

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202102008



球杆系统的阻尼自适应抗扰控制

周长新, 聂卓赞, 程前, 何旺祥, 朱恩泽

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了提高球杆系统的稳定性和抗扰性能,设计一种阻尼自适应抗扰控制策略.首先,分析球杆系统的非线性动力学过程,并在平衡点附近建立用于控制策略设计的线性模型.然后,在线性自抗扰控制(LADRC)基础上,提出一种阻尼自适应抗扰控制策略,可以克服不稳定对象的闭环振荡,提升抗扰性能.最后,通过仿真和实验,对阻尼自适应抗扰控制与 LADRC 的控制效果进行比较.结果表明:相较于 LADRC,文中方法的震荡超调、调节时间和抗扰性能等指标更加优异,文中方法具有优越性和有效性.

关键词: 自适应抗扰控制; 球杆系统; 阻尼; 控制效果

中图分类号: TP 273.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)04-0511-07

Damping Adaptive Active Disturbance Rejection Control for Ball-Beam System

ZHOU Changxin, NIE Zhuoyun, CHENG Qian,
HE Wangxiang, ZHU Enze

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to improve the stability and disturbance rejection performance of the ball-beam system, a damping adaptive active disturbance rejection control strategy was designed. Firstly, the nonlinear dynamic process of the ball-beam system was analyzed, and the linear model for control strategy design was established near the equilibrium point. Then, based on linear active disturbance rejection control (LADRC), a damping adaptive disturbance rejection control strategy was proposed, which could overcome the closed-loop oscillation of unstable object, and improved the disturbance rejection performance. Finally, the control effects of damping adaptive active disturbance rejection control and LADRC were compared through simulation and experiment. The results showed that compared with LADRC, the oscillation overshoot, adjustment time and disturbance rejection performance of the proposed method were better, superiority and effective.

Keywords: adaptive active disturbance rejection control; ball-beam system; damping; control effects

球杆系统是研究经典控制理论和现代控制理论常见的非线性系统平台.目前,学者已对球杆系统进行了较多研究.文献[1]采用基于线性二次型调节器(LQR)与扩张状态观测器(ESO)的控制算法对球杆系统进行研究.文献[2-3]采用比例-积分-微分(PID)和自适应遗传算法相结合的自适应遗传 PID 方法,设计了球杆系统控制器.自抗扰控制(ADRC)是一种采用扩张状态观测器、微分跟踪器和带宽参数整定等技术抑制系统扰动的方法.文献[4-5]提出原始的非线性自抗扰控制,并完成了线性化.自抗扰控

收稿日期: 2021-02-02

通信作者: 聂卓赞(1983-),男,副教授,博士,主要从事鲁棒控制及非线性系统的研究. E-mail: yezhuoyun2004@sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61403149);福建省自然科学基金资助项目(2019J01053)

制器继承了PID控制器的优点,针对工业场景中的应用,提出带宽参数整定方法,将自抗扰控制器的设计从非线性函数参数的经验性选择简化为带宽选择.

自适应控制能够自适应系统的不确定性和外部干扰,从而具有良好的抗扰性能^[6].文献[7]提出一种自适应控制器,以实现对外部干扰的渐近抑制.文献[8]提出一种鲁棒自适应算法,以实现不确定非线性系统的自适应跟踪.自适应控制提供了一种提高抗扰性能的新方式,而自抗扰控制器的扰动估计和自适应调节是相容的,自抗扰控制器的扰动估计是一种内环控制器,而模型参考自适应控制(MRAC)又可体现一种外环自适应效果.通过ESO对状态反馈的球杆系统状态进行观察,并估计“总扰动”进行补偿,利用参考模型与自抗扰控制系统之间的状态跟踪误差生成自适应律,通过添加阻尼抑制系统的震荡超调,减少对系统稳定性的影响,从而提升系统的抗扰性能.由于自适应律可作用于跟踪误差,当跟踪误差较小时,自适应抗扰控制系统会自动减小为线性自抗扰控制(LADRC)系统.因此,阻尼自适应抗扰控制可看作自抗扰控制的附加自适应.基于此,本文在自抗扰控制^[9-13]的基础上,提出一种阻尼自适应抗扰控制.

