

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314218

## 卷绕系统反演滑模恒张力控制\*

庞浩<sup>1</sup> 杜钦君<sup>1</sup> 赵金阳<sup>1</sup> 徐执诏<sup>1</sup> 徐东祥<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255022; 2. 淄博市产品质量检验研究院 淄博 255022)

**摘要:** 针对卷绕系统工作时卷料张力波动较大问题,提出了一种基于神经网络区间观测器的反演非奇异快速终端滑模张力控制方法。构建卷绕系统数学模型,利用神经网络逼近卷绕系统中卷料半径、惯量等参数变化部分所引起的随机响应,设计区间状态观测器估计系统转速、卷料张力的上下界。根据估计出的状态值,构建反演非奇异终端滑模控制器,使张力跟踪误差在有限时间内快速收敛到零,有效增强了系统鲁棒性能。仿真实验结果表明,所设计的控制方法使卷料上的张力在 1.6 s 后达到给定值并保持恒定,相较于常规的滑模控制器和已发表文献中的滑模控制器,其调节时间分别减少了 57% 和 33%,证明了所提出控制方法的有效性和可靠性,满足卷绕设备收卷工艺的要求。

**关键词:** 卷绕系统; 张力恒定控制; 反演控制; 终端滑模控制器; 区间观测器

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

## Inversion sliding mode constant tension control of winding system

Pang Hao<sup>1</sup> Du Qinjun<sup>1</sup> Zhao Jinyang<sup>1</sup> Xu Zhizhao<sup>1</sup> Xu Dongxiang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255022, China;

2. Zibo Product Quality Inspection Research Institute, Zibo 255022, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of large fluctuation of winding tension when the winding system is working, an inverse nonsingular fast terminal sliding mode tension control method based on neural network interval observer is proposed. The mathematical model of the winding system is constructed, and the neural network is used to approximate the random response caused by the change of parameters such as the radius and inertia of the winding system. The interval state observer is designed to estimate the upper and lower bounds of the system speed and the winding tension. According to the estimated state value, the backstepping nonsingular terminal sliding mode controller is constructed to make the tension tracking error converge to zero quickly in a finite time, which effectively enhances the robust performance of the system. The simulation results show that the designed control method makes the tension on the coil reach a given value and remain constant after 1.6 s. Compared with the conventional sliding mode controller and the sliding mode controller in the published literature, the adjustment time is reduced by 57% and 33% respectively, which proves the effectiveness and reliability of the proposed control method and meets the requirements of the winding process of the winding equipment.

**Keywords:** winding system; constant tension control; inversion control; terminal sliding mode controller; interval observer

## 0 引言

近年来,卷绕系统在造纸、印刷、纺织、冷塑材料等生产工业中得到了广泛的应用。在实际应用中,在保证收卷、放卷材料张力稳定的情况下,收卷效率得到提高是卷绕系统的控制目标<sup>[1]</sup>。随着卷绕系统的工作过程中卷绕轴上的材料厚度不断增加,材料上的张力会发生变化,而卷料张力过

大或过小往往会导致材料的断裂或脱轴。因此,保持系统中卷料张力的恒定极为重要。由卷绕动态模型可知,材料上的张力和速度之间存在耦合关系,通过控制卷绕速度以保持张力恒定是该课题研究的重点。

为保证卷绕系统中材料张力的恒定,国内外学者就此提出了不同的解决方法。文献[2]中,提出了一种基于模型参考自适应的控制策略,将系统中的参数变化部分在自适

收稿日期:2023-07-26

\* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(62076152)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MF096)资助

应律中体现;文献[3]中,设计了状态反馈鲁棒控制器,把误差动态模型中的时变参数设定为区间变量,提高了整个系统的鲁棒性;文献[4]中提出了一种基于自适应反演的非线性补偿控制方法以解决收放卷轮直径变化引起的参数不确定问题;文献[5]中,针对辊对辊卷绕系统中的张力变化,引入基于自回归滑动平均(auto-regressive moving average model, ARMA)模型的非线性动态矩阵控制(nonlinear dynamic matrix control, NDMC)来消除张力扰动,具有较好的控制效果。以上张力控制策略均需要速度和张力传感器来获取速度和张力的状态值。在材料的收卷过程中,材料会出现上下振动等情况,张力传感器的测量值较粗糙且使用传感器增加系统的复杂性和使用成本。因此,使用状态观测器来观测系统状态值。

无传感器控制中常用的观测器有滑模观测器、模型参考自适应观测器、扩展卡尔曼滤波器观测器<sup>[6]</sup>等。文献[7]提出了基于鲁棒滑模观测器的卷绕控制系统;文献[8]提出了自适应观测器来观测系统中的非线性部分;文献[9]提出了使用降阶张力观测器对卷料张力进行观测,但忽略了卷绕轴转动惯量的变化率。文献[8-9]中提到的观测器,观测到的是动态系统的点估计值,而使用点估计观测器需要确定的测量数据和系统参数,在运行过程中的卷绕系统,半径、转动惯量等数据获取比较困难,因此使用点估计观测器无法精确估计估计出卷绕系统较精准的状态值。为解决非线性时变系统中点估计观测器精度不足的问题,文献[10]中提出,区间观测器对于参数变化和非线性时变的系统是一种很有用的工具,通过观测系统状态的上界和下界来估计出一个状态变化的范围区间,进而通过加权的方法估计出系统的状态值,使系统更具包容性。文献[11],在观测器中引入神经网络构建了神经网络观测器。文献[12],在区间观测器中引入了 RBF 神经网络,提高了观测器精度。相较于径向基函数神经网络(radial basis function, RBF),超级基神经网络(hyper basis function, HBF)在神经元基函数的选择上,使用超基函数代替了 RBF 神经网络的高斯基函数,使 HBF 神经网络能够以更高的精度实现对非线性函数的逼近<sup>[13]</sup>。所以,将 HBF 神经网络引入到区间观测器中是有意义的。

卷绕系统是一个复杂的含有参数时变非线性系统,传统的 PID 控制存在适应能力低、抗扰动力差等问题<sup>[14]</sup>。滑模控制器由于结构简单、易物理实现、对系统参数变化和外部扰动的低灵敏性,可以较好地保证系统鲁棒性而被广泛用于非线性系统的控制中<sup>[15]</sup>。普通的滑模控制(sliding mode control, SMC)由于采用了线性滑模面而导致系统状态到达滑模面后沿着滑模面是渐近收敛的,容易出现较大系统抖振。文献[16]中,提出了非奇异快速终端滑模控制(nonsingular fast terminal sliding mode control, NFTSM),可实现全局快速收敛,但该文献提出的非线性滑模面收敛速度虽有所提高但仍需改进。针对含有参数变化的卷绕系

统,设计非奇异终端滑模控制器,在滑模面中引入非线性函数,设计了改进的非奇异终端滑模面,使张力跟踪误差更加快速的在有限时间内收敛到零。

滑模控制器鲁棒性较差,反演控制方法能够增强系统鲁棒性并简化高阶非线性系统的控制器设计<sup>[17]</sup>。采用反演控制方法可将复杂的非线性卷绕系统分解成两个子系统,通过设计 Lyapunov 函数和虚拟控制量,逐步递推得到系统所需的控制量,进而得到整个系统控制律,大大增强了卷绕系统的鲁棒性。将设计的非奇异全局终端滑模控制器与反演控制方法结合,构建反演滑模控制器,设计张力控制系统,提高了系统的鲁棒性及控制精度。

