

具有不匹配扰动的非线性系统自适应精确跟踪控制

张晓华¹, 井超², 穆继亮¹

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对非线性严反馈系统存在不匹配扰动的情况, 开发了一种自适应精确跟踪控制策略。该策略确保了跟踪误差不再仅仅收敛到原点附近的小范围内, 而是能够精确地收敛到零。同时, 为了降低算法设计的复杂性, 将不匹配扰动及虚拟控制器的微分项整合到一个多项式中, 并对其进行上界估计, 然后在控制器设计中进行相应的补偿。一旦跟踪误差偏离原点, 相应的控制策略就会立即被激活, 使跟踪误差沿原点滑动, 从而实现精确的跟踪控制。最终, 利用Lyapunov稳定性理论证明了闭环系统的稳定性, 并确认闭环系统的所有信号都是有界的。仿真实验结果进一步验证了所提方法, 显示跟踪误差能够精确地收敛到零, 同时闭环系统的所有信号均表现出半全局一致最终有界的特性。

关键词: 精确跟踪控制; 非线性系统; 复合多项式; 自适应控制; 不匹配扰动

中图分类号: TJ303.4

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025086

引用格式: 张晓华, 井超, 穆继亮. 具有不匹配扰动的非线性系统自适应精确跟踪控制[J]. 测试技术学报, 2025, 39(5): 518-523.

ZHANG Xiaohua, JING Chao, MU Jiliang. Adaptive precise tracking control for nonlinear systems under mismatched disturbances[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(5): 518-523.

Adaptive Precise Tracking Control for Nonlinear Systems Under Mismatched Disturbances

ZHANG Xiaohua¹, JING Chao², MU Jiliang¹

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Data Science and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the presence of mismatched disturbances, an adaptive Precise Tracking Control (PTC) mechanism has been developed for nonlinear strict-feedback systems. Based on this mechanism, the tracking error no longer converges to a small neighborhood around the origin but converges precisely to zero. Simultaneously, the mismatched disturbances and the derivative of the virtual controller are combined into a polynomial, for which an upper bound estimation is conducted and compensated for in the controller design to mitigate the complexity of algorithm design. In this way, once the tracking error deviates from the origin, the corresponding control strategy is activated, forcing it to slide along the origin, thereby achieving PTC. Finally, the stability of the closed-loop system is proven using Lyapunov stability theory, and all signals within the closed-loop system are bounded. Simulation results demonstrate that the tracking error converges precisely to zero, and all signals of the closed-loop system are semi-globally uniformly ultimately bounded.

Key words: precise tracking control; nonlinear systems; compound polynomials; adaptive control; mismatched disturbances

收稿日期: 2025-03-06

作者简介: 张晓华(1981-), 女, 高级实验师, 硕士, 主要从事智能感知与控制研究。E-mail: zxh@nuc.edu.cn.

0 引言

近几十年来,线性和非线性理论取得了重大进展^[1-3]。在受控系统的初步探索阶段,研究者们通常事先假定模型未知或不确定满足部分已知的先验知识。Zhang 等^[3]针对切换非线性系统在外部扰动和输入饱和同时存在的情况,提出了自适应模糊命令滤波控制,解决了被控系统的性能约束。当缺乏先决条件时,控制方法会陷入困境。为了突破这一局限,并超越先前的知识约束,自适应反步方法被提出,该方法能够使非线性系统具备重新配置为三角形结构的能力,从而实现更为灵活和有效的控制^[4-5]。

设计自适应反步控制器往往包含对子系统的虚拟控制设计。随着系统阶数的不断攀升,虚拟控制的推导过程需要反复迭代计算,进而导致计算量剧增,控制器设计的复杂性也呈现出指数级上升的趋势。一般来说,动态面控制方法^[6-7]和命令滤波方法^[8-9]常被用来解决反复微分带来的计算爆炸问题。基于动态面技术,Chu 等^[7]设计了一种具有双隐层循环神经网络结构的全调节神经网络,并基于此结构提出了一种自适应全局滑模控制器,适用于一类动态系统。Wei 等^[9]则基于命令滤波器的自适应模糊有限时间输出反馈控制方法,用于具有输入饱和的状态受限非线性系统。虽然上述方法可以较好地解决计算爆炸问题,但跟踪误差仅收敛到一个小的邻域,而不是精准收敛到零。

