第 26 卷第 2 期
2009 年 2 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 26 No. 2
Feb. 2009

文章编号: 1000−8152(2009)02−0228−05

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 Yun-ping, LI Jun-min, LI Jing

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

Abstract: Combining the pointwise integral mechanism with the feedback linearization approach, we propose a novel adaptive repetitive learning control for higher-order nonlinearly parameterized uncertain systems with time-varying and time-invariant parameters. This control can be applied to an uncertain system with time-varying parameters which are varying rapidly and periodically in an unknown compact set. A differential-difference mixed-type adaptive law and an adaptive repetitive learning control law are configured 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1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2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

收稿日期: 2008−01−14; 收修改稿日期: 2008−07−05.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60374015).

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[10,11]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$\int_{t-T}^{t} f^2(\tau)\mathrm{d}\tau$, 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: $x(t)=(x_1(t),x_2(t),\cdots,x_m(t))^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^m$是可测的系统状态向量, $u(t)\in\mathbb{R}$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$b>0$, $\theta_1(t)=(\theta_{1,1}(t),\cdots,\theta_{1,p}(t))\in\mathbb{R}^{1\times p}$是连续的未知时变参数向量, $\theta_2=(\theta_{2,1},\cdots,\theta_{2,p})^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^{p\times 1}$是未知的时不变参数向量, $\xi(x,t)=\mathrm{diag}\{\xi_1(x,t),\xi_2(x,t),\cdots,\xi_p(x,t)\}$是已知的矩阵值函数; $A=\begin{bmatrix}0 & I_{(m-1)\times(m-1)}\\ \vdots & \\ 0\cdots & 0\end{bmatrix}$, $C=[0,0,\cdots,1]^{\mathrm{T}}$; $x_r(t)=(x_{r,1}(t),\dot{x}_{r,1}(t),\cdots,x_{r,1}^{(m-1)}(t))^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^m$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$\theta_1(t)\xi(x,t)\theta_2$,$\theta_1(t)\in\mathbb{R}^{1\times p}$, $\xi(x,t)\in\mathbb{R}^{p\times q}$,$\theta_2\in\mathbb{R}^{q\times 1}$, 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$\Theta(t)\in\mathbb{R}^{1\times m}$, $\Omega\in\mathbb{R}^{m\times 1}(m>p,q)$, $\eta(x,t)\in\mathbb{R}^{m\times m}$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$\theta_{2,s}>0(s=1,2,\cdots,p)$.

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$\|\theta_1(t)\|\leqslant\theta_{1,M}$,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$\forall x^1,x^2\in\mathbb{R}^m$, 使得$\|\xi_s(x^1,t)-\xi_s(x^2,t)\|\leqslant l_s\|x^1-x^2\|,(s=1,2,\cdots,p)$, 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1阶导数直到m阶导数在L_T^2-范数意义是有界的. 即

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

定义广义跟踪误差

$$\sigma(t)=\sum_{i=1}^{m}c_ie_i(t),$$

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$s^{m-1}+c_{m-1}s^{m-2}+c_{m-2}s^{m-3}+\cdots+c_1$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

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

其中:

$$\Theta(t)=(\Theta_1(t),\Theta_2(t),\cdots,\Theta_{p+1}(t)),$$
$$\Theta_s(t)=b^{-1}\theta_{1,s}(t),(s=1,2,\cdots,p),$$
$$\Theta_{p+1}(t)=1,$$
$$\omega=(\theta_2^{\mathrm{T}},b^{-1})^{\mathrm{T}}=(\theta_{2,1},\cdots,\theta_{2,p},b^{-1})^{\mathrm{T}},$$
$$\theta_{2,p+1}=b^{-1},$$
$$\eta(x,t)=\mathrm{diag}\{\eta_1(x,t),\cdots,\eta_p(x,t),\eta_{p+1}(x,t)\},$$
$$\eta_s(x,t)=-\xi_s(x,t),\ (s=1,2,\cdots,p),$$
$$\eta_{p+1}(x,t)=\sum_{i=1}^{m}c_ix_{r,i+1}-\sum_{i=1}^{m-1}c_ix_{i+1}.$$

