第 30 卷 第 5 期
Vol. 30 No. 5

控 制 与 决 策
Control and Decision

2015 年 5 月
May 2015

文章编号: 1001-0920 (2015) 05-0877-05 **DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2014.0300

基于 Backstepping 的非线性系统预设性能鲁棒控制器设计

陈 明, 张士勇

(辽宁科技大学 电子与信息工程学院，辽宁 鞍山 114051)

摘 要: 针对一类具有外界扰动的严格反馈非线性系统, 将 Backstepping 技术、预设性能控制和鲁棒控制相结合, 提出一种预设性能鲁棒控制器设计方法. 通过误差转换, 建立系统等效误差模型, 利用 Backstepping 和鲁棒控制逐步递推选择适当的 Lyapunov 函数设计预设性能鲁棒控制器. 该控制策略兼顾系统的暂态和稳态性能, 仿真实例表明了所提出设计方法的有效性.

关键词: Backstepping；预设性能；鲁棒性；非线性

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Prescribed performance robust controller design for nonlinear systems based on Backstepping

CHEN Ming, *ZHANG Shi-yong*

(School of Electronic and Information Engineering，University of Science and Technology Liaoning，Anshan 114051, China．Correspondent：CHEN Ming，E-mail：cm8061@sina.com)

Abstract: By combining Backstepping technique, prescribed performance and robust control, a prescribed performance robust controller is investigated for a class of strict-feedback nonlinear systems with external disturbances. Firstly an equivalent error model is established by means of error transformation. The prescribed performance robust controller is designed step-by-step by choosing appropriate Lyapunov functions and utilizing Backstepping and robust control techniques. The transient and steady state performance is considered in the control strategy. The simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Backstepping；prescribed performance；robust；nonlinear

0 引 言

预设性能控制 (PPC) 问题是当前控制界的研究热点之一, 其主要思想是在保证系统稳定的基本前提下, 同时兼顾系统的暂态和稳态性能, 目前已取得一定的研究成果[1-4].

对于一个实际的控制系统, 仅具有稳定性是不够的, 还需要考虑其他一些性能. 文献 [5] 研究了线性不确定组合系统鲁棒分散输出渐近跟踪输出问题, 基于 Lyapunov 方程正定解的存在性, 给出了输出反馈跟踪控制器的设计方法, 对于系统中所有允许的不确定性, 所涉及的控制器均使系统的输出渐近跟踪给定的参考信号. 文献 [6] 研究了一类具有不确定性扰动输入的多输入多输出仿射型非线性系统渐近跟踪指定输出问题, 利用神经网络技术给出其状态和输出反馈控制器设计方法. 以上成果都是将注意力放在系统稳态性能上, 没有考虑系统的暂态性能, 如最大超调量和收敛速度等. PPC 问题是指在保证跟踪误差收敛到一个预先设定区域的同时, 保证收敛速度和超调量满足预先设定的条件. 如: 文献 [7] 针对一类反馈线性化系统设计了预设性能自适应控制器; 文献 [8] 针对一类状态不可观测的仿射型非线性系统, 利用性能函数、误差变换和神经网络给出了具有预设性能的输出反馈控制器设计方法.

本文将预设性能控制与 Backstepping 技术相结合, 针对一类具有外界扰动的严格反馈非线性系统, 提出一种非线性系统预设性能控制器设计方法. 同

收稿日期: 2014-03-05；**修回日期:** 2014-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403177).

作者简介: 陈明(1977−), 女, 副教授, 博士, 从事控制系统鲁棒控制、容错控制的研究；张士勇(1977−), 男, 讲师, 硕士生, 从事控制系统智能控制的研究.

时, 受文献 [9-10] 的启发, 首次将预设性能控制与鲁棒控制相结合, 保证系统暂态和稳态性能满足预先设定要求的同时, 要求系统也具有一定的鲁棒干扰抑制性能.

