

文章编号: 1001-0920(2008)08-0883-05

基于因特网的共享控制系统的时滞依赖鲁棒控制

钟铭恩, 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: 分析了基于因特网的共享控制系统的控制问题, 研究了数据包传输特有的时序现象及其对控制系统建模的影响. 通过引入有效的数据包处理器对接收到的信息进行再处理, 简化了系统的模型, 并从时滞依赖鲁棒稳定性的角度提出了一种使系统渐近稳定的状态反馈控制器设计方法. 仿真和实验结果证明了所提出方法的有效性.

关键词: 时变时延; 数据包处理器; 时滞相关; 网络控制; 共享控制

中图分类号: TP27 **文献标识码:** A

Delay-dependent robust control for internet based shared control system

ZHONG Ming-en, WU Ping-dong, HUANG Jie

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China.

Correspondent: ZHONG Ming-en, E-mail: peakarwen@bit.edu.cn)

Abstract: Control problems of internet based shared control system are analyzed, and situation of transfer of data packets and its influence on system modeling are discussed. By introducing a data packets processor to re-process the information, the modeling of shared control system is simplified. Finally, from the point of delay-dependent robust stabilization, a controller design method is proposed to make sure the asymptotical stability for the system.

Key words: Time-varying delay; Data packet processor; Delay-dependent; Networked control; Shared control

1 引 言

因特网的发展和普及为传统控制理论注入了新的活力, 远程实验室、远程外科手术、远程机械控制等都是这一领域的研究成果. 但这类系统多采用点对点的独享控制模式, 只利用了因特网的信息传输功能而无法利用其资源共享等功能. 为此, 构建一种新的网络控制系统模型: 基于因特网的共享控制系统^[1,2]. 引入服务器节点作为用户节点和设备节点的连接桥梁, 系统拓扑成为三节点式结构, 设备节点成为共享资源以供多用户使用. 控制算法与决策算法部署在服务器中为用户控制设备提供稳定性支持, 实现控制技术的共享.

共享控制系统采用大众因特网作为通讯媒介, 采用 UDP 协议传输信息. 这不可避免地带来较大的时变网络时延和数据包丢包、乱序等问题, 大大降低了控制系统的性能, 甚至使系统不稳定. 为克服网络时延对控制系统的不利影响, Luck 等人^[3,4]通过

缓冲区等方法将随机时延转变为固定时延来研究系统的稳定性, 但这种方法人为地加大时延而降低了系统性能. Nission 等人^[5]假设时延满足某种统计规律, 利用随机控制理论进行系统的稳定性设计, 但因特网的时延是随机的, 无法满足这些假设. Walsh 等人^[6,7]求得网络控制系统稳定允许的最大上界并设计了相应的控制器, 但要求时延基本为常数. 赵虹等人^[8]从时滞依赖鲁棒稳定性角度设计控制器取得了较好的效果, 但没有考虑到网络控制系统中数据包传输的时序特点及其影响.

本文通过引进数据包接收处理器, 结合时滞依赖鲁棒控制理论, 在所给时延上下界条件下给出了一种可行的采样状态反馈控制的控制器设计方法.

2 共享控制系统控制问题描述

基于因特网的共享控制系统为多用户、设备同时构成闭环回路进行控制的过程. 系统原理和典型的闭环控制回路分别如图 1 和图 2 所示.

收稿日期: 2007-05-29; 修回日期: 2007-09-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274035, 60674052); 国家 985 工程项目; 教育部研究生创新教育发展基金项目.

作者简介: 钟铭恩(1980—), 男, 福建厦门人, 博士生, 从事网络控制系统的研究; 吴平东(1940—), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络化控制系统、脑电信息特征等研究.

