

控制与决策

Control and Decision

具有非凸输入约束的不确定严格反馈系统有限时间自适应跟踪控制

张腾飞, 李明星

引用本文:

张腾飞, 李明星. 具有非凸输入约束的不确定严格反馈系统有限时间自适应跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(2): 608-616.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[参数不确定离散时间系统的有限时间输出反馈预见控制器设计](#)

Design of finite-time output feedback preview controller for discrete-time systems with parameter uncertainty
控制与决策. 2021, 36(9): 2074-2084 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1584>

[航天器输入受限的鲁棒自适应姿态跟踪控制](#)

Robust adaptive attitude tracking control of spacecraft with constrained inputs
控制与决策. 2021, 36(9): 2297-2304 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0013>

[基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制](#)

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization
控制与决策. 2021, 36(1): 97-104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

[一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制](#)

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems
控制与决策. 2020, 35(12): 3045-3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

[具有未建模动态和输出约束的耦合系统的分散自适应控制](#)

Decentralized adaptive control for interconnected systems with unmodeled dynamics and output constraints
控制与决策. 2018, 33(12): 2113-2121 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0933>

具有非凸输入约束的不确定严格反馈系统 有限时间自适应跟踪控制

张腾飞, 李明星[†]

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对一类具有非凸输入约束和外界干扰的不确定多输入多输出严格反馈非线性系统, 提出一种有限时间自适应神经网络动态面跟踪控制方案. 首先, 通过引入非凸约束算子, 将所设计反馈控制输入转化为与其同方向具有最大幅值的实际输入向量, 进而保证实际控制输入始终保持在非凸约束集合内; 然后, 采用径向基神经网络逼近不确定连续函数向量, 以解决控制增益矩阵上下界未知情形下的控制问题, 并利用不等式放缩处理未知有界干扰; 接着, 利用反步法设计有限时间自适应动态面跟踪控制器, 保证闭环系统所有信号均为一致最终有界的, 实现期望轨迹的有限时间跟踪控制; 最后, 给出数值仿真算例以表明所提出控制方案的有效性.

关键词: 非凸输入约束; 有限时间稳定; 动态面控制; 自适应神经网络; 反步设计; 不确定严格反馈系统

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0110

引用格式: 张腾飞, 李明星. 具有非凸输入约束的不确定严格反馈系统有限时间自适应跟踪控制[J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 608-616.

Finite-time adaptive tracking control of uncertain strict-feedback systems with nonconvex input constraint

ZHANG Teng-fei, LI Ming-xing[†]

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A finite-time adaptive neural network dynamic surface tracking control scheme is proposed for a class of uncertain multiple-input multiple-output strict-feedback nonlinear systems with nonconvex input constraint and external disturbance. Firstly, by introducing a nonconvex constraint operator, the designed feedback control input is transformed into the actual input vector with the largest value in the same direction, thus the actual control input is always kept in the nonconvex constraint set. Secondly, the radial basis neural network is used to approximate the uncertain continuous function vector to solve the control problem with unknown upper and lower bounds of the control gain matrix, and the inequality reduction is utilized to deal with the unknown bounded disturbance. Then, a finite-time adaptive dynamic surface tracking controller using the backstepping approach is proposed to ensure that all signals of the closed-loop system are ultimately uniformly bounded, and to realize the finite-time tracking control of the desired trajectory. Finally, a numerical simulation is provided to illustrate the effectiveness of the proposed control scheme.

Keywords: nonconvex input constraint; finite-time stability; dynamic surface control; adaptive neural network; backstepping design; uncertain strict-feedback system

0 引言

凭借对机器人、船舶、航空航天、电力系统以及化工过程等实际物理系统良好的建模能力, 严格反馈系统引起了控制领域研究者的广泛关注. 反步法作为严格反馈系统最有效的控制设计工具之一, 已取得了大量研究成果^[1-6]. 为了解决系统阶数增加时反步设

计过程对虚拟控制器进行重复微分造成的“复杂度爆炸”问题, 动态面控制方法被提出并广泛应用^[7-12], 其主要思想是在反步控制设计的每一步引入一阶低通滤波器以近似虚拟控制器. 此外, 针对系统动力学模型不确定问题, 通过将传统的自适应反步控制设计理论与其他先进的非线性控制设计技术相结合, 从

收稿日期: 2024-01-24; 录用日期: 2024-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703020).

责任编委: 张国山.

[†]通讯作者. E-mail: lmx196@126.com.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

而对不确定非线性动力学进行近似或学习来形成参数化非线性被控系统, 涌现了包括神经网络^[9-15]和模糊逻辑系统^[1,16-20]在内的一些有效的智能自适应反步控制设计方法. 然而, 上述文献均是针对单输入单输出(SISO)严格反馈系统展开研究, 并获得了一致最终有界性的结果. 考虑到控制工程中大多数实际系统均是多变量和非线性的, 近年来, 许多研究者针对多输入多输出(MIMO)严格反馈系统进行了深入研究^[21-28]. 文献[21]针对一类不确定MIMO非线性系统提出了基于神经预测器的动态面并行控制方法; 通过设计干扰观测器, 文献[22]针对具有死区约束和外界干扰的MIMO离散非线性严格反馈系统提出了自适应神经网络控制方法; 利用模糊逻辑系统控制方法, 文献[23-28]分别考虑了MIMO系统的输出反馈^[23]、有限^[24]/固定^[25]时间收敛、预设性能^[26-27]、传感器故障^[28]等问题.

由于物理条件的制约, 实际系统中执行机构的控制能力并不是无穷大的, 通常存在输入受限现象, 而理论分析过程所设计的控制器可能会超出执行机构的最大控制能力, 降低系统性能甚至影响系统稳定性. 鉴于此, 一些研究者针对输入饱和下的严格反馈系统的控制问题进行了深入研究^[3,29-38]. 文献[29]针对具有输入饱和约束和外界干扰的不确定非线性系统提出了鲁棒自适应控制方法; 文献[30]为具有输入死区和饱和的SISO不确定严格反馈系统提出了基于观测器的自适应模糊有限时间预设性能控制方法; 文献[31]考虑了未知控制系数下的自适应输入饱和和补偿控制问题; 文献[32-33]分别为存在外界干扰和输入死区的SISO系统提出了事件驱动的自适应神经网络控制方法; 文献[3]和文献[34]利用障碍李雅普诺夫函数分别考虑了输入饱和以及状态约束下的不确定SISO严格反馈系统和随机非线性系统的跟踪控制问题; 文献[35]给出了输入饱和下自适应渐近跟踪控制结果; 而文献[36-37]则考虑了预设性能要求; 文献[38]针对输入饱和下的MIMO非线性系统提出了自适应跟踪控制方案.

