



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402912

引用格式: 翟鑫, 刘薇, 刘玲玲. 考虑打纬影响的碳纤维角联织机经纱张力控制方法[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1587-1594.

Zhai Xin, Liu Wei, Liu LinLin. Warp tension control in carbon fiber diagonal loom considering the effect of beating-up[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1587-1594.

轻工业、手工业、生活服务业

考虑打纬影响的碳纤维角联织机经纱张力控制方法

翟鑫¹, 刘薇^{1,2*}, 刘玲玲¹

(1. 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387; 2. 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

摘要 针对碳纤维角联织机经纱张力控制中存在的张力控制精度低问题, 提出一种考虑打纬影响的经纱张力控制方法。首先深入分析打纬时经纱的伸长量, 再结合胡克定律与现有张力模型, 建立新的送经系统张力控制模型。其次, 提出一种指令滤波反步滑模控制器, 通过滤波器估计虚拟控制律的一阶微分, 避免“微分膨胀”问题, 采用径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络对系统未建模部分进行自适应估计, 同时引入滑模控制, 增强系统鲁棒性。最后, 使用 MATLAB/SIMULINK 软件对张力系统进行仿真实验。结果表明: 考虑打纬影响的滤波反步滑模控制在张力控制方面相比传统反步滑模控制在响应时间相近的情况下, 稳定时间缩短近 16.3%, 超调量减小 24.6%; 相比模糊比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制在稳定时间上缩短近 51.7%, 超调量减小 49.2%。

关键词 碳纤维角联织机; 经纱张力; 打纬; 反步控制; 指令滤波

中图分类号 TS103;

文献标志码 A

Warp Tension Control in Carbon Fiber Diagonal Loom Considering the Effect of Beating-up

ZHAI Xin¹, LIU Wei^{1,2*}, LIU Lin-lin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin 300387, China)

[Abstract] Aiming at the problem of low tension control accuracy existing in the warp yarn tension control of carbon fiber corner link loom, a warp yarn tension control method considering the effect of beating-up was proposed. Firstly, the elongation of the warp yarn during beating-up was analyzed, and then a new tension control model of the warp feeding system was established by combining Hooke's law with the existing tension model. Secondly, a command filter backstepping sliding mode controller was proposed, which estimated the first-order differentiation of the virtual control law through the filter to avoid the problem of “differential expansion”, and adopted the radial basis function (RBF) neural network to adaptively estimate the unmodeled part of the system, and at the same time, the sliding mode control was introduced to enhance the robustness of the system. Finally, MATLAB/SIMULINK software was used to carry out simulation experiments on the tension system. The results show that the filtered backstepping sliding mode control considering the effect of beating-up in tension control compared with the traditional backstepping sliding mode control in the case of similar response time, the stabilization time is shortened by nearly 16.3%, the amount of overshooting is reduced by 24.6%. Compared with the fuzzy proportional integral derivative (PID) control, the stabilization time is shortened by 51.7%, the amount of overshooting is reduced by 49.2%.

[Keywords] carbon fiber diagonal loom; warp tension; beating-up; backstepping control; command filtering

碳纤维因具有碳材料的固有所征特性, 又有纺织纤维的可加工性, 现在已经成为先进复合材料的主要增强纤维之一^[1]。随着航空航天、国防军工等产业的发展, 碳纤维将是需要迫切发展的关键战略

材料^[2]。碳纤维角联织机是生产碳纤维织物的大型设备, 其中, 经纱张力对织物的成型质量有着重大影响^[3]。而开口与打纬机构对经纱张力造成周期性波动^[4], 为保持经纱张力稳定性、满足更高质

收稿日期: 2024-04-21; 修订日期: 2024-11-27

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYBJC19400)

第一作者: 翟鑫(1998—), 男, 汉族, 山西大同人, 硕士研究生。研究方向: 机械系统智能控制技术。E-mail: 2230050703@tiangong.edu.cn。

*通信作者: 刘薇(1973—), 女, 汉族, 天津人, 博士, 副教授。研究方向: 机电一体化智能控制技术。E-mail: tguweiliu@sina.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