1 球杆系统的建模与分析

球杆系统主要由底座、支撑杆、带轮、电机、杠杆臂、小球和导轨等组成^[14].球杆系统装置示意图,如图1所示.图1中: d 为杠杆臂和带轮的连接处与带轮轮心的距离; θ 为带轮转动角度, θ 限制于一定范围内; α 为导轨偏转角度; L 为杠杆臂连接点与导轨转动固定点的距离; Y 为小球在导轨上的位移.

带增量式码盘的直流伺服电机可以测量电机的转动位置,导轨上的电阻传感器可以实时测量小球的位置.为使小球在导轨上稳定地运行,电机转动带动带轮转动(角度为 θ),带轮又带动支撑杆运动,使导轨发生偏转(角度为 α),从而使小球在导轨上滚动.

球杆系统装置参数,如表1所示.表1中: g 为重力加速度; J 为小球的转动惯量; m 为小球的质量; R 为小球的半径.

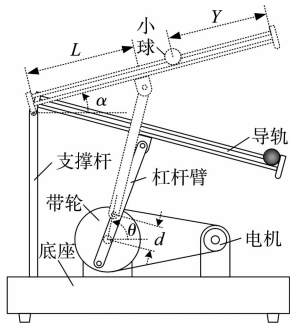


图1 球杆系统装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of ball-beam system device

表1 球杆系统装置参数
Tab.1 Parameters of ball-beam system device

参数	取值	参数	取值	参数	取值
$g/\text{m}\cdot\text{s}^2$	9.8	m/kg	0.11	R/m	0.015
$J/\times 10^{-6}\text{kg}\cdot\text{m}^2$	9.9	Y	—	d/m	0.045
L/m	0.17				

在忽略一些部件的情况下,可通过经典力学理论建立球杆系统的动力学方程,近似得到导轨偏转角度 α 与带轮转动角度 θ 之间的关系,即

$$\alpha=\frac{d}{L}\theta.$$

(1)

通过控制带轮转动角度 θ ,实现对小球的精确控制.球杆系统控制器的原理是通过控制直流伺服电机,调整带轮转动角度 θ ,从而对小球进行精确控制.

对球杆系统进行动力学分析,可得小球运动与自身重力加速度、半径、质量、转动惯量、导轨偏转角度及位移之间的关系,即

$$mg\sin\alpha-\left(\frac{J}{R^2}+m\right)\ddot{Y}-m\dot{Y}\dot{\alpha}^2=0.$$

(2)

由于 α 的期望值在0附近,故在0附近对 α 进行线性化,可得

$$\left. \begin{aligned} \sin\alpha&\approx\alpha, \\ \dot{\alpha}&\approx 0. \end{aligned} \right\}$$

(3)

将式(3)代入式(2),可得

$$\ddot{Y}=\frac{mg\alpha}{\frac{J}{R^2}+m}.$$

(4)

再将式(1)代入式(4), 可得

$$\ddot{Y}=\frac{mgd}{L\left(\frac{J}{R^2}+m\right)}\theta=\frac{gd\times 5}{L\times 7}\theta=1.853\theta.$$

(5)

系统实际输出量为小球在导轨上的位移 Y , 输入量为带轮转动角度 θ . 由表 1 数据, 经计算可得球杆系统的传递函数模型, 即

$$G(s)=\frac{Y(s)}{\theta(s)}=\frac{1.853}{s^2}.$$

(6)

式(6)中: s 为复频域变量.

2 控制系统的设计

阻尼自适应抗扰控制结构由参考模型、ESO 和自适应机构等组成, ESO 用于观测系统状态和总扰动^[8]. 与 LADRC 不同, 阻尼自适应抗扰控制的前馈控制器和状态反馈控制器可通过自适应机制进行实时调整. 这种自适应机制是由 ESO 状态 \mathbf{x}_o 和参考状态 \mathbf{x}_r 之间的跟踪误差 \mathbf{e}_r 推导出来的. 阻尼自适应抗扰控制结构, 如图 2 所示. 图 2 中: r 为参考输入; u_0 为自适应机构调整后的控制量; b_0 为输入增益; u 为系统输入(控制量), $u=U_{in}$; y 为系统输出.

