

## 网络控制系统中的时戳预测函数控制

张奇智, 张卫东

(上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

**摘要:** 传统预测函数控制算法不能有效处理网络控制系统中的随机延迟, 为此提出了时戳预测函数控制算法. 该算法使用时间戳来估计由网络引入的控制延迟, 在预测系统未来输出时明确考虑了该延迟, 然后借鉴传统预测函数控制算法的基本策略, 得到了适用于网络控制系统的控制规律. 进一步由 TrueTime 工具箱搭建了网络控制系统仿真平台, 对比了时戳预测函数控制算法和传统预测函数控制算法. 仿真结果表明随着网络引入延迟的增大, 时戳预测函数控制算法给出控制品质明显优越于传统预测函数控制算法.

**关键词:** 网络控制系统; 随机延迟; 预测函数控制; 工业以太网

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

Time-stamped predictive functional control in  
networked control systems

ZHANG Qi-zhi, ZHANG Wei-dong

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Conventional predictive functional control (CPFC) algorithm cannot deal with random delays in networked control systems (NCS). To solve this problem, the time-stamped predictive functional control (TSPFC) algorithm is proposed. TSPFC uses time-stamp to estimate the network-induced control delays, which are specifically considered for predicting the future plant outputs, and then the control law that applies to NCS is derived based on the basic strategy of CPFC algorithm. Furthermore, a networked control system based on TrueTime toolbox is constructed, on which the proposed TSPFC algorithm is compared with CPFC algorithm. The simulation results show that TSPFC algorithm gives much better control performance than CPFC algorithm when the network-induced delays are increased.

**Key word:** networked control systems; random delays; predictive functional control; industrial Ethernet

## 1 前言 (Introduction)

网络控制系统是指控制回路通过串行通信网络相连接的控制回路, 其主要特点是控制系统中所有组件(传感器、控制器和执行器等)之间的数据交换都是通过串行网络完成的. 在网络控制系统中, 通信带宽一般由多个控制回路分享, 这些控制回路相互竞争通信资源, 如基于工业以太网的网络控制系统, 其结果会在各自的闭环回路中引入随机延迟. 这种网络引入的随机延迟会恶化控制品质, 甚至使控制系统变得不稳定. 因此有必要研究新的控制算法来改善网络控制系统的控制品质.

针对网络控制系统中的随机延迟, 一些学者提出了不同的控制策略. Luck 和 Ray 使用队列把网络控制系统中的随机延迟转变为确定延迟, 因而控

制系统的设计被重新构建为一个标准的数据采样问题<sup>[1,2]</sup>. Göktas 使用鲁棒控制理论在频域内设计控制器, 网络引入的随机延迟被视为干扰处理<sup>[3]</sup>. Nilsson 针对网络控制系统中的随机延迟, 给出了设计最优随机控制器和最优随机状态观测器的方法<sup>[4]</sup>. Srinivasagupta 等基于动态矩阵控制提出了时戳模型预测控制算法<sup>[5]</sup>; 该算法继承了模型预测控制的很多优点, 如较好的鲁棒性, 参数易于调节和容易处理约束等.

预测函数控制是基于模型预测控制思想的另一种应用比较成功的控制算法<sup>[6-8]</sup>, 由于可以采用较大的采样周期, 因而特别适合于通信条件受限制的情况. 但传统的预测函数控制算法不能有效处理网络控制系统中的随机延迟, 因此本文提出了时戳预

测函数控制算法,把标准预测函数控制算法推广到带随机延迟的网络控制系统.

## 2 时戳预测函数控制(Time-stamped predictive functional control)

### 2.1 预测模型(Predictive model)

时戳预测函数控制算法的原理框图如图1所示.考虑一个单输入单输出的定常系统,其连续状态空间描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t), \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{x}(t). \end{cases} \quad (1)$$

如果在传输控制数据时加入时戳,可以估计由网络引入的控制延迟.记 $\tau_k^{\text{sc}}$ , $\tau_k^{\text{c}}$ 和 $\tau_k^{\text{ca}}$ 分别为传感器到控制器延迟,计算延迟和控制器到执行器延迟, $\tau_k^{\text{c}}$ 和 $\tau_k^{\text{sc}}$ , $\tau_k^{\text{ca}}$ 相比通常可以忽略不计.当网络引入的控制延迟大于一个采样周期时( $\tau_k = \tau_k^{\text{sc}} + \tau_k^{\text{ca}} > h$ ),执行器在一个控制周期内可能接收到一个或多个控制变量.这使得控制系统的分析和设计变得很困难,会导致非常复杂的控制算法,并在闭环回路中引入更多的控制延迟.为此一般要通过网络优化把传输延迟限制在一个采样周期内,这样不但有利于简化控制系统的分析和设计,同时也降低了对控制器的性能要求.