量的织造要求,设计一种控制精度高和鲁棒性好的控制器迫在眉睫。

近年来,多种智能控制方法被应用于织机的张力控制。孙哲等^[5]提出并设计了一种自适应滑模控制器用于经纱张力控制,利用滑模控制算法解决被控对象模型中的参数不确定性,具有较好的控制精度。汪林俊等^[6]为解决织造工艺中纱线张力具有非线性与时变性等问题,提出一种基于过拟合优化型 BP(back propagation)神经网络整定比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制,提升了经纱张力控制效果。夏鹏飞等^[7]为实现 CANbus 网络环境下的碳纤维角联织机经纱恒张力控制,提出 H_∞ 网络化控制策略,可有效提升张力控制的鲁棒性。Xiao 等^[8]为克服传统 PID 控制算法在织机经纱张力控制中效果较差的问题,提出了一种改进的遗传算法优化 PID 控制方案,通过 MATLAB 进行仿真以及以 910 型剑杆织机为实验对象进行实验测试,测试显示改进的控制策略可大幅度提升织机张力控制精度。目前,关于织机经纱的恒张力控制,众多学者主要针对控制器进行研究与设计,对于织机动力学模型的优化鲜有涉及,对于打纬运动,仅仅将其作为干扰考虑。

在织机五大机构(开口机构、引纬机构、打纬机构、卷取机构和送经机构)中,开口机构、引纬机构、卷取机构和送经机构运动均相对“温和”,而打纬运动是加速度最大、机构响应最快的运动,且对碳纤维纱线的作用力最直接^[9]。

作为织机重要组成部分,打纬机构决定了织物的成型品质^[10]。打纬过程中,因纬纱与经纱的摩擦作用,经纱产生形变^[11]。同时,因打纬阻力的存在,钢筘推动织口向机前方向移动,引起经纱形变^[12]。基于上述分析,利用柔韧体欧拉公式与胡克定律,给出打纬过程中经纱张力的变化规律,再结合现有送经系统动力学模型,建立新的动力学模型。同时,针对张力系统控制模型为链式结构这一特点,使用滤波反步滑模控制设计控制律,并采用 5 层径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络逼近系统未建模动态,最后通过 MATLAB/SIMULINK 软件对上述内容进行仿真验证,以达到提升张力控制精度、减小张力波动的目的。所设计的控制器能够保持张力平稳,可有效提升织物成型质量。

1 建立织机经纱张力控制模型

1.1 碳纤维角联织机工作原理

碳纤维角联织机工作原理如图 1 所示。经纱自送经轴逐层退绕,再经过张力补偿装置,穿过综眼,

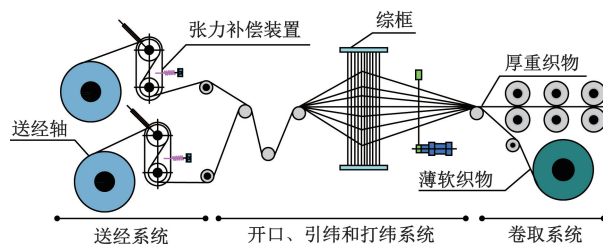


图 1 碳纤维角联织机工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the carbon fiber diagonal loom

并在开口系统的带动下形成梭口,引纬器将纬纱引至梭口,打纬机构打紧纬纱,与经纱在织口处完成交织,结成织物,最后由卷取系统引出。

1.2 送经系统动力学分析

以送经轴为研究对象,其系统结构如图 2 所示。对其受力进行分析,根据力矩平衡原理得出送经轴的力矩方程为

$$M - B\omega_1 + Tr = J \frac{d\omega_1}{dt} \quad (1)$$

式(1)中: M 为送经轴电机转矩; B 为送经轴黏性摩擦系数; ω_1 为送经轴角速度; T 为经纱张力; r 为经纱半径; J 为送经轴等效转动惯量; t 为时间。

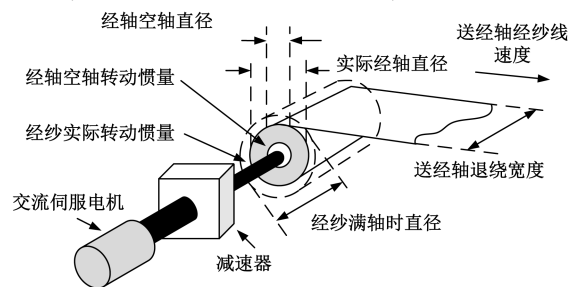


图 2 送经系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of let-off system

由式(2)得退绕过程中,经纱半径 $r(t)$ 与送经轴等效转动惯量 $J(t)$ 。

$$\begin{cases} r(t) = r_m - \frac{\varphi(t)}{2\pi} \delta \\ J(t) = J_0 + J_1 = J_1 + \frac{1}{2} \pi \rho b (r - r_0^4) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: r_m 为经纱满轴时半径; $\varphi(t)$ 为送经轴角位移; δ 为一层经纱厚度; J_0 为经纱卷转动惯量; J_1 为送经轴轴芯转动惯量; ρ 为经纱质量密度; b 为经纱退绕宽度; r_0 为送经轴轴芯半径。

