

# 数据丢包下网络控制系统事件触发预测控制

王 斐,刘晓华

(鲁东大学 数学与统计科学学院,山东 烟台 264039)

**摘要:**本文研究了一类具有随机数据丢包的网络控制系统的输出跟踪控制问题。提出基于事件触发机制的网络预测控制方法,通过状态观测器估计系统状态增量值,进而得到预测控制输入序列,并主动补偿反馈及前向通道中数据丢包对系统造成的影响。最后通过仿真实例证明该控制策略的可行性,并且有效降低系统的网络资源消耗。

**关键词:**事件触发控制;网络控制系统;数据丢失补偿;预测控制

**中图分类号:**TP273   **文献标志码:**A   **文章编号:**1673-8020(2025)02-0106-07

随着计算机网络和通信技术的快速发展,目前网络控制系统已被广泛应用于众多领域,例如航空航天、船舶控制、轨道交通等<sup>[1-4]</sup>。与传统控制系统相比,网络控制系统通过无线网络连接传感器、执行器和控制器等节点,在减少复杂布线的同时扩大了分布区域,支持资源共享和远程协同操作。但在网络带宽一定的限制下,随着控制系统复杂性增加,数据传输任务逐渐加重,导致网络拥堵、数据丢包等通信约束问题出现<sup>[5-6]</sup>。文献[7—8]根据系统数据包有无丢失分别设计了开环和闭环估计器,切换补偿系统数据丢包造成的影响;文献[9]利用优化算法计算系统最大丢包率,得到存在数据丢包和传输时延情况下的系统均方稳定条件。

上述文献主要采用被动丢包补偿控制方法,且系统控制性能较差。文献[10]针对反馈通道存在丢包的系统提出了网络预测控制(networked predictive control,NPC)策略,该控制策略可以主动补偿丢包对系统性能造成的负面影响,保证系统控制性能更好。在此基础上,学者们取得了更多相关研究成果<sup>[11-14]</sup>:文献[11]针对前向和反馈通道均存在数据丢包的网络控制系统,设计使其渐近稳定的预测控制器;文献[12]提出新的基于交换器的NPC方法,在前向和反馈通道中设计不同的补偿方案。由于实际工业操作过程中系统的状态不是完全可量测的,文献[13]利用状态观测器估计系统状态值,并在此基础上设计预测控制器。这些方法均是基于时间触发方式,其滚动迭代计算会消耗大量的网络资源,不利于实际工程应用。

事件触发器在保证系统控制性能的同时节约网络资源,因此在解决一些复杂的网络环境问题时常引入事件触发机制<sup>[15-21]</sup>。与传统的周期触发控制不同,事件触发器通过预设触发条件控制数据传输采样值通过节点,事件触发条件一般与反映系统控制效果的参量有关。因此,在控制系统中引入事件触发机制可以在保证系统控制性能的同时实现控制目标,且有效降低网络通信负担<sup>[17]</sup>。文献[18]利用基于输出的事件触发机制,研究了具有通信延迟的网络控制系统稳定性问题;文献[19]设计事件触发NPC方案,使存在传输时延和数据丢包的网络控制系统渐近稳定。以上文献多是研究网络系统的镇定控制问题,但关于具有数据丢包的网路系统输出跟踪控制问题的研究成果较少。

本文设计基于事件触发的NPC策略,研究一类具有随机数据丢包和带宽有限的网络控制系统的输出跟踪控制问题。相比已有研究成果,创新点主要包括两个方面:1)与文献[7—9]采用的控制策略不同,NPC策略能够主动补偿网络控制系统反馈及前向通道中随机数据丢包对系统造成的负面影响,且

收稿日期:2025-01-03;修回日期:2025-03-15

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2020MF063)

通信作者简介:刘晓华(1959—),男,教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为预测控制。E-mail:xhliu@ldu.edu.cn

获得与无丢包情形相同的控制性能;2) 与文献[10—14]相比,本文设计的基于本地状态观测器的事件发生器,通过结合 NPC 方法降低网络计算的复杂性,有效缓解了网络资源消耗。

