

控制与决策

Control and Decision

一类不确定非线性系统的事件驱动命令滤波反步控制

刘加朋, 于金鹏, 林崇

引用本文:

刘加朋, 于金鹏, 林崇. 一类不确定非线性系统的事件驱动命令滤波反步控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2733–2737.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0240>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

输出受限的不确定非线性系统的自适应固定时间控制

Adaptive fixed-time control for uncertain nonlinear systems with output constraints

控制与决策. 2022, 37(9): 2265–2273 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0310>

基于神经网络的周期扰动非线性系统自适应渐近跟踪控制

Neural-networks-based adaptive asymptotic tracking control for nonlinear systems with periodic disturbances

控制与决策. 2022, 37(4): 922–932 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1252>

串级连续搅拌反应釜的有限时间命令滤波控制

Finite-time command filter control of cascade continuous stirred tank reactors

控制与决策. 2022, 37(9): 2245–2254 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0199>

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

Finite-time adaptive dynamic surface control for strict-feedback systems with full state constraints and unmodeled dynamics

控制与决策. 2022, 37(1): 108–118 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1023>

带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制

Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation

控制与决策. 2021, 36(12): 3007–3014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0907>

一类不确定非线性系统的事件驱动命令滤波反步控制

刘加朋^{1,2}, 于金鹏^{1,2†}, 林 崇¹

(1. 青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071; 2. 青岛大学 山东省工业控制技术重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 研究一类具有严格反馈的不确定非线性系统跟踪控制问题. 与现有通过自适应神经网络等技术处理系统中未知动态不同, 利用命令滤波器处理系统中的不确定函数. 基于反步法原理构造虚拟控制律, 并通过设计辅助方程解决真实控制律构造困难的问题. 通过引入事件驱动机制, 在确保系统稳定性的同时降低系统控制律更新频率. 最后通过仿真算例验证了所提出命令滤波反步控制策略的有效性.

关键词: 反步控制; 命令滤波; 不确定; 非线性系统; 事件驱动

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0240

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 刘加朋, 于金鹏, 林崇. 一类不确定非线性系统的事件驱动命令滤波反步控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2733-2737.

Event-triggered and command-filter-based backstepping control for a class of uncertainty nonlinear systems

LIU Jia-peng^{1,2}, YU Jin-peng^{1,2†}, LIN Chong¹

(1. School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdan University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The tracking control problem for a class of uncertainty nonlinear systems with strictly feedback is studied. Different from existing researches that using the adaptive neural network technology to handle the unknown functions, this paper introduces command filters to deal with the system uncertainty. Virtual control signals are designed via backstepping and an auxiliary equation is designed to construct the final control function. And then, the event trigger mechanism which can guarantee the system stability is used to decrease the update frequency of the input signal. Finally, a simulation case is given to illustrate the effectiveness of the proposed event triggered backstepping control scheme.

Keywords: backstepping control; command filter; uncertainty; nonlinear system; event triggered

0 引言

命令滤波反步法广泛应用于高阶非线性系统控制器设计中^[1-3], 与传统反步法相比, 其解决了因虚拟控制律反复求导导致的“计算复杂性”问题, 有效降低了控制策略的计算负担. 2009年, 命令滤波反步法由Farrel等^[2]提出并被应用于一类具有严格反馈的非线性系统控制策略设计过程中. Dong等^[3]为了解决具有未知参数的非线性系统控制器设计问题, 提出了自适应命令滤波反步设计方法. Yu等^[4]利用模糊逻辑系统的“万能逼近特性”, 针对一类具有未知光滑函数的高阶非线性系统设计了命令滤波反步控制器. 最近, Zheng等^[5]结合自适应神经网络技术, 提出

了一种新型的命令滤波反步控制策略, 该方法只需要设计一个神经网络, 降低了神经网络设计以及控制参数整定的难度. 通过与神经网络、自适应等技术^[6-7]相结合, 命令滤波反步法可以有效处理非线性系统中的不确定函数. 但是, 上述工作侧重于系统控制器构造及稳定性分析, 未考虑控制器通讯及计算负担等问题. 特别是, 对于嵌入式微处理器系统, 其通讯及计算能力有限, 降低命令滤波反步控制策略计算及通讯负担, 将有助于其在实际中的推广应用.