1.3 开口机构运动分析

随着织造的进行,开口机构的周期性动作造成经纱长度 s_k 的变化,变化规律根据文献[13]可表示为

$$s_k = \lambda \sin^2 \omega t \quad (3)$$

式(3)中: ω 为主轴角速度。

1.4 打纬机构运动分析

经纱在开口机构的带动下形成梭口后, 引纬器将纬纱引入梭口, 梭口随着钢筘的推动以及梭口上下层经纱的相向运动逐渐收窄, 直到上下层经纱及钢筘将纬纱夹持住, 如图3所示, 分析这一时刻的纬纱位置

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arcsin\left(\frac{d_w + d_y}{l}\right) \\ \alpha_0 = \alpha_1 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: d_w 、 d_y 分别为纬纱与经纱直径; α_0 、 α_1 分别为所织纬前、后侧经纱角; l 为在约束起始位置当前所织纬与前一纬间距。

织造时, 打纬动作作为速度很快的往复运动, 故间距 l 的变化可近似为简谐运动, 可表示为

$$l = \lambda_1 \sin(\omega t) + \lambda_2 \quad (5)$$

式(5)中: λ_1 为所织纬约束起始位置与纬纱中间位置的间距; λ_2 为上一纬与纬纱中间位置的间距; $\lambda_1 + \lambda_2$ 为纬纱约束初始位置与上一纬间距, $\lambda_2 - \lambda_1$ 为纬纱打紧位置与上一纬间距。

α_1 及其一阶导数 $\dot{\alpha}_1$ 可表示为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arcsin\left(\frac{d_w + d_y}{l}\right) \\ \dot{\alpha}_1 = \frac{-(d_w + d_y)\lambda_1 \omega \cos \omega t}{l^2 \sqrt{1 + \left(\frac{d_w + d_y}{l}\right)^2}} \end{cases} \quad (6)$$

随着织造的进行, 钢筘向前心位置运动, 将纬纱从约束开始位置推动至打紧位置, 所织纬受力情况如图4所示, 根据柔韧体欧拉公式, 经纱张力满足:

$$T_1 = T_0 e^{-f(\alpha_0 + \alpha_1)} \quad (7)$$

式(7)中: f 为经纬纱间的摩擦因数; T_0 、 T_1 分别为所织纬后侧、前侧经纱张力。

由文献[14]可知, 所织纬前、后侧受力形变方程为

$$\begin{cases} T_c - T_1 \cos \alpha_1 = s_w C_{FL} \\ T_0 \cos \alpha_0 - T_c = s_w C_{YL} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: C_{FL} 、 C_{YL} 分别为织物和经纱在各自工作长度上的刚度系数; s_w 为打纬过程中纬纱对经纱的摩擦作用引起经纱形变量; T_c 为经纱的上机张力。

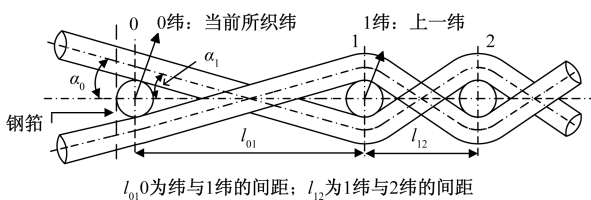


图3 所织纬的约束起始位置

Fig. 3 Initial restraint position of weaving weft

联立式(4)~式(6)得打纬过程中纬纱移动引起的经纱伸长量 s_w 及其一阶导数 \dot{s}_w 。

$$\begin{cases} s_w = \frac{\cos \alpha_0 - e^{-f\alpha} \cos \alpha_1}{C_{FL} \cos \alpha_0 + C_{YL} e^{-f\alpha} \cos \alpha_1} T_c \\ \dot{s}_w = \frac{e^{-f\alpha} \dot{\alpha}_1 \cos \alpha_0 (f \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1) c}{(C_{FL} \cos \alpha_0 + C_{YL} e^{-f\alpha} \cos \alpha_1)^2} T_c \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1$; $c = C_{FL} + C_{YL}$ 。

