第 30 卷第 6 期
2013 年 6 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 30 No. 6
Jun. 2013

DOI: 10.7641/CTA.2013.20976

控制方向未知的时变不确定系统的重复控制

赵叶蕾, 陈彭年†

(中国计量学院 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 本文考虑一类具有未知时变参数并且控制方向未知的非线性系统的重复学习控制. 针对重复学习控制的特点, 所构造的李亚普诺夫函数不仅与当前参数估计误差有关, 也与前一次参数估计误差有关. 基于该李亚普诺夫函数, 结合Nussbaum类型函数, 提出了控制方向未知的系统的重复学习方法. 该方法不采用饱和控制, 但能保证在闭环系统中跟踪误差在重复区间上一致收敛于零. 最后, 一个仿真例子说明了该方法的可行性.

关键词: 不确定系统; 重复控制; 一致收敛

中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Repetitive control for a class of systems with unknown time-varying parameters and unknown control direction

ZHAO Ye-lei, CHEN Peng-nian†

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: The paper studies the repetitive control of a class of nonlinear system with unknown time-varying parameters and unknown control direction. The Lyapunov functions used in the paper relate not only to the present parameter estimation errors, but also to the previous parameter estimation errors. A repetitive control law is presented by using the Lyapunov functions combined with the Nussbaum-type functions. Although in this method no saturation control is used, the tracking errors in the closed-loop converge to zero on the interval of repetition. Finally, a simulation example is presented to validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: uncertain systems; repetitive control; uniform convergence

1 引言(Introduction)

在实际控制系统中, 经常会遇到具有重复性质的控制任务, 例如, 数控机床、光盘和磁盘驱动器等, 都需要对周期性的外部信号进行跟踪或抑制. 因此, 对重复控制的研究具有重要理论和实际意义[1–2]. 重复控制虽然与迭代学习控制并行发展[3], 但有其自己的特点. 重复控制的特点是当前次重复控制的初始状态是前一次重复控制的最终状态, 无定位问题, 因此可以避免迭代学习中的初始定位误差问题[4]. 近年来, 重复控制得到重视, 但是主要是针对控制方向已知系统的研究.

在系统中存在时变不确定的情况下, 为了达到一致收敛, 一般需要采用饱和控制[4–5]. 如果不采用饱和控制, 则一般只能做到点点收敛或二次积分收敛[6–7]. 但饱和控制一般需要知道未知时变参数的上下界. 文献[8]针对一类具有未知时变参数的非线性系统提出了一种不采用饱和控制的迭代学习算法, 所提出的算法可以保证跟踪误差的一致收敛.

控制方向未知的系统在实际应用中广泛存在, 例如, 船舶航向、航空航天等中的某些控制系统. 解决控制方向未知的控制问题的方法通常是采用Nussbaum增益技术[9–10]. 文献[10]针对一类控制方向未知的高阶非线性系统研究了鲁棒自适应状态反馈控制问题. 但文献[9–10]的方法并不适用于控制方向未知的重复控制. 本文针对一类控制方向未知的参数不确定非线性系统, 基于Nussbaum类型函数提出了一种没有采用饱和控制的重复学习控制方法, 因此不需要将参数限制在预先给定的范围内. 在证明系统的收敛性时, 本文构造的重复控制律保证跟踪误差一致收敛到零, 克服了通常只能保证跟踪误差在重复区间上点点收敛的缺点.

2 问题描述(Problem formulation)

考虑下面的时变参数不确定系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1},\ 1 \leqslant i \leqslant n-1, \\ \dot{x}_n = \xi^{\mathrm{T}}(x,t)w(t) + bu, \\ y = x_1, \end{cases} \tag{1}$$

收稿日期: 2012−09−20; 收修改稿日期: 2012−12−13.

†通信作者. E-mail: pnchen@mail.hz.zj.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21006086).

其中: $x=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^{\mathrm T}\in\mathbb R^n$表示系统的状态向量, $u\in\mathbb R$和$y\in\mathbb R$分别为系统的输入和输出; $\xi:\mathbb R^n\times[0,T]\to\mathbb R^l$是已知连续函数, $w:[0,T]\to\mathbb R^l$是未知的时变参数, 假设$w(t)$是连续函数, 代表系统的干扰; $b\neq 0$是未知常数, 表示系统的控制方向; $[0,T]$是重复学习控制区间. 用

$$\begin{cases}\dot x_{i,j}=x_{i+1,j},\ 1\leqslant i\leqslant n-1,\\ \dot x_{n,j}=\xi^{\mathrm T}(\bar x_j,t)w(t)+bu_j,\\ y_j=x_{1,j}\end{cases}\tag{2}$$

表示系统(1)的第j次重复系统, $\bar x_j=(x_{1,j},x_{2,j},\cdots,x_{n,j})^{\mathrm T}$是第$j$次重复系统的状态向量, u_j和y_j分别为第j次重复系统的输入和输出变量, $j=1,2,\cdots$.