1 问题描述和预备知识

1.1 系统描述

考虑一类具有外界扰动的严格反馈非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = f_i(\bar{x}_i(t)) + g_i(\bar{x}_i(t))x_{i+1}(t) + w_i(t), \\ \dot{x}_n(t) = f_n(x(t)) + g_n(x(t))u + w_n(t), \\ y(t) = x_1(t). \end{cases} \tag{1}$$

其中: $\bar{x}_i(t) = [x_1, x_2, \cdots, x_i]^{\mathrm{T}} \in R^i$, $i = 1, 2, \cdots, n-1$; $x(t) = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^{\mathrm{T}} \in R^n$; $u \in R$ 和 $y \in R$ 分别为系统的状态、输入和输出向量; $f_i(\cdot)$ 和 $g_i(\cdot)$ 为已知连续的光滑函数; $w_i(t)$ 为外部扰动信号.

假设 1 假设 $g_i(\cdot)$ 为严格正或严格负的连续函数, 且 $f_i(\cdot)$ 与 $g_i(\cdot)$ 一阶可导.

假设 2 期望轨迹 $y_r(t)$ 及其一阶、二阶导数 $\dot{y}_r(t)$、$\ddot{y}_r(t)$ 均为已知连续且有界函数.

根据期望轨迹, 设计预设性能鲁棒 H_∞ 控制器, 控制目标如下:

1) 保证输出信号 $y(t)$ 跟踪期望轨迹 $y_r(t)$, 保证闭环系统中所有信号有界;

2) 保证输出跟踪误差 $e_1(t) = y(t) - y_r(t)$ 满足预先设定的性能函数, 即满足预先设定的暂态和稳态性能;

3) 保证系统具有一定的鲁棒 H_∞ 干扰抑制性能.

1.2 预设性能函数

定义 1[1] 连续函数 $\rho(t): R_+ \to R_+$, 若同时满足如下两个条件:

1) $\rho(t)$ 是正的且严格递减;

2) $\lim\limits_{t\to\infty} \rho(t) = \rho_\infty > 0$.

本文选取如下函数作为预设性能函数:

$$\rho(t) = (\rho_0 - \rho_\infty)\mathrm{e}^{-lt} + \rho_\infty, \tag{2}$$

其中 ρ_0、ρ_∞、l 为预先设定的正常数. 本文的控制目标可以通过如下不等式实现:

$$-M\rho(t) < e_1(t) < \rho(t),\ e_1(t) \geqslant 0, \tag{3}$$

或

$$-\rho(t) < e_1(t) < M\rho(t),\ e_1(t) < 0, \tag{4}$$

其中 $0 \leqslant M \leqslant 1$ 为设计参数.

注 1 式 (2) 中的 ρ_∞ 表示预设的最大容许稳态误差, l 表示跟踪误差的收敛速度, 同时跟踪误差的最大超调量小于等于 $M\rho_0$. 另外, 在式 (3) 和 (4) 中, 假设 $0 < |e_1(0)| < \rho_0$ 成立, 所以, 通过选择合适的 ρ_0、ρ_∞、l 可以保证系统的稳态误差收敛到一个预先设定的区域内, 即保证其最大超调量和收敛速度满足预先设定的要求.

1.3 误差变换

为了易于实现本文的控制目标, 将式 (3) 和 (4) 所示的不等式约束转换成等式约束的形式. 引入如下形式的误差变换:

$$e_1(t) = \rho(t)S(\varepsilon), \tag{5}$$

其中 ε 为新的转换误差. $S(\varepsilon)$ 具有如下性质:

1) $S(\varepsilon)$ 光滑, 可逆严格递增, 因此, 可将式 (5) 等效变换为

$$\varepsilon(t) = S^{-1}\Big(\frac{e_1(t)}{\rho(t)}\Big) = T\Big(\frac{e_1(t)}{\rho(t)}\Big); \tag{6}$$

