

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105954

基于滑模预测的网络控制系统*

王科举 张旭秀 柏丽娜

(大连交通大学 电气信息工程学院 大连 116028)

摘要: 针对网络控制系统存在时延和丢包导致系统性能下降的问题,提出一种新的时延和丢包补偿方法。首先建立具有时延的网络控制系统空间模型,通过线性转换,将有时延的网络控制系统转化为无时延系统,并采用自回归算法对时延进行在线预测,然后给出一种改进趋近律的滑模控制器对时延进行补偿,采用具有逻辑判断功能的零阶保持器改善丢包问题。该方法在预测时延方面具有较好的实时性,在处理丢包问题方面有较好的系统稳定性和鲁棒性。通过 Truetime 平台仿真结果表明,该方法对网络时延和丢包有较好的补偿作用。

关键词: 滑模控制;网络控制系统;趋近律;自回归算法;零阶保持器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Network control system based on sliding mode prediction

Wang Keju Zhang Xuxiu Bai Li'na

(School of Electrical Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at the problem of system performance degradation caused by delay and packet loss in the network control system, a new delay and packet loss compensation method is proposed. First, establish a time-delayed network control system space model, transform the time-delay network control system into a non-delay system through linear conversion, and use autoregressive algorithm to predict the time delay online, and then give an improved reaching law the sliding mode controller compensates for the delay, and uses a zero-order holder with logic judgment function to deal with the packet loss problem. This method has better real-time performance in predicting time delay, and better system stability and robustness in dealing with packet loss problems. The simulation results on the Truetime platform show that this method has a better compensation effect on network delay and packet loss.

Keywords: sliding mode control; network control system; reaching law; autoregressive algorithm; zero-order holder

0 引言

网络控制系统(network control system, NCS)是融合网络通信技术、计算机信息技术和自动控制技术后出现的一种新型控制系统,具有实时性好、易于扩展和维护、可靠性高等优点,在远程遥控操作、现场总线和网络机器人等领域具有较好的应用前景^[1]。对网络控制系统相关问题的研究,是目前控制理论领域的一个热点,具有重要的现实意义。由于网络的介入会引起数据包丢失、网络时延等问题,而传统控制系统的研究方法不能直接应用于网络控制系统,所以就需要考虑现有的控制方法怎样才能应用于网络控制系统中,以满足系统控制性能需求^[2]。在控制系统设计过程中,需要对上述问题进行充分的考虑,以避免造成控

制器失稳情况的出现。文献[3]针对网络时延和数据丢包的问题,通过设置缓冲区来处理数据包丢失,并从理论上分析固定延迟问题;文献[4]分析了具有时延和确定性丢包的网络控制系统,并对系统的稳定性进行了分析。上述文献仅是对网络时延和丢包进行了一些理想化处理,但系统的鲁棒性能还有待提高。

滑模变结构控制(sliding mode control, SMC)对系统模型结构不确定性以及外部干扰具有鲁棒性^[5],这使 SMC 成为 NCS 设计的理想选择。文献[6]设计了一种在不完善量化机制下的随机系统积分 SMC,补偿了数据包丢失。文献[7]提出了将预测滑模变结构控制(prediction sliding mode control, PSMC)用于时延系统,针对具有状态延迟的线性系统,提出了一种具有滑动功能的增强型预测离散时

收稿日期:2021-03-14

* 基金项目:国家留学基金委资助计划(201608210308)、国家支撑计划(2015BAF20B02)、国家自然科学基金(61471080/F010408)、辽宁省自然科学基金(2019-zd-0108)项目资助

间滑模控制,说明PSMC对于具有时滞的系统有较好的效果。上述文献虽有优点,但在某些实际应用中,特别是对于离散时间系统,在实施SMC方法时会产生系统抖振,另外数据丢包和错序会加剧抖振问题。

