed trigger mechanism and the coordinated tracking control protocol proposed.

**Key words:** multiple simple-pendulum network system; event-trigger; consensus; tracking control; multi-agent system

## 0 引言

单摆,是物理学、力学分析中最常用的经典模型之一,它是一个形状和大小都可以看成质点的小球系在不计伸长和质量的摆线上的理想模型。每个单摆可看作一个智能体,那么多单摆网络系统就可看作作为一个多智能体网络系统。与文献[1]中单控制系统的控制方法不同,多智能体系统的协调控制能够解决更为复

杂的控制任务。由多个具有自主计算能力的个体组成的分布式多智能体系统,通过个体间的协调与协作能够完成相对复杂的任务,而单个个体由于其功能简单,不具有解决复杂困难、高强度问题的能力<sup>[2]</sup>。多智能体一致性问题作为协调控制的最基本问题,在国内外已取得很多研究成果<sup>[3-4]</sup>。文献[5]研究了多智能体系统的一致性问题,提出了分布式控制算法和用于描

收稿日期:2019-10-30

修回日期:2020-03-05

**基金项目:**国家自然科学基金青年项目(61503045);吉林省科技优秀人才基金项目(20180520074JH);吉林省“十三五”教育科学技术研究项目(JJKH20191308KJ);吉林省自然科学基金项目(20180101333JC)

**作者简介:**陈雪(1993-),女,硕士研究生,研究方向为多智能体系统一致性与协调控制;通信作者:姜玉莲(1985-),女,博士,副教授,研究方向为多智能体系统一致性与协调控制。

述多智能体网络系统一致性问题的理论框架。文献[6]研究了无领导者多智能的一致性,分析了在有向网络中的一致性。文献[7]针对高阶线性多智能体系统的一致性跟踪问题,设计并分析了在固定和切换通信拓扑下的控制协议及其稳定性条件。文献[8]研究了多智能体系统在干扰下的一致性,设计了基于输出反馈控制器,给出了实现渐进一致的条件。

近年来,随着通信技术发展和节能减排的要求,为提高系统的通信效率和能源利用率,减少多智能体系统硬件资源的浪费,大量有关事件触发控制的研究开始出现<sup>[9-15]</sup>,事件触发机制的控制效果优于时间触发机制。Zeno 行为意味着在某个时间无限累计的执行,文献[16-18]中为了排除 Zeno 行为,在触发条件中引入常数,使得最小时间间隔严格大于零。文献[19-23]提出了分布式事件触发采样数据传输策略,利用该策略可以保证最小间隔时间至少为一个采样周期,避免了 Zeno 行为。

文中提出了一种分布式事件触发机制下的多单摆网络系统的一致性跟踪控制协议和触发函数。设计的事件触发函数的触发时刻仅依赖单摆系统自身和其邻居的相对状态。应用矩阵论和稳定性理论等对分布式事件触发机制下的多单摆网络系统一致性跟踪的稳定性进行了分析,得到了多单摆网络系统渐进达到一致性跟踪的充分条件。

## 1 电机驱动的多单摆网络系统建模

直流电机驱动的单摆系统工作原理示意图如图 1 所示。

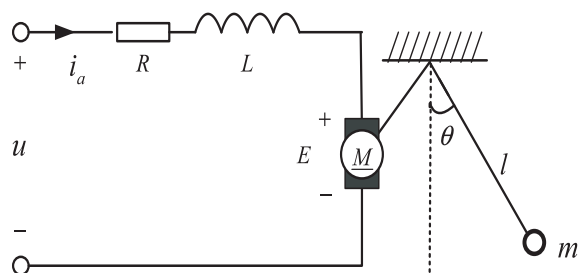


图 1 直流电机驱动的单摆系统

图中  $u$  是电枢绕组的终端电压,  $R$  为电枢电路中的电阻,  $L$  为电枢电路中的电感,  $i_a$  和  $E$  分别为直流电机的电枢电流和电动势, 单摆杆的摆角和长度分别为  $\theta, l$ ,  $m$  为单摆的质量。

