

## 网络控制系统的预测补偿

王瑞敏, 费树岷, 柴琳

(东南大学自动化学院, 江苏南京 210096)

**摘要:** 针对网络控制系统中存在长时延和数据丢包的情况, 通过在控制器节点前设置缓冲器, 并设计预估控制产生器和时延补偿器, 提出了一种预测补偿控制方案, 有效地克服了长时延、数据丢包和时序错乱问题对实际网络控制系统稳定性所造成的影响. 证明了采用上述控制方案时闭环网络控制系统的稳定性, 最后提供的仿真实例验证了该控制方案的有效性.

**关键词:** 网络控制系统; 缓冲器; 状态观测器; 预测控制; 时延补偿器

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Predictive compensation for networked control systems

WANG Rui-min, FEI Shu-min, CHAI Lin

(School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** We propose for the networked control system a predictive compensation scheme which effectively eliminates the adverse effects from the long time-delay, data-dropout and the system instability caused by the confusion in time-sequences. This scheme consists of the buffer, control prediction generator and delay compensator. The stability of the closed-loop networked control systems with the above mentioned scheme is analyzed. Simulation examples validate the efficacy of the proposed compensation scheme.

**Key words:** networked control systems; buffer; state observer; predictive control; delay compensator

### 1 引言(Introduction)

网络控制系统(networked control systems, NCSs)是一种全分布式、网络化实时反馈控制系统, 是将控制系统的传感器、控制器、执行器等单元通过通讯网络连接起来形成闭环的分布式控制系统. NCSs与传统的控制系统相比, 具有可以实现资源共享、连接线数大大减少、远程操作与控制、较高的诊断能力、安装与维护简便、能有效减少系统的重量与体积、增加系统的灵活性和可靠性等诸多优点<sup>[1]</sup>.

由于网络中的信息源很多, 信息在传送时要分时占用总线, 网络的通信带宽有限, 因此不可避免地存在着信息的碰撞、重发等现象, 这就使得信息在传输过程中不可避免地存在着不确定性时延、数据包丢失和时序错乱等现象<sup>[1]</sup>. 这些问题不同程度地降低了系统的控制性能, 甚至使系统不稳定. 因此, 如何有效地克服网络时延、数据丢包和时序错乱对实际网络控制系统的影响, 成为当前所研究的重点. 文献[2]用一种状态估计的方法, 从统计学的角度分析处理所获取的信息, 其前提是传输时延小于1个采样周期, 不适于传输时延大于1个采样周期的情况. 文献[3, 4]分别设计了一种状态观测器, 对传感器到

控制器的延迟进行补偿. 文献[5]提出具有Markov延迟特性的闭环网络控制系统的设计方法, 该方法对具有一般传输延迟特性的网络控制系统不适用. 文献[6]通过在节点中设置缓冲区将随机时延转化为确定性时延, 将传感器到控制器的时延与控制器到执行器的时延迭加在一起, 用具有时延补偿功能的状态观测器<sup>[3]</sup>进行了补偿.

文献[7]对控制器与执行器之间不存在网络连接的情况, 提出了一种基于时间戳的状态预估控制方法, 补偿了传感器到控制器的时延. 文献[8]提出了基于模型的时延补偿方法, 但不适用于长时延的情况. 文献[9~12]中在控制器端设置了观测器和预估控制产生器, 在执行器端设置了网络时延补偿器, 从而使传感器到控制器之间的时延以及控制器到执行器之间的时延得到了有效的补偿. 这种方法虽然有效, 但也有缺点. 文献[9, 10]中的模型隐含了两个前提条件: ①传感器输出的数据都能被控制器端接收; ②传感器到控制器之间的时延以及控制器到执行器之间的时延相互独立, 某时刻整个闭环回路的网络时延是这两部分时延的简单加和. 这两个前提条件在实际的网络控制系统中是不存在的, 所以具

有一定的局限性。

本文基于文献[9]的状态预估方法, 针对实际网络控制系统中存在长时延、数据丢包和时序错乱的情况, 通过在控制器节点前设置缓冲器, 并设计预估控制产生器和时延补偿器, 提出了一种预测补偿控制方案, 有效地克服了长时延、数据丢包和时序错乱问题对实际网络控制系统稳定性所造成的影响。