本文以单卷轴卷绕系统为研究对象,为保证卷绕过程中卷料张力的恒定,设计了一种基于区间观测器的反演非奇异快速终端滑模控制方法。考虑卷绕系统参数不确定性的存在,使用 HBF 神经网络逼近由半径、惯量等参数变化部分所引起的未知响应,根据逼近出的值,设计神经网络区间观测器,实现系统状态的区间估计,通过加权估计出系统状态值并输入到控制器中;将反演控制方法与非奇异终端滑模控制器结合,设计了一种基于区间观测器的滑模反演控制器,引入改进的新型滑模面,有效的加快了系统的响应速度。通过仿真实验,验证了该反演滑模控制器的设计增强了系统的鲁棒性,提高了系统控制精度。

## 1 卷绕系统工作原理

### 1.1 卷绕系统数学建模

卷绕系统由磁粉离合器、张力控制器、牵引辊、收卷辊组成。卷料从出料口被挤压出后,经过牵引辊牵引后,被收卷辊收取。随着收卷辊的卷取,其卷轴半径、转动惯量不断增加,卷料上的张力和收卷速度都将随之变化,该系统是一个张力和速度强耦合且非线性时变的系统。

该系统的执行机构为磁粉离合器。如图 1 所示,磁粉离合器有两个独立的主从嵌套装置组成,主从单元之间存在一定的空间,在这个空隙中填充有颗粒状的磁粉。由文献[1]可知,当磁粉离合器通电后,主从单元之间的磁粉被磁化并依附在主从轴的内壁上形成刚性连接,使扭矩从主动轴传递到从动轴,进而使卷曲辊转动。由磁粉离合器的特性可知,可实现直接改变输入电流来改变输出扭矩。

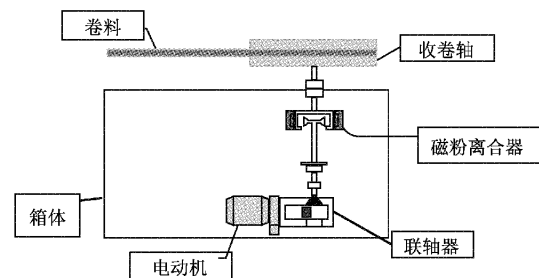


图 1 卷绕设备俯视图

由文献[18]可知,磁粉离合器的转矩比例系数为:

$$K(s) = \frac{M_d(s)}{I(s)} = \frac{\pi D^2 l N}{L} \cdot \frac{2\mu_0 \mu_d S_d \cdot (R_i + R_d)}{R_i + R_d \cdot s + 1} \quad (1)$$

式中:  $D$  和  $l$  分别为离合器的直径和宽度,  $\mu_0$  为磁隙磁导率,  $\mu_d$  为磁粉内部的磁导率.  $N$  为励磁线圈匝数,  $I$  为线圈电流,  $R_i$  为铁磁阻,  $R_d$  为磁粉磁阻,  $L$  为磁感线圈电感量,  $S_d$  为磁粉所作用的有效面积. 即将磁粉离合器的电磁转矩写为:

$$M_d = K \cdot I \quad (2)$$

其中,  $K$  为磁粉离合器的转矩比例系数,  $I$  为线圈电流.

### 1.2 卷绕系统动态过程分析

卷料加工好被挤出后,经过牵引后被卷曲辊收取,在速度和半径不断变化的情况下,保持卷料的张力恒定以及整个系统的稳定,提高工作效率.

卷绕系统动态模型如图2所示.

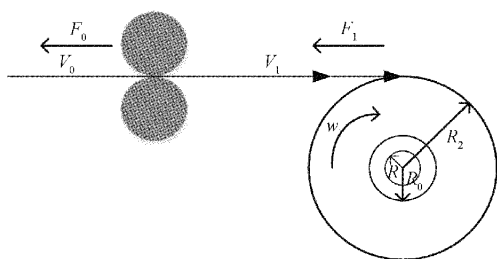


图2 卷绕设备收卷动态模型

图2中  $F_0$  为出料口与牵引辊之间的材料的张力;  $F_1$  为牵引辊与卷曲辊之间材料的张力;  $V_0$  为出料口与牵引辊之间材料的线速度;  $V_1$  为牵引辊与卷曲辊之间材料的线速度;  $R_0$  为牵引辊的已知半径;  $R_1$  为卷曲辊的轴半径;  $R_2$  为卷曲辊的实时半径;  $M_d$  为磁粉离合器的输出转矩;  $M_f$  为卷筒摩擦转矩.

磁粉离合器转矩平衡模型如下:

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = M_d - M_f - F_1 \cdot R_2 \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为卷轴收卷角速度;  $J$  为收卷侧的总转动惯量,由卷筒  $J_1$ 、收卷材料  $J_2$  及驱动轴  $J_3$  三部分转动惯量组成. 考虑在收卷过程中,卷筒和驱动轴本身的质量不会有所改变,即卷筒和驱动轴的转动惯量皆为定值且占比较小,收卷材料的转动惯量随着卷辊的半径增加、质量增加而变大. 即存在:

$$\begin{cases} \omega = \frac{V_1}{R_2} \\ J = J_1 + \frac{1}{2} \pi R_2^4 \cdot \rho \cdot b + J_3 \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中,整理可得:

$$\dot{V}_1 = \frac{R_2}{J} K \cdot I + \frac{\delta}{2\pi \cdot R_2^2} \cdot V_1^2 - \frac{\epsilon}{J} \cdot V_1 - \frac{R_2^2}{J} \cdot F_1 - \frac{b_f}{J} \cdot R \quad (5)$$

其中,  $\epsilon = \rho \cdot b \cdot \delta R_2^2$ ,  $\rho$  为热轧带的材料密度;  $b$  为材料宽度;  $\delta$  为材料厚度;  $b_f$  为材料摩擦系数.

由于卷料在收卷过程中产生了弹性形变,根据胡克定律可得:

$$\begin{cases} F = E \cdot A \cdot \epsilon \\ E = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\int_0^t V_1 - V_0 dt}{L_0} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $E$  为材料弹性模量;  $A$  为横截面积;  $\epsilon$  为材料形变率;  $t$  为这段材料经过两个辊轴的时间. 则由式(6)可得,牵引辊与收卷辊之间的卷料张力  $F_1$  为:

$$\dot{F}_1 = \frac{E \cdot S}{L_1} (V_1 - V_0) + \frac{F_0 \cdot V_0}{L_1} - \frac{F_1 \cdot V_1}{L_1} \quad (7)$$

由于系统中存在半径、惯量等非线性变化参数,则根据式(5)和(7),定义系统中由半径、惯量等参数变化部分所引起的未知响应为:

$$G = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_0 \cdot V_0}{L_1} - \frac{E \cdot S \cdot V_0}{L_1} - \frac{F_1 \cdot V_1}{L_1} \\ \Delta B_0 u + \frac{\delta}{2\pi R_2^2} \cdot V_1^2 - \frac{\epsilon}{J} \cdot V_1 - \frac{R_2^2}{J} \cdot F_1 - \frac{b_f}{J} \cdot R \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $\Delta B$  为系统输入的参数变化部分.

