

改进NDO的板球系统自适应滑模抗扰控制

杨立炜, 李萍, 夏国锋, 王涛

引用本文

杨立炜, 李萍, 夏国锋, 王涛. 改进NDO的板球系统自适应滑模抗扰控制[J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230700229-5.

YANG Liwei, LI Ping, XIA Guofeng, WANG Tao. Adaptive Sliding Mode Disturbance Rejection Control for Cricket System of Improved NDO [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230700229-5.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[无人机辅助边缘计算安全通信能力最大化方案](#)

Scheme for Maximizing Secure Communication Capacity in UAV-assisted Edge Computing Networks
计算机科学, 2024, 51(6A): 230800032-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230800032>

[基于迭代非对称盲点网络的低剂量CT重建算法](#)

Low-dose CT Reconstruction Algorithm Based on Iterative Asymmetric Blind Spot Network
计算机科学, 2023, 50(12): 221-228. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230300014>

[骨架数据增强和双重最近邻检索自监督动作识别](#)

Self-supervised Action Recognition Based on Skeleton Data Augmentation and Double Nearest Neighbor Retrieval
计算机科学, 2023, 50(11): 97-106. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230500158>

[开源软件中社区文档应用与维护的实证研究](#)

Empirical Study on Application and Maintenance of OSS Community Profile Documentation
计算机科学, 2023, 50(6A): 220600221-8. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220600221>

[使用语义解析构建面向分布式SCADA系统的自然语言接口](#)

Building Natural Language Interfaces for Distributed SCADA Systems Using Semantic Parsing
计算机科学, 2023, 50(6A): 220300141-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300141>

改进 NDO 的板球系统自适应滑模抗扰控制

杨立炜¹ 李萍¹ 夏国锋² 王涛¹

1 新疆理工学院信息工程学院 新疆阿克苏 843000

2 中国电建集团昆明勘测设计研究院 昆明 650033

(liweiyang1003@qq.com)

摘要 为解决板球系统因受到外部负载扰动、摩擦力、交叉耦合干扰等不确定性扰动而跟踪精度不高的问题,提出一种基于改进的非线性干扰观测器(NDO)和非线性信息增益滑模控制策略。利用预设性能函数(PPF)对误差的变换技术,将误差限定在规定的范围内,建立改进的 NDO 来估计不确定性扰动。运用精确的估计值来设计滑模控制器,滑模面包含一个修正项,可以降低扰动的影响,从而提高控制精度,并采用非线性信息增益设计自适应切换增益,降低抖振的影响。最后,仿真表明改进的 NDO 能有效地估计扰动,改善了动态品质,所提控制方案提高了传统的 NDO 的控制精度和抗扰能力。

关键词 板球系统;预设性能函数;非线性干扰观测器;不确定性扰动;滑模控制

中图分类号 TP273

Adaptive Sliding Mode Disturbance Rejection Control for Cricket System of Improved NDO

YANG Liwei¹, LI Ping¹, XIA Guofeng² and WANG Tao¹

1 School of Information Engineering, Xinjiang Institute of Technology, Aksu, Xinjiang 843000, China

2 Power Construction Corporation of China Kunming Research Institute, Kunming 650033, China

Abstract To address the challenge of achieving high-precision tracking in a ball and plate system subject to uncertain disturbances such as external loads, friction, and cross-coupling interference, this paper proposes an enhanced approach that combines an improved nonlinear disturbance observer(NDO) and a nonlinear information gain sliding mode control strategy. Utilizing error transformation techniques based on a prescribed performance function(PPF), we constrain the error within specified bounds, and introduce the improved NDO to estimate the uncertain disturbances accurately. We leverage the precise estimation to design a sliding mode controller with a corrective term on the sliding surface, which can reduce the impact of disturbances, and enhance control precision. Furthermore, we employ nonlinear information gain to adaptively adjust the switching gain, so as to mitigate chattering effects. Simulation results demonstrate that the enhanced NDO effectively estimates disturbances, leading to improved dynamic performance. The proposed control approach exhibits higher control precision and disturbance rejection capabilities.