## 2 问题描述(Description)

假定传感器到控制器之间为反馈通道, 控制器到执行器之间为前向通道. 网络控制系统的结构如图1所示。

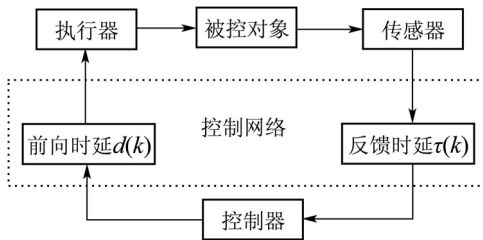


图1 网络控制系统结构图

Fig. 1 The structure of networked control systems

由图1可以看出, 将网络引入控制系统后, 由于多用户共享通信线路, 加之网络带宽有限, 使得在控制器、执行器和传感器之间不可避免的出现了时延, 这些时延通常是未知且时变的. 在网络中由于不可避免地存在网络阻塞和连接中断, 又会导致网络数据包的时序错乱和丢失. NCSs中的网络诱导时延、数据丢包以及时序错乱等问题都会降低系统性能甚至引起系统不稳定. 因此, 本文就设计一种综合的预测补偿控制方案来克服这些问题对系统产生的影响, 以保证网络控制系统的稳定性。

设离散时间线性时不变被控对象的模型为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (1)$$

假设未嵌入网络时系统的状态反馈控制律为

$$u(k) = Kx(k), \quad (2)$$

其中:  $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(k) \in \mathbb{R}^m$  和  $y(k) \in \mathbb{R}^q$  分别表示被控对象的状态、控制输入和被控对象输出,  $A, B, C$  和  $K$  是相应维数矩阵。

为方便讨论, 不妨做以下合理假设:

**假设 1**  $(A, B)$  完全可控,  $(A, C)$  完全可观, 并且未嵌入网络的控制系统本身是稳定的。

**假设 2** 传感器、控制器和执行器均采用时间驱动方式, 且具有相同的采样周期<sup>[1]</sup>. 各节点时钟同步, 这可以通过在网络上定时发送高优先级的时钟同步信号加以实现<sup>[3]</sup>.

**假设 3** 传感器及控制器的输出数据都带有时间戳<sup>[7]</sup>(time-stamp). 数据传输方式为单包传输。

**假设 4** 设传感器到控制器和控制器到执行器的最大时延分别为  $N_1T$  和  $N_2T$ , 连续丢包的最大个数分别为  $M_1$  和  $M_2$ , 则在缓冲机制下反馈通道的最大时延为  $\tau T = (N_1 + M_1)T$ , 前馈通道的最大时延为  $dT = (N_2 + M_2)T$ , 其中  $N_1, N_2, M_1, M_2$  均为非负整数。

## 3 网络控制系统设计(Design of networked control systems)

本文的设计思想是, 预估控制产生器利用被控对象的模型信息和所接收到的采样信号预估生成控制序列, 由时延补偿器按照时延补偿算法从其所接收到的控制序列中选取相应时刻的控制量作用于被控对象。

预测补偿网络控制系统如图2所示. 状态观测器、状态预估器和状态反馈控制器均采用时间驱动方式, 这3部分组成了预估控制产生器. 传感器到控制器之间的时延和数据丢包由状态预估器补偿, 控制器到执行器之间的时延和数据丢包由时延补偿器补偿。

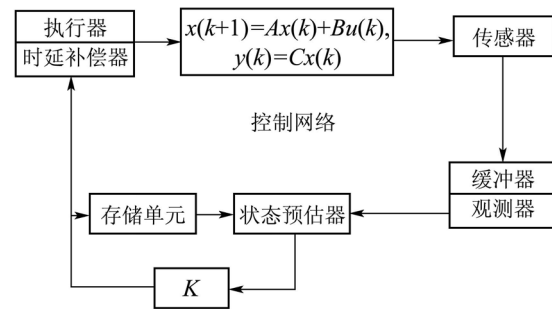


图2 预测补偿网络控制系统

Fig. 2 Networked prective compensation control system

### 3.1 控制器节点缓冲器(Controller node's buffer)

在控制器接收端设置长度为1的缓冲器, 通过比较传感器数据上的时间戳来判断数据的新旧. 某时刻如果缓冲器接收到的数据比原来的新, 则缓冲器里的数据被更新; 如果没有接收到数据或接收到的数据比原来的旧, 则缓冲器里的数据均保持不变. 显然, 缓冲器只存储最新的传感器输出, 并且解决了数据丢包和时序错乱问题。

