

文章编号: 1001-0920(2007)09-1065-05

## 预估网络控制系统的设计和分析

李德伟, 席裕庚

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200240)

**摘要:** 针对网络控制系统中存在的随机掉包和延迟情况, 采用前向和反馈补偿设计网络状态观测器, 并运用状态预估的方法设计网络预估控制系统 (PNCS), 作为网络控制系统中的掉包和延迟的整体解决方案. 同时介绍 PNCS 系统各部分设计的方法, 并给出了闭环系统的稳定性条件. 最后通过一个仿真算例验证了该系统的有效性.

**关键词:** 网络控制系统; 预测控制; 网络状态观测器; 预估网络控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Design and analysis of predictive networked control system

LI De-wei, XI Yu-geng

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: LI De-wei, E-mail: dwli@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** An integral solution, the predictive networked control system (PNCS), is presented to eliminate the effect caused by the random networked-induced delays and data packets dropout, which adopts the system state prediction of model predictive control and the networked system state observer. The design method of all parts in PNCS is introduced, and the stability conditions of closed-loop system are analyzed. Finally, a simulation example shows its effectiveness.

**Key words:** Networked control system; Predictive control; Networked system state observer; Predictive networked control

### 1 引言

网络控制系统 (NCS) 是以网络作为被控对象和控制器之间信号传输媒介的全分布、网络化的实时反馈控制系统<sup>[1]</sup>. 网络使控制系统极大地扩展了其覆盖范围, 在工业上的应用也越来越广泛. 但由于网络传输不可避免地存在延迟、掉包和拥塞, 这会对控制系统的性能产生影响, 甚至造成不稳定.

对于网络控制系统的研究, 主要集中在如何处理延迟、掉包造成的影响. 对于网络掉包, 文献[2]利用已知的系统模型, 引入网络信号更新时间的概念进行处理. 对于延迟, 通常采用补偿器的方法, 使时变系统变成时不变系统进行研究. Montestruque<sup>[2]</sup>等人提出尽量减少对网络的使用, 使得网络对系统的负面影响降至最低, 并以此提出了一种基于被控对象模型的网络时延控制方法. 文献[3]提出在反馈中将控制对象的信息打包传输, 并以此设计观测器

的方法. 文献[4]采用模型预测控制思想<sup>[5]</sup>, 利用模型进行状态预估, 设计控制器以克服可变延迟产生的影响. 于之训<sup>[6]</sup>提出具有 Markov 延迟特性的闭环网络控制系统的设计方法. 以往文献多是针对网络系统中延迟和掉包中的一种情况进行分析, 但实际系统中二者往往同时存在, 所以应该同时考虑这二者的影响.

本文基于文献[4]的状态预估方法, 借鉴文献[2, 3]的思想, 设计预估网络控制系统 (PNCS), 作为一个网络控制系统中的掉包和延迟问题的整体解决方案. 与已有文献中的控制方法相比, PNCS 同时考虑了延迟和掉包产生的影响, 适用范围更为广泛. 文中给出了预估网络控制系统的稳定性条件, 并通过一个仿真算例验证了该系统的有效性.

### 2 问题描述

对于一个网络控制系统 (如图 1), 网络延迟和掉包对系统的影响主要表现在: 反馈延迟使状态观

收稿日期: 2006-05-29; 修回日期: 2006-09-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60474002, 60674041); 国家 863 计划项目 (2006AA04Z173).

作者简介: 李德伟 (1971—), 男, 四川德阳人, 博士生, 从事预测控制理论及方法研究; 席裕庚 (1946—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、复杂系统控制理论等研究.

测器不能得到当前时刻控制对象的信息;前向延迟使控制量在一定延迟后才到达控制对象;而掉包则使系统中的信息在一段时间内丢失. NCS 的设计必须充分考虑这些影响,以保证系统的稳定性.

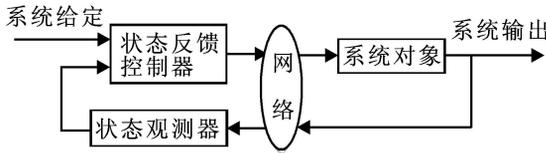


图 1 网络控制系统结构

考虑以下对象:

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

其中:  $A$  为  $n \times n$  矩阵,  $B$  为  $n \times m$  矩阵,  $C$  为  $s \times n$  矩阵.

在讨论预估网络控制系统前,作以下假设:

假设 1 系统对象完全可控、可观,对象模型已知.