Keywords Ball and plate system, Prescribed performance function, Nonlinear disturbance observer, Uncertain disturbances, Sliding mode controller

1 引言

近二十年来,板球系统(Ball and Plate System)不仅被广泛用作控制领域的实验平台^[1],而且在机器人技术、卫星定位、国防系统、火箭系统和无人机等动态系统中得到了实际应用^[2]。板球系统的动力学是高度非线性和强耦合的。在实际应用中,系统不可避免地受到参数不确定性和外部干扰的影响。板球系统模型具有未知或可变的外部负载扰动、摩擦力、交叉耦合和噪声扰动等^[3],所有这些问题使得控制系统的设计成为一项具有挑战性的复杂任务。滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)是一种高效的控制方法,不仅因为它具有处理非线性扰动、外部扰动和参数不确定性的能力,且能使系统具有良好的鲁棒性和抗扰性能^[4]。为缓解抖振现象, Li 等^[5]设计 RBF 神经网络逼近板球非线性未知部分来降低模糊增益,

该策略响应速度快,控制精度高,有效减弱了控制输入的抖动。Suleiman 等^[6]在控制输入中采用饱和函数而不是符号函数。但是,要做到这一点,需要在一定程度上牺牲干扰抑制性能。另一种方法是采用干扰观测器来估计干扰^[7]。Liu 等^[8]用非线性扰动观测器(Nonlinear Disturbance Observer, DNO)的估计值对系统进行补偿,将积分项的滑模开关函数作为输入,设计单输入模糊控制器,有效削弱了抖动。Wang 等^[9]设计降阶扩张状态观测器,使得切换项近似为零,实现滑模技术的无抖振控制。综上所述,基于观测器的滑模控制方法通过滑模面的精心设计来实现对系统状态的精确控制,在应对复杂、不稳定或非线性系统方面效果出色。

基于以上分析,本文采用预设性能函数(PPF)^[10]来改进非线性干扰观测器,利用 NDO 的估计值来设计动态滑模控制器。PPF 能将误差限制在一个预先设计的边界之内,改善

基金项目:国家自然科学基金(61163051)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61163051).

通信作者:夏国锋(3105192457@qq.com)

估计过程中出现的超调和振荡现象^[11],使得 NDO 具有更快的收敛速度,增强了干扰抑制的能力。然后,设计基于双曲正切函数的滑模控制器。选择合适的切换项增益能提高控制精度,然而,选择过大则会产生超调进而加大抖振,过小则会使系统响应变慢。因此,该控制器采用非线性增益技术^[12]设计自适应切换增益,这大大降低了 SMC 的抖振。

2 问题描述

2.1 数学模型

不考虑板的支撑结构,板球系统如图 1 所示。由于其倾斜,球是在板上旋转的理想球形质量。球的位置在笛卡尔坐标系 OXYZ 中表示,原点在板上的 O' 处。X-Y 平面与板的上表面共面,Z 轴向上并垂直于该平面。

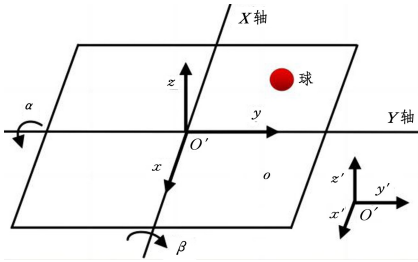


图 1 板球系统数学模型

Fig. 1 Mathematical model of ball and plate system

假设球在平板上无滚动,板球系统的数学模型可以通过欧拉-拉格朗日方程^[13]推导出,如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \left(m + \frac{I_b}{r_b^2}\right)\ddot{x} &= m(x\dot{\alpha}^2 + y\dot{\beta}^2) - mg\sin(\alpha) + f_x \\ \left(m + \frac{I_b}{r_b^2}\right)\ddot{y} &= m(x\dot{\beta}^2 + x\dot{\alpha}^2) - mg\sin(\beta) + f_y \\ (I_b + I_p + mx^2)\ddot{\alpha} &= \tau_x - m(xy\ddot{\beta} + x\dot{y}\dot{\beta} + 2x\dot{x}\dot{\alpha}) - \\ &\quad my\dot{x}\dot{\beta} - mgx\cos(\alpha) \\ (I_b + I_p + my^2)\ddot{\beta} &= \tau_y - m(xy\ddot{\alpha} + y\dot{x}\dot{\alpha} + 2y\dot{y}\dot{\beta}) - \\ &\quad mx\dot{y}\dot{\alpha} - mgy\cos(\beta) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $I_b = 0.4mr_b^2$ 。通过该模型的建立可以看出,板球系统是一个高阶、强耦合的非线性动态系统。

