

一类非线性参数化系统自适应重复学习控制

孙云平, 李俊民, 李靖

(西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对一类高阶非线性参数化系统, 利用分段积分机制, 提出了一种新的自适应重复学习控制方法, 该方法结合反馈线性化, 可以处理参数在一个未知紧集内周期性快时变的非线性系统, 通过引进微分-差分混合型参数自适应律, 设计了一种自适应控制策略, 使广义跟踪误差在误差平方范数意义下渐近收敛于零, 通过构造Lyapunov泛函, 给出闭环系统收敛的一个充分条件。实例仿真结果说明了该方法的可行性。

关键词: 非线性参数化系统; 混合型参数; 自适应控制; 重复学习控制; Lyapunov泛函

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive repetitive learning control for a class of nonlinearly parameterized uncertain systems

Sun Yunping, Li Junmin and Li Jing

(School of Science, Xidian University,
Xi'an 710071, China)

Abstract: Combining the pointwise integral mechanism with the feedback linearization approach, a novel adaptive repetitive learning control for high-order nonlinearly parameterized uncertain systems with time-varying and time-invariant parameters is proposed. It can be applied to the time-varying parametric uncertainty systems with unknown compact set, rapid time-varying, periodic and where the prior knowledge is the periodicity only. A differential-difference mixed-type adaptive law and an adaptive repetitive learning control one are constructed to ensure the asymptotic convergence of the extended tracking error in the sense of square error norm. Also, a sufficient condition of the convergence of the method is given by constructing a Lyapunov functional. A simulation example illustrates the feasibility of the proposed method.

Key words: nonlinearly parameterized uncertain systems; mixed parametric; adaptive control; repetitive learning control; Lyapunov functional

1 引言 (Introduction)

在工业应用中,研究控制对象的系统动力既完全未知或部分未知,那么,不确定性非线性系统控制器设计问题成为控制领域中挑战性的主题。因此,在文献中,提出了各种控制方法论述了与系统动力相关的不确定性,但对含有时变参数不确定性系统,实施自适应控制还是一个公开难题^[1];若系统不确定性是已知周期参数,可用学习控制与反馈线性化相结合,在线估计系统不确定性,从而实现期望的结果^[2]。重复控制观念首先由文[3]提出的,对一类线性时不变系统,在频率域上,利用小增益定理对它进行收敛性分析。它能有效地处理重复跟

踪控制问题或抑制周期性干扰问题^[4],并广泛应用到机器人系统^[2],而当系统不确定性参数的周期预先知道,文[5]通过分段积分方法,构造了自适应控制器和参数周期自适应律,解决了一阶混合线性参数化不确定系统自适应控制问题;文[6]设计了自适应鲁棒重复学习控制,把Nussbaum-type函数与Backstepping方法相结合,能保证系统状态一致最终有界;文[7]对状态难以直接测量的不确定非线性系统,基于状态观测器进行相应的迭代学习控制设计,实现在给定区间上对变轨迹的精确跟踪;文[8]对含有混合参数的二阶非线性系统,结合Backstepping方法,使跟踪误差平方的积分范数

渐近收敛于零. 然而, 有关非线性参数化非线性系统重复学习控制的文献至今还很少, 这是由于很困难对它进行分析和设计. 文[9]对一类多线性参数化系统, 利用重参数化方法, 使复合标量误差渐近收敛于零; 文[10]针对非线性参数化不确定性系统, 设计了自适应学习控制, 保证了跟踪误差全局收敛于零; 文[11]对一类非线性参数化系统, 利用积分Lyapunov函数, 设计了学习控制策略, 有效解决了控制器奇异性问题. 但文[10]和[11]都要求未知时变参数上界预先知道. 本文对一类非线性参数化系统, 利用分段积分机制, 提出一种自适应重复学习控制方法, 该方法可以处理参数在一个未知紧集内周期性快时变的非线性系统, 通过引入微分-差分混合型自适应学习律, 设计了自适应控制策略, 未知时变参数的上界不必预先知道, 使广义跟踪误差 $\sigma(t)$ 在 L_T^2 -范数意义下渐近收敛于零. 实例仿真说明了该方法的可行性.

在本文中, 函数 $f(s)$ 的 L_T^2 -范数, $s \in [t-T, t]$, 定义为 $\int_{t-T}^t f^2(\tau) d\tau$, T 为已知的有限正常数.