虽然利用光滑饱和函数近似方法对输入饱和问题进行处理并取得了大量相关成果^[29-38], 但是这些成果很少考虑实际MIMO系统中控制输入不同分量的约束幅值互相耦合影响的非凸输入约束情形, 如多关节机械臂由于关节间的耦合使得机械臂姿态的变化会引起不同关节驱动力矩幅值约束的变化; 固定翼飞行器的速度与发动机推力有关, 姿态角速率的变化则与副翼、升降舵以及方向舵的偏转角度有关, 其

控制输入分量无论是量纲还是数值限制可能均相差很大, 导致控制输入受限于非凸约束集. 因此, 针对非凸输入约束下不确定MIMO严格反馈系统的跟踪控制问题展开深入研究具有重要的理论意义和应用价值. 本文考虑不确定MIMO严格反馈非线性系统, 针对非凸输入约束、未知外界干扰和有限时间收敛性能, 提出一种自适应神经网络动态面跟踪控制方案. 具体内容如下.

1) 与考虑输入饱和的文献[29-38]不同, 本文通过引入非凸约束算子处理非凸输入约束问题, 将所设计反馈控制输入转化为与其同方向具有最大幅值的实际输入向量, 能够保证实际控制输入始终位于对应的非凸集合内.

2) 相比于文献[11-19, 23-25, 30-34]中的结果, 本文仅需干扰有界和期望轨迹及其一阶导数连续有界的假设条件, 无需额外限制干扰连续条件和期望轨迹二阶及以上导数连续有界条件, 放松对外界干扰和期望轨迹的假设限制.

3) 利用神经网络技术, 提出一种快速实际有限时间稳定的自适应动态面控制设计方案, 相比于文献[15-18, 22, 32-34]中的结果, 所提出控制器与自适应律中设计参数的选取范围与控制增益矩阵上界和下界无关, 使得控制器的设计过程更加简单.

1 问题描述与预备知识

考虑一类具有如下动力学描述的不确定MIMO严格反馈非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i)x_{i+1} + d_i(t, x), \\ i = 1, 2, \dots, n-1; \\ \dot{x}_n = f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)u + d_n(t, x); \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_i \in \mathbb{R}^l$, $\bar{x}_i = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_i^T]^T \in \mathbb{R}^{il}$, $i = 1, 2, \dots, n$, 且 $x = \bar{x}_n \in \mathbb{R}^{nl}$, $y \in \mathbb{R}^l$ 和 $u \in \mathbb{R}^l$ 分别为系统状态、输出和控制输入向量; $f_i(\bar{x}_i) : \mathbb{R}^{il} \rightarrow \mathbb{R}^l$ 为未知光滑函数构成的向量; $g_i(\bar{x}_i) : \mathbb{R}^{il} \rightarrow \mathbb{R}^{l \times l}$ 为未知光滑函数构成的增益矩阵; $d_i(t, x) : \mathbb{R}^{1+nl} \rightarrow \mathbb{R}^l$ 为未知干扰向量. 控制输入被限制在非凸集合内, 即 $u \in \Omega \subset \mathbb{R}^l$, 这里 Ω 为非空有界闭集且 $0 \in \Omega$.

本文的控制目标是为系统(1)设计非凸输入约束控制器 $u \in \Omega$, 使得系统输出 y 能够跟踪期望轨迹 $r \in \mathbb{R}^l$, 闭环系统所有信号有界, 并保证跟踪误差在有限时间内收敛至原点的小邻域内.

注1 与文献[1-20]中考虑的单输入严格反馈系统相比, MIMO非线性系统(1)更加实用, 能够应用于多关节机械臂、倒立摆等实际物理系统的拉格朗日动

力学模型. 此外, 与文献[29-38]中考虑的饱和输入约束不同, 系统(1)受到非凸输入约束的制约, 考虑了不同输入分量约束幅值间的耦合影响.

假设1 未知控制增益矩阵 $g_i(\bar{x}_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为对称的, 且对于任意 \bar{x}_i 存在未知正常数 α_i, β_i 满足 $0 < \alpha_i \leq |\lambda_m(g_i(\bar{x}_i))| \leq |\lambda_M(g_i(\bar{x}_i))| \leq \beta_i$, 其中 $\lambda_m(g_i)$ 和 $\lambda_M(g_i)$ 分别为矩阵 g_i 的最小和最大特征值. 不失一般性, 假设 $\lambda_m(g_i(\bar{x}_i)) > 0$.

假设2 未知干扰向量 d_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 有界, 即存在未知常数 $d_i^* > 0$ 满足 $\|d_i\| \leq d_i^*$.

假设3 期望轨迹 r 及其导数 \dot{r} 连续且有界, 即存在未知常数 r^* 和 r_d^* 满足 $\|r\| \leq r^*, \|\dot{r}\| \leq r_d^*$.

注2 机械臂、无人车、倒立摆等实际机械系统的拉格朗日动力学模型的惯性矩阵是正定有界的, 表明了假设1的合理性. 相比于文献[13, 15-18]中不考虑外界干扰或要求干扰连续有界, 假设2取消了干扰连续的条件. 与文献[19, 23-25, 30-34]中假设期望轨迹足够光滑以及文献[11-12, 14-18]中假设期望轨迹二阶连续可导且有界相比, 假设3无需期望轨迹二阶及以上导数连续有界, 放宽了对参考轨迹的要求.

引理1 [38] 令 $x \in \mathbb{R}$, 对于任意 $\nu > 0$, 有

$$0 \leq |x| - x \tanh\left(\frac{x}{\nu}\right) \leq 0.2785\nu. \quad (2)$$

特别地, 若 $x \in \mathbb{R}^n$, 则式(2)为

$$0 \leq \|x\| - x^T \tanh\left(\frac{nx}{\nu}\right) \leq 0.2785\nu. \quad (3)$$

引理2 [11] (Young's 不等式) 令 $x, y \in \mathbb{R}^m$, 对于任意 $\epsilon > 0$, 有

$$x^T y \leq \frac{\epsilon^p}{p} \|x\|^p + \frac{1}{q\epsilon^q} \|y\|^q, \quad (4)$$

其中 $p, q > 1$ 且满足 $(p-1)(q-1)=1$.

引理3 [15] 对于任意近似精度 ϵ^* 和连续向量函数 $f(x) : U \rightarrow \mathbb{R}^m$, 其中 $U \in \mathbb{R}^n$ 为紧集, 存在理想权值矩阵 W , 使得非线性向量函数 $f(x)$ 能够被下式所示的径向基神经网络任意精度逼近:

$$f(x) = W^T S(x) + \varepsilon(x). \quad (5)$$

这里: $S(x) = [s_1(x), s_2(x), \dots, s_p(x)]^T$ 为高斯基函数向量, $\varepsilon(x)$ 为近似误差向量且满足 $\|\varepsilon(x)\| \leq \epsilon^*$, 理想权值矩阵 W 满足

$$W = \arg \min_{\hat{W} \in \mathbb{R}^{p \times m}} \left\{ \sup_{x \in U} \|\hat{W}^T S(x) - f(x)\| \right\}. \quad (6)$$

引理4 [39] 考虑非线性系统 $\dot{x} = f(x)$, $x(0) = x_0$, $x \in \mathbb{R}^m$, 若存在径向无界连续正定函数 $V(x)$ 满足 $\dot{V}(x) \leq -aV^p(x) - bV(x) + c$, 其中 $a, b, c > 0$ 且 $0 < p < 1$, 则系统为快速实际有限时间稳定的且系统状态收敛至 $\|x\| \leq \sqrt{\frac{2c}{(1-\delta)a}}$. 调整时间满足 $T(x_0) \leq \frac{1}{\delta b(1-p)} \ln \leq \left(1 + \frac{\delta b V(x_0)^{1-p}}{a}\right)$ 且 $0 < \delta < 1$.

