

间歇通信下离散时间多智能体系统的输出一致性

赵娟, 刘琛*

湖南工业大学理学院, 湖南 株洲

收稿日期: 2024年12月9日; 录用日期: 2025年1月4日; 发布日期: 2025年1月13日

摘要

研究了离散时间多智能体系统的间歇输出一致性问题。首先, 基于离散时间多智能体系统建立模型, 提出了对通信时间进行控制的间歇输出一致性控制协议; 再通过构造误差系统和Lyapunov候选函数, 分阶段得到实现输出一致性的充分条件; 然后利用输出调节方程, 证明了间歇通信下多智能体系统的输出一致性; 最后, 使用具体的数值进行仿真, 验证所得结果的有效性。

关键词

多智能体系统, 离散时间, 间歇通信, 稳定性, 输出一致性

Output Consensus of Discrete-Time Multi-Agent Systems under Intermittent Communication

Juan Zhao, Chen Liu*

College of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan

Received: Dec. 9th, 2024; accepted: Jan. 4th, 2025; published: Jan. 13th, 2025

Abstract

The intermittent output consensus problem of discrete-time multi-agent systems is studied. Firstly, a model based on discrete-time multi-agent systems is established, and an intermittent output

*通讯作者。

文章引用: 赵娟, 刘琛. 间歇通信下离散时间多智能体系统的输出一致性[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(1): 11-19.
DOI: 10.12677/dsc.2025.141002

consensus control protocol is proposed to control communication time. Then, by constructing an error system and Lyapunov candidate function, sufficient conditions for achieving output consensus are obtained in stages. After that, the output consensus of multi-agent systems under intermittent communication was proved by using the output adjustment equation. Finally, a specific numerical simulation was conducted to validate the validity of the results obtained.

Keywords

Multi-Agent Systems, Discrete-Time, Intermittent Communication, Stabilization, Output Consensus

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着人工智能技术的快速发展,可用于描述大规模、复杂现实系统的多智能体系统因其突出的优势在许多领域中得到了广泛应用,如电力系统[1]、智慧交通系统[2]、机器人编队等[3]。在这些应用中,智能体之间的协同工作是实现复杂任务的关键,而一致性是多智能体系统协调控制的核心,因此一致性问题深受学者们的关注,并取得了丰硕的研究成果[4]-[6]。

在许多实际应用中,由于特定的要求和约束,智能体可能具有不同的动态,甚至它们的状态会有不同的维数,鉴于此,将多智能体系统建模为异构系统并对其输出信息进行研究是一种更实用、更具挑战的方法。目前为止,在研究异构多智能体系统的输出一致性方面取得了一些进展。文献[7]和文献[8]提出状态反馈控制算法来解决多智能体系统的输出一致性问题,基于此问题,文献[9]对输入饱和下的系统提出输出反馈控制算法。文献[10]研究了切换拓扑下多智能体系统的输出一致性,其中跟随者只能获取领导者部分信息。另外还分别针对线性系统[11]和非线性系统[12]的输出一致性进行了研究。

考虑到现实生活中传感设备可能还存在局限性,如网络带宽资源有限、设备故障等,这就需要利用更为经济实用的控制策略来节省网络通信资源。为此,间歇控制的概念被提出,其可避免系统状态瞬时变化,在实际操作中更具灵活性。文献[13]提出了一种新的间歇控制策略来解决具有时延的多智能体系统的固定时间一致性问题。文献[14]针对线性多智能体系统,引入事件触发控制和间歇控制机制,以此实现系统的一致性,达到提高通信效率的目的。

目前,关于多智能体系统一致性的研究主要集中在连续时间模型上,而对离散时间模型的研究相对较少。在离散时间多智能体系统中,由于信息的传递和处理是在离散的时间点进行的,这为系统的分析带来了新的挑战。此外,间歇通信意味着智能体不是在所有时间都进行通信或更新状态,这增加了问题的复杂性。因此,对离散时间多智能体系统的间歇输出一致性问题进行研究,不仅在理论上具有价值,在实际生活中也极具意义。

2. 预备知识和问题描述

在多智能体系统中,智能体间的信息传递是通过网络来连接的,因此可使用图论方法抽象地描述其通信拓扑,将系统建模为图结构。对于包含 N 个节点的图 G 可以用 $G=(V,E,A)$ 来表示, $V=\{v_1,v_2,v_3,\dots,v_N\}$ 表示图 G 节点的集合,任意一个节点都可相应地表示多智能体系统中的一个智能体,

