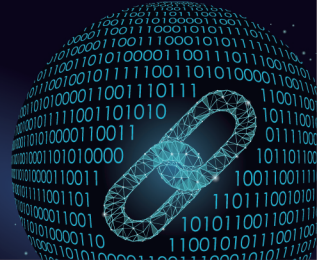




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



一种新的模糊滑模控制器设计方法

康庄, 贾利民, 秦勇

引用本文:

康庄, 贾利民, 秦勇. 一种新的模糊滑模控制器设计方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1909–1917.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1771>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制](#)

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

[直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制](#)

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor

控制与决策. 2021, 36(3): 693–698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

[输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制](#)

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation

控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

[线控转向系统的自适应高阶滑模控制](#)

Adaptive higher-order sliding mode control for SbW system

控制与决策. 2021, 36(6): 1529–1536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1526>

[基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制](#)

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller

控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

一种新的模糊滑模控制器设计方法

康庄^{1,2}, 贾利民^{1,2†}, 秦勇^{1,2}

(1. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044;
2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 针对具有较大且不可观测外界干扰的一类不确定系统, 提出一种新的模糊滑模控制器设计方法. 首先基于模糊滑模控制原理, 引入全局快速终端滑模控制, 使系统在有限时间内达到稳态; 然后构造以李雅普诺夫函数导数的绝对值为补偿的自适应干扰估计项, 对外界干扰进行准确估计, 进而提出一种双层递阶指数趋近全局快速终端模糊滑模控制器, 通过指数趋近率来调节滑模面的动态品质, 该控制器能快速收敛到稳定状态, 且有效消除控制器的抖振情况; 最后通过仿真算例验证所提方法的有效性.

关键词: 滑模控制; 模糊系统; 滑模面; 全局快速终端滑模控制; 指数趋近率; 外界干扰

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1771

引用格式: 康庄, 贾利民, 秦勇. 一种新的模糊滑模控制器设计方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1909-1917.

A new design method of fuzzy sliding mode controller

KANG Zhuang^{1,2}, JIA Li-min^{1,2†}, QIN Yong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A new design method of a fuzzy sliding mode controller is proposed for a class of uncertain systems with large and unobservable external disturbances. Firstly, based on the principle of fuzzy sliding mode control, global fast terminal sliding mode control is introduced to make the system reach a steady state in a limited time. Then an adaptive disturbance estimation term compensated by the absolute value of the derivative of the Lyapunov function is constructed to conduct an accurate estimation of external disturbances. Furthermore, a double-layer hierarchical and exponential reaching law global fast terminal fuzzy sliding mode controller is proposed. The dynamic quality of the sliding mode surface is adjusted by the exponential reaching law. The controller can quickly converge to a stable state and effectively eliminate the chattering of the controller. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by a simulation example.

Keywords: sliding mode control; fuzzy system; sliding mode surface; global fast terminal sliding mode control; exponential reaching law; external disturbance

0 引言

滑模控制(sliding mode control, SMC)自1950年首次出现至今, 经过长期发展, 已经证实了其控制的有效性^[1]. SMC也称变结构控制, 具有鲁棒性强、实现简单、响应速度快的优点, 被广泛应用在各类控制系统中, 并且取得了一定的成绩^[2-6]. 传统的SMC存在两个问题, 一是SMC采用线性滑模面, 收敛速度慢, 在时间趋于无穷时, 误差才收敛至零^[7]; 二是为了满足李雅普诺夫稳定性条件, 必须保证切换增益大于系统中的不确定项上界, 但是较大的切换增益会导致控

制器发生严重的抖振问题^[8].

为了解决SMC收敛慢的问题, 终端滑模控制(terminal sliding mode control, TSMC)和快速终端滑模控制(fast terminal sliding mode control, FTSMC)通过引入指数项滑模面来改善滑模面的动态品质, 提高了系统远离平衡点时的收敛速度, 使系统在有限时间收敛^[9-13]. 抖振是SMC普遍存在的问题, 相关学者已经做了大量研究^[14], 其中比较热点的研究是自适应控制与SMC的结合, 但该方法计算时间长, 计算量大, 系统的实时性和鲁棒性差^[8,15]. 直到模糊理论的引

收稿日期: 2022-10-12; 录用日期: 2023-03-11.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2022JBXT009).

责任编委: 孙宗耀.

†通讯作者. E-mail: jjalm@vip.sina.com.

入,模糊滑模控制(fuzzy sliding mode control, FSMC)被提出,有效地消除了抖振,使系统具有良好的自适应能力和鲁棒性.如模糊切换增益的方法,通过系统先验条件,构造模糊推理系统,调节系统的切换增益,有效抑制系统的抖振^[16-17].同时,自适应模糊滑模控制是近来研究的热点问题,利用模糊系统的自动逼近原理,对系统的未知不确定项进行自适应逼近,进而消除系统抖振^[18-20].

本文在FSMC和FTSMC的研究基础上,以存在不确定较大外界干扰的系统为研究对象,做出以下工作:1)基于模糊滑模控制原理,引入全局快速终端滑模控制,改善系统收敛速度;2)构造以李雅普诺夫函数导数绝对值为补偿的自适应干扰估计项,对外界干扰进行准确估计;3)提出一种双层递阶指数趋近全局快速终端模糊滑模控制器(double-layer hierarchical and exponential reaching law global fast terminal fuzzy sliding mode controller, DHE_GFTFSMC),以双层递阶控制思想,确保切换增益时刻稍大于不确定外界干扰,同时通过指数趋近率来调节滑模面动态品质,实验表明,该控制器能快速收敛到稳定状态,且能有效消除控制器的抖振.

1 模糊滑模控制原理与问题分析

1.1 系统描述与基本假设

考虑如下二阶不确定性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x) + bu(t) + d(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x = (x_1, x_2)$ 为系统状态变量; $f(x)$ 为已知连续函数; $u(t)$ 为控制输入; b 为控制增益; $d(t)$ 为不确定外界有界干扰,且存在某一上界 $k(t)$,使得 $d(t) \leq k(t)$.以 x_1 跟踪为例,定义系统的跟踪误差为

$$e = x_{1d} - x_1, \quad (2)$$

其中 x_{1d} 为系统的参考输入.控制任务是设计控制率 $u(t)$ 使系统快速地跟踪参考输入.