此外,一般情况下,小球运动速度很慢,可以将耦合项设为扰动。考虑到未知扰动、耦合项和摩擦力,它的模型可写成如下:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\gamma\sin(\alpha) + d_1 \\ \ddot{y} = -\gamma\sin(\beta) + d_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\gamma = \frac{mg}{m + I_b/r_b^2}$, d_1, d_2 分别为 X 和 Y 方向的集总扰动。所有相关参数的含义及其参数值如表 1 所列。

表 1 系统参数及其参数值

Table 1 System parameters and their values

参数	意义	数值	参数	意义	数值
m	小球质量	0.223 kg	I_b	平板转动惯量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1.76×10^{-5}
r_b	小球半径	0.038 m	I_p	小球转动惯量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.0001
α, β	平板 X 和 Y 方向倾角	rad	τ_x, τ_y	平板 X, Y 方向力矩/s	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
x, y	小球在 X 和 Y 方向的位置	m	f_x, f_y	球在 X, Y 方向摩擦力	N
g	引力常数	9.18/(m/s^2)			

2.2 预设性能函数

诸多文献表明,将预设性能函数(Prescribed Performance Function, PPF)和误差变换引入控制系统,可以将误差限定在规定范围内^[14]。其设计思想是定义一个误差边界函数 $\sigma(t)$ 来限制原误差转换为新误差函数,并利用新误差函数设计控制器, $\sigma(t)$ 的计算式如下:

$$\sigma(t) = (\sigma_0 - \sigma_\infty)e^{-lt} + \sigma_\infty \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mu = \frac{e(t)}{\sigma(t)} \\ \eta = S^{-1}(\mu) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+\mu}{1-\mu}\right) \end{cases} \quad (4)$$

其中, σ_0 表示初始误差范围, σ_∞ 表示稳态误差范围, $\sigma_0 > \sigma_\infty > 0$; $l > 0$ 是控制收敛速度的参数; $e(t)$ 是跟踪误差; μ 为中间变量; η 是变换后的误差。通过设计合适的控制律,可使 $e(t)$ 满足如下约束:

$$-\sigma(t) < e(t) < \sigma(t) \quad (5)$$

2.3 改进非线性干扰观测器

板球系统的数学模型已导出为方程(1)和(2)。由于板球系统是关于 X 轴和 Y 轴对称的,只需讨论一个方向即可。以 X 方向为例,假设 $d = d_1 = d_2, \alpha = u$, 则其数学模型可表示如下:

$$\dot{x} = -\gamma\sin(u) + d \quad (6)$$

根据 PPF 理论,定义系统误差为 $e = x - x_d, \mu = \frac{e}{\sigma}$, 转换误差为:

$$\epsilon = S^{-1}(\mu) = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\mu}{1-\mu} \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon} = r_e \left(\dot{\epsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} e \right), r_e = \frac{1}{1-\mu^2} \frac{1}{\sigma} \quad (8)$$

进一步可以得到 $\ddot{\epsilon}$:

$$\ddot{\epsilon} = \dot{r}_e \left(\dot{\epsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} e \right) + r_e \left(\ddot{\epsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \dot{\epsilon} - \frac{\ddot{\sigma}}{\sigma^2} e + \frac{\dot{\sigma}^2}{\sigma^3} e \right) \quad (9)$$

定义观测误差为 $\tilde{d} = d - \hat{d}$, 设计 NDO 为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{d}} = L_o r_e (d - \hat{d}) = L_o r_e (\ddot{x} + \gamma\sin(u)) - L_o r_e \hat{d} \end{cases} \quad (10)$$

