

控制与决策

Control and Decision

基于ADRC的放卷张力串级控制设计

汪良, 欧阳周, 王恒升, 杨润

引用本文:

汪良, 欧阳周, 王恒升, 等. 基于ADRC的放卷张力串级控制设计[J]. *控制与决策*, 2025, 40(9): 2672–2680.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1450>

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>

[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>

[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>

[基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制](#)

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law
控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

[四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制](#)

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV
控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

基于 ADRC 的放卷张力串级控制设计

汪良¹, 欧阳周¹, 王恒升^{1,2†}, 杨润¹

(1. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083; 2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 以隔膜分切机中的放卷张力控制为研究对象, 针对放卷系统非线性、强耦合以及参数时变等特性导致的张力波动问题, 提出一种基于自抗扰控制 (active disturbance rejection control, ADRC) 的串级控制方案. 首先, 采取串级控制结构, 以高动态性能的速度内环将传动机构的摩擦等非线性扰动对于张力的影响进行有效隔离; 然后, 由于速度内环的控制周期短、频率高, 将 ADRC 的扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 放在内环, 可有效减小扰动补偿的延时, 进一步提高控制带宽和动态性能; 最后, 张力外环引入 ADRC 的安排过渡过程和非线性状态误差反馈 (nonlinear state error feedback, NLSEF) 的措施, 能够有效缓解张力控制中存在的快速性与超调的矛盾, 对隔膜特性和卷径测量噪声等缓变扰动对于张力的影响有很好的补偿效果. 仿真和实验结果表明, 所提出串级控制器具有良好的动态性能和抗干扰能力, 能够更好地适应隔膜分切机不同工况下的张力控制要求.

关键词: 放卷系统; 张力控制; 速度控制; 自抗扰控制; 串级控制; 扩张状态观测器

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1450

引用格式: 汪良, 欧阳周, 王恒升, 等. 基于 ADRC 的放卷张力串级控制设计 [J]. 控制与决策, 2025, 40(9): 2672-2680.

Design of cascade controller for unwinding tension based on ADRC

WANG Liang¹, OUYANG Zhou¹, WANG Heng-sheng^{1,2†}, YANG Run¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Taking the unwinding tension in the diaphragm slitting machine as the research object, a cascade control scheme based on active disturbance rejection control (ADRC) is proposed to address the tension fluctuation problem caused by the nonlinearity, strong coupling, and time-varying parameters of an unwinding system. This cascade control structure can effectively isolate the influence of nonlinear disturbance such as friction of the transmission mechanism on the tension by the inner speed loop with high dynamic performance. The inner speed loop has short control period and high frequency. The extended state observer (ESO) of ADRC is placed in the inner loop, which can effectively reduce the delay of disturbance compensation and further improve the control bandwidth and dynamic performance. The outer tension loop introduces the measures of arranging the transition process of ADRC and nonlinear state error feedback (NLSEF), which effectively alleviates the contradiction between rapidity and overshoot in tension control, and has a good compensation effect on the influence of slow-variable disturbances such as the change of properties of diaphragm and measurement noise of the radius of the unwinding roll on tension. The simulation and experimental results show that the proposed cascade controller has good dynamic performance and anti-interference ability, and can better adapt to the tension control requirements of the diaphragm slitter under different working conditions.

Keywords: unwinding system; tension control; speed control; active disturbance rejection control; cascade control; extended state observer

0 引言

锂电池隔膜分切机是一种对电池隔膜卷材的幅宽进行裁切的装备, 通过多轴卷绕系统将宽幅面的

原料卷材铺展开, 展开的电池隔膜从放卷辊到收卷辊的多轴传输过程中, 在传输方向上被按照要求分布的切刀将幅面裁窄, 最终在收卷辊收出多个窄幅

收稿日期: 2024-12-15; 录用日期: 2025-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51975587); 中南大学与深圳市佳得设备科技有限公司的校企合作项目 (H20190612037037001).

†通信作者. E-mail: whscsu@163.com.

面的卷材,完成分切工艺.锂电池隔膜的分切工艺对于分切过程引起的拉伤、起皱等影响后续锂电池安全性能的指标有严格的要求,理想情况是分切后的隔膜卷端面平整,隔膜面无起皱和拉伤等现象.隔膜张力稳定是保证隔膜分切质量的关键因素之一,张力的变化会随着隔膜的传输而传导,放卷机构是隔膜传输路径的最上游,故放卷张力为整个系统基础张力.为保证隔膜分切质量,保证系统张力稳定,首先需要保证的是放卷张力的稳定.

放卷张力控制从早期的开环控制到传统的PID经典控制经历了长期的发展,目前,许多现代控制方法也广泛应用于卷绕系统的张力控制. Abjadi等^[1]针对张力控制系统设计了一种基于非线性滑模控制的解耦控制器. Pagilla等^[2]提出了全分散状态反馈控制器,并通过实验结果对控制器进行了验证. Koc等^[3]采用了 H_∞ 控制策略和线性参数变化(LPV)策略控制张力和传输速度,采用了围绕工作点的系统动力学线性化,并以特别的方式处理了滚动半径的变化. 刘乐等^[4]为削弱可逆冷带轧机速度张力系统中各变量间的非线性耦合影响,提出了一种基于幂指数趋近律的微分几何动态滑模解耦控制方法. Chen等^[5]考虑了工艺流程复杂可能导致材料弹性模量、放卷半径和转动惯量的变化、复杂操作环境对于控制量的约束等带来的负面影响,采用了鲁棒线性变参数模型预测控制(LPV-MPC)来综合考虑卷绕系统传送速度和卷材张力的因素,以达到提升张力跟踪性能. 米君杰等^[6]在放卷速度和张力组成状态空间方程的基础上,使用反步法(backstepping)设计了控制律,将神经网络对干扰的估计值在控制律中用于干扰补偿,以提升张力控制精度. 庞浩等^[7]提出了一种基于改进鲸鱼算法优化的多核最小二乘支持向量机回归预测模型和基于纵横交叉优化算法优化的模型预测张力协同控制系统. Ding等^[8]提出了一种基于RBF神经网络的PID前馈控制. 其中:前馈部分可以加快系统响应,RBF网络用于PID参数的在线自整定,以提高控制器在不同工况下的稳定性. Wang等^[9]在对薄膜张力和传输速度采用串级控制的基础上,引入了RBF神经网络,将扰动值作为系统输入的预反馈补偿,具有良好的鲁棒性和动态响应性能.