假设 2 网络造成的前向通道延迟  $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$ , 反馈通道延迟  $l \in [l_{\min}, l_{\max}]$ ,  $h$  和  $l$  均为正整数.

假设 3 网络造成的前向通道连续掉包的最大长度为  $k_h$ , 反馈通道的连续掉包的最大长度为  $k_f$ .

假设 4 预估控制器、前向补偿器和反馈补偿器均为时间驱动.

### 3 预估网络控制系统 (PNCS)

#### 3.1 无掉包和延迟固定的条件下的反馈控制器

对于对象(1),在系统状态不可测量时,一般通过状态观测器重构系统状态,然后设计状态反馈控制律.但由于网络传输的影响,使控制器的设计和就地设计有所不同.网络控制系统中,在  $t$  时刻控制器可以得到的反馈数据是实际对象在  $t-l$  时刻之前系统对象输出和输入信息,而对象输入是控制器在  $t-l-h$  时刻之前的输出.因此在时刻  $t$ ,必须根据能获得的对象输入和输出信息,预先计算出  $u(t+h)$ ,才能保持控制器和系统对象同步.在  $t$  时刻,控制端可以得到的信息包括:反馈的系统输出和输入信息  $y(t-l), y(t-l-1), \dots$ , 控制器的输出量  $u(t+h-1), u(t+h-2), \dots$ , 以及此前观测器输出  $\hat{x}(t-l)$ . 根据这些信息,控制端可作以下设计:

状态观测器

$$\begin{aligned} \hat{x}(t-l+1) &= \hat{A}\hat{x}(t-l) + \hat{B}u(t-l) + \\ &L(y(t-l) - \hat{C}\hat{x}(t-l)); \end{aligned}$$

状态预估器

$$\hat{x}(t-l+2/t-l+1) =$$

$$\hat{A}\hat{x}(t-l+1/t-l+1) + \hat{B}u(t-l+1),$$

...

$$\hat{x}(t+h/t-l+1) =$$

$$\hat{A}\hat{x}(t+h-1/t-l+1) + \hat{B}u(t+h-1);$$

状态反馈控制律

$$u(t+h) = K\hat{x}(t+h),$$

其中  $K$  为  $m \times n$  矩阵.

上述设计中,状态预估的作用在于:在  $t$  时刻,由于控制器不能获得  $y(t-l+1), \dots, y(t+h-1)$  的信息,只能利用系统已知的模型对系统状态进行估计.

#### 3.2 预估网络控制系统 (PNCS)

在实际系统中,网络延迟是随机的,且存在掉包. 3.1 节中的系统是不能正常工作的. PNCS 对 3.1 节中系统的 3 个部分进行了改进,并加入适当的补偿机制. 它由前向补偿器、反馈补偿器和预估控制器组成(见图 2).

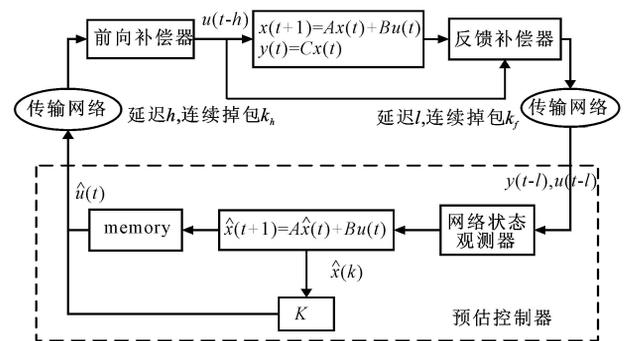


图 2 预估网络控制系统

预估控制器由网络状态观测器、状态预估器和状态反馈控制器组成. 其中反向通道中的掉包和随机延迟主要由网络状态观测器来克服,前向通道中的主要由状态预估器和反馈控制器来克服.

##### 3.2.1 网络状态观测器设计

实际系统当掉包发生时,3.1 节中的状态观测器将得不到系统的反馈信息而不能进行正常计算,预估器只能采用模型来估计系统状态. 这样即便重新获得反馈信息,由于观测器计算的初值不准确,观测器重构的系统状态也是不准确的.

为了克服网络掉包的影响,PNCS 借鉴文献[3]的思想使用反馈补偿器的方式,每次反馈包含一段时间信息的信息包. 假设反馈信息包长度为  $N$ ,且  $N > k_f$ ,则对于状态观测器而言无信息丢失.

