

带时延与丢包的网络化多智能体系统控制器设计*

安宝冉^{1)†} 刘国平¹⁾²⁾

1) (哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150080)

2) (南威尔士大学工程学院, 英国庞特普里 CF37 1DL)

(2014年3月10日收到; 2014年3月23日收到修改稿)

网络时延与数据丢包极大地降低了网络化多智能体系统的控制性能, 甚至会破坏稳定性. 考虑存在网络时延与数据丢包的网络化多智能体系统, 提出了一种基于时延与丢包补偿机制的预测控制器设计方法, 来主动地消除网络时延与数据丢包的影响. 通过对网络化多智能体预测控制系统的分析, 给出了能够保证系统稳定性与一致性的控制器设计步骤. 最后的仿真实例表明了该方法的有效性.

关键词: 时延, 丢包, 网络化多智能体系统, 预测控制

PACS: 02.30.Yy, 02.30.Ks, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.63.140203

1 引言

多智能体系统的分布式协同控制已成为近年来国际控制领域研究的热点课题^[1]. 随着网络技术的迅速发展, 越来越多的智能体系统采用网络来实现信息交流, 这就产生了网络化多智能体系统, 如: 物联网. 同传统控制系统相比, 网络化多智能体系统 (networked multi-agent systems, NMAS) 可以通过智能体间的相互协作解决各种复杂问题, 因而具有灵活性、可靠性、并行性等优势, 更适用于不确定环境. 网络化多智能体协同控制在科学工程领域中有着广泛的应用潜力, 如无人机组 (unmanned aerial vehicles, UAVs) 编队^[2]、智能交通^[3]、传感器网络分布式估计^[4]等. 目前, 学界在多智能体系统分布式协同控制的研究主要包括一致性问题^[5,6]、群集问题^[7,8]、编队问题^[9,10]和镇定问题^[11,12].

由于各个智能体之间通过共享的通信网络传输信息, 通信信道中网络时延、数据丢包、有限带宽等网络特性将会给网络化多智能体系统的稳定性及控制性能带来极大影响, 这给网络化多智能体系统控制器的设计与分析带来了很大困难. 为解

决这些问题, 目前学者们已尝试一些方法, 比如时滞理论^[13]、鲁棒控制^[14]、事件驱动控制^[15]、脉冲控制^[16]等. 然而, 大多数方法针对单积分型、双积分型、高阶积分型系统^[17-19]或者一般形式的连续系统^[20,21], 考虑离散系统的文献较少, 同时这些方法只能以被动的方式降低网络时延和数据丢包对网络化多智能体系统的影响, 并带有极大的保守性. 因此, 如何以主动的方式补偿网络时延和数据丢包并在保守性较弱的假设条件下设计控制器, 成为了网络化多智能体系统研究领域中的一个极具挑战性的课题.

本文对带有时延和丢包的网络化多智能体系统进行了研究, 从系统稳定性和一致性的角度, 提出了基于时延和丢包主动补偿机制的预测控制器设计方法, 并给出了同时满足网络化多智能体系统稳定和一致的条件.

2 预备知识

首先介绍文中使用的一些符号. \mathbb{R} 表示实数集合, $\mathbb{R}^{m \times n}$ 表示所有 $m \times n$ 实数元素矩阵的集合, \mathbf{I}_n 表示 n 阶单位矩阵. 符号 \otimes 表示 Kronecker 积, 对

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61333003) 和国家自然科学基金 (批准号: 61273104) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: baoran@126.com

于矩阵 $\mathbf{W} = (w_{ij}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $\mathbf{V} = (v_{ij}) \in \mathbb{R}^{p \times q}$, 矩阵 \mathbf{W} 和矩阵 \mathbf{V} 的 Kronecker 积定义为

$$\mathbf{W} \otimes \mathbf{V} = \begin{bmatrix} w_{11}\mathbf{V} & \cdots & w_{1n}\mathbf{V} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1}\mathbf{V} & \cdots & w_{mn}\mathbf{V} \end{bmatrix}.$$

在网络化多智能体系统的研究中, 图论是不可缺少的分析工具. 假设网络化多智能体系统由 N 个智能体组成, 智能体之间信息交换拓扑结构可以用一个加权有向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$ 来描述. 其中, $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 是顶点集, $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 是边集, $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 是非负加权邻接矩阵. 从顶点 i 到顶点 j 的有向边记作 $e_{ij} = (i, j)$, 相应于 e_{ij} 的邻接元素 a_{ji} 是正数, 即 $e_{ij} \in \mathcal{E} \Leftrightarrow a_{ji} > 0$, 意味着智能体 j 能够接收到智能体 i 的信息. 为便于讨论, 本文不考虑自环, 对于任一顶点 $i \in \mathcal{V}$, 都有 $a_{ii} = 0$. 节点 i 的邻域节点集合记为

$$\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V} | (j, i) \in \mathcal{E}\}.$$

有向图 \mathcal{G} 的拉普拉斯矩阵 $\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A}$, 其中

$$\begin{aligned} \mathcal{D} &= \text{diag}(d_{in}(1), d_{in}(2), \dots, d_{in}(N)), d_{in}(i) \\ &= \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}. \end{aligned}$$

显然, \mathcal{L} 每行的元素和为 0, 即有一个特征值为 0, 对应的右特征向量为 $\mathbf{1}_N = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$. 假定 \mathcal{L} 有 $s (s \leq N)$ 个特征值, 记为: $0 = \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_s$. 为方便分析, 本文将相关矩阵进行分块标记.

