

文章编号: 1001-0920(2004)12-1341-04

互联网环境下基于预测控制的闭环控制方法

张伟勇^{1,2}, 黄德先¹, 金以慧¹

(1. 清华大学 自动化系, 北京 100084; 2 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘要: 针对基于互联网的控制系统中, 网络数据传输普遍存在随机时延、数据时序颠倒和数据丢失而难以实现闭环实时控制的问题, 提出一种基于预测控制思想的闭环实时控制方法。该方法通过对采样数据附加时间标志, 选择和利用当前时刻所能得到的最新输出测量值进行在线校正, 并在互联网上实现预测控制策略。在模型准确或模型失配情况下, 控制效果与无网络传输环节时接近。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 基于互联网的控制; 预测控制; 随机时延; 数据丢失; 数据时序颠倒

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Predictive control-based closed-loop control under the internet environment

ZHANG Wei-yong^{1,2}, HUANG De-xian¹, JIN Yi-hui¹

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China. Correspondent: HUANG De-xian, E-mail: huangdx@mail.tsinghua.edu.cn)

Abstract: Closed-loop real-time control over the internet is very difficult because of the commonly existed random time delay, data packet dropout, and data packet out of order during internet transmission. A new strategy based on predictive control is proposed to deal with these problems. By attaching timestamp to the sampled data, choosing the available newest output measurement, and using this output measurement to modify the predicted outputs in predictive control, the strategy is able to effectively overcome the problems mentioned above. In both case of without and with model mismatch, the control performance is comparable to that of with no network transmission. The simulation results show the effectiveness of the scheme.

Key words: internet-based control; predictive control; random time delay; data packet dropout; data packet out of order

1 引言

基于网络的控制系统, 或网络控制系统, 是指通过网络形成反馈控制从而实现闭环控制系统。基于网络的控制系统在自动化制造工厂、电厂、机器人、远程教育等领域获得了越来越多的应用, 已成为当前的一个研究热点^[1-3]。将通信网络引入控制系统

给控制理论与应用带来了新的问题。控制系统各节点之间通过共享的网络传输信息往往会产生随机时变延迟、数据时序颠倒和数据丢失等现象, 这将导致系统丧失其确定性、定常性、因果性和完整性^[4,5], 尤其在互联网环境下更是如此。

为了解决网络控制系统中存在的问题, 已有不

收稿日期: 2004-02-19; 修回日期: 2004-04-21.

基金项目: 国家 973 计划项目子课题(2002CB312200); 国家 863 计划项目(2004AA412050).

作者简介: 张伟勇(1973—), 男, 山东寿光人, 博士生, 从事网络控制系统、预测控制的研究; 黄德先(1958—), 男, 河南潢川人, 教授, 博士, 从事流程工业的建模、先进控制与优化等研究。

少研究成果 Yang 等^[1]提出了如何系统地设计基于互联网的过程控制系统,并给出了该系统可能的结构及优缺点 Luck 和 Ray^[6]针对传输延迟多于一个采样周期的情况,采用设置接收缓冲区的方法,将随机时变的网络时延转变为确定性时延,再用确定性系统的设计方法设计了基于观测器的线性状态反馈控制器 Nilsson^[7]采用随机最优控制的方法,在网络时延小于一个采样周期时,对具有独立随机时延和 Markov 特性时延的网络控制系统进行了研究 Hu 等^[8]在网络时延大于一个采样周期时设计了随机最优控制律,使闭环系统均方指数稳定 Zhivoglyadov 等^[9]设计了两种方式切换的状态反馈控制器:在数据丢失的情况下,采用模型开环预测估计状态;当网络传输正常时,采用状态观测器估计状态

20 世纪 80 年代以来,由于预测控制鲁棒性强,对模型精度要求不高,对具有大时滞等复杂动态响应过程有良好的控制效果,在工业过程中得到了广泛应用^[10,11]。本文在同时考虑网络控制系统中存在的随机时延、数据时序错乱和丢失的情况下,采用预测控制的策略实现基于互联网的闭环实时控制