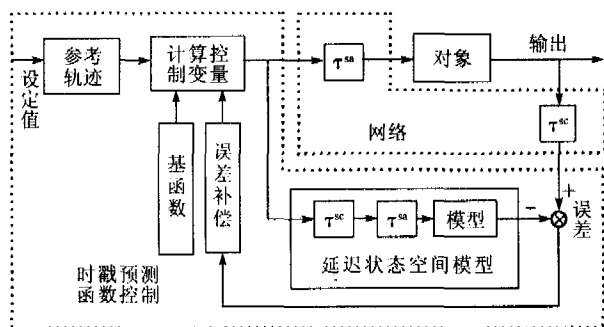


图1 时戳预测函数控制的原理框图

Fig. 1 Principle of time-stamped predictive functional control

时戳预测函数控制算法和传统预测函数控制算法的主要区别是,它使用系统的延迟状态空间模型来预测对象输出.假设控制延迟小于一个采样周期 $h$ ,把连续模型离散化可得<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} \mathbf{x}_d(k) = \mathbf{A}_d\mathbf{x}_d(k-1) + \mathbf{b}_d^0u(k-1) + \mathbf{b}_d^1u(k-2), \\ \mathbf{y}_d(k) = \mathbf{c}_d^T\mathbf{x}_d(k). \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{A}_d = e^{\mathbf{A}h}$ ,  $\mathbf{b}_d^0 = \int_0^{h-\tau_k} e^{\mathbf{A}s} \mathbf{b} ds$ ,

$$\mathbf{b}_d^1 = \int_{h-\tau_k}^h e^{\mathbf{A}s} \mathbf{b} ds, \mathbf{c}_m^T = \mathbf{c}^T.$$

由式(2)可得系统在第 $(k+i)$ 个控制周期的状态

$$\mathbf{x}_d(k+i) = \mathbf{A}_d\mathbf{x}_d(k+i-1) + \mathbf{b}_d^0u(k+i-1) + \mathbf{b}_d^1u(k+i-2), \quad (3)$$

通过递推方法,可以得到

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_d(k+i) = & \mathbf{A}_d^i\mathbf{x}_d(k) + \mathbf{A}_d^{i-1}\mathbf{b}_d^0u(k) + \mathbf{A}_d^{i-1}\mathbf{b}_d^1u(k-1) + \\ & \mathbf{A}_d^{i-2}\mathbf{b}_d^0u(k+1) + \mathbf{A}_d^{i-2}\mathbf{b}_d^1u(k) + \cdots + \\ & \mathbf{A}_d\mathbf{b}_d^0u(k+i-2) + \mathbf{A}_d\mathbf{b}_d^1u(k+i-3) + \\ & \mathbf{b}_d^0u(k+i-1) + \mathbf{b}_d^1u(k+i-2). \end{aligned} \quad (4)$$

系统在第 $(k+i)$ 个控制周期的输出为

$$\begin{aligned} y_d(k+i) = & \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^i\mathbf{x}_d(k) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-1}\mathbf{b}_d^0u(k) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-1}\mathbf{b}_d^1u(k-1) + \\ & \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-2}\mathbf{b}_d^0u(k+1) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-2}\mathbf{b}_d^1u(k) + \cdots + \\ & \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d\mathbf{b}_d^0u(k+i-2) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d\mathbf{b}_d^1u(k+i-3) + \\ & \mathbf{c}_d^T\mathbf{b}_d^0u(k+i-1) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{b}_d^1u(k+i-2). \end{aligned} \quad (5)$$

预测函数控制的基本策略是假定系统未来的控制量由预先设定的基函数组成<sup>[9]</sup>

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n(k) u_{Bn}(i). \quad (6)$$

其中 $1 \leq i \leq P$ ,  $P$ 为预测步长,  $u_{Bn}(i)$ 为基函数在 $t = ih$ 时刻的值,  $\mu_n(k)$ 为基函数的加权系数.把式(6)代入式(5)可得

$$y_d(k+i) = \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^i\mathbf{x}_d(k) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-1}\mathbf{b}_d^1u(k-1) + \mu(k)^T \mathbf{y}_B(i), \quad (7)$$