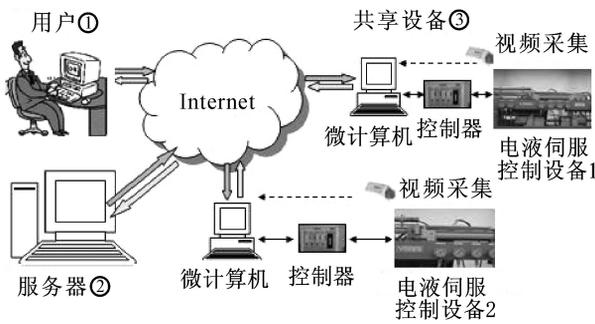


图1 基于因特网的共享控制系统

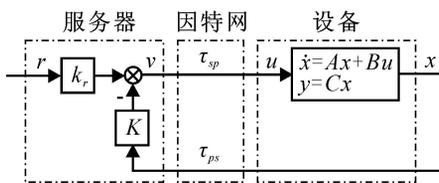


图2 基于因特网共享控制系统典型闭环回路

图2中： r 为来自于用户节点的输入信息， K 为状态反馈控制矩阵， τ_{sp} 和 τ_{ps} 分别为服务器到设备节点和设备节点到服务器的信息网络传输时延(包括服务器节点的控制器算法时延、设备节点的传感器时延和执行器时延)。在严格采样时序下，被控离散系统为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (1)$$

状态反馈控制可描述为

$$u(k) = k_r r(k - \tau_{ps}) - Kx(k - (k)), \quad (2)$$

其中 $(k) = \tau_{ps} + \tau_{sp}$ ，为闭环回路总时延。

本文假设：1) 环路时延为时变随机并且有界的，满足如下时滞条件：

$$\tau_1 \leq (k) \leq \tau_2, \quad (3)$$

其中 τ_1 和 τ_2 大于0。

2) 在进行稳定性分析时，为简化分析，假设参考输入为0(实际应用时不限制于此假设，可以是阶跃输入、正弦输入等任意信号，因为系统的稳定性由自身的模型特性决定而与参考输入无关)。于是，在不考虑数据包传输时序特性及其影响时，网络控制系统可描述为

$$x(k+1) = Ax(k) - BKx(k - (k)). \quad (4)$$

3 数据包处理器原理

3.1 数据包接收时序图

网络控制系统中，数据包的接收时序可简要表示为图3所示。

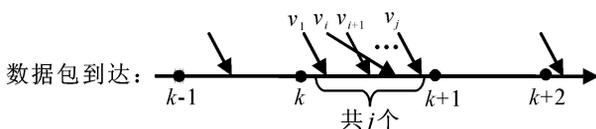


图3 网络控制系统中的数据包接收时序图

由图3可知，在每个采样间隔内，可能存在着单包到达、多包到达(可能乱序)和无包到达的情况。如果执行器采用事件驱动模式，则被控执行器输入和传感器采样输出时序不匹配，因为每个控制输入的作用时间不再恒为一个采样周期，式(1)不成立。假设 v_i 从服务器到达被控设备的时刻分别为 $t_i = l_i \times T + \tau_i, 0 \leq \tau_i < T, T$ 为采样周期，则

$$\begin{aligned} x(k+1) = & Ax(k) + \int_0^1 e^{A_0(1-\theta)} B_0 dt \cdot v(k-1) + \\ & \sum_{i=1}^{j-1} \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} e^{A_0(\tau_{i+1}-\theta)} B_0 dt \cdot v_i + \\ & \int_{\tau_j}^T e^{A_0(T-\theta)} B_0 dt \cdot v_j. \end{aligned} \quad (5)$$

其中： $A = e^{A_0 T}$ ， A_0 和 B_0 对应被控连续状态方程的状态转移矩阵和控制矩阵。网络的随机性使式(5)左边为随机多项式，从而使网络控制系统的稳定性分析变得极为复杂。

引入特定的数据包处理器，获得系统等效的严格采样时序下的模型，可使控制器的设计在保障控制性能的前提下简单化。

3.2 数据包处理器原理

3.2.1 采样间隔内单包或多包同时到达

此时，数据包处理器采用原则为：如果当前控制数据包 id (可以在每个数据包中增加此信息) 小于已到达数据包中最大 id ，则忽略此数据包的控制要求；否则，维持此数据包的控制要求。具体步骤为：