## 1 问题描述

本文考虑具有如下描述的网络控制系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k), \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^n$  为系统状态,  $\mathbf{u}(k) \in \mathbf{R}^m$  为控制输入,  $\mathbf{y}(k) \in \mathbf{R}^p$  为系统输出;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{C}$  是已知的常数矩阵。定义跟踪误差:

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{r}(k) - \mathbf{y}(k), \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{r}(k) \in \mathbf{R}^p$  为参考信号。由系统(1)可得如下的增量形式:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(k), \\ \Delta\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\Delta\mathbf{x}(k), \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\Delta\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k-1)$ ,  $\Delta\mathbf{y}(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{y}(k-1)$ ,  $\Delta\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)$ 。

由跟踪误差(2)和式(3)可得:

$$\mathbf{e}(k+1) = \mathbf{e}(k) - \mathbf{C}\mathbf{A}\Delta\mathbf{x}(k) - \mathbf{C}\mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(k) + \Delta\mathbf{r}(k+1),$$

其中,  $\Delta\mathbf{r}(k+1) = \mathbf{r}(k+1) - \mathbf{r}(k)$ 。结合式(3)可得到增广系统:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{x}}(k) + \bar{\mathbf{B}}\Delta\mathbf{u}(k) + \bar{\mathbf{E}}\Delta\mathbf{r}(k+1), \\ \Delta\mathbf{y}(k) = \bar{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{x}}(k), \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x}(k) \\ \mathbf{e}(k) \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{n+p}, \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0}_{n \times p} \\ -\mathbf{C}\mathbf{A} & \mathbf{I}_p \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ -\mathbf{C}\mathbf{B} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}_{p \times p}], \bar{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times p} \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix}。$$

因此,线性网络控制系统(1)的输出跟踪控制问题转化为增广系统(4)的镇定控制问题。

本文的控制目标是针对具有随机数据包丢失和网络带宽受限的网络控制系统,提出一种基于事件触发的 NPC 策略,使系统的输出跟踪误差最终收敛于零。分别用  $d_k^{\text{sc}}$  和  $d_k^{\text{ca}}$  表示  $k$  时刻网络控制系统反馈及前向通道中由网络被动引起的连续数据包丢失数,  $d_k$  表示事件触发器在  $k$  时刻的连续数据包丢失数。

**假设 1** 矩阵对  $(\mathbf{A}, \mathbf{B})$  是可控的,  $(\mathbf{A}, \mathbf{C})$  是可观测的。

**假设 2** 通过网络传输的数据包均带有时间戳。

**假设 3** 系统反馈及前向通道中由网络被动引起的连续数据包丢失数是有界的, 即  $d_k^{\text{sc}} \in [0 \quad \bar{d}^{\text{sc}}]$  和  $d_k^{\text{ca}} \in [0 \quad \bar{d}^{\text{ca}}]$ , 这里  $\bar{d}^{\text{sc}}$  和  $\bar{d}^{\text{ca}}$  是已知非负整数。

将事件触发器的触发时刻表示为  $0 = k_0 < k_1 < k_2 < \cdots < k_t < k_{t+1} < \cdots$ 。若  $k_t$  时刻激发了事件触发器, 则下一次事件触发时刻  $k_{t+1}$  可由下式判断:

$$k_{t+1} \triangleq \begin{cases} \min\{k | f(k) \geq 0\}, & k < k_t + W, \\ k_t + W, & k \geq k_t + W, \end{cases}$$

其中:  $f(k)$  为事件触发器中的事件触发函数;  $W$  为相邻触发时刻  $k_t, k_{t+1}$  之间的最大触发间隔。

## 2 基于事件触发的 NPC 策略

基于事件触发的 NPC 策略框架如图 1 所示。由图 1 可知, 该策略主要包含 4 个部分: 状态增量观测器、事件触发器、预测控制器以及丢包补偿器。下面给出具体设计过程。