利用反馈信息包,设计网络状态观测器

$$\hat{x}(t-l+1) =$$

$$(\hat{A} - LC)^N \hat{x}(t - l - N + 1) + \sum_{i=1}^N (\hat{A} - LC)^{N-i} \times [B u(t - l + N - h - i) + L y(t - l + N - i)].$$

这里  $L$  为  $n \times s$  矩阵,  $\hat{x}(t - l + 1)$  为观测器的输出.

当  $N$  和  $L$  取使  $(\hat{A} - LC)^N$  的范数趋近于 0 时, 则可消除初始状态对观测器的影响, 使网络状态观测器在得到反馈信息后能够迅速趋向系统真实状态. 掉包发生时, 由状态预估器对  $\hat{x}(t - l + 1)$  进行预估.

### 3.2.2 状态预估器设计

PNCS 的状态预估器和 3.1 节中的基本相同, 但由于前向通道掉包和随机延迟的存在, 需在前向通道中加入补偿器. 因此, 预估器必须预估到  $t + h + k_h + 1$  时刻的状态. 在网络状态观测器无输出时, 预估器仍采用上次计算的结果  $\hat{x}(t - l + 1)$  作为初值进行预估. 预估器设计如下:

$$\begin{aligned} \hat{x}(t - l + 2 / t - l + 1) &= \\ A \hat{x}(t - l + 1 / t - l + 1) + B u(t - l + 1), \\ \dots \\ \hat{x}(t + h + k_h + 1 / t - l + 1) &= \\ A \hat{x}(t + h + k_h / t - l + 1) + B u(t + k_h). \end{aligned}$$

与 3.1 节中的设计相比, 3.2.1 节和 3.2.2 节的设计在正常情况下与传统的设计相同; 在掉包和延迟出现时, 可以在网络恢复后快速得到系统真实状态, 保证了 PNCS 的正常工作.

### 3.2.3 状态反馈控制器设计

控制量的产生采用状态反馈方法. 为了克服前向通道的延迟和掉包的变化, 需在每一时刻输出长度为  $h_{\max} + k_h + 1$  的控制序列. 该序列采用滚动方法产生, 即在  $t$  时刻, 控制器输出为  $[\hat{u}(t), \dots, \hat{u}(t + h_{\max} + k_h - 1), K \hat{x}(t + h_{\max} + k_h)]$ ; 在  $t + 1$  时刻, 控制器输出的控制序列为  $[\hat{u}(t + 1), \dots, K \hat{x}(t + h_{\max} + k_h), K \hat{x}(t + h_{\max} + k_h + 1)]$ .

### 3.2.4 前向和反馈补偿器

PNCS 的前向补偿器将当前时刻最新得到的长度为  $h_{\max} + k_h + 1$  的控制序列滚动作用到系统对象.

即在  $t$  时刻, 前向补偿器中将第 1 个控制量  $\hat{u}(t - l)$  作用到对象上, 并将补偿器中的控制序列向前移位. 如果下一时刻前, 补偿器收到控制器传来的新的控制序列, 则将最新收到的控制序列代替原来的控制序列; 否则仍使用原有的控制序列进行控制.

反馈补偿器将系统对象的输出和输入序列 (长度为  $N > k_f$ ) 打包传输, 反馈到预估控制器.

## 4 PNC 系统闭环稳定性分析

PNCS 系统可以写成增广系统进行如下分析:

$$Z(t + 1) := \begin{bmatrix} X(t + 1) \\ \hat{X}(t + 1) \\ U(t + 1) \end{bmatrix} = Z(t),$$

$$= \begin{bmatrix} 11 & 12 & 13 \\ 21 & 22 & 23 \\ 31 & 32 & 33 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} X(t) &= [x(t + h_{\max} + k_h / t - l_{\max} + 1) \dots \\ &\quad x(t - l_{\max} - N) ]^T, \\ \hat{X}(t) &= [\hat{x}(t - l_{\max} + 1), \hat{x}(t - l_{\max} - N + 1) ]^T, \\ U(t) &= [u(t + h_{\max} + k_h / t - l_{\max} + 1) \dots \\ &\quad u(t - l_{\max} - h_{\max} - N) ]^T. \end{aligned}$$

控制序列长度取  $k_h + h_{\max} + 1$ .

设  $h_j$  和  $l_j$  为前向和反馈通道的延迟,  $M = A - LC$ . 因为控制序列涵盖了前向掉包长度, 所以在分析中不需再考虑前向通道的掉包问题.

