

DOI: 10.3901/JME.2021.24.074

# 基于神经网络的缠绕过程张力积分鲁棒控制\*

米君杰<sup>1</sup> 姚建勇<sup>1</sup> 邓文翔<sup>1,2</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院 南京 210094;

2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

**摘要:** 纤维缠绕系统是典型的非线性系统, 缠绕过程张力控制精度决定了缠绕制品成型品质, 然而系统非线性特性、摩擦及外干扰等严重制约了缠绕过程张力控制性能的提升。目前现有方法主要以收/放卷两轴同步控制为基础, 通过解耦等复杂操作展开张力控制研究, 计算量大且不利于控制算法的应用。为了避免上述问题并准确描述缠绕系统张力产生机理和实际的摩擦特性, 建立简化的缠绕系统非线性数学模型。同时以自适应作为神经网络权值训练方法, 基于自适应神经网络设计出干扰量的逼近函数, 在基于连续积分鲁棒(RISE)控制器设计的控制律中补偿扰动的影响, 并基于 Lyapunov 稳定性理论证明了系统的渐近稳定性。最后, 给出所提出控制器与现有方法的对比验证实例, 结果表明所提出基于神经网络扰动补偿的积分鲁棒控制显著增强了系统抑制外干扰的能力, 提升了张力控制精度。

**关键词:** 缠绕张力; 张力控制; 神经网络; 干扰补偿; 积分鲁棒控制; 参数自适应

**中图分类号:** TP137

## Neural Network Based RISE Control of Winding Tension

MI Junjie<sup>1</sup> YAO Jianyong<sup>1</sup> DENG Wenxiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094;

2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** Filament winding system is a typical nonlinear system. Tension control accuracy of the winding process determines the quality of the winding product. However, the nonlinear characteristics, friction and external interference of the system severely restrict the improvement of the tension control performance of the winding process. At present, the existing methods are mainly based on the synchronous control of the rewinding and unwinding axes, and the tension control research is carried out through complex operations such as decoupling. The calculation is large and is not conducive to the application of control algorithms. In order to accurately describe the tension generation mechanism and actual friction characteristics of the winding system, a uncomplicated nonlinear mathematical model of the winding system is established. Meanwhile, taking adaptive method as the neural network weights training procedure and the approximation function of the disturbance based on the adaptive neural network is designed. Therefore, the disturbance can be compensated at the control law of the continuous robust integral of the sign of the error (RISE) controller. Based on the Lyapunov stability theory, the asymptotic stability of the system is proved. Finally, a comparison verification example between the proposed controller and the existing methods is given. Results show that the proposed method of RISE controller based on adaptive neural network disturbance compensation significantly enhances the system's ability to suppress external disturbances, and improves the system control accuracy.

**Key words:** winding tension; tension control; neural networks; disturbance compensation; RISE; parameter adaptive

## 0 前言

随着对于作动系统与设备轻量化要求的不断提

高, 如今解决结构如何减重并提升功重比这一问题的  
重要性日益凸显。纤维增强材料由于其密度、弹性模量、抗拉强度等材料特性显著优于传统金属材料, 因此广泛应用于结构轻量化设计中。纤维缠绕技术<sup>[1]</sup>起步于 20 世纪 40 年代, 目前是较为常见的生产技术之一<sup>[2-3]</sup>。进入 90 年代后, 多轴缠绕机相

\* 国家重点研发计划资助项目(2018YFB2000702)。20210531 收到初稿, 20211025 收到修改稿

继问世, 缠绕技术发展进入全新阶段。随着数控技术的不断完善, 缠绕过程中位置控制已达到较高水平。但由于张力产生机理的复杂性与强非线性, 缠绕过程中的张力控制一直是影响成型品质的关键。

MATHUR 等<sup>[4]</sup>于 1998 年提出了较为完善的缠绕过程张力控制模型, 并首次给出了卷径随时间变化的公式。BAUMGART 等<sup>[5-7]</sup>将鲁棒控制应用于缠绕过程中张力控制, 考虑了空气夹带效应(Air entrainment), 利用 Lyapunov 函数证明其稳定性, 并于 2004 年, 提出了利用状态观测器的方法, 并验证了其可行性, 后续又研究了有限时限稳定下缠绕过程的控制器设计问题。2007 年, PAGILLA 等<sup>[8]</sup>首次将分区理念应用于长距离缠绕, 把缠绕过程中每两个导轮之间的材料单独建立数学模型进行控制器设计。LEVINE 等<sup>[9]</sup>于 2013 年提出将微分平坦和反馈线性化相结合应用于缠绕系统, 并验证了其可行性。霍海梁等<sup>[10]</sup>于 2016 年提出了建立鲁棒张力观测器用于缠绕系统。上述学者的研究方法使得张力控制进入了非线性研究阶段, 但考虑收/放卷轴进行同步控制所带来的速度环和张力环的解耦困难性, 与长距离缠绕的分区理念带来的建模复杂性, 很大程度上限制了更多算法的应用。

外干扰是系统模型不确定性的重要组成部分。20 世纪 90 年代开始, 非线性算法得到迅速发展。其中, 滑模控制(SMC)由于结构简单、能有效处理任何有界模型不确定性、渐进跟踪性能较好等特点, 得到广泛应用。但由于传统滑膜控制存在不连续问题, 因此衍生了很多滑模控制的变形形式, 其中关于高阶滑膜控制<sup>[11-12]</sup>的方法得到尤为广泛的关注。近年来, 一种基于误差信号的连续积分鲁棒(RISE)控制<sup>[13]</sup>策略被提出, 其中包含了积分信号反馈项用以处理模型不确定性, 该方法已被成功应用于液压系统中<sup>[14]</sup>。与此同时, 模型不确定性作为影响控制效果的主要因素, 一直得到广泛关注。由 KHALIL<sup>[15]</sup>提出的基于观测器的控制理念在近年来得到不断发展, 基于扩张状态观测器(ESO)处理外部干扰<sup>[16]</sup>的方法得到验证。LEWIS 等<sup>[17]</sup>首次提出了利用神经网络逼近的方法, 以两连杆机械臂为对象, 补偿在机械臂控制过程中所受到的外部扰动, 为后续神经网络的应用提供了理论基础。姚志凯等<sup>[18]</sup>于 2018 年将其应用于液压系统中用以估计模型不确定性, 并与自适应控制相结合, 通过试验分析验证了其有效性。