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= [\mathcal{L}_1^T \ \mathcal{L}_2^T \ \cdots \ \mathcal{L}_N^T]^T \\ &= \begin{bmatrix} \mathcal{L}_{11} & \mathcal{L}_{12} \\ \mathcal{L}_{21} & \mathcal{L}_{22} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathcal{L}}_2 &= [\mathcal{L}_2^T \ \mathcal{L}_3^T \ \cdots \ \mathcal{L}_N^T]^T, \\ \mathcal{D} &= [\mathcal{D}_1^T \ \mathcal{D}_2^T \ \cdots \ \mathcal{D}_N^T]^T \\ &= \begin{bmatrix} d_{in}(1) & 0 \\ 0 & \mathcal{D}_{22} \end{bmatrix}, \\ \alpha_i &= [a_{i2} \ a_{i3} \ \cdots \ a_{iN}], \\ \mathcal{A}_{22} &= [\alpha_2^T \ \alpha_3^T \ \cdots \ \alpha_N^T], \end{aligned}$$

其中, $\mathcal{L}_{11} \in \mathbb{R}$, $\mathcal{L}_{22}, \mathcal{A}_{22}, \mathcal{D}_{22} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times (N-1)}$, $\mathcal{L}_i, \mathcal{D}_i \in \mathbb{R}^{1 \times N}$, $i = 1, 2, \dots, N$.

3 时延丢包补偿机制

本文研究的网络化多智能体具有如下离散线性动态模型:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(t+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}_i(t), \\ \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}_i(t) \quad i = 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, 状态向量 $\mathbf{x}_i(t) \in \mathbb{R}^n$, 输出向量 $\mathbf{y}_i(t) \in \mathbb{R}^m$, 输入向量 $\mathbf{u}_i(t) \in \mathbb{R}^r$, 此外, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times r}$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 为定常矩阵.

在实际应用中, 通信网络在网络化多智能体系统拥有不同的分布结构, 网络可以分布于单个智能体的传感器与控制器之间, 可以分布于单个智能体控制器与执行器之间, 或者分布于智能体与其他智能体之间的控制组件(传感器、控制器、执行器)之间. 本文研究的网络化多智能体系统的控制结构如图 1 所示. 单个网络化智能体传感器一侧的输出信息可以通过通信网络发送至自身的控制器和邻域内其他智能体, 自身智能体的控制器根据通信网络发送的本身智能体和其他智能体的信息, 计算出控制信息, 通过网络发送至本身智能体的执行器.

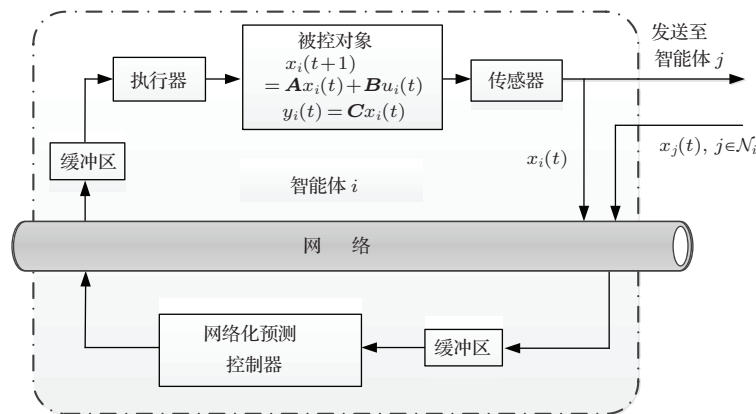


图 1 单个网络化智能体的结构

为进行网络化多智能体系统控制器设计与分析,并考虑到网络信道中网络时延、数据丢包的问题,提出如下假设:

假设 1 矩阵对 (A, B) 是可镇定的, (A, C) 是可检测的.

假设 2 智能体 i 及其邻域智能体 j 的传感器信息传递至智能体 i 的控制器网络信道的通信时延记作 $\tau_{ij}^{sc}(t)$, 其中,

$$0 \leq \tau_0 \leq \check{\tau}_{ij}^{sc}(t) \leq \tau_{ij}^{sc}(t) \leq \hat{\tau}_{ij}^{sc}(t) \leq \tau_b, \forall i, j \in \mathcal{V}$$

$\check{\tau}_{ij}^{sc}(t)$ 和 $\hat{\tau}_{ij}^{sc}(t)$ 是已知的有界函数, τ_0 和 τ_b 分别为下界和上界.