1) 无反馈通道掉包情况,  $(h_i, l_j)$  表示此时增广系统的系统矩阵.

$$(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 11(h_i, l_j) & 12(h_i, l_j) & 13(h_i, l_j) \\ 21(h_i, l_j) & 22(h_i, l_j) & 23(h_i, l_j) \\ 31(h_i, l_j) & 32(h_i, l_j) & 33(h_i, l_j) \end{bmatrix},$$

$$11(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} A & 0 \\ & \ddots \\ 0 & A \end{bmatrix}$$

$$R^{(h_{\max} + l_{\max} + k_h + N + 1)n} \times (h_{\max} + l_{\max} + k_h + N + 1)n,$$

$$12(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \dots & & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$R^{(h_{\max} + l_{\max} + k_h + N + 1)n} \times n,$$

$$13(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & B & 0 & \overbrace{\dots}^{(h_{\max} - h_i) m} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \ddots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & B & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R^{(h_{\max} + l_{\max} + k_h + N + 1)n} \times (2h_{\max} + l_{\max} + k_h + N + 1)n,$$

$$21(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & LC & \dots & AM^{N-1} LC \\ 0 & \dots & & \underbrace{0}_{Nn} & LC \end{bmatrix}$$

$$R^{2nl(h_{\max}+l_{\max}+k_n+N+1)nl},$$

$$23(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & B & \dots & AM^{N-1}B & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & B & \dots & \underbrace{0 \quad 0}_{(l_{\max}+h_{\max}-l_j-h_i)m} \end{bmatrix},$$

$$31(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \ddots & \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R^{l(2h_{\max}+l_{\max}+k_h+N+1)m] \times l(h_{\max}+l_{\max}+k_h+N+1)nl},$$

$$22(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 0 & AM^N \\ 0 & M \end{bmatrix},$$

$$33(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} KB & \dots & KA^{h_{\max}+k_h+l_j+h_i}B & KA^{h_{\max}+k_h+l_j+h_i+1}B & \dots & \dots \\ I & 0 & \dots & KA^{2h_{\max}+l_{\max}+k_h}B & \dots & \dots \\ 0 & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

$$R^{l(2h_{\max}+l_{\max}+k_h+N)m] \times l(2h_{\max}+l_{\max}+k_h+N)m],$$

$$32(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 0 & KA^{2h_{\max}+l_{\max}+k_h}M^N \\ \dots & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

2) 反馈通道有掉包情况,  $(h_i, l_j)$  表示此时增广系统的系统矩阵.

$$(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 11(h_i, l_j) & 12(h_i, l_j) & 13(h_i, l_j) \\ 21(h_i, l_j) & 22(h_i, l_j) & 23(h_i, l_j) \\ 31(h_i, l_j) & 32(h_i, l_j) & 33(h_i, l_j) \end{bmatrix},$$

$$11(h_i, l_j) = 11(h_i, l_j),$$

$$12(h_i, l_j) = 12(h_i, l_j),$$

$$13(h_i, l_j) = 13(h_i, l_j),$$

$$31(h_i, l_j) = 31(h_i, l_j),$$

$$32(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} (KA)^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$21(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & LC \end{bmatrix}$$

$$R^{2n \times l(h_{\max}+l_{\max}+k_h+N+1)nl},$$

$$22(h_i, l_j) = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix},$$

$$23(h_i, l_j) =$$

**定理 1** 对于对象(1), 满足假设 1 ~ 假设 4, 预估网络控制系统在网络前向和反馈通道有随机掉包和延迟条件下, 当存在正定矩阵  $P$ , 使所有的  $h_i, l_j$ , 都有  $(h_i, l_j)^T P (h_i, l_j) - P < 0$ ,  $(h_i, l_j)^T P (h_i, l_j) - P < 0$  时, 闭环系统渐近稳定.

**证明** 在网络前向和反馈通道有随机掉包和延迟条件下, PNCS 是一个线性开关系统. 由线性开关系统稳定性理论, 可以证明上述定理<sup>[7]</sup>.

定理 1 中的条件就是增广系统稳定性的 Lyapunov 条件, 特别当无延迟和掉包时, 即退化为原闭环系统稳定性条件; 当可变延迟增大时, 由于增广系统的维数增大, 增加了求解的难度, 但可采用商用 BMI 求解工具辅助求解矩阵  $K$  和  $P$ .

### 5 仿真验证

本节给出一个仿真实例来验证预估网络控制系统的有效性.