### 3.2 状态观测器(State observer)

由于实际系统中的状态往往不是完全可以测量的, 故需设计状态观测器. 假设当前时刻为  $k$ , 将时间戳与本地时间比较即得传感器到控制器时延  $\tau(k)T$ . 若  $k$  时刻缓冲器数据更新, 则  $\tau(k) \leq \tau(k-1)$ . 利用系统被控对象的输出和输入信息作为状态观测器的

输入. 控制器接收端得到的系统反馈信息为  $(y(k - \tau(k)), u(k - \tau(k)))$ , 用  $\hat{x}(k - \tau(k) + 1|k - \tau(k))$  表示  $k$  时刻状态观测器基于  $y(k - \tau(k)), u(k - \tau(k))$  得到的观测量, 这个值是由  $k - 1$  时刻的状态观测值  $\hat{x}(k - \tau(k) - 1|k - 1 - \tau(k - 1))$  与  $y(k - \tau(k)), u(k - \tau(k))$  估计得到的.

构造如下状态观测器:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k - \tau(k) + 1|k - \tau(k)) = & \\ & A\hat{x}(k - \tau(k)|k - 1 - \tau(k - 1)) + \\ & Bu(k - \tau(k)) + L(y(k - \tau(k)) - \\ & C\hat{x}(k - \tau(k)|k - 1 - \tau(k - 1))), \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $L \in \mathbb{R}^{n \times q}$  为观测器增益, 并且

$$\begin{aligned} \hat{x}(k - \tau(k)|k - 1 - \tau(k - 1)) = & \\ & A^{\tau(k-1)-\tau(k)}\hat{x}(k - \tau(k - 1)|k - \\ & 1 - \tau(k - 1)) + \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k-1)-\tau(k)} A^{j-1}Bu(k - \tau(k) - j). \end{aligned} \quad (4)$$

若  $k$  时刻缓冲器数据不变, 则  $\tau(k) = \tau(k - 1) + 1$ . 此时状态观测值为

$$\begin{aligned} \hat{x}(k - \tau(k) + 1|k - \tau(k)) = & \\ \hat{x}(k - \tau(k - 1)|k - 1 - \tau(k - 1)). \end{aligned} \quad (5)$$

### 3.3 状态预估器(State predictor)

为了得到更好的控制效果, 应该用当前时刻的系统状态值进行状态反馈, 而由于时延的存在, 当前时刻只能得到  $y(k - \tau(k))$ , 所以就用  $y(k - \tau(k))$  对当前时刻的系统状态值进行预估. 上述状态观测器得到的是  $x(k - \tau(k) + 1)$  的估计值  $\hat{x}(k - \tau(k) + 1|k - \tau(k))$ , 在此基础上, 可以进一步预测出  $k - \tau(k) + 2$  到  $k$  时刻系统的状态值, 即

$$\begin{cases} \hat{x}(k - \tau(k) + 2|k - \tau(k)) = \\ \quad A\hat{x}(k - \tau(k) + \\ \quad 1|k - \tau(k)) + Bu(k - \tau(k) + 1), \\ \hat{x}(k - \tau(k) + 3|k - \tau(k)) = \\ \quad A\hat{x}(k - \tau(k) + 2|k - \tau(k)) + \\ \quad Bu(k - \tau(k) + 2), \\ \quad \vdots \\ \hat{x}(k|k - \tau(k)) = \\ \quad A\hat{x}(k - 1|k - \tau(k)) + Bu(k - 1). \end{cases} \quad (6)$$

由此可得  $k$  时刻的状态估计值为

$$\begin{aligned} \hat{x}(k|k - \tau(k)) = & \\ \hat{x}(k - \tau(k) + 1|k - \tau(k)) + & \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^{j-1}Bu(k - j). \quad (7)$$