$E \in V \times V$ 表示图 G 边的集合, 有序对 (v_i, v_j) 表示节点 v_i 到节点 v_j 的一条边。若系统中智能体 i 可向智能体 j 有向地传递信息, 则图 G 为有向图; 若智能体 i 和智能体 j 能互相传递信息, 则图 G 为无向图。 $A = [a_{ij}] \in R^{N \times N}$ 表示图 G 的邻接矩阵, 若 $(v_i, v_j) \in E$, 则 $a_{ij} = 1$, 反之, $a_{ij} = 0$ 。特别在无向图中, 有 $a_{ij} = a_{ji}$, 由此可知邻接矩阵 A 为对称矩阵。 $D = \text{diag} \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} \right)$ 为度矩阵, 那么可定义拉普拉斯矩阵为

$$L = D - A = [l_{ij}] \in R^{N \times N}, \text{ 其中 } l_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}, & i = j \\ -a_{ij}, & i \neq j \end{cases}。$$

在无向图 G 中, 若任意两节点之间都存在通路, 即从节点 v_i 到节点 v_j 有路径, 则可称图 G 为连通图。

另外, 在领导-跟随者网络拓扑中, 令 h_i 代表智能体 i 和领导者之间的关系, 若智能体 i 可以接收到领导者的信息, 则 $h_i = 1$; 反之, $h_i = 0$ 。令 $\bar{l}_{ij} = l_{ij} + h_i$, $H = \text{diag} \{h_1, h_2, \dots, h_N\}$, 即有 $\bar{L} = L + H$, $\bar{L}$ 也为对称矩阵。

考虑由一个领导者和 N 个跟随者组合成的异构多智能体系统, 其中跟随者 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 的离散时间线性动态模型描述如下:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u_i(k), \\ y_i(k) = C_i x_i(k), i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_i 、 B_i 、 C_i 均为合适维常数矩阵, $x_i(k) \in R^r$ 表示第 i 个跟随者的状态, $y_i(k) \in R^s$ 表示第 i 个跟随者的输出信息, $u_i(k) \in R^n$ 表示间歇通信下的控制输入。

相应地, 领导者的离散时间线性动态模型可表示为:

$$\begin{cases} x_0(k+1) = A_0 x_0(k), \\ y_0(k) = C_0 x_0(k). \end{cases} \quad (2)$$

式中 A_0 和 C_0 为合适维常数矩阵, $x_0(k) \in R^r$ 为领导者的状态, $y_0(k) \in R^s$ 为领导者的输出信息。

假设 1 系统网络拓扑图 G 为无向连通图, 且至少存在一个跟随者可以获取领导者的信息。

假设 2 矩阵对 (A_i, B_i) 是可镇定的。

假设 3 矩阵 A_0 的特征值实部为正。

假设 4 对于任意智能体 i ($i = 1, 2, \dots, N$), 以下调节方程:

$$\begin{cases} \Upsilon_i A_0 = A_i \Upsilon_i + B_i \Pi_i, \\ C_i \Upsilon_i = C_0. \end{cases} \quad (3)$$

有解 (Υ_i, Π_i) , Υ_i , Π_i 是合适维矩阵。

定义 1 考虑具有初始状态为 $x_0(k)$ 的异构多智能体系统(1)~(2), 如果能得到

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (y_i(k) - y_0(k)) = 0, i = 1, 2, \dots, N,$$

则由所有智能体组成的多智能体系统可以渐近地实现输出一致。

引理 1 [15] 若矩阵对 (A_0, I) 可镇定, 则存在一个使以下代数 Riccati 方程成立的正定矩阵 F :

$$A_0^T F A_0 - F - c A_0^T F (F + I)^{-1} F A_0 + I = 0,$$

其中 $0 < c < 2 \frac{\lambda_1}{\lambda_N} - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_N}$ 。

3. 主要结果

在周期间歇通信下, 针对多智能体系统(1)~(2)提出以下控制协议:

$$u_i(k) = \Phi_{1i}x_i(k) + \Phi_{2i}z_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

$$z_i(k+1) = \begin{cases} A_0 z_i(k) + K \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} (z_j(k) - z_i(k)) + h_i(x_0(k) - z_i(k)) \right), & k \in [mT, mT+t); \\ A_0 z_i(k), & k \in [mT+t, (m+1)T). \end{cases} \quad (5)$$