结合式(5)、(7)和(8)可得,卷绕系统的数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_0 u + G \\ y(t) = Cx_1(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $A = \begin{bmatrix} 0 & ES \\ 0 & L_1 \end{bmatrix}$ ;  $B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ R_{20} \\ J_0 \end{bmatrix}$ ;  $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $x =$

$[x_1, x_3]^T = [F_1, V_1]^T$ ,  $F_1$  为卷料张力,  $V_1$  为收卷辊收卷的速度,  $G(x)$  为由半径、惯量等参数变化部分所引起的未知响应.

卷绕系统的输入为磁粉离合器的通电线圈电流  $I$ , 系统状态量为材料的张力  $F_1$  和卷曲线速度  $V_1$ , 输出为材料的张力. 通过改变通电电流,调整卷绕材料收卷的速度,进而控制张力,达到消除张力跟踪误差、保持张力恒定的效果.

卷绕系统的数学模型由式(9)可知,卷料张力与收卷速度之间是一个强耦合关系且包含半径、转动惯量等无法检测的变量. 系统运行过程中,系统中卷轴的半径、转动惯量不断发生非线性时变,卷绕系统张力和速度状态值有大幅波动,设计本文张力控制系统,控制卷料张力恒定.

1) 设计了一种反演非奇异终端滑模控制器,通过反演的方法将复杂的卷绕系统分解为两个独立系统,并设计改

进的滑模面,使得系统张力跟踪误差在有限时间内快速收敛到零,提高了系统的鲁棒性。

2)在卷绕系统中引入神经网络区间状态观测器,使用神经网络逼近由半径、惯量等参数变化部分所引起的随机响应  $G$ , 根据逼近的  $G$  观测系统卷料张力  $F$  和卷绕速度  $V$ , 输入到控制器中实现张力和速度的跟踪。

## 2 反演非奇异终端滑模控制器

在卷绕系统控制器选择中,由于卷绕系统在工作过程中卷径和卷曲轴转动惯量等参数保持时变导致收卷速度和卷料张力随之发生变化,若使用传统 PID 控制器,控制器参数需要根据经验设定且参数无法进行动态调整。针对卷绕系统中参数时变该问题,为实现张力误差的快速收敛,基于卷绕系统动力学模型,将反演控制与终端滑模控制方法结合起来,设计了一种基于反演算法的非奇异快速终端滑模控制器应用于张力控制中。

### 2.1 改进非奇异终端滑模面设计

传统的滑模控制采用线性滑模面,使系统状态渐进收敛。而快速终端滑模面可以使系统状态在有限时间内收敛到 0,通过引入非线性函数,改善了向平衡状态收敛的收敛速度。为解决普通终端滑模的奇异问题,文献[19]提出了非奇异快速终端滑模控制(NFTSM),该方法在保证快速收敛的同时有效的解决了控制奇异问题。

NFTSM 滑模面表示为:

$$s = \delta_1 + \alpha\delta_1^\kappa + \beta\delta_2^\gamma \quad (10)$$

式中:  $\kappa = g/h, \gamma = p/q, \kappa > \gamma, 1 < \gamma < 2, g, h, p, q$  均为奇数,  $\alpha > 0, \beta > 0$ 。

为提高状态收敛速度,提出一种改进的非奇异快速终端滑模面:

$$s = |\delta_1| \cdot e^{|\delta_1|} \cdot \text{sgn}(\delta_1) + \alpha\delta_1^\kappa + \beta\delta_2^\gamma \quad (11)$$

式中:  $\kappa, \gamma$  同上。

证明:在系统状态进入滑模面后,  $s = 0$

则存在:

$$s = |\delta_1| \cdot e^{|\delta_1|} \cdot \text{sgn}(\delta_1) + \alpha\delta_1^\kappa + \beta\delta_2^\gamma = 0 \quad (12)$$

由式(12)得:

$$\delta_2 = - \left[ \frac{1}{\beta} (|\delta_1| \cdot e^{|\delta_1|} \cdot \text{sgn}(\delta_1) + \alpha\delta_1^\kappa) \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (13)$$

定义 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} \delta_1^2 \quad (14)$$

对其求导可得:

$$\dot{V} = \delta_1 \cdot \dot{\delta}_1 = -\delta_1 \cdot \left[ \frac{1}{\beta} (|\delta_1| \cdot e^{|\delta_1|} \cdot \text{sgn}(\delta_1) + \alpha\delta_1^\kappa) \right]^{\frac{1}{\gamma}} =$$

$$-\left(\frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot [|\delta_1|^{\gamma+1} \cdot e^{|\delta_1|} + \alpha\delta_1^{\kappa-\gamma}]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (15)$$

式中:  $\gamma + 1, \kappa + \gamma$  均为偶数,则可得  $\dot{V} \leq 0$ , 即设计的改进

终端滑模面成立,系统状态将沿着该滑模面收敛至平衡点。

求解滑模面式(10)和滑模面式(11)上系统状态收敛时间  $t_{r1}$  和  $t_{r2}$ [16]:

$$t_{r1} = \int_0^{|\delta_1^{(0)}|} \frac{1}{\left[ \frac{1}{\beta} (\delta_1 + \alpha\delta_1^\kappa) \right]^{\frac{1}{\gamma}}} d\delta_1 \quad (16)$$

$$t_{r2} = \int_0^{|\delta_1^{(0)}|} \frac{1}{\left[ \frac{1}{\beta} (\delta_1 \cdot e^{|\delta_1|} + \alpha\delta_1^\kappa) \right]^{\frac{1}{\gamma}}} d\delta_1 \quad (17)$$

式(16)和(17)中,当  $\delta_1 > 0$  时,  $\delta_1 \cdot e^{|\delta_1|} > \delta_1$ , 则  $t_{r1} > t_{r2}$ 。即,式(11)改进的非奇异快速终端滑模面上的系统状态收敛速度比式(10)所述传统的非奇异终端滑模面上系统状态收敛速度快。

### 2.2 反演非奇异终端滑模控制器设计

本文的控制器由反演控制和改进的非奇异快速终端滑模控制器组成,系统控制框图如图 3 所示。控制系统的输入为给定的张力  $F_d$ , 对该系统进行闭环控制,由观测器估计出的张力状态值与系统的给定张力值形成张力跟踪误差,定义为:  $z_1 = \hat{F}_1 - F_d = x_1 - x_d$ 。由于系统传感器测出的张力状态值并不准确,且速度无法使用传感器检测,因此通过区间观测器根据模型来估计出更精准的系统状态值应用于系统控制中。误差变化率  $\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d = x_2 - \dot{x}_d$  反映了系统运行状态的变化趋势。