2.1 LADRC 的设计

令状态变量为 $x_{p,1}=U_{out}$, $x_{p,2}=\dot{U}_{out}$, 将模型(6)转化为状态空间, 有

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{p,1} &= x_{p,2}, \\ \dot{x}_{p,2} &= (1.853 - b_0)u + \Gamma(x_{p,1}, x_{p,2}) + D + b_0u, \\ y_p &= x_{p,1}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)中: y_p 为测量输出, $y_p=U_{out}$; $\Gamma(x_{p,1}, x_{p,2})$ 为系统的不确定部分; D 为外部扰动.

$f=(1.853-b_0)u+\Gamma(x_{p,1}, x_{p,2})+D$, f 被视为一种依赖于不确定性、控制输入和外部扰动的未知“总扰动”. 为了测量“总扰动”, f 被建模扩展为状态变量 $x_{p,3}$, 可得系统的扩张状态模型, 即

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{p,1} &= x_{p,2}, \\ \dot{x}_{p,2} &= f + b_0u, \\ \dot{x}_{p,3} &= h, \\ y_p &= x_{p,1}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)中: $h=f$.

假设 f 可微分, h 有界. 为了观测球杆系统的状态和“总扰动”, 设计 ESO, 有

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_o &= \mathbf{A}_o\mathbf{x}_o + \mathbf{B}_ob_0u + \mathbf{W}(y_p - y_o), \\ \mathbf{y}_o &= \mathbf{C}_o\mathbf{x}_o. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)中: $\mathbf{A}_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B}_o = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{C}_o = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$; $\mathbf{x}_o = [x_{o,1} \quad x_{o,2} \quad x_{o,3}]^T$; \mathbf{y}_o 为 ESO 的输出; \mathbf{W} 为 ESO

的增益矩阵.

\mathbf{x}_p 为系统状态, 观测误差 $\mathbf{e}_o = \mathbf{x}_p - \mathbf{x}_o = [e_{o,1} \quad e_{o,2} \quad e_{o,3}]^T$, 其动态系统为

$$\dot{\mathbf{e}}_o = (\mathbf{A}_o - \mathbf{W}\mathbf{C}_o)\mathbf{e}_o + \mathbf{B}_eh.$$

(10)

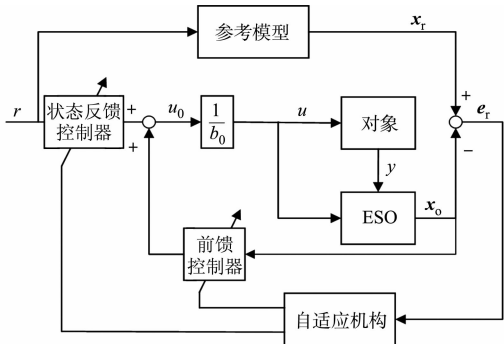


图 2 阻尼自适应抗扰控制结构
Fig. 2 Structure of damping adaptive active disturbance rejection control

式(10)中: $\mathbf{B}_e=[0 \quad 0 \quad 1]^T$.

ESO 的特征多项式设为 $\lambda(s)=(s+\omega_o)^3$, ω_o 为 ESO 的观测带宽. 因此, \mathbf{W} 的带宽调整为 $\mathbf{W}=[w_1 \quad w_2 \quad w_3]^T=[3\omega_o \quad 3\omega_o^2 \quad \omega_o^3]^T$.

期望传递函数模型选择为

$$H(s)=\left(\frac{\omega_c}{s+\omega_c}\right)^2=\frac{F_2^*}{s^2+F_1^*s+F_2^*}.$$

(11)

式(11)中: ω_c 为 $H(s)$ 的带宽; F_1^*, F_2^* 分别为前馈控制器参数 F_1, F_2 的期望参数.

因此, LADRC 控制器的控制量为

$$u=\frac{\omega_c^2(r-x_{o,1})-2\omega_cx_{o,2}-x_{o,3}}{b_0}.$$

(12)

2.2 阻尼自适应抗扰控制的设计

除了 LADRC 中的干扰估计和补偿外, MRAC 可以看作是实现自抗扰能力的另一种方法. 这两种方法具有一些相似性和互补性. 在参考模型方面, 参考模型表示控制方法中设计的控制系统的期望性能, LADRC 通过极点配置实现参考模型, 但是模型跟踪误差不能产生任何反馈校正; 而 MRAC 可以应用于带有跟踪误差反馈的自抗扰控制中. 在状态反馈方面, MRAC 常常需要访问被控对象的状态, 以实现状态反馈, 但由于系统的干扰和不确定性, 其应用具有较大的困难; 而 LADRC 最重要的优点之一是 ESO 可以提供良好的状态估计和干扰补偿. 在干扰抑制方面, 作为两种不确定性和干扰衰减方法, LADRC 的干扰估计和 MRAC 的自适应调整可在基于 ESO 的状态反馈控制方案中实现, 从而极大地提高控制性能.