打纬过程中, 钢筘将织口向机前方向推动, 织口移动造成梭口前部经纱变形, 此时, 梭口前部经纱变形可按图5进行计算。

由几何关系得

$$A'B_1 = A'B_2 = \sqrt{(l_1 + s)^2 + h^2} \quad (10)$$

式(10)中: $A'B_1$ 、 $A'B_2$ 分别为织口移动末位置上下层经纱长度; h 为开口时综框位移; s 为打纬时织口移动量。

织口移动量可表示为

$$s = \lambda_1 \sin(\omega t) + \lambda_2 \quad (11)$$

h 可表示为

$$\begin{cases} h = 0.5H |\sin \omega t|, & \omega t < 90^\circ, \omega t > 270^\circ \\ h = 0.5H, & 90^\circ \leq \omega t \leq 270^\circ \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: H 为最大开口量。

故打纬过程中织口移动引起的经纱形变量及其导数可分别表示为

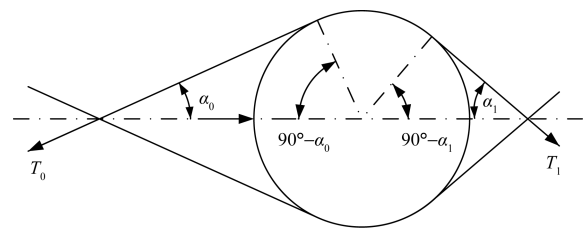
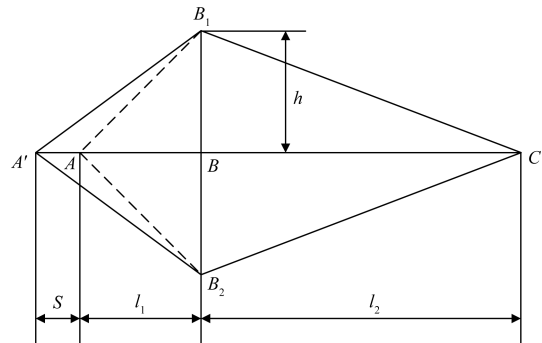


图4 所织纬受力情况

Fig. 4 Forces of weaving weft



ABC 为综平位置; B_1C 、 B_2C 分别为梭口前部上下层经纱长度; AB_1 、 AB_2 分别为梭口后部上下层经纱长度

图5 织口位移引起的经纱形变

Fig. 5 Warp yarn deformation due to web displacement

$$\begin{cases} s_z = 2\sqrt{(l_1 + s)^2 + h^2} - 2\sqrt{l_1^2 + h^2} \\ \dot{s}_z = \frac{4(l_1 + s)\lambda_1\omega\cos\omega t + 2H^2\sin 2\omega t}{[(l_1 + s)^2 + h^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{2H^2\sin 2\omega t}{(l_1^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}} \end{cases} \quad (13)$$

1.5 张力系统控制模型

送经轴与卷曲轴的速度差造成的经纱形变 s_v 可表示为

$$s_v = \int_{t_0}^t (v_2 - v_1) dt \quad (14)$$

式(14)中: v_1 为纱线退绕线速度; v_2 为纱线卷曲线速度; t_0 为织造开始时间。

织机织造过程中,根据胡克定律,经纱张力可表示为

$$T = K_f(s_v + s_w + s_z + s_k) \quad (15)$$

式(15)中: K_f 为纱线张力系数; s_w 为纬纱移动造成的经纱形变量; s_z 为织口移动造成经纱形变量。

综合以上内容,构建考虑打纬影响的碳纤维角联织机张力系统模型。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -K_f r x_2 + f \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + \Delta f(x) + bu + d(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: x_1, x_2 分别为送经轴角速度与经纱张力, $x_1 = \omega_1; x_2 = T; y$ 为输出; u 为控制器输入; $\Delta f(x)$ 为未知非线性函数,且

$$\begin{cases} f = K_f v_2 + K_f \lambda \omega \sin(2\omega t) + K_f (\dot{s}_z + \dot{s}_w) \\ f(x_1, x_2) = -\frac{B}{J} x_2 + \frac{r}{J} x_1 \\ b = \frac{1}{J} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: J 为送经轴等效转动惯量; r 为经纱半径。

