

含有死区输入的 Hammerstein 系统的网络预测控制

王磊, 师五喜, 郭文成, 郭利进

(天津工业大学 电气工程与自动化学院, 天津 300160)

摘要:文中对具有死区输入特性的一类 Hammerstein 系统提出了网络预测控制方法。此方法借鉴广义预测控制的思想, 首先对 Hammerstein 模型的线性部分, 求得中间变量的预测值, 并通过对死区求逆得到控制信号的预测值。在被控对象的缓冲区中选取最靠近当前时刻的控制输入预测值作为当前的控制输入, 以用来补偿网络诱导时延。实验结果表明, 采用了广义预测控制之后, 系统的响应速度明显提高。证明广义预测控制可以很好地补偿前向以及反馈通道的诱导时延。

关键词: Hammerstein 系统; 网络控制系统; 广义预测控制; 网络诱导时延

中图分类号: TP273+.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)03-0246-04

Hammerstein Networked Predictive Control System with Dead-Zone Input

WANG Lei, SHI Wu-xi, GUO Wen-cheng, GUO Li-jin

(College of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: In this paper, a network predictive control method is proposed for a Hammerstein-type system with dead-zone input. Based on the generalized predictive control (GPC), calculating the predictive value of the intermediate variable for the linear part of the system. Then, by calculating the inverse of the dead-zone, the predictive values of the control signals are obtained. In the buffer of the plant, there is a value whose time stamp is closest to current, and it is chosen as the real control input. Finally the experimental platform verified the validity of the proposed scheme. The experiments results show that the generalized predictive control, the system response speed has improved significantly. Proof of generalized predictive control can compensate for a very good forward and feedback channel-induced delay.

Key words: Hammerstein system; network control system; generalized predictive control; network-induced delay

0 引言

随着控制科学、计算机网络及通信技术的日益发展和交叉渗透, 控制系统结构越来越复杂, 空间分布越来越广, 对系统控制性能的要求也愈发提高, 这给自动化技术的发展带来了新的机遇和挑战。随着计算机和互联网技术的发展, 网络控制系统(NCS)打破了传统控制系统在空间物理位置上的限制, 拓宽了控制活动的场所, 降低了系统的连接复杂性及运行成本, 便于实现管控一体化, 提高系统的信息集成度。

但网络在给控制系统带来许多优点的同时, 也使得控制系统的分析与设计面临新的挑战, 这主要表现在: (1) 存在网络诱导时延; (2) 有时会出现数据包丢失现象。

由于网络传输的信息处在动态不确定的时变环境中, 所以网络中的信息流存在非线性动力学特性, 这使得网络控制系统是一时变时滞的不确定复杂系统。由于预测控制^[1]对被控制对象的不确定性、时滞变化等有较强的鲁棒性, 所以近期已被一些学者应用到网络控制中。如文献[2,3]对一类线性系统, 基于模型预测控制(MPC)方法来预测系统未来时刻的控制信号或输出信号, 用来补偿由于诱导时延造成的系统的稳定性和快速性的下降问题。在文献[2,3]的基础上, 文献[4,5]将预测控制方法进一步应用到含有 Hammerstein 模型的非线性系统网络控制系统中。文献[6]基于设计的实验平台, 对易于测量的前馈和反馈时延进行补偿, 并取得了较好的控制效果。文献[7]对前向通道和反馈通道的时延分别进行补偿, 即对控制对象的输入和输出都进行了预测补偿, 这大大改善了控制系统的动态和稳态性能。

在实际工业过程中, 死区、饱和等特性是经常遇到

收稿日期: 2009-07-13; 修回日期: 2009-10-15

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金项目(2006ba54)

作者简介: 王磊(1982-), 男, 硕士, 研究方向为智能控制; 师五喜, 博士, 副教授, 研究方向为预测控制。

的非线性特性。文中对具有死区输入特性的一类 Hammerstein 系统,提出了网络预测控制方法。此方法借鉴广义预测控制的思想,首先通过 Hammerstein 模型的线性部分,求得不可测量中间变量的预测值,并通过对死区求逆得到控制信号的预测值。然后在被控对象的缓冲区中选取最靠近当前时刻的控制输入预测值作为当前的控制输入,用来补偿网络前馈时延。最后通过自己开发的由一台 PC 机和一块基于 ARM7 (S3C4510B)嵌入式控制板的构成的实验平台验证了所提方案的有效性。