假设 3 智能体 i 的控制器信息传递至自身执行器的网络信道的通信时延记作 $\tau_i^{ca}(t)$, 其中,

$$0 \leq \tau_1 \leq \check{\tau}_i^{ca}(t) \leq \tau_i^{ca}(t) \leq \hat{\tau}_i^{ca}(t) \leq \tau_f, \quad \forall i \in \mathcal{V},$$

$\check{\tau}_i^{ca}(t)$ 和 $\hat{\tau}_i^{ca}(t)$ 是已知的有界函数, τ_1 和 τ_f 分别为下界和上界.

假设 4 通信网络中所有数据传输信道的连续丢包数不超过 d .

假设 5 网络化多智能体的通信连接图 \mathcal{G} 至少包含一条有向生成树.

注释 1 在实际的网络化多智能体系统中,控制量序列是基于时间的,所以需要同步网络化多智能体控制系统各数字组件的系统时钟. 本文主要讨论网络化多智能体系统的预测控制器设计问题,故假定控制器、传感器、执行器的时钟已完成同步,并且通信网络中传输的所有数据均带有时间戳.

为克服网络时延和丢包的存在,本文提出了时延与丢包补偿机制,并用于网络化多智能体系统控制器设计. 根据假设 1—4, 令 $b = \tau_b + d$, $f = \tau_f + d$, 为估计智能体 i 的状态向量, 设计如下状态观测器:

$$\begin{aligned} & \hat{x}_i(t-b+1|t-b) \\ &= \mathbf{A}\hat{x}_i(t-b|t-b-1) + \mathbf{B}u_i(t-b) \\ & \quad + \mathbf{L}(y_i(t-b) - \hat{y}_i(t-b)) \\ & \hat{y}_i(t-b) \\ &= \mathbf{C}\hat{x}_i(t-b|t-b-1) \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\hat{x}_i(t-b+1|t-b) \in \mathbb{R}^n$ 表示基于 $t-b$ 时刻的信息, 得到的 $t-b+1$ 时刻的预测状态, $\hat{y}_i(t-b) \in \mathbb{R}^m$ 表示观测器在 $t-b$ 时刻的输出向量, $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为状态观测器增益矩阵. 状态观测器 (2) 提供了向前一步状态的预测状态, $t-b+2$ 时刻至 $t+f$ 时刻的

状态预测序列为

$$\begin{aligned} & \hat{x}_i(t-b+2|t-b) \\ &= \mathbf{A}\hat{x}_i(t-b+1|t-b) + \mathbf{B}u_i(t-b+1) \\ & \hat{x}_i(t-b+3|t-b) \\ &= \mathbf{A}\hat{x}_i(t-b+2|t-b) + \mathbf{B}u_i(t-b+2) \\ & \quad \vdots \\ & \hat{x}_i(t+f|t-b) \\ &= \mathbf{A}\hat{x}_i(t+f-1|t-b) + \mathbf{B}u_i(t+f-1). \end{aligned} \quad (3)$$

根据假设 2—4, 在实际网络系统中, b 与 f 是固定正整数. 同时, 从 $t-b$ 时刻至 $t+f-1$ 时刻所有的控制输入, 均能在控制器端计算得到, 其中部分控制输入不能在 t 时刻应用于智能体 i 的被控对象中. 同理, 智能体 i 的邻域智能体 j ($j \in \mathcal{N}_i$) 的状态估计量, 可按上述状态预测机制得到.

当智能体 i 及其邻域智能体 j 的状态向量被估计后, 本文采用基于状态估计的反馈控制协议, 因此, 智能体 i 的控制器端的控制量预测值为

$$\begin{aligned} & u_i(t+f|t-b) \\ &= \mathbf{K} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{x}_j(t+f|t-b) \\ & \quad - \hat{x}_i(t+f|t-b)), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{r \times n}$ 为待设计的反馈增益矩阵. 在智能体 i 的执行器端, 选取的控制输入量为

$$\begin{aligned} & u_i(t) = u_i(t|t-b-f) \\ &= \mathbf{K} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{x}_j(t|t-b-f) \\ & \quad - \hat{x}_i(t|t-b-f)). \end{aligned} \quad (5)$$

为主动补偿数据丢包, 本文采用如下方法. 首先, 为防止智能体系统 i 及其邻域智能体系统 j 的量测输出数据包在信道传递过程中丢失, 规定 t 时刻从各智能体的传感器端发送至智能体 i 的控制器端的量测输出数据分别为

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} y_i(t) & y_i(t-1) & \cdots & y_i(t-d) \end{bmatrix} \quad \forall i \in \mathcal{V}, \\ & \begin{bmatrix} y_j(t) & y_j(t-1) & \cdots & y_j(t-d) \end{bmatrix} \quad \forall j \in \mathcal{N}_i. \end{aligned}$$

类似地, 为解决智能体 i 控制输入数据可能发生的丢包问题, 规定 t 时刻控制端发送至执行器端的控制量数据为

$$\begin{bmatrix} u_i(t+f|t-b) & u_i(t+f-1|t-b-1) \end{bmatrix}$$

$$\dots u_i(t + \tau_f | t - b - d) \Big] \quad \forall i \in \mathcal{V}.$$

同时, 为避免数据包错序, 智能体 i 的控制器端与执行器端分别设置数据缓冲区, 根据传输数据的时间戳, 对接收到的数据进行排序, 以保证控制器和执行器采用最新的控制输入数据和量测输出数据.