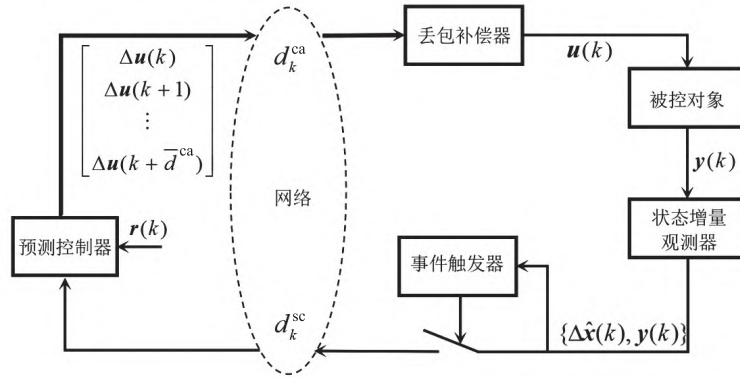


图 1 基于事件触发的 NPC 策略结构

Fig.1 Framework for event-triggered NPC strategy

为获取网络控制系统在  $k$  时刻状态估计值的增量,设计如下的状态增量观测器:

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \mathbf{A}\Delta \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}(k) + \mathbf{L}(\Delta \mathbf{y}(k) - \mathbf{C}\Delta \hat{\mathbf{x}}(k|k-1)), \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{L} \in \mathbf{R}^{n \times p}$  为待设计的观测器参数。为减少网络控制系统的网络资源消耗,设计如下事件触发函数:

$$\begin{cases} f(k) = \|\Delta \hat{\mathbf{x}}(k) - \Delta \hat{\mathbf{x}}(k_i)\| - \gamma(k), \\ \gamma(k) = \beta e^{-ak} + b, \beta > 0, a > 0, b \geq 0, \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $k_i$  和  $\Delta \hat{\mathbf{x}}(k_i)$  分别表示事件触发器中最近一次的触发时刻及相应的系统状态估计值的增量;  $\gamma(k)$  表示事件触发阈值;  $\|\cdot\|$  表示向量的欧几里得范数。

由图 1 和式 (6) 可知,当事件触发器在  $k$  时刻启动时,数据包  $\{\Delta \hat{\mathbf{x}}(k), \mathbf{y}(k)\}$  将通过系统的反馈通道发往预测控制器中,否则该数据包将在传感器端主动舍弃。为便于后续描述,假设网络控制系统反馈通道存在丢失的连续数据包数为  $\tau_k^{\text{sc}}$ ,即  $\tau_k^{\text{sc}} = d_k^{\text{sc}} + d_k$ 。

基于获取的历史数据  $\{\Delta \hat{\mathbf{x}}(k - \tau_k^{\text{sc}}), \mathbf{y}(k - \tau_k^{\text{sc}})\}$ ,计算  $k - \tau_k^{\text{sc}} + 1$  时刻到  $k + \bar{d}^{\text{ca}}$  时刻的增广状态预测值为:

$$\hat{\mathbf{x}}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i | k - \tau_k^{\text{sc}}) = \bar{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i - 1 | k - \tau_k^{\text{sc}}) + \bar{\mathbf{B}}\Delta \mathbf{u}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i - 1) + \bar{\mathbf{E}}\Delta \mathbf{r}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i), \quad (7)$$

其中,

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i | k - \tau_k^{\text{sc}}) &= [\Delta \hat{\mathbf{x}}^{\text{T}}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i | k - \tau_k^{\text{sc}}), \hat{\mathbf{e}}^{\text{T}}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i | k - \tau_k^{\text{sc}})]^{\text{T}}, \\ \hat{\mathbf{e}}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i | k - \tau_k^{\text{sc}}) &= \mathbf{r}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i) - \hat{\mathbf{y}}(k - \tau_k^{\text{sc}} + i | k - \tau_k^{\text{sc}}), \hat{\mathbf{x}}(k - \tau_k^{\text{sc}} | k - \tau_k^{\text{sc}}) = \hat{\mathbf{x}}(k - \tau_k^{\text{sc}}), \\ \hat{\mathbf{x}}(k - \tau_k^{\text{sc}}) &= [\Delta \hat{\mathbf{x}}^{\text{T}}(k - \tau_k^{\text{sc}}), \mathbf{e}^{\text{T}}(k - \tau_k^{\text{sc}})]^{\text{T}}, i = 1, 2, \dots, \tau_k^{\text{sc}} + \bar{d}^{\text{ca}}. \end{aligned}$$