1 网络诱导时延简介

由于网络的介入而使得控制系统的信息传输产生的时延,称之为网络诱导时延,是网络控制系统研究中面临的主要问题之一^[8]。如图 1 所示,网络诱导时延主要由以下几部分组成:传感器节点采集数据、处理数据和竞争发送权所花费的时间 τ_s ;传感器数据在网络上传输的时间 τ_{sn} ;控制器节点计算控制量、处理数据和竞争发送权所花费的时间 τ_c ;控制量在网络上传输所花费的时间 τ_{cn} 。数据在网络上传输的时间称为通道时延,即 τ_{sn}, τ_{cn} 而节点竞争发送权所花费的时间称为器件时延,即 τ_s, τ_c 。

在进行系统分析与设计时,可将器件时延和通道时延合并考虑,标记为传感器—控制器—执行器的时延,记为 τ_s, τ_{cn} ,称为网络诱导时延。综上所述网络的诱导时延是时变不确定的。它可能大于一个采样周期,也可能小于一个采样周期。

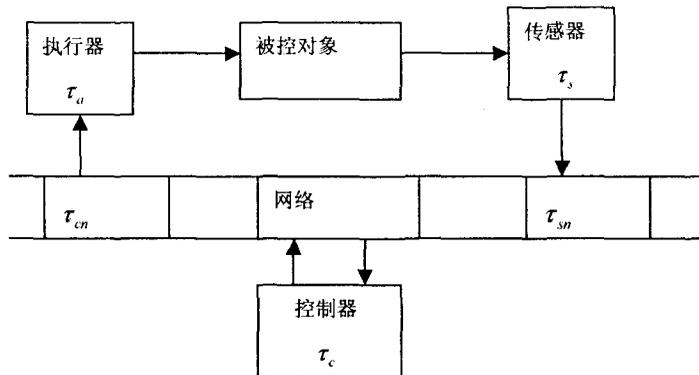


图1 网络控制系统结构图

2 被控对象和控制律推导

文中研究具有死区输入的非线性系

统,其被控对象的线性部分如下:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})v(t) \quad (1)$$

其中 $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$, $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b}$, d 为系统时延, $y(t)$ 是被控对象的输出, $v(t)$ 是不可测的中间变量,和输入 $u(t)$ 之间满足如下的死区函数:

$$v(t) = \begin{cases} ku(t) - m & u(t) > m \\ ku(t) + m & u(t) < -m \\ 0 & -m \leq u(t) \leq m \end{cases} \quad (2)$$