每一个直流电机驱动的单摆系统可看作一个智能体, 那么由多个直流电机驱动的单摆系统可组成一个多单摆网络系统。这里, 用  $i$  表示每个单摆系统,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为一个多单摆网络系统中单摆系统的个数。

第  $i$  个单摆系统的动力学模型为:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_i = -\frac{g}{l}\sin\theta_i + \frac{K_T}{mL^2}i_{ai} \\ \dot{i}_{ai} = -\frac{R}{L}i_{ai} - \frac{K_E}{L}\dot{\theta}_i + \frac{1}{L}u_i \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $K_T$  为电机的转矩常数,  $K_E$  为直流电机的电动势常数,  $g$  为重力加速度。

对于第  $i$  个直流电机驱动的单摆系统,  $x_{i1} = \theta_i$ ,  $x_{i2} = \dot{\theta}_i$ ,  $x_{i3} = i_{ai}$ ,  $\forall i = 1, 2, \dots, N$ , 多单摆网络系统的状态量可定义为  $x_i = [x_{i1}^T, x_{i2}^T, x_{i3}^T]^T$ , 多单摆系统的数学模型为<sup>[24]</sup>:

$$\dot{x}_i(t) = \bar{A}x_i(t) + \bar{B}u_i(t) + f(x_i(t)) \quad (2)$$

其中,  $f(x_i(t)) = [0, -\frac{g}{l}\sin x_{i1}, 0]^T$  是非线性函数, 在  $\theta_{i0} = 0$  的较小区域内, 非线性多单摆系统(2)可线性化为:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t), i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{g}{l} & 0 & \frac{K_T}{mL^2} \\ 0 & -\frac{K_E}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix}$$

## 2 多单摆网络系统的通信拓扑结构及其性质

一个单摆系统可以利用图中的一个节点来表示, 利用边来表示多单摆网络系统之间的信息传递。带有领导者的通信拓扑网络可由含有  $N+1$  个单摆系统的有向图  $G_p = \{V, E_p, A_p\}$  来表示, 其中  $V = \{0, 1, \dots, N\}$  表示单摆系统的集合。  $E_p = V \times V$  代表有向边的集合, 第  $i$  个直流电机驱动的单摆系统的邻接矩阵为  $N_i = \{j \in V | (j, i) \in E_p\}$ ,  $A_p = a_{ij} \in R^N$ , 其中  $a_{ij}$  表示边  $(i, j)$  的权重。如果存在有向边  $(i, j)$ , 即  $(i, j) \in E_p$ , 则与之对应的  $a_{ij} > 0$ , 否则  $a_{ij} = 0$ 。图  $G_p$  的 Laplacian 矩阵  $L$  被定义为, 当  $i=j$  时  $l_{ij} = \sum_{k \in N_i} a_{ik}$ , 否则  $l_{ij} = -a_{ij}$ 。对角矩阵  $D$  被定义为, 当跟随者能接收到领导者的信息时,  $d_i = 1$ ; 否则,  $d_i = 0$ 。矩阵  $H = L + D$ , 其对应的特征值为  $0 < \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_N$ 。

为方便分析, 给出以下性质:

引理:  $L$  为联通图  $G_p$  的 Laplacian 矩阵<sup>[7]</sup>:

(1)  $\lambda_1 = 0$  为  $L$  的一个特征值, 其特征向量为  $1_N$ , 满足  $L1_N = 0_N$ 。

(2) 若  $H = L + D$ , 其特征值  $\lambda(H) > 0$ 。

### 3 基于分布式事件触发的一致性跟踪控制

#### 3.1 问题描述

文中研究领导-跟随多单摆网络系统(3),对于由节点0表示的领导者,其动力学方程可以描述为:

$$\dot{x}_0(t) = Ax_0(t) \quad (4)$$

其中,  $x_0(t) \in \mathbb{R}^n$  为领导者的状态。

定义:领导-跟随多单摆网络系统(3)-(4)实现渐进一致性跟踪控制目标是:当且仅当存在控制协议  $u_i(t)$  使得系统在任意初始条件下满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_0(t)\| = 0, i = 1, 2, \dots, N$$