针对 LADRC, MRAC 系统中的震荡超调问题, 可在系统中添加减小系统震荡超调的阻尼, 阻尼系数 $\zeta>1$, 这样自适应机构的阻尼能力可以部分地抑制系统的震荡超调.

添加阻尼系数 ζ 后的期望传递函数模型为

$$H(s)=\frac{\omega_c^2}{s^2+2\zeta\omega_cs+\omega_c^2}.$$

(13)

因此, 阻尼自适应抗扰控制的期望控制量为

$$u=\frac{K^*r+\mathbf{F}^*\mathbf{x}_o}{b_0}.$$

(14)

式(14)中: \mathbf{F}^*, K^* 分别为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}^* &= -[F_2^* \quad F_1^* \quad F_0^*] = -[\omega_c^2 \quad 2\zeta\omega_c \quad 1], \\ K^* &= F_2^*. \end{aligned} \right\}$$

(15)

式(15)中: F_0^* 为扩张状态 $x_{o,3}$ 的反馈系数, $F_0^*=1$.

基于以上分析, 提出阻尼自适应抗扰控制方案. 由于实际的系统状态 \mathbf{x}_p 是不可测的, 故用 \mathbf{x}_o 替代. $H(s)$ 的阶数为 2, 而图 2 中的观测器阶数为 3, 因此, 为 $H(s)$ 设置一个额外的状态变量, 即 $x_{r,3}=x_{o,3}$, 以表示相同状态空间中的跟踪误差.

参考模型在状态空间中可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_r &= \mathbf{A}_r\mathbf{x}_r + \mathbf{B}_r r + (\mathbf{W} - \mathbf{L}_n)(\mathbf{y}_p - \mathbf{y}_o), \\ \mathbf{y}_r &= \mathbf{C}_r\mathbf{x}_r. \end{aligned} \right\}$$

(16)

式(16)中: $\mathbf{A}_r=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -F_2^* & -F_1^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_r=\begin{bmatrix} 0 \\ F_2^* \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{x}_r=[x_{r,1} \quad x_{r,2} \quad x_{r,3}]^T; \mathbf{C}_r=[1 \quad 0 \quad 0]; \mathbf{y}_r$ 为参考模型的输出; $\mathbf{L}_n=[w_1 \quad w_2 \quad 0]^T$.

$\mathbf{e}_r=\mathbf{x}_r-\mathbf{x}_o=[e_{r,1} \quad e_{r,2} \quad e_{r,3}]^T$, \mathbf{e}_r 为自适应控制器的调节根据, 进而可得到阻尼自适应抗扰控制器的控制量为

$$u=(Kr+\mathbf{F}\mathbf{x}_o)/b_0,$$

(17)

其参数为

$$\left. \begin{aligned} \dot{F} &= \rho \mathbf{B}_o^T \mathbf{P} \mathbf{e}_r \mathbf{x}_o^T + \omega_A \mathbf{F}^* - \omega_A F, \\ \dot{K} &= \rho \mathbf{B}_o^T \mathbf{P} \mathbf{e}_r r + \omega_A K^* - \omega_A K, \\ F(0) &= \mathbf{F}^*, \\ K(0) &= K^*. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式(17),(18)中: K, F 分别为状态反馈控制器和前馈控制器的参数; \mathbf{P} 为设计的正定矩阵, $\mathbf{P}=\mathbf{P}^T$; ω_A 为带宽参数, $\omega_A>0$, 其与能量相关, 决定了自适应调节速度; ρ 为

$$\rho=q \frac{\omega_A}{\left\| \left[\mathbf{x}_o^T \quad r \right]^T \right\|_2^2}.$$

(19)

式(19)中: q 为量化参数, $q>0$.