4 网络化多智能体系统预测控制器设计

为进一步分析网络化多智能体系统预测控制器的设计方法, 本节给出了同时满足网络化多智能体系统一致性和稳定性的条件.

定义 1 对于网络化多智能体系统 (1), 如果满足以下条件成立, 则称控制协议 (5) 同时解决了稳定性和一致性问题, 或称系统 (1) 在控制协议 (5) 的作用下同时实现了稳定和一致:

- 1) $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t)\| = 0, \quad \forall i \in \mathcal{V};$
- 2) $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0 \quad \forall i, j \in \mathcal{V};$
- 3) $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - \hat{x}_i(t|t-1)\| = 0, \quad \forall i \in \mathcal{V}.$

显然, 定义 1 的三个条件要求所有智能体的状态趋近于零, 智能体的状态达到一致, 同时要求观测器的估计误差趋近于零.

对于智能体 $i (\forall i \in \mathcal{V})$, 将时间 t 向后平移 b 步, 由观测器方程 (2) 可得

$$\begin{aligned} & \hat{x}_i(t+1|t) \\ &= \mathbf{A}\hat{x}_i(t|t-1) + \mathbf{B}u_i(t) \\ & \quad + \mathbf{L}\mathbf{C}(x_i(t) - \hat{x}_i(t|t-1)). \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式与 (1) 式相减, 得到如下状态估计误差方程

$$e_i(t+1) = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})e_i(t), \quad (7)$$

其中, $e_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t|t-1)$. 通过状态预测方程 (3) 进行迭代运算, 可得

$$\begin{aligned} & \hat{x}_i(t+f|t-b) \\ &= \mathbf{A}^{b+f-1}\hat{x}_i(t-b+1|t-b) \\ & \quad + \sum_{l=2}^{b+f} \mathbf{A}^{b+f-l}\mathbf{B}u_i(t+l-b-1). \end{aligned} \quad (8)$$

类似地, 使用 (2) 式和 (8) 式,

$$\begin{aligned} & \hat{x}_i(t+f|t-b+1) \\ &= \mathbf{A}^{b+f-2}\hat{x}_i(t-b+2|t-b+1) \\ & \quad + \sum_{l=3}^{b+f} \mathbf{A}^{b+f-l}\mathbf{B}u_i(t+l-b-1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \mathbf{A}^{b+f-2}(\mathbf{A}\hat{x}_i(t-b+1|t-b) + \mathbf{B}u_i(t-b+1) \\ & \quad + \mathbf{L}(y_i(t-b+1) - \hat{y}_i(t-b+1))) \\ & \quad + \sum_{l=3}^{b+f} \mathbf{A}^{b+f-l}\mathbf{B}u_i(t+l-b-1) \\ &= \mathbf{A}^{b+f-1}\hat{x}_i(t-b+1|t-b) \\ & \quad + \sum_{l=2}^{b+f} \mathbf{A}^{b+f-l}\mathbf{B}u_i(t+l-b-1) \\ & \quad + \mathbf{A}^{b+f-2}\mathbf{L}\mathbf{C}e_i(t-b+1). \end{aligned} \quad (9)$$

(9) 式与 (8) 式相减, 得

$$\begin{aligned} & \hat{x}_i(t+f|t-b) \\ &= \hat{x}_i(t+f|t-b+1) \\ & \quad - \mathbf{A}^{b+f-2}\mathbf{L}\mathbf{C}e_i(t-b+1). \end{aligned} \quad (10)$$

根据 (10) 式进一步迭代, 推出

$$\begin{aligned} & \hat{x}_i(t+f|t-b) \\ &= \hat{x}_i(t+f|t+f-1) \\ & \quad - \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l\mathbf{L}\mathbf{C}e_i(t+f-l-1). \end{aligned} \quad (11)$$

上式中, 使用 t 代换 $t+f$,

$$\begin{aligned} & \hat{x}_i(t|t-b-f) \\ &= \hat{x}_i(t|t-1) - \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l\mathbf{L}\mathbf{C}e_i(t-l-1) \\ &= x_i(t) - e_i(t) - \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l\mathbf{L}\mathbf{C}e_i(t-l-1). \end{aligned} \quad (12)$$

同理, 对于智能体 i 的所有邻域智能体 j , 可以得到

$$\begin{aligned} & \hat{x}_j(t|t-b-f) \\ &= x_j(t) - e_j(t) - \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l\mathbf{L}\mathbf{C}e_j(t-l-1). \end{aligned} \quad (13)$$