设$y_{\mathrm d}(t),\ t\in[0,T]$是期望信号. 本文的目的是: 设计一个重复控制律, 使得当$j\to\infty$时, $y_j(t)$在$[0,T]$上一致地趋于$y_{\mathrm d}(t)$, 即

$$\lim_{j\to\infty}(y_j(t)-y_{\mathrm d}(t))=0$$

对$t\in[0,T]$一致地成立.

像通常的重复控制研究一样, 做两点假设:

假设 1 重复系统(2)的初始状态满足$\bar x_{j+1}(0)=\bar x_j(T),\ j=1,2,\cdots$.

假设 2 期望信号$y_{\mathrm d}(t)$是n次连续可微的周期函数, 即$y_{\mathrm d}^{(n)}(t)$在$[0,T]$上连续, 而且满足$y_{\mathrm d}^{(i)}(0)=y_{\mathrm d}^{(i)}(T),\ i=1,2,\cdots,n$.

3 重复控制律设计(Design of repetitive control laws)

设

$$e_{i,j}=x_{i,j}(t)-y_{\mathrm d}^{(i-1)}(t),\ 1\leqslant i\leqslant n,\tag{3}$$

其中$j=1,2,\cdots$. 记$e_j=(e_{1,j},e_{2,j},\cdots,e_{n,j})^{\mathrm T}$. 则$e_j$满足方程

$$\begin{cases}\dot e_{i,j}=e_{i+1,j},\ 1\leqslant i\leqslant n-1,\\ \dot e_{n,j}=-y_{\mathrm d}^{(n)}(t)+\xi^{\mathrm T}(\bar x_j,t)w(t)+bu_j.\end{cases}\tag{4}$$

设

$$s_j=e_{n,j}+\alpha_{n-1}e_{n-1,j}+\cdots+\alpha_1e_{1,j},\tag{5}$$

选择系数$\alpha_i,i=1,2,\cdots,n-1$, 使得

$$p(\lambda)=\lambda^{n-1}+\alpha_{n-1}\lambda^{n-2}+\cdots+\alpha_1$$

为Hurwitz多项式. 设

$$V_j(t)=\frac12 s_j^2(t),\ j=1,2,\cdots,\tag{6}$$

容易看到$V_{j+1}(0)=V_j(T)$. 对$V(t)$求导得

$$\begin{aligned}\dot V_j=\ &s_j(\alpha_1e_{2,j}+\alpha_2e_{3,j}+\cdots+\alpha_{n-1}e_{n,j}-\\ &y_{\mathrm d}^{(n)}(t)+\xi^{\mathrm T}(\bar x_j,t)w(t)+bu_j)=\\ &s_j(\eta(e_j,t)+\xi^{\mathrm T}(\bar x_j,t)w(t)+bu_j),\end{aligned}\tag{7}$$

其中$\eta(e_j,t)=\alpha_1e_{2,j}+\alpha_2e_{3,j}+\cdots+\alpha_{n-1}e_{n,j}-y_{\mathrm d}^{(n)}(t)$.

基于式(7), 对系统(2)设计下面的重复控制律:

$$\begin{cases}u_j(t)=z_j(t)N(k_j),\\ z_j(t)=qs_j(t)+\eta(e_j,t)+\xi^{\mathrm T}(\bar x_j,t)\hat w_j(t),\\ \dot k_j(t)=z_j(t)s_j(t),\ k_j(0)=k_{j-1}(T),\ k_1(0)=0,\end{cases}\tag{8}$$

其中: $N(\cdot)$是Nussbaum函数, $q>0$为常数, $\hat w_j(t)$是未知时变参数$w(t)$的第j次估计, 由如下定义:

$$\begin{cases}\hat w_0(t)=0,\ t\in[0,T],\\ \hat w_j(t)=\hat w_{j-1}(t)+\gamma s_j(t)\xi^{\mathrm T}(\bar x_j,t),\\ \qquad t\in[0,T],\ j=1,2,\cdots,\end{cases}\tag{9}$$

其中$\gamma>0$为常数.