1) 信息再处理。首先根据接收到的控制信息构造序列满足如下条件：

$$\begin{cases} \{u_1, u_2, \dots, u_h\} \subset \{v_1, v_2, \dots, v_j\}, \\ id(u_1) < id(u_2) < \dots < id(u_h), \\ 0 \leq \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_h < T. \end{cases} \quad (6)$$

作用是：对到达设备节点的控制序列进行时序校验，当接收到的数据包相对于已接收的数据包序列不是最新的数据包时将其剔除，这是因为利用最新的过程信息进行控制决策对控制性能是有利的。式(6)中第3分式保证了时序的有序性。此时式(5)成为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + \int_0^1 e^{A_0(1-\theta)} B_0 dt \cdot u(k-1) + \\ \sum_{i=1}^{h-1} \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} e^{A_0(\tau_{i+1}-\theta)} B_0 dt \cdot u_i + \\ \int_{\tau_h}^T e^{A_0(T-\theta)} B_0 dt \cdot u_h, \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$B_i = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} e^{A_0(\tau_{i+1}-\theta)} B_0 dt \cdot u_i.$$

2) 等效估值。求取矩阵 $B(k)$ 使得下式成立：

$$= (B + B(k)) u(k),$$

$$B = f(T) = \int_0^T e^{A_0(T-t)} B_0 dt. \quad (8)$$

其中: $u(k)$ 为数据包处理器的输出, 根据最新状态信息计算的控制值, 即 $u(k) = u_h = Kx(k-h)$; $B(k)$ 是维数确定且范数有界的, 存在适当维数矩阵 W_1 和 W_2 , 使得

$$B(k) = W_1 W(k) W_2, \quad (9)$$

其中 $W(k)$ 满足

$$W^T(k) W(k) = I. \quad (10)$$

可以证明, 当采样周期 T 足够小时, $B(k)$ 存在, 可由矩阵函数

$$f(\cdot) = \int_0^{\cdot} e^{A_0(\cdot-t)} B_0 dt$$

在有界闭区间 $[KT, (K+1)T]$ 上的连续性, 以及 u_i 为有界常数序列来保证. 综合以上各式, 被控设备状态方程可描述为

$$x(k+1) = Ax(k) + (B + W_1 W(k) W_2) Kx(k-h). \quad (11)$$

3.2.2 采样间隔内无数据包到达

此时, 由于采样系统中 DA 模块的作用, 将延用上一时刻数据包处理器的输出控制值进行控制, 即 $u(k) = u(k-1)$. 令 $W(k) = 0$, 则此时设备状态可由式(11)描述.

需要注意的是, 如果连续 l 个采样区间无数据包到达, 则

$$u(k) = u(k-1) = \dots = u(k-l) = Kx(k-k-l),$$

此时设备上的执行器长时间无法获取最新的状态反馈控制信息, 系统可能失去稳定. 因此必须限制 l 的最大允许值. 由时滞条件(3)可得

$$l \leq \frac{2 - \tau - k-l}{T}. \quad (12)$$

综上所述, 通过引入设计的数据包处理器, 可将网络下的被控对象状态方程等效为式(11). 本文的设计目的是确定状态反馈控制器, 使得时滞条件(3)下基于因特网的共享控制系统中的被控设备(11)能够渐近稳定.