其中 k 为斜率, m 是死区宽度。整个被控对象的结构图如图 2 所示。

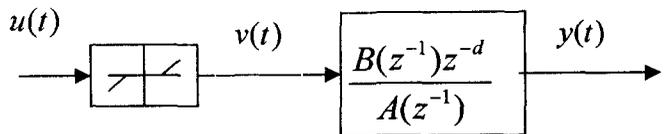


图2 带死区输入的 Hammerstein 模型

文中的目的是对以上的被控对象设计网络化控制方法。为补偿网络传输中的诱导时延,提出基于广义预测控制的网络预测控制方法,其结构图如图 3 所示。

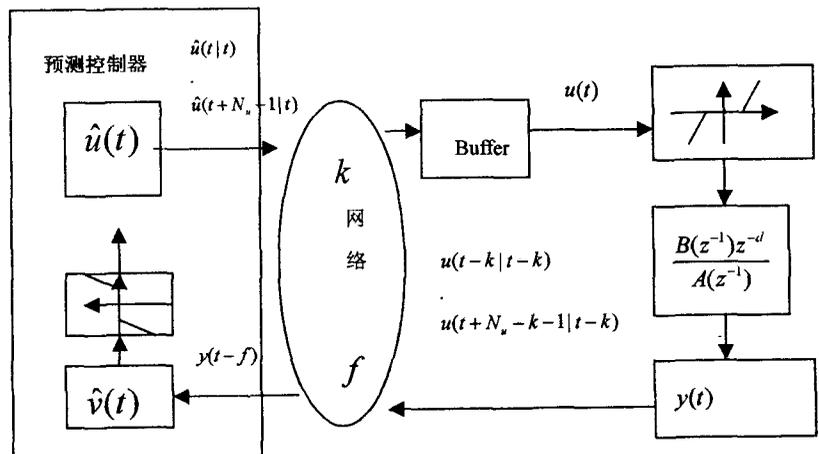


图3 含有死区输入的网络预测控制系统结构图

图中 k 为前向通道的诱导时延, f 为反馈通道的诱导时延。为了对网络诱导时延进行补偿,采用广义预测控制的思路来预测未来的控制信号,然后在缓冲区 (Buffer) 中选择和当前时间最近的预测值作为被控对象的控制输入。

由文献[1]知,广义预测控制性能指标:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [y(t+j) - r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_1} \lambda [\Delta v(t+j-1)]^2 \quad (3)$$

其中 N_1 是最小预测时域, N_2 是最大预测时域, N_u 是控制域, λ 为加权因子。

使用如下的 Diophantine 方程^[1]:

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (4)$$

$$E_j(z^{-1})B(z^{-1}) = G_j(z^{-1}) + z^{-j}H_j(z^{-1}) \quad (5)$$

其中:

$$E_j(z^{-1}) = e_0 + e_1z^{-1} + \dots + e_{j-1}z^{-j+1}, F_j(z^{-1}) = f_0 + f_1z^{-1} + \dots + f_nz^{-n}$$

$$G_j(z^{-1}) = g_0 + g_1z^{-1} + \dots + g_{j-1}z^{-j+1}, H_j(z^{-1}) = h_0 + h_1z^{-1} + \dots + h_{n_j-1}z^{-n_j+1}$$

对于被控对象的线性部分(1),由文献[1]可得中间值 $v(t)$ 的预测值:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}(t|t) \\ \hat{v}(t+1|t) \\ \dots \\ \hat{v}(t+N_u-1|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} v(t-1|t-1) +$$

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \dots \\ H_{N_u} \end{bmatrix} \times (R(t) - G(z^{-1})\Delta v(t-1|t-1) -$$

$$F(z^{-1})y(t-f)) \quad (6)$$

其中 $\hat{v}(t|t), \hat{v}(t+1|t), \dots, \hat{v}(t+N_u-1|t)$ 表示 $v(t)$ 的预测值。

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \dots \\ H_{N_u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \times (G^T G + \rho I_{N_u \times N_u})^{-1} G^T$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N_u-1} & \dots & \dots & g_0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N_u-d} & g_{N_u-d-1} & \dots & g_{N_u-d-N_u+1} \end{bmatrix}$$

$$R(t) = [r(t+d) \ r(t+d+1) \ \dots \ r(t+N_2)]^T, \\ G(z^{-1}) = [(G_{d+f}(z^{-1}) - \overline{G}_{d+f}(z^{-1}))z, \dots, \\ (G_{N_2+f}(z^{-1}) - \overline{G}_{N_2+f}(z^{-1}))z^{N_2-d+1}]^T, F(z^{-1}) = [F_{d+f}(z^{-1}) \ F_{d+f+1}(z^{-1}) \ \dots \ F_{N_2+f}(z^{-1})]^T$$

由式(2)得:

$$f^{-1}(v(t)) = \begin{cases} (v(t) + m)/k & v(t) > 0 \\ (v(t) - m)/k & v(t) \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