1.2 滑模控制

传统的滑模控制一般取滑模面为

$$s = ce + \dot{e}, \quad c > 0, \quad (3)$$

其中 c 为经验系数.定义李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2, \quad (4)$$

有

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(ce + \ddot{x}_{1d} - f(x) - bu(t) - d(t)). \quad (5)$$

根据系统稳定性原理 $\dot{V} \leq 0$,设计控制率为

$$u(t) = \frac{1}{b}(-f(x) + c\dot{e} + \ddot{x}_{1d} + k(t)\text{sgn}(s)). \quad (6)$$

其中: $k(t) = \max|d(t)| + \eta$,且 $\eta > 0$;sgn为符号函数.将式(6)代入(5)中,有

$$\dot{V} = s\dot{s} = -k(t)|s| - sd(t) \leq -\eta|s| \leq 0. \quad (7)$$

当 $\dot{V} \equiv 0$ 时, $\dot{s} \equiv 0$,根据LaSalle不变性原理^[21],系统渐近稳定.同时,当 $s = 0$ 时,由式(3)可得

$$\int_0^t \frac{1}{e(t)} \dot{e}(t) dt = \int_0^t -c dt. \quad (8)$$

所以有

$$e(t) = e(0) \exp(-ct). \quad (9)$$

因此只有当 $t \rightarrow \infty$ 时,误差 $e(t)$ 才趋向0.

1.3 模糊滑模控制

对于式(1)所示的系统,干扰 $d(t)$ 是时变不确定的,当 $d(t)$ 较大时,由式(7)可知,为满足系统稳定性,干扰上界 $k(t)$ 也要足够大,而过大的 $k(t)$ 会引起系统抖振,模糊理论较好地解决了这一问题.

在滑模控制率(6)中,为了消除抖振,切换增益 $k(t)$ 应该随着干扰 $d(t)$ 时变而时变,且满足 $k(t)$ 处处稍大于干扰 $d(t)$.设计模糊系统,以 $s\dot{s}$ 为系统输入, $\Delta k(t)$ 为系统输出,模糊集设置为

$$s\dot{s} = \{\text{NB NM Z PM PB}\}, \quad (10)$$

$$\Delta k = \{\text{NB NM Z PM PB}\}, \quad (11)$$

其中NB、NM、Z、PM、PB分别对应为负大、负中、零、正中、正大.模糊规则设计如表1所示.

表1 Δk 的模糊推理规则表

$s\dot{s}$	NB	NM	Z	PM	PS
Δk	NB	NM	Z	PM	PS

采用积分的方法对 $k(t)$ 进行估计,有

$$\hat{k}(t) = G \int_0^t \Delta k dt + \eta. \quad (12)$$

其中: G 为比例系数,由经验确定; η 为很小的正常数.此时模糊滑模控制器的控制率为

$$u(t) = \frac{1}{b}(-f(x) + c\dot{e} + \ddot{x}_{1d} + \hat{k}(t)\text{sgn}(s)). \quad (13)$$

1.4 模糊滑模控制

对于式(1)描述的系统,FSMC虽然能够在一定程度上消除控制器的抖振,但仍然存在两个问题.

1)滑模控制系统只有当 $t \rightarrow \infty$ 时,误差 $e(t)$ 才趋向0,而实际工程控制中,应该使得系统在有限时间 t_s 内趋向稳定,使误差 $e(t)$ 收敛到0.

2)引入模糊系统后,虽然能够有效消除控制器的抖振,但是使系统不稳定.FSMC的控制率 $u(t)$ 如式(13)所示,是在李雅普诺夫函数 $\dot{V} \leq 0$ 的条件下推导

的,但是要使系统严格满足 $\dot{V} \leq 0$ 的稳定条件,要求控制率 $u(t)$ 中的 $\hat{k}(t)$ 处处稍大于干扰 $d(t)$,但通过模糊理论估计的 $\hat{k}(t)$ 无法满足这一点,模糊估计的 $\hat{k}(t)$ 只是处处接近 $d(t)$.

2 双层递阶指数趋近全局快速终端模糊滑模控制器的设计与分析

为了解决FSMC存在的问题,首先引入全局快速终端滑模控制(global fast terminal sliding mode control, GFTSMC),使系统在有限时间收敛;其次,构造以李雅普诺夫导数绝对值为补偿的自适应干扰积分估计项;最后,基于上述方法,改进FSMC设计方法,提出一种新的模糊滑模控制器,即双层递阶指数趋近全局快速终端模糊滑模控制器(DHE_GFTFSMC).

2.1 全局快速终端模糊滑模控制器

取滑模面为

$$s = \dot{e} + \alpha e + \beta e^{p/q}. \quad (14)$$

其中: α 为经验系数, β 为正奇数, $p > q$ 为正奇数. 所以有

$$\dot{s} = \ddot{x}_{1d} - f(x) - bu_1(t) - d(t) + \alpha \dot{e} + \beta \frac{p}{q} e^{\frac{p}{q}-1} \dot{e}. \quad (15)$$

李雅普诺夫函数取式(4),所以有

$$\dot{V} = s \left(\ddot{x}_{1d} - f(x) - bu_1(t) - d(t) + \alpha \dot{e} + \beta \frac{p}{q} e^{\frac{p}{q}-1} \dot{e} \right). \quad (16)$$

根据系统稳定性原理 $\dot{V} \leq 0$, 设计控制率为

$$u_1(t) = \frac{1}{b} \left(-f(x) + \ddot{x}_{1d} + \alpha \dot{e} + \beta \frac{p}{q} e^{\frac{p}{q}-1} \dot{e} + k(t) \text{sgn}(s) \right). \quad (17)$$

其中: $k(t) = \max |d(t)| + \eta$, 且 $\eta > 0$; sgn 为符号函数. 将式(17)代入(16)中,有

$$\dot{V} = s \dot{s} = -k(t)|s| - sd(t) \leq -\eta|s| \leq 0. \quad (18)$$

当 $\dot{V} \equiv 0$ 时, $\dot{s} \equiv 0$, 根据LaSalle不变性原理^[21], 系统渐近稳定.