4 稳定性分析与控制器设计

首先介绍如下两条引理:

引理 1 X 和 Y 为适当维数矩阵, 则对于任意正实数 ϵ , 有如下不等式成立:

$$XY^T + YX^T \leq \epsilon XX^T + \frac{1}{\epsilon} YY^T.$$

引理 2^[9,10] 时滞条件(3)下, 如果存在对称正

定矩阵 P, Q, R , 矩阵 $X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{12}^T & X_{22} \end{bmatrix} \leq 0$, 以及适当维数矩阵 Y 和 Z , 使得如下不等式成立:

$$= \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & (A-I)^T T \\ \Phi_{12}^T & \Phi_{22} & K^T B^T T \\ T(A-I) & TBK & -T \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

$$= \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & Y \\ X_{12}^T & X_{22} & Z \\ Y^T & Z^T & R \end{bmatrix} \leq 0, \quad (14)$$

则满足时滞条件的状态反馈系统(4)是渐近稳定的. 其中

$$\begin{aligned} \Phi_{11} &= P(A-I) + (A-I)^T P + Y + Y^T + \\ &\quad (d_2 - d_1 + 1)Q + d_2 X_{11}, \\ \Phi_{12} &= PBK - Y + Z^T + d_2 X_{12}, \\ \Phi_{22} &= -Z - Z^T - Q + d_2 X_{22}, \\ T &= P + d_2 R. \end{aligned}$$

在此基础上, 得到基于因特网对共享控制系统中设备(11)下的稳定性结论:

定理 1 时滞条件(3)下, 如果存在: 对称正定

矩阵 L, M , 矩阵 $\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{12}^T & \Phi_{22} \end{bmatrix} \leq 0$, 以及任意适当维数的矩阵 N_1, N_2, V , 标量 $\alpha > 0, \beta > 0$, 使得下列矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} H & G^T \\ H^T & -I & 0 \\ G & 0 & -L \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & N_1 \\ \Phi_{12}^T & \Phi_{22} & N_2 \\ N_1^T & N_2^T & -L \end{bmatrix} \leq 0, \quad (16)$$

则满足时滞条件(3)的被控设备(11)渐近稳定, 控制器可取为 $K = VL^{-1}$. 其中

$$= \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & L(A-I)^T \\ \Phi_{12}^T & \Phi_{22} & V^T B^T \\ (A-I)L & BV & -(1 + \alpha/d_2)L \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \Phi_{11} &= (1 + d_2 - d_1)M + (A-I)L + \\ &\quad L(A-I)^T + N_1 + N_1^T + d_2 \Phi_{11}, \\ \Phi_{12} &= BV + N_2^T - N_1 + d_2 \Phi_{12}, \\ \Phi_{22} &= -M - N_2 - N_2^T + d_2 \Phi_{22}. \end{aligned}$$

证明 分别对式(13), (14)作如下初等变换:

$$\text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, T^{-1}\} \text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, T^{-1}\},$$

$$\text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}\} \text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}\},$$

并且令

$$\begin{aligned} M &= P^{-1}QP^{-1}, L = P^{-1}, V = KP^{-1}, \\ \Phi_{ij} &= P^{-1}X_{ij}P^{-1}, i = 1, 2, j = 1, 2, \\ N_1 &= P^{-1}YP^{-1}, N_2 = P^{-1}ZP^{-1}, \end{aligned}$$

则由引理 2 有

$$\begin{bmatrix} 11 & 12 & L(A - I)^T \\ 12^T & 22 & V^T B^T \\ (A - I)L & BV & -d_2^1 R^{-1} - L \end{bmatrix} < 0, \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} 11 & 12 & N_1 \\ 12^T & 22 & N_2 \\ N_1^T & N_2^T & LRL \end{bmatrix} 0. \quad (18)$$

作变换 $R = (L)^{-1}$ 则避免了矩阵不等式(18)中含有的非线性项 LRL , 并且此时式(18)成为式(16), 从而式(16)得证. 同时, 式(17)左侧即为 Φ , $\Phi < 0$. 用 $B + W(k)$ 替换 Φ 中的 B , 并且令 $H^T = [0 \quad 0 \quad V^T]$, $G = [0 \quad 2V \quad 0]$, 可得

$$\Phi = \Phi + HW(k)G + G^T W^T(k)H^T < 0.$$

把 $HW(k)$ 看作一个矩阵, 由引理1和式(10)知上式成立的充分条件为

$$\Phi + HH^T + W^{-1}GG^T < 0,$$

即

$$- [H \quad G^T] \begin{bmatrix} -I & 0 \\ 0 & -L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H^T \\ G \end{bmatrix} < 0.$$

由 Schur 补引理, 上式等价于式(15).