有关函数的概念和性质可参阅文献[10].

4 收敛性分析(Convergence analysis)

先介绍两个引理.

引理 1[10] 设$V(t)$在$[0,t_{\mathrm f})$上连续, $k(t)$在$[0,\ t_{\mathrm f})$上连续可微, 且对$t\in[0,t_{\mathrm f}),\ V(t)\geqslant 0$. 设$N(k)$是一偶的光滑的Nussbaum类型函数, θ是一非零常数. 若对$t\in[0,t_{\mathrm f})$有

$$V(t)\leqslant\int_0^t(\theta N(k)+1)\dot k(\tau)\mathrm d\tau+c,\tag{10}$$

式中c为一常数, 则$V(t)$和$k(t)$在$[0,t_{\mathrm f})$上有界.

引理 2 设$\phi_j:[0,T]\to\mathbb R^l$连续可微, $j=1,2,\cdots$. 设$\phi_j(t)$在$[0,T]$上关于j一致有界, 而且

$$\lim_{j\to\infty}\int_0^{\mathrm T}\|\phi_j(\tau)\|^2\mathrm d\tau=0.$$

如果$\int_0^{\mathrm T}\|\dot\phi_j(\tau)\|^2\mathrm d\tau$关于$j$有界, 则序列$\{\phi_j(t)\}_{j=1}^{\infty}$在$[0,T]$上一致收敛到零, 即

$$\lim_{j\to\infty}\phi_j(t)=0\tag{11}$$

对$t\in[0,T]$一致成立.

引理2的证明可参见文献[4,8].

定理 1 在式(4)和(8)组成的闭环系统中, 对所有的$j\geqslant 1$, $e_j(t)$, $\hat w_j(t)$和$k_j(t)$都在$[0,T]$上存在, 而且

$$\lim_{j\to\infty}e_j(t)=0\tag{12}$$

在$[0,T]$上一致成立.

证 首先证明$e_1(t)$, $\hat w_1(t)$和$k_1(t)$在$[0,T]$存在. 设$e_1(t)$, $\hat w_1(t)$和$k_1(t)$的最大存在区间为$[0,t_{\mathrm f})\subset[0,T]$. 用$\tilde w_j(t)=w(t)-\hat w_j(t)$表示$w(t)$的估计误差, $j=0,1,2,\cdots$. 定义函数

$$E_1=V_1+\frac{1}{2\gamma}\int_0^t\|\tilde w_1(\tau)\|^2\mathrm d\tau+$$

$$\frac{1}{2\gamma}\int_t^{\mathrm{T}}\|\tilde{w}_0(\tau)\|^2\mathrm{d}\tau,\ t\in[0,t_{\mathrm{f}}),\tag{13}$$

其中V_1由式(6)定义. 容易看到, E_1在$[0,t_{\mathrm{f}})$上连续可微.

对E_1求导得

$$\dot{E}_1=\dot{V}_1+\frac{1}{2\gamma}\left(\|\tilde{w}_1(t)\|^2-\|\tilde{w}_0(t)\|^2\right)= s_1(\eta(e_1,t)+\xi^{\mathrm{T}}(\bar{x}_1,t)w(t)+bu_1)+ \frac{1}{2\gamma}\left(\|\tilde{w}_1(t)\|^2-\|\tilde{w}_0(t)\|^2\right).\tag{14}$$

根据式(9), 有

$$\frac{1}{2\gamma}\left(\|\tilde{w}_1\|^2-\|\tilde{w}_0\|^2\right)= -s_1\xi^{\mathrm{T}}(\bar{x}_1,t)\tilde{w}_1-\frac{1}{2\gamma}\|\hat{w}_1-\hat{w}_0\|^2.\tag{15}$$

根据式(14)−(15)和式(8), 得到

$$\dot{E}_1\leqslant(bN(k_1)+1)s_1z_1+s_1\eta(e_1,t)+ s_1(\xi^{\mathrm{T}}(\bar{x}_1,t)w(t)-z_1)-s_1\xi^{\mathrm{T}}(\bar{x}_1,t)\tilde{w}_1= -qs_1^2+(bN(k_1)+1)\dot{k}_1,\tag{16}$$

由此对$t\in[0,t_{\mathrm{f}})$, 得到

$$E_1(t)\leqslant E_1(0)-q\int_0^t s_1^2(\tau)\mathrm{d}\tau+ \int_0^t(bN(k_1)+1)\dot{k}_1\mathrm{d}\tau.\tag{17}$$