其中

$$\mu(t) = [\mu_1(k), \mu_2(k), \dots, \mu_N(k)]^T,$$

$$\mathbf{y}_B(i) = [y_{B1}(i), y_{B2}(i), \dots, y_{BN}(i)]^T,$$

而 $y_{Bn}(i)$ 被定义为

$$\begin{aligned} y_{Bn}(i) = & \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-1}\mathbf{b}_d^0 \cdot u_{Bn}(0) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-2}\mathbf{b}_d^1 \cdot u_{Bn}(0) + \\ & \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-2}\mathbf{b}_d^0 \cdot u_{Bn}(1) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-3}\mathbf{b}_d^1 \cdot u_{Bn}(1) + \cdots + \\ & \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d\mathbf{b}_d^0 \cdot u_{Bn}(i-2) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{b}_d^1 \cdot u_{Bn}(i-2) + \\ & \mathbf{c}_d^T\mathbf{b}_d^0 \cdot u_{Bn}(i-1). \end{aligned} \quad (8)$$

假定系统未来的输出误差由一个多项式来逼近

$$e(k+i) = y_p(k) - y_d(k) + \sum_{j=1}^{N_e} e_j(k) i^j, \quad (9)$$

其中 $y_p(k)$ 为过程的实际输出,  $e_j(k)$ 为拟合多项式系数.经过误差校正的未来输出预测值为

$$y_p(k+i) = y_d(k+i) + e(k+i). \quad (10)$$

把式(7)(9)代入式(10)可得

$$\begin{aligned} y_p(k+i) = & \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^i\mathbf{x}_d(k) + \mathbf{c}_d^T\mathbf{A}_d^{i-1}\mathbf{b}_d^1u(k-1) + \\ & \mu(k)^T \mathbf{y}_B(i) + y_p(k) - y_d(k) + \sum_{j=1}^{N_e} e_j(k) i^j. \end{aligned} \quad (11)$$

## 2.2 控制规律 (Control law)

传感器由时间驱动,它在每个控制周期开始时通过 A/D 转换器采样对象输出,加入时戳后通过网络模块送往控制器。控制器的在线计算程序采用事件驱动方式,当接收到由网络送来的传感器数据时被触发,然后根据预先设定的控制算法计算出一个控制量,通过网络模块送往由事件驱动的执行器。执行器在接收到控制信号后,立即对其进行 D/A 转换并作用于受控对象。

### 3.2 仿真结果及讨论(Simulation results and discussion)

仿真中采用一直流电机为受控对象,其连续状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} -4 & -0.03 \\ 0.75 & -10 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} u, \\ y = [0 \quad 1] x. \end{cases} \quad (20)$$

控制系统的设计要求满足以下性能指标:

- 1) 阶跃响应的上升时间小于 0.9s;
- 2) 稳态误差小于 5%;
- 3) 超调量小于 20%。

首先调节仿真平台的网络参数,使网络引入的闭环控制延迟在 0.1s 和 0.2s 间变化。控制系统的采样周期取 0.2s,使控制延迟总是小于一个采样周期。在图 2 的仿真平台上分别实现传统预测函数(CPFC)算法<sup>[9]</sup>、时戳模型预测控制(TSMPC)算法<sup>[5]</sup>和本文提出的时戳预测函数控制(TSPFC)算法。作为对比,把 3 种控制算法作用下,控制系统对方波输入的跟踪曲线都画在图 3 中。

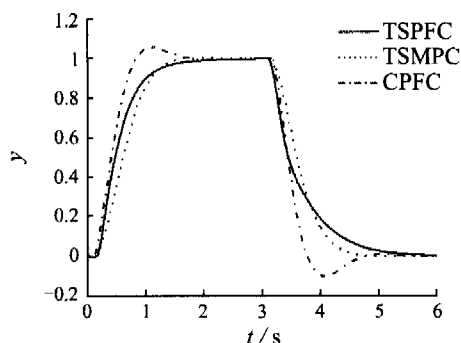


图3 采样周期为 0.2s 时控制品质对比

Fig. 3 Performance comparison when the sample period is 0.2s

从图 3 可以看出,CPFC 算法作用下的跟踪曲线有一个明显的超调量,这是由于 CPFC 算法无法处理由网络引入的随机延迟。而 TSMPC 和 TSPFC 算法在设计过程中由于考虑了网络延迟,并对其进行有效的补偿,其控制品质得到明显改善。此外,TSPFC 算法的控制品质略好于 TSMPC 算法,考虑到控制参数选择的影响,可以认为它们的控制品质相当。