假设1:  $(A, B)$  是可稳定的。

在该假设下,对于任意  $\beta > 0$  存在一个正定解  $P > 0$  满足如下黎卡提不等式<sup>[7]</sup>:

$$PA + A^T P - 2\beta P B B^T P + \beta I < 0 \quad (5)$$

设计反馈增益矩阵  $K = B^T P$

#### 3.2 分布式事件触发控制器的设计

设计基于事件触发机制的控制协议为:

$$u_i(t) = K \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t_k^j) - x_i(t_k^i)) + d_i(x_0(t) - x_i(t_k^i))$$

其中,  $K > 0$  为系统控制协议的增益,  $t_k^j$  为第  $j$  个单摆系统的第  $K$  次事件触发时刻。

定义状态测量误差为:

$$e_i(t) = \exp(A(t - t_k^i))x_i(t_k^i) - x_i(t), t \in [t_k^i, t_{k+1}^i)$$

其中,  $e(t) = (e_1^T(t), e_2^T(t), \dots, e_N^T(t))^T$ 。定义下式  $\hat{x}_i(t) = \exp(A(t - t_k^i))x_i(t_k^i)$ , 进而设计分布式事件触发控制律为:

$$u_i(t) = K \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{x}_j(t) - \hat{x}_i(t)) + d_i(\hat{x}_0(t) - \hat{x}_i(t)) \quad (6)$$

第  $i$  个单摆系统的触发事件间隔  $t_{k+1}^i$  为:

$$t_{k+1}^i = \max \{ t_k^i + \theta_i, \inf \{ t: t > t_k^i \text{ and } \|Ke_i(t)\|^2 > \delta_i \|K[ \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) + d_i(x_0(t) - x_i(t)) ]\|^2 \} \} \quad (7)$$

其中,  $\delta_i > 0$  是常数, 每个单摆系统的事件触发时间间隔是由单摆系统自身及其邻居的相对状态决定, 所以事件触发机制(7)是分布式的。

令  $\varepsilon_i(t) = x_i(t) - x_0(t)$ , 相应地  $\hat{\varepsilon}_i(t) = \hat{x}_i(t) - \hat{x}_0(t)$ 。

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_i(t) &= A\varepsilon_i(t) + BK \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{x}_j(t) - \hat{x}_i(t)) + \\ &\quad d_i(\hat{x}_0(t) - \hat{x}_i(t)) = \\ &\quad A\varepsilon_i(t) + BK \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) - \\ &\quad d_i \varepsilon_i(t) \end{aligned} \quad (8)$$

由于  $x_0(t) = \hat{x}_0(t)$ , 则  $\hat{\varepsilon}_i(t) = \varepsilon_i(t) + e_i(t)$ 。

记  $\varepsilon(t) = (\varepsilon_1^T(t), \varepsilon_2^T(t), \dots, \varepsilon_N^T(t))^T$ , 结合式(6)和式(8)得到闭环多单摆网络系统的跟踪误差动态方程为:

$$\dot{\varepsilon}(t) = (I_N \otimes A)\varepsilon(t) + (H \otimes BK)(\varepsilon(t) + e(t)) \quad (9)$$

定理:结合假设1,选取矩阵  $P$  和反馈增益矩阵  $K$  存在  $0 < \varphi_1 < 1$  和  $0 < \varphi_2 < 1$ , 所以  $\varphi_1 + \varphi_2 \leq \varphi < 1$ 。那么多单摆网络系统(3)-(4)在文中设计跟踪控制一致性协议(6)与分布式事件驱动条件(7)的共同作用下能够渐进实现一致性跟踪目标, 其中  $\delta_i \leq \varphi_1 / \lambda_N^2$ ,  $s = \varphi_2 / \lambda_N^2$ , 且不会出现 Zeno 现象。