2) 存在

$$-M < S(\varepsilon) < 1,\ e_1(t) \geqslant 0, \tag{7}$$

或

$$-1 < S(\varepsilon) < M,\ e_1(t) < 0. \tag{8}$$

选取具有如下典型形式的 $S(\varepsilon)$:

$$S(\varepsilon) = \frac{\mathrm{e}^{\varepsilon} - M\mathrm{e}^{-\varepsilon}}{\mathrm{e}^{\varepsilon} + \mathrm{e}^{-\varepsilon}},\ e_1(t) \geqslant 0, \tag{9}$$

或

$$S(\varepsilon) = \frac{M\mathrm{e}^{\varepsilon} - \mathrm{e}^{-\varepsilon}}{\mathrm{e}^{\varepsilon} + \mathrm{e}^{-\varepsilon}},\ e_1(t) \leqslant 0, \tag{10}$$

可以求得

$$\varepsilon(t) = 0.5\ln\Big(M + \frac{e_1(t)}{\rho(t)}\Big) - 0.5\ln\Big(1 - \frac{e_1(t)}{\rho(t)}\Big). \tag{11}$$

式 (6) 两边同时对时间求一阶导数, 有

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{e}_1(t) - \dot{\rho}(t)S(\varepsilon)}{\rho(t)\Big(\dfrac{\partial S}{\partial \varepsilon}\Big)}. \tag{12}$$

定义

$$e_i(t) = x_i(t) - y_r^{(i-1)}(t),\ i = 1, 2, \cdots, n. \tag{13}$$

根据式 (13), 建立原系统 (1) 的误差模型

$$\begin{cases} \dot{e}_i(t) = \\ \bar{f}_i(\bar{e}_i(t)) + \bar{g}_i(\bar{e}_i(t))e_{i+1}(t) + w_i(t), \\ \dot{e}_n(t) = \\ \bar{f}_n(\bar{e}_n(t)) + \bar{g}_n(\bar{e}_n(t))u(t) + w_n(t). \end{cases} \tag{14}$$

其中

$$\bar{e}_i(t) = [e_1(t), e_2(t), \cdots, e_i(t)]^{\mathrm{T}} \in R^i,$$
$$i = 1, 2, \cdots, n-1,$$
$$\bar{y}_i(t) = [y_r(t), y_r^{(1)}(t), \cdots, y_r^{(i-1)}(t)]^{\mathrm{T}},$$
$$\bar{f}_i(\bar{e}_i) = f_i(\bar{e}_i(t) + \bar{y}_i(t)) + g_i(\bar{e}_i(t) + \bar{y}_i(t))y_r^{(i)}(t) - y_r^{(i)}(t),$$
$$\bar{g}_i(\bar{e}_i) = g_i(\bar{e}_i(t) + \bar{y}_i(t)).$$

根据式 (5) 的误差变换, 将式 (12) 代入 (14), 建立原系统 (1) 的等效误差模型

$$\begin{cases}\dot{\varepsilon}(t)=\\ \phi\{\bar{f}_1(e_1)-\dot{\rho}(t)S(\varepsilon)+\\ \bar{g}_1(e_1(t))e_2(t)+w_1(t)\},\\ \dot{e}_i(t)=\\ \bar{f}_i(\bar{e}_i(t))+\bar{g}_i(\bar{e}_i(t))e_{i+1}(t)+w_i(t),\\ \dot{e}_n(t)=\\ \bar{f}_n(\bar{e}_n(t))+\bar{g}_n(\bar{e}_n(t))u(t)+w_n(t).\end{cases} \tag{15}$$

其中: $\phi=1\Big/\rho\Big(\dfrac{\partial S}{\partial\varepsilon}\Big)$, $2\leqslant i\leqslant n-1$.