针对上述问题,本文构建了网络控制系统的状态空间模型,并将其转化为无时延的形式,通过自回归模型实现在线时延预测,保持了网络控制系统的实时性,给出一种逻辑判断功能零阶保持器(zero-order holder,ZOH)的执行器策略和一种改进的广义预测滑模控制器,从而对网络时延和数据丢包进行补偿,通过理论分析和仿真验证,本文给出的方法可以有效地处理网络控制系统的时延和丢包问题,提高了系统的稳定性,改善了系统的控制性能。

1 网络控制系统结构及数学模型

1.1 网络控制系统的结构

网络控制系统主要是传感器、控制器、执行器以及被控对象构成^[8]。传感器和执行器处于被控对象的输出端和输入端,通过特定的数字通信网络分别与控制器的输入端和输出端连接,传感器与控制器之间的网络称为反馈通道,控制器与执行器之间的网络称为前向通道^[9],如图1所示。

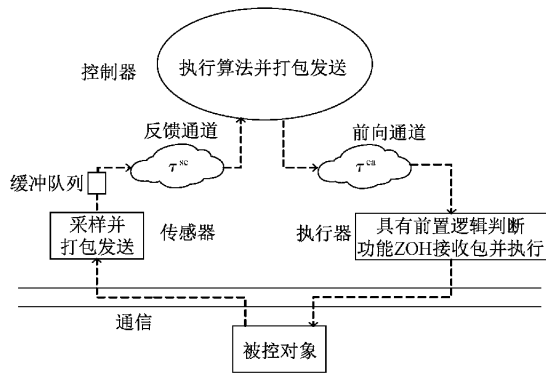


图1 网络控制系统结构

本文采用时间驱动来设计传感器,它周期性地从被控对象采取输出信息 $y(k)$,然后将其同执行器上个周期的历史数据 τ_{ca} ,和时间戳(时间标记) T_s ,三者一起打包(称为反馈包),经反馈通道发送给控制器。控制器采用事件驱动的方式,它接收反馈数据,执行控制算法,得出控制信息 $u(k)$,将 $u(k)$ 与上述反馈包中的时间戳 T_s 以及传感器上一个工作周期的时延 τ_{sc} 一起打包(称为控制包),经前向通道发送给执行器^[10]。执行器采用事件驱动,具有逻辑判断功能,首先运行最先到达控制包中的数据(放弃丢包数据或者因错序而迟到的数据)同时计算该包的时延^[10] τ_{ca} 并用控制包中的 T_s 加以标记,生成历史数据 τ_{ca} 的基本单元 (τ_{ca}, T_s) 。每隔一个采样周期 T ,传感器对被控对象进行一次数据采集,作为反馈数据送给控制器,控制器根据反馈数据执行算法,生成控制数据,送给执行器加以执行^[11]。控制器生成控制数据和传感器采样在同一个周期内,因此,传感器、控制器和

执行器三者采用时间同步启动。反馈信号和控制信号都是分段连续函数,每一个时间段的长度等于一个采样周期 T 。

1.2 网络控制系统的数学模型

根据1.1节所述,首先回顾一下通常的采样控制系统(非网络控制系统)的数学模型。这种控制系统的状态空间模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t+1) = \mathbf{a}x(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) = \mathbf{C}x(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x(t) \in \mathbf{R}^n$ 是对象的状态向量, $u(t) \in \mathbf{R}^m$ 是对象的控制输入^[12], $y(t)$ 是对象的输出采样值。 $\mathbf{a}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 为具有适当维数的常数矩阵,自变量 $t = 1, 2, \dots$ 是一些正整数。

网络控制系统与上述不同,正如1.1节所述,由于存在无规律的时延、丢包、错序等现象^[13],NCS的状态空间可以如下表示:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{a}x(t - \tau_{sc}) + \mathbf{B}u(t - \tau_{ca}) \\ y(t) = \mathbf{C}x(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: τ_{sc} 是传感器到控制器之间的时延, τ_{ca} 是控制器到执行器之间的时延。