2 非凸约束算子

为了处理非凸输入约束问题, 定义如下非凸约束算子.

定义1 非凸约束算子 $\Phi(\cdot)$ 满足

$$\Phi(z) = \begin{cases} \frac{\Psi(z)z}{\|z\|}, & z \neq 0; \\ 0, & z = 0; \end{cases} \quad (7)$$

且 $\sup_{z \in \Omega} \|\Phi(z)\| = \phi > 0$ 和 $\inf_{z \notin \Omega} \|\Phi(z)\| = \varphi > 0$. 函数 $\Psi(z)$ 为

$$\Psi(z) = \sup_{0 \leq b \leq \|z\|} \left\{ b \left| \frac{abz}{\|z\|} \in \Omega, \forall 0 \leq a \leq 1 \right. \right\}, \quad (8)$$

其中 a 和 b 均为标量参数. 利用该算子, 记

$$h(\mu) = \begin{cases} \frac{\|\Phi(\mu)\|}{\|\mu\|}, & \mu \neq 0; \\ 1, & \mu = 0. \end{cases} \quad (9)$$

这里 μ 为所要设计的控制输入. 由于 $\Phi(\mu)$ 与 μ 具有相同的方向, 非凸约束控制输入可表示为 $u = h(\mu)\mu$ 且显然有 $0 < h(\mu) \leq 1$.

注3 非凸约束算子 $\Phi(\cdot)$ 能够将反馈输入 μ 转化为与其同方向具有最大幅值的向量 $\Phi(\mu)$, 使得对于所有 $a \in [0, 1]$ 有 $a\Phi(\mu) \in \Omega$, 即在无需任何凸性假设下保证实际控制输入始终保持在非凸约束集合 Ω 内. 上确界 ϕ 表明 Ω 内任意一点与原点的距离是有界的, 即控制输入有界; 下确界 φ 表明原点在非凸约束集内部, 确保非凸输入约束下的实际控制输入在任意方向的可变不恒为0, 即控制输入方向可变, 具有稳定控制系统的控制能力. 图1给出了实例以更加直观地表明算子 $\Phi(\cdot)$ 的作用.

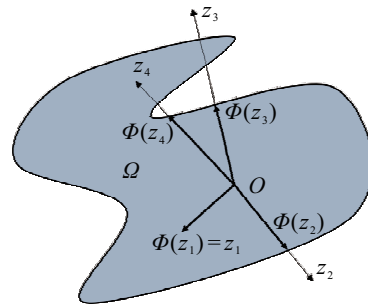


图1 非凸约束算子 $\Phi(x)$

3 控制设计

本节将利用反步法和动态面技术为严反馈非线性系统(1)设计非凸输入受限下的自适应神经网络有限时间跟踪控制器. 首先定义如下坐标变换:

$$\begin{cases} e_1 = y - r; \\ e_i = x_i - \hat{\eta}_{i-1}, & i = 2, 3, \dots, n. \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\hat{\eta}_i$ 为如下—阶滤波器的输出:

$$\tau_i \dot{\hat{\eta}}_i + \hat{\eta}_i = \eta_i, \quad \hat{\eta}_i(0) = \eta_i(0), \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (11)$$

这里: $\tau_i > 0$ 为滤波时间参数; η_i 为后续所设计的虚拟控制器, 且定义滤波误差为 $\tilde{\eta}_i = \hat{\eta}_i - \eta_i$.

为了便于控制设计, 定义如下符号:

$$\varpi_i = \|W_i\|^2, \quad \tilde{\varpi}_i = \hat{\varpi}_i - \varpi_i. \quad (12)$$

其中: W_i 为与第 i 步中神经网络权值矩阵 W_i 相关的自适应参数, 用于减轻在线计算负担; $\hat{\varpi}_i$ 为其估计值; $\tilde{\varpi}_i$ 为对应的估计误差.

下面利用反步法和动态面技术进行自适应控制设计, 具体步骤如下.

step 1: 考虑动态面 $e_1 = y - r$, 其时间导数为

$$\dot{e}_1 = f_1 + g_1(e_2 + \eta_1 + \tilde{\eta}_1) + d_1 - \dot{r}. \quad (13)$$

由假设2和假3, 得到 $\|d_1 - \dot{r}\| \leq d_1^* + r_d^*$, 进而由引理1, 有

$$\begin{aligned} e_1^T(d_1 - \dot{r}) &\leq \\ (d_1^* + r_d^*)\|e_1\| &\leq \\ (d_1^* + r_d^*)e_1^T \tanh\left(\frac{(d_1^* + r_d^*)le_1}{\nu_1}\right) &+ 0.2785\nu_1. \end{aligned} \quad (14)$$

选取李雅普诺夫函数为

$$V_1 = \frac{e_1^T e_1}{2\alpha_1} + \frac{\tilde{\varpi}_1^2}{2}. \quad (15)$$

由式(13)和(14), 对 V_1 求导, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq \\ \frac{e_1^T}{\alpha_1} \left[f_1 + (d_1^* + r_d^*) \tanh\left(\frac{(d_1^* + r_d^*)le_1}{\nu_1}\right) \right] &+ \\ \frac{e_1^T g_1}{\alpha_1} (e_2 + \eta_1 + \tilde{\eta}_1) + \tilde{\varpi}_1 \dot{\hat{\varpi}}_1 &+ 0.2785\nu_1. \end{aligned} \quad (16)$$

利用引理3中的径向基神经网络近似如下未知连续函数向量:

$$F_1(X_1) =$$

$$W_1^T S_1(X_1) + \varepsilon_1(X_1) =$$

$$\frac{f_1}{\alpha_1} + \frac{d_1^* + r_d^*}{\alpha_1} \tanh\left(\frac{(d_1^* + r_d^*)le_1}{\nu_1}\right) + \frac{\alpha_1^2 + 2\beta_1^2}{2\alpha_1^2} e_1. \quad (17)$$

其中: $X_1 = [x_1^T, r^T]^T$, 近似误差满足 $\|\varepsilon_1(X_1)\| \leq \varepsilon_1^*$ 且 ε_1^* 为未知有界近似精度. 因此, 式(16)可写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq e_1^T F_1(X_1) - \frac{\alpha_1^2 + 2\beta_1^2}{2\alpha_1^2} e_1^T e_1 + \frac{e_1^T g_1 e_2}{\alpha_1} + \\ \frac{e_1^T g_1 \eta_1}{\alpha_1} + \frac{e_1^T g_1 \tilde{\eta}_1}{\alpha_1} + \tilde{\varpi}_1 \dot{\hat{\varpi}}_1 &+ 0.2785\nu_1. \end{aligned} \quad (18)$$