2 问题描述 (Problem descriptions)

考虑下列非线性不确定性系统:

$$\dot{x} = Ax + C[\theta_1(t)\xi(x, t)\theta_2 + bu(t)], x(0) = x_0 \quad (1)$$

其中 $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))^T \in R^m$ 是可测的系统状态向量, $u(t) \in R$ 是系统控制输入, b 是符号已知, 但其值未知的常数增益, 不失一般性, 设 $b > 0$, $\theta_1(t) = (\theta_{1,1}(t), \dots, \theta_{1,p}(t)) \in R^{1 \times p}$ 是连续的未知时变参数向量, $\theta_2 = (\theta_{2,1}, \dots, \theta_{2,p})^T \in R^{p \times 1}$ 是未知的时不变参数向量, $\xi(x, t) = \text{diag}[\xi_1(x, t), \xi_2(x, t), \dots, \xi_p(x, t)]$ 是已知的矩阵值函数. $A = \begin{bmatrix} 0 & I_{(m-1) \times (m-1)} \\ \vdots & \\ 0 \dots & 0 \end{bmatrix}$, $C = [0, 0, \dots, 1]^T$. $x_r(t) = (x_{r,1}(t), \dot{x}_{r,1}(t), \dots, x_{r,1}^{(m-1)}(t))^T \in R^m$ 是参考对象的状态向量, 目标轨线是 $x_{r,1}(t)$, $x_r(0)$ 是参考对象的初值.

注1 对于一般情况 $\theta_1(t)\xi(x, t)\theta_2$, $\theta_1(t) \in R^{1 \times p}$, $\xi(x, t) \in R^{p \times q}$, $\theta_2 \in R^{q \times 1}$, 可把矩阵和向量分别进行分块, 扩阶, 则可化成 $\Theta(t)\eta(x, t)\Omega$ 的形式, 其中 $\Theta(t) \in R^{1 \times m}$, $\Omega \in R^{m \times 1}$, ($m > p, q$), $\eta(x, t) \in R^{m \times m}$ 是对角矩阵. 然后利用双线性参数模型的设计思想^[1], 保证 $\Theta(t)$ 和 Ω 的每个分量分别都能够得到估计. 为了说明设计思想和方法, 不失一般性, 在本文中, $\theta_1(t)\xi(x, t)\theta_2$ 取为系统(1)的形式.

在本文中, 系统(1)及目标轨线 $x_{r,1}(t)$ 满足下

列假设:

假设1 θ_2 是未知的常参数向量(或增益向量), 但符号是已知的, 即 θ_2 的每个分量(增益)的符号都是已知的, 不失一般性, 设 $\theta_{2,s} > 0$, ($s = 1, 2, \dots, p$).

假设2 $\theta_1(t)$ 是周期为 T 的未知连续向量函数, 即 $\theta_1(t)$ 的每个分量都是周期为 T 的时间函数. 且在某个紧集内变化, 即存在正数 $\theta_{1,M} < \infty$, 使得 $\|\theta_1(t)\| \leq \theta_{1,M}$, 这里 $\theta_{1,M}$ 可以是未知常参数.

假设3 $\xi(x, t)$ 的每个元素关于 x 是李普希茨连续, 关于 t 是分段连续. 即 $\forall x^1, x^2 \in R^m$, 使得 $\|\xi_s(x^1, t) - \xi_s(x^2, t)\| \leq l_s \|x^1 - x^2\|$, ($s = 1, 2, \dots, p$), l_s 是未知李普希茨常数.

假设4 目标轨线 $x_{r,1}(t)$ 和它的一阶导数直到 m 阶导数在 L_T^2 -范数意义是有界的. 即

$$\int_{t-T}^t [x_{r,1}^{(k)}(\tau)]^2 d\tau < \infty, (k = 0, 1, \dots, m).$$

定义广义跟踪误差 $\sigma(t) = \sum_{i=1}^m c_i e_i(t)$, 其中 $e_i(t) = x_{r,i}(t) - x_i(t)$, ($c_m = 1$), c_i 是霍尔维茨多项式 $s^{m-1} + c_{m-1}s^{m-2} + c_{m-2}s^{m-3} + \dots + c_1$ 的系数, s 是Laplace算子.

控制目标是在周期自适应控制机制下, 保证 $\sigma(t)$ 在 L_T^2 -范数意义下渐近收敛于零, 并且也保证闭环系统所有信号均在 L_T^2 -范数意义下有界.

