

扩维观测器用于共享控制系统的模型参数辨识的研究^①陈宏伟^② 吴平东 黄 杰

(北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

摘 要 针对基于因特网的共享控制系统无法对被控对象的模型参数进行在线辨识的问题,提出了一种在时变时延的网络环境下,服务器在线辨识被控对象模型参数的方案。该方案在服务器端使用扩维观测器观测被控对象模型的各阶状态变量,并结合网络通讯技术实现在因特网环境下对接入系统的被控对象模型参数的在线辨识。将该方案所得的辨识结果与无网络环境因素影响下的辨识结果进行了仿真实验对比验证,实验结果表明该方案是有效可行的,不仅实现了在网络环境下服务器对不同地域的被控设备对象模型参数的在线辨识,而且也扩展了系统辨识的应用范围。

关键词 因特网,扩维观测器,系统辨识,共享控制系统

0 引 言

基于因特网的共享控制系统是近几年发展起来的一种新型的网络控制系统。它具有任何人在任何地点对任何接入系统的被控设备对象进行控制的特点^[1,2]。施控的用户和被控的接入设备以及提供控制与管理功能的服务器的空间位置是任意分散的,三者之间依靠因特网传输控制和指令信息。网络环境因素的引入对接入设备的模型辨识提出了新的要求。网络传输时延的不确定性导致辨识过程中被控对象的模型参数不断地发生变化,因此,在基于因特网的共享控制系统中,原先应用于确定性系统中的对被控对象模型辨识方法已不再适用。目前,在过程控制领域,针对具有大纯滞后参数时变特点的过程对象模型的参数辨识问题,进行了较深入的研究:李鑫等人对不确定性时变大纯滞后的被控对象模型进行了在线辨识的研究,提出了一种离散大纯滞后对象的辨识方法^[3];杨志远等人将最小二乘法推广到时时滞时变的被控对象模型的辨识^[4,5];Rad 对连续的时变大纯滞后对象进行了辨识^[6];Faure 提出了采用正交函数对过程控制系统的时间参数进行辨识^[7]。他们在研究中所指的大纯滞后是指过程控制中由于控制流程中的电气特性等带来的时滞现象,其特点是虽然在整个过程控制中时滞是不断变化

的,但在所指的时间段内是常值,这与本文研究的网络环境下的不确定时变时延的情况是不相同的。另外,因特网环境下的共享控制系统中,服务器节点还具有对共享系统中多个接入设备进行在线辨识和管理的功能特点。

本研究实现了在网络环境下服务器节点对接入设备模型参数的辨识,实现了被辨识的接入设备与辨识的服务器在空间位置上的分离,也为服务器对空间位置各异的接入设备的辨识和管理提供了实现方法。同时,通过网络实现对被控设备模型在线辨识的方法,扩展了系统辨识技术的应用领域。

1 网络环境因素对系统辨识的影响

基于因特网的共享控制系统采用三节点式结构,由用户、服务器、设备和作为信息通讯媒介的因特网组成如图 1 所示。共享控制系统中同时存在着多个闭环控制回路,控制过程中的相关信息通过因特网在各节点之间传输。

在共享控制系统中,设备节点为计算机采样控制系统,为不失一般性,被控离散模型可表示为

$$G_o(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_m z^{-m}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - \cdots - a_n z^{-n}} \quad (1)$$

① 国家自然科学基金(60274035;60674052)资助项目。

② 男,1972 年生,博士生;研究方向:网络控制系统;联系人,E-mail: chw9507@bit.edu.cn
(收稿日期:2008-06-11)