可以利用线性变换,将原时延系统转换为无时延系统^[14]。定义线性变换:

$$z(t) = x(t) + \int_{t-\tau_{sc}}^t e^{\mathbf{A}(t-\tau_{sc}-s)} \mathbf{a}x(s) ds + \int_{t-\tau_{ca}}^t e^{\mathbf{A}(t-\tau_{ca}-\theta)} \mathbf{a}x(\theta) d\theta \quad (3)$$

对上式两边求导,代入原系统离散化后可得:

$$z(k+1) = \mathbf{A}z(k) + bu(k) \quad (4)$$

式(2)的表达式体现了传感器和执行器的工作特点,可以结合图2加以说明。

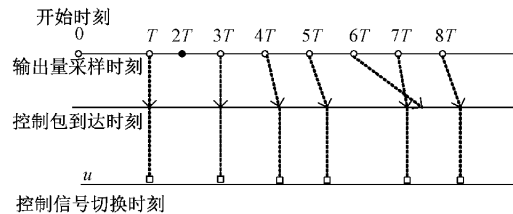


图2 NCS的数据传输情况举例

具体有如下几种情况^[13]:

- 1) 假设网络没有时延及丢包,譬如,在 T 时刻采样 $y(t)$,则执行器取控制量 $u(t) = u(T)$,直到控制包 $u(2T)$ 到达。
- 2) 假设网络没有时延但存在丢包,譬如,控制包 $u(2T)$ 丢包,则执行器取控制量 $u(t) = u(T), t \in [T, 3T)$ 。
- 3) 假设网络存在时延,譬如,在 $4T$ 时刻采样 $y(t)$,则执行器取 $u(t) = u(4h), t \in [4h, 5h)$,其中, $4h$ 表示时刻 $4T$ 经时延 τ_{4T} 后的时刻,即 $4h = 4T + \tau_{4T}$,同样, $5h = 5T + \tau_{5T}$ 。
- 4) 若网络时延偶尔大于一个采样周期,则会出现错序

包,譬如, $6T$ 与 $7T$ 时刻对应的控制包错序,则取 $u(t) = u(7h), t \in [7h, 8h)$, 而放弃 $6T$ 时刻对应的错序控制包。

由上面分析可见,由于传感器送出的数据包带有采样时刻标签,加上采用具有前置逻辑判断功能的 ZOH, 执行器所执行的控制信号在切换之后保持不变,直到下一个控制包到达,这就确保了对象的控制量总是取用最新到达的控制信息,从而摆脱丢包、错序等影响。

2 基于自回归模型的在线时延预测

自回归 (autoregressive, AR) 模型预测算法具有较好的预测实时性,因而可用于在线时延预测。 D 阶 AR 模型可以如下定义:

$$y_k = \sum_{i=1}^D e_i \tau_{k-i} \quad (5)$$

式中: D 是自适应模型的阶数; e_i 为模型的加权系数; τ_{k-i} 是存储在控制器缓冲区的时延历史值^[16]。

构造 AR 模型分为两步,模型定阶和参数计算。

第 1 步:模型定阶。模型阶数 D 的选择非常重要。阶数低不能满足系统性能的要求,阶数高又会增加计算量。通常评判标准采用 AIC 信息准则 (akaike information criterion), 根据系统的实时性需求,在满足条件的情况下设计较小的模型阶数。根据 AIC 信息准则,设计阶数 D 使得下面性能指标最小^[17]。

$$AIC(D) = \ln \beta^2 + 2D/N \quad (6)$$

式中: β^2 是线性预测误差的估计方差。

第 2 步:模型参数计算。历史时延值 τ_{k-i} 需要在线更新,因此加权系数的值也需要根据新的时延值不断的更新。在确保预测精度的前提下,还需要考虑实时性,因此要采用合适的算法,本文先采用协方差法离线求出 e_i 的初始值,然后根据最小均方误差算法 (LMS) 确定 e_i 的误差均方最小,再用梯度法求取加权系数 e_i 的值,代入式 (5) 在线更新时延值。

