

一类非均匀采样非线性系统的 无模型自适应控制

王宏伟, 连捷, 夏浩

(大连理工大学控制科学与工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 对一类未知的非均匀采样离散时间非线性非仿射系统, 基于在受控系统当前工作点处的等价数据模型, 利用输入输出数据对伪雅可比矩阵(PJM)的在线估计, 设计出相应的无模型自适应控制器. 所提出的控制方法具有如下特点: 控制器的设计仅需要非均匀采样的输入输出数据, 不包含系统模型的任何信息; 控制算法计算量小, 算法容易实现. 最后, 通过一个非均匀采样离散时间非线性系统仿真结果验证提出方法的有效性.

关键词: 无模型控制; 非均匀采样系统; 多采样率; 非线性系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)04-0814-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.04.007

A Model-Free Adaptive Control Approach of a Class of Non-Uniformly Sampled Nonlinear Systems

WANG Hong-wei, LIAN Jie, XIA Hao

(School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: For a class of unknown non-uniformly sampled discrete time nonlinear non-affine systems, the corresponding model free adaptive controller is designed by using equivalent data model in the current working point and the non-linear estimation of pseudo Jacobi matrix (PJM) by using input and output data. The proposed control method has the following characteristics: the designed controller requires only the non-uniformly sampled input and output data, and does not contain any information of the system model. The control algorithm has small calculation amount, and is easy to achieve. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by the simulation results of a non-uniformly sampled discrete-time nonlinear system.

Key words: model-free control; non-uniformly sampling systems; multi-rates; nonlinear systems

1 引言

非均匀多采样率系统是现代工业控制中广泛存在的一类系统, 受各种条件的限制, 例如, 人工采样, 数据丢失, 时基抖动或传输延迟等, 系统的输入信号和输出信号呈现出了不同的非均匀采样频率. 非均匀多采样率系统在增加控制系统复杂性的同时, 也提高了系统的控制性能, 具有一般多采样率系统所不具备的优点. 例如: 若原连续系统时间系统是可控可测的, 则其非均匀的离散系统是可控和能达的^[1].

当系统的控制输入信号非均匀周期刷新, 输出信

号周期采样, 是一类特殊的非均匀采样系统, 简称输入非均匀刷新和输出周期采样系统. 对此类系统, 很多文献做了辨识和控制方法的研究. 针对此类含有有色噪声的非均匀采样离散线性系统, 文献[2,3]提出了多模型的自校正控制. 首先, 将非均匀刷新和周期采样系统分解为多个子系统, 根据占空比分配跟踪系统的期望输出, 根据误差设计自校正控制器. 文献[4]提出了基于最优控制原理, 对非均匀刷新和输出周期采样线性系统进行了控制方法研究. 文献[5]采用脉冲理论和傅里叶变换对非均匀刷新和输出周期采样线性系统进行了控制方法的研究.

上述方法无论是辨识和控制,都是针对非均匀采样线性系统展开的,对于非均匀采样非线性系统的控制方法涉及不多.大多数实际的工业控制过程本质上都是非线性系统,对于非线性系统自适应控制,可以采用模型参考自适应^[6]、自适应反步控制^[7]、滑模自适应控制^[8],然而这些方法往往需要精确已知受控系统的模型.然而,实际的系统往往模型是未知的,准确的数学模型很难得到.另外,也可以采用神经网络^[9]和模糊控制^[10]等不依赖受控系统的精确模型信息进行控制器的设计.除此上述控制方法外,还有无模型自适应控制^[11-14].该方法针对离散时间非线性系统使用了一种新的动态线性化方法以及伪偏导数(Pseudo Partial Derivative, PPD)的技术,在闭环系统的每个动态工作点处建立一个等价的动态线性化数据模型,然后基于此等价的虚拟数据模型设计控制器.该控制方法已在化工过程,直线电机控制,注模过程、PH 控制得到成功应用.