近年来, 事件驱动技术因其能够大幅降低控制算法计算负担以及通讯频率, 受到了研究人员的广泛关注^[8-11]. Li等^[10]基于事件驱动技术, 针对一类具

收稿日期: 2021-02-04; 录用日期: 2021-07-29.

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2020M67199); 国家自然科学基金项目(61973179); 青岛市重点研发专项项目(21-1-2-6-nsh); 山东省自然科学基金项目(ZR2020QF063).

责任编辑: 俞立.

†通讯作者. E-mail: yjp1109@hotmail.com.

有严格反馈的不确定非线性系统提出了一种新型的神经网络自适应控制策略. 通过特定事件触发自适应律更新, 有效降低了系统计算及通信负担. Brunner等^[11]针对一类具有随机扰动以及状态受限的线性时不变离散系统, 提出了一种基于事件驱动的鲁棒预测控制策略. 通过构造巧妙的事件触发条件, 在降低系统通信负担的同时保证了系统的控制性能.

鉴于此, 本文基于事件驱动技术, 针对一类具有严格反馈的不确定非线性系统, 提出一种新型的命令滤波反步控制策略, 并分析闭环系统的稳定性. 最后通过仿真研究验证了所提出控制策略的有效性. 与现有研究相比, 本文主要创新点如下: 1) 与传统命令滤波反步控制策略^[2-3]相比, 使用命令滤波器处理系统中的未知非线性函数, 并通过构造辅助方程解决了真实控制律构造困难的问题; 2) 与自适应模糊逻辑系统/神经网络控制技术^[4-5]相比, 所提出的控制策略需要设计的控制参数较少, 降低了控制参数整定的难度.

1 问题描述

给出一类具有严格反馈的不确定非线性系统

$$\dot{x}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i)x_{i+1} + d_i, \quad (1)$$

$$\dot{x}_n = f_n(x) + g_n(x)u + d_n. \quad (2)$$

其中: 状态变量为 $x_n = [x_1, \dots, x_n]$; 系统控制输入为 u ; 系统输出为 $\bar{x}_i = [x_1, \dots, x_i]$, $i = 1, 2, \dots, n-1$; $f_i(\bar{x}_i)$ 和 $f_n(x)$ 为系统未知非线性函数, $g_i(\bar{x}_i)$ 和 $g_n(x)$ 为系统增益函数, d_i 和 d_n 为系统扰动, n 为系统阶数, 系统初始值为 $x_0 = x(0)$. 为了便于描述, 函数 $f_i(\bar{x}_i)$ 和 $f_n(x)$ 分别记作 f_i 和 f_n , 函数 $g_i(\bar{x}_i)$ 和 $g_n(x)$ 分别记作 g_i 和 g_n .

本文控制器设计目的是构造ZOH形式的控制输入信号 u , 保证系统输出 x_1 能够有效跟踪给定信号 x_d . 同时设计事件触发机制, 在保证系统稳定性的前提下, 降低控制律的更新频率. 为了构造控制律, 给出如下假设.

假设1 给定信号 x_d 、 \dot{x}_d 、 \ddot{x}_d 是连续、有界和已知的.

假设2 对于 $i = 1, 2, \dots, n$, 系统增益函数 $g_i \neq 0$, 且 g_i 、 \dot{g}_i 和 \ddot{g}_i 是连续、已知和有界的.

不失一般性, 假设 $g_i > 0$. 系统函数 f_i 、 \dot{f}_i 以及系统扰动 d_i 、 \dot{d}_i 是连续、未知和有界的.

一阶命令滤波器定义为 $\dot{\hat{z}} = -\varpi(\hat{z} - z)$. 其中: ϖ 为正常数, z 为滤波器输入, \hat{z} 为滤波器的状态变量, $\dot{\hat{z}}$ 为滤波器输出. 命令滤波状态变量初始值为 $\hat{z}_0 = \hat{z}(0)$. 命令滤波器的性质由引理1给出.