2 滤波反步滑模控制器设计

碳纤维织机张力系统为一链式系统且存在建模不确定性以及摩擦带来的干扰问题,故采用指令滤波反步滑模控制器,通过滑模控制算法提升张力控制的稳定性以及 RBF 神经网络逼近系统未知非线性函数完成张力恒定控制。滤波反步滑模控制器结构如图 6 所示。

2.1 指令滤波器设计

定义张力跟踪误差为

$$e_1 = x_1 - x_{1d} \quad (18)$$

$$e_2 = x_2 - x_{2d} \quad (19)$$

式中: x_{1d} 为张力参考值; x_{2d} 为虚拟控制输入。

在每一步的设计过程中,通过指令滤波器逼近虚拟控制律及其一阶导数,以解决“微分膨胀”问题。

滤波器设计为

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \chi_1 \\ \chi_1 = -r_1 |\varphi_1 - u_r|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\varphi_1 - u_r) + \varphi_2 \\ \dot{\varphi}_2 = -r_2 \text{sign}(\varphi_2 - \chi_1) \end{cases} \quad (20)$$

式(20)中: u_r 为输入信号; $\varphi_1 = u_{r0}$ 为输入信号估计值; φ_2 为中间变量,无实际意义; $\chi_1 = \dot{u}_{r0}$ 为输入信号的一阶导数估计值; r_1, r_2 为待设计的正常数。

设计滤波器误差补偿信号 ε , 可表示为

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = -\mu_1 \varepsilon_1 - K_f r (u_{r0} - u_r) \\ \varepsilon_1(0) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

式(21)中: μ_1 为待设计的正常数。

定义补偿误差变量为

$$z_1 = e_1 - \varepsilon \quad (22)$$

2.2 反步滑模控制器设计

对补偿误差变量求导得

$$\dot{z}_1 = \dot{e}_1 - \dot{\varepsilon} \quad (23)$$

定义李雅普诺夫函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (24)$$

定义

$$x_{2d} = \frac{1}{K_f r} (-\dot{x}_{1d} + c_1 e_1 + f) \quad (25)$$

式(25)中: c_1 为正的常数; \dot{x}_{1d} 为张力参考值一阶导数。

则虚拟控制律跟踪误差 e_2 可表示为

$$e_2 = \frac{1}{K_f r} (-\dot{x}_{1d} + c_1 e_1 + f) - x_2 \quad (26)$$

则有

$$\dot{e}_1 = -K_f r e_2 - c_1 e_1 \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 [-K_f r x_2 + K_f v_2 + K_f \lambda \omega \sin(2\omega t) + \\ & f - x_{1d} + c_1 e_1 + c_1 \varepsilon_1 + K_f r (u_{r0} - u_r)] \\ &= -c_1 z_1^2 - K_f r z_1 e_2 \end{aligned} \quad (28)$$

定义滑模切换面为

$$s = k_1 e_1 + e_2 \quad (29)$$

式(29)中: $k_1 > 0$ 为待设计参数。

将式(27)代入式(29)有

$$\dot{s} = k_1 \dot{e}_1 + \dot{e}_2 = -[(c_1 - k_1)e_1 + \frac{1}{K_f r} \dot{e}_1] \quad (30)$$

式(30)中: c_1 为待设计参数,且 $c_1 > k_1 > 0$ 。

再次定义李雅普诺夫函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} s^2 \quad (31)$$

有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + s\dot{s} \\ &= -c_1 z_1^2 - K_f r z_1 e_2 + \\ & s \left[k_1 (-K_f r e_2 - K_f r k_1 e_1) + \frac{B}{J} x_1 + \frac{r}{J} x_2 + \right. \\ & \Delta f(x) + bu + d(t) + \frac{1}{K_f} (\ddot{x}_{1d} - c_1 \dot{e}_1 - \\ & \left. K_f \lambda 2\omega^2 \cos(2\omega t) - \ddot{f}) \right] \end{aligned} \quad (32)$$

式(32)中: z_1 为误差补偿变量; $\Delta f(x)$ 为未知非线性函数; $d(t)$ 为干扰项。

设计控制器输入为

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{b} \left\{ -k_1 (-K_f r c_1 e_1 - K_f r e_2) - \frac{B}{J} x_1 - \frac{r}{J} x_2 - \right. \\ & \Delta f(x) - \frac{1}{K_f} [\ddot{x}_{1d} - c_1 \dot{e}_1 - K_f \lambda 2\omega^2 \cos(2\omega t) - \ddot{f}] - \\ & \left. D \operatorname{sgn}(s) - h[s + \beta \operatorname{sgn}(s)] \right\} \end{aligned} \quad (33)$$