自抗扰控制(ADRC)是上世纪90年代由中国科学家韩京清提出的一种新型控制方法,之后在控制理论和工程应用领域得到了广泛发展,是中国学者对工业控制的突出贡献. ADRC的主要要点体现在两个方面:一是通过安排过渡过程来减小对于控

制系统动态性能的要求,二是通过扩张状态观测器实现对未建模因素的动态补偿来提高动态性能. 由于ADRC的实现不依赖精确的数学模型,工程实现和参数调整方便,在许多领域得到了应用^[10-12]. 在张力系统控制中应用自抗扰控制器也有一些研究. Ding等^[13]提出了将导引头优化算法与自抗扰控制器相结合的张力控制方法; Liu等^[14]提出了一种基于RBF神经网络的自抗扰参数自整定解耦策略,以提高张力系统的控制精度; He等^[15]对印刷系统的多跨张力控制进行了研究,设计了基于ADRC的张力控制系统,具有良好的解耦性能和抗干扰能力; Ai等^[16]采用Simth预测器(SP)优化的ADRC实现了恒张力控制,基于SP-ADRC的张力控制系统具有更高的控制精度、更短的稳定时间和更强的抗干扰能力; Liu等^[17]通过引入RBF神经网络代替自抗扰中的ESO,设计了一种串级自抗扰控制方案,克服了自抗扰控制在解决多输入多输出系统耦合干扰控制问题方面的不足; Yao等^[18]引入了时间尺度的概念,并设计了一种滑模控制与自抗扰控制相结合的串级控制策略,解决了带宽约束的问题,增强了控制系统的鲁棒性.

针对分切机放卷张力系统,本文的主要内容如下: 1) 采取串级控制方式,速度内环可有效隔离传动机构的摩擦等非线性扰动对于张力的影响; 将ADRC中的扩张状态观测器(ESO)放在速度内环,还可有效解决传统自抗扰控制中ESO在工程实践中带宽和延时导致干扰补偿效果不好的问题,并提升系统的响应速度和抗干扰性能. 传动机构的摩擦扰动是放卷张力控制中最大的扰动来源,尤其是在启动过程、加减速过程对于张力波动的影响很大; 所提出控制结构对摩擦扰动的隔离具有很好的效果. 2) 张力外环引入跟踪微分器(TD1)来安排过渡过程,可有效缓解控制中存在的快速性与超调的矛盾; 能够对微分信号进行合理提取,有效抑制干扰信号. 采用非线性状态误差反馈控制(NLSEF1)方法,能够减少对精确模型的依赖,提高控制性能. 3) 其他不确定性和干扰,如隔膜特性和卷径的测量噪声等,可通过外环张力控制器来解决. 通过在隔膜分切机上的实验研究,所提出基于ADRC的串级控制器具有良好的动态性能和抗干扰能力,能够更好地适应隔膜分切机不同工况下的张力控制要求.

1 放卷系统建模

图1为隔膜分切机的结构简图. 其中:分切机由3台电机分别驱动放卷驱动辊1、牵引驱动组辊6~牵引驱动组辊10和主驱动辊16;其他辊为惰辊,包

括张力测量辊5; 17和18为表面收卷辊. 由于牵引辊的S形卷绕, 在一些适当的假设下, 可认为放卷张力区独立于下游部分. 主伺服驱动电机处于速度控制模式, 提供隔膜材料的传输速度(或称为主速度), 牵引驱动电机也处于速度控制模式, 其速度通过与

主驱动辊间的速比来调节确定. 这便是放卷牵引辊处的传输速度, 也是放卷张力区域的隔膜传输基准速度 v_2 ; 放卷电机处于力矩模式, 目标转矩由所设计控制律提供给放卷伺服电机, 对放卷张力进行调节, 这也是本文主要研究的问题.

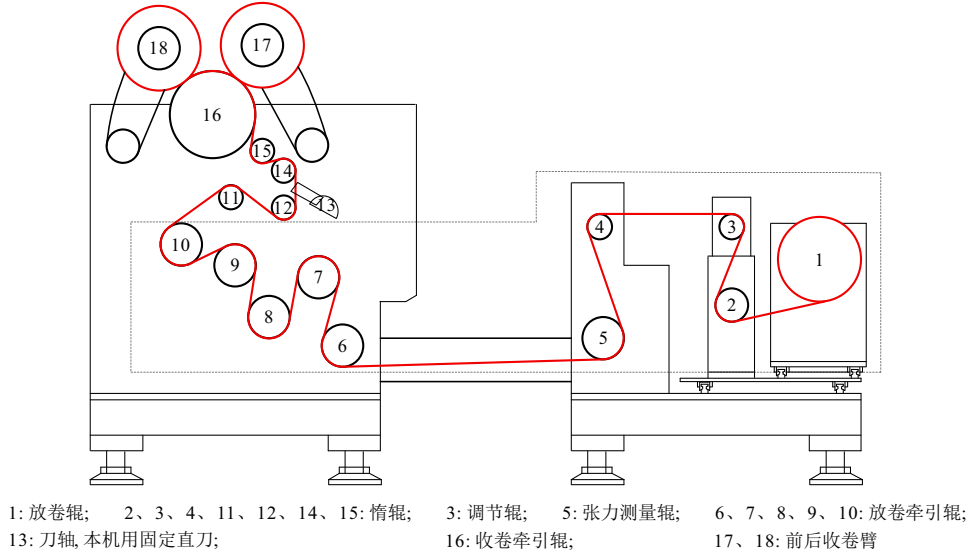


图1 锂电池隔膜分切机结构简图

图2为隔膜分切机放卷张力区域的简化示意图.