采用标准 LADRC 设计, 有

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_o + \mathbf{B}_o \mathbf{F}^* &= \mathbf{A}_r, \\ \mathbf{B}_o K^* &= \mathbf{B}_r. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

由此可得

$$\dot{\mathbf{e}}_r = \mathbf{A}_r \mathbf{e}_r + \mathbf{B}_o (\mathbf{F}^* - F) \mathbf{x}_o + \mathbf{B}_o (K^* - K) r - \mathbf{L}_n \mathbf{e}_{o,1}.$$

(21)

式(18)提出的自适应率可认为是一种增强鲁棒性的修正, 如果仅用式(18)中的 $\rho \mathbf{B}_o^T \mathbf{P} \mathbf{e}_r \mathbf{x}_o^T$ 和 $\rho \mathbf{B}_o^T \mathbf{P} \mathbf{e}_r r$ 作为传统的积分自适应率, 由于系统的扰动和不确定性的存在, 常常会导致系统参数漂移. 因此, 在式(18)中添加 $\omega_A \mathbf{F}^* - \omega_A F$ 和 $\omega_A K^* - \omega_A K$ 作为矫正, 将自适应率的纯积分作用转化为漏积分. 这样参数(F, K)将收敛到没有持续信号影响的(\mathbf{F}^*, K^*)的邻域.

3 仿真实验与分析

3.1 仿真分析

为了验证阻尼自适应抗扰控制的效果, 将阻尼自适应抗扰控制与 LADRC 进行比较. 加入阶跃响应和阶跃干扰信号, 以验证阻尼自适应抗扰控制的响应性能和抗扰性能. 当 $q=0$ 时, 阻尼自适应抗扰控制器自动变为 LADRC 控制器. LADRC 和阻尼自适应抗扰控制设置相同的自抗扰控制参数, $b_0=1.853$, $\omega_c=0.75$, $\omega_o=8.25$, $\zeta=1.3$. 阻尼自适应抗扰控制中, $q=0.002$.

系统的输入信号为阶跃信号, 其值为 0.25 m, 设置系统的响应时间为 30 s. 当系统运行至 15 s 时, 加入阶跃扰动, 扰动值为 0.2 m. 球杆系统的仿真响应曲线和控制量曲线, 如图 3 所示. 由图 3 可知: 阻尼自适应抗扰控制比 LADRC 的抗扰性能更佳, 且震荡超调更小.

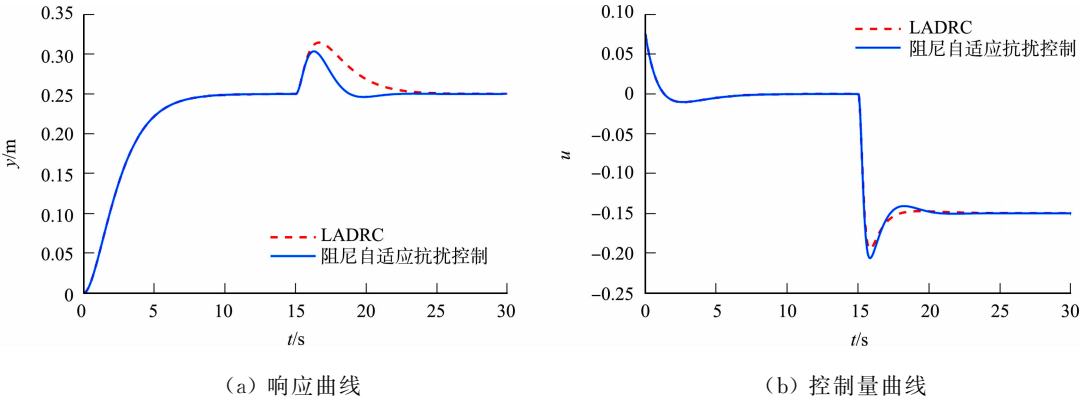


图 3 球杆系统的仿真响应曲线和控制量曲线

Fig. 3 Simulation response curves and control quantity curves of ball-beam system

3.2 实验分析

为了验证阻尼自适应抗扰控制的实验性能, 进行球杆系统控制实验. 球杆系统(广东省深圳市固高科技有限公司), 如图 4 所示. 该阻尼自适应抗扰控制器在 MATLAB/SIMULINK 2015b 平台中实现, 搭建系统的采样率为 100 Hz. 实验验证了球杆系统的快速性和稳定性. 然后, 引入阶跃干扰信号验证阻