其中, $z_i(k)$ 是对智能体状态的估计, K , Φ_{1i} 和 Φ_{2i} 为待设计的增益矩阵。

注: 间歇通信时, 可将整体时间用等周期的时间间隔区间 $[mT, (m+1)T]$, $m = 0, 1, \dots$ 表示。其中 t 是通信交流时间长度, T 是间歇通信的固定周期, 且 $0 < t < T$ 。另外, 在区间 $[mT, mT+t)$ 内智能体能与领导者进行交流, 在 $[mT+t, (m+1)T)$ 内不进行交流, 这两个区间通常称作通信时间和休息时间。

定理 1 在假设 1~4 都成立的条件下, 令增益矩阵 $K = \frac{1}{\lambda_N} (F + I)^{-1} F A_0$, 基于间歇通信下的控制协议 (4)、(5), 当多智能体系统(1)~(2)满足以下条件时可实现其输出一致性:

1) 当 $\lambda_{\max}(F) > 1$ 时, 间歇控制比率为 $\frac{t}{T-t} > -\frac{\beta}{\alpha}$; 当 $\lambda_{\max}(F) < 1$ 时, 间歇控制比率为 $\frac{t}{T-t} > -\frac{\beta}{\gamma}$;

其中 $\alpha = \ln \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max}(F)} \right)$, $\beta = \ln \left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)} \right)$, $\gamma = \ln(1 - \lambda_{\max}(F))$ 。

2) 增益矩阵 Φ_{1i} 满足 $A_i + B_i \Phi_{1i}$ 是 Schur 稳定的, 并有 $\Phi_{2i} = \Pi_i - \Phi_{1i} \Upsilon_i$ 。

证明: 将第 i 个智能体的状态误差定义为 $e_i(k) = z_i(k) - x_0(k)$, 由此可整理得到以下误差系统

$$e_i(k+1) = \begin{cases} A_0 e_i(k) - K \sum_{j=1}^N \bar{L}_{ij} e_j(k), & k \in [mT, mT+t), \\ A_0 e_i(k), & k \in [mT+t, (m+1)T). \end{cases} \quad (6)$$

为了更好地描述系统, 定义 $e(k) = [e_1^T(k), e_2^T(k), \dots, e_N^T(k)]^T$, $z(k) = [z_1^T(k), z_2^T(k), \dots, z_N^T(k)]^T$, 则 (6) 可写为

$$e(k+1) = \begin{cases} (I_N \otimes A_0 + \bar{L} \otimes K) e(k), & k \in [mT, mT+t), \\ (I_N \otimes A_0) e(k), & k \in [mT+t, (m+1)T). \end{cases} \quad (7)$$

根据误差系统(7), 构造如下 Lyapunov 候选函数

$$V(k) = e^T(k) (I_N \otimes F) e(k) \quad (8)$$

当 $k \in [mT, mT+t)$ 时, 求得 $V(k)$ 的差分为

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= e^T(k+1) (I_N \otimes F) e(k+1) - e^T(k) (I_N \otimes F) e(k) \\ &= e^T(k) \left(I_N \otimes (A_0^T F A_0 - F) - \bar{L} \otimes A_0^T F K - \bar{L} \otimes K^T F A_0 + \bar{L}^2 \otimes K^T F K \right) e(k) \end{aligned} \quad (9)$$

通过(9)可选择增益矩阵 $K = \frac{1}{\lambda_N} (F + I)^{-1} F A_0$, 并定义 $\bar{e}(k) = (P^T \otimes I_n) e(k)$, 其中 P 是一个满足 $P^T \bar{L} P = \Lambda = \text{diag} \{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N \}$ 的正交矩阵, λ_i 是 $\bar{L}$ 的第 i 个特征值, 且有 $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_N$ 。因此, $\Delta V(k)$