证明:构造 Lyapunov 函数为:

$$V(t) = \varepsilon^T(t) (I_N \otimes P) \varepsilon(t)$$

其中,  $P$  是正定矩阵满足式(5),  $\beta = (1 - \varphi)\lambda_1/2$ 。令  $\hat{A} = [(A^T P + AP)/2]$  且  $\hat{B} = P B B^T P$ 。对  $V(t)$  求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \dot{\varepsilon}^T(t) (I_N \otimes P) \varepsilon(t) + \varepsilon^T(t) (I_N \otimes P) \dot{\varepsilon}(t) = \\ &\quad \varepsilon^T(t) (I_N \otimes 2\hat{A}) \varepsilon(t) - \varepsilon^T(t) (H \otimes 2\hat{B}) \varepsilon(t) \\ &\quad - \varepsilon^T(t) (H \otimes 2\hat{B}) e(t) \leq \varepsilon^T(t) (I_N \otimes 2\hat{A} - \\ &\quad H \otimes \hat{B}) \varepsilon(t) + e^T(t) (H \otimes \hat{B}) e(t) \end{aligned}$$

如果,

$$e^T(t) (H \otimes \hat{B}) e(t) \leq \varphi \varepsilon^T(t) (H \otimes \hat{B}) \varepsilon(t) \quad (10)$$

其中,  $0 < \varphi < 1$ , 根据引理可得  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  为矩阵  $H$  的特征值, 由于  $H$  是对称矩阵, 存在正交矩阵  $T \in \mathbb{R}^n$ ,  $THT^T = \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ , 令  $\tilde{\varepsilon} = (T \otimes I_N) \varepsilon$ ,

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \sum_{i=1}^N \tilde{\varepsilon}_i^T(t) (2\hat{A} - (1 - \varphi)\lambda_1 \hat{B}) \tilde{\varepsilon}_i(t) \leq \\ &\quad - \frac{(1 - \varphi)}{2} \lambda_1 \sum_{i=1}^N \tilde{\varepsilon}_i^T(t) \tilde{\varepsilon}_i(t) = \\ &\quad - \frac{(1 - \varphi)}{2} \lambda_1 \tilde{\varepsilon}^T (I_N \otimes I_N) \tilde{\varepsilon} = \\ &\quad - \frac{(1 - \varphi)}{2} \lambda_1 \sum_{i=1}^N \tilde{\varepsilon}_i^T(t) \tilde{\varepsilon}_i(t) \end{aligned}$$

用节点集  $W_1(t)$  和  $W_2(t)$  表示多单摆网络系统(3)-(4)最新的事件触发瞬间, 因此,

$$W_1(t) \cup W_2(t) = \{1, 2, \dots, N\}, W_1(t) \cap W_2(t) = \emptyset$$

式(10)成立的充分条件是:

$$\sum_{i \in W_1} \|Ke_i(t)\|^2 \leq$$

$$\sum_{i \in W_1} \frac{\varphi_1}{\lambda_N^2} \|K[\sum_{j \in N_1} a_{ij}(\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) - d_i \varepsilon_i(t)]\|^2 \leq \frac{\varphi_1}{\lambda_N^2} \sum_{i=1}^N \|K[\sum_{j \in N_1} a_{ij}(\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) - d_i \varepsilon_i(t)]\|^2 \quad (11)$$

即:

$$\sum_{i \in W_2} \|Ke_i(t)\|^2 \leq \frac{\varphi_2}{\lambda_N^2} \sum_{i=1}^N \|K[\sum_{j \in N_1} a_{ij}(\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) - d_i \varepsilon_i(t)]\|^2 \quad (12)$$

其中,  $0 < \varphi_1 < 1$  和  $0 < \varphi_2 < 1$ , 且  $0 < \varphi_1 < 1$  和  $0 < \varphi_2 < 1$ 。对于在  $W_1(t)$  的单摆系统, 只要  $\delta_i > \varphi_1/\lambda_N^2$ , 式(11)成立。对于在  $W_2(t)$  的单摆系统, 充分条件是:

$$\|Ke_i(t)\|^2 \leq \frac{\varphi_2}{\lambda_N^2} \sum_{i=1}^N \|K[\sum_{j \in N_1} a_{ij}(\varepsilon_j(t) - \varepsilon_i(t)) - d_i \varepsilon_i(t)]\|^2 = s \|(\mathbf{H} \otimes \mathbf{K})\varepsilon(t)\|^2 \quad (13)$$