定理1 GFTSMC通过调节 α 、 β 、 p 、 q 参数,使系统在有限时间 t_s 内到达 $s = 0$ 滑模面,误差从任意初始状态 $e(0) \neq 0$ 收敛至平衡状态 $e(0) = 0$, 且

$$t_s = \frac{q}{\alpha(q-p)} \ln \frac{\beta + \alpha e(0)^{\frac{q-p}{q}}}{\beta}. \quad (19)$$

证明 当 $s = 0$ 时,由式(14)可得

$$-\beta = e^{-\frac{p}{q}} \cdot \frac{de}{dt} + \alpha e^{1-\frac{p}{q}}. \quad (20)$$

令 $y = e^{1-\frac{p}{q}}$, 则有 $\frac{dy}{dt} = \frac{q-p}{q} \cdot e^{-\frac{p}{q}} \cdot \frac{de}{dt}$, 所以式(20)可以化简为

$$\frac{dy}{dt} + \frac{q-p}{q} \cdot \alpha \cdot y = -\frac{q-p}{q} \beta. \quad (21)$$

由一次线性微分方程通解可得式(21)的通解

$$y = e^{-\int_0^t \frac{q-p}{q} \alpha dt} \left(\int_0^t -\frac{q-p}{q} \beta e^{\frac{q-p}{q} \alpha t} dt + C \right). \quad (22)$$

当 $t = 0$ 时, $C = y(0)$, 式(22)可化简为

$$y = -\frac{\beta}{\alpha} + \frac{\beta}{\alpha} e^{-\frac{q-p}{q} \alpha t} + y(0) e^{-\frac{q-p}{q} \alpha t}. \quad (23)$$

由于 $x = 0, y = 0$ 时, $t = t_s$, 式(23)化简为

$$\frac{\beta}{\alpha} e^{-\frac{q-p}{q} \alpha t_s} + y(0) e^{-\frac{q-p}{q} \alpha t_s} = \frac{\beta}{\alpha}, \quad (24)$$

其中 $y(0) = e(0)^{\frac{q-p}{q}}$, 所以可得

$$t_s = \frac{q}{\alpha(q-p)} \ln \frac{\beta + \alpha e(0)^{\frac{q-p}{q}}}{\beta}. \quad (25)$$

综上,定理1成立. \square

2.2 自适应干扰积分估计

FSMC采取式(12)所示干扰积分估计法,无法保证估计值处处大于实际干扰,系统不稳定,同时估计值抖振较大,使控制器抖振严重. 为此,本文设计一种自适应干扰积分估计方法,首先将李雅普诺夫函数导数的绝对值作为修正项加入积分估计中,其次将式(12)中的常数 η 也按照模糊积分估计法进行调整,从而使估计值更加接近真实的干扰值,减少抖振. 表达式如下所示:

$$\hat{k}_1(t) = G \int_0^t |\dot{V}| \Delta k dt + G' \int_0^t \Delta \eta dt, \quad (26)$$

其中 G, G' 为经验系数.

模糊系统的设计如下:根据式(26),构建两个模糊系统,输入为 $s\dot{s}$, 输出为 $\Delta k(t)$ 和 $\Delta \eta(t)$, 模糊集^[22-23]分别设置为

$$s\dot{s} = \{\text{NB NM Z PM PB}\}, \quad (27)$$

$$\Delta k = \{\text{NB NM Z PM PB}\}, \quad (28)$$

$$\Delta \eta = \{\text{NB NM Z PM PB}\}. \quad (29)$$

其中NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB分别对应为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大,各自对应的隶属度函数图像如图1所示.

为了让 $\hat{k}(t)$ 尽可能地接近真实干扰 $d(t)$, 需要设计更加合理的模糊规则. 若 $s\dot{s} > 0$, 当 $s\dot{s}$ 为PM和PB时,为了使系统快速调节至稳态,应该快速增大 $\hat{k}(t)$, 即 $\Delta k(t)$ 和 $\Delta \eta(t)$ 快速增大,则可以让 $\Delta k(t)$ 和 $\Delta \eta(t)$ 的模糊值为PB; 当 $s\dot{s}$ 为PS时,则需要微调 $\Delta k(t)$ 和 $\Delta \eta(t)$ 即可. 通过实验发现,当 $\Delta k(t)$ 对应为PS, $\Delta \eta(t)$ 对应PM时,实验效果较好. 同理,若 $s\dot{s} < 0$, 当 $s\dot{s}$ 为NM和NB时,为了使系统快速消除抖振,应该快速减小 $\hat{k}(t)$, 即 $\Delta k(t)$ 和 $\Delta \eta(t)$ 快速减小,则可以让 $\Delta k(t)$

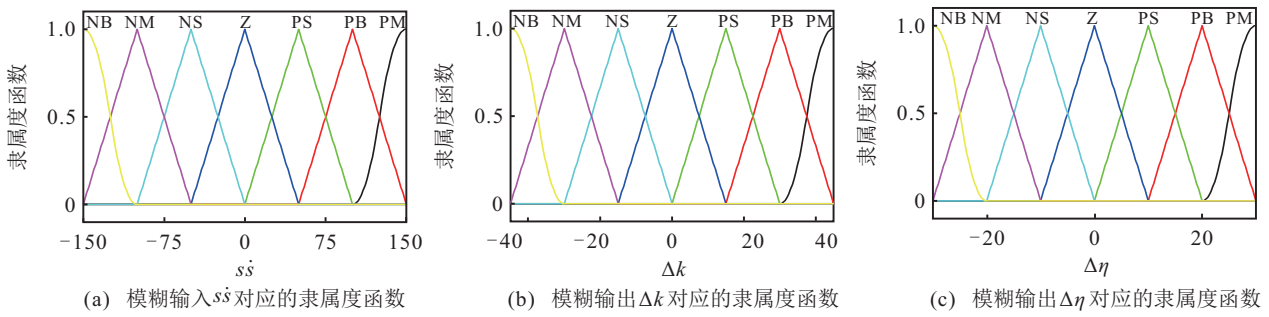


图1 隶属度函数

和 $\Delta\eta(t)$ 的模糊值为NB; 而当 $s\dot{s}$ 为NS时, 则只需要微调 $\Delta k(t)$ 和 $\Delta\eta(t)$ 即可, 通过实验发现, 当 $\Delta k(t)$ 对应为NS, $\Delta\eta(t)$ 对应NM时, 实验效果较好. 当 $s\dot{s} = 0$, 即 $s\dot{s}$ 为Z时, $\Delta k(t)$ 和 $\Delta\eta(t)$ 都为Z. 基于上述分析, 本文模糊规则设计如表2所示.