可得到以下结果

$$\begin{aligned}
 \Delta V(k) &= \bar{e}^T(k) \left(I_N \otimes (A_0^T F A_0 - F) - 2\Lambda \otimes A_0^T F K + \Lambda^2 \otimes K^T F K \right) e(k) \\
 &= \sum_{i=1}^N \bar{e}_i^T(k) \left(A_0^T F A_0 - F - 2\lambda_i A_0^T F K + \lambda_i^2 K^T F K \right) \bar{e}_i(k) \\
 &= \sum_{i=1}^N \bar{e}_i^T(k) \left(A_0^T F A_0 - F - 2\frac{\lambda_i}{\lambda_N} A_0^T F (F+I)^{-1} F A_0 + \frac{\lambda_i^2}{\lambda_N^2} A_0^T F (F+I)^{-1} F A_0 \right) \bar{e}_i(k) \\
 &= \sum_{i=1}^N \bar{e}_i^T(k) \left(A_0^T F A_0 - F - \left(2\frac{\lambda_i}{\lambda_N} - \frac{\lambda_i^2}{\lambda_N^2} \right) A_0^T F (F+I)^{-1} F A_0 \right) \bar{e}_i(k).
 \end{aligned} \tag{10}$$

由引理 1 可得

$$\begin{aligned}
 \Delta V(k) &\leq -\sum_{i=1}^N e_i^T(k) e_i(k) \\
 &\leq -\frac{1}{\lambda_{\max}(F)} V(k).
 \end{aligned} \tag{11}$$

接下来对正定矩阵 F 的最大特征值进行分类讨论, 当 $\lambda_{\max}(F) > 1$ 时, 可以得到 $\Delta V(k) \leq -\frac{1}{\lambda_{\max}(F)} V(k)$; 当 $\lambda_{\max}(F) < 1$ 时, 可以推出 $\Delta V(k) \leq -\lambda_{\max}(F) V(k)$ 。

当 $k \in [mT+t, (m+1)T)$ 时, 求得 $V(k)$ 的差分为

$$\begin{aligned}
 \Delta V(k) &= e^T(k) \left(I_N \otimes (A_0^T F A_0 - F) \right) e(k) \\
 &= \sum_{i=1}^N e_i^T(k) \left(A_0^T F A_0 - F \right) e_i(k) \\
 &\leq \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)} \sum_{i=1}^N e_i^T(k) F e_i(k) \\
 &= \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)} V(k).
 \end{aligned} \tag{12}$$

综上所述, 当 $\lambda_{\max}(F) > 1$ 时, 有解

$$V(k+1) \leq \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max}(F)} \right) V(k), & k \in [mT, mT+t), \\ \left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)} \right) V(k), & k \in [mT+t, (m+1)T). \end{cases} \tag{13}$$

当 $\lambda_{\max}(F) < 1$ 时, 有解

$$V(k+1) \leq \begin{cases} (1 - \lambda_{\max}(F)) V(k), & k \in [mT, mT+t), \\ \left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)} \right) V(k), & k \in [mT+t, (m+1)T). \end{cases} \tag{14}$$

对于 $\lambda_{\max}(F) > 1$, 当 $k = (m+1)T$ 时, 由(13)有

$$\begin{aligned}
 V((m+1)T) &\leq \left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)}\right)^{T-t} V(mT+t) \\
 &\leq \left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)}\right)^{T-t} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max}(F)}\right)^t V(mT),
 \end{aligned} \tag{15}$$

对其进行 m 次迭代后, 综合可得到

$$V((m+1)T) \leq \left[\left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)}\right)^{T-t} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max}(F)}\right)^t \right]^m V(0), \tag{16}$$

易知 $1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)} > 0$, $1 - \frac{1}{\lambda_{\max}(F)} > 0$, 根据条件(1)可知 $(T-t)\beta + t\alpha < 0$, 即

$$\begin{aligned}
 \ln \left[\left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)}\right)^{T-t} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max}(F)}\right)^t \right] &< 0, \\
 0 &< \left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)}\right)^{T-t} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max}(F)}\right)^t < 1,
 \end{aligned}$$

从而推断出当 $m \rightarrow \infty$ 时, 有 $V((m+1)T) \rightarrow 0$ 。

类似地, 对于 $\lambda_{\max}(F) < 1$ 的情况, 利用迭代方法可以得出

$$V((m+1)T) \leq \left[\left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)}\right)^{T-t} (1 - \lambda_{\max}(F))^t \right]^m V(0), \tag{17}$$