本文重新建立了一种考虑连续外部干扰与摩擦补偿下的缠绕系统数学模型, 与传统张力控制模型

相比较为简单, 且不需要进行速度环与张力环解耦。利用神经网络逼近模型并补偿扰动等不确定性项, 基于 RISE 控制器设计出实际控制率, 两者相结合, 使系统达到渐近稳定, 并得到相较于以往控制算法更优的控制效果, 且一定程度上简化了张力控制设计过程, 为更多算法实际应用提供理论依据。

## 1 缠绕系统数学模型

缠绕系统一般性结构如图 1 所示, 一般为两伺服电机分别驱动收、放卷轴, 通过调节两轴收、放卷端线速度之差从而产生位移差进而产生合适张力, 以满足生产需求。

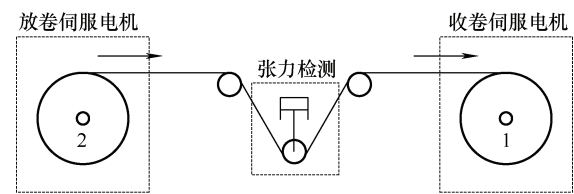


图 1 缠绕系统结构简图

### 1.1 张力环数学模型

张力主要由收、放两端位移差产生。典型放卷端材料放卷规律如图 2 所示, 由于丝带类材料在生产时是在基材上从一端至另一端均匀排布, 因此放卷轴在放线过程中材料会产生左右的移动, 从而放卷端至导丝头部分长度  $S_i$  会由于材料在放卷时的左右移动而产生变化, 从而导致材料整体跨距长度的变化, 进而影响张力大小。

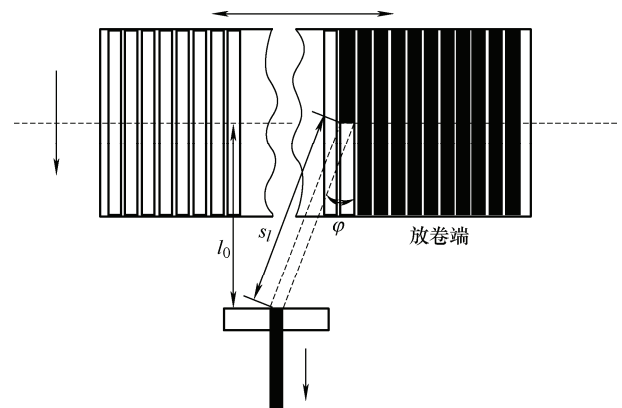


图 2 放卷过程材料左右横移引起整体跨距长度变化

跨距变化部分长度

$$S_i(t) = \frac{l_0}{\cos[\varphi(t)]} \quad (1)$$

以从左向右为一个放卷周期为例, 式(1)中放卷处纤维和垂直于轴线的夹角  $\varphi(t)$  与其相关表达式

$$\begin{cases} \varphi(t) = \arctan \frac{\left| \frac{L}{2} - \int_0^{t_L} v_{2z} d\tau \right|}{l_0} \\ v_{2z}(t) = \frac{b \cos\left(\arcsin \frac{b}{2\pi r}\right) \omega_2(t)}{2\pi} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $t_L$  为一个放卷周期所用时间,  $b$  为材料宽度,  $\omega_2$  为放卷轴角速度,  $v_{2z}$  为放卷端材料水平移动线速度。在  $r=0.1$ ,  $b=0.01$ ,  $l_0=0.5$ ,  $L=0.745$ , 单位: mm, 放卷轴角速度如图 3 所示的工况下, 对张力的影响如图 4 所示。

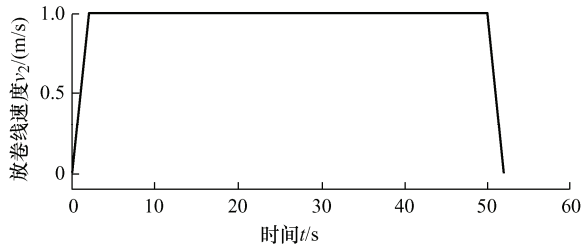


图 3 放卷端线速度曲线

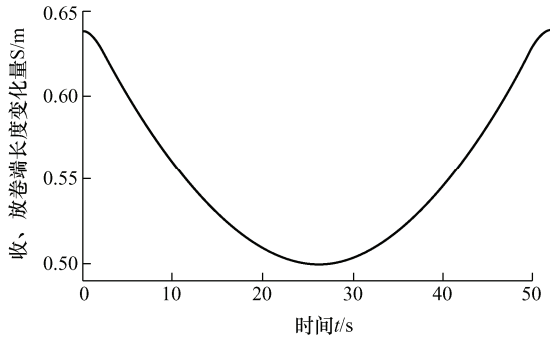


图 4 收、放卷端长度变化量

根据文献[4]并结合上述分析可知, 材料在放卷轴的左右移动是影响张力控制的关键因素, 因此材料跨距长度与张力数学模型可表示为

$$S(t) = S_0 + \int_{t_0}^t (r_1 \omega_1 - r_2 \omega_2) d\tau + S_l(t) \quad (3)$$

$$T(t, \omega_1) = \frac{EA}{S_0} S(t) + A(t, \omega_1) \quad (4)$$

式中,  $r_i$  与  $\omega_i, i=1,2$  分别表示收、放卷半径、角速度;  $E$  代表材料弹性模量,  $A$  为材料横截面积,  $S_0$  为跨距固定部分长度,  $A$  为由未建模不确定性等带来的建模误差。