此外,干扰作为一个不可忽视的关键因素,存在于整个被控过程中,对被控系统的性能构成显著影响^[10]。为了有效消除未知干扰带来的影响,研究并开发了非线性干扰观测器^[11-14]。这种方法旨在减轻干扰的影响,从而提高被控系统的鲁棒性和整体性能。其中,针对外部干扰下的飞机编队控制问题,Shao 等^[12]提出了一种分布式编队跟踪控制方法。随后,He 等^[14]研究了内力与位置控制的复杂问题,提出基于扰动观测器的径向基函数神经网络控制方案,旨在精确估计未知参数、近似输入饱和和扰动并提升系统鲁棒性,利用扰动观测器、自适应神经网络协同控制及全状态反馈实现。值得一提的是,本文所考虑的不匹配外部干扰是通过构建复合多项式来解决的,其处理方法与现有基于扰动观测器的方法不同,该方

法将不确定项和未建模动态复合在多项式中,简化了设计过程。

基于上述分析,本研究致力于突破传统控制方法的局限,提出一种创新性控制策略,确保系统跟踪误差能够精确渐近收敛至零,而非仅能收敛至原点附近的有限邻域。针对含不匹配扰动的非线性系统精确跟踪问题,本文的核心贡献在于设计了一种新型自适应精确跟踪控制(Precise Tracking Control, PTC)机制,其技术突破主要体现在以下三方面:一是创新性地采用复合多项式方法整合虚拟控制器微分项,通过实时估计该多项式的上界信息来重构控制器架构,这一设计从根本上规避了传统动态面控制与命令滤波方法中固有的计算爆炸问题;二是构建具有误差驱动特性的激活机制,当系统检测到跟踪误差偏离预期轨迹时,自主触发控制作用以强制误差回归至原点;三是当参数估计值收敛至真实上界时,所提控制方案可实现零误差跟踪的终极控制目标,即跟踪误差精确收敛性到零,这一特性显著超越了现有方法只能保证最终一致有界的性能水平。

1 系统描述与预备知识

考虑具有三角结构特征的非线性系统在不匹配干扰下的模型表示为

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= h_i(\underline{x}_i) + x_{i+1} + \mu_i, \quad 1 \leq i \leq n-1, \\ \dot{x}_n &= h_n(\underline{x}_n) + u(t) + \mu_n,\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $h_i(\underline{x}_i)$ 为已知、光滑且连续的非线性函数; $\underline{x}_i = [x_1, \dots, x_i]^T$ 为 i -th 维度的状态向量,系统输出表示为 $y = x_1$; μ_i 为未知不匹配扰动,存在未知常数 $\bar{\mu}_i > 0$, 使得 $|\mu_i| \leq \bar{\mu}_i$; $u(t)$ 为控制输入函数。

假设 1^[6] 参考信号 $y_d(t)$ 及其 $(n-1)$ 次导数是可微有界的。

随后,定义跟踪误差 e_i 为

$$\begin{aligned}e_1 &= x_1 - \alpha_0, \\ e_i &= x_i - \alpha_{i-1}, \quad 2 \leq i \leq n,\end{aligned}\quad (2)$$

式中: $\alpha_0 = y_d$; α_{i-1} 表示虚拟控制器。

本文的控制目标为: 针对非线性严反馈系统存在不匹配扰动的情况, 开发一种自适应 PTC 策略, 确保跟踪误差能够精确收敛到零, 且闭环系统的所有信号是半全局一致最终有界的。

注释 1 假设 1 是研究自适应反步控制中常见的假设, 类似的情况参考文献[5-6]。

2 控制器设计与稳定性分析

2.1 自适应PTC设计

第1步 在 $x_2 = e_2 + \alpha_1$ 的基础上,对 e_1 求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= x_2 + h_1(\underline{x}_1) + \mu_1 - \dot{y}_d \leq \\ &e_2 + \alpha_1 + h_1(\underline{x}_1) - \dot{y}_d + \theta_1, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: θ_1 为多项式 $|\mu_1|$ 的上界。需要注意的是,不匹配扰动 μ_1 被复合在多项式 θ_1 中,其上界估计信息 $\hat{\theta}_1$ 用于控制器的设计,这是实现PTC的关键。

定义候选Lyapunov函数 V_1 为

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2l_1}\tilde{\theta}_1^2, \quad (4)$$