2 网络控制系统的预测控制器设计

2.1 问题描述

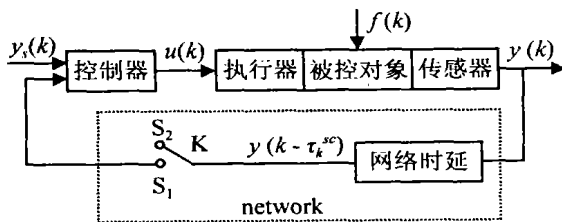


图1 网络控制系统

如图 1 所示网络控制系统,假设网络最大延迟时间有上界 $\tau_{\max} > 1$,且符合已知的随机分布。由于网络时延大于 1,且随机分布,在同一采样周期内可能接收到多个、一个或零个测量值,而且可能导致先发送的数据迟于后产生的数据到达控制器,出现时序颠倒现象。同样,在传输过程中还会出现数据丢失的情况。在图 1 中,用一个虚拟的开关 K 模拟数据丢失。开关 K 位于 S_2 位置模拟数据丢失,而位于 S_1 时则数据正常传输。大的网络时延、时序错乱和数据丢失会使控制器不能及时得到新的测量值或“错误”测量值,严重影响到系统的性能和稳定性。对此,本文提出了基于预测控制思想的闭环网络实时控制方法。

首先作如下假设:

- 1) 传感器节点和控制器节点同步采样;
- 2) 每一采样信号后面附加一时间标志 (time stamp);
- 3) 控制器的处理时间相对于采样周期而言可忽略不计。

控制器采用动态矩阵控制思想。在控制器的接收端,首先对接收的数据进行处理,总是保留最新时刻的 y 值和其时间标志,同时修改动态矩阵控制算法中的反馈修正方法,使得在模型修正时总是采用最新输出来进行修正。具体算法将在下面给出。

2.2 动态矩阵控制 DM C^[11]

DM C 算法的最优控制律为

$$\Delta u_M(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [w_P(k) - \tilde{y}_{P0}(k)] \quad (1)$$

其中

$$w_P(k) = [w(k+1), \dots, w(k+P)]^T$$

为未来 P 个时刻的期望值, P 为预测时域;

$$\tilde{y}_{P0}(k) = [\tilde{y}_0(k+1|k), \dots, \tilde{y}_0(k+P|k)]^T$$

为输出在历史控制作用下的预测值;

$$\Delta u_M(k) = [\Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M-1)]^T$$

为未来 M 个时刻的输入, M 为控制时域;

$$Q = \text{diag}(q_1, \dots, q_p), R = \text{diag}(r_1, \dots, r_m)$$

为加权阵; A 是由阶跃响应系数组成的动态矩阵。

由式(1)计算出的最优控制作用,只有当前步 $\Delta u(k)$ 是实际执行的,在这个增量作用下,对未来输出预报为

$$\tilde{y}_{N1}(k) = \tilde{y}_{N0}(k) + a(k) \Delta u(k) \quad (2)$$

由于模型失配和干扰,在下一时刻,利用实测 $y(k+1)$ 引入误差修正项 $d(k+1)$,即

$$d(k+1) = y(k+1) - \tilde{y}(k+1|k) \quad (3)$$

$$y_c(k+1) = \tilde{y}_{N1}(k+1) + h d(k+1) \quad (4)$$

其中: h 为校正系数向量, $y_c(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻在 $\Delta u(k)$ 作用下经误差校正后预测 $t = (k+i)T$ ($i = 1, \dots, N$) 时刻的系统输出。对 $y_c(k+1)$ 移位,取前 P 个作为 $\tilde{y}_{P0}(k+1)$,优化过程滚动执行。

2.3 反馈修正算法

在预测控制中,反馈修正总是采用最近的测量值,但由于网络时延和数据丢失等情况,在时刻 k ,新的测量值 $y(k)$ 并不一定能及时反馈到控制器。考虑到采样数据总伴随着时间标志,可利用 $k-1$ 时刻及以前时刻控制器接收到的最新测量值的时间标志,与 k 时刻接收到的数据时间标志进行比较。若有更新的数据到达,则控制器接收端数据更新为此数

据,并由时间标志计算此数据的网络时延;否则,说明没有新的数据到达,此时,控制器接收端数据更新为模型预测的当前值,并保持时间标志不变.采用这样的处理方法,实质上是将网络时延、时序错乱和数据丢失等进行了统一处理,以使控制器在部分采样点上接收到时序正确,但有时延的测量值.