## 1.2 速度环数学模型

缠绕系统主要由电机作为主要动力源, 驱动转轴转动达到卷绕目的。假设此系统中放卷轴电机转速已得到有效控制, 且转速可测得。因此针对收卷轴建立数学模型

$$J \dot{\omega}_1 = K_i u - B \omega_1 - r_1 T - F_f(\omega_1) - \Delta_2(t, T, \omega_1) \quad (5)$$

式(5)中,  $J$  为收卷轴转动惯量,  $K_i$  代表单位输入电压下的力矩常数,  $u$  为控制输入,  $B$  为黏性摩擦与模型阻尼结合的等效系数,  $F_f(\omega_1)$  为静摩擦效应,  $\Delta_2(t, T, \omega_1)$  表示不确定性非线性。

根据文献[19-20]得到摩擦模型

$$\begin{aligned} F_f(\omega_1) &= a_1 \tanh(c_1 \omega_1) + \\ &a_2 [\tanh(c_2 \omega_1) - \tanh(c_3 \omega_1)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $a_i$ 、 $c_i$  代表不同的摩擦等级,  $c_i, i=1,2,3$  定义为近似各种摩擦效应的形状系数。

结合式(6), 并令  $S_f(\omega_1) = \tanh(c_1 \omega_1)$ ,  $P_f(\omega_1) = \tanh(c_2 \omega_1) - \tanh(c_3 \omega_1)$ , 式(5)可改写为

$$J \dot{\omega}_1 = K_i u - B \omega_1 - r_1 T - a_1 S_f(\omega_1) - a_2 P_f(\omega_1) - \Delta_2(t, T, \omega_1) \quad (7)$$

## 1.3 缠绕系统状态空间方程

由于纤维缠绕过程中转轴半径变化不连续且较为缓慢, 因此不考虑半径变化情况。定义  $v_2 = r_2 \omega_2$ , 状态变量  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)^T = (T, \omega)^T$ , 参数  $\boldsymbol{\theta}_a = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7)^T = (S_0/EA r_1, v_2/r_1, J/K_i, B/K_i, a_1/K_i, a_2/K_i, r_1/K_i)^T$ , 假设  $A(t, x_2)$  与  $S_l(t)$  可导, 定义

$$\begin{cases} |f_1(x_2)| = \left| \frac{S_0}{EA r_1} (\dot{S}_l + \dot{\Delta}_1) \right| \leq \delta_1 \\ |f_2(\mathbf{x})| = \left| \frac{1}{K_i} \Delta_2 \right| \leq \delta_2 \end{cases} \quad (8)$$

设  $\boldsymbol{\theta}_b = (\theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7)^T$ ,  $\boldsymbol{\phi} = (x_2, S_f, P_f, x_1)^T$  缠绕系统状态空间方程为

$$\begin{cases} \theta_1 \dot{x}_1 = x_2 - \theta_2 - f_1(x_2) \\ \theta_3 \dot{x}_2 = u - \boldsymbol{\theta}_b^T \boldsymbol{\phi} - f_2(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (9)$$

误差信号设计如下

$$\begin{aligned} e_1 &= x_1 - x_{1d} \\ r &= \dot{e}_1 + k_1 e_1 \\ e_2 &= x_2 - \alpha_1 \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $x_{1d}$  为期望张力信号,  $r$  为建立在 1、2 通道之间的辅助误差信号,  $k_1$  为一正可调增益,  $\alpha_1$  为由反步法设计出的虚拟控制率, 本文中定义  $\dot{\bullet} = \hat{\bullet} - \bullet$ 。

## 2 神经网络设计

模型不确定性项  $f_1$ 、 $f_2$  若不予以有效处理, 会严重影响系统鲁棒性, 导致控制效果欠佳。神经网络

络(NN)可以用以近似平滑方程<sup>[17-18]</sup>, 即方程相对时间的一阶微分不存在突变, 三层或更多的神经网络结构可达到更好的近似效果。本文采用三层径向基(RBF)神经网络, 如图 5 所示, 由输入层、隐藏层和输出层组成。

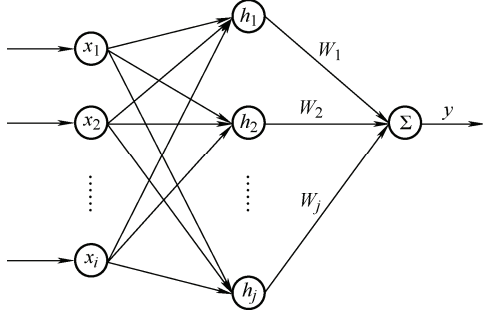


图 5 三层径向基(RBF)神经网络结构

根据式(8),  $f_1, f_2$  可表述为

$$\begin{cases} f_1(x_2) = \mathbf{W}_1^T \mathbf{h}_1(x_2) + \varepsilon_1 \\ f_2(\mathbf{x}) = \mathbf{W}_2^T \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)^T$ ,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  是方程近似误差且  $\varepsilon_1$  二阶可导,  $\mathbf{W}_1^T, \mathbf{W}_2^T$  是理想常值权重向量,  $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2$  为激励函数向量, 且函数表达式为

$$h_{ij} = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \boldsymbol{\varpi}_{ij}\|^2}{2p_i^2}\right) \quad (12)$$

式(12)中,  $i=1,2$  表示近似方程的个数,  $j=1,2,\dots,m$  表示隐藏层的数目,  $\boldsymbol{\varpi}_{ij}$  为非负常数,  $p_i$  为正常数, 且方程近似误差满足条件

$$|\varepsilon_1| \leq \zeta_{1a} \quad |\dot{\varepsilon}_1| \leq \zeta_{1b} \quad |\varepsilon_2| \leq \zeta_2 \quad (13)$$