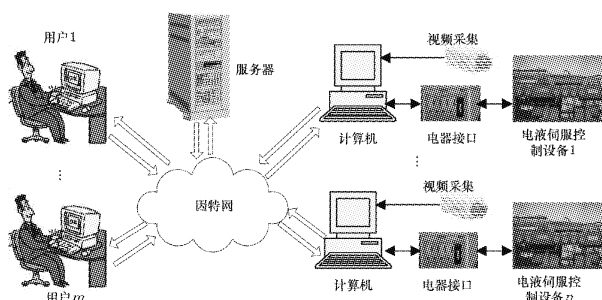


图 1 基于因特网的共享控制系统示例

网络环境下服务器辨识被控设备模型参数的结构框图如图 2 所示。图中 r 为参考输入信号, $u_{(s)}$ 为服务器端输入, $y_{(s)}$ 为服务器端输出, $u_{(m)}$ 为被控设备输入, $y_{(m)}$ 为被控设备输出, τ_{sp} 、 τ_{ps} 分别为服务器与设备、设备与服务器间的因特网前向和反馈通道时延值。

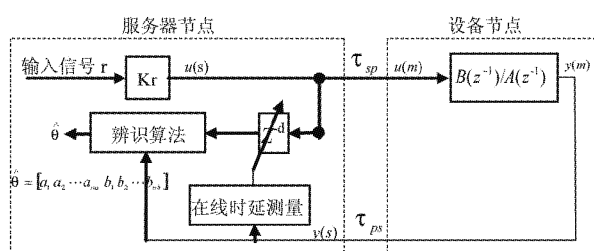


图 2 因特网环境下的在线辨识模型框图

考虑网络环境因素影响,辨识的被控设备离散模型则表示为

$$G_o(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - \dots - a_n z^{-n}} z^{-d} \quad (2)$$

其中: $d = t_{sp}/T_s$ 为采样周期的整数倍。

模型(2)可以表示成如下最小二乘格式:

$$y_{(s)} = h_{(s)}^T \theta + V_{(s)} \quad (3)$$

其中 $V_{(s)}$ 为均值为零的不相关随机噪声, $h_{(s)}^T = [-y_{(s-1)}, \dots, -y_{(s-n_a)}, u_{(s-1-d)}, \dots, u_{(s-n_b-d)}]$, $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_m]^T$,

$\max \left| \frac{\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}_i(k-1)}{\hat{\theta}_i(k-1)} \right| < \epsilon$ 当递推到第 i 组数据时,参数的估计值的相对变化量 $< \epsilon$, 则停机。

由于网络时延的不确定性影响,每组输入输出对应的网络时延值都不相同,这将导致辨识算法无法收敛到 ϵ 。减小辨识过程中网络环境因素对数据

报传输的影响是实现服务器对接入设备对象进行辨识的关键。

2 本研究的方案分析

2.1 网络传输协议

时延会使网络控制系统性能变坏甚至失稳^[8], 因此,时延越小越好。研究网络控制系统传输协议的目的是保证数据传输的可靠性和降低网络时延。目前研究主要分为两类:一是在现有 TCP/IP 协议的基础上修改;一是根据控制系统特点设计新的传输协议。但共享控制系统采用大众因特网作为通讯媒介,将使用现有网络协议,主要是 TCP/IP 协议^[9]。

图 3 为 TCP 协议的应用层上测得的北京理工大学校园网与中国电信 512K ADSL 拨号网络间的网络环路时延。

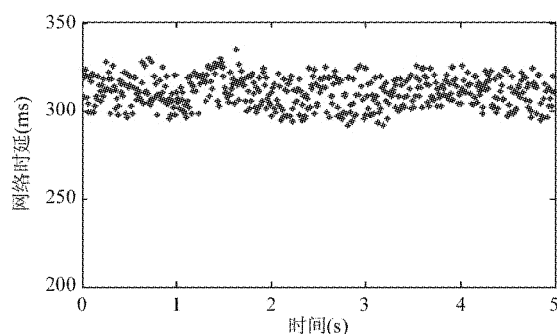


图 3 TCP 协议下因特网传输时延

2.2 数据包结构

数据包中数据区的设计对网络流量负载、系统响应性、扩展性、安全性影响较大。数据区设计的原则是在较小的字节数上尽量提高系统的响应能力、安全性和扩展性。TCP 数据包可分为可变大小和固定大小两种。可变大小包有利于减小数据量,但由于 TCP 的流式数据传输导致数据包间粘接,使处理接收数据过程繁琐,系统响应变慢。固定大小包的数据包大小为