显然有 $1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)} > 0$, $1 - \lambda_{\max}(F) > 0$, 根据条件(1)知 $(T-t)\beta + t\gamma < 0$, 即

$$\begin{aligned}
 \ln \left[\left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)}\right)^{T-t} (1 - \lambda_{\max}(F))^t \right] &< 0, \\
 0 &< \left(1 + \frac{\lambda_{\max}(A_0^T F A_0 - F)}{\lambda_{\min}(F)}\right)^{T-t} (1 - \lambda_{\max}(F))^t < 1,
 \end{aligned}$$

故当 $m \rightarrow \infty$ 时, 有 $V((m+1)T) \rightarrow 0$ 。

综上所述, 当多智能体系统符合定理 1 中条件时, 有 $V(k) \rightarrow 0 (k \rightarrow \infty)$, 即 $e(k) \rightarrow 0$, 此时, 系统 (1)~(2) 的状态一致性可以实现。

另外, 还需对输出误差 $y_i(k) - y_0(k)$ 的收敛性进行分析。

定义 $\delta_i(k) = x_i(k) - \Upsilon_i x_0(k)$ 和 $\Phi_{2i} = \Pi_i - \Phi_{1i} \Upsilon_i$, 结合系统动态, 经过推导可以得出

$$\begin{aligned}
 \delta_i(k+1) &= x_i(k+1) - \Upsilon_i x_0(k+1) \\
 &= A_i \delta_i(k) - B_i \Pi_i x_0(k) + B_i \Phi_{1i} x_i(k) + B_i \Phi_{2i} z_i(k) \\
 &= (A_i + B_i \Phi_{1i}) \delta_i(k) + B_i \Phi_{2i} e_i(k),
 \end{aligned}$$

由于选择的矩阵 Φ_{li} 可满足 $A_i + B_i \Phi_{li}$ 是 Schur 稳定的, 并由以上证明知 $e_i(k) \rightarrow 0 (k \rightarrow \infty)$, 故推出 $\lim_{k \rightarrow \infty} \delta_i(k) = 0$, 即 $\lim_{k \rightarrow \infty} (x_i(k) - \Upsilon_i x_0(k)) = 0$ 。根据输出调节方程(3), 进一步有

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} (y_i(k) - y_0(k)) &= \lim_{k \rightarrow \infty} (C_i x_i(k) - C_0 x_0(k)) \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} (C_i x_i(k) - C_i \Upsilon_i x_0(k)) \\ &= 0 \end{aligned}$$

回顾定义 1 知离散时间系统(1)~(2)的间歇输出一致性可实现。

证明完毕。

4. 数值仿真

下面给出一个具体的仿真例子来验证所得结论的有效性。假设多智能体系统由 1 个领导者和 5 个跟随者组成, 并有如图 1 所示的通信拓扑结构。

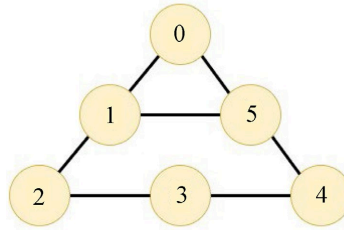


Figure 1. Communication topology graph

图 1. 通信拓扑图

在此例中, 领导者和跟随者动态模型中的系数矩阵和增益矩阵设置为如下数据:

$$\begin{aligned} A_1 = A_2 = A_3 &= \begin{bmatrix} -0.1 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix}, \quad A_4 = A_5 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & -0.7 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = B_2 = B_3 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.1 \end{bmatrix}, \quad B_4 = B_5 = \begin{bmatrix} 0.1 \\ -0.3 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C_1 = C_2 = C_3 &= \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C_4 = C_5 = \begin{bmatrix} -2 \\ 0 \\ -0.5 \end{bmatrix}, \quad A_0 = \begin{bmatrix} -0.7 & -1 \\ 0.2 & -0.3 \end{bmatrix}, \quad C_0 = \begin{bmatrix} 5 \\ 0.2 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 1.2784 & 0.3501 \\ 0.3501 & 1.6428 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

根据以上数据可解得矩阵 F 的特征值为 $\lambda_{\max}(F) = 1.8553 > 1$, 根据证明过程可得 $\alpha = -0.7743$, $\beta = 0.1858$, 那么 $\frac{t}{T-t} > -\frac{\beta}{\alpha} \approx 0.2399$ 。以此可将间歇控制每个周期时间长度设计为 $T = 9s$, 通信时间设计为 $t = 7s$ 。