此外, 由于控制器到执行器之间存在着时延和数据丢包, 需要时延补偿器进行补偿. 由于控制器不能获得  $y(k + 1), \dots, y(k + d)$  的信息, 只能利用系统已知的模型对系统状态值进行预估, 从而计算出控制量  $u(k + i|k - \tau(k))$ ,  $i = 1, \dots, d$  才能保持控制器和系统对象同步. 因此, 预估器还必须预估出  $k + 1$  到  $k + d$  时刻的状态, 即

$$\begin{cases} \hat{x}(k + 1|k - \tau(k)) = A\hat{x}(k|k - \tau(k)) + Bu_{k|k}, \\ \hat{x}(k + 2|k - \tau(k)) = \\ \quad A\hat{x}(k + 1|k - \tau(k)) + Bu_{k+1|k}, \\ \quad \vdots \\ \hat{x}(k + d|k - \tau(k)) = \\ \quad A\hat{x}(k + d - 1|k - \tau(k)) + Bu_{k+d-1|k}. \end{cases} \quad (8)$$

### 3.4 状态反馈控制器(State feedback controller)

设计状态反馈控制器为

$$u_{k+i|k} = K\hat{x}(k + i|k - \tau(k)), \quad i = 0, 1, \dots, d, \quad (9)$$

其中  $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$  为控制器增益. 从而

$$\begin{aligned} \hat{x}(k + i|k - \tau(k)) = & \\ (A + BK)^i\hat{x}(k|k - \tau(k)), \end{aligned} \quad (10)$$

$$u_{k+i|k} = K(A + BK)^i\hat{x}(k|k - \tau(k)). \quad (11)$$

将  $u_{k+i|k}$ ,  $i = 0, 1, \dots, d$  构造成控制序列  $U_k = \{u_{k|k}, u_{k+1|k}, \dots, u_{k+d|k}\}$ , 与时间戳一起打成一个数据包向执行器端的时延补偿器传输.

### 3.5 时延补偿器(Delay compensator)

在执行器端设置长度为  $d$  的时延补偿器来存储接收到的最新的控制序列, 将时间戳与本地时间相比较获得前向通道时延.

设  $k$  时刻前向通道时延为  $d(k)T$ , 则  $k$  时刻时延补偿器接收到的控制序列是控制器在  $k - d(k)$  时刻生成的  $U_{k-d(k)}$ . 由于  $k - d(k)$  时刻反馈通道的时延为  $\tau(k - d(k))T$ , 所以  $k$  时刻整个回路的时延为  $[d(k) + \tau(k - d(k))]T$ . 基于被控对象输出信号  $y(k - d(k) - \tau(k - d(k)))$  和输入信号  $u(k - d(k) - \tau(k - d(k)))$  的状态预估器输出为  $\hat{x}(k - d(k) + i|k - d(k) - \tau(k - d(k)))$ ,  $i = 0, 1, \dots, d$ . 因此,  $k$  时刻被控对象的控制输入为

$$\begin{aligned} u_k = u_{k|k-d(k)} = & \\ K\hat{x}(k|k - d(k) - \tau(k - d(k))) = & \\ K(A + BK)^{d(k)}\hat{x}(k - d(k)|k - d(k) - \tau(k - d(k))). \end{aligned} \quad (12)$$

设 $k$ 时刻时延补偿器中的控制序列为

$$U_{k-d(k)} = \{u_{k-d(k)|k-d(k)}, u_{k-d(k)+1|k-d(k)}, \dots, u_{k-d(k)+d|k-d(k)}\},$$

则被控对象的控制输入应该为 $u_{k|k-d(k)}$ .  $k+1$ 时刻之前, 如果到达补偿器的控制序列比原来的控制序列新, 则代替原来的控制序列; 如果到达补偿器的控制序列比原来的控制序列旧, 则控制序列保持不变; 如果没有控制序列到达, 则控制序列也保持不变. 若 $k+1$ 时刻补偿器里的控制序列没有变化, 则被控对象的控制输入为 $u_{k+1|k-d(k)}$ .

#### 4 闭环网络控制系统稳定性(Stability of the closed-loop networked control system)

设跟踪误差为

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k|k - \tau(k)). \quad (13)$$

当 $\tau(k+1) \leq \tau(k)$ 时, 由式(3)和式(7)得

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1|k+1 - \tau(k+1)) = & A^{\tau(k+1)}\hat{x}(k+1 - \tau(k+1)|k - \tau(k)) + \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k+1)} A^{j-1}Bu(k+1 - j) + \\ & A^{\tau(k+1)-1}L[y(k+1 - \tau(k+1)) - \\ & C\hat{x}(k+1 - \tau(k+1)|k - \tau(k))]. \end{aligned} \quad (14)$$