引理1^[4-5] 对于命令滤波器 $\dot{\hat{z}} = -\varpi(\hat{z} - z)$, 若输入信号 z 以及 \dot{z} 、 \ddot{z} 连续且有界, 则对于任意给定的正数 ε_1 和 ε_2 , 存在正常数 ϖ' , 当 $\varpi > \varpi'$ 时, 满足 $|\hat{z} - z| \leq \bar{\varepsilon}_1$, $|\dot{\hat{z}} - \dot{z}| \leq \bar{\varepsilon}_2$. 其中: $\bar{\varepsilon}_1 = \max\{\varepsilon_1, \hat{z}(0) - z(0)\}$, $\bar{\varepsilon}_2 = \max\{\varepsilon_2, \dot{\hat{z}}(0) - \dot{z}(0)\}$.

2 控制器设计

基于命令滤波反步法原理, 定义跟踪误差为 $z_1 = x_1 - x_d$, $z_i = x_i - \alpha_{i-1}$. 其中: $i = 2, 3, \dots, n$, α_i 为系统虚拟控制律. 现给出控制器的具体设计步骤.

step 1: 跟踪误差 z_1 的导数为 $\dot{z}_1 = g_1x_2 + f_1 + d_1 - \dot{x}_d$. 注意到上式中 $f_1 + d_1$ 函数项为未知的, 因此无法使用传统命令反步法^[2]构造虚拟控制率 α_1 . 与文献[4]采用自适应模糊逻辑系统控制等技术处理系统不确定项不同, 本文基于文献[5]方法, 利用命令滤波器处理不确定函数 $f_1 + d_1$. 该命令滤波器定义为 $\dot{\hat{z}}_1 = -\varpi_1(\hat{z}_1 - z_1)$. 其中: z_1 为命令滤波器输入, \hat{z}_1 为命令滤波器状态变量, $\dot{\hat{z}}_1$ 为命令滤波器输出信号, ϖ_1 为正常数. 定义误差 ε_1 为 $\varepsilon_1 = \dot{z}_1 - \dot{\hat{z}}_1$, 故 \dot{z}_1 可表示为

$$\dot{z}_1 = \dot{\hat{z}}_1 + \varepsilon_1 = g_1x_2 + f_1 + d_1 - \dot{x}_d. \quad (3)$$

对于第1个子系统, 定义Lyapunov函数为 $V_1 = z_1^2/2$. 由式(3)和误差 z_1 的定义, 可得

$$\dot{V}_1 = z_1(g_1z_2 + g_1\alpha_1 + \dot{\hat{z}}_1 - g_1x_2 + \varepsilon_1). \quad (4)$$

构造虚拟控制率 α_1 为

$$\alpha_1 = (-k_1z_1 - \dot{\hat{z}}_1 + g_1x_2)/g_1, \quad (5)$$

其中 k_1 为正常数. 将式(5)代入(4), 可得

$$\dot{V}_1 = -k_1z_1^2 + g_1z_1z_2 + z_1\varepsilon_1. \quad (6)$$

step i ($i = 2, \dots, n-1$): 对于第 i 个子系统, 使用命令滤波器处理跟踪误差信号 z_i . 该滤波器定义为 $\dot{\hat{z}}_i = -\varpi_i(\hat{z}_i - z_i)$. 其中: ϖ_i 为正常数, z_i 为滤波器输入, \hat{z}_i 为滤波器状态变量, $\dot{\hat{z}}_i$ 为滤波器输出. 误差 ε_i 为 $\varepsilon_i = \dot{z}_i - \dot{\hat{z}}_i$. 定义Lyapunov函数 V_i 和虚拟控制率 α_i 分别为

$$V_i = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{1}{2} z_j^2 + \frac{1}{2} z_i^2, \quad (7)$$

$$\alpha_i = (-k_i z_i - \dot{\hat{z}}_i + g_i x_{i+1} - g_{i-1} z_{i-1})/g_i, \quad (8)$$