表2 Δk 和 $\Delta\eta$ 的模糊推理规则表

$s\dot{s}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
Δk	NB	NB	NS	Z	PS	PB	PB
$\Delta\eta$	NB	NB	NM	Z	PM	PB	PB

2.3 双层递阶指数趋近全局快速终端模糊滑模控制

本文设计一种双层递阶指数趋近全局快速终端模糊滑模控制器, 如图2所示, 整体结构分为上下两层控制器, 上层控制器本质上是一个参数估计器, 用来产生与实际干扰 $d(t)$ 尽可能接近的估计值 $\hat{k}_1(t)$; 下层控制器的干扰估计值是在上层干扰估计值的基础上加一个很小的常数得到的, 能够确保估计值时刻大于真实干扰, 进而保证控制系统的稳定性, 是控制系统的主控制器.

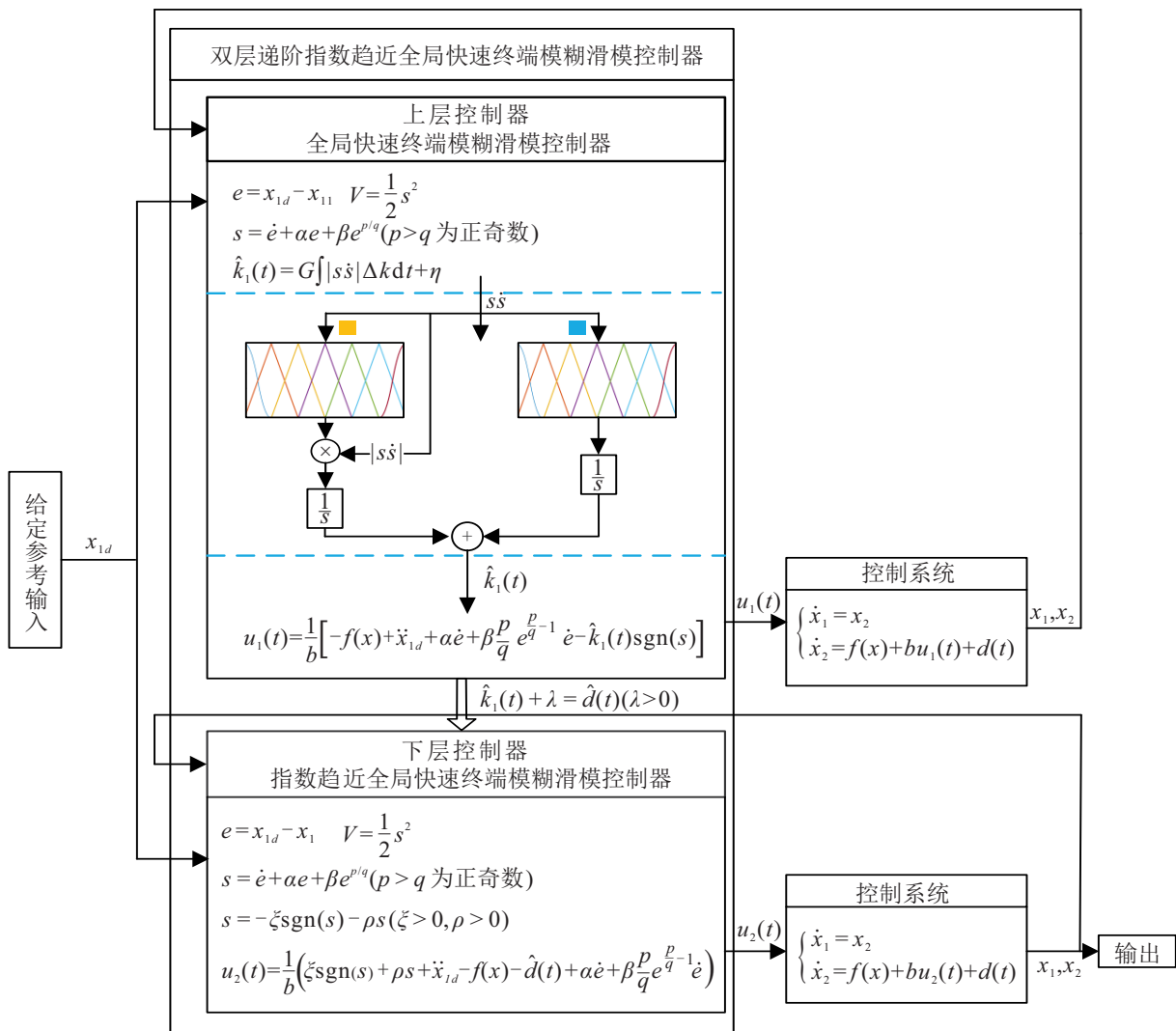


图2 双层递阶指数趋近全局快速终端模糊滑模控制结构

首先构造DH_GFTFSMC控制器,上层控制器利用式(26)的自适应干扰积分估计方法得到干扰估计值,将估计值加一个很小的常数 $\lambda(\lambda > 0)$ 作为下层控制器的干扰估计值 $\hat{d}(t)$,确保 $\hat{d}(t)$ 处处稍大于真实干扰 $d(t)$,如下所示:

$$\hat{d}(t) = \hat{k}_1(t) + \lambda. \quad (30)$$

根据式(30)和(14)~(17)设计下层控制率

$$u_2(t) = \frac{1}{b} \left(-f(x) + \ddot{x}_{1d} + \hat{d}(t) \operatorname{sgn}(s) + \alpha \dot{e} + \beta \frac{p}{q} e^{\frac{p}{q}-1} \dot{e} \right). \quad (31)$$

定理2 对于DH_GFTFSMC控制器,干扰估计值取式(30),控制率取式(31),则系统渐近稳定.

证明 由式(31)和(16)可得

$$\dot{V} = s\dot{s} = -\hat{d}(t)|s| - sd(t) \leq 0. \quad (32)$$

当 $\dot{V} \equiv 0$ 时, $\dot{s} \equiv 0$,根据LaSalle不变性原理^[21],系统渐近稳定. \square

同时,在DH_GFTFSMC控制器的基础上,在下层控制器中引入指数趋近率,对滑模面的运动轨迹进行限制,从而改善滑模面的动态品质,形成DHE_GFTFSMC控制器.指数趋近率如下所示:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - \rho s. \quad (33)$$

其中: $\varepsilon > 0, \rho > 0$,均为常数.