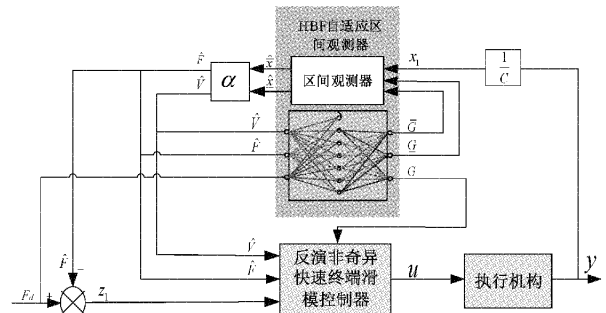


图 3 张力系统控制框图

将卷绕系统状态方程式(9)展开可得:

$$\begin{cases} x_1 = \hat{F}_1 \\ x_3 = \hat{V}_1 \\ \dot{x}_1 = x_2 = \frac{ES}{L_1} x_3 - \frac{x_1 \cdot x_3}{L_1} - \frac{E \cdot S}{L_1} V_0 + \frac{F_0 \cdot V_0}{L_1} \\ \dot{x}_2 = \frac{ES}{L_1} x_3 - \frac{x_1 \cdot \dot{x}_3}{L_1} - \frac{x_3 \cdot \dot{x}_1}{L_1} \\ \dot{x}_3 = B_0 u + g_2 \end{cases} \quad (18)$$

为实现对张力的精确控制,精准跟踪参考值,设计了该基于反演算法的滑模控制器,定义张力跟踪误差为:  $z_1 = \hat{F}_1 - F_d = x_1 - x_d$ , 其中  $F_d$  为期望张力,则:

$$\dot{z}_1 = \dot{F}_1 - \dot{F}_d = x_2 - \dot{x}_d \quad (19)$$

设计反演滑模控制器,步骤如下:

1)定义控制器 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (20)$$

则:

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1(x_2 - \dot{x}_d) \quad (21)$$

取  $x_2 = -c_1 z_1 + \dot{x}_d + z_2$ , 其中  $c_1 > 0$ ,  $z_2$  为虚拟控制量,即  $z_2 = x_2 + c_1 z_1 - \dot{x}_d$ 。

则:

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (22)$$

若  $z_2 = 0$ , 则  $\dot{V}_1 \leq 0$ , 因此进行下一步设计。

2)根据滑模变结构控制,定义滑模面为:

$$s = z_1 \cdot e^{|z_1|} + \alpha \cdot z_1^\kappa + \beta \cdot h_2^\gamma \quad (23)$$

定义以下变量:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - x_d \\ h_2 = \dot{z}_1 = x_2 - \dot{x}_d = -c_1 z_1 + z_2 \\ \dot{h}_2 = -c_1 \dot{z}_1 + \dot{z}_2 \\ \dot{z}_2 = \dot{x}_2 + c_1 \dot{z}_1 - \ddot{x}_d \\ \dot{x}_2 = \left(\frac{ES}{L_1} - \frac{x_1}{L_1}\right) \cdot (B_0 u + g_2) - \frac{x_3}{L_1} \cdot \dot{x}_1 \end{cases} \quad (24)$$

其中,  $z_1$  为张力跟踪误差,  $z_2$  为虚拟控制量,  $h_2$  为张力误差变化率,  $g_2$  为由神经网络逼近出的未知响应。

定义 Lyapunov 函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} s^2 \quad (25)$$

则:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + s \cdot \dot{s} = -c_1 z_1^2 + z_1 \cdot z_2 + s \cdot [h_2 \cdot e^{|z_1|} + z_1 \cdot h_2 \cdot e^{|z_1|} + \alpha \cdot \kappa z_1^{\kappa-1} \cdot h_2 + \beta \cdot \gamma h_2^{\gamma-1} \cdot \dot{h}_2] \quad (26)$$

设计反演滑模控制律  $u$ :

$$u = \frac{1}{B_0} \cdot \left\{ \frac{x_3}{ES - x_1} \cdot \dot{x}_1 + \frac{L_1}{ES - x_1} \cdot \left[ -\frac{1}{\beta \cdot \gamma h_2^{\gamma-1}} \cdot \left( \frac{c_2 z_2^2 + z_1 z_2}{s} + \dot{z}_1 \cdot e^{|z_1|} + z_1 \cdot \dot{z}_1 \cdot e^{|z_1|} + \alpha \cdot \kappa z_1^{\kappa-1} \cdot \dot{z}_1 + k \operatorname{sgn}(s) \right) + \ddot{x}_d \right] - g_2 \right\} \quad (27)$$

趋近律采用等速趋近律:  $\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s)$ 。将式(27)代入式(26)中,得  $\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - k |s| \leq 0$ , 其中  $c_2$  为大于零的常数。由此可知,设计的基于反演算法的非奇异终端滑模控制器是稳定的。

由式(27)可知,设计的滑模控制率中含有系统的卷料张力、卷绕速度和由半径、惯量等参数变化部分所引起的未知响应,但是由于卷绕速度和由时变参数带来的随机响应无法检测,卷料张力测量值不准确,需要使用观测器观测出卷料张力和卷绕速度以及时变参数带来的未知影响  $G$ , 下文对观测器进行设计。

### 3 神经网络区间观测器设计

在系统的卷绕过程中,考虑到系统中半径、转动惯量等时变参数的变化是非线性的且难以通过测量直接获取、材料在被收卷到卷筒上后材料之间有缝隙、材料厚度的不均匀等都将影响卷绕系统中卷料张力和收卷轴收卷速度的精确测量,导致无法建立精确的系统模型,无法实现对卷绕系统中卷料张力的精确跟踪。尽管系统中卷料张力可测但存在外部干扰或噪声使得参数测量值相对比较粗糙,从而可考虑用合理区间来替代这些单一点测量值。为此,引入一种基于神经网络的区间状态观测器,将神经网络和区间观测器相结合。通过神经网络逼近复合非线性变化部分及其上下界,根据逼近出的非线性变化部分上下界设计了区间观测器,实现对卷料上张力和收卷速度状态量的估计,同时将逼近出的非线性变化部分输入到滑模控制器中以实现卷料张力的跟踪。

#### 3.1 HBF 神经网络设计

HBF 神经网络的结构与 RBF 神经网络结构类似, HBF 神经网络在神经元基函数的选择上,使用超基函数代替了 RBF 神经网络的高斯基函数,使 HBF 神经网络能够以更高的精度实现对非线性函数的逼近。

RBF 和 HBF 神经网络的输出函数形式皆为:

$$y_n = f(x_i) = \sum_{i=1}^l W_{ij} \cdot h_j, n = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

式中:  $x_i$  为网络的输入;  $W_{ij}$  为隐含层节点  $i$  到输出层节点  $j$  的加权系数;  $h_j$  为隐含层第  $j$  个隐含层的输出;  $n$  为输出节点个数。

两者的不同主要体现在基函数的选择中, HBF 神经网络的基函数形式为超基函数:

$$h_j = \exp\left(-\frac{(x_i - c_j)^T \cdot \sum_j (x_i - c_j)}{2}\right) \quad (29)$$