式中: $l_1 > 0$, $\theta_1 = \hat{\theta}_1 + \tilde{\theta}_1$ 。 V_1 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1\dot{e}_1 - \frac{1}{l_1}\tilde{\theta}_1\dot{\hat{\theta}}_1 \leq \\ &e_1(e_2 + \alpha_1 + h_1(\underline{x}_1) - \dot{y}_d + \theta_1) - \frac{1}{l_1}\tilde{\theta}_1\dot{\hat{\theta}}_1. \end{aligned} \quad (5)$$

在此基础上,构建控制信号 α_1 和复合多项式的上界估计 $\hat{\theta}_1$ 为

$$\alpha_1 = -c_1e_1 - \frac{1}{2}e_1 - h_1(\underline{x}_1) + \dot{y}_d - \hat{\theta}_1\text{sign}(e_1), \quad (6)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = l_1|e_1|. \quad (7)$$

通过调用杨氏不等式,有

$$e_1e_2 \leq \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2. \quad (8)$$

将式(6)~式(8)代入式(5),可化简为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -c_1e_1^2 + \theta_1|e_1| - \hat{\theta}_1|e_1| - \tilde{\theta}_1|e_1| + \frac{1}{2}e_2^2 \leq \\ &-c_1e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2. \end{aligned} \quad (9)$$

第2步 ($i = 2, \dots, n-1$) 在 $x_{i+1} = e_{i+1} + \alpha_i$ 的基础上,对 e_i 求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_i &= x_{i+1} + h_i(\underline{x}_i) + \mu_i - \dot{\alpha}_{i-1} \leq e_{i+1} + \alpha_i + \\ &h_i(\underline{x}_i) + \theta_i, \end{aligned} \quad (10)$$

式中: θ_i 为多项式 $|\mu_i - \dot{\alpha}_{i-1}|$ 的上界。需要注意的是,将不匹配扰动 μ_i 和虚拟控制器的微分 $\dot{\alpha}_{i-1}$ 复合在多项式 θ_i 中,进而将其上界估计信息 $\hat{\theta}_i$ 用于控制器设计。

候选Lyapunov函数 V_i 为

$$V_i = V_{i-1} + \frac{1}{2}e_i^2 + \frac{1}{2l_i}\tilde{\theta}_i^2, \quad (11)$$

式中: $l_i > 0$, $\theta_i = \hat{\theta}_i + \tilde{\theta}_i$ 。 V_i 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \dot{V}_{i-1} + e_i\dot{e}_i - \frac{1}{l_i}\tilde{\theta}_i\dot{\hat{\theta}}_i \leq \dot{V}_{i-1} + \\ &e_i(e_{i+1} + \alpha_i + h_i(\underline{x}_i) + \theta_i) - \frac{1}{l_i}\tilde{\theta}_i\dot{\hat{\theta}}_i. \end{aligned} \quad (12)$$

与式(6)~式(7)的构建方式类似,构建虚拟控制信号 α_i 和复合多项式的上界估计 $\hat{\theta}_i$ 为

$$\alpha_i = -c_ie_i - e_i - h_i(\underline{x}_i) - \hat{\theta}_i\text{sign}(e_i), \quad (13)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_i = l_i|e_i|. \quad (14)$$

通过调用杨氏不等式,有

$$e_ie_{i+1} \leq \frac{1}{2}e_i^2 + \frac{1}{2}e_{i+1}^2. \quad (15)$$

将式(9)和式(13)~式(15)代入式(12),可化简为

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &\leq -\sum_{j=1}^{i-1}c_j e_j^2 + \frac{1}{2}e_i^2 - c_ie_i^2 + \theta_i|e_i| - \hat{\theta}_i|e_i| - \\ &\tilde{\theta}_i|e_i| - \frac{1}{2}e_i^2 + \frac{1}{2}e_{i+1}^2 \leq -\sum_{j=1}^i c_j e_j^2 + \frac{1}{2}e_{i+1}^2. \end{aligned} \quad (16)$$

第n步 对 e_n 求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_n &= \dot{x}_n - \dot{\alpha}_{n-1} = u + h_n(\underline{x}_n) + \mu_n - \dot{\alpha}_{n-1} \leq \\ &u + h_n(\underline{x}_n) + \theta_n, \end{aligned} \quad (17)$$