基于式(10)、(11)与(12), 三层 RBF 神经网络实际输出为

$$\begin{cases} \hat{f}_1(x_2) = \hat{\mathbf{W}}_1^T \mathbf{h}_1(x_2) \\ \hat{f}_2(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{W}}_2^T \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\hat{\mathbf{W}}_1^T, \hat{\mathbf{W}}_2^T$  为权值估计值, 权值自适应律如下所示

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{W}}}_1 = \text{proj}\{-\boldsymbol{\Gamma}_1 \dot{\mathbf{h}}_1 r \theta_3\} \\ \dot{\hat{\mathbf{W}}}_2 = \text{proj}\{-\boldsymbol{\Gamma}_2 \mathbf{h}_2 (e_2 + r)\} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $\boldsymbol{\Gamma}_1, \boldsymbol{\Gamma}_2$  为对角自适应律矩阵。

### 3 连续积分鲁棒控制器设计

#### 3.1 基于反步法的虚拟控制率设计

根据式(9)、(10)可得

$$\theta_1 r = k_1 \theta_1 e_1 + e_2 + \alpha_1 - \theta_2 - f_1 - \theta_1 \dot{x}_{1d} \quad (16)$$

根据式(16)可设计虚拟控制量为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_{1a} + \alpha_{1s1} + \alpha_{1s2} \\ \alpha_{1a} = \theta_2 + \hat{f}_1 + \theta_1 \dot{x}_{1d} \\ \alpha_{1s1} = -(k_r + k_1 \theta_1) e_1 \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $\alpha_{1a}$  为模型补偿项,  $\alpha_{1s}$  为鲁棒项,  $k_r$  同样为一正可调增益, 将式(17)代入式(16)有

$$\theta_1 r = -k_r e_1 + e_2 + \alpha_{1s2} + \tilde{\mathbf{W}}_1^T \mathbf{h}_1 - \varepsilon_1 \quad (18)$$

由式(18)分析可知, 若神经网络对于模型的近似无误差或者无不确定性非线性等因素, 则不需要非线性鲁棒项  $\alpha_{1s2}$ , 仅靠线性反馈项  $\alpha_{1s1}$  即可使系统达到较好的跟踪效果, 但事实情况下不确定性非线性总是存在。设计基于积分鲁棒的 RISE 项  $\alpha_{1s2}$  为

$$\alpha_{1s2} = -\int_0^t [k_r k_1 e_1 + \beta \text{sgn}(e_1)] d\tau \quad (19)$$

式中,  $\beta > 0$  为积分鲁棒反馈增益,  $\text{sgn}(\bullet)$  为符号函数, 因此可以通过调节增益  $\beta$  的大小以补偿模型不确定性非线性的影响, 同时达到较优跟踪精度。

#### 3.2 实际控制率设计

式(19)代入式(18), 并结合式(10), 求微分可得

$$\begin{aligned} \theta_1 \dot{r} &= \dot{e}_2 - k_r r - \beta \text{sgn}(e_1) + \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_1^T \mathbf{h}_1 + \tilde{\mathbf{W}}_1^T \dot{\mathbf{h}}_1 - \dot{\varepsilon}_1 = \\ \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 - k_r r - \beta \text{sgn}(e_1) &+ \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_1^T \mathbf{h}_1 + \tilde{\mathbf{W}}_1^T \dot{\mathbf{h}}_1 - \dot{\varepsilon}_1 \end{aligned} \quad (20)$$

结合式(9)后可得

$$\begin{aligned} \theta_1 \theta_3 \dot{r} &= -k_r \theta_3 r + u - \theta_b^T \boldsymbol{\phi} - f_2 - \theta_3 \dot{\alpha}_1 - \theta_3 \dot{\varepsilon}_1 - \\ &\theta_3 \beta \text{sgn}(e_1) + \theta_3 \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_1^T \mathbf{h}_1 + \theta_3 \tilde{\mathbf{W}}_1^T \dot{\mathbf{h}}_1 \end{aligned} \quad (21)$$

设控制率为

$$\begin{cases} u = u_a + u_{s1} + u_{s2} \\ u_a = \theta_3 \dot{\alpha}_1 + \theta_b^T \boldsymbol{\phi} + \hat{f}_2 \\ u_{s1} = -k_2 e_2 \\ u_{s2} = -\psi \text{sgn}(e_2 + r) \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $u_a$  作为模型补偿项,  $u_s$  为鲁棒项用以稳定系

统,  $k_2$  为一正可调增益。同时将式(22)代入式(21)中有

$$\begin{aligned} \theta_1 \dot{\theta}_3 \dot{r} = & -k_r \theta_3 r - k_2 e_2 - \varepsilon_2 - \theta_3 \dot{e}_1 - \\ & \psi \operatorname{sgn}(e_2 + r) - \theta_3 \beta \operatorname{sgn}(e_1) + \\ & \theta_3 \dot{\tilde{W}}_1^T \dot{\mathbf{h}}_1 + \theta_3 \tilde{\mathbf{W}}_1^T \dot{\mathbf{h}}_1 + \tilde{\mathbf{W}}_2^T \dot{\mathbf{h}}_2 \end{aligned} \quad (23)$$

对比式(23)与式(20), 可得到  $\dot{e}_2$  表达式为

$$\theta_3 \dot{e}_2 = -k_2 e_2 - \psi \operatorname{sgn}(e_2 + r) + \tilde{\mathbf{W}}_2^T \dot{\mathbf{h}}_2 - \varepsilon_2 \quad (24)$$