式中:  $c_j$  为第  $j$  个基函数的中心;  $\sum_j = \operatorname{diag}\left(\frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_n^2}\right)$  是一个正定方阵,用来表示  $x_i$  与  $c_j$  之间的相似度;  $\sigma$  为节点在方向上的宽度。

在 RBF 神经网络中,神经元的形状较多为统一的球状,更容易进行计算和对数据的处理,但由于是球状则无法对数据进行局部缩放。在 HBF 网络中,神经元的形状较多为椭球状,将  $\sum_j$  选为一个对角阵形式, HBF 神经网络在每一个维度上均有各自的宽度且不会增加太多计算量,使神经网络变得更加灵活。

使用 HBF 神经网络以更高的精度来逼近卷绕系统中参数不确定性及其上下界,解决了卷绕系统中含有未知的非线性部分且系统状态无法测量时无法估计系统状态边界的问题。通过调节 HBF 神经网络的权值来调节非线性部分区间宽度进而可设计区间观测器的观测状态值区间宽度。

### 3.2 区间观测器设计

点估计状态观测器, 需要保证观测器误差动态系统渐近收敛到 0, 而区间观测器仅要求观测器误差动态系统状态为非负的, 因此搭建区间观测器仅需要设计观测器增益矩阵使得误差动态系统矩阵为 Metzler 矩阵。

由卷绕系统的动态过程数学模型式(9)可知:  $G$  为由半径、惯量等参数变化部分所引起的未知响应, 能否精确获得  $G$  的值在很大程度上直接决定了张力控制系统的控制品质。

根据式(8)中  $G$  的表达式可得, 存在  $\underline{G} \leq G \leq \overline{G}$ 。对于该非线性系统, 存在张力和速度的初始状态量  $x_0$ , 且已知存在  $\underline{x}_0$  和  $\overline{x}_0$  使得  $\underline{x}_0 \leq x_0 \leq \overline{x}_0$ 。

存在状态变量  $F, V$  的上下界, 使得  $\underline{x} \leq x \leq \overline{x}$ ; 控制输入  $u(t)$  有界, 且存在  $|u(t)| \leq u_d$ ; 对于 HBF 神经网络, 分别存在理想权值矩阵  $\underline{W}, \overline{W}$  和  $\overline{W}$ , 且权值矩阵  $\underline{W}, \overline{W} \in \omega^{m \times 2}$ 。假定其均有界, 即可表示为:  $|\overline{W}| \leq \overline{W}_{\max}, |W| \leq W_{\max}, |\underline{W}| \leq \underline{W}_{\max}$ 。

使用 HBF 神经网络逼近系统中的参数不确定变化  $G$  及其上下界部分, 可表示为:

$$\begin{cases} G = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \underline{W}^T \cdot h(\ast) + \underline{\epsilon}_f(\ast) \\ \overline{G} = \begin{bmatrix} \overline{g}_1 \\ \overline{g}_2 \end{bmatrix} = \overline{W}^T \cdot \overline{h}(\ast) + \overline{\epsilon}_f(\ast) \\ G = \begin{bmatrix} \underline{g}_1 \\ \underline{g}_2 \end{bmatrix} = \underline{W}^T \cdot \underline{h}(\ast) + \underline{\epsilon}_f(\ast) \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $\underline{W}^T$  和  $\overline{W}^T$  为自适应权值矩阵;  $\underline{h}(\ast)$  和  $\overline{h}(\ast)$  为 HBF 网络的超基函数;  $\underline{\epsilon}_f(\ast)$  和  $\overline{\epsilon}_f(\ast)$  为已知逼近误差且  $\underline{\epsilon}_f(\ast) \leq \epsilon_f(\ast) \leq \overline{\epsilon}_f(\ast)$ 。

根据文献[12]中的观测器模型, 构建适应于本文系统的 HBF 自适应区间观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\overline{x}} = \underline{A}_c \overline{x} + B_0 u + [\overline{W}^T \cdot \overline{h}(\ast) + \overline{\epsilon}_f] + L y \\ \dot{\underline{x}} = \underline{A}_c \underline{x} + B_0 u + [\underline{W}^T \cdot \underline{h}(\ast) + \underline{\epsilon}_f] + L y \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $\underline{A}_c = A - LC, L$  为观测器增益且存在  $L$  使  $\underline{A}_c$  为 Metzler 矩阵。

由径向基神经网络的特点, 定义神经网络的上下界权重变化律:

$$\begin{cases} \dot{\overline{W}}^T = \overline{\gamma} \underline{K}_f \overline{h}_f - \overline{\rho} \underline{K}_f \overline{W}^T \\ \dot{\underline{W}}^T = \underline{\gamma} \underline{K}_f \underline{h}_f - \underline{\rho} \underline{K}_f \underline{W}^T \end{cases} \quad (32)$$

其中自调整参数矩阵  $\underline{K}_f = \underline{K}_f^T > 0, \overline{K}_f = \overline{K}_f^T > 0$ ; 系统残差上下界  $\overline{\gamma} = \overline{y} - y, \underline{\gamma} = y - \underline{y}$ ; 衰减系数  $\overline{\rho}$  和  $\underline{\rho}$  均大于 0。

定义区间观测器的系统状态误差上下界分别为:  $\overline{e} = \overline{x} - x$  和  $\underline{e} = x - \underline{x}$ 。区间观测器的系统状态误差系统为:

$$\begin{cases} \dot{\overline{e}} = \underline{A}_c \overline{e} + (\overline{G} - G) \\ \dot{\underline{e}} = \underline{A}_c \underline{e} + (G - \underline{G}) \end{cases} \quad (33)$$

若存在观测器增益矩阵  $L$  使得  $\underline{A}_c$  为 Metzler 和 Hurwitz 矩阵且满足:

$$\begin{bmatrix} \underline{A}_c^T P + P \underline{A}_c + Q & P \\ P & -I \end{bmatrix} \leq 0, Q > 0 \quad (34)$$

其中  $(A - LC)^T P + P(A - LC) = -Q$ , 则设计的区间观测器式(34)是满足该卷绕系统且稳定收敛的。

证明:

定义 Lyapunov 函数为:  $V = \frac{1}{2} \overline{e}^T P \overline{e}$

对  $V$  进行求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} \overline{e}^T P \dot{\overline{e}} + \frac{1}{2} \dot{\overline{e}}^T P \overline{e} = \frac{1}{2} \times \\ &[\overline{e}^T P \cdot [(A - LC)\overline{e} + (\overline{G} - G)]] + \\ &\frac{1}{2} \times [[(A - LC)\overline{e} + (\overline{G} - G)]^T \cdot P \overline{e}] = \\ &\frac{1}{2} \times [\overline{e}^T P \cdot [(A - LC)\overline{e}]^T + [(A - LC)\overline{e}]^T \cdot P \overline{e}] + \\ &\frac{1}{2} \times [\overline{e}^T P \cdot (\overline{G} - G)^T + (\overline{G} - G)^T \cdot P \overline{e}] \end{aligned} \quad (35)$$