由假设1和引理2, 得到

$$\begin{cases} \frac{e_1^T g_1 \tilde{\eta}_1}{\alpha_1} \leq \frac{\beta_1^2 \|e_1\|^2}{\alpha_1^2} + \frac{\|\tilde{\eta}_1\|^2}{4}, \\ e_1^T \varepsilon_1(X_1) \leq \frac{\|e_1\|^2}{2} + \frac{\varepsilon_1^{*2}}{2}, \\ e_1^T W_1^T S_1(X_1) \leq k_{11} \varpi_1 \|S_1(X_1)\|^2 \|e_1\|^2 + \frac{1}{4k_{11}}. \end{cases}$$

进一步地, 将上式代入式(18), 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq \frac{e_1^T g_1 e_2}{\alpha_1} + \frac{e_1^T g_1 \eta_1}{\alpha_1} + \frac{\|\tilde{\eta}_1\|^2}{4} + \tilde{\varpi}_1 \dot{\hat{\varpi}}_1 + \\ k_{11} \varpi_1 \|S_1(X_1)\|^2 \|e_1\|^2 + \nu_1^*, \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $\nu_1^* = \frac{1}{4k_{11}} + \frac{\varepsilon_1^{*2}}{2} + 0.2785\nu_1$.

设计虚拟控制器为

$$\begin{aligned} \eta_1 &= -k_{11} \hat{\varpi}_1 \|S_1(X_1)\|^2 e_1 - k_{12} e_1 - \\ k_{13} \|e_1\|^q \text{sgn}(e_1), \end{aligned} \quad (20)$$

这里 $k_{11}, k_{12}, k_{13} > 0$ 为正设计参数. 根据假设1, 有

$$\begin{aligned} \frac{e_1^T g_1 \eta_1}{\alpha_1} &\leq -k_{11} \hat{\varpi}_1 \|S_1(X_1)\|^2 \|e_1\|^2 - \\ k_{12} \|e_1\|^2 - k_{13} \|e_1\|^{q+1}. \end{aligned} \quad (21)$$

设计自适应律为

$$\dot{\hat{\varpi}}_1 = k_{11} \|S_1(X_1)\|^2 \|e_1\|^2 - k_{14} \hat{\varpi}_1, \quad (22)$$

其中 $k_{14} > 0$ 为正设计参数. 将式(20)和(22)代入(19), 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq \frac{e_1^T g_1 e_2}{\alpha_1} - k_{12} \|e_1\|^2 - k_{13} \|e_1\|^{q+1} + \\ \frac{\|\tilde{\eta}_1\|^2}{4} - k_{14} \tilde{\varpi}_1 \hat{\varpi}_1 + \nu_1^*. \end{aligned} \quad (23)$$

step i ($i = 2, 3, \dots, n-1$): 考虑动态面 $e_i = x_i - \hat{\eta}_{i-1}$, 并选取李雅普诺夫函数为

$$V_i = V_{i-1} + \frac{e_i^T e_i}{2\alpha_i} + \frac{\tilde{\varpi}_i^2}{2} + \frac{\tilde{\eta}_{i-1}^T \tilde{\eta}_{i-1}}{2}. \quad (24)$$

与step 1类似, 设计虚拟控制器为

$$\eta_i = -k_{i1} \hat{\varpi}_i \|S_i(X_i)\|^2 e_i - k_{i2} e_i - k_{i3} \|e_i\|^q \text{sgn}(e_i), \quad (25)$$

其中 $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3} > 0$ 为正设计参数. 同样可设计自适应律为

$$\dot{\hat{\varpi}}_i = k_{i1} \|S_i(X_i)\|^2 \|e_i\|^2 - k_{i4} \hat{\varpi}_i, \quad (26)$$

这里 $k_{i4} > 0$ 为正设计参数.

利用式(23)~(26), 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &\leq \frac{e_i^T g_i e_{i+1}}{\alpha_i} - \sum_{j=1}^i (k_{j2} \|e_j\|^2 + k_{j3} \|e_j\|^{q+1}) + \\ \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\|\tilde{\eta}_j\|^2}{2} + \frac{\|\tilde{\eta}_i\|^2}{4} + \sum_{j=1}^{i-1} \tilde{\eta}_j^T \dot{\tilde{\eta}}_j - \\ \sum_{j=1}^i k_{j4} \tilde{\varpi}_j \hat{\varpi}_j + \sum_{j=1}^i \nu_j^*. \end{aligned} \quad (27)$$

step n : 考虑动态面 $e_n = x_n - \hat{\eta}_{n-1}$, 时间导数为

$$\dot{e}_n = f_n + g_n u + d_n - \dot{\hat{\eta}}_{n-1}. \quad (28)$$

由一阶滤波器(11)可知, $\dot{\hat{\eta}}_{n-1} = -\frac{\tilde{\eta}_{n-1}}{\tau_{n-1}}$, 并根据假设2和引理1, 有

$$e_n^T d_n \leq d_n^* e_n^T \tanh\left(\frac{d_n^* l e_n}{\nu_n}\right) + 0.2785\nu_n. \quad (29)$$

选取李雅普诺夫函数为

$$V_n = V_{n-1} + \frac{e_n^T e_n}{2\alpha_n} + \frac{\tilde{\omega}_n^2}{2} + \frac{\tilde{\eta}_{n-1}^T \tilde{\eta}_{n-1}}{2}. \quad (30)$$

由式(28)和(29),对 V_i 求导,得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &\leq \\ \dot{V}_{n-1} &+ \frac{e_n^T}{\alpha_i} \left[f_n + d_n^* \tanh\left(\frac{d_n^* l e_n}{\nu_n}\right) \right] + \frac{e_n^T g_n}{\alpha_n} u + \\ &\frac{e_n^T \tilde{\eta}_{n-1}}{\alpha_n \tau_{n-1}} + \tilde{\eta}_{n-1}^T \dot{\tilde{\eta}}_{n-1} + \tilde{\omega}_n \dot{\tilde{\omega}}_n + 0.2785\nu_n. \end{aligned} \quad (31)$$

同样地,利用引理3中的径向基神经网络近似如下未知连续函数向量:

$$\begin{aligned} F_n(X_n) &= W_n^T S_n(X_n) + \varepsilon_n(X_n) = \\ &\frac{g_{n-1} e_{n-1}}{\alpha_{n-1}} + \frac{f_n}{\alpha_n} + \frac{d_n^*}{\alpha_n} \tanh\left(\frac{d_n^* l e_n}{\nu_n}\right) + \\ &\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\alpha_n^2 \tau_{n-1}^2}\right) e_n. \end{aligned} \quad (32)$$

其中: $X_n = [\tilde{x}_n^T, e_{n-1}^T, e_n^T]^T$, 近似误差满足 $\|\varepsilon_n(X_n)\| \leq \varepsilon_n^*$ 且 ε_n^* 为未知有界近似精度. 因此,式(31)可写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &\leq \dot{V}_{n-1} + \frac{e_n^T g_n}{\alpha_n} u - \frac{e_{n-1}^T g_{n-1} e_n}{\alpha_{n-1}} + e_n^T F_n(X_n) - \\ &\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\alpha_n^2 \tau_{n-1}^2}\right) e_n^T e_n + \frac{e_n^T \tilde{\eta}_{n-1}}{\alpha_n \tau_{n-1}} + \\ &\tilde{\eta}_{n-1}^T \dot{\tilde{\eta}}_{n-1} + \tilde{\omega}_n \dot{\tilde{\omega}}_n + 0.2785\nu_n. \end{aligned} \quad (33)$$