由式(4)得

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1 - \tau(k+1)|k - \tau(k)) = & A^{\tau(k)-\tau(k+1)}\hat{x}(k - \tau(k) + 1|k - \tau(k)) + \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-\tau(k+1)} A^{j-1}Bu(k+1 - \tau(k+1) - j). \end{aligned} \quad (15)$$

由式(7)得

$$\begin{aligned} \hat{x}(k - \tau(k) + 1|k - \tau(k)) = & A^{1-\tau(k)}[\hat{x}(k|k - \tau(k)) - \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^{j-1}Bu(k - j)]. \end{aligned} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1 - \tau(k+1)|k - \tau(k)) = & A^{\tau(k)-\tau(k+1)}A^{1-\tau(k)}[\hat{x}(k|k - \tau(k)) - \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^{j-1}Bu(k - j)] + \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-\tau(k+1)} A^{j-1}Bu(k+1 - \tau(k+1) - j). \end{aligned} \quad (17)$$

由 $x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$ 得

$$x(k) = A^{\tau(k+1)-1}x(k+1 - \tau(k+1)) + \sum_{j=1}^{\tau(k+1)-1} A^{j-1}Bu(k - j), \quad (18)$$

则

$$x(k+1 - \tau(k+1)) = A^{1-\tau(k+1)}[x(k) - \sum_{j=1}^{\tau(k+1)-1} A^{j-1}Bu(k - j)], \quad (19)$$

从而

$$y(k+1 - \tau(k+1)) = CA^{1-\tau(k+1)}[x(k) - \sum_{j=1}^{\tau(k+1)-1} A^{j-1}Bu(k - j)]. \quad (20)$$

将式(17)(20)代入式(14)得

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1|k+1 - \tau(k+1)) = & A^{\tau(k+1)}\{A^{\tau(k)-\tau(k+1)}A^{1-\tau(k)}[\hat{x}(k|k - \tau(k)) - \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^{j-1}Bu(k - j)] + \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-\tau(k+1)} A^{j-1}Bu(k+1 - \tau(k+1) - j)\} + \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k+1)} A^{j-1}Bu(k+1 - j) + \\ & A^{\tau(k+1)-1}L\{CA^{1-\tau(k+1)}[x(k) - \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k+1)-1} A^{j-1}Bu(k - j)] - \\ & CA^{\tau(k)-\tau(k+1)}A^{1-\tau(k)}[\hat{x}(k|k - \tau(k)) - \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^{j-1}Bu(k - j)] - \\ & C \sum_{j=1}^{\tau(k)-\tau(k+1)} A^{j-1}Bu(k+1 - \tau(k+1) - j)\} = \\ & A\hat{x}(k|k - \tau(k)) - \sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^jBu(k - j) + \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-\tau(k+1)} A^{\tau(k+1)-1+j}Bu(k+1 - \tau(k+1) - j) + \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k+1)} A^{j-1}Bu(k+1 - j) + LC[x(k) - \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k+1)-1} A^{j-1}Bu(k - j) - \hat{x}(k|k - \tau(k)) + \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^{j-1}Bu(k - j) - \\ & \sum_{j=1}^{\tau(k)-\tau(k+1)} A^{\tau(k+1)-2+j}Bu(k+1 - \tau(k+1) - j)] = \\ & A\hat{x}(k|k - \tau(k)) - \sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^jBu(k - j) + \\ & \sum_{j=\tau(k+1)}^{\tau(k)-1} A^jBu(k - j) + \sum_{j=1}^{\tau(k+1)-1} A^{j-1}Bu(k - j) + \\ & Bu(k) + LC[x(k) - \hat{x}(k|k - \tau(k))] - \end{aligned}$$

$$LC \left[ \sum_{j=1}^{\tau(k+1)-1} A^{j-1} Bu(k-j) - \sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^{j-1} Bu(k-j) + \sum_{j=\tau(k+1)}^{\tau(k)-1} A^{j-1} Bu(k-j) \right] = A\hat{x}(k|k - \tau(k)) + Bu(k) + LC[x(k) - \hat{x}(k|k - \tau(k))], \quad (21)$$