## 4 系统稳定性分析

由自适应律式(15), 选择合适的反馈增益  $k_1$ 、 $k_r$ 、 $k_2$  以及  $\beta$  和  $\psi$ , 结合控制率式(22), 总是希望能保证系统所有信号在闭环操作下都是有界的, 同时追踪误差能达到渐进稳定, 即

$$t \rightarrow \infty, \text{有 } e_1 \rightarrow 0 \quad (25)$$

令  $N = \dot{\tilde{W}}_1^T \dot{\mathbf{h}}_1 - \dot{e}_1$ , 且有

$$|N| \leq \varsigma_1 \quad |\dot{N}| \leq \varsigma_2 \quad (26)$$

设辅助函数为

$$L(t) = \theta_3 r [N - \beta \operatorname{sign}(e_1)] \quad (27)$$

若增益  $\beta$  满足如下条件

$$\beta \geq \varsigma_1 + \frac{\varsigma_2}{k_1} \quad (28)$$

则方程  $P(t) > 0$  恒成立

$$P(t) = \beta |e_1(0)| - e_1(0)N(0) - \int_0^t L(\tau) d\tau \quad (29)$$

设计 Lyapunov 函数使其总是正定, 且微分形式恒为负定即可满足系统达到渐近稳定, 设其形式为

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} \theta_3 e_2^2 + \frac{1}{2} \theta_1 \theta_3 r^2 + P + \\ & \frac{1}{2} \theta_3 \tilde{\mathbf{W}}_1^T \Gamma_1 \tilde{\mathbf{W}}_1 + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}}_2^T \Gamma_2 \tilde{\mathbf{W}}_2 \end{aligned} \quad (30)$$

根据式(10)、(23)、(24)与(29), Lyapunov 函数微分形式如下

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_r \theta_3 r^2 + e_1 r - k_2 e_2 r + \\ & (e_2 + r) [-\psi \operatorname{sgn}(e_2 + r) - \varepsilon_2] + \\ & \theta_3 r \tilde{\mathbf{W}}_1^T \dot{\mathbf{h}}_1 + \tilde{\mathbf{W}}_1^T \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_1 + \\ & (e_2 + r) \tilde{\mathbf{W}}_2^T \dot{\mathbf{h}}_2 + \tilde{\mathbf{W}}_2^T \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_2 \end{aligned} \quad (31)$$

结合式(13)、(15), 式(31)可写为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_r \theta_3 r^2 + e_1 r - k_2 e_2 r + \\ & (e_2 + r) [-\psi \operatorname{sgn}(e_2 + r) - \varepsilon_2] = \\ & -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_r \theta_3 r^2 + e_1 r - k_2 e_2 r + \\ & [-\psi |e_2 + r| - \varepsilon_2 (e_2 + r)] \end{aligned} \quad (32)$$

由式(32)可知, 可以通过选择合适的反馈增益  $\psi$  使式(33)恒成立

$$[-\psi |e_2 + r| - \varepsilon_2 (e_2 + r)] \leq \xi \quad (33)$$

式中, 正常数  $\xi > 0$ , 因此式(32)满足如下形式

$$\dot{V} \leq -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_r \theta_3 r^2 + e_1 r - k_2 e_2 r + \xi \quad (34)$$

通过选择合适的反馈增益  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_r$ , 可使系数矩阵  $\mathbf{A}$  定义为如下形式恒为正定

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} k_1 & -1/2 & 0 \\ 0 & k_r \theta_3 & k_2/2 \\ -1/2 & k_2/2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

定义  $\mathbf{z} = [e_1, r, e_2]^T$ , 因此式(33)可写为

$$\dot{V} \leq -\gamma_{\min} \mathbf{A} \|\mathbf{z}\|^2 + \xi \quad (36)$$

式中,  $\gamma_{\min}$  是系数矩阵  $\mathbf{A}$  的最小特征值。

由上述分析可知, 当参数选择合适时, 总是可以使 Lyapunov 函数正定, 其微分形式负定恒成立, 可得到

$$t \rightarrow \infty, V \rightarrow 0, \text{即 } e_1 \rightarrow 0 \quad (37)$$

## 5 验证实例

本部分一共设计了四种控制器以分析验证本文提出的控制方法在缠绕系统中抑制扰动的可行性, 同时对比其他控制方法以体现其更好的控制效果。其中缠绕系统具体参数如表 1 所示。

表 1 缠绕系统参数表

规格参数	数值
杨氏模量 $E/(\text{N/m}^2)$	$1.6 \times 10^{-9}$
材料横截面积 $(\text{A}/\text{m}^2)$	$1.2 \times 10^{-6}$
材料跨距 $S_0/\text{m}$	1.5
放卷线速度 $v_2/(\text{m/s})$	0.5
收卷轴半径 $r_1/\text{m}$	0.1
收卷轴转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.014 6
电压力矩常数 $K_t/(\text{N} \cdot \text{m}/\text{V})$	1
摩擦-阻尼系数 $B$	0.25
摩擦等级系数 $a_1, a_2$	0.02, 0.01
摩擦形状系数 $c_1, c_2, c_3$	700, 15, 1.5

(1) NN-RISE: 这是本文提出应用于缠绕系统的基于自适应神经网络的积分鲁棒控制方法。神经网络隐藏层的数目  $j=5$ , 权值的自适应率对角矩阵  $\Gamma_1=\text{diag}\{5,5,5,5,5\}$ ,  $\Gamma_2=\text{diag}\{6,6,6,6,6\}$ , 权值初向量  $W_1=(0.18,0.18,0.18,0.18,0.18)^T$ ,  $W_2=(0,0,0,0,0)^T$ , 激励函数中的常值参数向量  $\varpi_1=(2,-2,0,1,1)^T$ ,  $\varpi_2=(2,3,2,2,2)^T$ , 其中正常值  $p_1=p_2=5$ , 增益  $k_1=k_r=k_2=\beta=5$ ,  $\psi=0.1$ 。

(2) RISE: RISE 控制器的控制率设计为

$$u = \theta_3 \dot{\alpha}_1 + \theta_b^T \phi - k_2 e_2 \quad (38)$$

其中虚拟控制率

$$\alpha_1 = \theta_2 + \theta_1 \dot{x}_{1d} - (k_r + k_1 \theta_1) e_1 - \int_0^t [k_r k_1 e_1 - \beta \text{sgn}(e_1)] d\tau \quad (39)$$