在本文中,对未知的输入非均匀刷新,输出周期采样离散时间非线性非仿射系统,基于在受控系统当前工作点处的等价数据模型,利用输入输出采样数据对模型中伪雅可比矩阵(Pseudo Jacobian Matrix, PJM)的在线估计,设计出相应的无模型自适应控制方器.另外,本文还对控制算法的收敛性、参数的选择等性能进行了分析.最后,对于非均匀采样非线性系统进行了仿真验证,以证明提出方法的有效性.

2 非均匀采样系统的问题描述

2.1 非均匀采样非线性模型

假设 $x(t) \in R^n, y(t) \in R^l, u(t) \in R^l$. 考虑连续非线性函数为:

$$S_p: \begin{cases} \dot{x}(t) = F[x(t), u(t)] \\ y(t) = h(t) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中的控制信号有如下关系:

$$u(t) = \begin{cases} u(kT), & kT \leq t < kT + t_1 \\ u(kT + t_1), & kT + t_1 \leq t < kT + t_2 \\ \vdots & \vdots \\ u(kT + t_{p-1}), & kT + t_{p-1} \leq t < (k+1)T \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,非均匀刷新时间间隔为 τ_i ,为采样前一时刻 t_{i-1} 和后一时刻 t_i 的差,即 $\tau_i = t_i - t_{i-1}, t_i = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_i$ (设 $t_0 = 0, t_p = T$), $T = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_p = t_p$ 称为更新周期(帧周期).控制信号 u 在第 k 个周期 $[kT, kT + T), k = 0, 1, 2, \dots$, 以 $t = kT + t_i, i = 1, 2, \dots, p$ 非均匀刷新 p 次. 输出量 y 以 T 为周期均匀采样,即在 $[kT, kT + T)$ 内, $y(t) = y(kT)$. 此时, $x(kT + T)$ 是以 $x(kT)$ 为初值的微分方程 $\dot{x}(t) = F(x(t), u(t))$ 的解,即

$$\begin{cases} x(kT + T) = f[x(kT), u(kT + t_1), \dots, u(kT + t_{p-1})] \\ y(kT) = h(x(kT)) \end{cases} \quad (3)$$

采用提升技术,提升变量构造如下:

$$\bar{u}(kT) = \begin{bmatrix} u_1(kT) \\ u_2(kT) \\ \vdots \\ u_p(kT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(kT) \\ u(kT + t_1) \\ \vdots \\ u(kT + t_{p-1}) \end{bmatrix} \in R^{p \times 1}$$

此时,可将系统(3)转换如下离散系统,即

$$\begin{cases} x(kT + T) = f(x(kT), \bar{u}(kT)) \\ y(kT) = h(x(kT)) \end{cases} \quad (4)$$

2.2 线性模型与非线性模型的关系

对于一个线性连续系统 S_c ,其模型如下:

$$S_c: \begin{cases} \dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $x(t) \in R^n$ 是状态向量; $u(t) \in R^l$ 是控制输入; $y(t) \in R^l$ 是系统输出; A_c, B_c 和 C 为适当维数的矩阵. 由 2.1 节可知,采样数据分别为 $u(kT + t_i), i = 0, 1, 2, \dots, p-1$ 和 $y(kT)$. 在一个周期 T 内对模型(5)进行离散化,

$$\begin{cases} x(kT + T) = Ax(kT) + B\bar{u}(kT) \\ y(kT) = Cx(kT) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $A = e^{A_c T} \in R^{n \times n}; B_c \in \int_0^T e^{A_c t} dt, B_c \in R^{n \times l}, B_i = e^{A_c(T-t_i)}, B_i \in R^{n \times l}, B = [B_1, B_2, \dots, B_p] \in R^{n \times pl}; \bar{u}(kT) = [u(kT), u(kT + t_1), \dots, u(kT + t_{p-1})]^T$ (“ T ”为矩阵的转置符号). 若 S_c 可测,则 $[(C)^T, (CA)^T, \dots, (CA^{n-1})^T]^T$ 的秩为 n .