根据式(17)和引理1, 可得$E_1(t)$ 和$k_1(t)$在$[0,t_{\mathrm{f}})$上有界. 而$E_1(t)$在$[0,t_{\mathrm{f}})$上有界蕴含着$e_1(t)$ 在$[0,t_{\mathrm{f}})$上有界. 根据式(9), $\hat{w}_1(t)$ 在 $[0,t_{\mathrm{f}})$ 上也有界. 因此, 根据微分方程理论, $e_1(t),\hat{w}_1(t)$ 和 $k_1(t)$ 都可延拓. 这同$[0,t_{\mathrm{f}})$是$e_1(t)$, $\hat{w}_1(t)$和$k_1(t)$的最大存在区间的假设矛盾. 因此, $e_1(t),\hat{w}_1(t)$和$k_1(t)$在$[0,T]$上存在, 而且式(17)对$t\in[0,T]$成立.

设

$$E_j=V_j+\frac{1}{2\gamma}\int_0^t\|\tilde{w}_j(\tau)\|^2\mathrm{d}\tau+ \frac{1}{2\gamma}\int_t^{\mathrm{T}}\|\tilde{w}_{j-1}(\tau)\|^2\mathrm{d}\tau,\ j=2,3,\cdots.\tag{18}$$

用类似上面的方法, 可以证明, 对所有的$j\geqslant 2$, $e_j(t)$, $\hat{w}_j(t)$和$k_j(t)$都在$[0,T]$上存在, 而且对$t\in[0,T]$有

$$E_j(t)\leqslant E_j(0)-q\int_0^t s_j^2(\tau)\mathrm{d}\tau+ \int_0^t(bN(k_j)+1)\dot{k}_j\mathrm{d}\tau.\tag{19}$$

另外, 有

$$E_{j+1}(0)=E_j(T),\ j=1,2,\cdots.\tag{20}$$

由式(16)(19)−(20)可知: 对$j\geqslant 1$, $t\in[0,T]$, 有

$$E_j(t)\leqslant E_1(0)-q\sum_{i=1}^{j-1}\int_0^{\mathrm{T}}s_i^2(\tau)\mathrm{d}\tau- q\int_0^t s_j^2(\tau)\mathrm{d}\tau+\sum_{i=1}^{j-1}\int_0^{\mathrm{T}}(bN(k_i)+1)\dot{k}_i\mathrm{d}\tau+ \int_0^t(bN(k_j)+1)\dot{k}_j\mathrm{d}\tau.\tag{21}$$

注意, 当$j=1$时, 约定求和运算$\sum\limits_{i=1}^{j-1}$是空运算, 也就是不求和. 现在定义$[0,\infty)$上的函数E, k和s. 当$t\in[(j-1)T,jT)$, $j=1,2,\cdots$时,

$$E(t)=E_j(t-(j-1)T),\tag{22}$$

$$k(t)=k_j(t-(j-1)T),\tag{23}$$

$$s(t)=s_j(t-(j-1)T).\tag{24}$$

显然, $E(t)$, $k(t)$和$s(t)$是$[0,\infty)$上的连续函数, 而且$E(t)\geqslant 0$, $t\in[0,\infty)$.

根据式(22), 对$t\in[0,T]$有

$$\int_0^t(bN(k_i(\tau))+1)\dot{k}_i(\tau)\mathrm{d}\tau= \int_{(i-1)T}^{(i-1)T+t}(bN(k(\tau)+1)\dot{k}(\tau)\mathrm{d}\tau,\tag{25}$$

$$\int_0^t s_i^2(\tau)\mathrm{d}\tau=\int_{(i-1)T}^{(i-1)T+t}s^2(\tau)\mathrm{d}\tau.\tag{26}$$

由式(21)−(26), 对$t\geqslant 0$, 有

$$E(t)\leqslant E_1(0)-q\int_0^t s^2(\tau)\mathrm{d}\tau+ \int_0^t(bN(k)+1)\dot{k}(\tau)\mathrm{d}\tau.\tag{27}$$