为了简化, 做出以下假设: 1) 惰辊的惯性和摩擦相对较小, 在建模时可忽略不计; 2) 隔膜应变是弹性的; 3) 辊筒上的隔膜打滑现象被忽略了. 隔膜跨度中张力动力学^[9]可用下式表示:

$$\dot{T}_1 = -\frac{v_2}{L}T_1 + \frac{(T_0 - EA)}{L}v_1 + \frac{EA}{L}v_2. \quad (1)$$

其中: T_1 为放卷辊与放卷牵引辊间的隔膜张力; T_0 为隔膜卷中隔膜的原始张力; E 为隔膜的弹性模量; A 为隔膜横截面积; L 为隔膜跨度, 即放卷辊与放卷牵引辊间展开隔膜的长度; v_2 为放卷牵引辊形成的隔膜传输基准速度. 当处于平衡状态时, 即 $\dot{T}_1 = 0$, 由式(1), 可得到期望放卷张力为

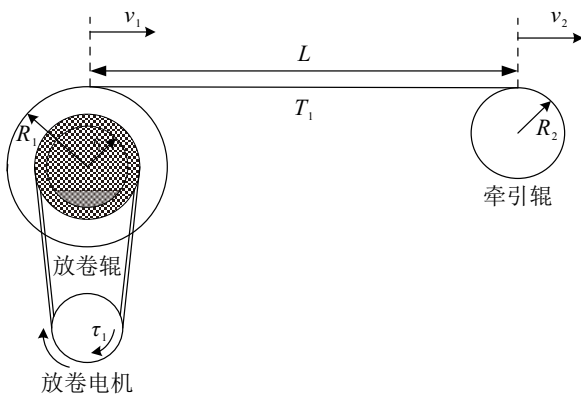


图2 放卷张力区域的简化示意图

$$T_{1r} = EA\left(1 - \frac{v_{1r}}{v_2}\right) + \frac{v_{1r}}{v_2}T_0. \quad (2)$$

由式(2), 可求得如下期望线速度 v_{1r} :

$$v_{1r} = \frac{(T_{1r} - EA)v_2}{T_0 - EA}. \quad (3)$$

这里: T_0 和 E 实际上是不确定项, 无法获得精确的期望线速度 v_{1r} ; 此外, $v_{1r} = \omega_{1r}R_1$, R_1 为放卷辊隔膜卷外径, 变量 R_1 无法获得精确值, 放卷辊期望角速度 ω_{1r} 更加无法精确得到. 因此, 需要通过放卷驱动电机来调节放卷辊期望角速度 ω_{1r} , 进而保障放卷张力区的速比值 v_1/v_2 , 最终实现放卷张力的稳定.

放卷电机处于力矩模式, 调节放卷辊角速度 ω_1 的驱动力矩方程^[9]如下所示:

$$\dot{\omega}_1 = \frac{R_1}{J_1}T_1 + \frac{1}{J_1}i\tau_1 + \frac{M_f}{J_1} - \frac{\rho HR_1^3}{J_1}h\omega_1^2 + \frac{d(t)}{J_1}. \quad (4)$$

其中: J_1 为折算到放卷辊处的转动惯量, τ_1 为放卷电机轴电磁转矩, i 为电机轴与放卷辊间的传动比, ω_1 为放卷辊角速度, M_f 为折算到放卷辊轴处的摩擦力矩, $d(t)$ 为放卷部分未建模扰动.

在任意时刻, 系统的转动惯量主要有机械部分、料卷纸筒以及隔膜卷3部分组成, 即

$$J_1(t) = i^2J_m + J_c + J_w(t). \quad (5)$$

其中: J_m 为机械部分转动惯量, 包括电机轴和辊轴等; J_c 为纸筒的转动惯量; $J_w(t)$ 为隔膜卷转动惯量. 在系统放卷过程中, 放卷半径不断减小, $J_w(t)$ 是时

变的,即

$$J_w(t) = \frac{\pi}{2} \rho H (R_1^4 - r_1^4). \quad (6)$$

这里: r_1 为放卷辊隔膜卷内径, H 为隔膜卷宽度, ρ 为隔膜密度, h 为隔膜厚度.

对 J_1 求导, 可得到

$$\dot{J}_1 = 2\pi\rho H R_1^3 \dot{R}_1. \quad (7)$$

由于厚度很薄, 在不考虑隔膜间隙的情况下, 根据质量守恒定律, 传输过程中可认为在 dt 时间内有

$$\frac{dR_1}{dt} = -\frac{hw_1}{2\pi}. \quad (8)$$

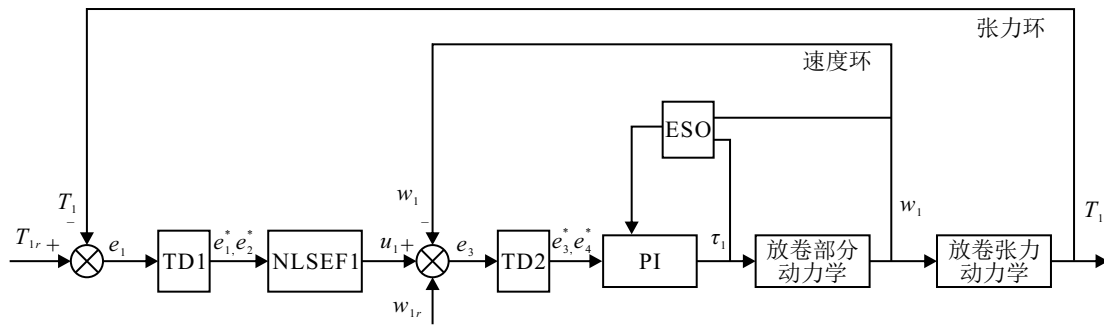


图3 放卷张力控制方案

2.1 外环控制器设计

针对外环控制器的设计, 由式 (1), 可得到如下隔膜张力动力学模型:

$$\dot{T}_1 = -\frac{v_2}{L} T_1 + \frac{(T_0 - EA)R}{L} w_1 + \frac{EA}{L} v_2. \quad (9)$$

令 $u_1 = w_1$, $g_1 = \frac{(T_0 - EA)R}{L}$, $f_1 = \frac{(EA - T_1)}{L} v_2$, 将系统方程描述为

$$\dot{T}_1 = g_1 u_1 + f_1, \quad (10)$$

其中 u_1 为外环控制量.