其中, L_o 为观测器增益; \hat{d} 为扰动估计值。定义辅助变量:

$$z = \hat{d} - L_o \dot{\epsilon} \quad (11)$$

则沿时间方向对 z 求导,代入式(9)一式(10)有:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= L_o r_e (\ddot{x} + \gamma\sin(u)) - L_o r_e \hat{d} - L_o \dot{r}_e \left(\dot{\epsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} e \right) - \\ &\quad L_o r_e \left(\ddot{\epsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \dot{\epsilon} - \frac{\ddot{\sigma}}{\sigma^2} e + \frac{\dot{\sigma}^2}{\sigma^3} e + \dot{\epsilon} \right) + L_o r_e \dot{\epsilon} \\ &= -L_o r_e z - L_o \dot{r}_e \left(\dot{\epsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} e \right) - L_o r_e \left(-\ddot{x}_d - \gamma\sin u - \right. \\ &\quad \left. \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \dot{\epsilon} - \frac{\ddot{\sigma}}{\sigma^2} e + \frac{\dot{\sigma}^2}{\sigma^3} e + \dot{\epsilon} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

所以可得观测器估计值为:

$$\hat{d} = z + L_o \dot{\epsilon} \quad (13)$$

假如 \hat{d} 有界, $|\dot{\hat{d}}| \leq \lambda$; 对 \tilde{d} 求导 $\dot{\tilde{d}} = \dot{d} - L_o r_e \tilde{d}$, 求解微分方程得:

$$\tilde{d} = \tilde{d}(0)e^{-L_o r_e t} + e^{-L_o t} \int \dot{d} e^{L_o r_e t} dt \quad (14)$$

当 $\dot{d} > 0, \dot{d} \leq \lambda$ 时,有:

$$\tilde{d} \leq \tilde{d}(0)e^{-L_o r_e t} + e^{-L_o t} \int \dot{d} e^{-L_o r_e t} dt$$

$$\leq \tilde{d}(0)e^{-L_0 r_e t} + \frac{\lambda}{L_0} \quad (15)$$

因此观测误差收敛上限为:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{d} \leq \frac{\lambda}{L_0 r_e} \quad (16)$$

当 $\dot{d} < 0, \dot{d} \geq -\lambda$ 时,“ : ”:

$$\tilde{d} \geq \tilde{d}(0)e^{-L_0 r_e t} + e^{-L_0 t} \int_0^t d e^{-L_0 r_e t} dt \geq \tilde{d}(0)e^{-L_0 r_e t} - \frac{\lambda}{L_0 r_e} \quad (17)$$

因此观测误差收敛下限为:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{d} \geq -\frac{\lambda}{L_0 r_e} \quad (18)$$

NDO 的误差指数收敛到一个有限半径的闭球内: $\tilde{d}(\infty) \in$

$B, r(B) \leq \max\left(\frac{\lambda}{L_0 r_e}\right)$ 。其中, $r(B)$ 为闭球半径,通过设计恰当的 $L_0 r_e$, 让 $r(B)$ 总是能够足够小。

3 控制器设计

控制器的设计旨在使球滚动到所需位置或沿某些指定轨迹移动。然而,除了动力学的非线性之外,未知扰动、摩擦力和轴之间的耦合运动提高了控制难度。因此,本研究的目标是开发一种含干扰补偿的动态滑模控制策略来控制球的运动,防止上述不利影响导致其性能下降。

该方案将非线性、耦合作用、外部扰动和系统不确定性作为一个集合部分,或专门称为集总扰动,通过 NDO 提取后即消除。

定义 $x_1 = x - x_d, x_2 = \dot{x} - \dot{x}_d$ 。其中, x_d 是 X 轴方向的期望位置。参考文献[15]的思想并根据式(2),状态空间模型可以描述如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{x} - \ddot{x}_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, $\ddot{x} - \ddot{x}_d = -\gamma \sin(u) + \hat{d} - \ddot{x}_d$, 定义滑模面 s 并求导:

$$s = k_1 x_1 + x_2 + k_2 \tanh\left(\frac{x_1}{\kappa}\right) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= k_1 x_2 + \dot{x}_2 + \frac{k_2}{\gamma} \left[1 - \tanh^2\left(\frac{x_1}{\kappa}\right)\right] \dot{x}_1 \\ &= k_1 x_2 - \gamma \sin(u) + \hat{d} - \ddot{x}_d + \frac{k_2}{\gamma} \left[1 - \tanh^2\left(\frac{x_1}{\kappa}\right)\right] x_2 \end{aligned} \quad (21)$$