由此可得文中所设

计的控制律:

$$\hat{u}(t+j|t) = \begin{cases} (\hat{v}(t+j|t) + m)/k, & \hat{v}(t+j|t) > 0 \\ (\hat{v}(t+j|t) - m)/k, & \hat{v}(t+j|t) \leq 0 \end{cases}$$

$$j = 0, 1, \dots, N_u - 1 \quad (8)$$

文中假设不存在数据包丢失现象,通过前向通道把 $\hat{u}(t+j|t)$ 发送到控制对象的缓冲区,由于前向通道诱导时延为 k ,则缓冲区中的控制序列为: $u(t-k|t-k), \dots, u(t+N_u-k-1|t-k)$ 。本方案选取最靠近当前时刻的控制输入作为被控对象的实际输入。对反馈通道,由于延时为 f ,所以预测控制器端表示为 $y(t-f)$ 。

文中方法的具体实现步骤如下:

(1) 由式(6)计算中间变量的预测值 $\hat{v}(t|t), \hat{v}(t+1|t), \dots, \hat{v}(t+N_u-1|t)$ 。

(2) 利用(7)式求出系统的控制输入的预测值 $\hat{u}(t|t), \hat{u}(t+1|t), \dots, \hat{u}(t+N_u-1|t)$ 。

(3) 通过前向通道把控制输入的预测值发送到被控对象的输入缓冲区,期间的时延为 k ,所以输入为 $u(t-k|t-k), \dots, u(t+N_u-k-1|t-k)$ 。

(4) 在缓冲区中,选取最靠近当前时刻的预测值作为系统的实际输入,获得系统输出 $y(t)$ 。

(5) $y(t)$ 通过反馈通道发送到预测控制器。因为反馈通道延时为 f ,所以在预测控制器中记为 $y(t-f)$ 。

3 实验及结果分析

文中设计的实验平台如图 4 所示,该平台由一台 PC 机(客户端)和一块基于 S3C4510B 的嵌入式网络控制实验板(服务端)构成。其中 PC 机中基于 VC++6.0 完成预测控制器的设计,客户端和服务端之间通过以太网连接,利用 VC 中的 SOCKET 套接字,采用 UDP 协议通讯。

本实验的被控对象线性部分选取

$$(1 - 0.7z^{-1})y(t) = z^{-1}(0.9 - 0.6z^{-1})v(t)$$

实验目的是使系统的输出跟踪参考轨迹 $r(t) = 40$ 。

实验中选取参数 $N_u = 3, N_1 = 1, N_2 = 3, \lambda = 0.1$ 。

类似文献[4,5],先假设反馈通道的诱导时延和前向通道的诱导时延为固定的值,分别为 $f = 2, k = 1$ 。对于随机的时延情况,今后的研究中将再讨论。

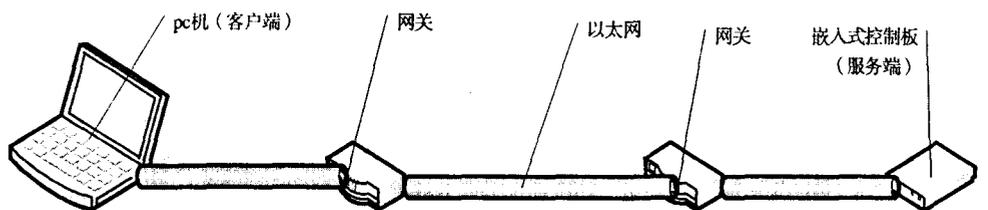


图 4 网络控制系统实验平台

非线性部分中,选择 $k = 1, m = 10$ 。

图 5 为未加延时补偿时系统的阶跃响应曲线,图 6 为含有延时补偿时系统的阶跃响应曲线。可以看出,由于网络诱导时延的存在,系统的超调量增大,调节时间较长。但采用了预测补偿之后,诱导时延对系统的影响明显减小,系统的动态和稳态性能得到了明显改善。