针对隔膜张力的一阶系统, 引入如下跟踪误差:

$$e_1 = T_{1r} - T_1, \quad (11)$$

其中 T_{1r} 为期望张力.

由于串级控制器对于主回路响应速度没有太高的要求, 为减少控制器对于精确模型的依赖以及提升抗干扰性, 设计了一种带有 TD1 和 NLSEF1 的外环张力控制器. TD1 用于安排过渡过程, 产生放卷张力跟踪误差 e_1 的跟踪信号 e_1^* ; 同时, 给出过渡过程的近似微分信号 e_2^* , 目的在于有效缓解由于初始误差过大而造成的超调现象, 缓解控制系统快速性与超调间的矛盾. 安排张力外环过渡过程^[20] 如下所示:

$$\begin{cases} \dot{e}_1^* = e_2^*, \\ \dot{e}_2^* = \text{fhan}(e_1^* - e_1, e_2^*, r_0, h_0). \end{cases} \quad (12)$$

其中: e_1 为 TD1 的输入量, e_1^* 、 e_2^* 分别为 TD1 输出

综上所述, 放卷系统动力学模型由方程 (1)、(4)、(5)、(6)、(8) 组成.

2 串级控制器设计

针对此放卷系统的非线性、强耦合以及参数时变等特性, 设计了一种增强张力稳定性和鲁棒性的串级控制方法. 放卷张力控制方案如图 3 所示, 采用串级控制结构^[17-19]. 张力外环采用不依赖精确模型的非线性状态误差反馈控制, 速度内环使用基于 ESO 的 PI 控制, 可有效减小扰动补偿的延时, 进一步提高控制带宽和动态性能.

的信号和信号的微分, r_0 为控制参数, h_0 为仿真步长, $\text{fhan}(\cdot)$ 为最速控制综合函数. $\text{fhan}(x_1, x_2, r_0, h_0)$ 函数的具体形式^[21] 为

$$\begin{cases} d = r_0 h_0, d_0 = h_0 d, y = x_1 + h_0 x_2; \\ a_0 = \sqrt{(d^2 + 8r_0 |y|)}; \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sign}(y), & |y| > d_0; \\ x_2 + \frac{y}{h_0}, & |y| \leq d_0; \end{cases} \\ \text{fhan}(x_1, x_2, r_0, h_0) = - \begin{cases} r_0 \text{sign}(a), & |a| > d; \\ r_0 \frac{a}{d}, & |a| \leq d. \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

接下来, 设计张力外环非线性状态误差反馈控制器. 可设计如下张力环控制律^[20]:

$$u_1 = k_0 u_0 + \text{fhan}(e_1^*, c_0 e_2^*, r_1, h_1). \quad (14)$$

这里: 积分项 $u_0 = \int e_1^* dt$, k_0 和 c_0 为控制参数.

结合放卷辊期望角速度 w_{1r} , 令

$$w_{1r}^* = w_{1r} + u_1. \quad (15)$$

然后, 将 w_{1r}^* 作为内环的期望角速度输入量, 设计内环控制器来计算得到内环的控制律 τ_1 .

由方程 (10) 可知, g_1 和 f 有界, 文献 [21] 中论证了 $\text{fhan}(\cdot)$ 函数作为控制器的使用, 能够抑制一定范围扰动, 并能够实现很好的闭环动态性能.

2.2 内环控制器设计

在工程试验中, 状态观测器带宽和延时等问题会严重影响自抗扰性能, 导致放卷张力控制效果不好, 因此, 将传统的自抗扰控制结构改为串级控制形式, 将 ADRC 的扰动观测器放在内环, 可有效减小扰动补偿的延时, 进一步提高控制带宽和动态性能; 同时, 将未知扰动和摩擦等因素隔离在内环内, 减小其对张力外环的影响。

由式 (4), 可得到干扰条件下的放卷辊动力学模型为

$$\dot{w}_1 = \frac{R_1}{J_1} T_1 + \frac{1}{J_1} i \tau_1 + \frac{M_f}{J_1} - \frac{\rho H R_1^3}{J_1} h w_1^2 + \frac{d(t)}{J_1}. \quad (16)$$

其中: w_1 为放卷辊的实际角速度; $d(t)$ 为放卷部分未建模扰动, 工程中的扰动是有界的, 假设 $|d(t)| \leq k_1$,

$k_1 > 0$; τ_1 为内环控制律. 令 $g_2 = \frac{i}{J_1}$, $f_2 = \frac{R_1}{J_1} T_1 + \frac{M_f}{J_1} - \frac{\rho H R_1^3}{J_1} h w_1^2 + \frac{d(t)}{J_1}$, 将系统状态方程描述为

$$\dot{w}_1 = g_2 \tau_1 + f_2. \quad (17)$$

为实现内环控制目标, 控制器的设计如下. 首先, 定义放卷辊角速度跟踪误差, 即

$$e_3 = w_{1r}^* - w_1. \quad (18)$$

1) 安排速度内环过渡过程^[20], 如下所示:

$$\begin{cases} \dot{e}_3^* = e_4^*, \\ \dot{e}_4^* = f \text{han}(e_3^* - e_3, e_4^*, r_2, h_2). \end{cases} \quad (19)$$

其中: e_3 为 TD2 的输入量, e_3^* 、 e_4^* 分别为 TD2 输出的信号和信号的微分, r_2 为控制参数, h_2 为仿真步长. TD2 对内环速度输入信号, 安排过渡过程和实现滤波. 根据离散跟踪微分器对信号的跟踪特性^[21], 可实现

$$e_3^* \rightarrow e_3, \quad e_4^* \rightarrow \dot{e}_3. \quad (20)$$

2) 内环基于 ESO 补偿的 PI 控制器设计.