初始状态 $x_i(0)$, $x_0(0)$, $z_i(0)$ 均设为随机值。再给出使 $A_i + B_i \Phi_{li}$ 是 Schur 稳定的增益矩阵 Φ_{li} , Φ_{2i} :
 $\Phi_{11} = [-0.1 \ 0.2]$, $\Phi_{12} = [0 \ 0.5]$, $\Phi_{13} = [0.6 \ 0.3]$, $\Phi_{14} = [-0.8 \ -1 \ 0]$, $\Phi_{15} = [-0.7 \ -1 \ 0.5]$,
 $\Phi_{21} = [-6.7200 \ -10.1120]$, $\Phi_{22} = [-7.2200 \ -10.1320]$, $\Phi_{23} = [-8.2200 \ -10.1720]$,
 $\Phi_{24} = [0.9224 \ 2.3529]$, $\Phi_{25} = [1.4518 \ 2.3741]$ 。

利用所得的结果进行仿真实验, 可得到系统中各智能体的测量误差和输出误差, 如图 2 和图 3 所示。从图 2 可看出, 随着时间的推移, 基于间歇通信下的系统状态误差收敛到 0, 其状态一致性得以实现。观察图 3 可知, 所有智能体的输出误差的稳定性已经达到, 因此离散时间多智能体系统的间歇输出一致性可得到证明。

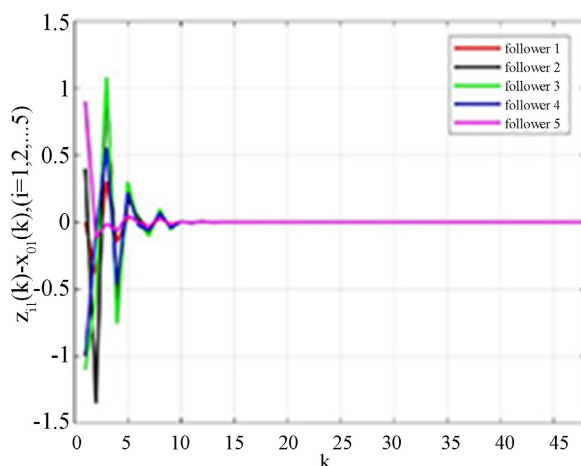


Figure 2. The state error of systems

图 2. 系统状态误差

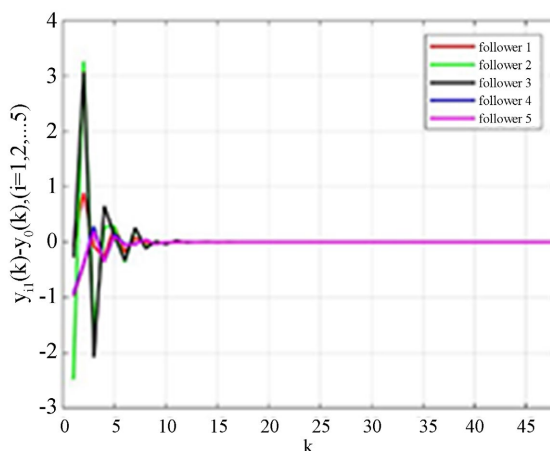


Figure 3. The output error of systems

图 3. 系统输出误差

5. 结论

本文旨在探讨离散时间多智能体系统实现间歇输出一致性的理论与方法。通过设计合适的控制算法来研究间歇输出一致性问题, 确保在有限的通信资源下异构多智能体系统可实现快速且稳定的一致性收敛。结论显示在假设 1~4 成立的条件下, 当系统满足 1) $\lambda_{\max}(F) > 1$, $\frac{t}{T-t} > -\frac{\beta}{\alpha}$ 和 2) $\lambda_{\max}(F) < 1$, $\frac{t}{T-t} > -\frac{\beta}{\gamma}$ 时, 所提出的间歇控制协议可以解决此系统的输出一致性问题。如此, 在保证多智能体系统性能的同时, 可减少智能体之间的通信频率, 从而降低系统能耗并延长系统寿命。

致 谢

在此, 我衷心地感谢湖南省教育厅重点项目和给予我引用权的资料来源者对我的研究工作提供的帮助和支持。同时, 我也要感谢我的导师以及课题组的师兄师姐, 是他们耐心地回答了我的问题, 用专业的知识和经验对我进行指导, 并给予了我宝贵的建议和意见。最后再次感谢所有给予我支持和帮助的人, 让我顺利完成了此篇论文的研究。