基于式 (7),设计如下的控制协议:

$$\Delta \mathbf{u}(k + \bar{d}^{\text{ca}}) = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}(k + \bar{d}^{\text{ca}} | k - \tau_k^{\text{sc}}), \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{m \times (n+p)}$  为待设计的控制器参数。由式 (8) 可知,网络控制系统的预测控制器在  $k$  时刻可获取的控制序列为:

$$\Delta \mathbf{U}(k + \bar{d}^{\text{ca}}) = \{\Delta \mathbf{u}(k), \Delta \mathbf{u}(k+1), \Delta \mathbf{u}(k+2), \dots, \Delta \mathbf{u}(k + \bar{d}^{\text{ca}})\},$$

并通过系统的反馈通道将其发往丢包补偿器。由于网络控制系统的前向通道在  $k$  时刻存在的连续数据包丢失数假设为  $d_k^{\text{ca}}$ ,则丢包补偿器在  $k$  时刻可获取的控制输入序列为:

$$\Delta \mathbf{U}(k + \bar{d}^{\text{ca}} - d_k^{\text{ca}}) = \{\Delta \mathbf{u}(k - d_k^{\text{ca}}), \dots, \Delta \mathbf{u}(k), \dots, \Delta \mathbf{u}(k + \bar{d}^{\text{ca}} - d_k^{\text{ca}})\}.$$

由不等式  $d_k^{\text{ca}} \leq \bar{d}^{\text{ca}}$  可知,丢包补偿器在  $k$  时刻可选取  $\Delta \mathbf{U}(k + \bar{d}^{\text{ca}} - d_k^{\text{ca}})$  中第  $(d_k^{\text{ca}} + 1)$  个元素  $\Delta \mathbf{u}(k)$ 。因此,网络控制系统在  $k$  时刻的控制输入表示为:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1) + \Delta \mathbf{u}(k). \quad (9)$$

### 3 稳定性和跟踪性能分析

本节给出了网络控制系统在控制协议(8)作用下的稳定性与输出跟踪性能分析。

**定理1** 针对网络控制系统(1),当且仅当矩阵  $\bar{A} - \bar{B}K$  和  $A - LC$  的所有特征值均位于单位圆内时,在控制输入(9)的作用下该系统是渐近稳定的。

**证明** 定义状态观测器误差:

$$\xi(k) = \Delta x(k) - \Delta \hat{x}(k|k-1), \quad (10)$$

由式(3)、(5)和(10)可得:

$$\xi(k+1) = \Delta x(k+1) - \Delta \hat{x}(k+1|k) = (A - LC)\xi(k), \quad (11)$$

由式(2)和(7)可得:

$$e(k - \tau_k + 1) - \hat{e}(k - \tau_k + 1|k - \tau_k) = -C(\Delta x(k - \tau_k + 1) - \Delta \hat{x}(k - \tau_k + 1|k - \tau_k)) = -C\xi(k - \tau_k + 1), \quad (12)$$

其中,  $\tau_k = \tau_{k-\bar{d}^{ca}}^{sc} + \bar{d}^{ca}$ 。则由式(4)、(7)和(12)可得:

$$\bar{x}(k) - \hat{\bar{x}}(k|k - \tau_k) = \bar{A}^{\tau_k-1}(\bar{x}(k - \tau_k + 1) - \hat{\bar{x}}(k - \tau_k + 1|k - \tau_k)) = \bar{A}^{\tau_k-1}(\bar{I} - \hat{I}C)\xi(k - \tau_k + 1), \quad (13)$$

其中,  $\bar{I} = [I_n \quad 0_{n \times p}]^T$ ,  $\hat{I} = [0_{n \times n} \quad I_{n \times p}]^T$ 。