基于因特网的共享控制系统, 通过定义不同的时滞区间, 利用此定理在 Matlab 提供的 LMI 工具包, 可以求出当网络环路时延大小分布在定义的时滞区间内时, 使系统保持稳定的时滞依赖鲁棒控制器. 在此控制器作用下, 可以克服控制信息在因特网上传输时的时变时延对系统控制性能的不利影响, 提高控制品质.

5 实验结果

仿真与实验采用的被控对象为电液伺服控制液压实验台, 其在油温 27°C , 油压 5MPa , 采样周期 $T = 10\text{ms}$ 的条件下辨识获得的离散状态方程为

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1.36 & -0.28 & -0.33 \\ 0.16 & 0.65 & 0.03 \\ 4.95 & -6.43 & -1.61 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 2.99 \\ 2.01 \\ 1.01 \end{bmatrix} u(k),$$

$$y(k) = [0.012 \quad 0.016 \quad -0.003] x(k).$$

通过 Matlab 的 LMI 工具箱求得当时滞条件为 $15T < 25T$ 时, 鲁棒控制器为 $K = [0.016 \quad 0.044 \quad 0.011]^T$. 实验时具体条件为: 1) 网络环境: 服务器处于中国电信 512 K ADSL 拨号网络, 用户和设备处于 CERNET 的北京理工大学校园网; 2) 被控电液伺服控制液压实验台: 油温 $25 \sim 32^\circ\text{C}$, 油压 $4.95 \sim 5.02\text{MPa}$.

当系统处于稳定状态而受到外界扰动时实测的网络时延和系统的状态变化分别如图4和图5(其中 x_1, x_2, x_3 为被控设备的观测状态) 所示.

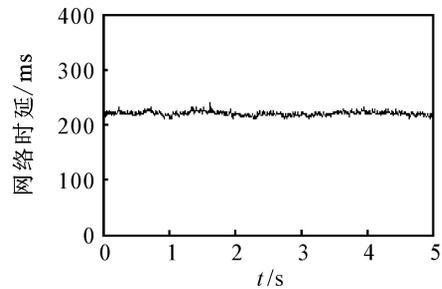


图4 实测 UDP 协议下因特网的网络环路时延

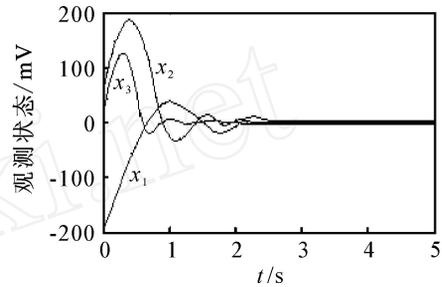


图5 扰动作用下系统的状态调整过程

而系统在单位阶跃输入下的实测网络时延和输出响应分别如图6和图7所示.

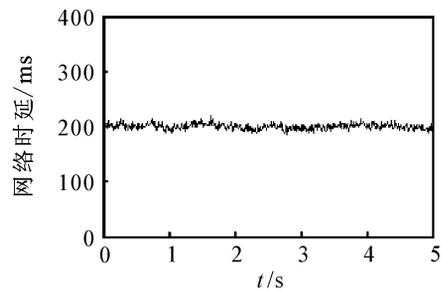


图6 实测 UDP 协议下因特网的网络环路时延

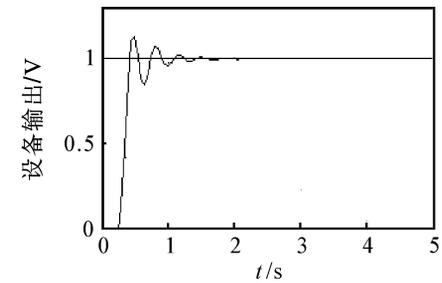


图7 单位阶跃输入时设备的输出曲线

以上实验结果表明, 在所给基于时滞鲁棒稳定性理论求得的状态反馈控制器作用下, 系统稳态误差基本为零, 且具有较好的抗扰动能力和控制性能.