3 新型滑模控制器的设计

在网络系统模型中讨论了时延和丢包对系统的影响,以及如何排除这种影响,以确保系统响应的实时性,但是没有考虑外部干扰和系统参数不确定性^[18]带来的问题,而这两方面问题在实际系统中是不可避免的。因此,如何确保系统具有一定的鲁棒稳定性是系统设计必须考虑的问题。本文设计滑模控制器可以确保闭环系统具有期望的性能,如消抖,快速收敛,优化控制输入确保系统的稳定性和鲁棒性。

3.1 新型趋近律的设计

在滑模控制 (变结构控制) 问题中,根据趋近律设计系统的控制律,趋近律所表示的到达条件具有诸多优点 (参看式 (7)): 通过调节趋近律等式中的参数 δ 和 q , 可以使趋近模态获得良好的品质。

常见的滑模离散型趋近律为:

$$s(k+1) = (1-qT)s(k) - \delta T \operatorname{sgn}(s(k)) \quad (7)$$

式中: $\delta > 0, q > 0, qT < 1, T$ 是采样周期; $\operatorname{sgn}()$ 是符号函数; q 是趋近速度参数。

由趋近律来设计相应的控制律,该法的不足之处就是所设计的控制律,只能使系统状态收敛到原点的邻域内,而不是收敛到原点。为此给出改进的趋近律如下:

$$s(k+1) = (1-qT)s(k)\Phi(s(k)) - \delta T\Psi(s(k))\operatorname{sgn}(s(k)) \quad (8)$$

$$\Phi(s(k)) = \begin{cases} 1, & |s(k)| > \epsilon \\ 0, & |s(k)| \leq \epsilon \end{cases}$$

$$\Psi(s(k)) = \begin{cases} 1, & |s(k)| > \epsilon \\ \frac{|s(k)|^2}{\epsilon}, & |s(k)| \leq \epsilon \end{cases}$$

其中, $0 < \delta T < 1, 0 < 1 - qT < 1, T > 0, \epsilon = \frac{\delta T}{1 - qT}$,

设计这两个系数为了确保滑模轨迹进入滑模带,并最终保持在其内。

3.2 滑模控制器的设计

根据改进的趋近律设计滑模控制器^[19], 定义切换函数:

$$s(k) = \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{x}(k) \quad (9)$$

其中, $\mathbf{x}(k)$ 为被控系统的状态向量, $\boldsymbol{\eta}^T = [\eta_1, \dots, \eta_n]$, $\boldsymbol{\eta}_i (i = 1, \dots, n)$ 可以用极点配置方法^[20]确定,这样既可以确保系统的稳定性,又能根据需要调节系统的动态性能。

滑模面 (又称为滑模轨迹)^[21]:

$$\mathcal{S} = \{\mathbf{x}(k) \mid s(\mathbf{x}(k)) = 0\} \quad (10)$$

构造预测滑模模型如下:

$$s_m(k) = \boldsymbol{\eta}^T (I - z^{-1}A)^{-1} b \Delta u(k-1) \quad (11)$$

因此,在 k 时刻预测的第 j 步输出为:

$$s_m(k+j) = \boldsymbol{\eta}^T (I - z^{-1}A)^{-1} b \Delta u(k+j-1) \quad (12)$$

由改进的趋近律可得滑模参考轨迹为:

$$\begin{cases} s_r(k+p) = (1-qT)s_r(k+p-1)\Phi(s_r(k+p-1)) - \\ \delta T\Psi(s_r(k+p-1))\operatorname{sgn}(s_r(k+p-1)) \\ s_r(0) = s(0) \end{cases} \quad (13)$$