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$(j=1,2,\cdots,p+1)$,$\eta_j=\eta_j(x,t)$. 根据系统(1)和式(2)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

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

时不变参数学习律为

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

其中: $q_{2,j}>0$和$q_{1,j}>0$ 分别是常数增益. 设$q_{0,j}(t)=\dfrac{t}{T}q_{1,j},t\in[0,T)$, 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, 从而进一步保证了式(5)中$\dot{\hat{\theta}}_{2,j}(t)$的连续性(证明略).

把式(3)代入式(2), 得

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

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, 学习控制律式(3), 混和参数学习律式(4)和式(5), 保证了:

1) 广义跟踪误差$\sigma(t)$ 在L_T^2–范数意义下渐近收敛于零, 即$\lim\limits_{t\to\infty}\displaystyle\int_{t-T}^{t}\sigma^2(\tau)\mathrm{d}\tau=0$;

2) 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

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

这里$q_{2,j}>0$和$q_{1,j}>0$均是常数增益.

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

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

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

$$\Delta E(t)\leqslant\int_{t-T}^{t}-K\sigma^2(\tau)\mathrm{d}\tau<0,\tag{9}$$

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

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

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

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

因为$E(t)\geqslant0$, 如果$\max\limits_{t_0\in[0,T)}E(t_0)$在区间$[0,T)$上是有限的, 由式(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$\lim\limits_{t\to\infty}\displaystyle\int_{t-T}^{t}\sigma^2(\tau)\mathrm{d}\tau=0$. 因此, 只需证明$\max\limits_{t_0\in[0,T)}E(t_0)$的有限性. 为了简便, 以下证明记$t_0=t$. 在$[0,T)$上, 由式(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, $\max\limits_{t\in[T_1,T)}E(t)$的有限性.

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

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

由式(4)和 Young's 不等式$x^{\mathrm{T}}y\leqslant cx^{\mathrm{T}}x+\dfrac{1}{4c}y^{\mathrm{T}}y,c>0$, 并令$0<\dfrac{c}{\varepsilon_j}<\lambda_j$, 得

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

因为$\Theta(t)=\Theta(t-T)$, 由假设2知, 存在正数Θ_M,使

得$\|\Theta(t)\| \leqslant \Theta_M$, 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$|\Theta_j(t)| \leqslant \Theta_{j,M_j}$, 不妨令$\Theta_M = \max\{\Theta_{j,M_j}\}$, 同理, $\theta_{2,j}$是向量ω的分量, 取$\omega_M = \max\{\theta_{2,j}\}$,则由式(14)可知, 在区域

$$\{(\sigma(t),\tilde{\Theta}_j(t)) \in \mathbb{R}^2 | K'\sigma^2(t) + \sum_{j=1}^{p+1}(\lambda_j - \frac{c}{\varepsilon_j})\tilde{\Theta}_j^2(t) \leqslant \sum_{j=1}^{p+1}\frac{1}{4\varepsilon_j c}\Theta_M^2\}$$

的外部, 其中$K' = \dfrac{K}{\omega_M}$, 使得$\dfrac{\dot{E}(t)}{\omega_M}$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$b = \dfrac{1}{ml^2 + I} > 0$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:

$$\theta_2 = [5b\ bgl]^{\mathrm{T}},\ \theta_1(t) = [\sin^3(0.5\pi t)\ -1],$$

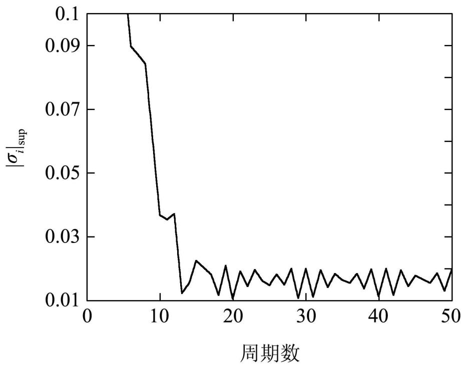
$$\xi(x,t) = \mathrm{diag}\{x_1^2, \cos x_1\}.$$

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.