2　预设性能鲁棒控制器设计

将预设性能与鲁棒控制相结合, 利用Backstepping技术, 设计系统 (1) 的预设性能鲁棒控制器. 首先定义虚拟状态变量 ς_i 和虚拟控制量 $a_{N,i}$ $(2\leqslant i\leqslant n)$, 且满足

$$\varsigma_i=e_i-a_{i-1}. \tag{16}$$

考虑系统外部扰动 w_i, 则系统 (15) 可以等效变换为

$$\begin{cases}\dot{\varepsilon}=\phi(\bar{f}_1+\bar{g}_1a_1+\bar{g}_1\varsigma_2-\dot{\rho}S+w_1),\\ \dot{\varsigma}_i=\bar{f}_i+\bar{g}_ia_i+\bar{g}_i\varsigma_{i+1}+w_i-\dot{a}_{i-1},\\ \dot{\varsigma}_n=\bar{f}_n+\bar{g}_nu+w_n-\dot{a}_{n-1},\\ z=\varepsilon,\end{cases} \tag{17}$$

其中 $2\leqslant i\leqslant n-1$.

令

$$w(t)=[w_1,w_2,\cdots,w_n]^{\mathrm{T}},$$

$z(t)$ 表示系统的控制输出.

注 2　为了书写和表示方便, 省略系统 (17) 的所有时间变量 t, 并将 $\bar{f}_i(\bar{e}_i)$、$\bar{g}_i(\bar{e}_i)$、$S(\varepsilon)$、$w_i(t)$ 简记为 $\bar{f}_i$、$\bar{g}_i$、S、w_i.

利用Backstepping技术对预设性能鲁棒控制器进行设计, 首先给出系统具有鲁棒 H_∞ 干扰抑制性能的定义.

定义 2[11]　对于系统 (17), 若存在控制律 $u(t)$ 和李亚普诺夫函数 $V(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_n)$, 且从干扰 $w(t)$ 到控制输出 $z(t)$ 的 L_2 增益小于一个给定的正常数 γ, 即

$$V(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_n)-V(0)\leqslant\int_0^T(\gamma^2\|w\|^2-\|z\|^2)\mathrm{d}t, \tag{18}$$

其中 $T>0$. 则称该系统内部稳定, 且具有鲁棒 H_∞ 干扰抑制性能.

基于Backstepping技术逐步对预设性能鲁棒控制器进行设计, 过程如下.

Step 1　考虑式 (17) 中的第 1 个子系统, 选择如下形式的Lyapunov函数:

$$V_1(\varepsilon)=\frac{1}{2}\varepsilon^2. \tag{19}$$

定义

$$H_1=\dot{V}_1(\varepsilon)+\frac{1}{2}(\|z\|^2-\gamma^2\|w_1\|^2). \tag{20}$$

对 $V_1(\varepsilon)$ 求导, 可得

$$\begin{aligned}&H_1=\\ &\frac{1}{2}\|z\|^2-\frac{\gamma^2}{2}\|w_1\|^2+\\ &\varsigma_1(\bar{f}_1+\bar{g}_1a_1+\bar{g}_1\varsigma_2-\dot{\rho}S+w_1)=\\ &\frac{1}{2}\varepsilon^2-\frac{\gamma^2}{2}w_1^2+\varsigma_1(\bar{f}_1+\bar{g}_1a_1+\bar{g}_1\varsigma_2-\dot{\rho}S+w_1)=\\ &-\Big(\frac{\gamma}{2}w_1-\frac{\varsigma_1}{\gamma}\Big)^2-\frac{\gamma^2}{4}w_1^2+\\ &\varsigma_1(\varGamma_1\varepsilon+\bar{f}_1+\bar{g}_1a_1+\bar{g}_1\varsigma_2-\dot{\rho}S).\end{aligned}$$

为了使第 1 个子系统稳定, 设计虚拟控制量 a_1 为

$$a_1=\frac{1}{\bar{g}_1}(-\varGamma_1\varepsilon-\bar{f}_1-c_1\varsigma_1+\dot{\rho}S). \tag{21}$$