由控制协议(8)和式(13),系统在  $k$  时刻的控制协议为:

$$\Delta u(k) = -K(\hat{\bar{x}}(k|k - \tau_k) - \bar{x}(k) + \bar{x}(k)) = -K\bar{x}(k) + K\bar{A}^{\tau_k-1}(\bar{I} - \hat{I}C)\xi(k - \tau_k + 1),$$

代入式(4)可得:

$$\bar{x}(k+1) = (\bar{A} - \bar{B}K)\bar{x}(k) + \bar{B}K\bar{A}^{\tau_k-1}(\bar{I} - \hat{I}C)\xi(k - \tau_k + 1) + \bar{E}\Delta r(k+1). \quad (14)$$

基于式(11)和(14),闭环网络控制系统可以表示为如下形式:

$$Y(k+1) = \Phi(\tau_k)Y(k) + \Psi\Delta r(k+1), \quad (15)$$

其中,

$$Y(k) = [\bar{x}(k) \quad \Xi(k)]^T, \Phi(\tau_k) = \begin{bmatrix} \bar{A} - \bar{B}K & \Theta(\tau_k) \\ 0 & I \end{bmatrix}, \Xi(k) = [\xi^T(k), \xi^T(k-1), \dots, \xi^T(k - \bar{\tau} + 1)]^T, \\ \Psi = [\bar{E}^T, 0]^T, \bar{\tau} = \max\{\tau_k\}, \Theta(\tau_k) = [0, \dots, 0, \bar{B}K\bar{A}^{\tau_k-1}(\bar{I} - \hat{I}C), 0, \dots, 0], \\ \Gamma = \text{diag}\{A - LC, A - LC, \dots, A - LC\}。$$

由式(15)可知,闭环网络控制系统的稳定性取决于矩阵  $\bar{A} - \bar{B}K$  和  $A - LC$  的特征值。定理1得证。

**定理2** 若矩阵  $\bar{A} - \bar{B}K$  和  $A - LC$  的特征值均位于单位圆内,则闭环网络控制系统(15)对于阶跃参考信号可获得零稳态输出跟踪误差,即  $\lim_{k \rightarrow \infty} e(k) = 0$ 。

**证明** 考虑如下形式的阶跃参考信号:

$$r(k) = \begin{cases} y(0), & k < 0, \\ y(0) + \bar{r}, & k \geq 0, \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $\bar{r} \in \mathbf{R}^p$  为定常矩阵。由式(16)可得如下增量形式:

$$\Delta r(k) = \begin{cases} \bar{r}, & k = 0, \\ 0, & k \neq 0. \end{cases} \quad (17)$$

若闭环系统(15)是稳定的,且  $Y(0)$  是有界的,由式(15)和(17)可得:

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} Y(k) = \lim_{k \rightarrow +\infty} (\Phi(\tau_{k-1})Y(k-1) + \Psi\Delta r(k)) = \\ \lim_{k \rightarrow +\infty} \left( \prod_{i=1}^k \Phi(\tau_{k-i})Y(0) + \Psi\Delta r(k) + \sum_{j=1}^{k-1} \prod_{i=1}^j \Phi(\tau_{k-i})\Psi\Delta r(k-j) \right) = 0. \quad (18)$$

结合式(4)、(15)和(18)可得  $\lim_{k \rightarrow +\infty} e(k) = 0$ , 即闭环网络控制系统在控制协议(8)的作用下可获得零稳态输出跟踪误差。定理2得证。

## 4 仿真例子

为了验证基于事件触发的 NPC 策略的有效性和优越性,本节使用 GNM5440E 型直流电机系统<sup>[22]</sup>作为被控对象进行数值仿真,其中电机系统的微分方程为:

$$\begin{cases} L_g \frac{di_g(k')}{dk'} = V_g(k') - R_g i_g(k') - c_1 \omega(k'), \\ J \frac{d\omega(k')}{dk'} = c_2 i_g(k') - a \omega(k'), \end{cases} \quad (19)$$