控制器增益  $k_1 = k_r = k_2 = \beta = 5$ 。

(3) ARC: 自适应鲁棒控制(ARC)控制率

$$u = \hat{\theta}_3 \dot{\alpha}_1 + \hat{\theta}_b^T \phi - k_2 e_2 + u_{s2} \quad (40)$$

其中虚拟控制率

$$\alpha_1 = \hat{\theta}_2 + \hat{\theta}_1 \dot{x}_{1d} - k_1 e_1 + \alpha_{1s2} \quad (41)$$

且式(40)与式(41)中

$$\begin{cases} \left[ \tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_1 \dot{x}_{1d} - f_1 \right] e_1 \leq \mathcal{Q}_1 \\ \left| \tilde{\theta}_2 + \tilde{\theta}_1 \dot{x}_{1d} - f_1 \right| \leq h_{s1} \\ \alpha_{1s2} e_1 \leq 0 \\ \alpha_{1s2} = -\frac{h_{s1}^2}{4\mathcal{Q}_1} e_1 \end{cases} \quad (42)$$

$$\begin{cases} \left[ \tilde{\theta}_3 \dot{\alpha}_1 + \hat{\theta}_b^T \phi - f_2 \right] e_2 \leq \mathcal{Q}_2 \\ \left| \tilde{\theta}_3 \dot{\alpha}_1 + \hat{\theta}_b^T \phi - f_2 \right| \leq h_{s2} \\ u_{s2} e_2 \leq 0 \\ u_{s2} = -\frac{h_{s2}^2}{4\mathcal{Q}_2} e_2 \end{cases} \quad (43)$$

控制器增益  $k_1 = k_2 = 10$ , 参数初值大小为  $\theta_a = (7 \times 10^{-3}, 1, 0.01, 0.1, 0.1, 0.1, 0)^T$ , 参数自适应律矩阵  $\Gamma = \text{diag}\{200, 1\ 000, 30, 10, 100, 500\ 000, 100\}$ , 其中对于系统参数估计的上界设定为  $\theta_{a\max} = (1 \times 10^{-2}, 10, 0.2, 1, 0.5, 0.1, 0.5)^T$ , 下界设定为

$$\theta_{a\min} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T。$$

(4) NN-ARC: 将自适应神经网络与自适应鲁棒控制相结合, 对比 NN-RISE, 各参数与控制率参考方法(1)和(3)。

(5) PID: 比例积分微分(PID)控制作为传统线性控制器, 广泛应用于工程领域。本文中 PID 控制增益为  $k_p = 4\ 000$ ,  $k_i = 10$ ,  $k_d = 0$ 。

令缠绕系统的期望张力跟踪曲线为  $x_{1d} = 2.5 \times [1 - \cos(2t)] \times [1 - \exp(-t)]$ , 如图 6 所示。系统所受扰动  $f_1 = 0.01x_2$ ,  $f_2 = 0.1x_1x_2$ 。在有无扰动情况下, RISE、ARC 与 PID 控制算法的控制效果如图 7、8 所示。