其中: $\varGamma_1=\dfrac{1}{2\phi}+\dfrac{\phi}{\gamma^2}$, c_1 为设计参数. 因此, H_1 可以表示为

$$\begin{aligned}&H_1=\\ &-\Big(\frac{\gamma}{2}w_1-\frac{\varsigma_1}{\gamma}\Big)^2-\frac{\gamma^2}{4}w_1^2-c_1\varsigma_1^2+\bar{g}_1\varsigma_1\varsigma_2.\end{aligned} \tag{22}$$

Step i $(2\leqslant i\leqslant n-1)$　与Step 1推导过程相似, 定义函数

$$\begin{aligned}&V_i(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_i)=\\ &V_{i-1}(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_{i-1})+\frac{1}{2}\varsigma_i^2,\end{aligned} \tag{23}$$

$$H_i=\dot{V}_i(\varepsilon)+\frac{1}{2}\|z\|^2-\frac{\gamma^2}{2}\sum_{j=1}^{i}w_j^2. \tag{24}$$

设计虚拟控制量

$$\begin{aligned}&a_i=\\ &\frac{1}{\bar{g}_i}\Big(-\frac{\varsigma_i}{\gamma^2}-\bar{f}_i-\bar{g}_{i-1}\varsigma_{i-1}-c_i\varsigma_i+\dot{a}_{i-1}\Big).\end{aligned} \tag{25}$$

将式 (25) 代入 (24), 得到

$$\begin{aligned}&H_i=\\ &-\sum_{j=1}^{i}\Big[\Big(\frac{\gamma}{2}w_j-\frac{\varsigma_j}{\gamma}\Big)^2+\frac{\gamma^2}{4}w_j^2+c_j\varsigma_j^2\Big]+\bar{g}_i\varsigma_i\varsigma_{i+1}.\end{aligned} \tag{26}$$

Step n　定义如下函数:

$$V_n(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_n)=V_{n-1}+\frac{1}{2}\varsigma_n^2. \tag{27}$$

得到

$$\begin{aligned}&H_n=\\ &\dot{V}_n(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_n)+\frac{1}{2}\|z\|^2-\frac{\gamma^2}{2}\sum_{j=1}^{n}w_j^2=\end{aligned}$$

$$
-\sum_{j=1}^{n}\Big[\Big(\frac{\gamma}{2}w_j-\frac{\varsigma_j}{\gamma}\Big)^2+\frac{\gamma^2}{4}w_j^2\Big]-
\sum_{j=1}^{n-1}c_j\varsigma_j^2+\bar{g}_{n-1}\varsigma_{n-1}\varsigma_n+
\varsigma_n\Big(\frac{\varsigma_n}{\gamma^2}+\bar{f}_n+\bar{g}_n u-\dot{a}_{n-1}\Big).
$$

设计实际控制量为

$$
u=\frac{1}{\bar{g}_n}\Big(-\frac{\varsigma_n}{\gamma^2}-\bar{f}_n-\bar{g}_{n-1}\varsigma_{n-1}-c_n\varsigma_n+\dot{a}_{n-1}\Big). \tag{28}
$$

将式 (28) 代入 H_n, 有

$$
H_n=-\sum_{j=1}^{n}\Big[\Big(\frac{\gamma}{2}w_j-\frac{\varsigma_j}{\gamma}\Big)^2+\frac{\gamma^2}{4}w_j^2+c_j\varsigma_j^2\Big]<0. \tag{29}
$$

选择系统 (17) 的李亚普诺夫函数

$$
V(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_n)=2V_n(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_n), \tag{30}
$$

计算得到

$$
\dot{V}(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_n)=2H_n-\gamma^2(\|z\|^2-\|w\|^2). \tag{31}
$$

因为 $H_n<0$, 所以

$$
\dot{V}(\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_n)\leqslant\gamma^2(\|w\|^2-\|z\|^2). \tag{32}
$$

注 3 式 (32) 表明, 基于 Backstepping 方法构造李亚普诺夫推导出的鲁棒控制律 u, 使得误差系统 (17) 对于所有有界干扰是内部稳定的, 即从外部扰动到输出具有小于 γ 的 L_2 增益.