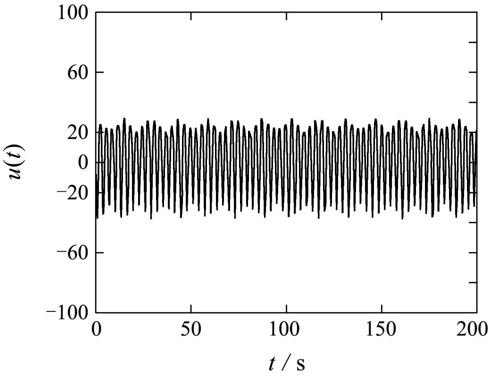
$$q_{2,j} = 0.5,\ q_{0,j}(t) = \frac{t}{T}q_{1,j},$$

$$q_{1,j} = 0.5(j = 1, 2, 3),\ K = 75.$$

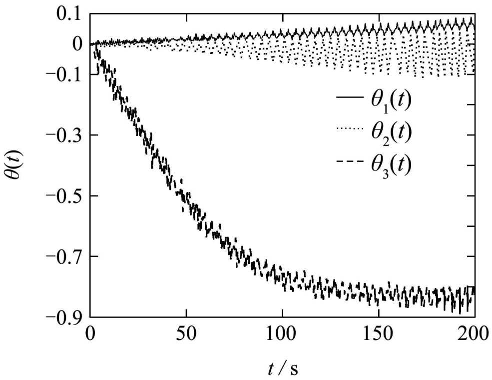
根据本文提的学习控制律(3)和参数自适应律(4), 式(5)得到仿真结果如图1所示.



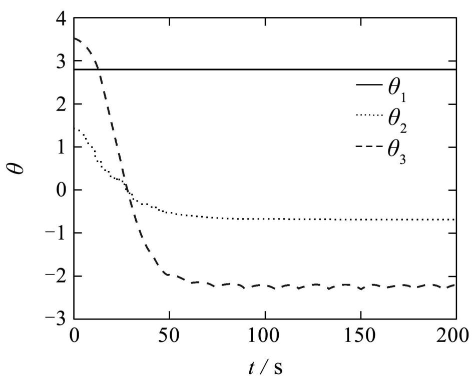
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1 重复学习控制的系统曲线

Fig. 1 System curves of repetitive learning control

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.

参考文献(References):

[1] IOANNOU P, SUN J. *Robust Adaptive Control*[M]. New Jersey: Upper Saddle River, 1996.

[2] DIXON W E, ZERGEROGLU E, DAWSON D M, et al. Repetitive leaning control: a Lyapunov-based approach[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems, Man and Cybernetics*, 2002, 32(4): 538 – 545.

[3] HARA S, YAMAMOTO Y, OMATA T, et al. 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, XU J X. 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*. USA: [s.n.]: 2001: 3830 – 3835.

[5] XU J X. 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 R, ER M J, PAN Y J. 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*. USA: [s.n.]: 2006: 238 – 143.

[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 Dongmei, SUN Mingxuan, 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, 刘赟, 李俊民. 一类2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, MAMMAR S, et al. A new adaptive control algorithm for systems with multilinear parameterization[C]//*Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, USA, June 14–16*. USA: [s.n.], 2006: 4100 – 4105.

[10] FANG Y, XIAO X, MA B, et al. Adaptive learning control of complex uncertain systems with nonlinear parameterization[C]//*Proceeding of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, Minneaota, USA, June 14–16*. USA: [s.n.], 2006: 3385 – 3390.

[11] SUN M X, GE S Z 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, 目前研究方向为学习控制、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, 目前研究方向为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, 目前研究方向为自适应控制、神经网络与模糊控制, E-mail: xidianjing@126.com.