故 \dot{V}_i 可表示为

$$\dot{V}_i = \sum_{j=1}^i (-k_j z_j^2 + z_j \varepsilon_j) + g_i z_i z_{i+1}. \quad (9)$$

step n : 对跟踪误差 z_n 求导, 可得

$$\dot{z}_n = f_n + g_n u + d_n - \dot{\alpha}_{n-1}. \quad (10)$$

使用如下命令滤波器处理误差信号 z_n : $\dot{\hat{z}}_n = -\varpi_n(\hat{z}_n - z_n)$, 其中 ϖ_n 为正常数. 误差 ε_n 为 $\varepsilon_n =$

$\dot{z}_n - \dot{\hat{z}}_n$. 注意到虚拟控制律 α_i (式(8))中含有 x_{i+1} 项, 而系统(1)和(2)的阶数只有 n 阶, 故在第 n 个子系统中无法按照上述步骤构造虚拟控制率 α_n . 为了解决该问题, 定义辅助方程如下:

$$\dot{v} = -k_v(v - w) - g_n z_n + \dot{w}, \quad (11)$$

其中 k_v 为正常数. 定义变量 $\chi = [x, v]$, 函数 w 定义为

$$w = (-k_n z_n - \dot{\hat{z}}_n + g_n v - g_{n-1} z_{n-1})/g_n, \quad (12)$$

其中 k_n 为正常数. 将 w 输入如下命令滤波器:

$$\dot{\hat{w}} = -\varpi_v(\hat{w} - w), \quad (13)$$

其中 ϖ_v 为正常数. 误差 ε_v 定义为 $\varepsilon_v = \hat{w} - w$.

基于事件驱动机制, 设计真实控制律 $u(t)$, 有

$$u(t) = v(t_k), \quad t \in [t_k, t_{k+1}), \quad (14)$$

$$t_{\Delta 1} = \inf\{t > t_k \mid |e(t)| \geq \gamma|u(t)| + \sigma\}, \quad (15)$$

$$t_{\Delta 2} = t_{\max}, \quad (16)$$

$$t_{k+1} = \min\{t_{\Delta 1}, t_{\Delta 2}\}. \quad (17)$$

其中: 误差为 $e(t) = v(t) - u(t)$, γ 和 σ 为正常数, 时间 t_{\max} 为正常数, t_k 为第 k 次事件触发时刻, $k = 1, 2, \dots$, 假设 $k = 1$ 时, $t_1 = 0$. 即在初始时刻, 系统控制律 u 会更新一次. 由式(17)可见, 两个相邻触发事件间隔的最大时间为 t_{\max} .

3 系统性能分析

定理 1 考虑非线性系统(1)和(2), 在控制律(14)以及事件触发机制(15)~(17)的作用下, 若变量 $\chi(t)$ 满足 $\chi(t) \in \Omega_\chi$ (Ω_χ 为一充分大的紧集), 则系统输出 x_1 可以有效跟踪给定信号 x_d , 并且避免 Zeno 行为的发生.

证明 证明过程分为 3 部分. 首先分析当 $u(t) = v(t)$ 时, 闭环系统的稳定性; 然后分析 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 时闭环系统在控制律 $u(t) = v(t_k)$ 下的稳定性; 最后证明所设计的事件触发控制器能够避免 Zeno 行为.

1) 定义 Lyapunov 函数为

$$V_s = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} z_i^2 + \frac{1}{2} z_v^2,$$

其中 $z_v = v - w$. 由式(8)、(11)~(13), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= \sum_{i=1}^{n-1} (-k_i z_i^2 + z_i \varepsilon_i) + g_{n-1} z_{n-1} z_n + \\ & z_n (f_n + g_n u + d_n - \dot{\alpha}_{n-1}) + \\ & z_v (-k_v z_v - g_n z_n + \dot{w} - \dot{w}). \end{aligned} \quad (18)$$