式中: θ_n 为多项式 $|\mu_n - \dot{\alpha}_{n-1}|$ 的上界。需要注意的是,不匹配扰动 μ_n 和虚拟控制器的微分 $\dot{\alpha}_{n-1}$ 被复合在多项式 θ_n 中,其上界估计信息 $\hat{\theta}_n$ 用于控制器设计。

候选Lyapunov函数 V_n 为

$$V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2}e_n^2 + \frac{1}{2l_n}\tilde{\theta}_n^2, \quad (18)$$

式中: $l_n > 0$, $\theta_n = \hat{\theta}_n + \tilde{\theta}_n$ 。 V_n 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= \dot{V}_{n-1} + e_n\dot{e}_n - \frac{1}{l_n}\tilde{\theta}_n\dot{\hat{\theta}}_n \leq \\ &\dot{V}_{n-1} + e_n(u + h_n(\underline{x}_n) + \theta_n) - \frac{1}{l_n}\tilde{\theta}_n\dot{\hat{\theta}}_n. \end{aligned} \quad (19)$$

在此基础上,构建实际控制信号 u 和复合多项式的上界估计 $\hat{\theta}_n$ 为

$$u = -c_ne_n - \frac{1}{2}e_n - h_n(\underline{x}_n) - \hat{\theta}_n\text{sign}(e_n), \quad (20)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_n = l_n|e_n|. \quad (21)$$

将式(16),式(20),式(21)代入式(19),可化简为

$$\dot{V}_n \leq -\sum_{j=1}^{n-1}c_j e_j^2 + \frac{1}{2}e_n^2 - c_ne_n^2 - \frac{1}{2}e_n^2 +$$

$$\theta_n|e_n| - \hat{\theta}_n|e_n| - \tilde{\theta}_n|e_n| \leq -\sum_{j=1}^n c_j e_j^2. \quad (22)$$

注释 2 对于式(20)中的控制信号 u , 如果 $e_n > 0$, 则 $sign(e_n) = 1$, $u = -c_n e_n - 0.5e_n - h_n(\underline{x}_n) - \hat{\theta}_n$. 如果 $e_n < 0$, 那么 $sign(e_n) = -1$, $u = -c_n e_n - 0.5e_n - h_n(\underline{x}_n) + \hat{\theta}_n$. 如果 $e_n = 0$, 则 $sign(e_n) = 0$, 对应的控件输入为 $u = -c_n e_n - 0.5e_n - h_n(\underline{x}_n)$. 式(6)和式(13)中也存在类似情形. 经分析可知, 当跟踪误差偏离原点时, 相应控制器将被激活, 驱使跟踪误差沿原点滑动, 从而实现 PTC.

注释 3 参数 c_i 增大会加快跟踪误差的收敛速度, 但由于滑模控制本身固有的属性, 会带来明显的抖振. 此外, 参数 l_i 的选择会影响复合多项式上界到达的快慢, 如果想要加速收敛, 可以适当增大参数 l_i 的数值. 因此, 适当的参数选择对系统性能有明显的影响.

2.2 稳定性分析

本节将分析和证明被控系统的稳定性, 为了便于理解所提控制策略, 对定理进行总结.

定理 1 考虑一类非线性系统在不匹配扰动下满足假设 1 的条件. 选取复合多项式上界的估计值 $\hat{\theta}_i$ 为式(7), 式(14)和式(21). 最后, 在式(20)中构造一种新的自适应 PTC 机制, 保证了跟踪误差收敛到零, 且所有闭环信号都是半全局一致最终有界的.

证明 为分析稳定性, 结合设计的虚拟控制器 α_1 , α_i 和实际控制器 u , 以及复合多项式的上界估计 $\hat{\theta}_i$, 且令 $V = V_n$, 调用不等式(22), 并选择合适的参数 $c_j > 0$ 和 $j = 1, \dots, n$, 有

$$\dot{V} = \dot{V}_n \leq -\sum_{j=1}^n c_j e_j^2 < 0. \quad (23)$$

正如式(23)所述, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $V(t) \rightarrow 0$. 因此, 闭环系统是稳定的. 此外, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 跟踪误差 $e_i \rightarrow 0$, 这意味着实现了 PTC. 同样, 当 $t \rightarrow \infty$ (即 θ_i 收敛于 $\hat{\theta}_i$) 时, 可以满足 $\tilde{\theta}_i \rightarrow 0$. 同理, 证明了闭环系统的所有信号都是半全局一致最终有界的.