引入后移算子 z^{-1} , 其为 $z^{-1}u(kT + t_i) = u(kT + t_i - T)$, 或前移算子 z , 其满足 $zx(kT) = x(kT + T)$, 由式(6)可得

$$y(kT) = \sum_{i=0}^{p-1} \frac{z^{-n} \text{Cadj}[zI_n - A] B_i}{z^{-n} \det[zI_n - A]} u(kT + t_i)$$

其中 I_n 为 n 阶单位矩阵, 上式也可以表示为有理分式的形式,

$$y(kT) = \sum_{i=0}^{p-1} \frac{b_i(z^{-1})}{a(z^{-1})} u(kT + t_i) \quad (7)$$

其中

$$a(z^{-1}) = z^{-n} \det[zI_n - A] = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n},$$

$$b_0(z^{-1}) = b_{00} z^0 + b_{01} z^{-1} + b_{02} z^{-2} + \dots + b_{0n} z^{-n},$$

$$b_i(z^{-1}) = b_{i1} z^{-1} + b_{i2} z^{-2} + \dots + b_{in} z^{-n},$$

$$i = 1, 2, \dots, p-1; j = 1, 2, \dots, n.$$

对于非线性系统(4)与线性系统(7)的关系是:非线性系统 S_p 可以看作是在多个工作点的局部线性模型(6),经过非线性加权组合得到,即

$$y(kT) = \sum_{i=1}^c f_i[\phi(kT)] g_i[\phi(kT)] \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \phi(kT) = & [y(kT-T), \dots, y(kT-nT), u(kT-T), \dots, \\ & u(kT-nT), u(kT+t_1-T), \dots, u(kT+t_1-nT), \dots, \\ & u(kT+t_{p-1}-T), \dots, u(kT+t_{p-1}-nT)]^T \end{aligned}$$

$f_l[\phi(kT)]$ 是第 l 个非线性加权函数; $g_l[\phi(kT)]$ 是在第 l 个工作点处的局部线性模型. 模型(8)还可写为一般形式:

$$y(kT) = f(\phi(kT)) \quad (9)$$

3 无模型自适应控制

对于模型(9), 可以看做多输入单输出(MISO)系统, 其可表示为:

$$y(kT+T) = f(y(kT), \dots, y(kT-n_yT), \mathbf{u}(kT), \dots, \mathbf{u}(kT-n_uT)), \quad n_y = n_u = n-1 \quad (10)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(kT) &= \begin{bmatrix} u(kT) \\ u(kT+t_1) \\ \vdots \\ u(kT+t_{p-1}) \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{u}(kT-n_uT) \\ &= \begin{bmatrix} u(kT-(n-1)T) \\ u(kT+t_1-(n-1)T) \\ \vdots \\ u(kT+t_{p-1}-(n-1)T) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

分别表示 $kT, \dots, kT-n_uT$ 时刻的输入, $\mathbf{u} \in R^p$. n_y 和 n_u 是两个未知正整数; $f(\dots) \in \prod_{n_y+1} R \times \prod_{n_u+1} R^p \rightarrow R^p$ 是未知的非线性函数.

假设 1^[14] $f(\dots)$ 关于第 n_y+2 个变量具有连续偏导数.

假设 2^[14] 系统(10)满足广义 Lipschitz 条件, 即对任意 $k_1 \neq k_2, k_1, k_2 \geq 0$, 和 $\mathbf{u}(k_1T) \neq \mathbf{u}(k_2T)$ 有,

$$\|y(k_1T+T) - y(k_2T+T)\| \leq b \|\mathbf{u}(k_1T) - \mathbf{u}(k_2T)\|$$

其中, $y(k_iT+T) = f(y(k_iT), \dots, y(k_iT-n_yT), \mathbf{u}(k_iT), \dots, \mathbf{u}(k_iT-n_uT))$,

$b > 0$ 是一个常数.

定理 1 对于满足假设 1 和假设 2 的非线性系统(10), 当 $\|\Delta \mathbf{u}(kT)\| \neq 0$ 时, 一定存在一个被称为伪雅可比矩阵(PJM)的时变参数 $\Phi_c(kT) \in R^{p \times 1}$, 使得系统(10)可转为如下紧格式动态线性化(CFDL)数据模型,

$$\Delta y(kT+T) = \Phi_c^T(kT) \Delta \mathbf{u}(kT) \quad (11)$$

其中 $\Phi_c(kT) = [\phi_1(kT) \ \dots \ \phi_p(kT)]^T \in R^{p \times 1}$, 并且 $\|\Phi_c(kT)\| \leq b$, b 是一个正常数, $\Delta y(kT+T) = y(kT+T) - y(kT)$, $\Delta \mathbf{u}(kT) = \mathbf{u}(kT) - \mathbf{u}(kT-T)$.