根据式(30)和(33)重新设计下层控制器的控制率,由式(15)和(33)可得

$$\begin{aligned} \dot{s} = \ddot{x}_{1d} - f(x) - bu_2(t) - d(t) + \alpha \dot{e} + \beta \frac{p}{q} e^{\frac{p}{q}-1} \dot{e} = \\ -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - \rho s, \end{aligned} \quad (34)$$

所以有

$$u_2(t) = \frac{1}{b} \left(\varepsilon \operatorname{sgn}(s) + \rho s + \ddot{x}_{1d} - f(x) - \hat{d}(t) + \alpha \dot{e} + \beta \frac{p}{q} e^{\frac{p}{q}-1} \dot{e} \right). \quad (35)$$

综上,定理2成立. \square

定理3 针对含有外界不确定干扰 $d(t)$ 的控制系统(1),DHE_GFTFSMC通过设计上下层控制器分别控制上下层控制系统,上层控制器作为外界干扰 $d(t)$ 的参数估计器,估计方法采取式(26)所示自适应积分估计法,下层控制器的控制率设置为式(35),指数趋近率设置为式(33),则下层控制器渐近稳定,且在有限时间误差 e 收敛至0.

证明 因为DHE_GFTFSMC下层控制器采用式(14)所示的全局快速终端滑模面,所以从定理1可知,通过设定 α, β, p, q 的值可以使系统在有限时间 t_s 内

达到平衡状态,即系统将从任意初始状态 $e(0) \neq 0$ 收敛至平衡状态,收敛时间 t_s 计算如式(19)所示.

稳定性.取式(4)所示的李雅普诺夫函数,结合指数趋近率式(33)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} = s(-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - \rho s) = \\ -\varepsilon|s| - \rho s^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (36)$$

当 $\dot{V} \equiv 0$ 时, $\dot{s} \equiv 0$,根据LaSalle不变性原理^[21],系统渐近稳定.对系统做进一步分析,由式(36)可得

$$\dot{V} = s\dot{s} = -\varepsilon|s| - \rho s^2 \leq -\rho 2V. \quad (37)$$

根据文献[21],不等式方程(37)对应的解为

$$V(t) \leq e^{-2\rho(t-t_0)}V(t_0). \quad (38)$$

因为 $\rho > 0$,所以 $V(t)$ 指数收敛至0,收敛速度由 ρ 决定.同时,在指数趋近率式(33)中,指数趋近率实际上可以分解为 $\dot{s} = -\rho s$ 和 $\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 两部分,其中 $\dot{s} = -\rho s$ 的解为

$$s = s(0)e^{-\rho t}. \quad (39)$$

因此,指数趋近率中的指数项 ρs ,只能保证当 s 较大时,系统能以较大的速率趋近稳定滑模面,但是不能保证在有限时间内到达,所以通过增加等速趋近项 $-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 来确保当 s 接近零时,趋近速度是 ε 而不是零,可以保证有限时间内到达稳态滑模面. \square

定理4 针对含有外界不确定干扰 $d(t)$ 的控制系统(1),DHE_GFTFSMC通过上下层递阶控制器使系统渐近稳定,且外界干扰 $d(t)$ 可以非常大.

证明 DHE_GFTFSMC的渐近稳定性已经在定理3中得证,此处主要证明DHE_GFTFSMC可以应对非常大的外部干扰.针对SMC,从控制率(6)可以看出,过大的切换增益 $k(t)$ 是导致控制输入严重抖振的主要原因,FSCM能够在一定程度上消除抖振,但无法严格保证系统的稳定性要求.本文提出的DH_GFTFSMC上层控制器中,采取式(26)的自适应积分估计法,最终采取式(30)作为下层控制器的干扰估计值,保证了干扰估计值处处稍大于真实干扰,既满足了系统稳定性要求,又很好地消除了抖振,为更进一步消除抖振,在DHE_GFTFSMC下层控制器引入指数趋近率(33),从式(35)可以看到,控制输入抖振与指数趋近率中的参数 ε 有关,因此可以通过设置很小的 ε 来确保消除控制输入的抖振.所以,只要通过合理设置自适应积分估计(26)中各参数与模糊规则,实现外界干扰的精确估计,DHE_GFTFSMC控制器就能很好地消除控制抖振,可以应对非常大的外部干扰. \square

3 仿真实例

3.1 实验说明

1) 模型说明. 本实验在式(1)所表述的二阶不确定系统上进行实验. 根据文献[21], $f(x)$ 、 b 及参考输入 x_{1d} 的取值分别为 $f(x) = -25x_2, b = 133, x_{1d} = \sin(2\pi t)$. $d(t)$ 取值如下:

$$d(t) = 200 \exp\left(-\frac{(t - c_i)^2}{(2b_i^2)}\right), b_i = 0.5, c_i = 5. \tag{40}$$

2) 实验中各控制器及方法的符号简写与实验参数. 为了方便实验对比分析, 对各类控制器及方法名称进行简写, 如表3所示. 同时, 给出各仿真实验的参数取值, 如表4所示.

表3 各控制器及方法名称简写

控制器及方法名称	简写
滑模控制器 ^[21]	SMC
模糊滑模控制器 ^[21]	FSMC
全局快速终端滑模控制器 ^[24-25]	GFTSMC
全局快速终端模糊滑模控制器 ^[22]	GFTFSMC
自适应干扰积分估计	AIE
双层递阶全局快速终端模糊滑模控制器	DH_GFTFSMC
双层递阶指数趋近全局快速终端模糊滑模控制器	DHE_GFTFSMC