其中:  $i_g(k')$  表示电流,  $V_g(k')$  表示电压,  $\omega(k')$  表示角速度;  $L_g, R_g$  分别表示电机电枢的电感和电阻,  $J$  表示转动惯量;  $a$  表示粘性摩擦系数,  $c_1$  表示反电动势常数,  $c_2$  表示电机转矩常数。仿真过程中的参数取值具体见表 1。

表 1 GNM5440E 型直流电机的参数  
Tab.1 Parameters of GNM5440E direct current motor

| 参数 | $R_g/\Omega$ | $L_g/H$ | $c_1/(Vs \cdot \text{rad}^{-1})$ | $c_2/(Nm \cdot A^{-1})$ | $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | $a/(\text{N} \cdot \text{ms}^{-1})$ |
|----|--------------|---------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 取值 | 0.965 0      | 0.002 2 | 0.120 1                          | 0.120 1                 | 0.118 2                          | 0.129 6                             |

定义  $\mathbf{x}(k') = [i_g(k') \quad \omega(k')]^T$ ,  $u(k') = V_g(k')$ ,  $y(k') = \frac{30}{\pi} \omega(k')$ , 则式(19)写为如下的连续时间状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(k') = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k') + \tilde{\mathbf{B}}u(k'), \\ y(k') = \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{x}(k'), \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -438.636 & 4 & -54.590 & 9 \\ 1.016 & 1 & -1.096 & 4 \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 454.545 & 5 \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{C}} = [0 \quad 9.549 \quad 3]$ 。

采样周期选取 0.05 s, 使用离散化技术将式(20)表示为形如系统(1)的离散时间状态空间模型, 其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0.000 & 3 & -0.117 & 4 \\ 0.002 & 2 & 0.940 & 9 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1.030 & 5 \\ 0.048 & 8 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [0 \quad 9.549 \quad 3]。$$

系统的初始状态和控制输入分别取为  $\mathbf{x}(k') = [0 \quad 0]^T$  和  $u(k') = 0$ ; 事件触发器中相邻两个连续触发时刻的最大触发间隔设为  $W = 4$ 。采用传统的极点配置方法获取观测器和控制器参数, 其中观测器和控制器极点分别取为  $\{0.6, 0.1\}$  和  $\{0.2, 0.7 \pm 0.3\}$ , 则得到观测器和控制器参数分别为

$$\mathbf{L} = [2.853 \quad 7 \quad 0.025 \quad 2]^T, \mathbf{K} = [-0.104 \quad 1 \quad 6.358 \quad 4 \quad -0.295 \quad 2]。$$

在仿真过程中, 假设网络控制系统中反馈及前向通道的连续随机数据丢包数如图 2 所示, 即  $d_{k'}^{\text{sc}} \in [0 \quad 4]$ ,  $d_{k'}^{\text{ca}} \in [0 \quad 4]$ ; 事件触发阈值为  $\gamma(k') = 1.5e^{-0.5k'} + 0.01$ , 事件触发器的触发间隔见图 3。针对系统(20), 分别采用本文控制策略、通信环境理想的本地控制策略以及仅存在随机丢包情况的网络控制策略, 得到相应的输出和跟踪误差轨迹, 如图 4 所示。比较图 4 结果可以看到, 随机数据丢包的存在明显降低了网络控制系统的控制性能, 本文控制策略较好地补偿了随机数据丢包对系统性能造成的负面影响, 并减少了系统反馈通道的数据传输频率。

## 5 结论

本文考虑一类具有反馈及前向通道随机数据丢包的网路控制系统, 设计一种结合事件触发控制策略的 NPC 方法。通过构造增广系统, 将系统输出跟踪控制问题转化为增广系统的镇定控制问题; 利用预测控制思想设计能够估计系统状态增量的状态观测器, 结合实际控制输入计算未来控制信号, 从而主