针对传动机构非线性摩擦等未建模扰动, 设计扩张状态观测器估计扰动值, 对控制器进行扰动补偿, 提高控制器的控制精度.

设计扩张状态观测器^[19,22] 为

$$\begin{cases} \dot{\hat{w}}_1 = g_2 \tau_1 + \hat{f}_2 + \frac{\alpha_1}{\varepsilon} (w_1 - \hat{w}_1), \\ \dot{\hat{f}}_2 = \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2} (w_1 - \hat{w}_1). \end{cases} \quad (21)$$

其中: $\varepsilon > 0$, α_1 和 α_2 为正实数. $[\hat{w}_1 \quad \hat{f}_2]^T$ 表示观测器的状态向量; 通过适当选择 α_1 、 α_2 , 多项式 $\lambda^2 + \alpha_1 \lambda + \alpha_2$ 满足 Hurwitz 条件. 采用该扩张观测器, 可实现当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\hat{w}_1 \rightarrow w_1$, $\hat{f}_2 \rightarrow f_2$, 实现了对放卷辊角速度和扰动的观测. 因此, 速度内环基于观测器补偿的 PI 控制器可设计为

$$\tau_1 = \frac{1}{g_2} \left(k_2 k_3 \int e_3^* dt + (k_2 + k_3) e_3^* - \hat{f}_2 \right). \quad (22)$$

这里: k_2 和 k_3 为内环控制参数, 且 $k_2 > 0$, $k_3 > 0$.

以上即为串级控制器的设计过程, 扩张状态观测器的稳定性证明可参见文献 [19] 和文献 [22]. 将 τ_1 经过比例换算作为电机的控制量, 以完成整个放卷张力的控制.

3 仿真与实验

3.1 仿真分析

为验证所设计基于 ADRC 的串级控制器对放卷张力的控制性能, 本文分别对所设计串级控制器与基于前馈补偿的 PID 控制器进行了对比仿真和实验^[23-25]. 系统参数如表 1 所示, 其中摩擦系数和机械部分转动惯量通过实验辨识得到.

表1 系统参数

名称	符号	单位	数值
隔膜弹性量	E	N/m ²	0.94×10^9
隔膜宽度	H	m	0.425
隔膜跨度	L	m	1.6
隔膜厚度	h	m	0.000012
隔膜横截面积	A	m ²	5.1×10^{-6}
纸筒外径	r	m	0.0465
隔膜密度	ρ	kg/m ³	541.4549
放卷卷径	R	m	0.08
机械部分转动惯量	J_m	kg · m ²	0.0418
纸筒转动惯量	J_c	kg · m ²	0.000198

为了能够对系统性能进行定量描述, 从实用的角度出发, 定义两个综合性能指标来衡量张力跟踪性能: 跟踪误差绝对值的最大值 I_{APE} , 这一指标表示控制器的极限性能; 跟踪误差平方的平均数 I_{MSE} , 这一指标表示控制器在整个工作周期的平均性能. 这两个指标的数学表达式如下所示:

$$I_{APE} = \max_{i=1,2,\dots,N} |e(i)|,$$

$$I_{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [e(i)]^2.$$

其中: $e(i)$ 为第 i 次采样点的张力误差, N 为采样点的总数.

该仿真测试了控制器面对不同的干扰情况, 基准速度 v_2 从 0 加速至 0.8 m/s 后保持匀速运行, 对隔膜放卷张力的控制效果.

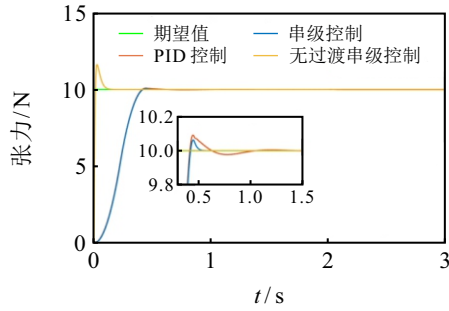
工况 1 参数设定值如下: $v_2 = 0.8$ m/s, $a_2 = 0.4$ m/s², $T_{1r} = 10$ N, $R_1(0) = 0.06$ m.

3.1.1 动态性能仿真

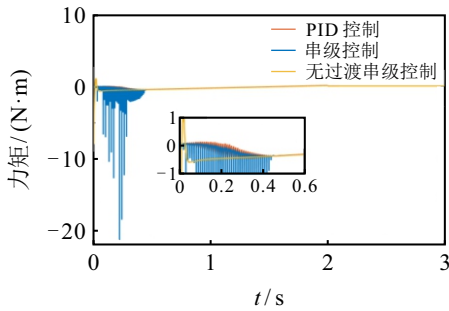
放卷张力系统的响应速度是衡量张力控制性能

的重要指标之一. 假设在工况 1 下, 对放卷张力系统施加 10 N 的阶跃信号, 考察不同控制器对设定值的跟踪能力. 仿真结果如下.

如图 4 所示: 安排过渡过程可有效缓解张力控制中存在的超调问题; 所设计串级控制的方式相较于前馈 PID 控制, 可有效提升放卷张力系统动态响应的速度.



(a) 张力跟踪曲线



(b) 电机输出力矩曲线

图4 设定值跟踪性能对比

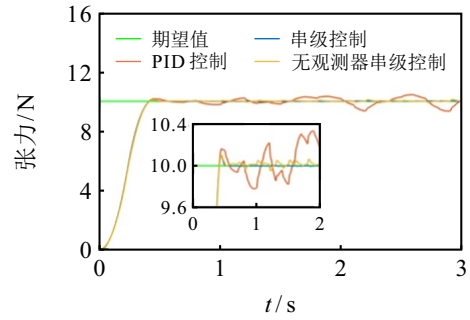
3.1.2 模型参数敏感性仿真

在实际工程中, 放卷端的模型参数往往难以准确测量. 模型参数不准确会影响放卷张力的控制性能, 这要求控制器对于模型参数不太敏感. 假设在条件 1 下, 放卷系统的测量放卷半径与实际放卷半径间存在 ± 0.002 m 误差, 仿真结果如下.