其中, k_1, k_2 和 κ 是正常数, $0 < \kappa < 1$ 。为了满足滑模条件,控制输入由下式给出:

$$\begin{cases} u = \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{\gamma} (k_1 x_2 + \hat{d} - \ddot{x}_d + u_{es} + \right. \\ \left. \frac{k_2}{\gamma} \left[1 - \tanh^2\left(\frac{x_1}{\kappa}\right)\right] x_2 \right\} \\ u_{es} = \{k_3 + N(\lambda_1, \bar{e}, \sigma)\} s + (\hat{k} + \gamma_0) \tanh\left(\frac{s}{\kappa}\right) \end{cases} \quad (22)$$

式中, $k_3, \gamma_0 \in \mathbb{R}^+, \hat{k}$ 是 k 的估计, γ_0 为很小的常数。为了利用 e 增强控制和估计性能,定义非线性信息增益 $N: N(a, \bar{e}, c) = \sqrt{a\bar{e}^2 + c^2}, a > 0$ 是权重参数, $c > 0$ 是下界参数, \bar{e} 是有界跟踪误差,满足 $|\bar{e}| \leq E_{\max}, E_{\max}$ 是设定的误差上界;当 $|\bar{e}| < E_{\max}$ 时, $\bar{e} = e$; 当 $E_{\max} \leq |\bar{e}|$ 时, $\bar{e} = E_{\max}$ 。通过将模型扰动、未知不确定性、摩擦和不同轴之间的耦合结合在一起,设计了 SMC 控制器来实时观察其影响并进行

补偿。然后,设计自适应律为:

$$\dot{\hat{k}} = \Gamma \left(-\frac{\nu \hat{k}}{N(\lambda_2, \bar{e}, \sigma)} + \{1 + N(\lambda_3, \bar{e}, \sigma)\} |s| \right) \quad (23)$$

定义 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2\Gamma} \tilde{k}^2, \tilde{k} = k - \hat{k}$, 则:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\{k_3 + N_1\} s^2 - \tilde{k} \hat{k} / \Gamma - (\hat{k} + \gamma_0) s \tanh\left(\frac{s}{\kappa}\right) \\ &\leq -\{k_3 + N_1\} s^2 - \gamma_0 |s| + |\tilde{k} s| + 0.2785\kappa |\hat{k} + \gamma_0| - \\ &\quad \tilde{k} \hat{k} / \Gamma \\ &\leq -\{k_3 + N_1\} s^2 + N_3 \|s\| |\tilde{k}| + \\ &\quad 0.2785\kappa |\hat{k} + \gamma_0| + \frac{\nu \hat{k}}{N_2} \tilde{k} \end{aligned} \quad (24)$$

由于 $N_i \leq \sqrt{\lambda_i E_{\max}^2 + c^2} = \bar{N}_i, i = 1, 2, 3$, 根据不等式

$$|a| |b| \leq \frac{1}{2\gamma} a^2 + \frac{\gamma}{2} b^2, \text{有:}$$

$$N_3 |s| |\tilde{k}| \leq \frac{\bar{N}_3^2}{\gamma_1} s^2 + \frac{\gamma_1}{4} \tilde{k}^2 \quad (25)$$

$$\frac{\nu \hat{k}}{N_2} \tilde{k} \leq -\frac{\nu}{2 N_2} \tilde{k}^2 + \frac{\nu}{2 N_2} k^2 \quad (26)$$