再次调节仿真平台的网络参数,使网络引入的闭环控制延迟在 0.2s 至 0.4s 间变化,相应地控制系统的采样周期取 0.4s,使控制延迟总是小于一个采样周期。同样可以得到系统在 CPFC、TSMPC 和 TSPFC 算法作用下对方波输入的跟踪曲线(图 4)。

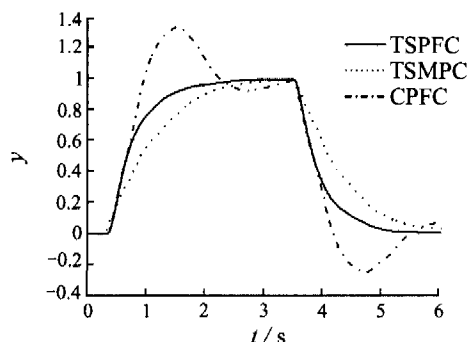


图4 采样周期为 0.4s 时的控制品质对比

Fig. 4 Performance comparison when the sample period is 0.4s

当网络延迟进一步增大后,CPFC 算法作用下的控制品质很快恶化,已经不再满足控制系统的设计要求。而 TSMPC 和 TSPFC 算法作用下的控制品质仍然可以接受。此外,TSPFC 算法的控制效果也明显好于 TSMPC 算法,这是因为 TSPFC 算法继承了预测函数控制算法的优点,可以采用较大的采样周期,在网络引入的随机延迟较大时更显示出其优越性。

### 4 结论(Conclusion)

本文通过引入受控对象的延迟状态空间模型,推导了适用于网络控制系统的时戳预测函数控制算法。同时基于 TrueTime 工具箱搭建了网络控制系统仿真平台,对比了时戳预测函数控制算法和传统预测函数控制算法的控制品质。仿真研究表明传统的预测函数控制算法随着网络引入延迟的增大,其控制品质很快恶化;而时戳预测函数控制算法由于在设计时考虑了网络引入的随机传输延迟,明显减少了网络延迟对控制系统品质的不利影响。

### 参考文献(References):

- [1] LUCK R, RAY A. An observer-based compensator for distributed delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903-908.
- [2] LUCK R, RAY A. Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems [J]. *Int J of Control*, 1994, 59(6): 1357-1372.
- [3] GÖKTAS F. *Distributed control of systems over communication networks* [D]. USA: Department of Computer and Information Science, University of Pennsylvania, 2000.
- [4] NILSSON J. *Real-time control systems with delays* [D]. Sweden:

- Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 1998.
- [5] SRINIVASAGUPTA D, SCHATTLER H, JOSEPH B. Time-stamped model predictive control: An algorithm for control of processes with random delays [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, 28(8): 1337 - 1346.
- [6] RICHALET J, ESTIVAL J L, FIANI P. Industrial applications of predictive functional control to metallurgical industries [C]// *Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications*. New York: IEEE Press, 1995: 934 - 942.
- [7] 潘红华, 苏宏业, 褚健. 具有时滞和干扰的多变量系统预测函数控制方法的研究[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(6): 813 - 818.  
(PAN H, SU H, CHU J. The study of predictive functional control for multivariable systems with time-delay and disturbance [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(6): 813 - 818.)
- [8] 张泉灵, 王树青. 化学反应器温度跟踪预测函数控制的研究及应用[J]. *控制理论与应用*, 2001, 18(4): 559 - 563.  
(ZHANG Quanling, WANG Shuqing. Studies and applications of predictive functional control in temperature tracking of chemical reactors [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(4): 559 - 563.)
- [9] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 207 - 214.  
(XI Yugeng. *Predictive Control* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993: 207 - 214.)
- [10] HENRIKSSON D, CERVIN A, ARZEN K E. TrueTime: Simulation of control loops under shared computer resources [C]// *Proceedings of the 15th IFAC*. Barcelona, Spain: Elsevier Science, 2002.
- [11] HENRIKSSON D, CERVIN A. *TrueTime 1.13 reference manual* [EB/OL]. Lund, Sweden: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, [2003-03-28]. <http://www.control.lth.se/~dan/truetime>.

### 作者简介:

张奇智 (1978—), 男, 2003年毕业于华北电力大学(北京)自动化系, 现为上海交通大学自动化系博士生, 研究方向为工业以太网和网络控制系统, E-mail: zhangqz@sjtu.edu.cn;

张卫东 (1967—), 男, 1996年毕业于浙江大学, 获博士学位, 现为上海交通大学自动系教授, 主要研究领域为鲁棒控制, 现场总线和网络控制系统等, E-mail: wdzhang@sjtu.edu.cn.