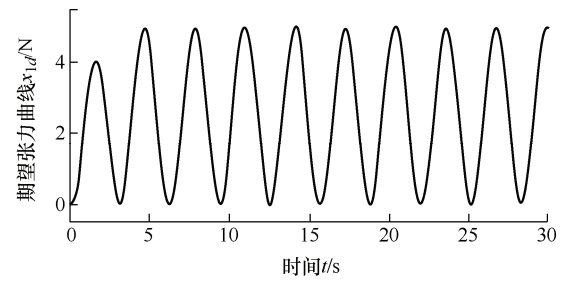


图 6 期望张力曲线图

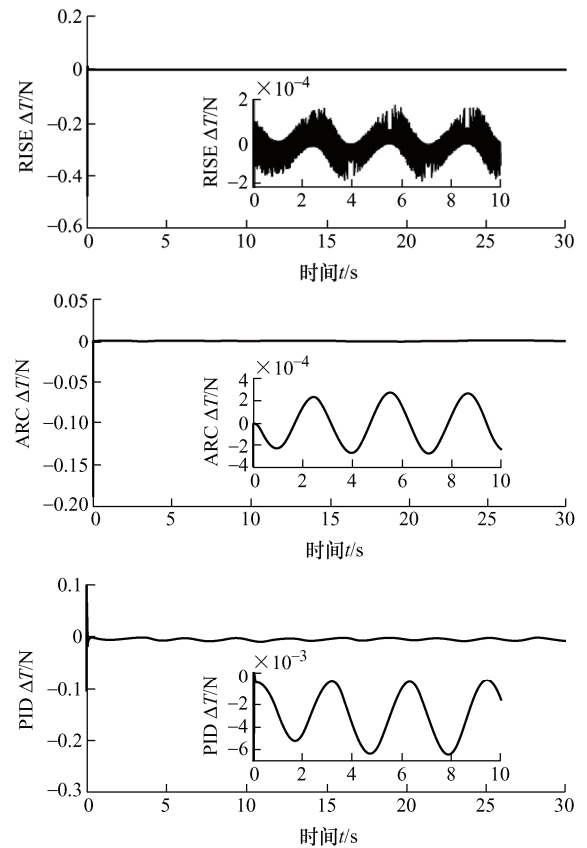


图 7 无扰动情况下跟踪误差曲线



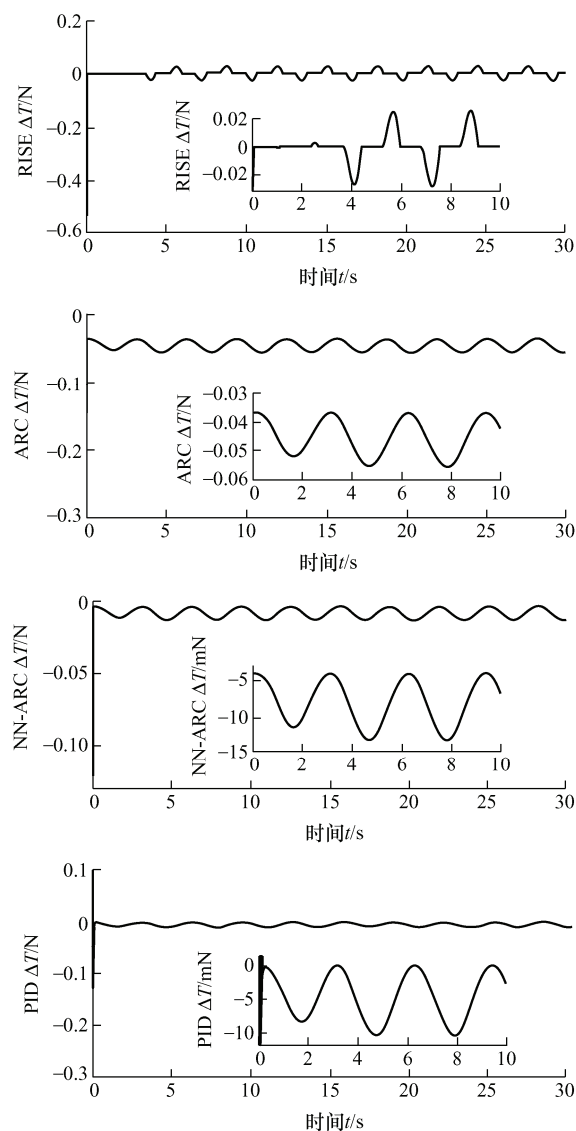


图 8 有扰动情况下跟踪误差曲线

在 RISE 基础之上加入神经网络算法以逼近干扰, 从而在控制率中使其得到补偿, 提升控制效果, 跟踪误差如图 9 所示, RISE 与 NN-RISE 控制效果对比如图 10 所示, 其中对模型不确定性的估计补偿如图 11、12 所示。

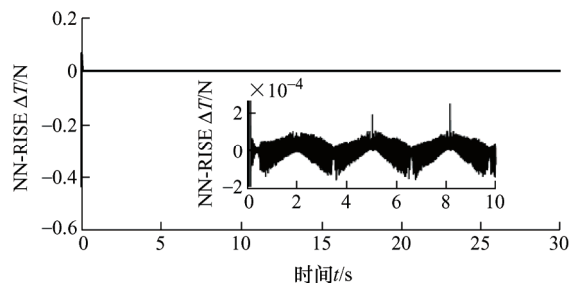


图 9 有扰动情况下 NN-RISE 跟踪误差曲线

通过试验对比分析可知, 在无干扰情况下, 基于模型的 RISE、ARC 以及 PID 控制方法的跟踪效果均处于较高水平, 且 RISE 的控制效果最优。其

中, RISE 与 ARC 的跟踪精度均在  $10^{-4}$  数量级, 且 RISE 的精度可以达到  $\pm 1.8 \times 10^{-4} N$ , ARC 精度在  $\pm 2.2 \times 10^{-4} N$ , PID 下的跟踪精度也能达到  $10^{-3}$  数量级。

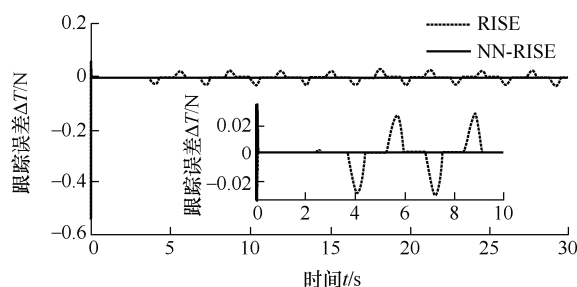
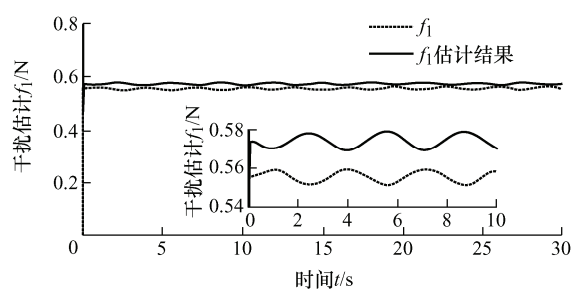
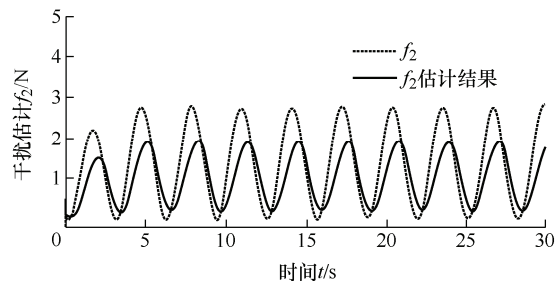


图 10 有扰动下 RISE 与 NN-RISE 跟踪误差对比图

图 11 扰动项  $f_1$  的估计结果图 12 扰动项  $f_2$  的估计结果

当引入干扰项时, 在保持参数不变的情况下, 基于模型的控制方法跟踪效果均受到明显影响, 且 RISE 所受影响最大, 控制效果明显下降, 稳态误差仅为  $\pm 2 \times 10^{-2} N$ 。ARC 受影响也较为明显, 在干扰存在情况下跟踪精度也一度降至  $5 \times 10^{-2} N$ 。PID 控制效果精度最差也降到了  $10^{-2}$  数量级。NN-ARC 使得 ARC 控制效果提升, 达到了  $-1.5 \times 10^{-2} \sim -5 \times 10^{-3} N$ , 但是仍无法达到无干扰下控制精度。