3 仿真分析

为了便于理解所提自适应 PTC 机制的有效性.

首先, 以一个连杆机器人为例, 说明该方法可以保证系统的稳定性, 并能精确跟踪所需的参考信号. 其次, 将跟踪效果和跟踪误差与文献[10]方法进行比较. 下面给出了具体的设计内容.

以一个单连杆机器人系统为例, 说明该方法的特点及其优点和改进之处, 给出如下数学模型

$$M\ddot{\tau} + \frac{1}{2}mgL \sin(\tau) = u(v), \quad (24)$$

式中: $\tau, \dot{\tau}, \ddot{\tau}$ 为连杆的角位置、角速度和角加速度; M, m 和 L 分别为连杆的惯量、质量和长度; g 为重力加速度; u 为输入转矩. 通过定义 $x_1 = \tau, x_2 = \dot{\tau}$, 在存在不匹配干扰 ϱ 的情况下, 将系统(24)转化为三角形结构, 有

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= \frac{u(v)}{M} - \frac{mgL \sin(x_1)}{2M} + \frac{\varrho}{M}. \end{aligned} \quad (25)$$

可选参数为 $M = 1, m = 1, L = 1, g = 9.8$. 参考信号选择为 $y_d = 0.5 \sin(0.1t) + 0.5 \sin(0.5t)$. 除了初始状态值 $x_0 = [0.02, -0.1]$, 其他初始信号值均为零. 控制参数设置为 $c_1 = 10, c_2 = 5, l_2 = 300$. 本文选择与文献[10]中基于动态面控制的方法进行对比. 在仿真中, 控制器的设计参数均与本文保持一致, 动态面控制中的设计参数为 $\beta_1 = 0.01$. 接下来, 为了验证所提方法的有效性, 除了与文献[10]的对比, 还添加了不同干扰强度下所提方法的有效性, 对比参数保持一致:

情况 1: $\varrho = 0.1 \sin(t)$;

情况 2: $\varrho = 2 \cos(0.5t)$.

通过理论分析, 构建虚拟控制器及实际控制器为

$$\alpha_1 = -10e_1 + \dot{y}_d, \quad (26)$$

$$u = -5e_2 + 4.9 \sin(x_1) - \hat{\theta}_2 sign(e_2), \quad (27)$$

同时, 构建复合多项式的上界估计为

$$\hat{\theta}_2 = l_2 |e_2|. \quad (28)$$

仿真结果如图 1~图 5 所示. 图 1 为本文方法与文献[10]中基于动态面控制方法的对比结果, 所提方法跟踪精度优于文献[10]的方法. 图 2~图 3 为跟踪误差 z_1 和 z_2 的轨迹图, 注意到本文方法在初始阶段出现的超调现象源于控制器设计中符号函数的固有特性, 即在滑模面等于 0 处的不连续切换特性会引发控制信号瞬时突变. 之后, 这一超调会迅速向稳态收敛, 并且稳态误差收敛到零, 而不是文献[10]被约束在原点附近的

小邻域内。当跟踪误差 z_1 第一次到达原点时，它不是沿着原点滑动，而是偏离原点。与此同时，相应的控制器被激活，强制跟踪误差返回到原点。随后，跟踪误差被迫在1 s左右沿原点滑动，即达到了精确跟踪控制。另一方面，情况1与情况2对比了不同干扰强度下，所提方法与对比方法的效果。结果表明，即使干扰强度变大，所提方法的性能依然可以得到保障。因此，通过分析可知，所提出方法不仅准确地跟踪了期望的参考信号，而且保证了跟踪误差 z_1 和 z_2 收敛于零。

此外，图4展示了复合多项式的上界估计信息 $\hat{\theta}_2$ 。注意到，在大概0.8 s左右达到了该多项式的真实上界，而不再改变。图5展示了虚拟控制器 α_1 和实际控制器 u 的轨迹图。