则跟踪误差的方程为

$$\begin{aligned} e(k+1) &= x(k+1) - \hat{x}(k+1|k+1 - \tau(k+1)) = \\ &= Ax(k) + Bu(k) - A\hat{x}(k|k - \tau(k)) - Bu(k) - \\ &= LC[x(k) - \hat{x}(k|k - \tau(k))] = \\ &= (A - LC)[x(k) - \hat{x}(k|k - \tau(k))] = \\ &= (A - LC)e(k). \end{aligned} \quad (22)$$

**定理 1** 对式(1)所描述的系统, 若  $(A, C)$  可观, 则对任意时延  $\tau(k)$ ,  $A - LC$  可以实现极点的任意配置.

**证** 由假设知,  $(A, C)$  可观, 则定理得证.

由此可见, 对任意的时延  $\tau(k)$ , 给定误差系统 (22) 的期望极点, 总可以得到相应的反馈矩阵  $L$ . 所以本文设计的状态观测器可以实现观测器极点的任意配置, 使  $A - LC$  的全部特征值的幅值均小于 1, 观测器将最终实现对给定系统状态的无误差跟踪.

下面推导闭环网络控制系统模型:

当  $\tau(k+1) = \tau(k) + 1$  时, 由式(5)(7)得

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1|k+1 - \tau(k+1)) &= A^{\tau(k+1)-1} \hat{x}(k+1 - \tau(k+1) + 1|k+1 - \\ &= \tau(k+1)) + \sum_{j=1}^{\tau(k+1)-1} A^{j-1} Bu(k+1 - j) = \\ &= A^{\tau(k)} \hat{x}(k - \tau(k) + 1|k - \tau(k)) + \\ &= \sum_{j=1}^{\tau(k)} A^{j-1} Bu(k+1 - j) = \\ &= A^{\tau(k)} A^{1-\tau(k)} [\hat{x}(k|k - \tau(k)) - \\ &= \sum_{j=1}^{\tau(k)-1} A^{j-1} Bu(k-j)] + \\ &= \sum_{j=1}^{\tau(k)} A^{j-1} Bu(k+1 - j) = \\ &= A\hat{x}(k|k - \tau(k)) + Bu(k), \end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned} e(k+1) &= x(k+1) - \\ &= \hat{x}(k+1|k+1 - \tau(k+1)) = Ax(k) + \\ &= Bu(k) - [A\hat{x}(k|k - \tau(k)) + Bu(k)] = Ae(k). \end{aligned} \quad (23)$$

由式(13)得

$$\begin{aligned} e(k-d(k)) &= x(k-d(k)) - \\ &= \hat{x}(k-d(k)|k-d(k) - \tau(k-d(k))), \end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned} \hat{x}(k-d(k)|k-d(k) - \tau(k-d(k))) &= \\ &= x(k-d(k)) - e(k-d(k)). \end{aligned} \quad (24)$$

将式(24)代入式(12)得

$$\begin{aligned} u_k = u_{k|k-d(k)} &= \\ &= K\hat{x}(k|k-d(k) - \tau(k-d(k))) = \\ &= K(A+BK)^{d(k)} \hat{x}(k-d(k)|k-d(k) - \\ &= \tau(k-d(k))) = \\ &= K(A+BK)^{d(k)} [x(k-d(k)) - e(k-d(k))], \end{aligned}$$

从而有

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \\ &= Ax(k) + Bu_k = Ax(k) + \\ &= BK(A+BK)^{d(k)} [x(k-d(k)) - e(k-d(k))]. \end{aligned}$$

当  $\tau(k+1) \leq \tau(k)$  时, 由式(22)得

$$\begin{aligned} e(k) &= (A - LC)^{d(k)} e(k-d(k)) \\ e(k-d(k)) &= (A - LC)^{-d(k)} e(k), \end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \\ &= Ax(k) + BK(A+BK)^{d(k)} [x(k-d(k)) - \\ &= e(k-d(k))] = Ax(k) + \\ &= BK(A+BK)^{d(k)} [(A+BK)^{-d(k)} x(k) - \\ &= (A-LC)^{-d(k)} e(k)] = (A+BK)x(k) - \\ &= BK(A+BK)^{-d(k)} (A-LC)^{d(k)} e(k). \end{aligned} \quad (25)$$