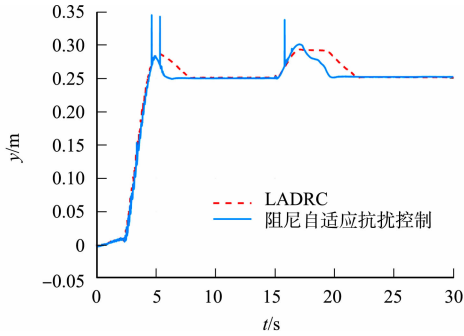
尼自适应抗扰控制的抗扰性能.

球杆系统的实验响应曲线和控制量曲线,如图 5 所示.由图 5 可知:相较于 LADRC,阻尼自适应抗扰控制能在更短的时间内稳定,且震荡超调更小;小球可以很好地跟踪位置设定值($r=0.25\text{ m}$);在与仿真实验相同参数的情况下,验证了系统的稳定性和快速性.

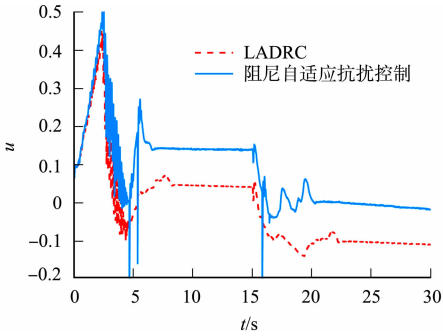
球杆系统控制器参数的自适应曲线,如图 6 所示.图 6 中: $F_1\sim F_3,K$ 均为控制器参数.由图 6 可以知道:当扰动出现时,小球离开设定位置后能够快速回到设置位置,阻尼自适应抗扰控制的球杆系统具有较好的抗



图 4 球杆系统
Fig. 4 Ball-beam system



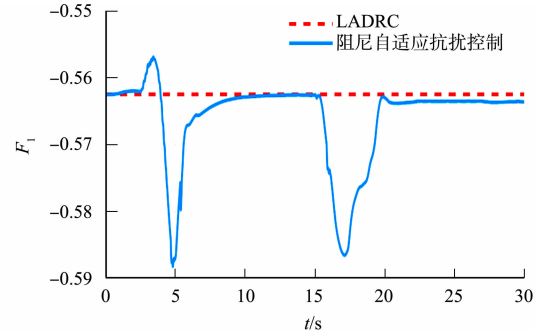
(a) 响应曲线



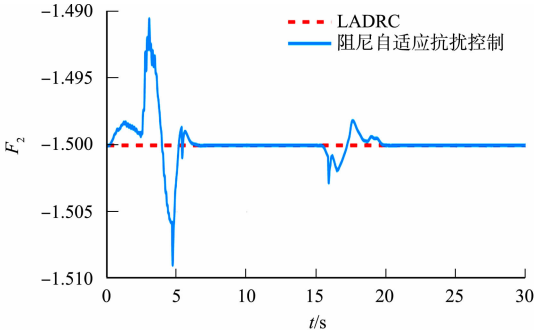
(b) 控制量曲线

图 5 球杆系统的实验响应曲线和控制量曲线

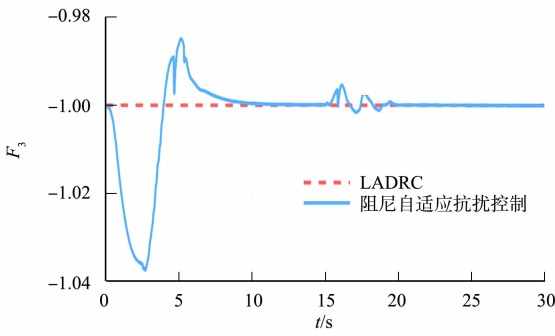
Fig. 5 Experimental response curves and control quantity curves of ball-beam system



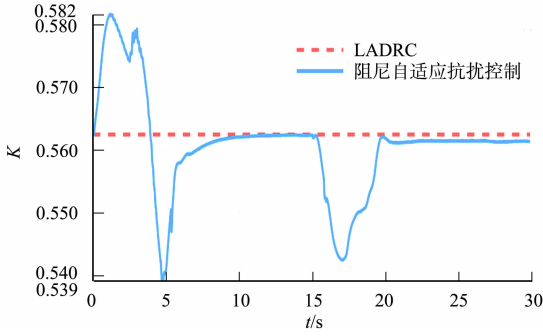
(a) F_1



(b) F_2



(c) F_3



(d) K

图 6 球杆系统控制器参数的自适应曲线

Fig. 6 Adaptive curves of ball-beam system controller parameters

扰性能.