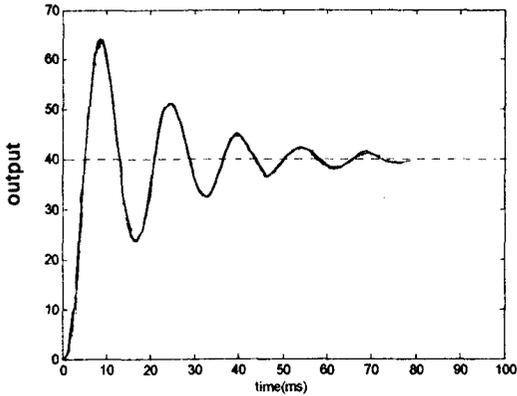


图 5 未加预测补偿时的阶跃响应

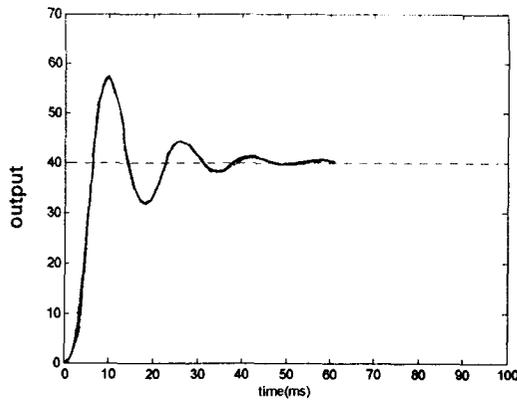


图 6 使用预测补偿后的阶跃响应

4 结束语

文中采用了广义预测控制的思想对具有死区输入的 Hammerstein 非线性系统设计了网络预测控制方

法。该方法首先设计线性部分的预测控制器,然后对非线性部分求逆来求取预测的控制输入,选取最靠近当前时刻的预测值作为系统的实际输入,以对诱导时延进行补偿。初步的实验结果验证了所提方法的有效性。文中假设了数据包不存在丢失现象,对数据包存在丢失的情况,在今后的研究中将予以考虑。

参考文献:

- [1] 王伟. 广义预测控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] Liu G P, Chai S C, Mu J X, et al. Networked predictive of systems with random delay in signal transmission channels[J]. International Journal of Systems Science 2008, 39(11): 1055 - 1064.
- [3] Liu G P, Mu J X, Rees D, et al. Design and stability analysis of networked control systems with random communication time delay using the modified MPC[J]. International Journal of Control, 2006, 79(4): 288 - 297.
- [4] Zhao Yun - Bo, Liu Guo - Ping, Rees D. Networked Predictive Control Systems Based on the Hammerstein Model[J]. IEEE, Transactions on Circuits and Systems - IE Express, 2008, 55(5): 469 - 473.
- [5] Zhao Yun - Bo, Liu Guo - Ping, Rees D. A Predictive Control - Based Approach to Networked Hammerstein Systems: Design and Stability Analysis[J]. IEEE Transactions on System, man, and Cybernetics - PARTB: Cybernetics, 2008, 38(3): 700 - 708.
- [6] 赵辉, 邓燕, 王红军. 基于预测控制的网络时延补偿策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(9): 1923 - 1928.
- [7] Chai Shenchun, Liu Guo - ping, Rees D, et al. Design and Practical Implementation of Internet - Based Predictive Control of a ServoSystem[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(1): 158 - 168.
- [8] 樊卫华. 网络控制系统的建模与控制[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.

(上接第 245 页)

- ground Value Calculation(I)[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2000, 20(4): 98 - 103.
- [8] Tan Guanjun. Construction and Application of GM(1,1) Background Value Calculation(II)[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2000, 20(5): 125 - 127.
- [9] Zhang Yi, Wei Yong, Xiong Changwei. One New Optimized Method of GM(1,1) Model[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2007, 27(4): 141 - 146.
- [10] Shi Yufeng, Ning Jinsheng. Improved Grey Model by Exponential Smoothing and Its Applications in Deformation Data Analysis[J]. Journal of China coal, 2005, 30(2): 206 - 209.

- [11] Qu Debin, Liu Qingnian, Sun Dongfang. Predicting Oil Production in China By the Grey System Model[J]. Journal of DAQIN Petroleum Institute, 1989, 13(2): 7 - 11.
- [12] Shi Weiren, Wang Yanxia, Tang Yunjian, et al. Water quality parameter forecast based on grey neural network modeling [J]. Journal of Computer Application, 2009, 29(6): 1529 - 1531.
- [13] Liu Qiang, Wang Xinwei, Chen Renwen, et al. Decoupled Control Algorithm for MIMO System Based on Grey Prediction[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(2): 222 - 226.