其中,  $s = \varphi_2/\lambda_N^2$ ,  $\|Ke(t)\|/\|(\mathbf{H} \otimes \mathbf{K})\varepsilon(t)\|$  的从0到 $\sqrt{s}$ 事件触发的最小间隔值可以写为  $\|(I_N \otimes K)e(t)\|/\|(\mathbf{H} \otimes K)\varepsilon(t)\|$  从0到 $\sqrt{s}$ 的事件触发的最小间隔值, 为证明系统在运行过程中不会被触发无数次, 推导得到事件触发的最小间隔值为:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\|(I_N \otimes K)e(t)\|}{\|(\mathbf{H} \otimes K)\varepsilon(t)\|} \right) &= \frac{e^T(t)(I_N \otimes K^T K)e(t)}{\|(I_N \otimes K)e(t)\| \cdot \|(\mathbf{H} \otimes K)\varepsilon(t)\|} - \\ &\frac{\|(I_N \otimes K)e(t)\| \cdot (\varepsilon^T(t)(\mathbf{H}^T \mathbf{H} \otimes K^T K)\varepsilon(t))}{\|(\mathbf{H} \otimes K)\varepsilon(t)\|^3} = \\ &\|(\mathbf{H}^2 \otimes KB)\| \frac{\|(I_N \otimes K)e(t)\|^2}{\|(\mathbf{H} \otimes K)\varepsilon(t)\|^2} + \\ &\|I_N \otimes BK\| + 2(\|I_N \otimes A\| + \\ &\|H \otimes BK\|) \frac{\|(I_N \otimes K)e(t)\|}{\|(\mathbf{H} \otimes K)\varepsilon(t)\|} \end{aligned}$$

令  $\zeta(t) = \|(I_N \otimes K)e(t)\|/\|(\mathbf{H} \otimes K)\varepsilon(t)\|$ , 进而得到  $\zeta(t) \leq \psi(t, \psi_0)$  是如下伯努利方程的解:

$$\frac{d\psi}{dt} = a\psi^2 + 2b\psi + c; \psi(t, \psi_0) = \psi_0 \quad (14)$$

其中,  $a = \|\mathbf{H}^2 \otimes KB\|$ ,  $b = \|I_N \otimes A\| + \|\mathbf{H} \otimes BK\|$ ,  $c = \|I_N \otimes BK\|$ 。

意味着  $\psi(\tau, 0) = \sqrt{s}$ ,  $t_{k+1}^i - t_k^i \geq \tau$ 。

其中的  $\tau$  满足以下三种情况:

I: 若  $b^2 = ac$ , 则  $\tau = (\sqrt{s}b/\sqrt{sab} + b^2)$

II: 若  $b^2 < ac$ , 则  $\tau = (1/a\sqrt{\gamma})[\arctan((\sqrt{s}/\sqrt{\gamma}) + (b/a\sqrt{\gamma})) - \arctan(b/a\sqrt{\gamma})]$

III: 若  $b^2 > ac$ ,

则  $\tau =$

$$(1/2a\sqrt{-\gamma}) \ln \left| \frac{(\sqrt{s}a + b - a\sqrt{-\gamma})(b + a\sqrt{-\gamma})}{(\sqrt{s}a + b + a\sqrt{-\gamma})(b - a\sqrt{-\gamma})} \right|$$

对  $W_2(t)$  中的单摆系统, 触发间隔满足  $\tau_i \leq \tau$  时, 式(13)成立, 且避免了 Zeno 行为的发生。因此对于任意  $\varepsilon_i(t) \neq 0$  时  $\dot{V} < 0$ , 那么表明  $\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i(t) - x_0(t)| = 0$ 。因此多单摆网络系统(3)-(4)达到了渐进一致性跟踪目标。