由假设1和引理2,得到

$$\begin{cases} \frac{e_n^T \tilde{\eta}_{n-1}}{\alpha_n \tau_{n-1}} \leq \frac{\|e_n\|^2}{\alpha_n^2 \tau_{n-1}^2} + \frac{\|\tilde{\eta}_{n-1}\|^2}{4}, \\ e_n^T \varepsilon_n(X_n) \leq \frac{\|e_n\|^2}{2} + \frac{\varepsilon_n^{*2}}{2}, \\ e_n^T W_n^T S_n(X_n) \leq k_{n1} \varpi_n \|S_n(X_n)\|^2 \|e_n\|^2 + \frac{1}{4k_{n1}}. \end{cases}$$

进一步地,将上式代入式(33),得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &\leq \dot{V}_{n-1} - \frac{e_{n-1}^T g_{n-1} e_n}{\alpha_{n-1}} + \frac{e_n^T g_n u}{\alpha_n} + \\ &\frac{\|\tilde{\eta}_{n-1}\|^2}{4} + k_{n1} \varpi_n \|S_n(X_n)\|^2 \|e_n\|^2 + \\ &\tilde{\eta}_{n-1}^T \dot{\tilde{\eta}}_{n-1} + \tilde{\omega}_n \dot{\tilde{\omega}}_n + \nu_n^*, \end{aligned} \quad (34)$$

其中 $\nu_n^* = \frac{1}{4k_{n1}} + \frac{\varepsilon_n^{*2}}{2} + 0.2785\nu_n$.

设计非凸输入约束控制器为

$$\begin{cases} \mu = -\kappa_{n1} \tilde{\omega}_n \|S_n(X_n)\|^2 e_n - \kappa_{n2} e_n - \\ \kappa_{n3} \|e_n\|^q \text{sgn}(e_n), \\ u = \Phi(\mu) = h(\mu). \end{cases} \quad (35)$$

这里: κ_{n1} 、 κ_{n2} 、 $\kappa_{n3} > 0$ 为正设计参数, $\Phi(\cdot)$ 为定义1中的非凸约束算子. 根据假设1,有

$$\frac{e_n^T g_n u}{\alpha_n} \leq -\kappa_{n1} h(\mu) \tilde{\omega}_n \|S_n(X_n)\|^2 \|e_n\|^2 -$$

$$\kappa_{n2} h(\mu) \|e_n\|^2 - \kappa_{n3} h(\mu) \|e_n\|^{q+1}. \quad (36)$$

设计自适应律为

$$\dot{\tilde{\omega}}_n = k_{n1} \|S_n(X_n)\|^2 \|e_n\|^2 - k_{n4} \tilde{\omega}_n, \quad (37)$$

其中 k_{n1} 、 $k_{n4} > 0$ 为正设计参数且 $\tilde{\omega}_n(0) > 0$, 则对于所有 $t > 0$ 恒有 $\tilde{\omega}_n(t) > 0$. 将式(27)、(35)和(37)代入(34),得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &\leq -\sum_{i=1}^{n-1} (k_{i2} \|e_i\|^2 + k_{i3} \|e_i\|^{q+1}) - \\ &\kappa_{n2} h(\mu) \|e_n\|^2 - \kappa_{n3} h(\mu) \|e_n\|^{q+1} - \\ &(\kappa_{n1} h(\mu) - k_{n1}) \tilde{\omega}_n \|S_n(X_n)\|^2 + \\ &\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\|\tilde{\eta}_i\|^2}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \tilde{\eta}_i^T \dot{\tilde{\eta}}_i - \\ &\sum_{i=1}^n k_{i4} \tilde{\omega}_i \dot{\tilde{\omega}}_i + \sum_{i=1}^n \nu_i^*. \end{aligned} \quad (38)$$

注4 式(14)利用不等式放缩处理期望轨迹的一阶导数 \dot{r} ,避免其出现在所设计控制器和自适应律中,从而在对 e_i 、 $\tilde{\eta}_i$ 、 $\tilde{\omega}_i$ 求导时,无需出现期望轨迹的二阶导数项 \ddot{r} .

4 稳定性分析

记 $e = [e_1^T, e_2^T, \dots, e_n^T]^T$, $\tilde{\eta} = [\tilde{\eta}_1^T, \tilde{\eta}_2^T, \dots, \tilde{\eta}_n^T]^T$, $\tilde{\omega} = [\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_n]^T$, 并定义如下紧集:

$$\Xi := \{[e^T, \tilde{\eta}^T, \tilde{\omega}^T]^T \mid V_n \leq B_v\}, \quad (39)$$

其中 $B_v > 0$ 为任意正常数.

由假设3可知,对于任意 $B_r > 0$, 集合 $\Lambda := \{[r^T, \dot{r}^T]^T \mid \|r\|^2 + \|\dot{r}\|^2 \leq B_r\}$ 为紧集. 由一阶滤波器(11),有

$$\dot{\tilde{\eta}}_i = -\frac{\tilde{\eta}_i}{\tau_i} - \dot{\eta}_i, \quad (40)$$

则在紧集 $\Xi \times \Lambda$ 内存在常数 γ_i , 使得 $\|\dot{\tilde{\eta}}_i\| \leq \gamma_i$. 若 $V_n \leq B_v$, 则 e 、 $\tilde{\eta}$ 、 $\tilde{\omega}$ 均有界, 由式(35)可知, μ 有界, 即存在正常数 μ_0 满足 $\|\mu\| \leq \mu_0$. 进一步地, 由定义1可知 $\|\Phi(\mu)\| > \varphi$, 因此由式(9), 得到

$$h_0 \triangleq \frac{\varphi}{\mu_0} \leq h(\mu) \leq 1. \quad (41)$$

定理1 考虑不确定MIMO严反馈非线性系统(1), 采用式(11)中的一阶滤波器, 式(20)、(25)和(35)中的虚拟控制输入和非凸输入约束控制器, 以及式(22)、(26)和(37)中的自适应律, 并选择满足如下条件的设计参数:

$$\begin{cases} k_{i1} > 0, k_{i2} > 0, k_{i3} > 0, k_{i4} > 0; \\ k_{n1} > 0, k_{n4} > 0, \frac{1}{\tau_i} > 1, \\ i = 1, 2, \dots, n-1; \\ \kappa_{n1} > \frac{k_{n1}}{h_0}, \kappa_{n2} > 0, \kappa_{n3} > 0. \end{cases} \quad (42)$$

则对于任意初始条件 $V_n(0) \leq B_v$, 闭环系统的所有信号均为一致最终有界的且系统输出 y 能够在有限时间内跟踪期望轨迹 r .

定理证明过程略.