注 4 对于误差模型 (17), 采用控制律 (21)、(25) 和 (28), 可以保证闭环系统中所有误差信号 $\varepsilon,\varsigma_2,\cdots,\varsigma_n$ 有界, 进而保证转化误差 $\varepsilon(t)$ 满足预先设定的暂态、稳态性能要求. 根据 $S^{-1}(\varepsilon)$ 的存在性, 不难证明原系统 (1) 中所有的信号有界, 同时其跟踪误差满足预先设定的要求.

综上所述, 得到如下定理.

定理 1 对于原系统 (1), 满足假设 1 和假设 2, 采用式 (5) 的误差变换, 给定某一常数 $\gamma>0$ 和设计参数 $c_i\geqslant 0\,(i=1,2,\cdots,n)$, 利用预设性能鲁棒控制律式 (21)、(25) 和 (28), 可以保证原系统中所有信号有界, 进而保证原系统的跟踪误差满足预先设定的暂态和稳态性能, 同时可以使系统满足给定的 H_∞ 干扰抑制性能指标要求.

3 仿真分析

考虑某一严格反馈非线性系统

$$
\begin{cases}
\dot{x}_1=x_1^2+x_2+w_1,\\
\dot{x}_2=-\sin(x_1)-2x_2+u+w_2,\\
y=x_1.
\end{cases} \tag{33}
$$

根据定理 1, 设计系统 (33) 预设性能鲁棒控制器. 为了验证设计方法的有效性, 将仿真结果与不考虑预设性能的 Backstepping 控制器的仿真结果进行比较 (选取相同的仿真参数). 仿真参数如下:

期望输出为

$$
y_r(t)=\sin(2t),
$$

初始状态为

$$
x(0)=[0.6,0]^{\mathrm{T}},
$$

性能函数为

$$
\rho(t)=(1-10^{-2})\mathrm{e}^{-0.5t}+10^{-2},
$$

设计参数为

$$
c_1=1,\ c_2=1,\ \gamma=2,
$$

$$
w_1=0.01\cos(t),\ w_2=0.05\sin(t).
$$

图 1 ~ 图 4 分别为两种控制器作用下的跟踪输出误差曲线和实际输出响应曲线. 由仿真曲线可见, 本文所设计的控制器能够保证系统的稳态和暂态性能满足预先设定的要求, 且具有一定的鲁棒干扰抑制性能.

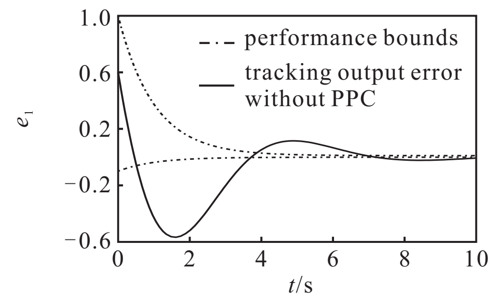

图 1 跟踪误差响应曲线 (无预设性能)

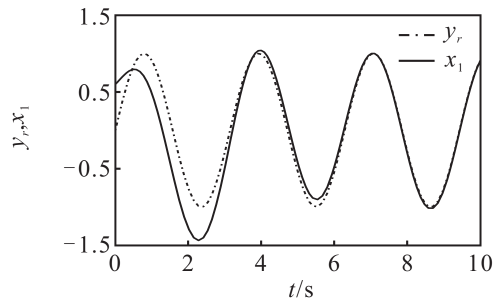

图 2 输出响应曲线 (无预设性能)