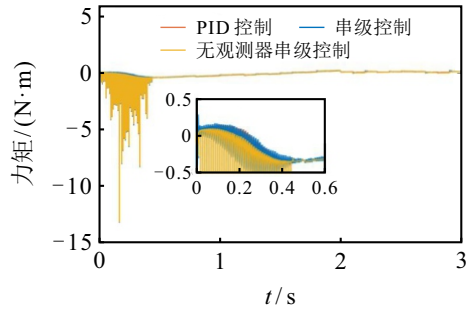
图 5 为模型参数误差下张力控制性能对比. 由图 5 可见: 传统 PID 控制下的卷材张力响应曲线由于放卷半径误差经历了显著的波动; 而所设计串级控制下的卷材张力响应曲线具有较小的过冲和波动, 以及更好的张力控制性能. 由基于观测器的串级控制器与无观测器的串级控制性能对比可知, 内环 ESO 能够有效观测并补偿系统的摩擦扰动, 提升系统对模型参数的鲁棒性. 相对而言, 所设计串级控制器对于模型参数的精度不太敏感, 具有更好的控制性能.

3.1.3 抗干扰性仿真

在实际工程中, 存在各种不确定因素的干扰, 传动机构的摩擦扰动是最大的扰动来源, 因此, 需要张力控制器具有较强的抗摩擦扰动能力, 才能保证张力在放卷过程中的稳定; 假设在工况 1 下放卷系统



(a) 张力跟踪曲线

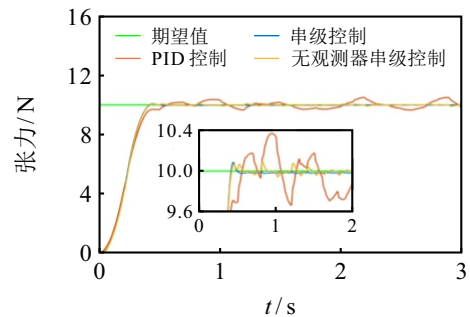


(b) 电机输出力矩曲线

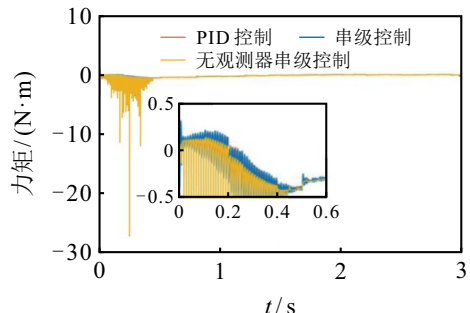
图5 模型参数误差下张力控制性能对比

受到 ± 0.06 N·m 范围内摩擦扰动力矩的持续干扰, 仿真结果如下.

图 6 为连续干扰下张力控制性能对比. 由图 6 对比分析可知, 在系统受到外部连续干扰时, 所设计串级控制器下的隔膜放卷张力在加速和匀速阶段均更为稳定, 动态响应更快, 跟踪误差更小. 内环 ESO 能够有效观测并补偿系统的摩擦扰动, 提升系统的抗干扰能力.



(a) 张力跟踪曲线



(b) 电机输出力矩曲线

图6 连续干扰下张力控制性能对比

通过上述仿真可知,所设计串级控制器适用于锂电池隔膜分切机的张力控制,能够有效减小张力的超调,减小张力误差,缩短系统调节时间,表现出更好的动态性能和扰动调节能力.

3.2 实验研究

为验证所提出控制策略的优越性,将所设计基于 ADRC 的串级控制器与基于前馈补偿的 PID 控制器进行对比实验.卷绕系统放卷张力控制实验平台如图 7 所示.

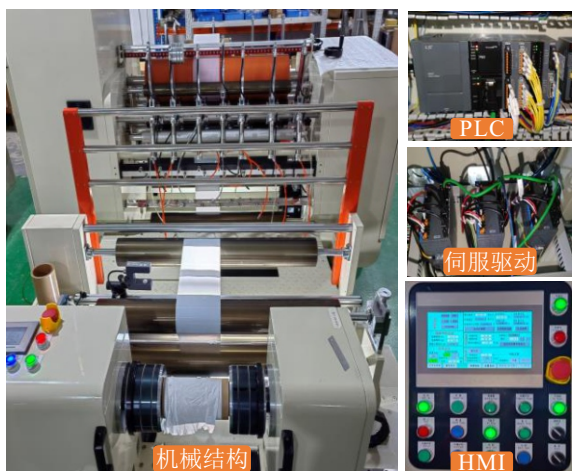


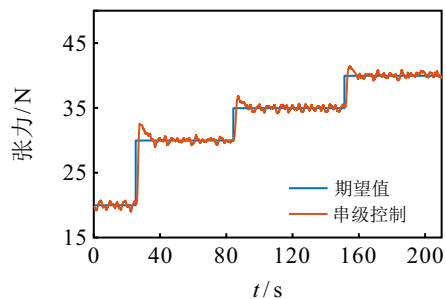
图7 实验平台

在该实验中,测试了所设计串级控制器与 PID 控制器在相同传输速度 $v_2 = 50 \text{ m/min}$, 不同期望张力 T_{1r} 为 (30 N、35 N、40 N) 时,对放卷系统中隔膜张力的控制效果.变张力控制实验结果以及各分段结果如下.

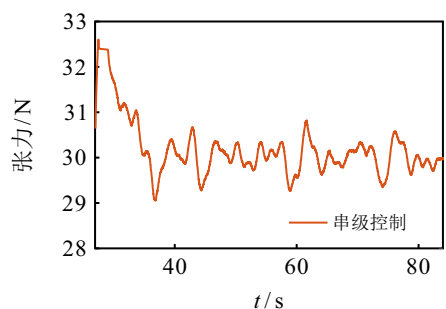
图 8 为串级控制器变张力实验,图 9 为 PID 控制器变张力实验,表 2 为变张力的张力控制误差指标.由图 8、图 9 和表 2 可知,所提出串级控制器在系统变张力运行各阶段,超调量更小,调节时间更短,放卷张力稳态误差各阶段均更小,具有较好的跟踪性能.