将 (12) 式和 (13) 式代入 (5) 式, 推导出 t 时刻智能体 i 受控对象采用的控制输入为

$$\begin{aligned} u_i(t) &= \mathbf{K} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(\hat{x}_j(t|t-b-f) \\ & \quad - \hat{x}_i(t|t-b-f)) \\ &= \mathbf{K} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \left(x_j(t) - e_j(t) \right. \\ & \quad \left. - \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l\mathbf{L}\mathbf{C}e_j(t-l-1) \right. \\ & \quad \left. - x_i(t) + e_i(t) \right) \end{aligned}$$

$$+ \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l \mathbf{L} \mathbf{C} e_i(t-l-1)). \quad (14)$$

把(14)式代入智能体*i*的受控动态方程(1), 则智能体*i*的闭环控制系统可表示为

$$\begin{aligned} & x_i(t+1) \\ &= \mathbf{A} x_i(t) + \mathbf{B} \mathbf{K} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (x_j(t) - e_j(t) \\ & \quad - \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l \mathbf{L} \mathbf{C} e_j(t-l-1) \\ & \quad - x_i(t) + e_i(t) + \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l \mathbf{L} \mathbf{C} e_i(t-l-1)) \\ &= \mathbf{A} x_i(t) + \mathbf{B} \mathbf{K} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \\ & \quad + \mathbf{B} \mathbf{K} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (e_i(t) \\ & \quad + \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l \mathbf{L} \mathbf{C} e_i(t-l-1)) \\ & \quad - \mathbf{B} \mathbf{K} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (e_j(t) \\ & \quad + \sum_{l=0}^{b+f-2} \mathbf{A}^l \mathbf{L} \mathbf{C} e_j(t-l-1)) \\ &= \mathbf{A} x_i(t) + \mathbf{B} \mathbf{K} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \\ & \quad + \Phi(b, f) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\mathbf{E}_i(t) - \mathbf{E}_j(t)), \quad (15) \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} \Phi(b, f) &= [\mathbf{B} \mathbf{K} \quad \mathbf{B} \mathbf{K} \mathbf{L} \mathbf{C} \quad \mathbf{B} \mathbf{K} \mathbf{A} \mathbf{L} \mathbf{C} \\ & \quad \dots \quad \mathbf{B} \mathbf{K} \mathbf{A}^{b+f-2} \mathbf{L} \mathbf{C}] \in \mathbb{R}^{n \times n(b+f)}, \\ \mathbf{E}_i(t) &= [e_i^T(t) \quad e_i^T(t-1) \\ & \quad \dots \quad e_i^T(t-b-f+1)]^T \in \mathbb{R}^{n(b+f) \times 1}, \\ \mathbf{E}_j(t) &= [e_j^T(t) \quad e_j^T(t-1) \\ & \quad \dots \quad e_j^T(t-b-f+1)]^T \in \mathbb{R}^{n(b+f) \times 1}. \end{aligned}$$

根据(7)式, 容易得到

$$e_i(t-s+1) = (\mathbf{A} - \mathbf{L} \mathbf{C}) e_i(t-s), \quad (16)$$

其中, $s = 0, 1, \dots, b+f-1$. 显然, (16)式可以写成如下等效形式

$$\mathbf{E}_i(t+1) = (\mathbf{I}_{b+f} \otimes (\mathbf{A} - \mathbf{L} \mathbf{C})) \mathbf{E}_i(t). \quad (17)$$

定义

$$\delta_i(t) = x_i(t) - x_1(t),$$

$$\begin{aligned} \delta(t) &= [\delta_2^T(t) \quad \dots \quad \delta_N^T(t)]^T, \\ \mathbf{E}(t) &= [\mathbf{E}_1^T(t) \quad \mathbf{E}_2^T(t) \quad \dots \quad \mathbf{E}_N^T(t)]^T. \end{aligned}$$

(15)式可以写成

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= \mathbf{A} x_i(t) + (\alpha_i \otimes (\mathbf{B} \mathbf{K})) \delta(t) \\ & \quad - d_{in}(i) \mathbf{B} \mathbf{K} \delta_i(t) \\ & \quad + (\mathcal{L}_i \otimes \Phi(b, f)) \mathbf{E}(t), \quad (18) \end{aligned}$$

从而, 智能体*i*与智能体1的状态差可以表示为

$$\begin{aligned} \delta_i(t+1) &= \mathbf{A} \delta_i(t) + \mathbf{B} \mathbf{K} \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\delta_j(t) - \delta_i(t)) \right. \\ & \quad \left. - \sum_{j \in \mathcal{N}_1} a_{1j} \delta_j(t) \right) \\ & \quad + \Phi(b, f) \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\mathbf{E}_i(t) - \mathbf{E}_j(t)) \right. \\ & \quad \left. - \sum_{j \in \mathcal{N}_1} a_{1j} (\mathbf{E}_1(t) - \mathbf{E}_j(t)) \right) \\ &= (\mathbf{A} - d_{in}(i) \mathbf{B} \mathbf{K}) \delta_i(t) + ((\alpha_i - \alpha_1) \otimes \mathbf{B} \mathbf{K}) \delta(t) \\ & \quad + ((\mathcal{L}_i - \mathcal{L}_1) \otimes \Phi(b, f)) \mathbf{E}(t) \\ & \quad i = 2, 3, \dots, N. \quad (19) \end{aligned}$$