3 自适应重复学习控制的设计 (Adaptive repetitive learning control design)

$\sigma(t)$ 关于 t 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}(t) &= b[\Theta(t)\eta(x, t)\omega - u(t)] \\ &= b[\sum_{j=1}^{p+1} \Theta_j(t)\eta_j(x, t)\theta_{2,j} - u(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\Theta(t) = (\Theta_1(t), \Theta_2(t), \dots, \Theta_{p+1}(t))$, $\Theta_s(t) = b^{-1}\theta_{1,s}(t)$, ($s = 1, 2, \dots, p$), $\Theta_{p+1}(t) = 1$, $\omega = (\theta_2^T, b^{-1})^T = (\theta_{2,1}, \dots, \theta_{2,p}, b^{-1})^T$, $\theta_{2,p+1} = b^{-1}$, $\eta(x, t) = \text{diag}[\eta_1(x, t), \dots, \eta_p(x, t), \eta_{p+1}(x, t)]$, $\eta_s(x, t) = -\xi_s(x, t)$, ($s = 1, 2, \dots, p$), $\eta_{p+1}(x, t) = \sum_{i=1}^m c_i x_{r,i+1} - \sum_{i=1}^{m-1} c_i x_{i+1}$.

注2 显然 $\Theta(t)$ 是周期为 T 的未知连续时变参数向量, $\omega > 0$ 是未知常参数向量.

为了使收敛性分析简便, 除非特别说明, 以下 j 指的是($j = 1, 2, \dots, p+1$), $\eta_j = \eta_j(x, t)$. 根据系统(1)和(2)式的特点, 构造的学习控制律为

$$u(t) = K\sigma(t) + \sum_{j=1}^{p+1} \hat{\Theta}_j(t)\eta_j\hat{\theta}_{2,j}(t) \quad (3)$$

其中 $K > 0$ 是常数反馈增益, $\hat{\Theta}_j(t)$ 和 $\hat{\theta}_{2,j}(t)$ 分别

是 $\Theta_j(t)$ 和 $\theta_{2,j}$ 的估计量.

时变参数周期学习律为

$$\hat{\Theta}_j(t) = \begin{cases} \hat{\Theta}_j(t-T) + q_{1,j}\eta_j\sigma(t) & t \in [T, +\infty) \\ \frac{t}{T}q_{1,j}\eta_j\sigma(t) & t \in [0, T) \\ 0 & t \in [-T, 0) \end{cases} \quad (4)$$

时不变参数学习律为

$$\dot{\hat{\theta}}_{2,j}(t) = q_{2,j}\eta_j\hat{\Theta}_j(t)\sigma(t) \quad (5)$$

其中 $q_{2,j} > 0$ 和 $q_{1,j} > 0$ 分别是常数增益。设 $q_{0,j}(t) = \frac{t}{T}q_{1,j}$, $t \in [0, T)$, 则 $q_{0,j}(t)$ 在区间 $[0, T)$ 上是严格单调增加的连续函数, 满足 $q_{0,j}(0) = 0$, $q_{0,j}(T) = q_{1,j}$.

注3 时变增益 $q_{0,j}(t)$ 这样选取, 显然确保了 $\hat{\Theta}_j(t)$ 在 $[0, +\infty)$ 上的连续性, 从而进一步保证了(5)中 $\dot{\hat{\theta}}_{2,j}(t)$ 的连续性.(证明略).

把(3)式代入(2)式, 得

$$\dot{\sigma}(t) = b \sum_{j=1}^{p+1} (\tilde{\Theta}_j(t)\eta_j\theta_{2,j} + \hat{\Theta}_j(t)\eta_j\tilde{\theta}_{2,j}(t)) - bK\sigma(t) \quad (6)$$

其中 $\tilde{\Theta}_j(t) = \Theta_j(t) - \hat{\Theta}_j(t)$, $\tilde{\theta}_{2,j}(t) = \theta_{2,j} - \hat{\theta}_{2,j}(t)$.

4 收敛性分析 (Convergence analysis)

定理 1 系统(1)在假设1-假设4条件下, 学习控制律(3)式, 混和参数学习律(4)式和(5)式, 保证了(i)广义跟踪误差 $\sigma(t)$ 在 L_T^2 -范数意义下渐近收敛于零, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t-T}^t \sigma^2(\tau) d\tau = 0$; (ii)闭环系统所有信号均在 L_T^2 -范数意义下有界.