$$l = \max\{l_1, l_2, \dots, l_i\} \quad (4)$$

其中 l_i 为每种指令包的大小。部分数据包中存在无关数据,增加了传输的数据总量。令接收缓冲区大小 $m = l$, 则每次接收可完整接收一包,克服数据包粘接带来的缺点,加快系统响应。

共享控制系统的指令信息传输不频繁,快速响应是主要要求,因此采用固定包长封装 TCP 数据包,各字段定义如表 1 所示。

表 1 数据包字段格式

Type: 1B	Name: 1B	Params: 8nB	Extension: mB
----------	----------	-------------	---------------

实际应用时可根据需要增加包长灵活扩展,如增加加密密钥、数据校验字段等。

2.3 驱动方式

驱动方式影响设备的响应输出时序。网络控制系统中主要有两种驱动方式:时间驱动和事件驱动。时间驱动方式以固定的时间间隔采样系统各种信息并做出响应,可避免被控对象长时间得不到控制,但采用轮询方式会浪费大量系统资源。事件驱动方式仅在注册事件发生时才做出响应,这样可节省系统资源,但当数据包不能正常传输时系统将长时间无响应。

服务器是基于因特网的共享控制系统的核心,同时为多用户和设备提供控制决策,应避免软硬件资源的不良耗用,因此采用事件驱动,保证服务器对各用户和设备的及时响应。

设备一方面应定时采集被控对象的相关信息并向服务器发送控制决策请求,采用时间驱动方式以避免被控设备长时间失控。另一方面,设备在接受服务器发送的控制信息时采用的是事件驱动方式,保证接收到控制信息能够立刻被执行。

设备端在接收由服务器发送的输入序列时受网络因素的影响,会发生设备输出响应序列不是等时间间隔的现象。

3 方案的设计

3.1 辨识模型的工作原理

因特网环境下的共享控制系统的设备辨识受网络环境因素以及服务器和设备的驱动方式影响,本研究所设计的因特网环境下的设备对象辨识模型框图如图 4 所示。

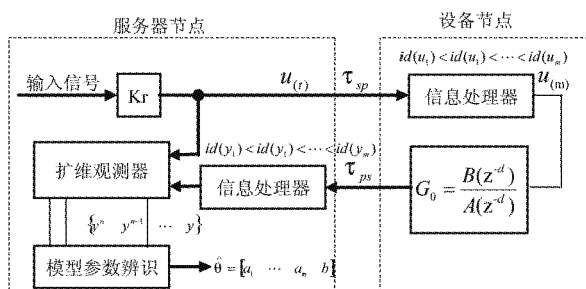


图 4 因特网环境下的具有扩维观测器的在线辨识模型框图

该方案由服务器节点的扩维观测器和设备节点的采样信息处理器等组成。当接到辨识指令后,服务器节点产生正弦信号或阶跃信号的输入信号,通过网络送入设备节点,由于受网络环境的影响,设备节点处的采样信息处理器在采样间隔内接收数据时将发生单采样、空采样、多采样的现象,采样信息处理器将接收的输入值整理后按顺序作用于设备,并将设备输出响应值送回服务器中的扩维观测器中,结合服务器的输入值进行设备的模型参数辨识,当设备模型参数估值的相对误差小于设定值 ϵ 时,则停止模型参数辨识算法的迭代运算。该方法避免了网络环境因素对设备辨识的影响。