图 10 为所设计观测器对放卷辊角速度的跟踪实验.该实验表明观测器能够较好地跟踪放卷辊角速度,从侧面印证了 ESO 设计的合理性.实验结果表明了所设计控制器可以很好地处理模型的不确定性和传动机构的摩擦干扰等对于张力控制的影响,提升了隔膜张力控制性能.

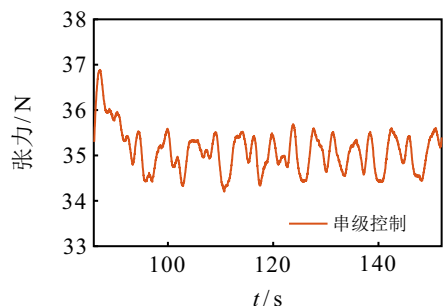
综合对比上述的仿真和实验可知,表 2 中的张力控制误差指标与 3 组仿真的结果能够相互印证.所设计控制器相较于 PID 控制器的响应速度更快,超调量更小,跟踪精度更高.因此,可知所设计控制器的动态性能和抗干扰能力更佳,整体控制性能更强,可以更好地应用于实际工业生产.



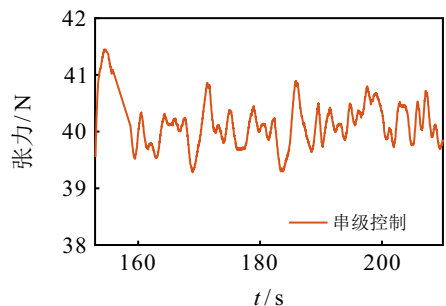
(a) 张力跟踪曲线



(b) 30 N 张力跟踪曲线



(c) 35 N 张力跟踪曲线

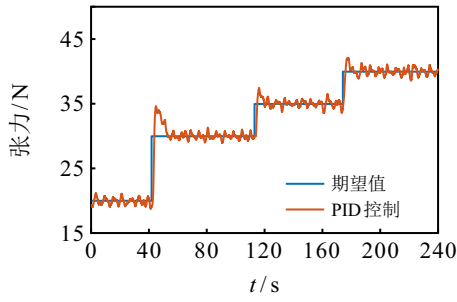


(d) 40 N 张力跟踪曲线

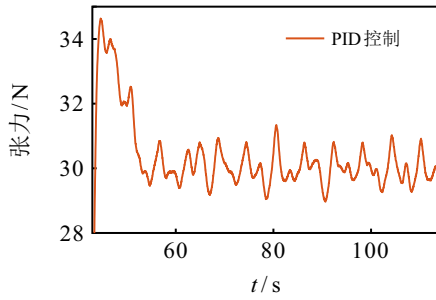
图8 串级控制器变张力实验

4 结论

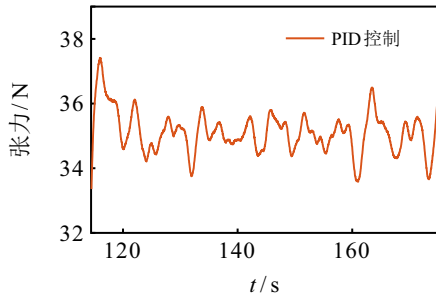
基于隔膜分切机放卷过程中的动态特性,以放卷牵引辊线速度为系统运行的基准速度,建立了放卷张力和放卷速度的数学模型.针对放卷过程中出现的张力波动问题,本文提出了一种基于 ADRC 的串级控制方法.首先,张力外环引入了跟踪微分器 (TD) 来安排过渡过程,有效缓解了控制中存在的超调问题,同时有效抑制了噪声干扰,得到了更好的张力环控制性能.然后,速度内环引入了基于 ESO 的 PI 控制器,有效减小了扰动补偿的延时,进一步提高



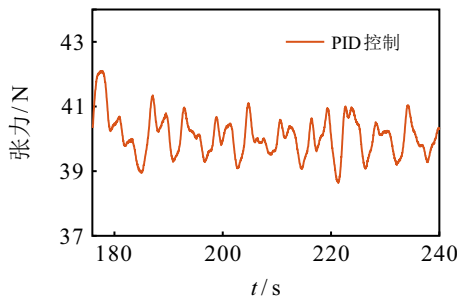
(a) 张力跟踪曲线



(b) 30N 张力跟踪曲线



(c) 35N 张力跟踪曲线



(d) 40N 张力跟踪曲线

图9 PID 控制器变张力实验

表2 变张力的张力控制误差指标

控制方法	图号	超调量/%	调节时间/s	I_{APE}	I_{MSE}
PID	8(b)	15.47	11.32	4.64	1.35
	8(c)	6.91	7.90	2.42	0.42
	8(d)	5.28	7.50	2.11	0.39
Cascade	9(b)	8.70	10.7	2.61	0.29
	9(c)	5.40	7.64	1.89	0.23
	9(d)	3.64	7.40	1.46	0.16

了控制带宽和动态性能. 接着, 通过滞后更短、带宽更佳的速度控制器, 抑制了扰动和未建模等因素对于张力外环的影响, 提升了系统的响应速度和抗干

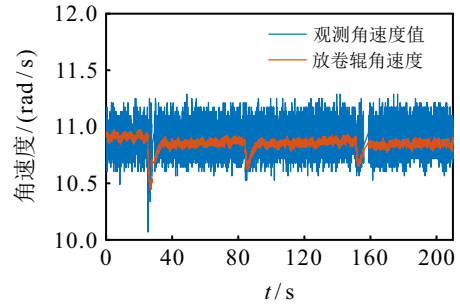


图10 串级控制中观测器跟踪实验

扰性能. 仿真和实验结果表明: 所提出方法在不同的参考张力和传输速度下对隔膜张力具有良好的控制性能; 所提出方法可提高设备在不同工况下的动态性能和抗干扰性, 在工业生产中具有较好的使用价值.