证 构造的Lyapunov泛函为

$$E(t) = \int_{t-T}^t \sum_{j=1}^{p+1} \frac{\theta_{2,j}}{2q_{1,j}} \tilde{\Theta}_j^2(\tau) d\tau + \frac{1}{2}b^{-1}\sigma^2(t) + \sum_{j=1}^{p+1} \frac{1}{2q_{2,j}} \tilde{\theta}_{2,j}^2(t) \quad (7)$$

这里 $q_{2,j} > 0$ 和 $q_{1,j} > 0$ 均是常数增益.

对任意 $t \geq T$, $E(t)$ 在一个周期区间 $[t-T, t)$ 差分为

$$\Delta E(t) = \frac{1}{2} \int_{t-T}^t \sum_{j=1}^{p+1} \frac{\theta_{2,j}}{q_{1,j}} [\tilde{\Theta}_j^2(\tau) - \tilde{\Theta}_j^2(\tau-T)] d\tau + \sum_{j=1}^{p+1} \frac{\tilde{\theta}_{2,j}^2(t) - \tilde{\theta}_{2,j}^2(t-T)}{2q_{2,j}} + \frac{\sigma^2(t) - \sigma^2(t-T)}{2b} \quad (8)$$

以下推导类似于文[5]的推导.利用(3),(4)和(5), 分别计算(8)右边每一项后, 其结果代入(8), 得

$$\Delta E(t) \leq \int_{t-T}^t -K\sigma^2(\tau) d\tau < 0 \quad (9)$$

$$b^{-1}\sigma(t)\dot{\sigma}(t) = -K\sigma^2(t)$$

$$+ \sum_{j=1}^{p+1} [\tilde{\Theta}_j(t)\eta_j\theta_{2,j} + \hat{\Theta}_j(t)\eta_j\tilde{\theta}_{2,j}(t)]\sigma(t) \quad (10)$$

$$1/q_{2,j}\tilde{\theta}_{2,j}(t)\dot{\tilde{\theta}}_{2,j}(t) = -\tilde{\theta}_{2,j}(t)\eta_j\hat{\Theta}_j(t)\sigma(t) \quad (11)$$

对 $\forall t \in [iT, (i+1)T)$, 记 $t = iT + t_0$, $t_0 \in [0, T)$, ($i = 1, 2, \dots$).显然, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $i \rightarrow \infty$, 重复应用(8)后, 并两端取极限, 得到

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) < -K \lim_{i \rightarrow \infty} \sum_{l=0}^{i-1} \int_{t-(l+1)T}^{t-lT} \sigma^2(\tau) d\tau + \max_{t_0 \in [0, T)} E(t_0) \quad (12)$$

因为 $E(t) \geq 0$, 如果 $\max_{t_0 \in [0, T)} E(t_0)$ 在区间 $[0, T)$ 上是有限的, 由(12)以及级数收敛性定理可知, 广义跟踪误差 $\sigma(t)$ 在 L_T^2 -范数意义下渐近收敛于零, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t-T}^t \sigma^2(\tau) d\tau = 0$. 因此, 只需证明 $\max_{t_0 \in [0, T)} E(t_0)$ 的有限性. 为了简便, 以下证明记 $t_0 = t$. 在 $[0, T)$ 上, 由(4)知 $\hat{\Theta}_j(t)$ 是连续的, 由微分方程解的存在性定理和假设3知, 存在有限正常数 $T_1 > 0$, 使得系统(1)在 $[0, T_1) \subset [0, T)$ 上存在唯一的连续解. 因而又只需证明当 $t \in [T_1, T)$ 时, $\max_{t \in [T_1, T)} E(t)$ 的有限性.

由 $q_{0,j}(t)$ 的选取, 因此, $q_{1,j} \geq q_{0,j}(t) \geq q_{0,j}(T_1) > 0$, 进一步有 $2q_{1,j} \geq q_{0,j}(t) > 0$, 即 $\lambda_j = \frac{1}{q_{0,j}(t)} - \frac{1}{2q_{1,j}} > 0$, $t \in [T_1, T)$. 令 $q_{0,j}(T_1) = \varepsilon_j$. (7)式两边关于 t 求导, 再利用(10)和(11)式, 得

$$\dot{E}(t) \leq \sum_{j=1}^{p+1} [\tilde{\Theta}_j(t)\eta_j(x, t)\theta_{2,j}\sigma(t) + \frac{\theta_{2,j}}{2q_{1,j}} \tilde{\Theta}_j^2(t)] - K\sigma^2(t) \quad (13)$$