3.2 扩维观测器设计

如图 4 所示,基于因特网的共享控制系统中,分离出网络环境因素的不确定环节,系统中被控设备的模型为不失一般性可写为:

$$a_0 y^n(t) + a_1 y^{n-1}(t) + \dots + a_n y(t) = W(t) + bu(t) \quad (5)$$

其中 $W(t)$ 为系统总扰动。

系统 (5) 的状态变量为 $y^{n-1}(t), \dots, y^1(t), y(t)$ 。如果将变量 $y^n(t)$ 也当作状态变量,则得到被扩维的状态变量: $y^n(t), y^{n-1}(t), \dots, y^1(t), y(t)$ 。

构造非线性系统

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = \hat{x}_2(t) - \beta_{01} f_1(e(t)) \\ \dots \\ \dot{\hat{x}}_n(t) = \hat{x}_{n+1}(t) - \beta_{0n} f_n(e(t)) \\ \dot{\hat{x}}_{n+1}(t) = -\beta_{0,n+1} f_{n+1}(e(t)) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $e(t) = \hat{x}_1(t) - y(t)$ 。

文献[10, 11]指出,只要适当选取非线性函数 $f_1(\cdot), \dots, f_{n+1}(\cdot)$ 和系数 $\beta_{01}, \dots, \beta_{0,n+1}$, 则此系统各状态分别跟踪被扩维的状态变量 $y^n(t), y^{n-1}(t), \dots, y^1(t), y(t)$, 即 $\hat{x}_1(t) \rightarrow y(t) \dots \hat{x}_n(t) \rightarrow y^{(n-1)}(t) \dots \hat{x}_{n+1}(t) \rightarrow y^{(n)}(t)$ 。通常情况下,让非线性函数 $f_1(\cdot), \dots, f_{n+1}(\cdot)$ 相同,并选择为

$$fal(e, a, d) = \begin{cases} e/d^{(1-a)} \dots |e| < a \\ \text{sign}(e) |e|^{a \dots} |e| \geq a \end{cases} \quad (7)$$

式中, a 和 d 是正数,一般选择 $0 < a < 1$ 。

共享控制系统中,服务器节点产生持续的输入激励,经计算机采样的输入值序列封装成 TCP 数据包时在每个数据前加装 id 序号,之后数据包经因特网存储到设备节点的缓存区中。设备节点的采样信

息处理器接收到的输入序列解包后按 $id(u_1) < id(u_2) < \dots < id(u_h)$ 的方式排序, 采样信息处理器将顺序地取出输入控制值 $u(k)$ 作用到被控设备。设备节点将输出响应标记上相应的 id 序号传回服务器, 服务器将相同 id 序号的输入输出值 $u(k), y(k)$ 按顺序送入扩维观测器, 经扩维观测器得到被控设备对象的各阶状态变量 $y^{n-1}(t), \dots, y^1(t), y(t)$ 。

服务器节点通过采用扩维观测器观测被控对象的各阶状态变量, 避免了传统的离散法辨识对象时的输入输出序列延迟必须为采样时间间隔的整数倍的问题。输入输出数据只需编号处理即可, 简化了采样信息处理器的功能。

扩维状态观测器只接收作用与设备对象的输入输出信号, 其中, 输入信号是服务器节点产生的, 输入信号是连续信号并且方便获取, 输出信号是被控设备响应输出存储到服务器节点缓冲区中的信息。

3.3 被控设备对象的辨识实现

考虑被控设备对象为二阶系统:

$$y''(t) + a_1 y'(t) + a_2 y(t) = W(t) + bu(t) \quad (8)$$

式中: $y(t)$ 和 $u(t)$ 分别是系统的输出和输入 $W(t)$ 零均值的不相关随机噪声。

如果可以通过量测输出 $y(t)$ 可以得到系统(8)的输出及各阶导数估计 $\hat{y}(t), \hat{y}'(t), \hat{y}''(t)$, 那么就能直接估计系统参数。适用下列准则函数:

$$J = \sum_{i=1}^k (\hat{y}''(t_i) - \ddot{y}(t_i)) \quad (9)$$

其中 $\ddot{y}''(t) = -a_1 \dot{y}'(t) - a_2 y''(t) + bu(t)$, 极小化(9)式, 得到矩阵方程

$$A\Theta = B \quad (10)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} \int_0^t \hat{y}''(t) \hat{y}'(t) dt & \int_0^t \hat{y}''(t) \hat{y}(t) dt & \int_0^t \hat{y}''(t) u(t) dt \\ \int_0^t \hat{y}'(t) \hat{y}'(t) dt & \int_0^t \hat{y}'(t) \hat{y}(t) dt & \int_0^t \hat{y}'(t) u(t) dt \\ \int_0^t \hat{y}(t) \hat{y}'(t) dt & \int_0^t \hat{y}(t) \hat{y}(t) dt & \int_0^t \hat{y}(t) u(t) dt \end{bmatrix}$$

$$\Theta = [a_1, a_2, b]^T, \quad B = \begin{bmatrix} \int_0^t \hat{y}''(t) \hat{y}'(t) dt \\ \int_0^t \hat{y}''(t) \hat{y}(t) dt \\ \int_0^t \hat{y}''(t) u(t) dt \end{bmatrix}$$

从上面的推导可以看出, 当给被控对象一个满足充分激励的输入信号后, 利用(10)式可求出系统

参数估计值。被控设备对象的输出响应以及各阶导数的估计值可以通过 3.1 节所述的扩维观测器观测得到。

扩维观测器只利用被控设备对象的输入输出信号, 其中, 输入信号是服务器节点产生的, 输入信号是连续信号并且方便获取。输出信号是被控设备响应输出存储与服务器节点的信息。采样信息处理器分别处于服务器节点的接收端和设备节点的接收端, 用于完成解包和按需发送的工作。

4 仿真实验

通过仿真实例可说明本文方案的有效性。采用正弦信号作为输入, 用 Euler 法解微分方程组, 积分步长选 0.01, 且使用如下形式的三阶扩维状态观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = \hat{x}_2(t) - \beta_{01} fal(e, a, d) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) = \hat{x}_3(t) - \beta_{02} fal(e, a, d) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) = -\beta_{03} fal(e, a, d) \end{cases} \quad (11)$$

被控对象模型为

$$y''(t) + a_1 y'(t) + \dots + a_2 y(t) = W(t) + bu(t)$$

其中 $a_1 = 0.5, a_2 = 2.5, b = 1; W(t)$ 为零均值的不相关随机噪声。观测器系数 $a = 0.5, d = 0.01, \beta_{01} = 6, \beta_{02} = 30, \beta_{03} = 300$, 使用递推最小二乘法估计系统参数, $J \leq 0.05$ 迭代结果是

$$\hat{\Theta} = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}] = [0.4252, 2.5592, 1.0321]$$

用 Euler 法解微分方程组, 计算的真值为

$$\Theta = [a_1, a_2, b] = [0.4773, 2.5119, 1.0048]$$

将单位阶跃信号作用到在两种情况下获得的辨识模型, 通过仿真实验分析输出响应结果(如图 5 所示):

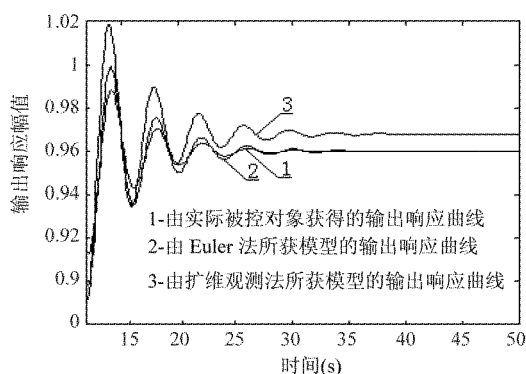


图 5 仿真实验中被控对象的阶跃输出响应

$$y_i = k \cdot G_o(z)_i \cdot x; \quad i = 0, 1, 2 \quad (12)$$

x : 输入的单位阶跃信号;