参考文献 (References)

- [1] Abjadi N R, Soltani J, Askari J, et al. Nonlinear sliding-mode control of a multi-motor web-winding system without tension sensor[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2009, 3(4): 419-427.
- [2] Pagilla P R, Siraskar N B, Dwivedula R V. Decentralized control of web processing lines[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(1): 106-117.
- [3] Koc H, Knittel D, de Mathelin M, et al. Modeling and robust control of winding systems for elastic webs[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(2): 197-208.
- [4] 刘乐, 方一鸣, 李建雄, 等. 可逆冷带轧机速度张力系统的动态滑模解耦控制[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(8): 1005-1013. (Liu L, Fang Y M, Li J X, et al. Dynamic sliding mode decoupling control for speed and tension system of reversible cold strip mill[J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(8): 1005-1013.)
- [5] Chen Z Y, Qu B N, Jiang B Y, et al. Robust constrained tension control for high-precision roll-to-roll processes[J]. *ISA Transactions*, 2023, 136: 651-662.
- [6] 米君杰, 姚建勇, 邓文翔. 基于神经网络的缠绕过程张力积分鲁棒控制[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(24): 74-82. (Mi J J, Yao J Y, Deng W X. Neural network based RISE control of winding tension[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(24): 74-82.)
- [7] 庞浩, 杜钦君, 徐东祥, 等. 基于数据驱动的多卷料张力协同控制系统[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 909-917. (Pang H, Du Q J, Xu D X, et al. Data-driven multi-winding tension cooperative control system[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(3): 909-917.)
- [8] Ding H D, Liu S H, Li Z, et al. Design controller based on RBF neural network for the rewinding tension system[C]. *Proceedings of the 6th IEEE Information Technology and Mechatronics Engineering Conference*.

- Chongqing, 2022: 1448-1452.
- [9] Wang L, Wang H S, Ouyang Z, et al. Design of a cascade control scheme for unwinding tension based on RBF network[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 103660-103672.
- [10] Liu S H, Yin B Z, Ma L E, et al. A decoupling control strategy for multilayer register system in printed electronic equipment[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016: 7165163.
- [11] Khaled T A, Akhrif O, Bonev I A. Dynamic path correction of an industrial robot using a distance sensor and an ADRC controller[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(3): 1646-1656.
- [12] Hai X S, Wang Z L, Feng Q, et al. Mobile robot ADRC with an automatic parameter tuning mechanism via modified pigeon-inspired optimization[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(6): 2616-2626.
- [13] Ding M, Zhao S H. Tension control of unwinding system based on seeker optimization auto disturbance rejection control[J]. *Wool Textile Journal*, 2020, 48(1): 85-91.
- [14] Liu S H, Ding H D, Wang Z Y, et al. An ADRC parameters self-tuning control strategy of tension system based on RBF neural network[J]. *Journal of Renewable Materials*, 2023, 11(4): 1991-2014.
- [15] He K, Li S F, He P B, et al. Multi-span tension control for printing systems in gravure printed electronic equipment[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(18): 8483.
- [16] Ai Y M, Yu B C, Zhang Y D, et al. Constant tension control system of high-voltage coil winding machine based on Smith predictor-optimized active disturbance rejection control algorithm[J]. *Sensors*, 2023, 23(1): 140.
- [17] Liu L, Liu Y X, Zhou L L, et al. Cascade ADRC with neural network-based ESO for hypersonic vehicle[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2023, 360(12): 9115-9138.
- [18] Yao S H, Gao G Q, Gao Z Q. On multi-axis motion synchronization: The cascade control structure and integrated SMC-ADRC design[J]. *ISA Transactions*, 2021, 109: 259-268.
- [19] 汪良, 王恒升, 郭新平, 等. 隔膜分切机放卷张力串级控制器设计[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(10): 181-192.
(Wang L, Wang H S, Guo X P, et al. Design of a cascade controller for unwinding tension of diaphragm slitting machine[J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(10): 181-192.)
- [20] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. *前沿科学*, 2007, 1(1): 24-31.
(Han J Q. Auto disturbances rejection control technique[J]. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 24-31.)
- [21] 韩京清. 最速反馈控制的不变性[J]. *系统科学与数学*, 2005, 25(4): 9.
(Han J Q. Invariability of time optimal feedback control[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2005, 25(4): 9.)
- [22] 王新华, 陈增强, 袁著祉. 基于扩张观测器的非线性不确定系统输出跟踪[J]. *控制与决策*, 2004, 19(10): 1113-1116.
(Wang X H, Chen Z Q, Yuan Z Z. Output tracking based on extended observer for nonlinear (uncertain) systems[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(10): 1113-1116.)
- [23] 黄恒宇, 吴敏, 陆承达, 等. 基于扰动估计和无微分模型参考自适应控制的钻柱振动抑制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(8): 2409-2418.
(Huang H Y, Wu M, Lu C D, et al. Drill-string vibration suppression based on disturbance estimation and D-F MRAC methods[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(8): 2409-2418.)
- [24] 王天宇, 拓卫晓, 李醒飞, 等. 基于 DOB 与扰动前馈的惯性参考单元位置控制技术研究[J]. *控制与决策*, 2025, 40(4): 1331-1338.
(Wang T Y, Tuo W X, Li X F, et al. Research on position control technology of inertial reference unit based on DOB and disturbance feedforward[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(4): 1331-1338.)
- [25] 秦耀, 杨杰, 刘书云, 等. 基于改进 Fal 函数的滤波器及扩张状态观测器研究[J]. *控制与决策*, 2025, 40(2): 684-692.
(Qin Y, Yang J, Liu S Y, et al. Research on filter and extended state observer based on improved Fal function[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(2): 684-692.)

作者简介

汪良 (1986-), 男, 博士生, 主要研究方向为机电系统建模与控制, E-mail: 342257335@qq.com;

欧阳周 (1996-), 男, 博士生, 主要研究方向为机电系统控制与智能算法, E-mail: 223701006@csu.edu.cn;

王恒升 (1963-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为机电系统动力学建模与控制、机器人人工智能、机器人人机交互, E-mail: whscsu@163.com;

杨润 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为自动化系统设计, E-mail: 1719500295@qq.com.