6 结论

1) 共享控制系统采用大众因特网作为信息传输媒介, 在网络时延、数据包传输时序等问题上较传统的网络控制系统的情况更加复杂.

2) 在一个采样时间间隔内, 数据包可能发生单包到达、多包到达和无包到达的现象, 使得系统的建模和稳定性分析难度大大增加.

3) 本文设计了有效的数据包处理器, 对接收到

的含有控制信息的数据包进行再处理,在保障系统控制性能和基本的假设前提下,大大简化了系统的建模。

4) 本文从时滞依赖鲁棒稳定的角度出发,提出了使系统渐近稳定的状态反馈控制器的设计方法。仿真和实验结果证明了该方法是有效的。

参考文献(References)

- [1] 吴平东,林理平. 一种基于 Internet 的共享实验系统结构[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(3): 235-238.
(Wu P D, Lin L P. Structure of internet-based laboratory sharing system[J]. J of Beijing Institute of Technology, 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[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(5): 403-407.
(Zhong M E, Wu P D. Building an internet based shared control system [J]. J of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(5): 403-407.)
- [3] Asok R, Yoram H. Integrated communication and control systems: Part [J]. J of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1988, 110(4): 374-381.
- [4] Luck R, Ray A. An observer based compensator for distributed delays[J]. Automatica, 1990, 26(5): 903-908.
- [5] Nilsson J. Real time control systems with delays [D]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1998.
- [6] Walsh G C, Ye H. Scheduling of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 57-65.
- [7] Park H S, Kim Y H, Kim D S, et al. A scheduling method for network based control systems [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 318-330.
- [8] 赵虹,吴敏. 带时变时延的网络化控制系统控制器的设计方法[J]. 信息与控制, 2006, 35(3): 325-328.
(Zhao H, Wu M. A controller design method for networked control systems with time-varying delays[J]. Information and Control, 2006, 35(3): 325-328.)
- [9] 何勇. 基于自由权矩阵的时滞相关鲁棒稳定与镇定 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.
(He Y. Delay-dependent robust stability and stabilizing based on free weighting matrices [D]. Changsha: Central South University, 2004.)
- [10] Xie L. Output feedback control of systems with parameter uncertainty[J]. Int J of Control, 1996, 63(4): 741-750.

(上接第 882 页)

参考文献(References)

- [1] Peng J X, Li K, Huang D S. A hybrid forward algorithm for RBF neural network construction [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2006, 17(6): 1439-1451.
- [2] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1985, 15(1): 117-132.
- [3] Leith D J, Leithead W E. Analytic framework for blended multiple model systems using linear local models [J]. Int J of Control, 1999, 72(7): 605-619.
- [4] Verdult V, Ljung L, Verhaegen M. Identification of composite local linear state-space models using a projected gradient search[J]. Int J of Control, 2002, 75(16): 1385-1398.
- [5] Qin S J, Lin W, Ljung L. A novel subspace identification approach with enforced causal models[J]. Automatica, 2005, 41(2): 2043-2053.
- [6] Isaksson A. Identification of ARX-models subject to missing data [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1993, 38(5): 813-819.
- [7] Dennis J E, Schnabel R B. Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1983.
- [8] Favoreel W, Moor B D, Overschee P V. Subspace state space system identification for industrial processes[J]. J of Process Control, 2000, 10(2): 149-155.
- [9] Vanbleu K, Ysebaert G, Cuyper G, et al. Adaptive bit rate maximizing time-domain equalizer design for DMT-based systems [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(2): 483-498.
- [10] Gibson S, Wills A, Ninness B. Maximum-likelihood parameter estimation of bilinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(10): 1581-1595.