由式(34)和(35)可知:

$$(A - LC)^T P + P(A - LC) = -Q \quad (36)$$

则展开式(35)得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{1}{2} \overline{e}^T Q \overline{e} + \frac{1}{2} [\overline{e}^T P \cdot (\overline{G} - G) + (\overline{G} - G)^T \cdot P \overline{e}] = \\ &-\frac{1}{2} \overline{e}^T Q \overline{e} + \frac{1}{2} \times 2 \overline{e}^T P \cdot (\overline{G} - G) = -\frac{1}{2} \overline{e}^T Q \overline{e} + \frac{1}{2} \times \\ &2 \overline{e}^T P \cdot [(\overline{W}^T \cdot \overline{h}(\ast) + \overline{\epsilon}_f) - (\underline{W}^T \cdot \underline{h}(\ast) + \underline{\epsilon}_f)] = \\ &-\frac{1}{2} \overline{e}^T Q \overline{e} + \frac{1}{2} \times 2 \overline{e}^T P \cdot [(\overline{W}^T - \underline{W}^T) \cdot \overline{h}(\ast) + (\overline{h}(\ast) - \\ &\underline{h}(\ast)) \cdot \underline{W} + \overline{\epsilon}_f - \underline{\epsilon}_f] + \frac{1}{2} \times [\overline{e}^T P \cdot (\overline{G} - G)^T + \\ &(\overline{G} - G)^T \cdot P \overline{e}] \end{aligned} \quad (37)$$

定义权重的误差上界表达式为:  $\overline{e}_w = \overline{W} - \underline{W}$ 。由于基函数都是有界的, 则  $\overline{h}(\ast) - \underline{h}(\ast)$  同样有界, 可将其表示为  $\|\overline{h}(\ast) - \underline{h}(\ast)\| \leq \overline{h}_m$ ; 逼近误差也是有界的, 则  $\|\overline{\epsilon}_f - \underline{\epsilon}_f\| \leq \Delta \overline{\epsilon}_{fm}$ 。

由瑞利不等式可知:

$$0 < \lambda_{\min}(Q) \cdot \|\overline{e}\|^2 \leq \overline{e}^T Q \overline{e} \leq \lambda_{\max}(Q) \cdot \|\overline{e}\|^2 \quad (38)$$

定义新变量  $Z$ , 则:

$$(\overline{h}(\ast) - \underline{h}(\ast)) \cdot \underline{W} + \overline{\epsilon}_f - \underline{\epsilon}_f \leq \overline{h}_m \cdot \underline{W} + \Delta \overline{\epsilon}_{fm} = Z \quad (39)$$

由上述不等式可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q) \cdot \|\overline{e}\|^2 + \overline{e}^T P \cdot [\overline{e}_w \cdot \overline{h}(\ast) + Z] \leq \\ &-\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q) \cdot \|\overline{e}\|^2 + \lambda_{\max}(p) \cdot \|e\| \cdot [\overline{e}_w \cdot \overline{h}(\ast) + Z] \leq \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{2}\lambda_{\min}(Q)\|\bar{e}\|\cdot\left[\|\bar{e}\|+\frac{\lambda_{\max}(p)}{\lambda_{\min}(Q)}(-2\bar{e}_w\cdot\bar{h}(\ast)-2Z)\right]\leq$$

$$-\frac{1}{2}\lambda_{\min}(Q)\|\bar{e}\|\cdot$$

$$\left[\|\bar{e}\|+\frac{\lambda_{\max}(p)}{\lambda_{\min}(Q)}[(\bar{e}_w-\bar{h}(\ast))^2-h^2(\ast)-2Z]\right] \quad (40)$$

因此,当满足以下条件时:

$$\begin{cases} \|e\| > \frac{\lambda_{\max}(p)}{\lambda_{\min}(Q)}\cdot\bar{h}^2(\ast)+2\frac{\lambda_{\max}(p)}{\lambda_{\min}(Q)}Z \\ \|e_w\| < \sqrt{h^2(\ast)-2Z}-\bar{h}(\ast) \end{cases} \quad (41)$$

可得:  $V\cdot\dot{V}<0$ , 即所提出的神经网络自适应区间观测器满足稳定性准则。

### 3.3 基于上下界区间的状态估计值

区间观测器估计出系统状态值上下界后,可根据上下界区间使用加权估计法估计位于上下界区间的状态值  $\hat{x}$ 。存在一个加权系数  $\alpha$ , 其中  $\alpha$  由系统的输出以及状态估计值的上下界计算得出:

$$\alpha = \frac{y - c\bar{x}}{C(x - \bar{x})} \quad (42)$$

由加权估计方法可估计出系统状态值为:

$$\hat{x} = \alpha\bar{x} + (1 - \alpha)\bar{x} \quad (43)$$

## 4 仿真分析

为了对本文所提出的观测器及控制器的有效性和可靠性进行验证,根据实际卷绕设备,利用 Simulink 仿真软件搭建观测器和控制器模型,对控制方法进行仿真验证。其中仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 卷绕系统参数表

参数	单位	标称值
$E$	$N/m^2$	$3.2 \times 10^8$
$S$	$m^2$	$5 \times 10^{-6}$
$\rho$	$kg/dm^2$	400
$b$	$m$	0.1
$b_f$	$N \cdot m/rad/s$	0.004 5
$L$	$m$	1
$\epsilon$	$kg \cdot dm$	$3.84 \times 10^{-3}$
$\delta$	$m$	$1.2 \times 10^{-3}$
$J$	$kg \cdot dm^2$	$5 \times 10^{-4}$
$R_2$	$m$	0.2
$F_0$	$N$	10
$V_0$	$dm/s$	0.2

### 4.1 区间状态观测器仿真

根据表 1 中的参数、卷绕系统动态过程数学模型以及式(21)、(22)搭建观测器模型,并对其进行仿真分析。取观测器增益矩阵  $L$  为:  $[60, -30]^T$ ,  $L$  使  $A_c$  为 Metzler 矩阵。

以  $u = t^{0.6}$  作为输入信号,得到卷绕系统材料张力和收卷速度的状态曲线。

取状态初始值  $x(0) = [0, 0]^T$ ,  $\bar{x}(0) = [0, 6]^T$ ,  $\underline{x}(0) = [0, -2]^T$ 。神经网络权值自调整参数矩阵  $\bar{F}_1 = F_1 = diag[15 \times 10^4]$ ,  $\bar{F}_2 = F_2 = diag[15 \times 10^4]$ ; 衰减系数  $\bar{\rho}_1 = \rho_1 = 0.001$ ,  $\bar{\rho}_2 = \rho_2 = 0.001$ 。材料张力实际值与观测值如图 4 所示,材料收卷速度的实际值与观测值如图 5 所示。