将神经网络对干扰估计与 RISE 控制率相结合, 可以看到即便存在干扰, NN-RISE 的跟踪精度仍可处于较高水平, 为  $\pm 1.8 \times 10^{-4} N$ , 控制精度与无干扰下 RISE 处于同一量级。通过对比分析可知, 通过本文提出的将基于自适应的 NN-RISE 控制方法应

用于缠绕过程张力控制, 对缠绕过程中存在的扰动进行补偿, 能起到明显的抑制干扰作用, 一定程度上减小对控制精度的影响。

## 6 结论

本文基于典型缠绕系统, 给出了收、放卷端之间材料长度变化对系统张力的影响规律, 将其视为受系统状态影响的时变干扰项, 并基于此重新建立缠绕系统数学模型。同时使用三层径向基神经网络近似时变干扰项, 以参数自适应理念作为神经网络权值的训练方法, 建立基于连续积分鲁棒控制方法的辅助误差变量, 使用反步法(Backstepping)设计控制率, 将神经网络对干扰的估计值在控制率中用以干扰补偿, 并通过 Lyapunov 函数验证了系统的渐进稳定性。结合试验分析可知以下结论。

(1) 将放卷轴端线速度作为已知状态, 重新设计状态空间方程, 更便于非线性算法的应用。

(2) 通过与其它非线性/线性控制方法进行对比, 该方法明显抑制了扰动对张力的干扰, 一定程度上提高了缠绕系统张力的控制精度, 为张力控制的发展提供一定理论依据。

(3) 对之前学者建立的状态空间方程进行优化, 速度环与张力环不需要解耦, 进一步简化了控制器设计步骤。

## 参 考 文 献

- [1] 贾立军, 朱虹. 复合材料加工工艺[M]. 天津: 天津大学出版社, 2007.
- JIA Lijun, ZHU Hong. Composite material processing technology[M]. Tianjing: Tianjing University Press, 2007.
- [2] WILSON B. Filament winding - the jump from aerospace to commercial fame[J]. SAMPE J, 1997, 33(3): 25-29.
- [3] 李海晟. 纤维缠绕复合材料弯管 CAD/CAM 系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- LI Haishen, ZHU Hong. CAD/CAM System for filament winding composite material bend pipe[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [4] MATHUR P D, MESSNER W C. Controller development for a prototype high-speed low-tension tape transport[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1998, 6(4): 534-542.
- [5] BAUMGART M D, PAO L Y. Robust Lyapunov-based feedback control of nonlinear web-winding systems[C]// Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on. IEEE, 2004.
- [6] BAUMGART M D, PAO L Y. Robust control of tape transport systems with no tension sensor[C]// IEEE Conference on Decision & Control. IEEE, 2005.
- [7] BAUMGART M D, PAO L Y. Time-optimal control of web-winding systems with air entrainment[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(3): 257-262.
- [8] PAGILLA P R, SIRASKAR N B, Dwivedula R V. Decentralized control of web processing lines[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 15(1): 106-117.
- [9] LEVINE J, CHOI. Control of roll-to-roll web systems via differential flatness and dynamic feedback linearization[J]. IEEE transactions on control systems technology: A publication of the IEEE Control Systems Society, 2013, 21(4): 1309-1317.
- [10] HOU H, NIAN X, JING S, et al. Robust tension observers design for web-winding systems[C]// 2016 35th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2016.
- [11] DOMINGUEZ J R, MORA-SOTO C, ORTEGA-CISNEROS S, et al. Copper and core loss minimization for induction motors using high-order sliding-mode control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2877-2889.
- [12] WANG G, YANG R, XU D. DSP-based control of sensorless IPMSM drives for wide-speed-range operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 720-727.
- [13] XIAN B, DAWSON D M, DEQUEIROZ M S, et al. A continuous asymptotic tracking control strategy for uncertain nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(7): 1206-1211.
- [14] YAO J, JIAO Z, MA D, et al. High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(2): 633-641.
- [15] KHALIL H K. High-gain observers in nonlinear feedback control[M]. London: Springer, 1999.
- [16] YAO J, JIAO Z, MA D. Extended-state-observer-based output feedback nonlinear robust control of hydraulic systems with backstepping[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 6285-6293.
- [17] LEWIS F L. Neural network control of robot manipulators[J]. IEEE Expert, 1996, 11(3): 64-75.
- [18] YAO Z, YAO J, SUN W. Adaptive RISE control of



- hydraulic systems with multilayer neural-networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, PP(99): 1-1.
- [19] MAKKAR C, DIXON W E, SAWYER W G, et al. A new continuously differentiable friction model for control systems design[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2005.
- [20] YAO J, JIAO Z, MA D. RISE-based precision motion control of DC motors with continuous friction compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial

Electronics, 2014, 61(12): 7067-7075.

作者简介: 米君杰, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电系统非线性控制、刚柔耦合体动力学分析。

E-mail: meeji@njust.edu.cn

姚建勇(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电液系统伺服控制, 动态系统故障检测与容错, 半实物动态仿真技术。

E-mail: jerryao.buaa@gmail.com

邓文翔, 男, 1991 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为机电液系统伺服控制。

E-mail: wxdeng\_njust@163.com



(上接第 48 页)

- selection applied to a Valsalva maneuver model[J]. Journal of Theoretical Biology, 2021, 43(9): 858-867.
- [19] WANG Pengcheng, ZHU Hao, TIAN Hui. Analytic target cascading with fuzzy uncertainties based on global sensitivity analysis for overall design of launch vehicle powered by hybrid rocket motor[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 48(15): 90-95.
- [20] DAMBLIN G, GHIONE A. Adaptive use of replicated Latin hypercube designs for computing Sobol' sensitivity

indices[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 212(3): 700-711.

作者简介: 巴凯先, 男, 1989 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机器人控制理论。

E-mail: bkx@ysu.edu.cn

俞滨(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。

主要研究方向为机器人控制理论与电液伺服控制系统。

E-mail: yb@ysu.edu.cn