当系统控制律 $u(t) = v(t)$, 即控制律以连续方式实现时, \dot{V}_s 可化为

$$\dot{V}_s = \sum_{i=1}^n (-k_i z_i^2 + z_i \varepsilon_i) - k_v z_v^2 + z_v \varepsilon_v. \quad (19)$$

为了证明误差 ε_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 以及 ε_v 存在上界, 给出 $z_1, \dot{z}_1, \ddot{z}_1$ 如下: $z_1 = x_1 - x_d, \dot{z}_1 = f_1 + g_1 x_2 - \dot{x}_d, \ddot{z}_1 = \dot{f}_1 + \dot{g}_1 (f_2 + g_2 x_3) - \ddot{x}_d$. 由假设 1 和假设 2, 对于任意 $\chi(t) \in \Omega_\chi$, 存在正常数 $\beta_1, \beta'_1, \beta''_1$ 满足 $|z_1| \leq \beta_1, |\dot{z}_1| \leq \beta'_1, |\ddot{z}_1| \leq \beta''_1$. 由引理 1 可知, 存在一正常数 ϖ'_1 令 $|\varepsilon_1| \leq \bar{\varepsilon}_1$. 同理可知, 存在一正常数 ϖ'_i 令 $|\varepsilon_i| \leq \bar{\varepsilon}_i$. 由杨氏不等式^[4]得

$$z_i \varepsilon_i \leq \frac{1}{2} z_i^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_i^2, \quad z_v \varepsilon_v \leq \frac{1}{2} z_v^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_v^2.$$

故式(19)可表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &\leq \\ &\sum_{i=1}^n -\left(k_i - \frac{1}{2}\right) z_i^2 - \left(k_v - \frac{1}{2}\right) z_v^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_i^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_v^2. \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)可化为 $\dot{V}_s(t) \leq -a_1 V_s + b_1$. 其中: $a_1 = \min\{2k_1 - 1, 2k_2 - 1, \dots, 2k_n - 1, 2k_v - 1\}, b_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_i^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_v^2$. 当 $V_s(t) > b_1/a_1$ 时, $\dot{V}_s(t) < 0$, 故式(20)保证了闭环系统的收敛性.

2) 分析闭环系统在控制律(14)下的稳定性. 当 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 时, \dot{V}_s 可表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_s(t) &= \frac{\partial V_s(\chi(t_k))}{\partial \chi} \frac{\partial \chi(t_k)}{\partial t} \Big|_{u(t)=v(t_k)} + \\ &\frac{\partial V_s(\chi(t))}{\partial \chi} \frac{\partial \chi(t)}{\partial t} \Big|_{u(t)=v(t_k)} - \\ &\frac{\partial V_s(\chi(t_k))}{\partial \chi} \frac{\partial \chi(t_k)}{\partial t} \Big|_{u(t)=v(t_k)}. \end{aligned} \quad (21)$$

由于 \dot{V}_s 的连续性以及函数 f_i, g_i 在 $\chi \in \Omega_\chi$ 上的局部 Lipschitz 性, 对于任意的 $\chi(t), \chi(t_k) \in \Omega_\chi$, 存在一个正常数 L 满足

$$\begin{aligned} \left\| \frac{\partial V_s(\chi(t))}{\partial \chi} \frac{\partial \chi(t)}{\partial t} \Big|_{u(t)=v(t_k)} - \right. \\ \left. \frac{\partial V_s(\chi(t_k))}{\partial \chi} \frac{\partial \chi(t_k)}{\partial t} \Big|_{u(t)=v(t_k)} \right\| \leq L \|\chi(t) - \chi(t_k)\|. \end{aligned} \quad (22)$$

由式(17)可知, $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ 存在上界 t_{\max} . 由于函数 f_i, g_i 的连续性以及 $v(t_k)$ 的有界性, 对于任意 $\chi(t), \chi(t_k) \in \Omega_\chi$, 存在一个正常数 M 满足

$$\frac{\partial \chi(t)}{\partial t} \Big|_{u(t)=v(t_k)} \leq M, \quad (23)$$

$$\|\chi(t) - \chi(t_k)\| \leq M(t - t_k). \quad (24)$$

将式(22)~(24)代入(21), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s(t) &\leq \\ &\sum_{i=1}^n (-k_i z_i^2 + z_i \varepsilon_i) - k_v z_v^2 + z_v \varepsilon_v + LMt_{\max}. \end{aligned} \quad (25)$$