由(4)式和Young's不等式 $x^T y \leq cx^T x + \frac{1}{4c}y^T y$, $c > 0$, 并令 $0 < \frac{c}{\varepsilon_j} < \lambda_j$, 得

$$\dot{E}(t) \leq -\sum_{j=1}^{p+1} [(\lambda_j - \frac{c}{\varepsilon_j})\theta_{2,j}\tilde{\Theta}_j^2(t) + \frac{\theta_{2,j}}{4\varepsilon_j c} \Theta_j^2(t)] - K\sigma^2(t) \quad (14)$$

因为 $\Theta(t) = \Theta(t-T)$, 由假设2知, 存在正数 Θ_M , 使得 $\|\Theta(t)\| \leq \Theta_M$, 而 $\Theta_j(t)$ 是 $\Theta(t)$ 的分量, 也是周期为 T 的连续函数, 因此存在正数 Θ_{j,M_j} , 使得 $|\Theta_j(t)| \leq \Theta_{j,M_j}$, 不妨令 $\Theta_M = \max\{\Theta_{j,M_j}\}$, 同理, $\theta_{2,j}$ 是向量 ω 的分量, 取 $\omega_M = \max\{\theta_{2,j}\}$, 则由(14)式可知, 在区域 $\{(\sigma(t), \tilde{\Theta}_j(t)) \in R^2 | K'\sigma^2(t) + \sum_{j=1}^{p+1} (\lambda_j - \frac{c}{\varepsilon_j})\tilde{\Theta}_j^2(t) \leq \sum_{j=1}^{p+1} \frac{1}{4\varepsilon_j c} \Theta_M^2\}$ 的外部, 其中 $K' = \frac{K}{\omega_M}$, 使得 $\frac{\dot{E}(t)}{\omega_M}$ 是负定的, 即 $\dot{E}(t)$ 是负定的. 从而, $E(t)$ 在有限区间 $[T_1, T)$ 是有界的. 类似于

文[5]有界性的证明, 由 $E(t)$ 的有界性和定义, 可以证明闭环系统所有信号以及 $\sigma(t)$ 在 L_T^2 -范数意义下是有界的。

5 实例仿真 (Simulation results)

考虑如下一个关节的机器人操作臂方程

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = (u(t) - gl \cos x_1 + \eta_1)/(ml^2 + I)$$

其中 x_1 是关节角度, x_2 是角速度, m 是质量, l 是长度, g 是重力加速度, I 是惯性矩, $u(t)$ 是关节输入, $\eta_1 = 5x_1^2 \sin^3(5\pi t)$ 是外界干扰。

在仿真中, 取 $b = \frac{1}{ml^2 + I} > 0$ 为时不变参数, 系统参数分别是 $m = 3(kg)$, $l = 1(m)$, $I = 0.5(kg \cdot m^2)$, 参考轨迹 $x_{r,1}(t) = 2 \sin 2t$, 周期 $T = 4(s)$, 系统的初始条件为: $x_1(0) = 0, x_2(0) = 0$ 。系统的不确定性表示为 $\theta_1(t)\xi(x, t)\theta_2$, 其中 $\theta_2 = [5b \ bgl]^T$, $\theta_1(t) = [\sin^3(0.5\pi t) - 1]$, $\xi(x, t) = \text{diag}(x_1^2, \cos x_1)$, 广义跟踪误差 $\sigma(t) = 3e_1 + e_2$, 用 $|\sigma_i|_{\sup}$ 表示在第 i 个周期 $\sigma(t)$ 的最大绝对值。 $q_{2,j} = 0.5$, $q_{0,j}(t) = \frac{t}{T}q_{1,j}$, $q_{1,j} = 0.5$, ($j = 1, 2, 3$). $K = 75$ 。根据本文提的学习控制律(3)和参数自适应律(4),(5)得到仿真结果如图1所示。图1(a)说明了在第 i 个周期 $\sigma(t)$ 的最大绝对值, 由图1(b)可看出, 控制曲线 $u(t)$ 是有界的, 图1(c)-(d)分别说明时变和时不变参数估计曲线的有界性, 这与理论分析结果是相符的。实例仿真结果表明所提方法是可行的。

6 结论 (Conclusion)

针对一类非线性参数化系统, 利用分段积分机制, 引进微分-差分混合型参数自适应律, 设计了一种周期自适应控制策略。通过构造Lyapunov泛函, 保证了广义跟踪误差在 L_T^2 -范数意义下渐近收敛于零, 实例仿真结果表明了该方法的可行性。