假设系统对象为

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} 1.05 & 0 \\ 0 & 0.95 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u(t),$$

$$y(t) = [1 \quad 1]x(t).$$

系统初始状态为  $[2, 2]$ , 网络条件为  $h \in [2,$

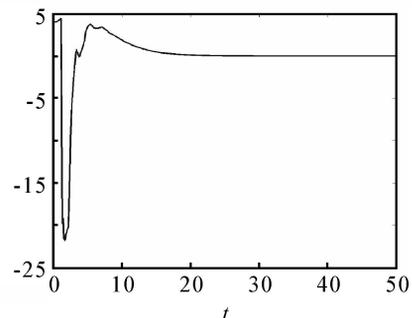


图 3 系统仿真输出

3],  $l \in [2, 3]$ ,  $k_h = k_f = 2$ . 由系统对象的状态方程可知, 该对象是不稳定的.

取  $N = 10$ ,  $L = [8.525 \quad -6.525]^T$ ,  $K = [1 \quad 0.1 \quad 0]$ , 可以验证满足定理 1 条件. 经 Matlab 仿真, 系统输出曲线如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 闭环预估控制系统在网络中存在掉包和延迟变化时是稳定的.

## 6 结 语

本文针对网络控制系统中的可变延迟和掉包情况, 使用网络反馈补偿器和前向补偿器, 将随机变化的掉包过程转化成静态问题; 采用状态预估和网络状态观测器, 保证系统的正常运行. 该系统较好地克服了延迟和掉包对系统的影响, 仿真算例验证了该系统的有效性.

## 参考文献(References)

- [1] 刘磊明, 童朝南, 袁立. 关于网络控制系统中的延迟对系统性能影响的研究[J]. 信息与控制, 2005, 34(3): 263-268.  
(Liu Lei-ming, Tong Chao-nan, Yuan Li. Research on effects of delays on the performance of networked control systems[J]. Information and Control, 2005, 34(10): 263-268.)
- [2] Montestruque L A, Antsaklis P J. On the model-based control of networked systems[J]. Automatica, 2003, 39(10): 1837-1843.
- [3] Zhivoglyadov P V, Middleton R H. Networked control design for linear systems[J]. Automatica, 2003, 39(4): 743-750.
- [4] Liu G P, Xia Yuan-qing, Rees D. Predictive control of networked systems with random delays [C]. IFAC World Congress. 2005.
- [5] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防科技出版社, 1993.  
(Xi Yu-geng. Model predictive control [M]. Beijing: National Defense Publishing House, 1993.)
- [6] 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 Zhi-xun, Chen Hui-tang, Wang Yue-juan. Based on markov delay characteristic-based closed loop networked control system [J]. Control Theory and Applications, 2002, 9(2): 263-267.)
- [7] Decarlo R A, Branicky M S, Pettersson S, et al. Perspectives and results on the stability and stabilizability of hybrid systems[J]. Proc of the IEEE, 2000, 88(7): 1069-1082.
- [4] Chen S H, Lü J H. Synchronization of an uncertain unified chaotic system via adaptive control[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2002, 14: 643-647.
- [5] Wang Y W, Guan Z H, Xiao J W. Impulsive control for synchronization of a class of continuous systems [J]. Chaos, 2004, 14(1): 199-203.
- [6] Li C D, Liao X F, Wong K W. Chaotic lag synchronization of coupled time-delayed systems and its applications in secure communication [J]. Physica D, 2004, 194: 187-202.
- [7] Li C D, Liao X F, Zhang R. An unified approach for impulsive lag synchronization of chaotic systems with time delay[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 23(4): 1177-1184.
- [8] Shahverdiev E M, Sivaprakasam S, Shore K A. Lag synchronization in time-delayed systems [J]. Physics Letters A, 2002, 292(6): 320-324.
- [9] Cheng C J, Liao T L, Hwang C C. Exponential synchronization of a class of chaotic neural networks[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 24(1): 197-206.
- [10] Gopalsmay K, Issic L K C. Convergence under dynamical thresholds with delays [J]. IEEE Neural Networks, 1994, 8(2): 341-8.
- [11] Liao X F, Wang K W, Leung C S. Hopf bifurcation and chaos in a single delayed neuron equation with non-monotonic activation function[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2001, 12(8): 1535-1547.
- [12] Peng J, Liao X F. Synchronization of a coupled time-delay chaotic system and its application to secure communications [J]. Computer Research and Development, 2003, 40(2): 263-268.
- [13] Gopalsamy K. Stability and oscillations in delay differential equations of population dynamics [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992.

(上接第 1060 页)