式(33)中: D 为扰动 $d(t)$ 的上界; h, β 为正的常数; $|d(t)| \leq D$ 。

将式(33)代入 \dot{V}_2 的表达式有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -k_1 z_1^2 + K_f r z_1 e_2 - hs^2 - |s|(h\beta - D) + d(t) \\ &\leq -k_1 z_1^2 + K_f r z_1 e_2 - hs^2 - h\beta |s| \end{aligned} \quad (34)$$

定义 $0 < \tau < 1$, 式(33)中 $-k_1 z_1^2 + K_f r z_1 e_2$ 项满足式(35)不等式关系。

$$\begin{aligned} -k_1 z_1^2 - K_f r z_1 e_2 &\leq -k_1(1 - \tau)z_1^2 - k_1 \tau |z_1|^2 + \\ & K_f r |z_1| |e_2| \end{aligned} \quad (35)$$

若使 $K_f r |z_1| |e_2| - k_1 \tau |z_1|^2 \leq 0$, 即 $\frac{K_f r |e_2|}{k_1 \tau} \leq |z_1|$, 则有

$$-k_1 z_1^2 - K_f r z_1 e_2 \leq -k_1(1 - \tau)z_1^2 \quad (36)$$

2.3 RBF 神经网络设计

采用 RBF 神经网络逼近未知非线性函数

$\Delta f(x)$, RBF 网络算法可表示为

$$\begin{cases} h_j = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_j\|^2}{2b_j^2}\right) \\ \Delta f(x) = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(x) + \varepsilon \end{cases} \quad (37)$$

式(37)中: $\mathbf{x} = [e \quad \dot{e}]^T$ 为网络的输入; \mathbf{c}_j 为隐含层节点中心向量; b_j 为高斯基函数的宽度; j 为网络隐含层第 j 个节点, $j=1, 2, 3, 4, 5$; $\mathbf{h} = [h_j]^T$ 为高斯函数的输出; \mathbf{W}^* 为网络的理想权重; ε 为网络的逼近误差。

网络输出可表示为

$$\Delta \hat{f}(x) = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(x) \quad (38)$$

式(38)中: $\hat{\mathbf{W}}$ 为神经网络实际权值。

则控制输入式(33)可表示为

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{b} \left\{ -k_1 (-K_f r c_1 e_1 - K_f r e_2) - \frac{B}{J} x_1 - \frac{r}{J} x_2 - \right. \\ & \Delta \hat{f}(x) - \frac{1}{K_f} [\ddot{x}_{1d} - c_1 \dot{e}_1 - K_f \lambda 2\omega^2 \cos(2\omega t) - \\ & \left. \ddot{f}] - D \operatorname{sgn}(s) - h[s + \beta \operatorname{sgn}(s)] \right\} \end{aligned} \quad (39)$$

将式(39)代入式(34), 有

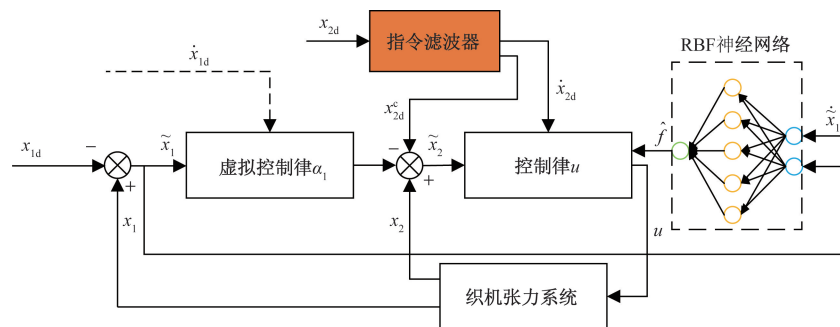
$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -k_1 z_1^2 + K_f r z_1 e_2 + s[-\Delta f(x) + \Delta \hat{f}(x)] - \\ & hs^2 - h\beta |s| + d(t) - D |s| \\ &= -k_1 z_1^2 + K_f r z_1 e_2 - s \Delta \tilde{f}(x) - hs^2 - \\ & h\beta |s| + d(t) - D |s| \end{aligned} \quad (40)$$