## 4 仿真实验

文中给出多单摆网络系统的参数为:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -0.5 & 0 & 1.5 \\ 0 & -0.3 & -0.25 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

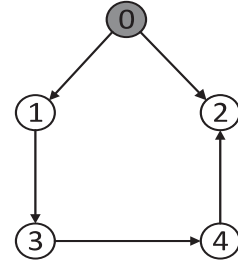


图2 多单摆网络系统的通信拓扑

仿真实验中共有4个跟随者和一个领导者, 该系统通信拓扑结构如图2所示。选取  $\delta_1 = 0.05, \delta_2 = 0.045, \delta_3 = 0.04, \delta_4 = 0.035, \tau_1 = 0.05, \tau_2 = 0.04, \tau_3 = 0.03, \tau_4 = 0.02, \varphi = 0.2$ 。

对基于分布式事件触发机制(7)的一致性控制协议(6)作用下的多单摆网络系统进行仿真实验。图3~图5反映了系统状态随时间变化的情况, 可以看出系统在分布式事件驱动控制下达到了渐进一致性跟踪目标。图6标注出了每个单摆系统在时间间隔  $[0, 100]$  中的事件时刻, 从图中看出, 采样是分散并非等时间间

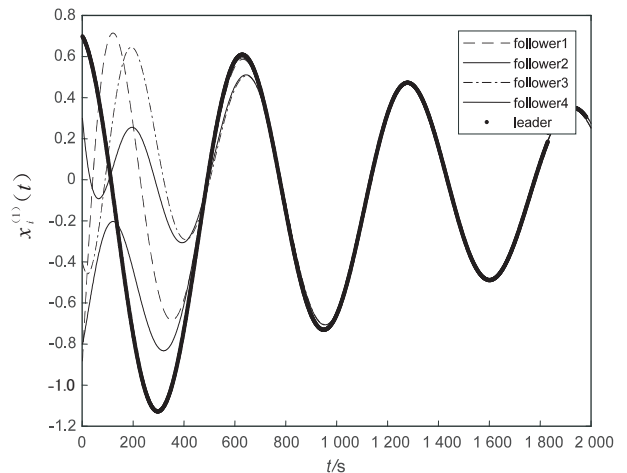


图3 电枢电流的变化轨迹

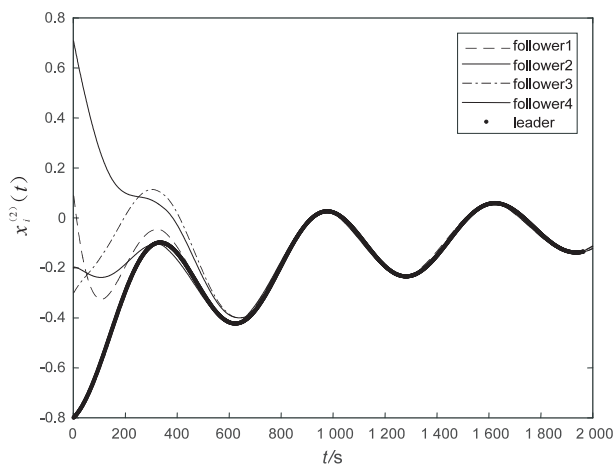


图4 角位移的变化轨迹

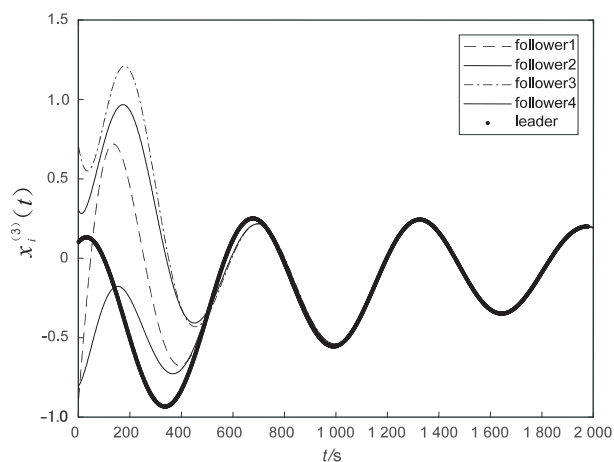


图5 角速度的变化轨迹

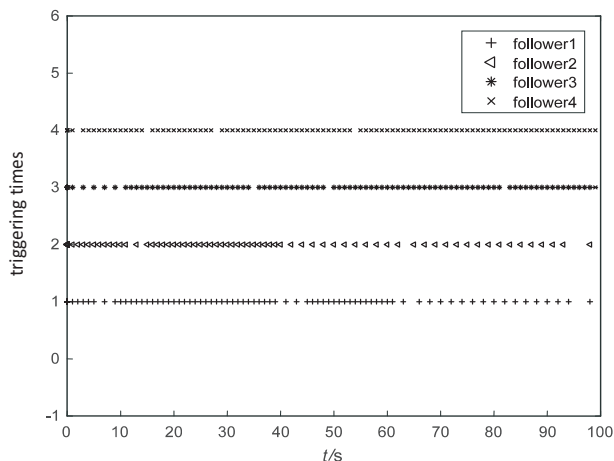


图6 每个跟随者事件触发时间

隔,即分布式事件触发有效地降低了信息传输和控制器更新频率。

## 5 结束语

对多单摆网络系统建模且进行线性化,解决了多单摆网络系统的一致性跟踪问题,提出分布式事件触发机制及其作用下的一致性跟踪控制器并分析了其稳定性。运用图论、矩阵论和 Lyapunov 稳定性理论,证明了多单摆网络系统可以实现渐进一致性跟踪目标,

且每一个单摆系统不会发生 Zeno 行为。最后进行仿真实验,验证了控制协议的有效性,且分布式事件触发降低了信息传输和控制器更新频率。

## 参考文献:

- [1] 黄姝娟,刘萍萍,白小军,等. 基于 STM32 的智能车控制系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2018,28(9):185-188.
- [2] 石纯一,王克宏,王学军,等. 分布式人工智能进展[J]. 模式识别与人工智能,1995,8(s1):72-92.
- [3] 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.
- [4] 陈刚,林青. 基于观测器的多智能体系统一致性控制与故障检测[J]. 控制理论与应用,2014,31(5):584-590.
- [5] 谭拂晓,关新平,刘德荣. 非平衡拓扑结构的多智能体网络系统一致性协议[J]. 控制理论与应用,2009,26(10):1087-1092.