设 $k-1$ 时刻及以前时刻控制器接收到的最新测量值时间标志为 k_0 , k 时刻接收到 n_k 个测量值,分别为 $y(k_i)$, 时间标志为 $k_i, i = 1, 2, \dots, n_k$. 令

$$k_0 = \max(k_0, k_1, \dots, k_{n_k}), \quad (5)$$

则反馈修正使用的数据为

$$z(k) = \begin{cases} y(k_0) = y(k - \tau), & k_0 = k_0; \\ \tilde{y}(k), & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\tau = k - k_0$ 为网络时延.

为使反馈修正项的时间相对应,取反馈修正项

$$d(k) = \begin{cases} z(k) - \tilde{y}(k - \tau | k - \tau - 1), & k_0 = k_0; \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

若没有新的测量值到达, $d(k) = 0$, 当前时刻不进行反馈修正.由式(2)~(4)知,输出预测是滚动叠加的,对未来的预测是由以前时刻的反馈修正项的叠加进行修正.

若模型无失配,当无网络传输环节时,根据内模控制原理,系统的反馈断开,系统稳定性由控制器的稳定性和过程稳定性决定;当有网络传输环节时,根据式(7),反馈修正项实测值与预测值的时间相对应,两者相减为零,系统的反馈也断开,此时等价于没有网络传输环节,于是控制器的性能与无网络传输环节相同.

若存在模型失配,只能由控制器在部分采样点上接收到的有时延的测量值进行修正.虽然不是由最新时刻的实测输出信息进行修正,但除了不能及时将干扰所引起的预报误差进行补偿外,仍然可以补偿由模型失配引起的预报误差.干扰补偿的不及时并不会影响预测控制系统的稳定性和鲁棒性,对于线性定常系统而言,该预测控制系统的稳定性和鲁棒性基本与无网络传输环节时一样.这很类似于 Smith 补偿器,由网络传输环节引起的时滞被移出了闭环回路,不影响闭环系统的稳定性.可见,预测控制方法本身就是 Smith 补偿器的改进,这也正是本文应用预测控制思想所要达到的目的.

3 仿真研究

在图 1 结构中,设被控过程

$$G(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)},$$

其中: $K = 1, T_1 = 10, T_2 = 4, \tau = 5$. 控制器周期 $T_s = 1$, 预测时域 $P = 20$, 控制时域 $M = 1$, 其余按缺省值.网络时延在 $[0, 10]$ 区间平均分布,如图 2 所示,在以下仿真中保持不变.数据丢失概率 $p = 0.01$.在 $T = 2$ 时给定值按单位阶跃变化.

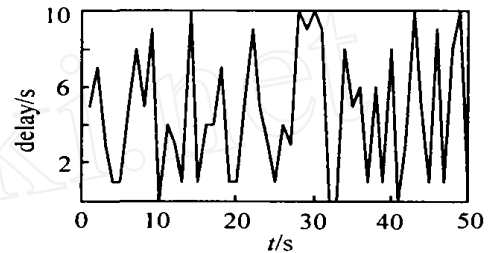
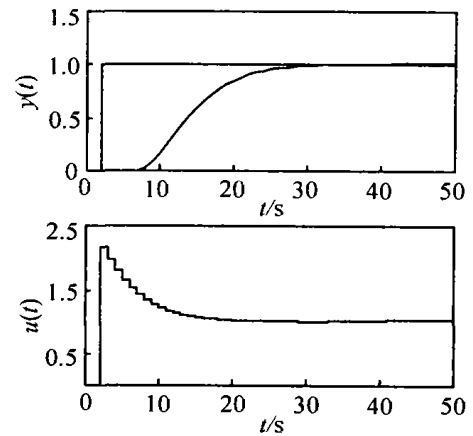