预测滑模控制的目的是使预测滑模状态与滑模参考轨迹之间的误差最小,而且所消耗的控制能量尽量少,因此,定义成本函数如下:

$$J = \sum_{j=N_0}^{N_1} q_j (s_m(k+j) - s_r(k+j))^2 + \sum_{i=1}^M r_i \Delta u^2(k+i-1) \quad (14)$$

式中: $s_m(k+j)$ 、 $s_r(k+j)$ 分别表示未来 $(k+j)$ 时刻系统的实际输出、参考输出; N_0 是预测时域的下限, N_1 是预测时域的上限^[21]; $\Delta u(k+i-1)$ 为控制输入增量; M 是控制

增量的个数。此外, $\Delta u(k+j) = 0 (j = M, \dots, N_1)$ 表示当 M 步之后, 控制增量不再增添, 为了获得优化结果, 使用 Diophantine 函数:

$$\begin{cases} 1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \\ E_j(z^{-1})P(z^{-1}) = G_j(z^{-1}) + z^{-j}H_j(z^{-1}) \end{cases} \quad (15)$$

$$E_j(z^{-1}) = e_0 + e_1z^{-1} + \dots + e_{j-1}z^{-(j-1)}$$

$$F_j(z^{-1}) = f_0^j + f_1^jz^{-1} + \dots + f_{n-1}^jz^{-(n-1)}$$

$$G_j(z^{-1}) = g_0 + g_1z^{-1} + \dots + g_{j-1}z^{-(j-1)}$$

$$H_j(z^{-1}) = h_0^j + h_1^jz^{-1} + \dots + h_{n-1}^jz^{-(n-1)}$$

其中, $j = 1, \dots, N_1$ 。

式(12)改写成矩阵形式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= (\mathbf{S}_m - \mathbf{S}_r)^T \mathbf{Q} (\mathbf{S}_m - \mathbf{S}_r) + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U} = \\ &(\mathbf{G}\mathbf{U} + \mathbf{F}\mathbf{s}_m(k) + \mathbf{H}\Delta u(k-1) - \mathbf{S}_r)^T \mathbf{Q} * \\ &(\mathbf{G}\mathbf{U} + \mathbf{F}\mathbf{s}_m(k) + \mathbf{H}\Delta u(k-1) - \mathbf{S}_r) + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U} \end{aligned} \quad (16)$$

其中相关参数用 Diophantine 函数进行设计:

$$\mathbf{S}_r = [s_r(k+1), \dots, s_r(k+N_1)]^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M-1} & g_{M-2} & \dots & g_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{M-1} & g_{M-2} & \dots & g_{N_1-M} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{q_1, \dots, q_{N_1}\}, \mathbf{R} = \text{diag}\{r_1, \dots, r_M\}$$

$$\mathbf{F} = [F_1(z^{-1}), \dots, F_{N_1}(z^{-1})]^T$$

$$\mathbf{H} = [H_1(z^{-1}), \dots, H_{N_1}(z^{-1})]^T$$

对上式求偏导并令其等于 0, $\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{U}} = 0$, 可解得控制律:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) = u(k-1) - (\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{Q} * (\mathbf{S}_r - \mathbf{F}\mathbf{s}_m(k) - \mathbf{H}\Delta u(k-1)) \quad (17)$$

广义预测滑模控制算法按如下步骤运行:

- 1) 选择合适的 η^T 保障滑模面的稳定性;
- 2) Diophantine 函数计算相关参数;
- 3) 根据控制律获得 k 时刻的控制输入 $u(k)$;
- 4) 让 $k = k + 1$, 跳到步骤 3)。

3.3 稳定性分析

对系统(2)设计滑模控制器(17), 对于切换函数的任意初始值由式(10)决定的滑模轨迹将进入准滑模带内并保持渐进稳定。选取 Lyapunov 函数 $v(k) = s^2(k)$, 分以下情况讨论。