式(40)中:

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{f}(x) &= \Delta f(x) - \Delta \hat{f}(x) \\ &= \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(x) + \varepsilon - \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(x) \\ &= \tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(x) + \varepsilon \end{aligned} \quad (41)$$

定义

$$\tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{W}^* - \hat{\mathbf{W}} \quad (42)$$



x_{1d} 为张力参考值; x_1 为张力系统张力实际值; \tilde{x}_1 为张力误差; \dot{x}_{1d} 为张力参考值一阶导数; x_{2d} 为设计虚拟控制律; x_{2d}^c 为滤波器对虚拟控制律的估计值; x_2 为虚拟控制律实际值; \tilde{x}_2 为虚拟控制律误差; \dot{x}_{2d} 为滤波器对虚拟控制律一阶导数的估计值; $\dot{\tilde{x}}_1$ 为张力误差一阶导数; \hat{f} 为神经网络对未知非线性函数 $\Delta f(x)$ 的估计值

图6 滤波反步滑模控制器结构图

Fig.6 Structure of filtered backstepping sliding mode controller

再次定义李雅普诺夫函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}\gamma \tilde{W}^T \tilde{W} \quad (43)$$

对式(43)求导

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} \\ &= -k_1 z_1^2 + K_f r z_1 e_2 - s \tilde{W}^T h(x) - s\varepsilon + \\ &\quad \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} - hs^2 - h\beta |s| + d(t) - D|s| \\ &= -\tilde{W}^T [sh(x) + \gamma \dot{\tilde{W}}] - k_1 z_1^2 + K_f r z_1 e_2 - \\ &\quad hs^2 - h\beta |s| + d(t) - D|s| - s\varepsilon \quad (44) \end{aligned}$$

设计自适应律,可表示为

$$\dot{\tilde{W}} = -\frac{1}{\gamma} sh(x) \quad (45)$$

式(45)中: γ 为待设计的正常数。

将式(45)代入式(44),并结合式(34)与式(36)的分析可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -k_1 z_1^2 + K_f r z_1 e_2 - hs^2 - |s|(h\beta - D) + d(t) \\ &\leq -k_1 z_1^2 + K_f r z_1 e_2 - hs^2 - h\beta |s| \\ &\leq 0 \quad (46) \end{aligned}$$

根据 Lasalle 不变集原理,闭环系统渐进稳定,即 $t \rightarrow \infty, \dot{V}_3 \rightarrow 0$, 继而 $e_2 \rightarrow 0, z_1 \rightarrow 0, x_1 \rightarrow x_{1d}$ 。

3 仿真与分析

通过 MATLAB/Simulink 建立新的张力控制模型,并验证上述经纱张力控制器的控制有效性,碳纤维角联织机参数如表 1 所示。

为验证所设计的考虑打纬影响的滤波反步滑模控制器的性能,将其与常规反步滑模控制器以及同样考虑打纬影响的模糊 PID 控制器做对比。

表 1 碳纤维角联织机参数

Table 1 Parameter of carbon fiber diagonal loom

参数	数值
$B/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$	0.223
$\omega_1/(rad \cdot s^{-1})$	0.5
$J/(kg \cdot m^2)$	0.607
$v_2/(m \cdot s^{-1})$	2.5
r/m	1
λ	1
λ_1	5
λ_2	6
d_w/mm	0.323 5
d_y/mm	0.327 4
f	0.401
T_c/N	0.5
$C_{FL}/(N \cdot mm^{-1})$	0.017 84
$C_{YL}/(N \cdot mm^{-1})$	0.024 87
H/m	1

设置 $x = [0.5 \ 0]^T$ 为碳纤维角联织机张力系统状态初值,参考值设为 10 N 时,张力跟踪响应与角速度响应曲线如图 7、图 8 所示。

所设计控制器的参数为: $c_1 = 4.89, k_1 = 4.212, \beta = 1, r_1 = 12.5, r_2 = 14, c = 0.791 \times \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}, b = 3.311, \gamma = 0.75, h = 0.86$ 。