注5 由参数选取条件(42)可知, 各参数的选取范围均与控制增益矩阵 g_i 的上界和下界无关. 此外, 考虑到控制器中符号函数的存在可能导致的抖振现象, 可利用双曲正切函数对其进行近似.

5 仿真分析

本节给出数值仿真算例来验证所提出理论结果的有效性. 考虑具有非凸输入约束和外界干扰的二阶严格反馈非线性系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = x_{11}^2 + x_{12} + (1 + 0.5 \cos(x_{11}))x_{21} + d_{11}, \\ \dot{x}_{12} = x_{11}e^{-x_{12}} + (2 + \sin(x_{11} + x_{12}))x_{22} + d_{12}, \\ \dot{x}_{21} = x_{11}x_{12} + (2 + \sin(x_{11}^2x_{21}))u_1 + d_{21}, \\ \dot{x}_{22} = x_{12} + x_{21}^2 + (1 - 0.5 \cos(x_{21}x_{22}))u_2 + d_{22}, \\ y_1 = x_{11}, \\ y_2 = x_{12}. \end{cases}$$

其中: $d_{11} = 0.3e^{-t} \sin(x_{11})$, $d_{12} = 0.5e^{-t} \sin(x_{12})$, $d_{21} = d_{22} = 0.2 \times \text{square}(t)$ 为外界干扰且 $\text{square}(t)$ 为方波信号. 选择期望轨迹信号为 $r = [r_1, r_2]^T = [0.8 \sin(2t), 0.4 \cos(3t)]^T$. 系统初始状态为 $x(0) = [x_{11}(0), x_{12}(0), x_{21}(0), x_{22}(0)]^T = [0.2, -1, 0.8, 0]^T$. 由定理1的结果, 选取设计参数为 $k_{11} = 10, k_{12} = 5, k_{13} = 2, k_{14} = 1, k_{21} = 0.1, k_{24} = 1, \kappa_{21} = 10, \kappa_{22} = 5, \kappa_{23} = 2, \tau_1 = 0.05$. 非凸输入约束集合选择为

$$\Omega = \{(u_1, u_2) | 0.5|u_1| + |u_2| \leq 7.5\} \cup \{(u_1, u_2) | 2|u_1| + |u_2| \leq 15\}.$$

由仿真结果图2~图5可知, 系统输出 y 能够很好地跟踪期望轨迹 r , 状态 x_2 也可以跟踪虚拟控制器 η_1 , 对应的跟踪误差 e_1 和 e_2 均有界. 图6为自适应调节参数 $\hat{\omega}_1, \hat{\omega}_2$. 图6表明自适应调节参数 $\hat{\omega}_1$ 和 $\hat{\omega}_2$ 有界. 图7对比了所设计无约束控制输入 μ 与经过非凸约束算子 $\Phi(\cdot)$ 限制的实际控制输入 u . 由图7可见, 所采用非凸约束算子能够限制实际输入的幅值, 在小幅值输入下实现系统的稳定. 图8为非凸约束控制输入的相平面轨迹, 其始终位于非凸约束集合 Ω 内.

作为对比, 将文献[30]中所设计的输入饱和控制方案应用于系统, 选择非凸约束集合 Ω 内的最大输入饱和和约束集合为 $|u_1| \leq 5, |u_2| \leq 5$.

由仿真结果图9和图10可见, 系统输出 y 和状态 x_2 的第1个分量能够跟踪期望轨迹 r 和虚拟控制器 η_1 的对应分量, 而无法保证第2个分量的跟踪效果.

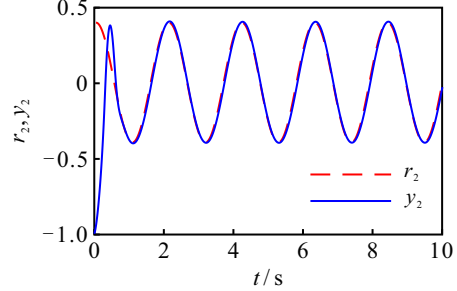
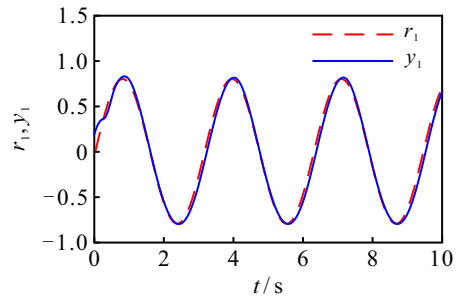


图2 系统输出 y 和期望轨迹 r

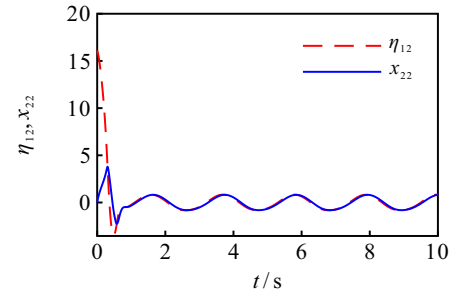
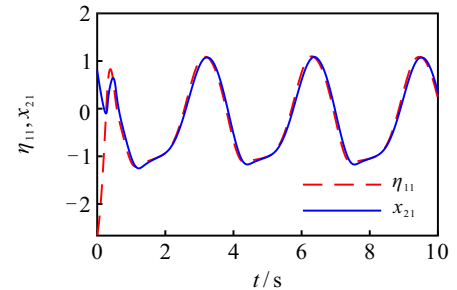


图3 状态 x_2 和虚拟控制器 η_1

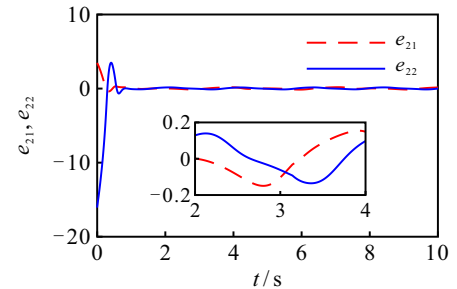
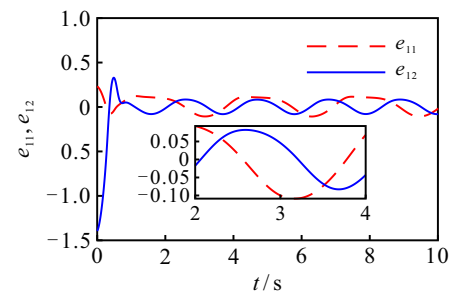