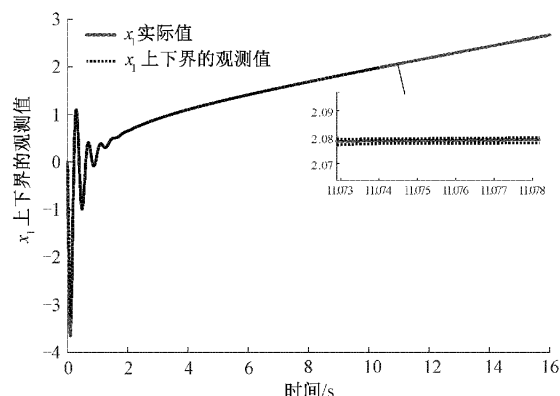


图 4 区间观测器张力上下界估计曲线

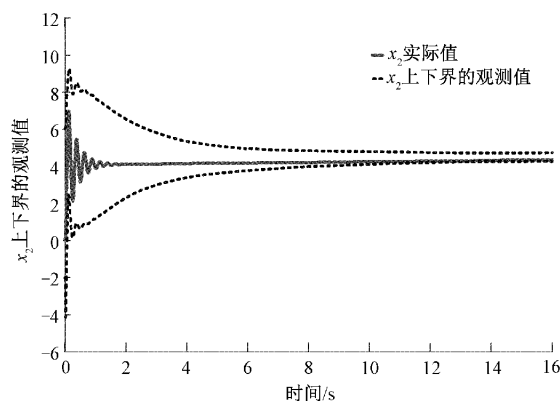


图 5 区间观测器速度上下界估计曲线

由图 4 和 5 可知,卷绕系统的材料张力和收卷速度的实际值均在观测器观测的状态值上下界区间之间,设计的神经网络区间观测器能够对卷绕系统状态值的上下界进行准确估计。

### 4.2 控制器性能分析

为验证本文设计的改进反演终端滑模控制器的性能,将其应用于本文卷绕系统张力控制,并与常规反演终端滑模控制器和传统 PID 控制器进行比较。为进一步突出本文所设计的改进快速终端滑模面的优越性,根据参考文献[20]中所提出的改进快速终端滑模面,构建了相同结构的反演终端滑模控制器,并将其应用于张力控制系统中,从而将上述四种控制器的张力控制性能进行比较。

改进反演终端滑模的滑模面为式(11)所示,常规终端滑模的滑模面为式(10)所示,上述滑模控制器均采用等速

趋近率。本文采用的改进反演终端滑模控制器参数为： $\alpha = 13, \beta = 0.6, \kappa = 3/1 = 3, \gamma = 9/5 = 1.8, k = 10$ 。本文采用的传统 PID 控制器参数为： $K_p = 4, K_i = 1.5, K_d = 1$ 。

卷绕系统启动,设定给定张力为 10 N,比较三种控制器的控制效果,卷料上张力和收卷速度变化分别如图 6 和 7 所示。由图 6 可知,传统的 PID 控制器相较于滑模控制器,张力跟踪性能较差,调节时间较长,其应用于卷绕系统并不能实现良好的控制效果。

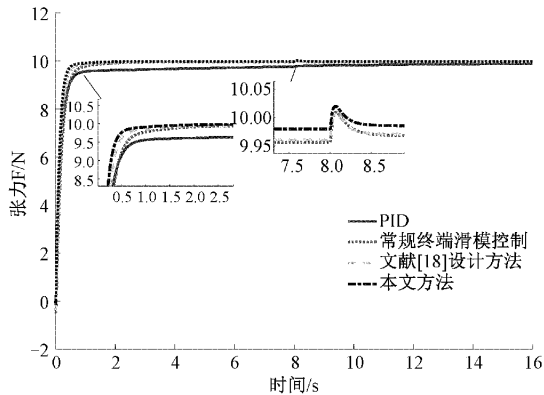


图 6 材料张力对比曲线

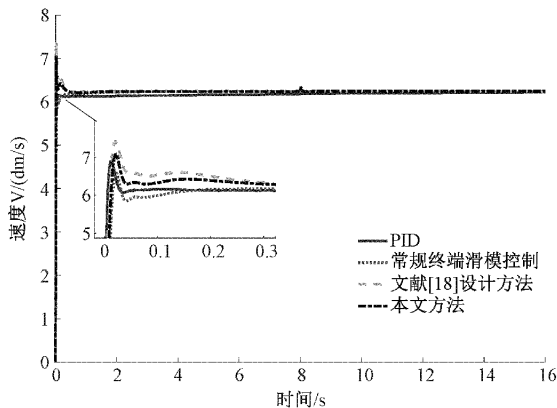


图 7 收卷速度对比曲线

对比 3 种滑模控制器,改进的滑模控制器和传统的滑模控制器,由图 6 得,系统启动后,常规的滑模控制器张力在 3.5 s 趋于稳定,应用文献[20]滑模面的滑模控制器张力在 2.4 s 趋于稳定,本文设计的控制器张力在 1.6 s 趋于稳定,本文所设计的控制方法相较于常规的滑模控制器和应用文献[20]滑模面的滑模控制器,其调节时间分别减少了 57% 和 33%。

由图 6 可明显看出:传统的滑模控制器张力跟踪时间较长,存在一定的静差;本文设计得滑模控制器响应速度较快,相较于其他两种滑模控制器,该控制器能在更短时间内使材料张力到达稳态值且跟踪精度更高。

卷绕系统刚启动时,由于材料处于松弛状态,材料的收卷速度会出现较大波动,由图 7 可知,传统的 PID 控制器控

制效果较差,改进的滑模控制器相较于传统的滑模控制器能够较快的使收卷速度趋于稳定。

为验证控制器的抗扰性能,在 8 s 时在系统中加入一个幅值为 0.1 的未知持续扰动,由图 6 可看出,本文设计的终端滑模控制器能够使张力较快的恢复稳态,鲁棒性能更好。

根据图 8 可以看出,卷绕系统启动开始,经过 1.6 s 后,本文设计的滑模控制器使张力误差收敛至零,相较于其他 3 种控制器,响应速度最快,调节能力最强,能够使张力控制系统在短时间回到稳态运行状态。本文设计的滑模控制器可使张力控制系统具有良好的动态调节能力,使卷绕设备稳态运行能力得到提高,实现卷绕设备的恒张力控制。综上所述,本文设计的控制方法最优。

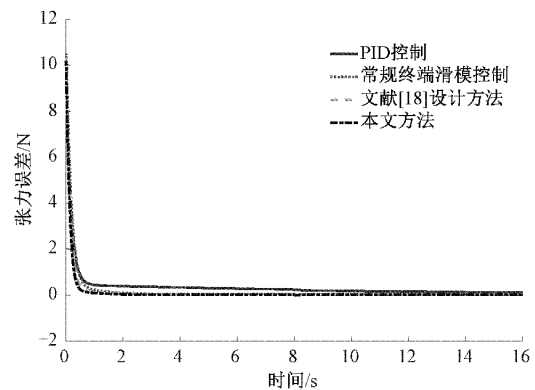


图 8 张力误差曲线

## 5 实验验证

为验证本文方法可行性,对本文方法进行实验验证,卷绕设备平台如图 9 所示,主要包括收卷电机、磁粉离合器、收卷辊、牵引电机、控制台等。磁粉离合器选用空心轴外壳旋转磁粉离合器(CJKX 型),卷绕设备张力控制系统原采用 PID 控制。