k : 比例系数;

y_0 : 无网络环境影响下真实被控对象模型的响应输出(曲线 1 所示);

y_2 : 无网络环境下 Euler 法所得被控对象模型的响应输出(曲线 2 所示);

y_3 : 网络环境下本方案所得被控对象模型的响应输出(曲线 3 所示)。

从图 5 中可以看出,该研究的模型辨识方法所得被控对象的模型辨识结果与无网络环境下的模型辨识结果对应的控制系统的输出响应有偏差,但偏差不大且系统能很快稳定。输出响应结果有偏差说明网络环境对被控设备的模型参数辨识造成了影响。两种情况下的输出响应产生的稳态偏差不大,说明在网络环境下该研究中辨识被控对象模型的方法是有效的。

5 结 论

仿真实验结果验证了利用扩维状态观测器观测被控对象模型各阶状态变量,并结合信息的网络传输技术实现网络环境下对被控设备进行异地在线辨识是有效可行的,该方案为在基于因特网的共享控制系统下,服务器对空间位置各异的接入设备的识别和管理提供了实现方法。同时,通过网络实现对异地被控设备的辨识扩展了系统辨识技术的应用领域。

网络环境下的被控设备对象模型异地辨识方法的研究尚需进一步完善,如对多输入多输出系统以及非线性系统的网络环境下异地辨识的可行性,尚有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 吴平东,林理平. 一种基于 Internet 的共享实验系统结构. 北京理工大学学报, 2006, 26(3): 235-238
- [2] 钟铭恩,吴平东. 基于 Internet 的共享实验系统平台构建. 北京理工大学学报, 2007, 27(5): 403-407
- [3] 李鑫,党选举,薛万伟. 一种新的时变大纯滞后对象在线辨识方法. 计算机仿真, 2005, 22(5): 95-97
- [4] 杨志远,吕跃刚. 时变时滞系统的参数辨识及自适应控制. 信息与控制, 1993, 22(2): 76-82
- [5] 宋春平,杨志远,袁亚伟. 一种时滞未知随即系统参数辨识算法. 华北电力大学学报, 1998, (3): 69-74
- [6] Rad A B, Lo W L, Tsang K M. Simultaneous online identification of rational dynamics and time delay: a correlation-based approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* (S1558-0865), 2003, (11): 957-959
- [7] Faure F, Evans F J. Identification of process delay time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1969, (14): 421-422
- [8] 黄杰,陈之龙,吴平东. 远程控制系统中的采样信息处理方法研究. 北京理工大学学报, 2003, 23(6): 713-716
- [9] Forouzan B A, Fegan S C. TCP/IP Protocol Suite (2nd Edition). 谢希仁(译). TCP/IP 协议族(第 2 版). 北京: 清华大学出版社, 2003. 242-285
- [10] 吴剑,孙秀霞. 一种连续系统辨识方法及其在飞控规律辨识中的应用. 空军工程大学学报, 2002, (10): 4-8
- [11] 王晓卫. ESO 滤波器在运动参数估计中的仿真研究. 系统仿真学报, 2007, (8): 1766-1792

Research on applying the extended state observer to model parameter identification for shared control systems

Chen Hongwei, Wu Pingdong, Huang Jie

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081)

Abstract

In order to realize the on-line estimation of shared plants' parameters in internet based shared control systems by the server node, the paper proposes a new method that can on-line identify the model parameters through an internet based shared control system under the time-varying and time-delay environment. By observing out all the model variables of shared plants in different states by the extended state observer in different region and utilizing the network technology, the method realizes the on-line identification of model parameters of the remote terminal. The numerical computer simulations were performed to compare the system' result with the existing systems without the influence of network factors, and the results show that the proposed method is valid and feasible, which can realize the identification of model parameters of the controlled objects in different regions under the network environment, and extend the applications of the on-line identification systems.

Key words: internet, extended state observer, system identification, shared control system