表4 各控制器仿真参数值

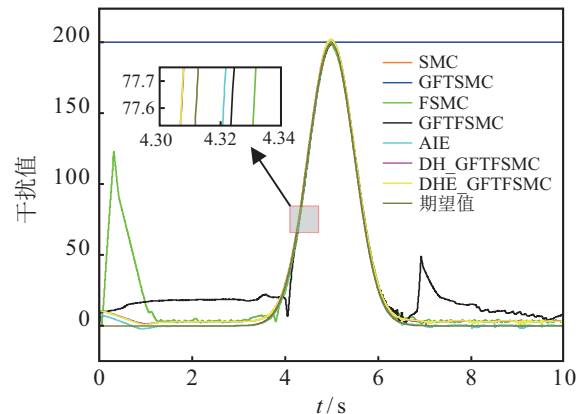
控制方法	参数	数值		
		参数	数值	
SMC	c	150	η	1
	G	400	/	/
GFTSMC	α	40	q	3
	β	0.02	η	1
	p	11	/	/
GFTFSMC	α	40	q	3
	β	0.02	G	400
	p	11	η	1
AIE	α	40	q	3
	β	0.02	G	0.05
	p	11	G'	5
DH_GFTFSMC(上层)	α	40	q	3
	β	0.02	G	0.05
	p	11	G'	5
DH_GFTFSMC(下层)	α	40	q	3
	β	0.02	λ	3
	p	11	/	/
DHE_GFTFSMC(上层)	α	40	q	3
	β	0.02	G	0.05
	p	11	G'	5
DHE_GFTFSMC(下层)	α	40	λ	3
	β	0.02	ε	2.6
	p	11	ρ	50
	q	3	/	/

3.2 实验仿真

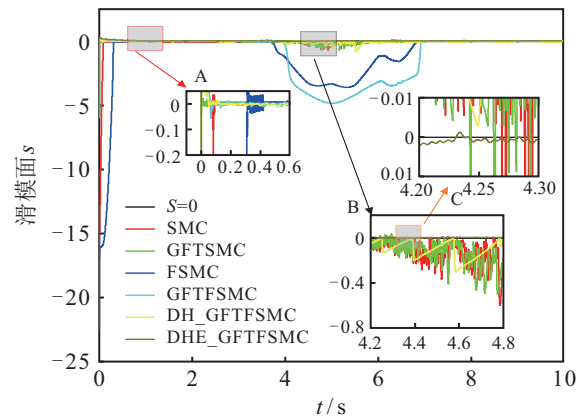
本文主要分析滑模面 s 的动态品质, 控制输入 $u(t)$ 的抖振情况, 外界干扰 $d(t)$ 估计精度和状态变量 x_1, x_2 的跟踪效果, 实验最后给出本文所提模型针对其他类型干扰的测试实验.

1) 外界干扰估计与滑模面 s 动态品质.

外界干扰估计与滑模面 s 动态轨迹如图3所示. 从图3(a)可以看出, SMC和GFTSMC通过直接给定定值201来保证估计值时刻大于干扰值, 以满足李雅普诺夫稳定条件^[21], 而这会造成控制器的严重抖振, 且这个值的给定需要已知外界干扰的上限. 引入模糊系统后的FSMC和GFTFSMC的估计值抖动较为严重, 且在很多时刻有估计值小于干扰值的情况. 本文引入的AIE方法, 总体估计值光滑, 抖振较小, 很好地跟随了实际干扰. 在AIE估计值的基础上, 加上一个很小的常数, 就得到DH_GFTFSMC和DHE_GFTFSMC下层控制器估计值, 且处处略大于实际干扰, 整体光滑, 抖振较小.



(a) 外界干扰 $d(t)$ 估计



(b) 滑模面 s

图3 外界干扰 $d(t)$ 估计与滑模面 s

滑模控制最终的理想状态是使滑模面稳定在 $s = 0$ 的平衡位置且不再离开. 从图3(b)可以看出, FSMC和GFTFSMC在扰动较大时, 滑模面严重偏移平衡位置, 这也是由于FSMC和GFTFSMC在利用模

糊积分估计干扰时无法保证估计值大于实际干扰造成的. 从图3(b)放大图A可以看出,在引入全局快速终端滑模控制后明显改善了系统第一次到达稳态滑模面的时间,基于全局快速终端滑模控制的各类方法明显优于SMC和FSMC. 从放大图B、C可以看出,本文所提模型DHE_GFTFSMC的效果最优,滑模面一直稳定在 $s = 0$ 附近,总体抖振较小.

2) 状态变量 x_1 和 x_2 的跟踪效果. 首先对状态变量 x_1 的跟踪效果进行分析. 从图4(a)和4(b)可以看出,在对状态变量 x_1 的跟踪上,本文所提控制器

DHE_GFTFSMC效果最优,抖振较小,其跟踪误差都始终保持在接近0的位置,其他方法跟踪误差较大,尤其是FSMC和GFTFSMC,由于无法保证估计值时刻大于干扰值,在扰动较大的地方,跟踪值严重偏离给定值. 其次对状态变量 x_2 的跟踪效果进行分析. 从图4(c)和4(d)可以看出,DHE_GFTFSMC控制器效果最优,其跟踪误差始终保持在接近0的位置,实现了精确的跟踪,尤其在外界干扰较大的地方,其他方法跟踪误差和跟踪值的变化幅度都较大,跟踪性能较差.