同理, 由杨氏不等式, 式(25)可化为

$$\dot{V}_s(t) \leq -a_2 V_s + b_2. \quad (26)$$

其中: $a_2 = \min\{2k_1 - 1, 2k_2 - 1, \dots, 2k_n - 1, 2k_v - 1\}$, $b_2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \varepsilon_i^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_v^2 + LMt_{\max}$. 由式(25)可得, 通过选择合适的设计参数 k_i, k_v, γ, σ , 可以保证系统跟踪误差 z_1 趋于原点的一个足够小的邻域. 定义紧集

$$\Omega_z = \{z_1, \dots, z_n, z_v | V_s \leq c_1\}. \quad (27)$$

其中 $c_1 = (n+1) \max_{\chi \in \Omega_\chi} \left\{ \frac{1}{2} z_1^2, \dots, \frac{1}{2} z_n^2, \frac{1}{2} z_v^2 \right\}$.

由式(26)可得

$$V_s(t) \leq \left(V_s(0) - \frac{b_2}{a_2} \right) e^{-a_2 t} + \frac{b_2}{a_2}, t \geq 0. \quad (28)$$

若 $a_2 \geq b_2/c_1, V_s(0) \in \Omega_z$, 则由式(28)可得

$$V_s(t) \in \Omega_z, t \geq 0, \quad (29)$$

故 Ω_z 为不变集. 定义紧集 Ω_{χ_1} 为

$$\Omega_{\chi_1} = \left\{ \chi \left| \frac{1}{2} (x_1 - x_d)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n (x_i - \alpha_{i-1})^2 + \frac{1}{2} (v - w)^2 \leq c_2 \right. \right\}. \quad (30)$$

基于上述分析, 若 $\chi(0) \in \Omega_\chi$, 则变量 χ 会收敛到紧集 Ω_{χ_1} . 考虑到 $\Omega_{\chi_1} \subset \Omega_\chi$, 故 Ω_χ 为不变集.

3) 对于 $\forall t \in [t_k, t_{k+1})$, 由 $e(t)$ 的定义得

$$\frac{d}{dt} |e(t)| = \frac{d}{dt} \sqrt{e(t) \cdot e(t)} \leq |\dot{v}(t)| \leq \beta_v, \quad (31)$$

其中 β_v 为 $\dot{v}(t)$ 的上界. 注意到 $t = t_k$ 时, $e^+(t_k) = 0$.

由式(31)可得

$$|e(t)| \leq \int_{t_k^+}^{t_{k+1}^+} |\dot{e}(t)| dt \leq \int_{t_k^+}^{t_{k+1}^+} \beta_v dt \leq \beta_v (t_{k+1} - t_k). \quad (32)$$

将式(15)代入(32)可得

$$t_{k+1} - t_k \geq \frac{\gamma |u(t)| + \sigma}{\beta_v} > 0. \quad (33)$$

式(33)表明本文所设计事件驱动控制律更新时间间隔 $t_{k+1} - t_k$ 存在一个非零的下界, 故该控制律可避免Zeno行为的发生. □

4 仿真验证

针对一种典型的直流电动机驱动单机器臂系统^[12]开展仿真研究, 验证所提出控制策略的有效性. 该系统动态数学模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + d_1, \quad \dot{x}_2 = -\frac{N}{D} \sin x_1 - \frac{B}{D} x_2 + \frac{1}{D} x_3 + d_2, \\ \dot{x}_3 &= -\frac{K_m}{L} x_2 - \frac{R}{L} x_3 + \frac{u}{L} + d_3. \end{aligned}$$