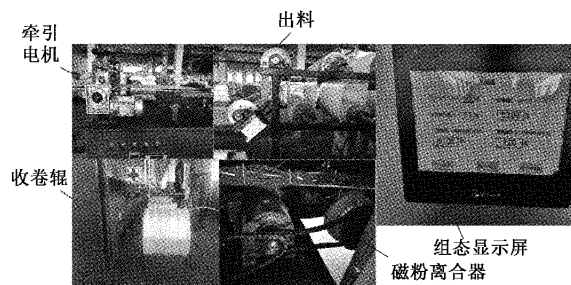


图 9 卷绕设备现场

本次实验设定给定张力为 30 N,稳定运行到 30 s 时,通过显示屏操作界面将给定张力突然减到 18 N,原 PID 控制的实验结果和本文方法的实验结果分别如图 10 和 11 所示。



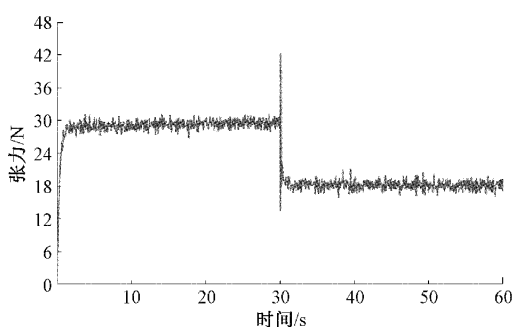


图 10 PID 控制的实验结果

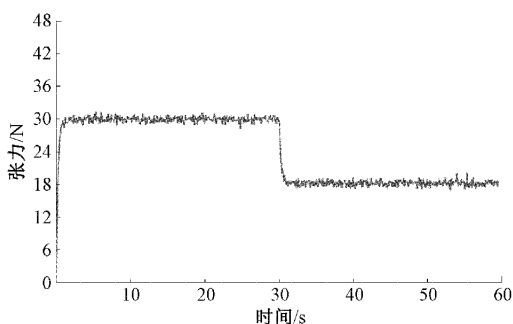


图 11 本文设计方法的实验结果

由图 10 可知, PID 张力控制系统的卷料张力受扰动影响较大, 跟踪到张力给定值的速度较慢, 当张力给定值突减时, 存在较大的超调, 鲁棒性差。由图 11 可知, 应用本文设计的控制方法, 卷料张力可以快速跟踪到给定值, 受扰动影响较小, 在张力给定值突变时, 超调量小。对比图 10 和 11 的实验结果, 相较于 PID 控制, 本文所提出的控制方法鲁棒性能好、系统响应快、控制精度高, 符合实际生产的要求。

## 6 结 论

针对卷绕系统由系统参数时变性以及状态变量之间的强耦合造成的控制精度低, 动态调节能力差的问题, 本文提出了一种基于神经网络区间观测器和改进反演非奇异快速终端滑模控制器的卷绕系统恒张力控制方法。

对卷绕系统进行建模, 构建卷绕系统的卷料张力与收卷速度之间的数学关系。通过神经网络逼近出半径、转动惯量等时变参数引起的未知响应并根据逼近的值构建区间观测器, 实现对卷绕系统卷料张力、卷绕速度的观测。利用 Lyapunov 稳定性定理证明了该区间观测器的稳定性, 保证了卷绕系统张力控制的可靠性。

通过构建新的滑模面函数, 改进传统的非奇异快速终端滑模控制器, 在保证张力跟踪误差在有限时间内收敛到零的同时加快了收敛速度, 并将反演控制算法与非奇异快速终端滑模控制相结合, 有效提高了整个系统的鲁棒性和稳定性。利用 Lyapunov 稳定性定理证明了设计的反演非

奇异快速终端滑模控制器的稳定性, 保证了整个卷绕系统的可靠运行。

通过仿真证明, 本文设计的神经网络区间观测器能够有效地对系统状态值进行估计, 提高了整个系统的控制精度; 相比于传统的终端滑模控制, 改进滑模面的非奇异快速终端滑模控制器能够更快速的使误差收敛, 响应速度更加快速, 对于整个卷绕系统使其具有较强的鲁棒性, 通过实验验证了所提出控制方法的有效性。

## 参考文献

- [1] XIAO Y J, HUANG S J, CHEN H, et al. Research on tension control strategy of battery pole-piece winding and unwinding system based on fault-tolerant control[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15(1): 5073-5078.
- [2] 胡军剑. 大惯性电液张力模拟绞车系统的动特性及张力控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [3] 侯海良, 年晓红, 彭智, 等. 三电机卷绕系统的状态反馈鲁棒控制—LMI 方法[J]. *电机与控制学报*, 2016, 20(7): 111-118.
- [4] 周锋, 郑丽霞, 沈焯超, 等. 基于自适应反演的超细金刚线张力控制系统[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(24): 2995-3000, 3007.
- [5] WEIHAI C, XIANTAO S, WENJIE C, et al. Nonlinear web tension control of a roll-to-roll printed electronics system[J]. *Precision Engineering*, 2022, 76: 88-94.
- [6] 李鹏飞, 高文根, 张港, 等. 基于改进 SMO 的无传感器 IPMSM 转子位置估计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(9): 65-72.
- [7] 楚晓艳, 年晓红, 刘静静. 基于鲁棒滑模观测器的多电机卷绕系统故障检测和隔离[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(6): 795-804.
- [8] 郁明, 李旺林, 蓝盾. 基于优化自适应阈值的非线性机电系统传感器故障检测和主动容错控制[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(4): 26-37.
- [9] 蒋林军, 张华. 无传感参数自适应纱线卷绕张力控制方法[J]. *纺织学报*, 2022, 43(4): 167-173.
- [10] 何忠伟. 区间观测器及其控制系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [11] 付光杰, 潘海龙. 基于神经网络观测器的 PMSM 无传感器矢量控制[J]. *国外电子测量技术*, 2018, 37(5): 98-101.
- [12] 易泽仁, 谢巍, 刘龙文, 等. 一类非线性系统的神经网络自适应区间观测器设计[J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(10): 1730-1736.

- [13] 武晨,谷松原,房圣超. HBF 神经网络的一种结构自适应在线学习算法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(5):486-495.
- [14] 徐托,瞿少成,王安等. 基于模糊 PID 的室内空气质量测控系统[J]. 电子测量技术, 2022, 45(7):62-67.
- [15] 禹聪,康尔良. 永磁同步电机模糊滑模速度控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(7):98-104.
- [16] YANG L, YANG J. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(16):1865-1879.
- [17] 戚荣志,丁力. 绳驱动空中机械臂的自适应分数阶终端滑模控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6):206-213.
- [18] 张学恒,赵麒,毋天峰,等. 基于磁粉离合器的电解电容卷绕张力系统研究[J]. 微处理机, 2021, 42(3):39-43.
- [19] 常雪剑,刘凌,崔荣鑫. 永磁同步电机非奇异快速终端可变边界层滑模控制[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6):53-59.
- [20] 凌辉,杜钦君,庞浩,等. 基于改进终端滑模控制器和 SMO 的 SRM 瞬时转矩控制[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1-17[2023-10-08]. DOI:10.13700/j. bh. 1001-5965. 2022. 0021.

#### 作者简介

庞浩, 硕士, 主要研究方向为自动化技术与装置。

E-mail: panghao2000@126. com

杜钦君(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为机器人技术、电机及驱动控制技术。

E-mail: duqinjun@sdut. edu. cn