由于论文篇幅的限制, 这里证明略.

考虑如下控制目标函数,

$$J(\mathbf{u}(kT)) = \|\mathbf{y}^*(kT+T) - y(kT+T)\|^2 + \lambda \|\mathbf{u}(kT) - \mathbf{u}(kT-T)\|^2 \quad (12)$$

其中, $\lambda > 0$ 是权重因子, 用于控制输入量的变化; $\mathbf{y}^*(kT+T)$ 为期望的输出信号.

将式(11)代入目标函数(12)中, 对 $\mathbf{u}(kT)$ 求导, 并令其等于零, 可得控制算法,

$$\mathbf{u}(kT) = \mathbf{u}(kT-T) + \frac{\rho \Phi_c(kT) (\mathbf{y}^*(kT+T) - y(kT))}{\lambda + \|\Phi_c(kT)\|^2} \quad (13)$$

其中, 步长因子 ρ 的加入可使控制算法更具一般性.

在控制算法(13)中, 需要计算伪偏导数向量(PJM) $\Phi_c(kT)$, 为此给出如下目标函数,

$$J(\Phi_c(kT)) = \|\Delta y(kT) - \Phi_c^T(kT) \Delta \mathbf{u}(kT-T)\|^2 + \mu \|\Phi_c(kT) - \hat{\Phi}_c(kT-T)\|^2 \quad (14)$$

其中, $\mu > 0$ 是权重因子, 用于控制伪偏导数向量估值的过大变化.

极小化目标函数(14), 可得到如下的投影算法,

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_c(kT) &= \hat{\Phi}_c(kT-T) + (\Delta y(kT) \\ &\quad - \hat{\Phi}_c^T(kT-T) \Delta \mathbf{u}(kT-T)) \Delta \mathbf{u}(kT-T) \\ &\quad \cdot (\mu \mathbf{I} + \Delta \mathbf{u}(kT-T) \Delta \mathbf{u}^T(kT-T))^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

由于 PJM 估计算法(15)中包含一个矩阵求逆的计算, 当系统输入输出维数很大时, 求逆运算非常耗时, 不利于实际应用. 因此, 采用改进的 PJM 估计算法,

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_c(kT) &= \hat{\Phi}_c(kT-T) \\ &\quad + \frac{\eta \Delta \mathbf{u}(kT-T) (\Delta y(kT) - \hat{\Phi}_c^T(kT-T) \Delta \mathbf{u}(kT-T))}{\mu + \|\Delta \mathbf{u}(kT-T)\|^2} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, η 为步长.

采用了参数估计算法(16)和控制算法(13), 可以得到无模型自适应控制策略,

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_c(kT) &= \hat{\Phi}_c(kT-T) \\ &\quad + \frac{\eta \Delta \mathbf{u}(kT-T) (\Delta y(kT) - \hat{\Phi}_c^T(kT-T) \Delta \mathbf{u}(kT-T))}{\mu + \|\Delta \mathbf{u}(kT-T)\|^2} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_i(kT) &= \hat{\phi}_i(T), \text{ 如果 } |\hat{\phi}_i(kT)| < \varepsilon \text{ 或} \\ &\quad \text{sign}(\hat{\phi}_i(kT)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}_i(T)), i=1, \dots, p \end{aligned} \quad (18)$$

$$\mathbf{u}(kT) = \mathbf{u}(kT-T) + \frac{\rho \hat{\Phi}_c(kT) (\mathbf{y}^*(kT+T) - y(kT))}{\lambda + \|\hat{\Phi}_c(kT)\|^2} \quad (19)$$

其中, $\hat{\Phi}_c(kT) = [\hat{\phi}_1(kT) \ \dots \ \hat{\phi}_p(kT)]^T \in R^{p \times 1}$ 是系统(11)的紧格式线性化数据模型的伪偏导数估计值; $\hat{\phi}_1(T)$ 为 $\hat{\phi}_i(kT)$ 的初值; $i=1, \dots, p$; $\lambda > 0, \mu > 0, \rho \in (0, 1), \eta \in (0, 1), \varepsilon$ 是一个小的正数.