由于 LADRC 的增益是固定的,因此,在不同的运行条件下只能依靠 ESO 保持良好的抗扰性能,当扰动发生时,由于阻尼自适应抗扰控制的参数调整,参数随之发生变化.通过这种方式,小球的位置稍微

向前移动后,能够快速回到设置位置.相较于 LADRC,阻尼自适应抗扰控制的抗扰性能更佳.

4 结束语

球杆系统的阻尼自适应抗扰控制可以减小系统的震荡超调,提升系统的抗扰性能.针对自适应抗扰控制中不稳定非线性系统的震荡问题,通过增加阻尼的方式进行抑制,阻尼自适应抗扰控制可看作自抗扰控制系统的附加阻尼自适应.当状态跟踪误差较小时,阻尼自适应抗扰控制自动减小为 LADRC.增加阻尼可以在 LADRC 的基础上提升系统的稳定性和抗扰性能.仿真和实验结果验证了阻尼自适应抗扰控制的优越性和有效性.

参考文献:

- [1] CHOUDHARY M K, KUMAR G N. ESO based LQR controller for ball and beam system[J]. IFAC-Papers on Line, 2016, 49(1): 607-610. DOI: 10. 1016/j. ifacol. 2016. 03. 122.
- [2] 刘克平, 史鹏飞. 球杆系统自适应遗传 PID 控制[J]. 控制工程, 2009, 16(2): 173-175. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-7848. 2009. 02. 015.
- [3] 周凯汀, 郑力新. 进化算法的 PID 参数最优设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2005, 26(1): 85-88. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-5013. 2005. 01. 022.
- [4] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906. DOI: 10. 1109/TIE. 2008. 2011621.
- [5] GAO Zhiqiang. Scaling and parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver: IEEE Press, 2003: 4989-4996. DOI: 10. 1109/ACC. 2003. 1242516.
- [6] 宋国杰. 采用自适应模糊 PID 的二阶倒立摆控制[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 74-78. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2016. 01. 0074.
- [7] CHEN Zhiyong, HUANG Jie. Attitude tracking and disturbance rejection of rigid spacecraft by adaptive control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(3): 600-605. DOI: 10. 1109/TAC. 2008. 2008350.
- [8] MARINO R, TOMEI P. Adaptive tracking and disturbance rejection for uncertain nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(1): 90-95. DOI: 10. 1109/TAC. 2004. 841132.
- [9] NIE Zhuoyun, ZHANG Bin, WANG Qingguo, *et al.* Adaptive active disturbance rejection control guaranteeing uniformly ultimate boundedness and simplicity[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(17): 7278-7294. DOI: 10. 1002/rnc. 5177.
- [10] CHEN Wenhua, YANG Jun, GUO Lei, *et al.* Disturbance-observer-based control and related methods: An overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1083-1095. DOI: 10. 1109/TIE. 2015. 2478397.
- [11] LI Yi, SUN Mingwei, WANG Zenghui, *et al.* Quantitative analysis of critical limitation in using extended state observer[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2016, 14(3): 876-882. DOI: 10. 1007/s12555-014-0543-0.
- [12] OLIVEIRA T R, PEREIRA R V H, FRIDMAN L. Generalized model reference adaptive control by means of global HOSM differentiators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 64(5): 2053-2060. DOI: 10. 1109/TAC. 2018. 2862466.
- [13] CHRISTOPHER E, SHTESSEL Y B. Adaptive continuous higher order sliding mode control[J]. Automatica, 2016, 65(1): 183-190. DOI: 10. 1016/j. automatica. 2015. 11. 038.
- [14] JO N H, SEO J H. A state observer for nonlinear systems and its application to ball and beam system[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(5): 968-973. DOI: 10. 1109/9. 855562.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)