其中: x_1 为直流电动机角位置, x_2 为直流电动机角速度, x_3 为电动机电枢电流, u 为电动机输入电压. 令 x_1 为系统输出, u 为系统输入, d_1, d_2 和 d_3 为系统扰动. 参数 D 和 L 的值分别为 $0.0642 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{A}/\text{N}$ 和 0.0025 H . 系统其他参数以及扰动 d_1, d_2 和 d_3 是未

知的. 控制器的设计目标为令该系统输出 x_1 可以有效跟踪信号 x_d , 跟踪信号设定值为 $x_d = 0.1 \sin(0.2t)$. 本次仿真中, 系统相关参数可参考文献[12]. 系统初始值设置为 $x_0 = [0, 0, 0], v(0) = w(0) = 0$. 控制器参数设置为 $k_1 = k_2 = k_3 = k_v = 10, \varpi_1 = \varpi_2 = \varpi_3 = \varpi_v = 300, \gamma = 0.003, \sigma = 0.5, t_{\max} = 0.2$.

图1为系统状态变量 x_1, x_2 及 x_3 在所提出控制律下的变化曲线. 系统输出可有效跟踪给定信号 x_d , 同时系统跟踪误差满足 $|x_1 - x_d| \leq 0.002$.

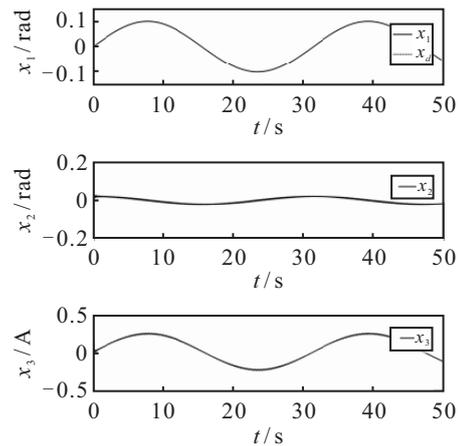


图1 系统状态变量 x_1, x_2, x_3 变化曲线

图2为系统控制输入曲线以及触发事件时间间隔图. 与文献[13]控制信号使用连续实现方式不同, 所提出控制策略基于事件触发, 并采用ZOH实现方式. 可以看出, 所设计的事件触发机制可以有效降低控制律更新频率.

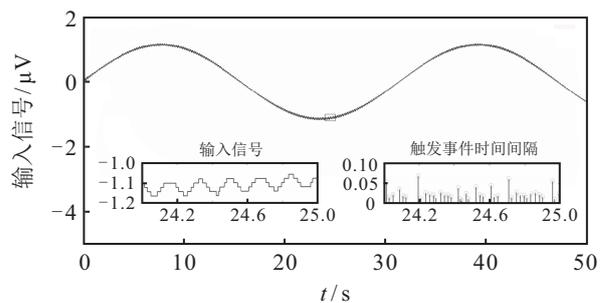


图2 系统控制律变化曲线及触发事件时间间隔

为了表明所提出控制策略与传统模糊自适应命令滤波反步法^[13]在跟踪效果、控制律更新频率等方面的异同, 给出系统(34)~(36)在该控制策略作用下的仿真结果. 模糊逻辑系统隶属度函数选择为高斯型函数. 控制器参数设定为 $k_1 = k_2 = k_3 = 20, \varpi_1 = \varpi_2 = 300, j = [-5, -4, \dots, 4, 5]^T, i = [1, 2, 3, 4, 5], r_1 = r_2 = r_3 = 0.5, l_1 = l_2 = l_3 = 0.001, m_1 = m_2 = m_3 = 0.1$. 故所提出控制器需要设计的参数少于传统控制策略. 图3为不同控制律下系统跟踪误差 z_1 曲线. 仿真结果显示本文所提出控制器跟踪精

度优于传统模糊自适应命令滤波反步法^[13]. 自适应控制策略通过自适应律更新动态补偿系统未知特性. 文献[13]基于Lyapunov方法设计了 σ -修改自适应律, 在该自适应律作用下, 模糊逻辑系统权重趋于原点的一个邻域内, 而不是趋于真实值^[5]. 因此, 模糊逻辑系统逼近误差较大. 而所提出控制策略是基于命令滤波器的性质处理系统的未知非线性函数, 故所提出控制策略精度优于传统的模糊自适应命令滤波反步法.