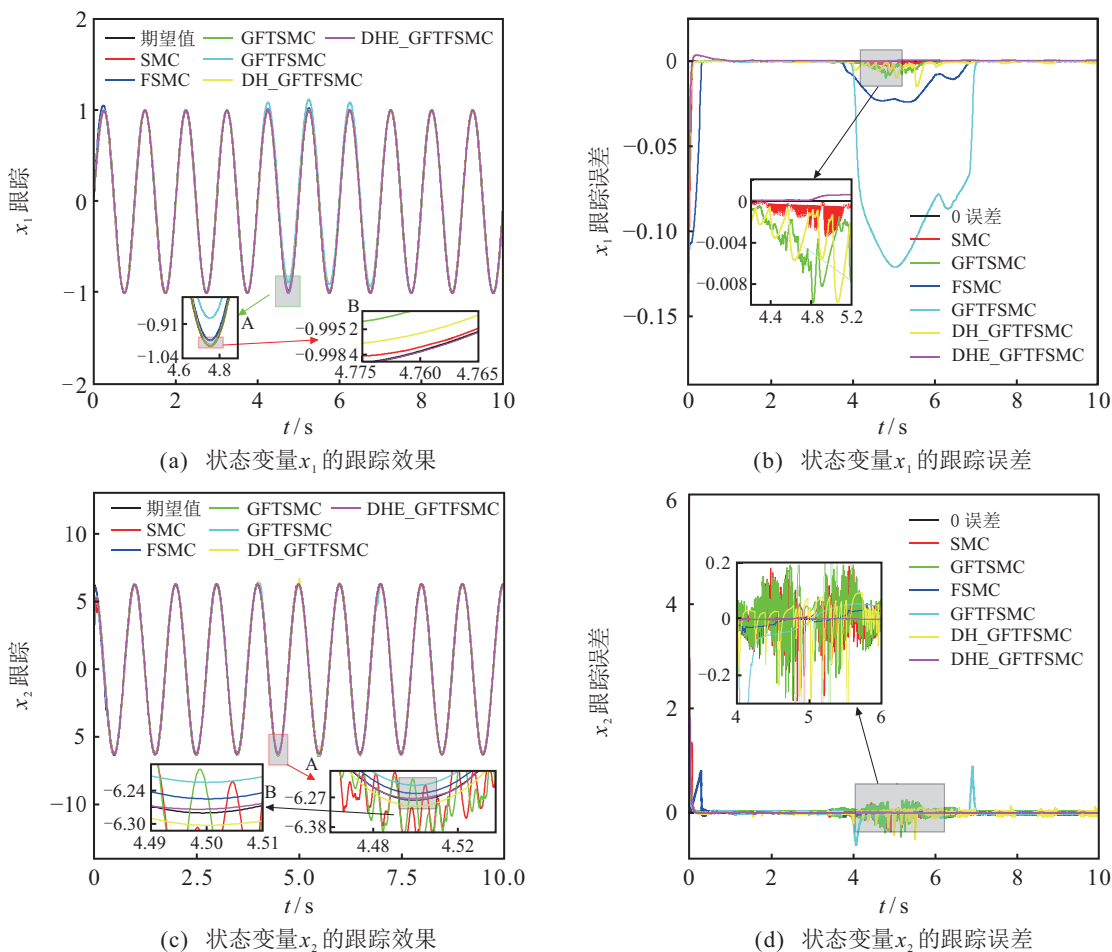


图4 状态变量跟踪效果与误差

3) 控制输入. 控制输入 $u(t)$ 如图5所示. 对一个控制系统而言,控制器能稳定地输出是最重要的,对控制器性能和被控对象稳定性的影响都至关重要. 通过上文分析可知,要使控制器稳定且有效消除抖振,就要保证控制率 $u(t)$ 中的估计值 $k(t)$ 跟随干扰 $d(t)$ 时变而时变,且处处稍大于实际干扰 $d(t)$. 本文所提的DHE_GFTFSMC满足此要求,从图5可以得到验证,本文所提控制器DHE_GFTFSMC控制性能优秀,能有效地消除控制器的抖振现象,没有引入模糊系统的SMC和GFTSMC抖振最为严重,其他类型的

控制器也存在一定的抖振.

4) 其他类型干扰测试. 根据文献[26],干扰值超过系统给定值的1.1倍时,即可认为是系统的大干扰,因此本文所加干扰约在3.4s~6.6s属于大干扰. 为进一步验证模型对其他类型干扰的鲁棒性,本文增加两类大干扰的情况,第1类是增加方波干扰,第2类是直接在本文式(40)所示的干扰基础上加10,用于产生全过程的大干扰信号. 基于本文所提的DHE_GFTFSMC控制器模型进行实验,实验结果如图6所示.

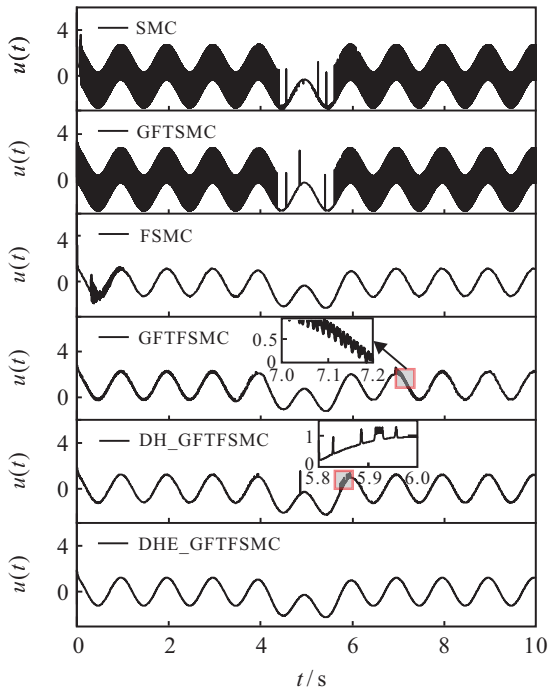
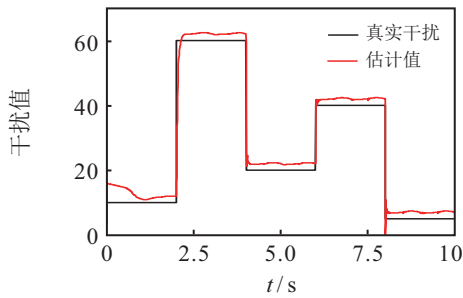
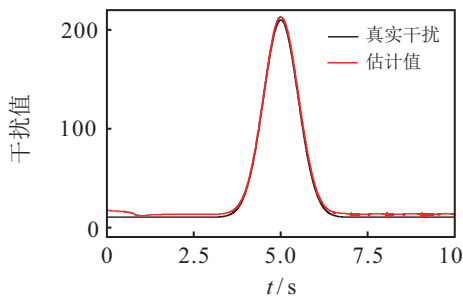


图5 控制输入



(a) 干扰1



(b) 干扰2

图6 两类大干扰

从图6(a)和6(b)可以看出,对于上述两类大干扰,本文模型也能够做到精准估计,由此可见,本模型对各类外界不确定大干扰具有很好的适应性。

4 结论

本文在模糊滑模控制的基础上,引入全局快速终端滑模控制,构造了以李雅普诺夫函数导数的绝对值为补偿的自适应误差估计项,进而提出了一种双层递阶指数趋近全局快速终端模糊滑模控制器。在具有不确定外界干扰的二阶系统上进行实验,改善了对状态变量的跟踪效果,同时有效消除了控制器的抖振现

象。仿真实验验证了所提控制器的可行性和有效性,通过相关对比实验进一步验证了其优越性,为状态变量可直接测量且具有外界较大不可观测干扰的一类控制系统提供了一种新模糊滑模控制器的设计方法。

现实生活中的扰动更为复杂多样,且扰动一般不可测量,因此对扰动进行精确估计对于系统的稳定性至关重要。后续研究的重点将集中于对所提模型进行更多的算法鲁棒性测试与实际应用,在本文提出的双层控制器的基础上,考虑融合上下层控制信息,构造普适性更强的复合型控制器,进而满足实际工程需求。