(19)式可以整理成如下形式:

$$\begin{aligned} \delta(t+1) &= (\mathbf{I}_{N-1} \otimes \mathbf{A} - \mathcal{D}_{22} \otimes (\mathbf{B} \mathbf{K})) \\ & \quad + (\mathcal{A}_{22} - \mathbf{1}_{N-1} \alpha_1) \otimes (\mathbf{B} \mathbf{K}) \delta(t) \\ & \quad + ((\tilde{\mathcal{L}}_2 - \mathbf{1}_{N-1} \mathcal{L}_1) \otimes \Phi(b, f)) \mathbf{E}(t) \\ &= (\mathbf{I}_{N-1} \otimes \mathbf{A} - (\mathcal{L}_{22} - \mathbf{1}_{N-1} \mathcal{L}_{12}) \\ & \quad \otimes (\mathbf{B} \mathbf{K})) \delta(t) + ((\tilde{\mathcal{L}}_2 - \mathbf{1}_{N-1} \mathcal{L}_1) \\ & \quad \otimes \Phi(b, f)) \mathbf{E}(t). \quad (20) \end{aligned}$$

综合(17)—(20)式, 整个网络化多智能体闭环控制系统可以表示为

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} x(t+1) \\ \delta(t+1) \\ \mathbf{E}(t+1) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{\Pi}_1 & \mathbf{A}_1 \\ 0 & \mathbf{\Pi} & \mathbf{A}_2 \\ 0 & 0 & \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \delta(t) \\ \mathbf{E}(t) \end{bmatrix}, \quad (21) \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{\Pi} &= (\mathbf{I}_{N-1} \otimes \mathbf{A} - (\mathcal{L}_{22} - \mathbf{1}_{N-1} \mathcal{L}_{12}) \otimes (\mathbf{B} \mathbf{K})), \\ \mathbf{\Pi}_1 &= -\mathcal{L}_{12} \otimes (\mathbf{B} \mathbf{K}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{I}_{N(b+f)} \otimes (\mathbf{A} - \mathbf{LC}), \\ \mathbf{A}_1 &= \mathcal{L}_1 \otimes \Phi(b, f), \\ \mathbf{A}_2 &= (\tilde{\mathcal{L}}_2 - \mathbf{1}_{N-1} \mathcal{L}_1) \otimes \Phi(b, f). \end{aligned}$$

显然, (21) 式是个上三角系统. 对于一个上三角系统而言, 当且仅当其对角线上的子矩阵稳定时, 此上三角系统稳定. 因此, 当且仅当矩阵 \mathbf{A} , $\mathbf{\Pi}$ 和 \mathbf{A} 的特征值位于单位圆内时, 系统 (21) 是稳定的, 此时网络化多智能体系统同时实现了稳定和一致.

以上分析表明, 当网络化智能体之间交换信息存在有界时延和有界连续丢包数时, 在基于时延丢包补偿机制的控制协议 (5) 的作用下, 网络化多智能体系统 (1) 稳定性仅与智能体的动态特性和通讯拓扑有关, 而与通信延时、数据丢包等网络特性无关. 这一结论对于控制系统的设计是至关重要的, 多智能体系统的状态观测器增益矩阵与反馈增益矩阵可以分离设计, 同时完全可以借鉴传统多智能体系统 (不考虑网络特性) 的设计方法. 因此整个设计过程包含了两个重要的步骤:

1) 采用现有的方法, 求解合适的反馈增益矩阵 \mathbf{K} 来保证多智能体系统一致, 使得 $\mathbf{\Pi}$ 的特征值位于单位圆内, 文献 [22] 给出了一种利用 Riccati 不等式的设计方法, 当 \mathcal{G} 包含一生成树且满足: ① (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 可镇定; ② 存在 $\varsigma \in \mathbb{R}$, 服从 $\eta(\varsigma) = \max_{i \in \{2, \dots, s\}} |1 - \varsigma \lambda_i| < 1$, 则保证一致性的反馈增益矩阵 $\mathbf{K} = \varsigma(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$, 其中 \mathbf{P} 为 Riccati 不等式

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &> \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \\ &- (1 - \eta^2(\varsigma)) \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{B} (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \end{aligned}$$

的正定矩阵解;

2) 使用常用的观测器设计方法, 设计状态观测器增益矩阵 \mathbf{L} , 使得矩阵 $\mathbf{A} - \mathbf{LC}$ 的特征值位于单位圆内.