由式(27)和引理1知道, $E(t)$和$k(t)$在$[0,\infty)$上都是有界的. 由此可知, $E_j(t)$和$k_j(t)$关于j在$[0,T]$上一致有界, 而且

$$\lim_{j\to\infty}\int_0^{\mathrm{T}}s_j^2(t)\mathrm{d}\tau=0.\tag{28}$$

根据式(6)和式(13), $E_j(t)$关于j在$[0,T]$上一致有界意味着$s_j(t)$和$\int_0^t\|\tilde{w}(\tau)\|^2\mathrm{d}\tau$在$[0,T]$上关于$j$都是一致有界的. 因此, 存在$m_1>0$使得对$t\in[0,T]$有

$$|s_j(t)|\leqslant m_1,\ \int_0^t\|\tilde{w}_j(\tau)\|^2\mathrm{d}\tau<m_1,\ j\geqslant 1.\tag{29}$$

由于$s_j=e_{1,j}^{(n-1)}+\alpha_{n-1}e_{1,j}^{(n-2)}+\cdots+\alpha_2e_{1,j}^{(1)}+\alpha_1e_{1,j}$和$p(\lambda)$是Hurwitz多项式, $e_j(t)$在$[0,T]$上关于j也是一致有界的. 因此, 存在$m_2>0$, 使得

$$\|e_j(t)\|\leqslant m_2,\ t\in[0,T],\ j=1,2,\cdots.\tag{30}$$

由式(7)−(8)知

$$\dot{s}_j=\eta(e_j,t)+\xi^{\mathrm{T}}(\bar{x}_j,t)w(t)+bu_j= \xi^{\mathrm{T}}(\bar{x}_j,t)\tilde{w}(t)+(bN(k_j)+1)z_j-qs_j.\tag{31}$$

根据式(29)−(31), 可以证明: 存在$m_3>0$, 使得

$$\int_0^{\mathrm{T}}|\dot{s}_j(\tau)|^2\mathrm{d}\tau\leqslant m_3.\tag{32}$$

根据引理2, $\lim\limits_{j\to\infty} s_j(t)=0$对$t\in[0,\ T]$一致成立. 这意味着$\lim\limits_{j\to\infty} e_j(t)=0$对$t\in[0,T]$一致成立.

证毕.

5 仿真算例(Numerrical simulation)

受扰的船舶运动控制系统可以表示成[10]

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2,\\ \dot{x}_2=\sum\limits_{j=1}^{2}\theta_j\phi_j(x_2)+\xi(x_1,x_2)w(t)+\theta_0 u,\\ y=x_1,\end{cases} \tag{33}$$

其中: $\theta_0\neq 0,\theta_1,\theta_2$是未知时不变参数, $w(t)$是系统的未知扰动, $\phi_1(x_2)=x_2$, $\phi_2(x_2)=x_2^3$, $\xi(x_1,x_2)=\sin\,x_1$为已知函数. 当外部扰动$w(t)=0$时, 系统设重复控制区间$[0,T]=[0,2]$, 期望信号$y_{\rm d}(t)=\sin(\pi t)$. 采用式(8)的重复控制律, 其中: $N(k_j)=k_j^2\cos,k_j$, $q=10$, $\gamma_1=1$, $\gamma_2=100$, $\alpha_1=1$. 设初始状态为$x_{1,1}(0)=0$, $x_{2,1}(0)=\pi$. 图1和3显示了当$\theta_0=0.011$, $\theta_1=-0.05$, $\theta_2=-0.014$的仿真结果. 图2和4显示了当$\theta_0=-0.011$, $\theta_1=0.05$, $\theta_2=0.014$时的仿真结果. 从仿真结果可知, 跟踪误差随着重复次数的增加而一致收敛到零.