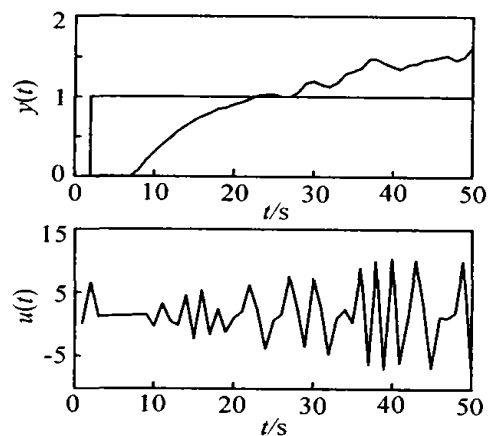
图 2 网络随机时延

3.1 无模型失配,有网络传输环节

在此情况下,将本文方法与 PID 控制进行比较.由图 3(a)可见,无模型失配时,本文方案对给定



(a) 基于预测控制的方案



(b) PID 控制

图 3 无模型失配时的响应

值响应可完全补偿网络时延的影响。采用理想PD控制,按随动系统AE性能指标进行最优整定。考虑到网络随机时延,整定时纯滞后取为 $\tau=10$,得到PD参数 $K_p=0.94$, $T_i=14$, $T_d=5.8$,其控制效果如图3(b)所示。

3.2 模型失配情况

此时,采用本文方法对有网络传输与无网络传输时的控制性能进行比较。

图4为增益失配情况下的响应,过程增益 $K=1.5$,控制模型增益 $K_m=1$ 。两者控制效果比较接近。仿真结果表明,本文提出的控制策略是有效的,能较好地克服网络数据传输带来的问题。

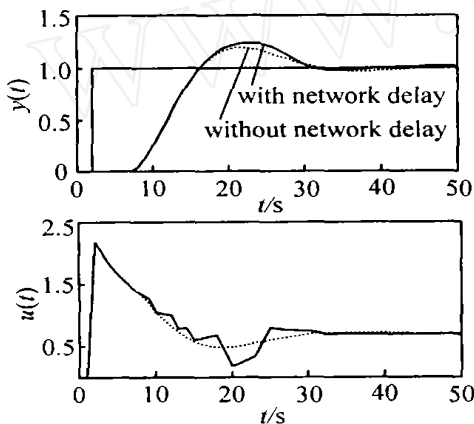


图4 模型失配有网络传输与无网络传输时的性能

4 结论

针对基于互联网的控制系统中网络数据传输存在随机时延、数据时序颠倒和数据丢失的现象,提出了基于预测控制思想的闭环实时控制新方法。该方法的要点是对采样数据附加时间标志,选择并利用控制器当前时刻所能得到的最新输出测量值,修改预测控制中的反馈修正算法。仿真结果表明了该方法的有效性。在模型准确情况下,控制效果等价于没有网络传输环节时的控制效果;在模型失配情况下,合理整定参数,控制效果也接近于没有网络传输环节时的控制效果。

参考文献(References):

[1] Yang S H, Chen X, A lty J. Design issues and imple-

mentation of internet-based process control systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(6): 709-720

[2] 黎善斌,王智,张卫东,等.网络控制系统的研究现状与展望[J].*信息与控制*, 2003, 32(3): 239-244

(Li S B, Wang Z, Zhang W D, et al. Status and prospect of networked control system [J]. *Information and Control*, 2003, 32(3): 239-244)

[3] Tipsuan Y, Chow M Y. Control methodologies in networked control systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(6): 1099-1111

[4] 王飞跃,王成红.基于网络控制的若干基本问题的思考和分析[J].*自动化学报*, 2002, 28(增): 171-176

(Wang F Y, Wang C H. On some basic issues in network-based direct control systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(S): 171-176)

[5] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84-99

[6] Luck R, Ray A. An observer-based compensator for distributed delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903-908

[7] Nilsson J. Real-time control systems with delays [D]. Lund: Lund Institute of Technology, 1998

[8] Hu S S, Zhu Q X. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay [J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1877-1884

[9] Zhivoglyadov P V, Middleton R H. Networked control design for linear systems [J]. *Automatica*, 2003, 39(4): 743-750

[10] 袁璞.生产过程动态数学模型及其应用[M].北京:中国石化出版社,1994. 252-266

[11] 席裕庚.预测控制[M].北京:国防工业出版社,1993

[12] 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 Z X, Chen H T, Wang Y J. Research on Markov delay characteristic-based closed loop network control system [J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(2): 263-267.)