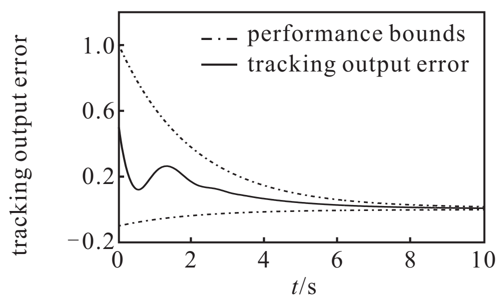

图 3 跟踪误差响应曲线 (预设性能)

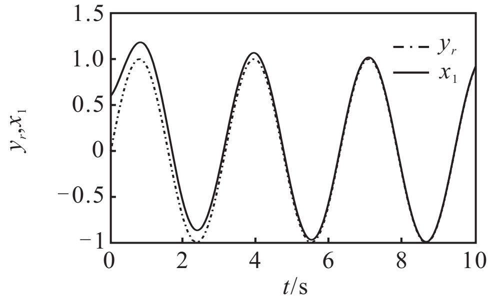

图 4　输出响应曲线(预设性能)

4　结　论

本文针对一类具有外界扰动的严格反馈非线性系统, 利用Backstepping技术、预设性能和鲁棒控制等技术, 基于Lyapunov稳定性理论提出了一种预设性能鲁棒控制器设计方法. 该控制器兼顾了系统的暂态和稳态性能, 即保证系统稳态误差收敛到一个预先设定的指定区域的同时, 保证系统在外扰作用下, 具有一定的鲁棒干扰抑制性能. 该成果为研究具有一般形式的非线性系统预设性能控制问题提供了一种新的思路和方法.

参考文献(References)

[1] Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Prescribed performance adaptive control for multi-input multi-output affine in the control nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2010, 55(5): 1220-1226.

[2] Seong I Han, Jang M Lee. Dynamic surface control for prescribed performance of a nonlinear danamic system[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 1099-1112.

[3] Jing N, Qiang C, Ren X M, et al. Adaptive prescribed performance motion control of Servo mechanisms with friction compensation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 486-494.

[4] Amit Ailon, Nadav Berman, Shai Arogeti. Robot controller design for achieving global asymptotic stability and local prescribed performance[J]. IEEE Trans on Robotics, 2004, 20(4): 790-795.

[5] 陈兵, 刘粉林, 张嗣瀛. 一类不确定组合系统的输出反馈分散输出跟踪控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(1): 75-81.
(Chen B, Liu F L, Zhang S Y. Decentralized output tracking control for a class of linear composite systems with uncertainty via output feedback[J]. Acta Automatic Sinica, 2001, 27(1): 75-81.)

[6] Yang Q M, Jagannathan S, Sun Y X. Robust integral of neural network and sign of tracking error control of uncertain nonlinear affine systems using state and output feedback[C]. The 50th IEEE Conf on Decision and Control and European Control. Orlando: IEEE Press, 2011: 6765-6770.

[7] Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Robust adaptive control of feedback linearizable mimo nonlinear systems with prescribed performance[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(9): 2090-2099.

[8] Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Prescribed performance adaptive control of SISO feedback linearizable systems with disturbances[C]. The 16th Mediterranean Conf on Control and Automation. Ajaccio: IEEE Press, 2008: 1035-1040.

[9] Sun L Y, Tong S C, Liu Y. Adaptive backstepping sliding mode H_∞ control of static var compensator[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2011, 19(5): 1178-1185.

[10] Le Wei, Fang Fang, Yang Shi. Adaptive Backstepping-based composite nonlinear feedback water level control for the nuclear U-Tube steam generator[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2014, 22(1): 369-377.

[11] 吴敏, 张凌波, 桂卫华. 不确定非线性系统的鲁棒控制分析与综合[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 203-206.
(Wu M, Zhang L B, Gui W H. Analysis and synthesis for robust control of uncertain nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications, 2002, 19(2): 203-206.)

(责任编辑: 郑晓蕾)