基金项目

湖南省教育厅重点项目(21A0366, 22A0406)。

参考文献

- [1] Yan, H., Han, J., Zhang, H., Zhan, X. and Wang, Y. (2020) Adaptive Event-Triggered Predictive Control for Finite Time Microgrid. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, **67**, 1035-1044. <https://doi.org/10.1109/tcsi.2019.2953958>
- [2] Hasan, M. and Niyogi, R. (2024) Deep Hierarchical Reinforcement Learning for Collaborative Object Transportation by Heterogeneous Agents. *Computers and Electrical Engineering*, **114**, Article ID: 109066. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.109066>
- [3] Luo, Y., Gao, X., Li, A. and Kashkynbayev, A. (2022) Event-Triggered Finite-Time Formation Control for Second-Order Leader-Following Multi-Agent Systems with Nonlinear Term Time Delay. *International Journal of Control*, **96**, 2636-2650. <https://doi.org/10.1080/00207179.2022.2106898>
- [4] Wei Ren, and Beard, R.W. (2005) Consensus Seeking in Multiagent Systems under Dynamically Changing Interaction Topologies. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **50**, 655-661. <https://doi.org/10.1109/tac.2005.846556>
- [5] Ding, Z. and Li, Z. (2016) Distributed Adaptive Consensus Control of Nonlinear Output-Feedback Systems on Directed Graphs. *Automatica*, **72**, 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.05.014>
- [6] Su, H., Long, M. and Zeng, Z. (2020) Controllability of Two-Time-Scale Discrete-Time Multiagent Systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **50**, 1440-1449. <https://doi.org/10.1109/tcyb.2018.2884498>
- [7] Han, T. and Zheng, W.X. (2021) Bipartite Output Consensus for Heterogeneous Multi-Agent Systems via Output Regulation Approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, **68**, 281-285. <https://doi.org/10.1109/tcsii.2020.2993057>
- [8] Deng, C., Che, W. and Wu, Z. (2021) A Dynamic Periodic Event-Triggered Approach to Consensus of Heterogeneous Linear Multiagent Systems with Time-Varying Communication Delays. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **51**, 1812-1821. <https://doi.org/10.1109/tcyb.2020.3015746>
- [9] Ali, P.R., Rehan, M., Ahmed, W., Basit, A. and Ahmed, I. (2024) A Novel Output Feedback Consensus Control Approach for Generic Linear Multi-Agent Systems under Input Saturation over a Directed Graph Topology. *ISA Transactions*, **148**, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.02.029>
- [10] Sun, J., Zhang, J., Liu, L., Wu, Y. and Shan, Q. (2024) Output Consensus Control of Multi-Agent Systems with Switching Networks and Incomplete Leader Measurement. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **21**, 6643-6652. <https://doi.org/10.1109/tase.2023.3328897>
- [11] Jiang, Y., Liu, L. and Feng, G. (2024) Fully Distributed Adaptive Control for Output Consensus of Uncertain Discrete-Time Linear Multi-Agent Systems. *Automatica*, **162**, Article ID: 111531. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2024.111531>
- [12] Ran, M. and Xie, L. (2021) Practical Output Consensus of Nonlinear Heterogeneous Multi-Agent Systems with Limited Data Rate. *Automatica*, **129**, Article ID: 109624. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109624>
- [13] Liu, J., Wu, Y., Xue, L. and Liu, J. (2023) A New Intermittent Control Approach to Practical Fixed-Time Consensus with Input Delay. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, **70**, 2186-2190. <https://doi.org/10.1109/tcsii.2022.3233794>
- [14] Sun, J., Zhang, J., Liu, L., Shan, Q. and Zhang, J. (2024) Event-Triggered Consensus Control of Linear Multi-Agent Systems under Intermittent Communication. *Journal of the Franklin Institute*, **361**, Article ID: 106650. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2024.106650>
- [15] Chen, M.Z.Q., Zhang, L., Su, H. and Chen, G. (2016) Stabilizing Solution and Parameter Dependence of Modified Algebraic Riccati Equation with Application to Discrete-Time Network Synchronization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **61**, 228-233. <https://doi.org/10.1109/tac.2015.2434011>