5 仿真实验

为验证本文提出的算法的有效性, 考虑由 4 个智能体组成的网络化多智能体系统, 通信拓扑由有向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$ 表示,

$$\begin{aligned} \mathcal{V} &= \{1, 2, 3, 4\}, \\ \mathcal{E} &= \{(1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 2)\}, \end{aligned}$$

相应的邻接元素都为 1 (见图 2).

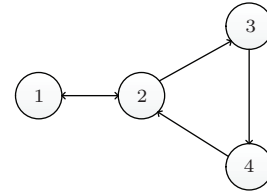


图 2 智能体间的通信拓扑

每个智能体的动力学模型是相同的, 均采用文献 [23] 中的伺服电机模型, 其输入和输出分别为控制电压 (V) 和角度位置 ($^\circ$), 当采样时间为 0.04 s 时, 状态空间模型辨识为

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= \mathbf{A}x_i(t) + \mathbf{B}u_i(t) \\ y_i(t) &= \mathbf{C}x_i(t) \quad i = 1, \dots, 4, \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1.2998 & -0.4341 & 0.1343 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} &= [3.5629 \quad 2.7739 \quad 1.0121]. \end{aligned}$$

系统的状态初值为

$$\begin{aligned} x_1(0) &= [10.8860 \quad 10.8860 \quad 10.8860]^T, \\ x_2(0) &= [5.4430 \quad 5.4430 \quad 5.4430]^T, \\ x_3(0) &= [-5.4430 \quad -5.4430 \quad -5.4430]^T, \\ x_4(0) &= [-10.8860 \quad -10.8860 \quad -10.8860]^T, \end{aligned}$$

分别对应于

$$\begin{aligned} y_1(0) &= 80, \quad y_2(0) = 40, \\ y_3(0) &= -40, \quad y_4(0) = -80. \end{aligned}$$

观测器的状态初值为

$$\begin{aligned} \hat{x}_1(0) &= [0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad \hat{x}_2(0) = [0 \quad 0 \quad 0]^T, \\ \hat{x}_3(0) &= [0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad \hat{x}_4(0) = [0 \quad 0 \quad 0]^T. \end{aligned}$$

根据第四节中叙述的网络化多智能体预测控制器设计方法, 设计出的观测器矩阵 \mathbf{L} 和控制增益矩阵 \mathbf{K} 分别为

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0.0755 \\ 0.0959 \\ 0.1628 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} 0.1598 & -0.0053 & 0.0882 \end{bmatrix}.$$

为测试网络化预测控制系统的性能,同时不考虑模型失配的情况,本文进行了如下两个实验.

1) 未采用时延丢包补偿机制的网络化多智能体控制. 此仿真案例中,网络特性的参数设置为 $\tau_f = 3, \tau_b = 2, d = 1$. 网络信道中的通信时延和数据丢包未得到补偿,因此网络化多智能体系统的控制器为

$$u_i(t) = K \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{x}_j(t-7) - \hat{x}_i(t-7)) \quad i \in \mathcal{V}.$$

实验结果如图3所示,表明网络时延与数据丢包极大地降低了网络化多智能体系统的控制性能,如果不采用时延与丢包补偿策略,甚至将使系统不稳定.

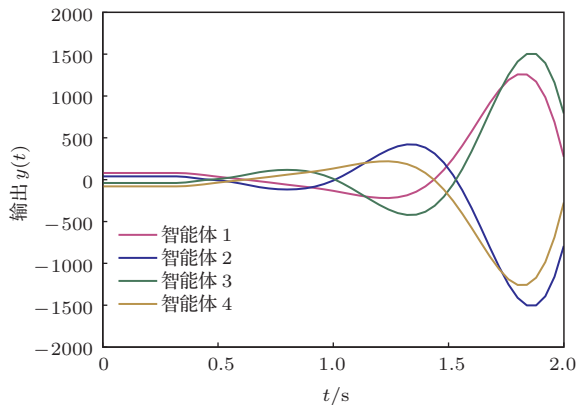


图3 未采用时延与丢包补偿机制的网络化多智能体控制

2) 采用时延丢包补偿机制的网络化多智能体预测控制. 此仿真案例采用了基于时延与丢包补偿机制的预测控制策略,网络特性的参数设置与案例1)相同. 图4给出了网络化多智能体系统预测控制与本地控制(不考虑网络特性,即无时延、无丢包的情况)的输出曲线,实线表示采用时延与丢包机制的网络化多智能体预测控制系统的输出曲线,虚线表示本地控制的输出曲线. 实验结果表明,网络化多智能体预测控制系统是稳定的,同时,控制性能可以达到与本地控制一样的控制效果. 当通信时延与连续丢包数增加时,闭环系统的稳定性与控制性能不会改变.