当 $|s(k)| > \epsilon$ 时,

$$s(k+1) = s(k) - \delta T \text{sgn}(s(k)) - qTs(k)$$

当 $|s(k)| = 0$ 时, $s(k+1) = 0$ 滑模轨迹保持在滑模面上;

当 $0 < |s(k)| < \epsilon$ 时,

$$s(k+1) = -(1-qT) |s(k)|^2 \text{sgn}(s(k))$$

$$\Delta v(k) = v(k+1) - v(k) = [-(1-qT) |s(k)|^2$$

$$\text{sgn}(s(k))]^2 - s^2(k) = s^2(k)[(1-qT)^2 s^2(k) - 1] \leq s^2(k)[\epsilon^2 T^2 - 1] < 0$$

根据稳定性分析可得, 滑模面函数 $s(k)$ 保持在宽度为 $\pm \epsilon$ 的范围内, 当 ϵ 取值非常小, $s(k)$ 的值趋近于 0。将本文设计的广义预测滑模控制器应用于原系统(2)后, 系统(2)可以收敛到滑模面(10)的带宽以内, 而且可以收敛到原点, 从而确保原系统(2)渐进收敛。

4 MATLAB 仿真与结果分析

仿真验证利用 MATLAB 的网络控制系统仿真平台 TrueTime2.0 进行, 考虑搭建以下伺服系统, 被控对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{133}{s(s+25)}$$

在伺服系统模型中, 系统采样间隔为 $T = 10$ ms, 将方波信号引入到网络中, 作为参考, 网络采用 Can 网络协议, 即根据优先权来决定信息的传输顺序, 数据传输速率为 80 000 bits/s, 最小帧大小 80 bits; 数据包大小为 80 bits。预测时延长度 $N = 30$, 阶数 $D = 10$ 。仿真中采用的测试数据是 Truetime 仿真软件测得时延, 采集 200 组数据。时延预测结果对比分析如表 1 所示。

表 1 时延预测结果对比分析

时延预测方法	误差均值	误差方差	ms 周期预测 时间
AR 模型	-0.041	0.29	0.13
RBF 神经网络	-0.023	0.23	3.72

由表 1 可知, AR 模型的网络时延预测算法, 算法简单, 计算时间短, 但是预测误差较大, 这对网络控制系统的精确性有不利影响。而 RBF 神经网络相对于自回归模型具有较高的预测精度, 但是单次预测计算时间太长, 影响网络控制系统的实时性, 增大系统的时延, 对系统的性能有不利影响。综合考虑本文使用 AR 模型预测网络时延。

由极点配置方法, 设计 $\eta = [1.11]^T$, 因此滑动模态是稳定的, 根据预测控制原理, 选择预测时域 $N_0 = 1, N_1 = 8, M = 2$ 。选择 $\alpha = 0.98, 1 - qT = 0.75, \delta T = 0.15, \mathbf{Q} = \mathbf{I}_{N \times N}, \mathbf{R} = \mathbf{I}_{2 \times 2}$ 其中 \mathbf{I} 是合适维数的单位阵。

采用 True Time 工具箱搭建的广义预测滑模模块如下图所示, 使用了 3 个 True Time 内核模块(分别用来模拟对应的干扰节点、控制器和执行器/传感器)和 1 个 True Time 网络模块, 此外还设计了广义滑模控制器, 使用 Simulink 搭建的广义滑模模块独立于控制器节点之外, 通过负反馈回路将控制器节点的输出反馈到广义滑模控制器输入端, 使系统输出与系统目标的误差不断地减小, 从而促使系统趋于稳定, 相比于直接在控制器节点中输入算法效果更好, 滑模控制模块如图 3 所示。