因此,式(23)可重写为:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\left\{k_3 + N_1 - \frac{\bar{N}_3^2}{\gamma_1}\right\} s^2 - \left(\frac{\nu}{2 N_2} - \frac{\gamma_1}{4}\right) \tilde{k}^2 + \\ &\quad 0.2785\kappa |\hat{k} + \gamma_0| + \frac{\nu}{2 N_2} k^2 \\ &= -\mathfrak{S} V + \Lambda \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $\mathfrak{S} = \min\left\{2k_3 + 2N_1 - 2\frac{\bar{N}_3^2}{\gamma_1}, \frac{\nu\Gamma}{N_2} - \frac{\Gamma\gamma_1}{2}\right\}, \Lambda =$

$$0.2785\kappa |\hat{k} + \gamma_0| + \frac{\nu}{2 N_2} k^2.$$

对式(25)在 $[0, t]$ 积分,得到解为:

$$0 \leq V(t) \leq \Lambda / \mathfrak{S} + (V(0) - \Lambda / \mathfrak{S}) \exp(-\mathfrak{S} t) \leq V(0) + \Lambda / \mathfrak{S} \quad (28)$$

由不等式(28)可以得出 $V(t)$ 是一致最终有界的,则 s 和 \tilde{k} 均为有界的。因此控制器满足稳定性要求。

由于信号 Λ / \mathfrak{S} 的边界在分母上包括 N_i , 因此,当跟踪误差由于外部扰动而增大时, Λ / \mathfrak{S} 减小。也就是说,非线性信息增益可以抑制外部扰动的影响。文献[15]设计的控制器为 $u = \frac{7}{5g} \left(k_1 x_2 + k_2 x_3 + \frac{ks}{|s| + \delta}\right)$, 并未考虑非线性、集总扰动的影 响,这往往会导致控制精度和稳定性下降。

4 仿真分析

为了证明设计的控制器在抑制干扰和保证规定性能方面的有效性,将所提策略与文献[15]进行对比。在实施所提控制方案时,首先需要设置各个参数值和初始值。板球的参数 $\gamma = 5/7$; PPF 选择为 $\sigma = (0.1 - 0.001) \exp(-2t) + 0.001$, $L_0 = 5, k_1 = 20, k_2 = 0.8, k_3 = 10, \nu = 0.1, \lambda_i = 2, c = 0.0001$ 。因为球盘是一个对称的系统,为了方便起见,设扰动为 $d_1 = d_2 = 0.1 \sin t \cos t + 0.02 \sin(t) \exp(-0.01t)$ 。文献[15]的参数为 $k = 20, k_1 = 200, k_2 = 1.4, \delta = 1.53$ 。

同时,选择未改进的 NDO^[16] 植入本文设计控制器式(22)参与比较,记为(NDO+SMC):

$$\begin{cases} \dot{z} = -L_0 z - L_0 (-\gamma \sin u + L_0 \dot{x}) \\ \hat{d} = z + L_0 \dot{x} \end{cases} \quad (29)$$

为了进一步说明所提策略在响应速度和抗干扰能力方面的优越性能,在相同参考输入条件下比较控制方案的跟踪性能:

$$\begin{cases} x_d = 1 - \frac{(t-15)^2}{(1+(t-15)^2)^2} \\ y_d = \frac{1}{0.2+1000e^{-1.6t}} - \frac{1}{1000.2} \end{cases} \quad (30)$$

首先,为了验证改进 NDO 的合理性,进行了扰动估计实验,如图 2 和图 3 所示。其仿真能够较为合理地估计扰动,相比传统 NDO,改进 NDO 在瞬态性能和稳态性能方面比传统 NDO 好,只要选择的控制增益能够满足所提出方法的稳定性条件,通过应用预设性能函数和变换误差,设计 NDO 能够保证跟踪误差的瞬态特性,从而克服系统集总不确定性。