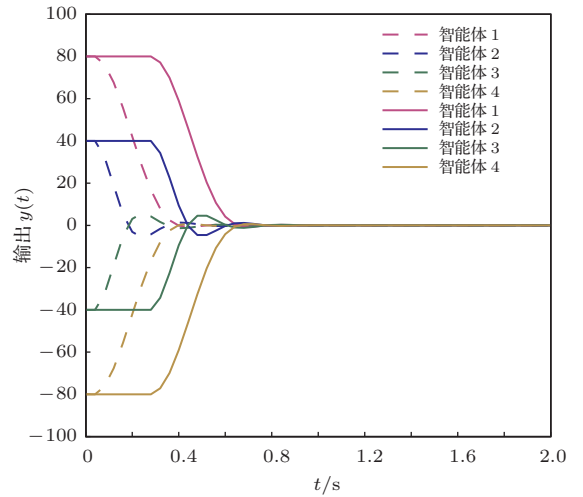


图4 网络化多智能体预测控制

6 结 论

本文提出了基于时延与丢包补偿机制的网络化多智能体预测控制器的设计方法,并讨论了闭环网络化多智能体控制系统的稳定性和一致性问题. 根据同时满足网络化多智能体控制系统的稳定性与一致性的条件,来确定预测控制器的参数矩阵. 仿真结果表明该方法是有效的.

感谢奥克兰大学工程学院董立静博士在多智能体系统分布式控制方面的讨论.

参考文献

- [1] Cao Y, Yu W, Ren W, Chen G 2013 *IEEE Trans. Ind. Inf.* **9** 427
- [2] Du Y J, Jin Y J, Li H 2007 *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering* Wuhan, China, November 10-11, 2007 p6795
- [3] Chen B, Cheng H H 2010 *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **11** 485
- [4] Lynch K M, Schwartz I B, Yang P, Freeman R A 2008 *IEEE Trans. Rob.* **24** 710
- [5] Ren W, Beard R W, Atkins E M 2007 *IEEE Control Syst. Mag.* **27** 71
- [6] Shang Y 2012 *Int. J. Syst. Sci.* **43** 499
- [7] Olfati-Saber R 2006 *IEEE Trans. Autom. Control* **51** 401
- [8] Su H, Wang X, Yang W 2008 *Asian J. Control* **10** 238
- [9] Xiao F, Wang L, Chen J, Gao Y 2009 *Automatica* **45** 2605
- [10] Lu X, Austin F, Chen S 2012 *Comm. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **17** 1382
- [11] Guan Y, Ji Z, Zhang L, Wang L 2013 *Syst. Control Lett.* **62** 438

- [12] Kim H, Shim H, Back J, Seo J H 2011 *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference* Orlando, FL, USA, December 12–15, 2011 p4829
- [13] Meng Z, Ren W, Cao Y, You Z 2011 *IEEE Trans Syst. Man Cybern. Part B Cybern.* **41** 75
- [14] Munz U, Papachristodoulou A, Allgower F 2011 *IEEE Trans. Autom. Control* **56** 145
- [15] Seyboth G S, Dimarogonas D V, Johansson K H 2013 *Automatica* **49** 245
- [16] Wu Q, Zhou J, Xiang L 2012 *Int. J. Syst. Sci.* **43** 1479
- [17] Ji L H, Liao X F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 150202 (in Chinese) [纪良浩, 廖晓峰 2012 物理学报 **61** 150202]
- [18] Ji L H, Liao X F, Liu Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 220202 (in Chinese) [纪良浩, 廖晓峰, 刘群 2012 物理学报 **61** 220202]
- [19] Yang T, Jin Y H, Wang W, Shi Y J 2011 *Chin. Phys. B* **20** 020511
- [20] Wen G, Hu G, Yu W, Cao J, Chen G 2013 *Syst. Control Lett.* **62** 1151
- [21] Wen G, Duan Z, Yu W, Chen G 2013 *Int. J. Robust Nonlinear Control* **23** 602
- [22] Hengster-Movric K, You K, Lewis F L, Xie L 2013 *Automatica* **49** 414
- [23] Pang Z H, Liu G P, Zhou D 2013 *J. Adv. Comput. Intell. Intelligent Informatics* **17** 813

Predictive controller for networked multi-agent systems with communication delay and packet loss*

An Bao-Ran^{1)†} Liu Guo-Ping¹⁾²⁾

1) (School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

2) (School of Engineering, University of South Wales, Pontypridd CF37 1DL, U.K.)

(Received 10 March 2014; revised manuscript received 23 March 2014)

Abstract

Communication delay and packet loss highly degrade the control performances of networked multi-agent systems (NMAS). This paper addresses the problem by presenting a novel predictive control technique using a time-delay and packet-loss compensation scheme. The principle of the time-delay and packet-loss compensation scheme is employed to remove the effects of network delay and packet loss. Furthermore, another key part of this paper is to analyse the stability and consensusability of close-loop NMAS on the basis of the designed predictive controller. Finally, simulation results illustrate the efficacy of the proposed method.

Keywords: communication delay, packet loss, networked multi-agent systems, predictive control

PACS: 02.30.Yy, 02.30.Ks, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.63.140203

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61333003) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61273104).

† Corresponding author. E-mail: baoranan@126.com