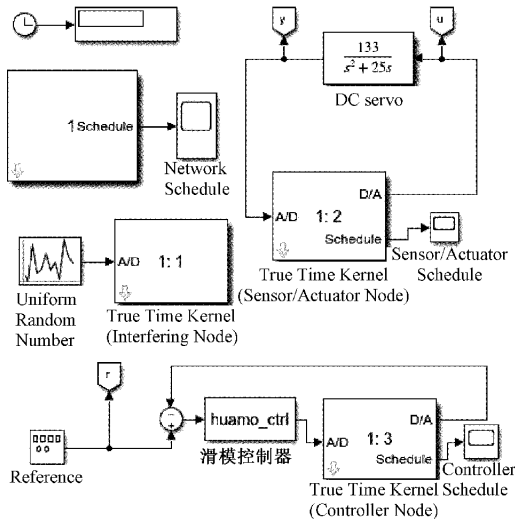


图 3 用 Truetime 工具箱搭建的滑模控制模块

为验证本文方法,丢包率设为 20%,仿真结果如图 4 和 5 所示,采用模糊 PID 的方法,受网络时延丢包的影响,输出 y 有较大的超调,而且不稳定,跟踪效果较差,不能满足控制性能要求。保持相同的对象参数,与模糊 PID 方法对比,采用本文方法后,系统具有更好的快速性和系统跟踪能力,补偿了网络时延丢包的影响,消除了抖振,并保证了系统的快速稳定,对丢包也具有一定的鲁棒性,无论是超调时间还是响应时间,都能满足控制性能要求。

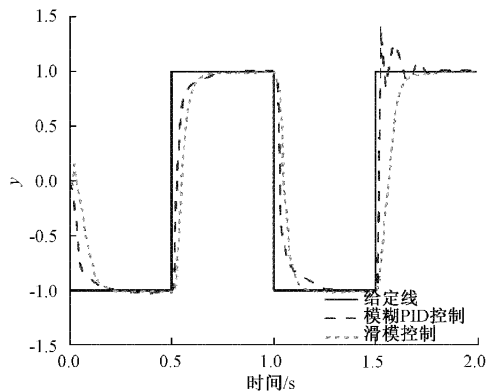


图 4 没有丢包时的控制效果

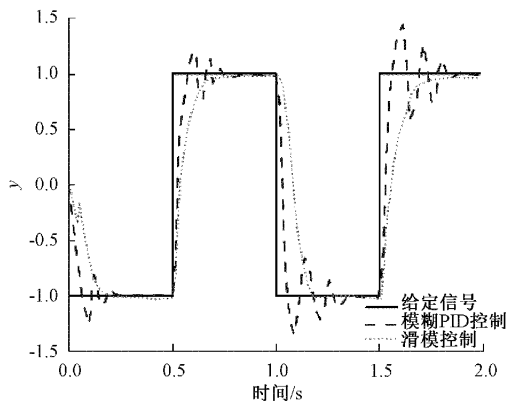


图 5 丢包率设为 20% 控制效果

结合表 1、图 4 和 5 可知,AR 模型在线网络预测的滑模控制精度较高而且实时性好,误差方差在 0.29 ms,周期预测时间 0.13 ms,设计的滑模控制器在跟踪给定信号时,在 20%丢包的情况下,依然保持较为稳定的状态,而模糊 PID 控制器在跟踪给定信号的过程中超调较大,最大超调达到了 20%,影响系统的控制性能。通过对比验证了本文所设计控制器的有效性,将滑模控制、AR 模型在线时延预测方法和零阶保持器结合起来处理网络时延和丢包问题也是一个新的思路,与已有研究成果对比,本方法使系统的稳定性较好,达到预期设计目的。