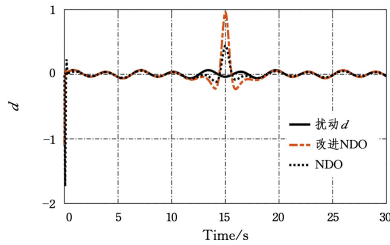


图 2 扰动估计

Fig. 2 Perturbation estimation

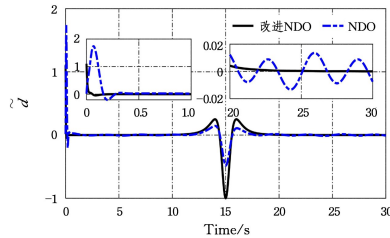


图 3 扰动估计误差

Fig. 3 Perturbation estimation error

位置跟踪如图 4 和图 5 所示,跟踪误差如图 6 所示,控制器输出如图 8 所示。可以看出,文献[15]存在抗干扰能力弱、响应慢的问题,其误差超出了 PPF 的边界。相比之下,在抗干扰和响应速度指标上本文方法更优,进一步可以看出所提策略具有更好的收敛性和鲁棒性。虽然传统 NDO 能够在有限时间内收敛且能保证误差在预期范围内,但也出现了较大的超调,稳态误差也较大。控制信号输出幅值虽然相差不大,但文献[15]涉及的 3 个参数加剧了调节难度,并且滑模切换增益的大小直接影响了控制精度和稳定性。尽管文献[15]的方法能保证跟踪误差的快速收敛,但控制增益选择是经过多次尝试,导致增益选择方法效率低下且繁琐。本文从这方面着手设计自适应增益 k ,其变化规律如图 7 所示,这样大大省去了繁琐的过程。可以证明,当由估计性能差、外部扰动和快速瞬态响应不会导致跟踪误差不增大时,非线性信息增益不会影响控制性能。控制增益的增加会影响控制输入。但由于同时抑制了跟踪误差,如图 7 所示,非线性增益的增加对控制输入的影响并不明显。

由于集总扰动的存在,图 8 中控制器在零点处的输出是非光滑的,对比文献[15],本文策略振荡小,达到了要求水平,对不确定性扰动具有较强的鲁棒性,利于实际系统的实现。

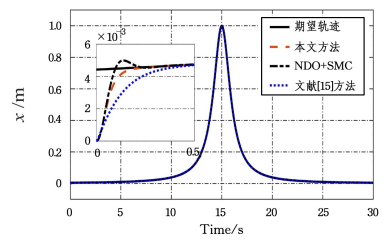


图 4 x 轴位置跟踪对比

Fig. 4 x-axis position tracking comparison

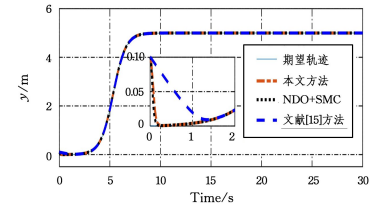


图 5 y 轴位置跟踪对比

Fig. 5 y-axis position tracking comparison

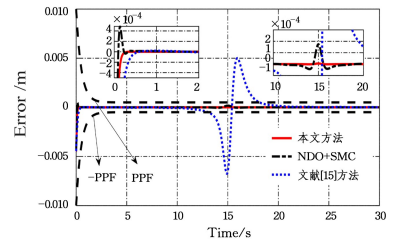


图 6 位置跟踪误差

Fig. 6 Position tracking error

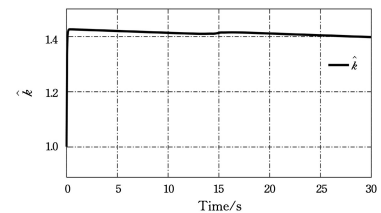
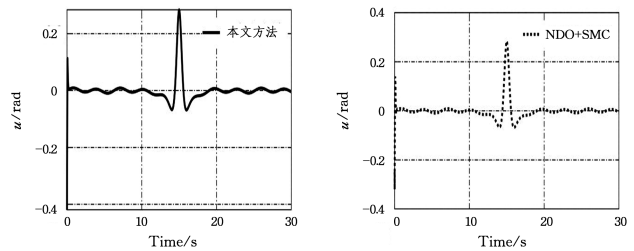


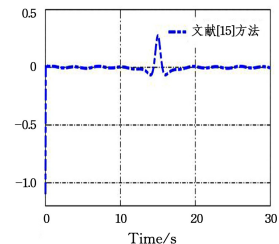
图 7 自适应增益

Fig. 7 Adaptive gain



(a) 本文方法

(b) NDO+SMC



(c) 文献[15]