4 性能分析

控制器中的参数 λ, μ, ρ, η 的取值对于自适应控制很重要, 为此进行下面讨论. 首先, 给出下面引理.

引理 1 对于非均匀采样系统(11),在假设 1.2 满足的条件下,若 μ, η 的选取满足 $\mu > 0, \eta \in (0, 1)$, 则估计算法(16)给出的伪偏导数估计值 $\hat{\Phi}_c(kT)$ 是有界的. 由于论文篇幅的限制,证明略.

引理 2 定义 $\vartheta(kT) = \frac{\rho \Phi_c^T(kT) \hat{\Phi}_c(kT)}{\lambda + \|\hat{\Phi}_c(kT)\|^2}$, 若选择 λ, ρ , 满足条件 $\lambda > \frac{(\rho b)^2}{4}$ 则存在正的常数 d_1 和 d_2 使得

$$0 \leq d_1 \leq \vartheta(kT) \leq d_2 < 1 \quad (20)$$

由于论文篇幅的限制,证明略.

定理 2 对于非均匀采样系统(11),在假设 1.2 的条件下,采用式(17)~(19)的控制方案,当系统的期望输出为 $y^*(kT+T) = y^* = \text{const}$ 时,若控制器参数满足 $\mu > 0, \eta \in (0, 1), \lambda > \frac{(\rho b)^2}{4}$, 则系统输出在 $k \rightarrow \infty$ 时,存在 $\lim_{k \rightarrow \infty} y(kT+T) = y^*$.

由于论文篇幅的限制,证明略.

5 仿真实例

考虑一个非均匀采样的非线性系统如下:

$$y(kT+T) = \begin{cases} \begin{cases} u(kT) + 1.1u(kT+t_1-T) \\ \cdot \frac{5y(kT)y(kT-T)}{1+y^2(kT)+y^2(kT-T)+y^2(kT-2T)}, \\ k \leq 500 \end{cases} \\ \begin{cases} \frac{2 \cdot 5y(kT)y(kT-T)}{1+y^2(kT)+y^2(kT-T)} \\ + 1.2u(kT) + 1.4(kT+t_1-T) \\ + 0.7\sin(0.5(y(kT)+y(kT-T))) \\ \cdot \cos(0.5(y(kT)+y(kT-T))), \\ k > 500 \end{cases} \end{cases}$$

该系统是由两个非线性子系统串联连接成的. 非均匀采样方案为: 帧周期 $T = 1\text{s}, p = 2, t_1 = 0.4\text{s}$. 通过对非线性系统的分析, 第一个和第二个子系统都是非线性、非最小相位系统.

期望输出信号为:

$$y(kT+T) = \begin{cases} 5\sin(kT\pi/50) + 2\cos(kT\pi/100), & k \leq 300 \\ 5(-1)^{\text{round}(k/100)}, & 300 < k \leq 700 \\ 5\sin(kT\pi/50) + 2\cos(kT\pi/100), & k > 700 \end{cases}$$

分别选取权重因子 $\lambda = 0.4$ 和 $\mu = 1$, 和 $\lambda = 2.5$ 和 $\mu = 1$, 对非均匀采样非线性系统进行控制. 从图 1 仿真效果来看, 当权重取为 $\lambda = 0.4$ 和 $\mu = 1$ 时, 系统的闭环反应很快, 但其超调却很大. 其次, 当权重取为 $\lambda = 2.5$ 和 $\mu = 1$ 时, 从图 2 仿真效果来看, 即使非均匀采样非线性系统在参数和结构发生变化时, 系统仍能很好地跟踪期望的输出; 从图 3 看出, 伪偏导数向量中的元素 $\phi_1(kT)$ 和 $\phi_2(kT)$ 的变化都是慢时变的有界函数, 变化

较平稳, 其动力学行为与闭环系统工作点、控制信号以及系统本身的动力学等有关.