动补偿数据丢失对系统的影响。此外,通过引入事件触发机制解决系统带宽有限问题。

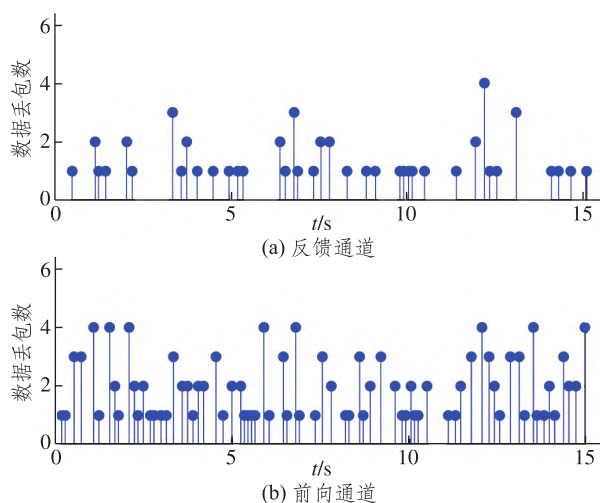


图2 网络控制系统反馈及前向通道的连续随机数据丢包数

Fig.2 Continuous random data packet loss of the backward and forward channels in the networked control system

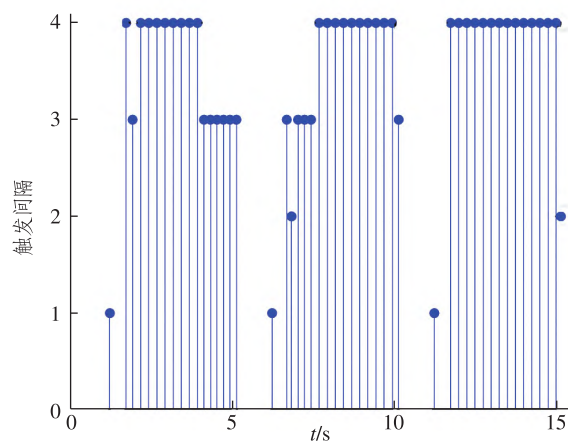


图3 事件触发器触发间隔

Fig.3 Triggering interval of the event trigger

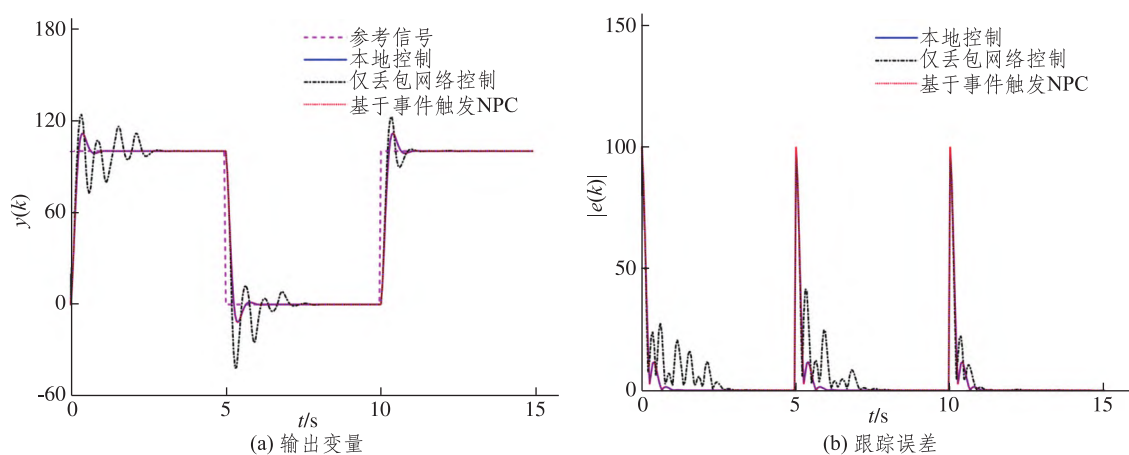


图4 三种控制策略下网络控制系统的输出和跟踪误差轨迹

Fig.4 Output and tracking error trajectories of the networked control system under three control strategies