当  $\tau(k+1) = \tau(k) + 1$  时, 由式(23)得

$$\begin{aligned} e(k) &= A^{d(k)} e(k-d(k)), \\ e(k-d(k)) &= A^{-d(k)} e(k), \end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + \\ &= BK(A+BK)^{d(k)} [x(k-d(k)) - e(k-d(k))] = \\ &= Ax(k) + BK(A+BK)^{d(k)} [(A+BK)^{-d(k)} x(k) - \\ &= A^{-d(k)} e(k)] = (A+BK)x(k) - \\ &= BK(A+BK)^{-d(k)} A^{d(k)} e(k). \end{aligned} \quad (26)$$

设增广向量为  $z(k) = [x^T(k) \ e^T(k)]$ , 则整个闭环网络控制系统可表示为

$$z(k+1) = \Omega z(k), \quad (27)$$

其中:

$$\Omega = \begin{bmatrix} A+BK & -BK(A+BK)^{d(k)}(A-LC)^{-d(k)} \\ 0 & A-LC \end{bmatrix},$$

$$\tau(k+1) \leq \tau(k);$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} A+BK & -BK(A+BK)^{d(k)}A^{-d(k)} \\ 0 & A \end{bmatrix},$$

$$\tau(k+1) = \tau(k) + 1.$$

**定理2** 对于式(1)所示的被控对象和预估控制器, 闭环网络控制系统(27)的控制器和状态观测器满足分离原理<sup>[13]</sup>.

**定理3** 对于闭环网络控制系统(27), 若传感器到控制器的时延为 $\tau T$ , 控制器到执行器的时延为 $dT$ , 则其渐近稳定的充要条件是式(27)中矩阵 $\Omega$ 的全部特征根的幅值均小于1.

**证** 当时延固定时, 系统(27)是一个离散时间线性时不变自治系统. 由离散时间线性时不变系统的稳定性判据即可证明上述定理.

**定理4** 若原被控系统(1)可控可观且渐进稳定, 则带预估控制器的闭环网络控制系统是可镇定的<sup>[13]</sup>.

**证** 因为假设原系统(1)可控可观且渐进稳定, 即 $(A, B)$ 可控,  $(A, C)$ 可观且 $A$ 渐进稳定. 因 $(A, B)$ 可控, 所以矩阵 $(A+BK)$ 的极点可以任意配置. 因 $(A, C)$ 可观, 所以矩阵 $(A-LC)$ 的极点可以任意配置. 所以闭环系统是可镇定的<sup>[13]</sup>.

## 5 仿真实例(Simulation examples)

设一控制系统的采样周期为 $T = 0.04\text{s}$ , 离散模型为

$$G(z) = \frac{A(z)}{B(z)} = \frac{0.0541z + 0.115}{z^3 - 1.12z^2 - 0.213z + 0.335}.$$

为方便仿真, 将其转化成状态空间模型, 系统矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1.12 & 0.213 & -0.335 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \quad 0.0541 \quad 0.115].$$

不考虑网络时延和数据丢包时, 按照极点配置的方法设计控制器与观测器, 将控制器的极点配置在 $(-0.3857, 0.7428 + 0.5999i, 0.7428 - 0.5999i)$ , 将观测器的极点配置在 $(0.645, -0.0744, -0.4506)$ , 可以得到控制器与状态观测器的增益分别为

$$K = [-0.02 \quad -0.5517 \quad -0.0166], L = \begin{bmatrix} 5.9341 \\ 6.1467 \\ 5.8041 \end{bmatrix}.$$

用MATLAB/Simulink进行仿真. 假设传感器到控制器的随机时延为 $2T \sim 3T$ , 控制器到执行器之间的随机时延为 $3T \sim 4T$ . 网络时延用能产生随机

时延的时延模块来仿真, 预估控制产生器和时延补偿器分别由网络控制模块和时延补偿模块来仿真. 所有这些模块均用MATLAB的S函数设计. 仿真的结果如图3所示. 图中: 1为不采用补偿方法, 2为本文的补偿策略, 3为不存在网络时延, 4为回路总时延为 $[d(k) + \tau(k)]T$ 的情况.