图 8 控制器输出

Fig. 8 Controller output

结束语 本研究巧妙地解决了为受外部干扰的板球系统设计复杂控制方案的难题。通过预设性能函数和误差转换,改进 NDO 并能有效估计扰动,该 NDO 能够保证输出跟踪误差在规定时间内收敛,实现对扰动的估计与补偿,并设计了基于非线性信息自适应增益的滑模控制方案。与现有的 SMC 和 NDO 的控制设计相比,所提出的方案不仅具有更好的衰减不确定性扰动的能力和削弱抖振的能力,而且能够保证输出跟踪误差在规定时间内收敛,具有更高的响应速度和精度。最后,通过仿真实验验证了所提方法的有效性和抗干扰性。

本文的不足之处在于 PPF 无法在有限时间内实现收敛,跟踪误差受到性能函数式(3)中以指数衰减为界的预定义包络的限制,跟踪误差只能以指数速率收敛。尽管动态过程在理论上是趋向于渐近收敛的,但观测器的性能依旧受到了限制。今后可以围绕能够在有限时间内收敛的 PPF 进行进一步优化改进。

参 考 文 献

- [1] HUANG W, ZHAO Y, YE Y, et al. State feedback control for stabilization of the ball and plate system[C]// 2019 Chinese Control Conference(CCC). IEEE, 2019:687-690.
- [2] OKAFOR E, UDEKWE D, IBRAHIM Y, et al. Heuristic and deep reinforcement learning-based PID control of trajectory tracking in a ball-and-plate system[J]. Journal of Information and Telecommunication, 2021, 5(2):179-196.
- [3] ZHANG Y, LI Y, LIU Y, et al. Control of cricket system using LQR controller optimized by particle swarm optimization[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1670(1):012016.
- [4] ZHANG Z, LI S, LUO S. Terminal guidance laws of missile based on ISMC and NDOB with impact angle constraint[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 31(1):30-41.
- [5] LI J F, XIANG F H. RBF Network Adaptive Sliding Mode Control of Ball and Plate System Based on Reaching Law[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 9(24):1-12.
- [6] SULEIMAN H U, MU'AZU M B, ZARMA T A, et al. Methods of chattering reduction in sliding mode control: a case study of ball and plate system[C]// 2018 IEEE 7th International Conference on Adaptive Science & Technology(ICAST). IEEE, 2018:1-8.
- [7] PAN R C, LI Z G. Adaptive sliding mode control of coordinated arm based on exponentially convergent observer[J]. Journal of ARMS and Equipment Engineering, 2021, 42(4):53-57, 67.
- [8] LIU H B, LIU S L. Fuzzy sliding mode control of rotary table with disturbance compensation[J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2018, 22(8):113-118.
- [9] WANG S W, LI S Q, MOURNING W, et al. Reduced-order dilation state observer and jitter-free sliding-mode control of Buck converter(in English)[J]. Control Theory and Applications, 2021, 38(6):766-774.
- [10] NA J, HUANG Y, WU X, et al. Active adaptive estimation and control for vehicle suspensions with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 26(6):2063-2077.
- [11] ZHU B, SUN R S, CHEN J Q, et al. Sliding mode control algorithms for nonaffine systems with nonmatched disturbances and unknown dynamics[J]. Control Theory and Applications, 2021, 38(6):862-870.
- [12] YOU S, GIL J, KIM W. Adaptive neural network control using nonlinear information gain for permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 3(53):1392-1404.
- [13] CAI T, DONG Z, LIU X. On disturbance rejection control for nonlinear three-revolute prismatic spherical ball and plate systems[J]. Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems, 2021, 3(2):e62.
- [14] WANG S B, REN X M, LI S Q, et al. Parameter estimation and adaptive control of rotary table servo system based on preset performance[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(2):193-197.
- [15] BANG H, LEE Y S. Implementation of a ball and plate control system using sliding mode control[J]. IEEE Access, 2018, 6:32401-32408.
- [16] KHAMAR M, EDRISSI M. Designing a backstepping sliding mode controller for an assistant human knee exoskeleton based on nonlinear disturbance observer[J]. Mechatronics, 2018, 54:121-132.



YANG Liwei, born in 1997, master. His main research interest is intelligent optimal control.



XIA Guofeng, born in 1996, master, researcher. His main research interests include complex networks and neural networks.