## 参考文献:

- [1] SURYENDU C, SUBUDHI B. Formation control of multiple autonomous underwater vehicles under communication delays [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(12): 3182–3186.
- [2] ZHANG L, WANG Y C, WANG Z P. Robust lateral motion control for in-wheel-motor-drive electric vehicles with network induced delays [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11): 10585–10593.
- [3] DENG Y R, YIN X X, HU S L. Event-triggered predictive control for networked control systems with DoS attacks [J]. Information Sciences, 2021, 542: 71–91.
- [4] 陈谋, 吴颖. 具有输入时滞的集群无人机事件触发协同最优控制 [J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 958–968.
- [5] 李健, 刘晓华. 输入受限网络控制系统的鲁棒模型预测控制 [J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2009, 25(3): 218–224.
- [6] 罗杰, 刘晓华. 基于多速率采样系统的网络预测控制算法 [J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2008, 23(2): 122–126.
- [7] 龙承念, 代双凤, 关新平. 具有数据包丢失的网络控制系统的切换补偿策略研究 [C] // 第五届全球智能控制与自动化大会会议论文集, 2004: 1348–1351.
- [8] WU J, CHEN T W. Design of networked control systems with packet dropouts [J]. IEEE Transactions on Automatic control, 2007, 52(7): 438–441.

- [9] TAN C,ZHANG H S.Necessary and sufficient stabilizing conditions for networked control systems with simultaneous transmission delay and packet dropout[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2016,62(8):4011–4016.
- [10] LIU G P,XIA Y,REES D,et al.Design and stability criteria of networked predictive control systems with random network delay in the feedback channel[J].IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics,Part C (Applications and Reviews),2007,37(2):173–184.
- [11] LI H P,SHI Y.Network-based predictive control for constrained nonlinear systems with two-channel packet dropouts[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(3):1574–1582.
- [12] PANG Z H,BAI C D,LIU G P,et al.A novel networked predictive control method for systems with random communication constraints[J].Journal of Systems Science and Complexity,2021,34(4):1364–1378.
- [13] PANG Z H,LUO W C,LIU G P,et al.Observer-based incremental predictive control of networked multi-agent system with random delays and packet dropouts[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs,2020,68(1):426–430.
- [14] 于淑芬,高荣.基于模型预测控制的离散网络控制系统镇定研究[J].鲁东大学学报(自然科学版),2022,38(2):139–145.
- [15] PENG C,LI F Q.A survey on recent advances in event-triggered communication and control[J].Information Sciences,2018,457:123–125.
- [16] LIU D,YANG G H.Robust event-triggered control for networked control systems[J].Information Sciences,2018,459:186–197.
- [17] LUO W C,LU P L,LIU H K,et al.Event-triggered networked predictive output tracking control of cyber-physical systems with model uncertainty and communication constraints[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs,2023,70(6):2166–2170.
- [18] YANG R,ZHENG W X.Output-based event-triggered predictive control for networked control systems[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,67(12):10631–10640.
- [19] YANG H,GUO X,DAI L,et al.Event-triggered predictive control for networked control systems with network-induced delays and packet dropouts[J].International Journal of Robust and Nonlinear Control,2018,28(4):1350–1365.
- [20] LIU H,WANG S D,LI Y Z.Event-triggered control and proactive defense for cyber-physical systems[J].IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics:Systems,2022,52(10):6305–6313.
- [21] SUN Q,CHEN J C,SHI Y.Event-triggered robust MPC of nonlinear cyber-physical systems against DoS attacks[J].Science China Information Sciences,2022,65(1):110202.
- [22] 路平立,骆文城,杜长坤.基于动态事件驱动的多智能体系统预测控制[J].控制与决策,2024,39(12):3981–3988.

## Event-triggered Networked Predictive Control Systems with Packet Loss

WANG Fei,LIU Xiaohua

(School of Mathematics and Statistics Science,Ludong University,Yantai 264039,China)

**Abstract:** This paper studies the output tracking control problem of a class of networked control systems with random packet loss. A networked predictive control method combined with event-triggered control strategy was designed. This method estimates the incremental value of the system using a state observer to obtain a predictive control input sequence, and actively compensates for the impact of packet loss in both feedback and forward channels. Finally, simulation results show that the control method is feasible, while the scheme effectively reduces the network resource consumption in the system.

**Keywords:** event-triggered control; networked control systems; packet loss compensation; predictive control