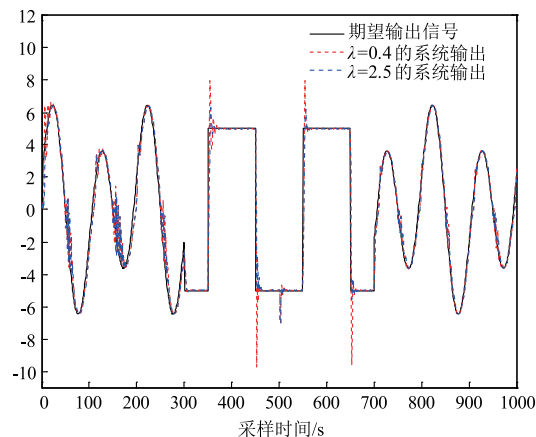


图1 非均匀采样系统的跟踪过程

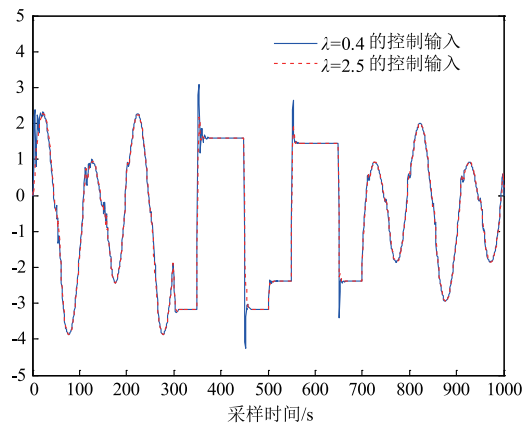


图2 控制输入信号

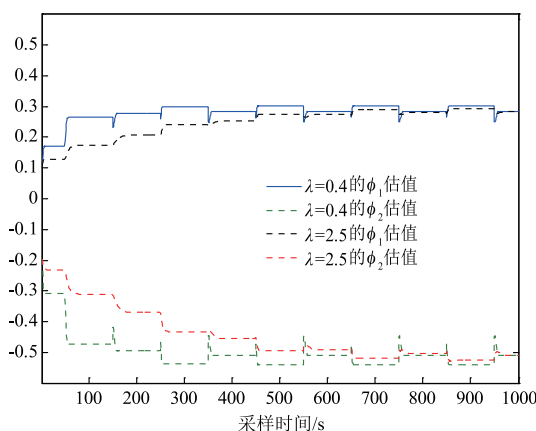


图3 系统伪偏导数的变化

另外, 为了说明本文的方法有效性, 我们与文献 [15] 控制方法进行了比较. 文献 [15] 采用了多模型的非均匀采样系统自校正控制方法. 表 1 给出了本文方法和文献 [15] 对实例系统控制后的跟踪误差的性能比较.

表 1 本文方法与文献[15]的性能比较

控制方法	误差均方根	每次控制乘法次数	每次控制除法
本文方法($\lambda=0.4$)	0.098	4次	2次
本文方法($\lambda=2.5$)	0.068	4次	2次
文献[15]方法	0.214	10次	6次

通过仿真实验结果和与文献比较,本文提出的控制算法具有良好的控制效果,计算量小,实现难度小于基于模型的控制算法,因此,适用于非均匀采样非线性系统的在线自适应控制。

6 结论

在本文中,对输入非均匀刷新和输出均匀采样的离散时间非线性系统,提出了无模型的自适应控制。主要贡献在:(1)分析了非均匀采样的非线性系统与线性系统之间的关系;(2)基于在受控系统当前工作点处的等价数据模型,利用输入输出数据对伪雅可比矩阵(Pseudo Jacobian Matrix)的在线估计,设计出相应的无模型自适应控制器;(3)控制器的设计仅需要非均匀采样的现场输入输出数据,不包含系统模型的任何信息。对于输入和输出非均匀周期采样的非线性非仿射系统,我们还要在将来对其进行讨论和研究的。