5 结 论

本文针对网络控制系统的时延和丢包问题,给出一种在线预测滑模控制方法。首先是建立网络控制系统模型,通过线性转换将时延系统转换为形式上无时延的系统,设计自适应模型算法在线预测时延,保障了系统时延预测的实时性和准确性。其次给出了一种新的趋近律,该趋近律使系统状态不仅能收敛到原点的邻域内还可以收敛到原点,增加系统的稳定性,通过该趋近律设计一种滑模控制器,该控制器采用预测的控制信号序列来补偿时间延迟,执行器采用逻辑 ZOH 策略,选择最新到达时刻控制数据包,丢弃滞后错序包的信号,对数据丢包进行补偿。最后通过对一个网络化位置伺服系统进行仿真,验证了该方法的有效性。但本文并未对调度策略进行深入研究,此外考虑网络控制系统的其他问题和有限信道带宽将是下一步研究重点。

参 考 文 献

- [1] 吴杰,付敬奇. 网络控制系统的事件触发与量化控制协同设计[J]. 电子测量技术, 2017,40(5):80-86.
- [2] 张浩,彭晨,孙洪涛. 多路径的无线网络控制系统镇定性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11): 1627-1634.
- [3] 唐晓铭,邓梨,虞继敏. 基于区间二型 T-S 模糊模型的网络控制系统的输出反馈预测控制[J]. 自动化学报, 2019, 45(3): 162-174.
- [4] 张奇,刘斌. 具有时延和丢包的非线性网络控制系统的切换稳定性研究[J]. 高技术通讯, 2020, 30(10): 90-99.
- [5] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012:20-29.
- [6] ZHANG Y, XIE S, ZHANG L, et al. Robust sliding mode predictive control of uncertain networked control system with random time delay[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2018(21): 6959250.
- [7] NIZAR A, HOUDA B M, SAID N A. A new sliding function for discrete predictive sliding mode control of time delay systems [J]. International Journal of

- Automation and Computing, 2013, 10(4):288-295.
- [8] 王玉龙, 韩清龙, 费敏锐. 网络控制系统的优化设计[M]. 北京:科学出版社, 2019, 15-21.
- [9] 侯华舟. 广义复杂网络系统的滑模变结构控制[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
- [10] 游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(2):101-108.
- [11] 时维国, 唐志瑶. 非线性网络控制系统的双通道时延和丢包鲁棒 H^∞ 控制[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 7-14.
- [12] LI X, SUN S. H^∞ control for networked stochastic nonlinear systems with randomly occurring sensor saturations, multiple delays and packet dropouts [J]. IET Control Theory & Applications, 2017, 11(17):2954-2963.
- [13] 罗永平. 网络控制系统时延预测与补偿控制研究[D]. 郑州:郑州大学, 2014:15-18.
- [14] 郑晓晨. 伺服电机 NCS 神经网络 PID 趋近律滑模控制[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(8):24-31.
- [15] 彭晨, 田恩刚. 一种改进的具有非理想网络状况的网络控制系统分析与综合方法[J]. 自动化学报, 2010, 36(1):188-192.
- [16] 武慧勇, 任清安. 基于时延预测的网络控制系统自适应滑模控制[J]. 遥测遥控, 2016, 37(4):32-36.
- [17] 刘艳红, 罗永平. 基于混合控制的网络系统随机时延补偿[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6):1262-1266.
- [18] 肖玲斐. 基于预测控制策略的离散滑模控制研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010:21-30.
- [19] 李宏玉, 丁善峰, 余超, 等. 基于滑模变结构的永磁同步电机控制研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(9): 112-116.
- [20] 杨菊花, 李文元, 陈光武, 等. 引入滑模观测器的 GPS/INS 组合导航滤波方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9):78-86.
- [21] 白云奎, 李祥飞, 陈玄. 自适应高阶滑模永磁同步电机永磁磁链观测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 163-170.

作者简介

王科举, 硕士研究生, 主要研究方向为网络控制系统。

E-mail: jack.wkj@foxmail.com

张旭秀, 博士, 教授, 主要研究方向为信号处理与智能控制、网络控制系统等。

E-mail: zhangxuxiu@163.com

柏俪娜, 硕士研究生, 主要研究方向为网络控制系统。

E-mail: 1006927850@qq.com