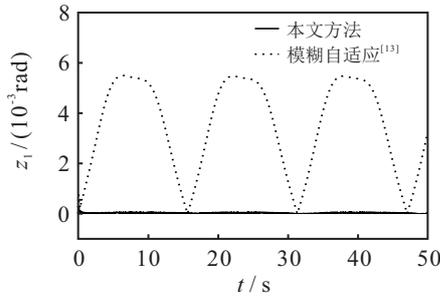


图3 在不同控制律下的系统跟踪误差 z_1 曲线

5 结论

本文针对一类具有严格反馈的不确定非线性系统, 提出了一种新型的事件驱动命令滤波反步控制策略. 利用命令滤波器处理系统中存在的未知非线性函数, 并通过设计辅助方程解决了系统最终控制律构造困难的问题. 引入事件触发机制实现控制信号的更新, 稳定性分析表明, 所提出命令滤波反步控制策略可以保证闭环系统的稳定性, 并避免Zeno行为的发生. 最后通过仿真结果表明所提出控制策略可以实现系统输出对给定信号的跟踪, 并有效降低控制律更新频率.

参考文献(References)

- [1] Li Y X. Finite time command filtered adaptive fault tolerant control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2019, 106: 117-123.
- [2] Farrell J A, Polycarpou M, Sharma M, et al. Command filtered backstepping[C]. *American Control Conference*. Seattle, 2008: 1923-1928.
- [3] Dong W J, Farrell J A, Polycarpou M M, et al. Command filtered adaptive backstepping[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(3): 566-580.
- [4] Yu J P, Shi P, Dong W J, et al. Observer and command-filter-based adaptive fuzzy output feedback control of uncertain nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5962-5970.
- [5] Zheng X L, Yang X B. Command filter and universal approximator based backstepping control design for strict-feedback nonlinear systems with uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(3): 1310-1317.
- [6] Wang M, Wang Z D, Chen Y, et al. Observer-based fuzzy output-feedback control for discrete-time strict-feedback nonlinear systems with stochastic noises[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(8): 3766-3777.
- [7] Li Y M, Li K W, Tong S C. Adaptive neural network finite-time control for multi-input and multi-output nonlinear systems with positive Powers of odd rational numbers[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(7): 2532-2543.
- [8] 宋秀兰, 俞立. 一类不受控离散事件驱动不确定线性切换系统优化控制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(8): 1407-1412.
(Song X L, Yu L. Optimization control of a class of switched linear uncertain systems driven by uncontrollable discrete-events[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(8): 1407-1412.)
- [9] 张皓, 张洪铭, 王祝萍. 基于事件触发的无人驾驶汽车路径跟随预测控制[J]. *控制与决策*, 2019, 34(11): 2421-2427.
(Zhang H, Zhang H M, Wang Z P. Event-triggered predictive path following control for unmanned autonomous vehicle[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(11): 2421-2427.)
- [10] Li Y X, Yang G H. Model-based adaptive event-triggered control of strict-feedback nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, 29(4): 1033-1045.
- [11] Brunner F D, Heemels W P M H, Allgöwer F. Robust event-triggered MPC with guaranteed asymptotic bound and average sampling rate[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(11): 5694-5709.
- [12] Wang N, Tong S C, Li Y M. Observer-based adaptive fuzzy control of nonlinear non-strict feedback system with input delay[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2018, 20(1): 236-245.
- [13] Yu J P, Shi P, Dong W J, et al. Command filtering-based fuzzy control for nonlinear systems with saturation input[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(9): 2472-2479.

作者简介

刘加朋(1990—), 男, 副教授, 博士, 从事复杂非线性系统事件驱动控制、制冷系统智能控制等研究, E-mail: 876042121@qq.com;

于金鹏(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、交流传动系统控制等研究, E-mail: ljp1109@hotmail.com;

林崇(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事系统稳定性、鲁棒控制理论等研究, E-mail: linchong_2004@hotmail.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)