参考文献

- [1] Sheng J, Chen T, Shah S L. Generalized predictive control for nonuniformly sampled systems[J]. Journal of Process Control, 2002, 12(8): 875-885.
- [2] Wang Hongwei. Adaptive control based on multiple sub-models and auxiliary variables for non-uniformly sampled data systems[A]. Proceedings of the 34th Chinese Control Conference[C]. Hangzhou, 2015. 2994-2999.
- [3] Wang Hongwei, Xia Hao. Self-tuning control scheme of non-uniformly sampled data systems with time delay and unknown colored noise[A]. 28th Chinese Control and Decision Conference[C]. Yinchuan, 2016. 4025-4030.
- [4] Pedro Albertos, Julián Salt. Non-uniform sampled-data control of MIMO systems[J]. Annual Reviews in Control, 2011, 35(1): 65-76.
- [5] A Cuenca, J Salt. RST controller design for a non-uniform multi-rate control system[J]. Journal of Process Control, 2012, 22(10): 1865-1877.
- [6] Zhang Y, Wen C Y, Soh Y C. Robust adaptive control of uncertain discrete-time systems[J]. Automatica, 1999, 35(5): 321-329.
- [7] Zhang Y, Wen C Y, Soh Y C. Improved robust backstepping adaptive control for nonlinear discrete-time systems without overparameterization[J]. Automatica, 2008, 44(3): 864-867.
- [8] Chen X K. Adaptive sliding mode control for discrete-time

multi-input multi-output systems[J]. Automatica, 2006, 42(3): 427-435.

- [9] Yilmaz Sevcin, Oysal Yusuf. Nonlinear system modeling and control with dynamic fuzzy wavelet neural network[A]. 2015 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications[C]. USA: IEEE, 2015. 1024-1032.
- [10] Bangen, Sara, Hensleigh, James, McHugh, Peter, Wheaton, Joseph. Error modeling of DEMs from topographic surveys of rivers using fuzzy inference systems[J]. Water Resources Research, 2016, 52(2): 1176-1193.
- [11] Hou Z S, Bu X H. Model free adaptive control with data dropouts[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(8): 709-717.
- [12] Coelho L D S, et al. Model-free adaptive control design using evolutionary-neural compensator[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 499-508.
- [13] Zhang B, Zhang W D. Adaptive predictive functional control of a class of nonlinear systems[J]. ISA Transactions, 2006, 45(2): 175-183.
- [14] 侯忠生, 金尚泰. 无模型自适应控制[M]. 北京: 科学出版社. 2013.
HOU Zhongsheng, JIN Shangtai. Model Free Adaptive Control[M]. Beijing: Science Press. 2013. (in Chinese)
- [15] Tan K K, Lee T H, Huang S N, et al. Adaptive-predictive control of a class of SISO nonlinear systems[J]. Dynamics and Control, 2001, 11(2): 151-174.

作者简介



王宏伟 男, 1969年3月出生, 吉林长春人。工学博士, 教授。1999年毕业于哈尔滨工业大学自动控制系。现在大连理工大学控制科学与工程学院工作。已发表SCI、EI检索等论文110篇, 发明专利2项。主持和参与国家和地方项目5项。研究方向: 网络控制系统、多采样率系统控制、切换系统控制。

E-mail: wanghw@dlut.edu.cn



连捷 女, 1980年9月出生, 吉林白城人。工学博士, 教授。2009年毕业于东北大学控制科学与工程系。现在大连理工大学控制科学与工程学院工作。已发表SCI、EI检索等论文30篇。主持和参与国家和地方项目5项。研究方向: 网络控制系统、时滞系统控制、切换系统控制。

E-mail: jielian@dlut.edu.cn

夏浩 男, 1971年10月出生, 黑龙江哈尔滨人。工学博士, 教授。2000年毕业于University of Birmingham。现在大连理工大学控制科学与工程学院工作。已发表SCI、EI检索等论文32篇。主持和参与国家和地方项目5项。研究方向: 项目调度、生产运作管理、混杂系统控制等。

E-mail: hao.x.xia@dlut.edu.cn