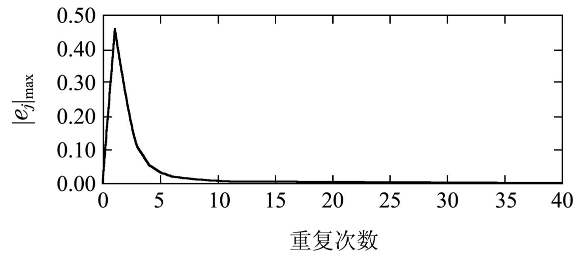

图 1 $\theta_0=0.011$时的跟踪误差

Fig. 1 Tracking errors, $\theta_0=0.011$

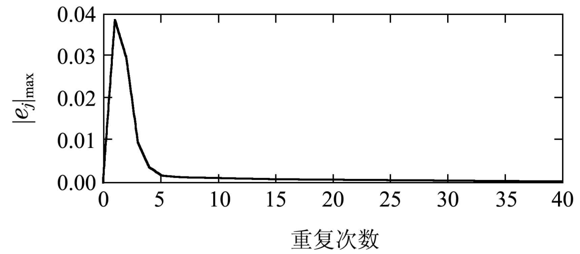

图 2 $\theta_0=-0.011$时的跟踪误差

Fig. 2 Tracking errors, $\theta_0=-0.011$

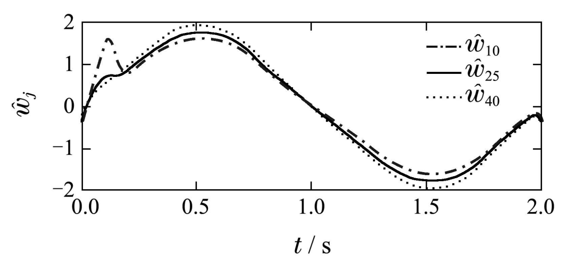

图 3 $\theta_0=0.011$时的$\hat{w}_j(t)$的变化曲线

Fig. 3 Curves of $\hat{w}_j(t)$, $\theta_0=0.011$

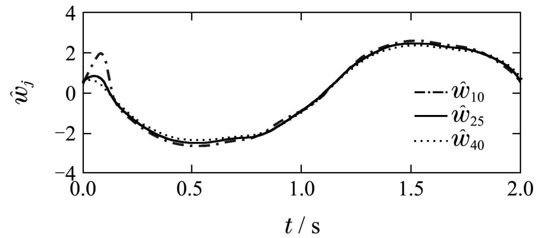

图 4 $\theta_0=-0.011$时$\hat{w}_j(t)$的变化曲线

Fig. 4 Curves of $\hat{w}_j(t)$, $\theta_0=-0.011$

6 结论(Conclusions)

本文针对控制方向未知的参数不确定系统, 基于Nussbaum函数增益提出了一种重复学习控制方法, 在没有使用饱和控制的情况下, 建立了跟踪误差的一致收敛性.

参考文献(References):

[1] SUN M, HE X, CHEN B. Repetitive learning control for time-varying robotic systems: a hybrid learning scheme [J]. *Automatica Sinica*, 2007, 33(11): 1189 – 1195.

[2] XU J X, YAN R. On repetitive learning control for periodic tracking tasks [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(11): 1842 – 1848.

[3] XU J X. The frontiers of iterative learning control-part II [J]. *Journal of Systems, Control and Information*, 2002, 46(5): 233 – 243.

[4] SUN M, WANG D, CHEN P. Repetitive learning control of nonlinear systems over finite intervals [J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2010, 40(3): 433 – 444.

[5] 金奎, 孙明轩, 吴忻生. 非参数不确定时滞系统的重复控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(12): 1779 – 17785.
(JIN Kui, SUN Mingxuan, WU Xinsheng. Repetitive control for a class of time-delay systems with non-parametric uncertainties [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(12): 1779 – 1785.)

[6] XU J X, XU J. On iterative learning from different tracking tasks in the presence of time-varying uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2004, 34(1): 589 – 597.

[7] XU J X, XU J. Observer based learning control for a class of nonlinear systems with time-varying parametric uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(2): 275 – 281.

[8] 陈彭年, 秦化淑, 方学毅. 迭代学习控制的收敛性改进 [C] //第31届中国控制会议论文集. 上海: 上海系统科学出版社, 2012: 3035 – 3040.
(CHEN Pengnian, QIN Huashu, FANG Xueyi. Convergence improvement of iterative learning control [C] //*Proceedings of the 31st Chinese Control Conference*. Shanghai: Shanghai Systems Science Publishers, 2012: 3035 – 3040.)

[9] 魏春玲, 王德强, 武玉强. 控制方向未知的高次非线性系统的鲁棒自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 519 – 524.
(WEI Chunling, WANG Deqiang, WU Yuqiang. Robust adaptive control of high order nonlinear systems with unknown control directions [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(4): 519 – 524.)

[10] 杜佳璐, 郭晨. 控制增益未知的船舶航向非线性自适应跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(2): 315 – 320
(DU Jialu, GUO Chen. Nonlinear adaptive design for course-tracking control of ship without a priori knowledge of control gain [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(2): 315 – 320.)

作者简介:

赵叶蕾 (1987–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为学习控制, E-mail: NUPTzyl@163.com;

陈彭年 (1948–), 男, 教授, 目前主要研究方向为非线性控制、自适应控制等, E-mail: pnchen@mail.hz.zj.cn.