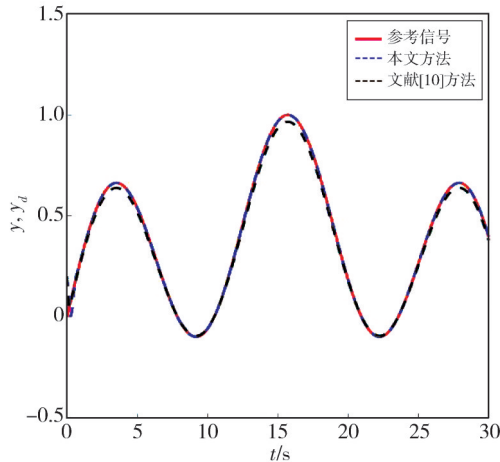


图1 参考信号及输出信号的轨迹图

Fig. 1 Trajectory diagram of reference signal and output signal

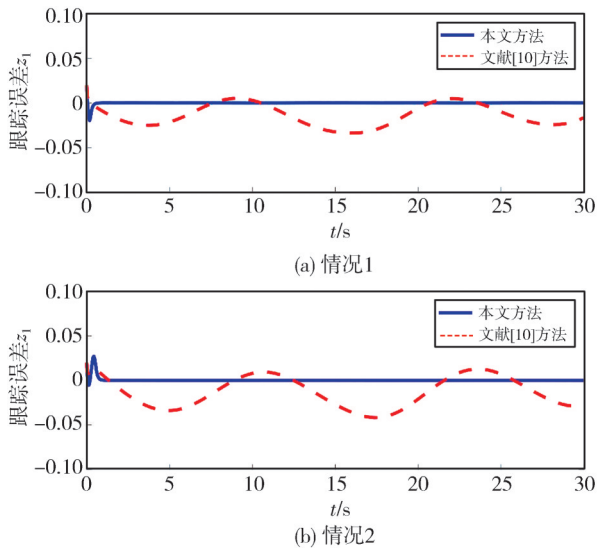


图2 跟踪误差 z_1 的轨迹图

Fig. 2 Trajectory diagram of tracking error z_1

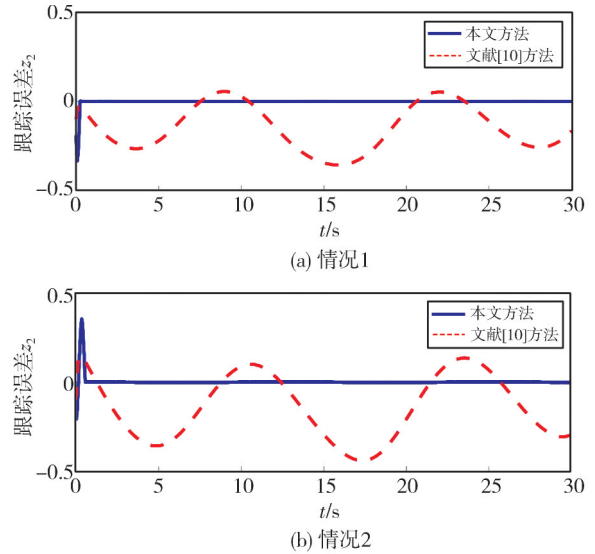


图3 跟踪误差 z_2 的轨迹

Fig. 3 Trajectory diagram of tracking error z_2

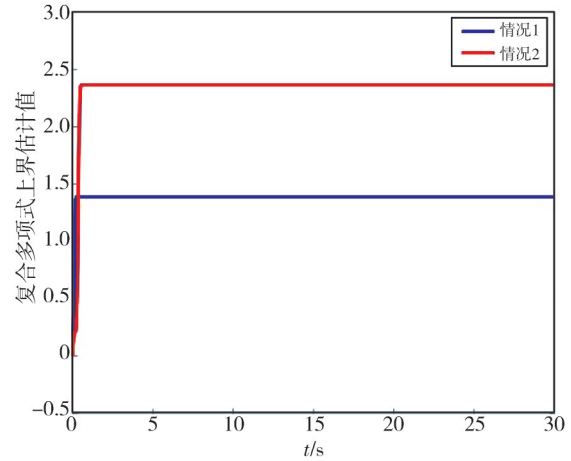


图4 复合多项式上界估计 $\hat{\theta}_2$ 的轨迹图

Fig. 4 Trajectory diagram of composite polynomial upper bound estimation $\hat{\theta}_2$