图4 跟踪误差 e_1 和 e_2

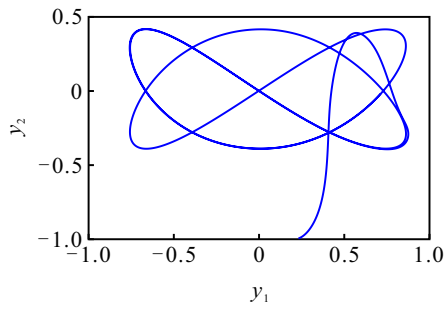


图5 y_1, y_2 相平面轨迹

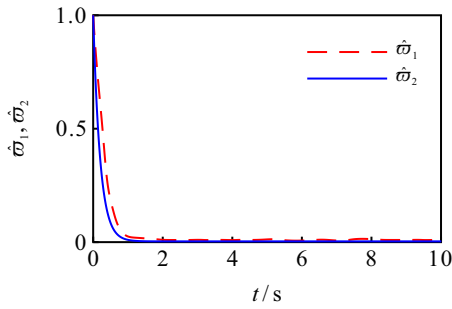


图6 自适应调节参数 $\hat{\omega}_1, \hat{\omega}_2$

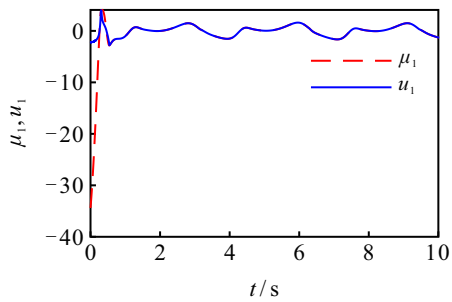


图7 无/有约束控制输入 μ 和 u

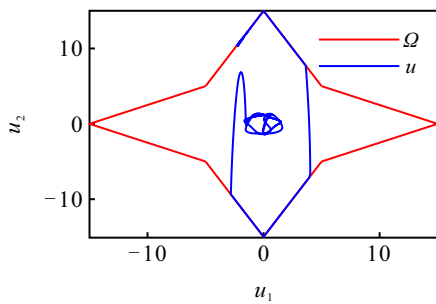
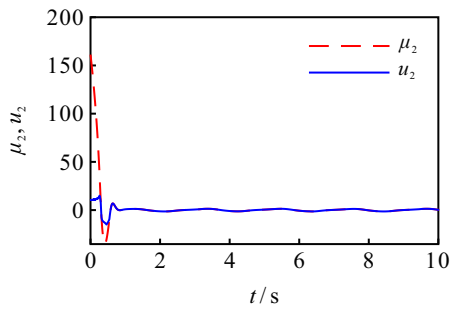


图8 非凸约束控制输入 u 相平面轨迹

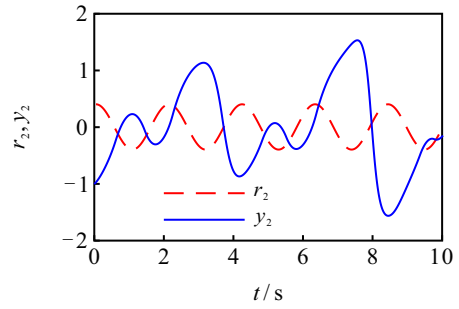
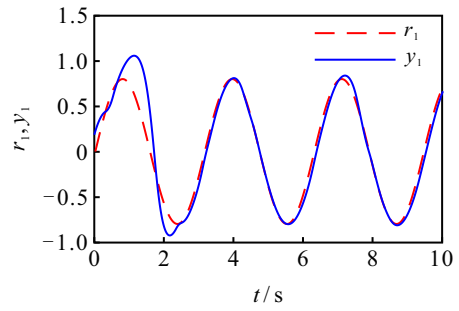


图9 文献[30]控制方案下系统输出 y 和期望轨迹 r

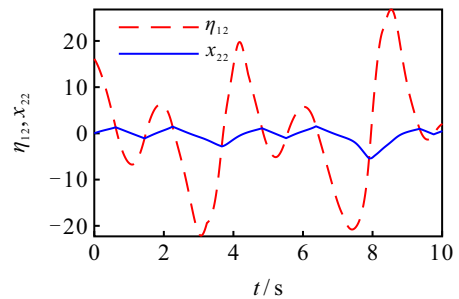
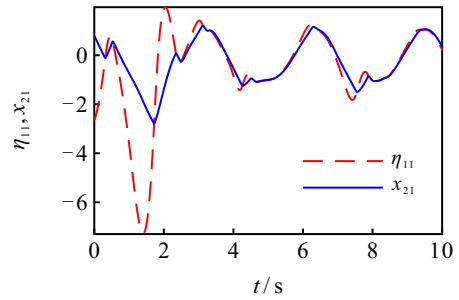


图10 文献[30]控制方案下状态 x_2 和虚拟控制器 η_1

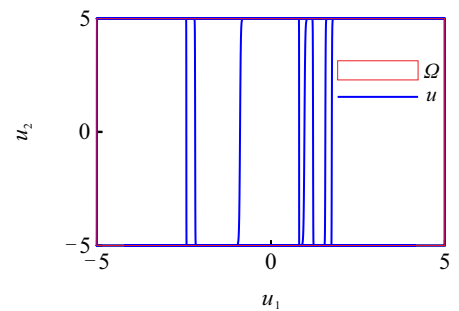


图11 饱和约束控制输入 u 相平面轨迹

对比图9与图11中的控制输入相平面轨迹可以看出:控制输入 u_1 在非凸约束集合和饱和约束集合均能够保持在 $[-5, 5]$ 内; u_2 的幅值在非凸约束集合可以大于5,然而在饱和约束集合只能取值在5以内,限制了

系统的控制能力,表明仅考虑输入饱和难以保证系统达到稳定,进一步表明了所提出非凸输入约束控制方案的有效性.

6 结 论

本文针对一类具有非凸输入约束和外界干扰的不确定MIMO严格反馈非线性系统,提出了有限时间自适应神经网络动态面跟踪控制方案.通过引入非凸约束算子,将所设计反馈控制输入转化为与其同方向具有最大幅值的实际输入向量,保证其始终位于对应的非凸集合内.利用径向基神经网络、不等式放缩和动态面技术,设计了有限时间跟踪控制器,可避免对控制增益矩阵上界和下界的需求,同时能够处理不连续外界干扰给控制设计带来的难题.所提出控制方案能够保证闭环系统所有信号为有界的,且可以使得跟踪误差在有限时间内收敛至原点的小邻域内.仿真结果验证了所提出方案的有效性.

参考文献(References)