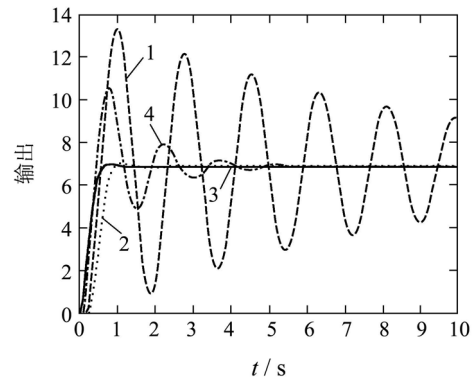


图3 仿真实验结果

Fig. 3 Simulation experimental results

从仿真结果可以看出, 考虑网络时延和数据丢包而不采取补偿措施时, 系统的超调量很大, 调节时间很长. 回路总时延若取文献[9]中的形式, 即 $[d(k) + \tau(k)]T$ , 并采用本文的控制策略进行时延补偿后得到的阶跃响应超调量仍然很大, 调节时间也很长. 回路时延的形式对系统是有影响的. 而采用本文提出的控制方法对存在网络时延与数据丢包补偿后得到的阶跃响应曲线与不考虑网络时延和数据丢包的情况下得到的响应曲线非常相似, 由此可见, 本文提出的控制方案是十分有效的.

## 6 结论(Conclusion)

针对网络控制系统中传感器与控制器、控制器与执行器之间存在长时延(随机的或固定的)、数据丢包以及时序错乱的情况, 本文提出了一种新的预测补偿控制方案, 通过MATLAB仿真实验验证了该控制方案的有效性. 并对时延固定时该闭环网络控制系统的稳定性做了理论分析. 对具有随机时延的闭环网络控制系统稳定性的理论分析还有待做进一步研究.

## 参考文献(References):

- [1] 聂雪媛, 王恒. 网络控制系统补偿器设计及稳定性分析[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 217-222.  
(NIE Xueyuan, WANG Heng. Compensator design and stability analysis for networked control systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 217-222.)
- [2] RAY A, LIU L W, SHEN H J. State estimation randomly delayed measurements[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1993, 115(1): 19-26.

- [3] 于之训, 蒋平, 陈辉堂, 等. 具有传输延迟的网络控制系统中状态观测器的设计[J]. 信息与控制, 2000, 29(2): 125 – 130.  
(YU Zhixun, JIANG Ping, CHEN Huitang, et al. Design of status observer for network control system with transfer delay[J]. *Information and Control*, 2000, 29(2): 125 – 130.)
- [4] CHEN Z P, LIU L, ZHANG J F. Observer based networked control systems with network-induced time delay[C] // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Hague, Netherlands: IEEE, 2004: 3333 – 3337.
- [5] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 基于Markov延迟特性的闭环网络控制系统研究[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 263 – 267.  
(YU Zhixun, CHEN Huitang, WANG Yuejuan. Research on Markov delay characteristic-based closed loop network control system[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(2): 263 – 267.)
- [6] WU J G, ZHU Q X, LU G P, et al. The output feedback control of deterministic networked control systems[C] // *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 1334 – 1337.
- [7] SUN H X, LIANG T, LEI Z M, et al. Time-stamp based state prediction control approach to a class of networked control systems[C] // *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*. New York: IEEE, 2008: 8149 – 8153.
- [8] MONTESTRUQUE, ANTSAKLIS L A P. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1562 – 1572.
- [9] XIA Y Q, LIU G P, REES D. Predictive control of networked systems with random delay and data dropout[C] // *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. New York: IEEE, 2006: 643 – 648.
- [10] XIA Y Q, LIU G P, FU M, et al. Predictive control of networked systems with random delay and data dropout[J]. *IET Control Theory Application*, 2009, 3(11): 1476 – 1486.
- [11] GAO H J, MENG X Y, CHEN T W. Stabilization of networked control systems with a new delay characterization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2142 – 2148.
- [12] 李德伟, 席裕庚. 预估网络控制系统的设计和分析[J]. 控制与决策, 2007, 22(9): 1065 – 1069.  
(LI Dewei, XI Yugeng. Design and analysis of predictive networked control system[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(9): 1065 – 1069.)
- [13] 朱其新. 网络控制系统的建模、分析与控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.  
(ZHU Qixin. *Modeling, analysis and control of networked control systems*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.)

### 作者简介:

王瑞敏 (1983—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为网络控制系统, E-mail: 386968450@qq.com;

费树岷 (1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性控制系统设计与综合、鲁棒控制、自适应控制、时滞系统分析与综合等, E-mail: smfei@seu.edu.cn;

柴琳 (1978—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为时滞系统、自适应控制、控制等, E-mail: chailin\_1@163.com.