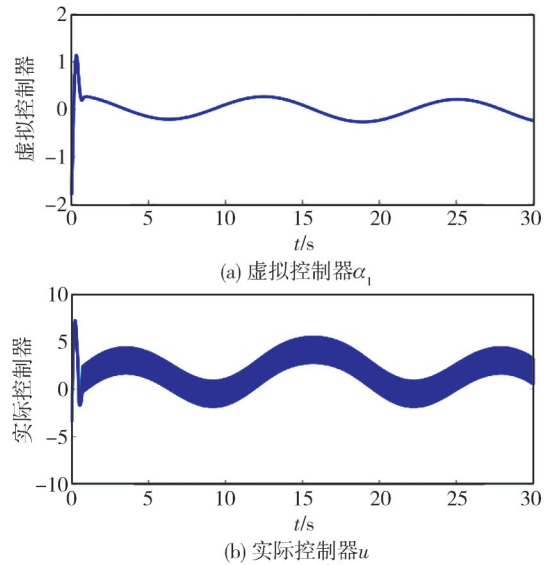


图5 虚拟控制器 α_1 和实际控制器 u 的轨迹图

Fig. 5 Trajectory diagram of virtual controller α_1 and actual controller u

4 结 论

本文针对非线性严反馈系统在不匹配扰动下的 PTC 问题,提出了创新性的自适应 PTC 机制,取得以下成果:所提控制机制实现了精确收敛,提升了系统的跟踪精度,通过理论分析和数值仿真验证,跟踪误差能够收敛至零。同时,将不匹配扰动及虚拟控制器微分整合于多项式结构中,实现了扰动上界的有效估计。该方法在控制器设计中引入补偿机制,不仅简化了算法结构,还增强了系统的鲁棒性。基于 Lyapunov 稳定性理论,证明了闭环系统所有信号的有界性,并确保系统具有半全局一致最终有界性。通过数值仿真实验,验证了所提控制策略的有效性。未来重点将所提方法拓展至多智能体系统协同控制领域,以应对更复杂的工程应用场景。本研究为非线性系统精确跟踪控制提供了新的理论框架和技术途径,在机器人控制、飞行器导航等工程领域具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] YIN C, XU J X, HOU Z. A high-order internal model based iterative learning control scheme for nonlinear systems with time-iteration-varying parameters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(11): 2665-2670.
- [2] ZHANG X K, FENG Y X. Control algorithm of YUPENG ship autopilot based on tangent function nonlinear feedback[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2017, 8(1): 78-83.
- [3] ZHANG Q, SHAO X. Disturbance-observer-based adaptive fuzzy command filtered control for switched nonlinear systems with prescribed performance and input saturation [EB/OL]. International Journal of Fuzzy Systems, 2024. [2025-01-03]. <https://doi.org/10.1007/s40815-024-01929-3>.
- [4] WANG H, MA J, ZHAO X, et al. Adaptive fuzzy fixed-time control for high-order nonlinear systems with sensor and actuator faults[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2023, 31(8): 2658-2668.
- [5] LI Y, TONG S. Adaptive backstepping control for uncertain nonlinear strict-feedback systems with full state triggering[J]. Automatica, 2024, 163: 111574.
- [6] 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.
- [7] CHU Y, FEI J, HOU S. Adaptive global sliding-mode control for dynamic systems using double hidden layer recurrent neural network structure[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(4): 1297-1309.
- [8] FARRELL J A, POLYCARPOU M, SHARMA M, et al. Command filtered backstepping[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6): 1391-1395.
- [9] WEI W, ZHANG W. Command-filter-based adaptive fuzzy finite-time output feedback control for state-constrained nonlinear systems with input saturation[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(10): 4044-4056.
- [10] KANG S, LIU P X, WANG H. Finite-time prescribed performance-based adaptive fuzzy command filtering control for permanent magnet synchronous motors with actuator faults[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2024, 26(6): 1827-1839.
- [11] WEI X, GUO L. Composite disturbance-observer-based control and H_∞ control for complex continuous models [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2010, 20(1): 106-118.
- [12] SHAO X, YUE X, ZHANG W. Coordinated moving-target encircling control for networked quadrotors with event-triggered extended state observers [J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(4): 6576-6587.
- [13] WANG F, GAO Y, ZHOU C, et al. Disturbance observer-based backstepping formation control of multiple quadrotors with asymmetric output error constraints[J]. Applied Mathematics and Computation, 2022, 415: 126693.
- [14] HE W, SUN Y, YAN Z, et al. Disturbance observer-based neural network control of cooperative multiple manipulators with input saturation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(5): 1735-1746.