- [6] MOREAU L. Stability of multi-agent systems with time-dependent communication links[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(2):169-182.
- [7] NI Wei, CHENG Daizhan. Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(3-4):209-217.
- [8] JIANG Yulian, WANG Hongquan, WANG Shenquan. Distribute  $H_\infty$  consensus control for nonlinear multi-agent systems under switching topologies via relative output feedback[J]. Neural Computing & Application, 2019, 31(1):1-9.
- [9] LINDEMANN L, DIMAROGONAS D V. Feedback control strategies for multi-agent systems under a fragment of signal temporal logic tasks[J]. Automatica, 2019, 106:284-293.
- [10] REN Wei. Consensus seeking formation keeping and trajectory tracking in multiple vehicle cooperative control[J]. Dissertation Abstracts International, 2004, 65(6):3074-3080.
- [11] 夏倩倩,刘开恩,纪志坚. 基于二阶邻居事件触发多智能体系统的一致性[J]. 智能系统学报, 2017, 12(6):833-840.
- [12] 张捷,田袁. 分布式事件触发控制下的有向多智能体网络一致性分析[J]. 计算机工程, 2017, 43(8):288-292.
- [13] TABUADA P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(9):1680-1685.
- [14] 李永,陆伟. 面向分布式交互应用的事件完全序问题研究[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(4):72-77.
- [15] DIMAROGONAS D V, FRAZZOLI E, JOHANSSON K H. Distributed event-triggered control for multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(5):1291-1297.
- [16] ZHU Wei, JIANG Zhongping, FENG Gang. Event-based

(下转第187页)