参考文献(References)

- [1] Wu L G, Liu J X, Vazquez S, et al. Sliding mode control in power converters and drives: A review[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 9(3): 392-406.
- [2] 陈强, 朱健宏, 陶玫玲. 基于两相幂次趋近律的航天器姿态控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1145-1152. (Chen Q, Zhu J H, Tao M L. Spacecraft attitude control based on two-phase power reaching law[J]. Control and Decision, 2022, 37(5): 1145-1152.)
- [3] 韩红桂, 秦晨辉, 孙浩源, 等. 城市污水处理过程自适应滑模控制[J]. 自动化学报, 2023, 49(5): 1010-1018. (Han H G, Qin C H, Sun H Y, et al. Adaptive sliding mode control for municipal wastewater treatment process[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(5): 1010-1018.)
- [4] 梁慧慧, 吴炜, 楼旭阳, 等. 二维桥式起重机的滑模控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2163-2169. (Liang H H, Wu W, Lou X Y, et al. Sliding mode control of two-dimensional overhead crane[J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 2163-2169.)
- [5] Ma Z Q, Huang P F, Kuang Z A. Fuzzy approximate learning-based sliding mode control for deploying tethered space robot[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(9): 2739-2749.
- [6] Van M, Ge S S. Adaptive fuzzy integral sliding-mode control for robust fault-tolerant control of robot manipulators with disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(5): 1284-1296.
- [7] Drakunov S V, Utkin V I. Sliding mode control in dynamic systems[J]. International Journal of Control, 1992, 55(4): 1029-1037.
- [8] 于瑞, 徐雪峰, 周华, 等. 基于改进切换增益自适应率的欠驱动USV滑模轨迹跟踪控制[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2022, 56(3): 436-443. (Yu R, Xu X F, Zhou H, et al. Underactuated USV sliding mode trajectory tracking control based on improved switching gain adaptive rate[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2022, 56(3): 436-443.)
- [9] Qiao L, Zhang W D. Trajectory tracking control of AUVs via adaptive fast nonsingular integral terminal sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 1248-1258.

- [10] Wang Y Y, Zhu K W, Chen B, et al. Model-free continuous nonsingular fast terminal sliding mode control for cable-driven manipulators[J]. ISA Transactions, 2020, 98: 483-495.
- [11] 杨俊起, 高煜欣, 陈滢涛, 等. 基于干扰观测器的不确定非线性系统终端滑模控制器设计[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 155-160.
(Yang J Q, Gao Y X, Chen Y T, et al. Disturbance observer-based terminal sliding mode controller design for uncertain nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2020, 35(1): 155-160.)
- [12] 雷城, 蓝益鹏, 徐泽来, 等. 一种新型复合滑模趋近律设计与分析[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 435-440.
(Lei C, Lan Y P, Xu Z L, et al. Design and analysis of a new compound sliding mode reaching law[J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 435-440.)
- [13] 沙磊, 王树波, 刘逸坚. 基于扩张状态观测器的二质量系统非奇异快速终端滑模控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 850-856.
(Sha L, Wang S B, Liu Y J. Nonsingular fast terminal sliding mode control based on extended state observer for two mass systems[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 850-856.)
- [14] Zheng K M, Hu Y M, Wu B. Intelligent fuzzy sliding mode control for complex robot system with disturbances[J]. European Journal of Control, 2020, 51: 95-109.
- [15] Amer A F, Sallam E A, Elawady W M. Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(8): 4943-4953.
- [16] Chen J Y, Chen L M, Zou Q. Sliding mode control for manipulator based on fuzzy switching gain adjustment[C]. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Tianjin, 2019: 822-826.
- [17] Lan Y P, Li J, Zhang F G, et al. Fuzzy sliding mode control of magnetic levitation system of controllable excitation linear synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5585-5592.
- [18] 王希铭, 孙金生, 吴梓杏, 等. 基于自适应滑模的不确定 Euler-Lagrange 多智能体系统抗扰动蜂拥控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(9): 2418-2424.
(Wang X M, Sun J S, Wu Z X, et al. Adaptive sliding mode control based flocking control of uncertain Euler-Lagrange multi-agent systems subject to unknown external disturbances[J]. Control and Decision, 2022, 37(9): 2418-2424.)
- [19] 张春雷, 李鹤, 董茂林, 等. 燃料电池空气供应系统自适应神经网络滑模控制[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2022, 43(9): 1270-1276.
(Zhang C L, Li H, Dong M L, et al. Adaptive neural network sliding mode control for the fuel cell air supply system[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2022, 43(9): 1270-1276.)
- [20] 李德昀, 徐德刚, 桂卫华. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1311-1323.
(Li D Y, Xu D G, Gui W H. Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. Control and Decision, 2021, 36(6): 1311-1323.)
- [21] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真: 基本理论与设计方法[M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2015: 269-272.
(Liu J K. Sliding mode control design and MATLAB simulation[M]. The 3rd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 269-272.)
- [22] 周向阳, 舒通通, 吕子豪, 等. 基于模糊切换增益调节的惯性稳定平台滑模控制[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 263-271.
(Zhou X Y, Shu T T, Lyu Z H, et al. Sliding mode control of inertially stabilized platform based on fuzzy switching gain adjustment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 263-271.)
- [23] 刘杰, 李允公, 刘宇. 智能控制与 MATLAB 实用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 35-36.
(Liu J, Li Y G, Liu Y. Intelligent control and MATLAB practical technology[M]. Beijing: Science Press, 2017: 35-36.)
- [24] Yu S H, Yu X H, Man Z H. Robust global terminal sliding mode control of SISO nonlinear uncertain systems[C]. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney, 2002: 2198-2203.
- [25] Yu X H, Zhihong M. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(2): 261-264.
- [26] Jiang N, Li S T, Liu T, et al. Nonlinear large disturbance attenuation controller design for the power systems with STATCOM[J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 219(20): 10378-10386.

作者简介

康庄(1995—), 男, 博士生, 从事模糊控制、列车智能运行控制等研究, E-mail: zhuangkangxxy@163.com;

贾利民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、系统安全等研究, E-mail: jialm@vip.sina.com;

秦勇(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、系统安全等研究, E-mail: yqin@bjtu.edu.cn.