- [1] Xu N, Liu X, Li Y L, et al. Dynamic event-triggered control for a class of uncertain strict-feedback systems via an improved adaptive neural networks backstepping approach[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, PP(99): 1-10.
- [2] Zhang C H, Chang L, Xing L T, et al. Fixed-time stabilization of a class of strict-feedback nonlinear systems via dynamic gain feedback control[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(2): 403-410.
- [3] Zhang J X, Li K W, Li Y M. Output-feedback based simplified optimized backstepping control for strict-feedback systems with input and state constraints[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, 8(6): 1119-1132.
- [4] Zhang J X, Chai T Y. Global prescribed performance control of unknown strict-feedback systems with quantized references[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(10): 6257-6267.
- [5] Aslmostafa E, Mirzaei M J, Asadollahi M, et al. Free-will arbitrary time stabilisation problem for a class of nonlinear strict-feedback systems based on the backstepping method[J]. *International Journal of Control*, 2023, 96(11): 2749-2761.
- [6] Huang J S, Wang W, Wen C Y, et al. Adaptive control of a class of strict-feedback time-varying nonlinear systems with unknown control coefficients[J]. *Automatica*, 2018, 93: 98-105.
- [7] Hou M, Shi W R, Fang L, et al. Adaptive dynamic surface control of high-order strict feedback nonlinear systems with parameter estimations[J]. *Science China Information Sciences*, 2023, 66(5): 159203.
- [8] Swaroop D, Hedrick J K, Yip P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(10): 1893-1899.
- [9] Zhang T P, Xia M Z, Yi Y. Adaptive neural dynamic surface control of strict-feedback nonlinear systems with full state constraints and unmodeled dynamics[J]. *Automatica*, 2017, 81: 232-239.
- [10] Niu B, Li H, Zhang Z Q, et al. Adaptive neural-network-based dynamic surface control for stochastic interconnected nonlinear nonstrict-feedback systems with dead zone[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(7): 1386-1398.
- [11] 张天平, 邓伟伟, 吴自文, 等. 具有全状态约束和未建模动态的严格反馈系统有限时间自适应动态面控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 108-118. (Zhang T P, Deng W W, Wu Z W, et al. Finite-time adaptive dynamic surface control for strict-feedback systems with full state constraints and unmodeled dynamics[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(1): 108-118.)
- [12] 朱新峰, 丁文武, 张天平. 具有输入量化和全状态约束的非严格反馈随机非线性系统的有限时间动态面控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2575-2584. (Zhu X F, Ding W W, Zhang T P. Finite-time dynamic surface control for nonstrict-feedback stochastic nonlinear systems with input quantization and full-state constraints[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(10): 2575-2584.)
- [13] Li Y M, Liu Y J, Tong S C. Observer-based neuro-adaptive optimized control of strict-feedback nonlinear systems with state constraints[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 33(7): 3131-3145.
- [14] Cui B, Xia Y Q, Liu K, et al. Finite-time tracking control for a class of uncertain strict-feedback nonlinear systems with state constraints: A smooth control approach[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(11): 4920-4932.
- [15] Lv J X, Ju X Z, Wang C H. Neural network-based nonconservative predefined-time backstepping control for uncertain strict-feedback nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, PP(99): 1-12.
- [16] Tong S C, Min X, Li Y X. Observer-based adaptive fuzzy tracking control for strict-feedback nonlinear systems with unknown control gain functions[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(9): 3903-3913.
- [17] Zhang J, Jiang W Y, Ge S S. Adaptive fuzzy control for uncertain strict-feedback nonlinear systems with full-state constraints using disturbance observer[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(10): 6145-6156.
- [18] Sun K K, Liu L, Qiu J B, et al. Fuzzy adaptive finite-time fault-tolerant control for strict-feedback nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(4): 786-796.
- [19] Wang H Q, Bai W, Zhao X D, et al. Finite-time-prescribed

- performance-based adaptive fuzzy control for strict-feedback nonlinear systems with dynamic uncertainty and actuator faults[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(7): 6959-6971.
- [20] Ma Z Y, Tong S C. Nonlinear filters-based adaptive fuzzy control of strict-feedback nonlinear systems with unknown asymmetric dead-zone output[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023, PP(99): 1-11.
- [21] Zhang Y B, Wu W T, Lu J H, et al. Neural predictor-based dynamic surface parallel control for MIMO uncertain nonlinear strict-feedback systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(8): 2909-2913.
- [22] Wu B, Chen M, Shao S Y, et al. Disturbance-observer-based adaptive NN control for a class of MIMO discrete-time nonlinear strict-feedback systems with dead zone[J]. *Neurocomputing*, 2021, 446: 23-31.
- [23] Wan P, Zhou Y F. Observer-based adaptive fuzzy output-feedback tracking control of MIMO strict-feedback nonlinear systems on time scales[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, 32(2): 420-434.
- [24] Sui S, Tong S C. Finite-time fuzzy adaptive PPC for nonstrict-feedback nonlinear MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023, 53(2): 732-742.
- [25] Jin X. Adaptive fixed-time control for MIMO nonlinear systems with asymmetric output constraints using universal barrier functions[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(7): 3046-3053.
- [26] Shi W X. Adaptive fuzzy output-feedback control for nonaffine MIMO nonlinear systems with prescribed performance[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(5): 1107-1120.
- [27] Zhou B, Huang X C, Song Y D, et al. Asymptotic tracking control for uncertain MIMO nonlinear systems with guaranteed performance and enhanced controllability[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2024, 69(6): 4005-4012.
- [28] Huang X C, Wen C Y, Song Y D. Adaptive neural control for uncertain constrained pure feedback systems with severe sensor faults: A complexity reduced approach[J]. *Automatica*, 2023, 147: 110701.
- [29] Wen C Y, Zhou J, Liu Z T, et al. Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems in the presence of input saturation and external disturbance[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(7): 1672-1678.
- [30] Zhou X, Gao C, Li Z G, et al. Observer-based adaptive fuzzy finite-time prescribed performance tracking control for strict-feedback systems with input dead-zone and saturation[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 103(2): 1645-1661.
- [31] Hu X, Wei X J, Zhang H F, et al. Adaptive saturation compensation for strict-feedback systems with unknown control coefficient and input saturation[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2021, 35(6): 1083-1098.
- [32] Zerari N, Chemachema M. Event-triggered adaptive output-feedback neural-networks control for saturated strict-feedback nonlinear systems in the presence of external disturbance[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 104(2): 1343-1362.
- [33] Xu W Q, Liu X P, Wang H Q, et al. Event-based adaptive NN controller design for strict-feedback discrete-time nonlinear systems with input dead zone and saturation[J]. *International Journal of Control*, 2022, 95(1): 218-233.
- [34] Wang Q, Gao C, Cui Y, et al. Adaptive control-based barrier Lyapunov functions for strict-feedback stochastic nonlinear systems with input saturation and dead zone[J]. *International Journal of Systems Science*, 2022, 53(15): 3165-3176.
- [35] 李元新, 魏淑仪. 具有输入饱和的不确定非线性系统自适应渐近跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2326-2334.
(Li Y X, Wei S Y. Adaptive asymptotic tracking of uncertain nonlinear systems with input saturation[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(8): 2326-2334.)
- [36] Zhao N N, Zhang A M, Ouyang X Y, et al. A novel prescribed performance controller for strict-feedback nonlinear systems with input constraints[J]. *ISA Transactions*, 2023, 132: 258-266.
- [37] Bikas L N, Rovithakis G A. Prescribed performance under input saturation for uncertain strict-feedback systems: A switching control approach[J]. *Automatica*, 2024, 165: 111663.
- [38] Chen M, Ge S S, Ren B B. Adaptive tracking control of uncertain MIMO nonlinear systems with input constraints[J]. *Automatica*, 2011, 47(3): 452-465.
- [39] Jin D Y, Niu B, Wang H Q, et al. A new adaptive DS-based finite-time neural tracking control scheme for nonstrict-feedback nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(2): 1014-1018.

作者简介

张腾飞(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为自适应控制以及多智能体系统, E-mail: tfzhang@buaa.edu.cn;

李明星(1986—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为鲁棒控制、车辆控制以及智能控制, E-mail: lmx196@126.com.