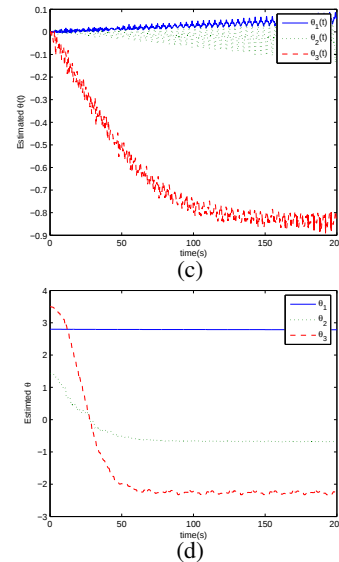
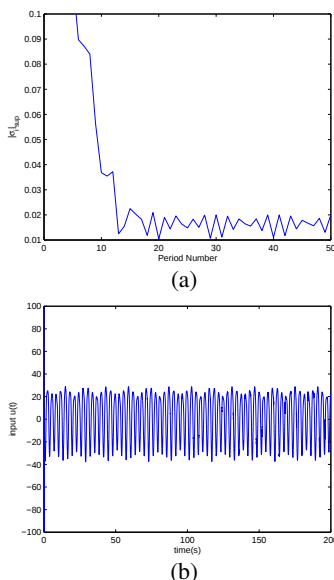


图1 重复学习控制的系统曲线

Fig.1 System curves of repetitive learning control

参考文献 (References):

- [1] Petros Ioannou, Jing Sun. *Robust Adaptive Control* [M]. Upper Saddle River, New Jersey, 1996.
- [2] Dixon W.E, Zergeroglu E, Dawson D.M and Costic B.T. Repetitive Learning Control: A Lyapunov-Based Approach[J]. *IEEE transactions on circuits and systems, man, and cybernetics Part B*, 2002, 32 (4):538-545.
- [3] S Hara, Y Yamamoto, T Omata, M Nakano. Repetitive control system: A new type servo system for periodic exogenous signals [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33 (7): 659-668.
- [4] Cao.W.J and Xu Jian-Xin. Robust and almost perfect periodic tracking of nonlinear systems using repetitive VSC [C]. *Proceedings of the 2001 American Control Conference*, Arlington, VA, USA, June 25-27, 2001, 3830-3835.
- [5] Xu Jian-Xin. A New Periodic Adaptive Control Approach for Time-Varying Parameters with Known Periodicity [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49 (4):579-583.
- [6] Yan Rui, Er Meng Joo, Pan Ya-Jun. Multi-period repetitive learning control for a class of unmatched systems with unknown control direction[C]. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, June 14-16, 2006, 238-243.
- [7] 张冬梅, 孙明轩, 俞立. 基于观测器跟踪非一致轨迹的迭代学习控制器设计[J]. *控制理论与应用*, 2006, 23 (5):795-799. (ZHANG Dong-mei, SUN Ming-xuan, YU Li. Observer-based iterative learning control for non-identical trajectory tracking[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23 (5):795-799.)
- [8] 孙云平, 刘赞, 李俊民. 一类二阶时变非线性系统的混合自适应重复学习控制[J]. *西安电子科技大学学报*, 2006, 33(3): 495-499. (Sun Yunping, Liu Yun, Li Junmin. Adaptive repetitive learning control for a class of second order nonlinear time-varying systems with mixed parameters[J]. *Journal of Xidian University*, 2006, 33(3): 495-499.)
- [9] Netto, M.; Annaswamy, A.; Mammarr, S.; Glaser, S. A new adaptive control algorithm for systems with multilinear parameterization[C] *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, June 14-16, 2006. 4100-4105.

- [10] Fang Y, Xiao X, Ma B and Lu G. Adaptive Learning Control of Complex Uncertain Systems with Nonlinear Parameterization[C].*Proceeding of the 2006 American Control Conference*, Minneapolis, Minneaota, USA, June 14-16, 2006: 3385-3390.
- [11] Sun Mingxuan and Ge Shuzhi Sam. Adaptive Repetitive Control for a Class of Nonlinearly Parametrized Systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51 (10): 1684-1688.

作者简介:

孙云平 (1966—), 男, 博士研究生, 目前研究方向是学习控制,

自适应控制和鲁棒控制, E-mail:sunypxd@163.com;

李俊民 (1965—), 男, 博士生导师, 目前研究方向是自适应控制与学习控制, 最优控制与算法, 混合系统理论和网络化控制等, E-mail: jmli@ mail.xidian.edu.cn;

李靖 (1979—), 女, 博士研究生, 目前研究方向是自适应控制, 神经网络与模糊控制。E-mail:xidianjing@126.com