从图 7、图 8 可以看出,在常规反步滑模控制下,经纱张力在 0.43 s 趋于稳定,张力超调量为 3%,张力达到稳定前,送经轴角速度存在明显波动;在模糊 PID 控制下,经纱张力在 0.58 s 趋于稳定,张力超调量为 6.7%,张力达到稳定前,送经轴角速度存在较大波动,在实际生产中,张力与送经轴角速度的波动易加大断经概率,降低织造效率与织物成型质量;在考虑打纬影响的滤波反步滑模控制下,张力稳定时间为 0.38 s,且张力没有出现超调,

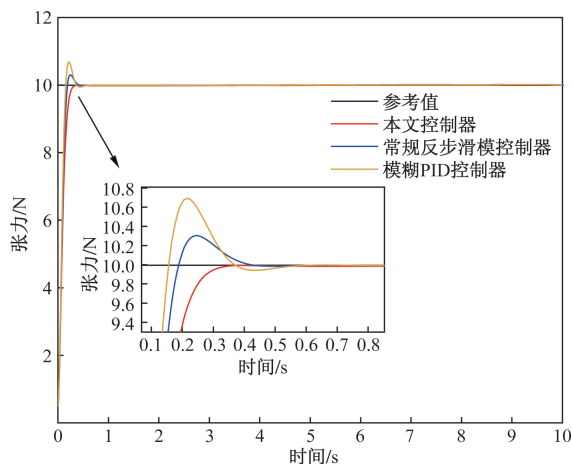


图 7 张力跟踪响应对比曲线

Fig. 7 Comparison curve of tension tracking response

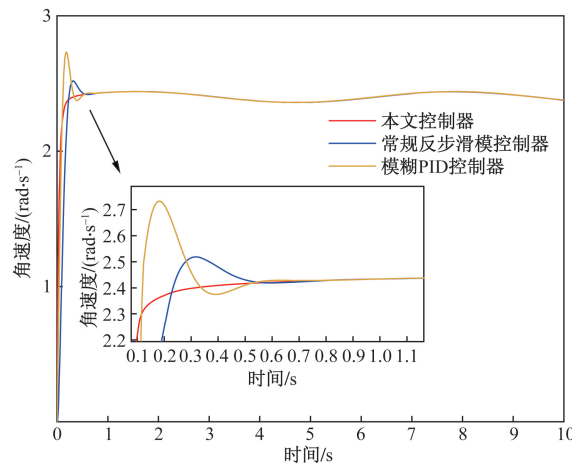


图 8 送经角速度响应对比曲线

Fig. 8 Comparison curve of angular velocity response of warp feed

相比传统反步滑模控制在稳定时间上缩短近 16.3%,相比模糊 PID 控制在稳定时间上缩短近 51.7%,满足生产要求,且提升了张力控制性能。

以方波信号和正弦信号为参考信号,得到本文控制器、常规反步滑模控制器与模糊 PID 控制器的张力响应曲线,如图 9、图 10 所示。

从图 9、图 10 可以看出,当目标张力发生连续变化或突然变化时,本文控制器仍然较传统反步滑模控制与模糊 PID 控制器响应时间快,跟踪精度高。

指令滤波器输入与输出信号如图 11 所示,在 0.36 s 滤波器对虚拟控制律及其一阶导数的估计达到稳定,可有效避免控制器设计过程中复杂的微分计算。

RBF 神经网络权值更新曲线如图 12 所示,结合图 7、图 8 可知,随着张力不断趋近设定值,送经角速度趋于稳定,神经网络权值也逐渐趋于稳定。

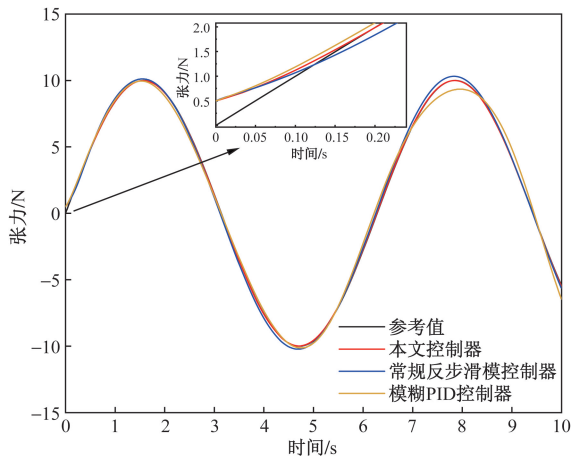


图 9 正弦跟踪响应对比曲线

Fig. 9 Comparison curve of sinusoidal tracking response

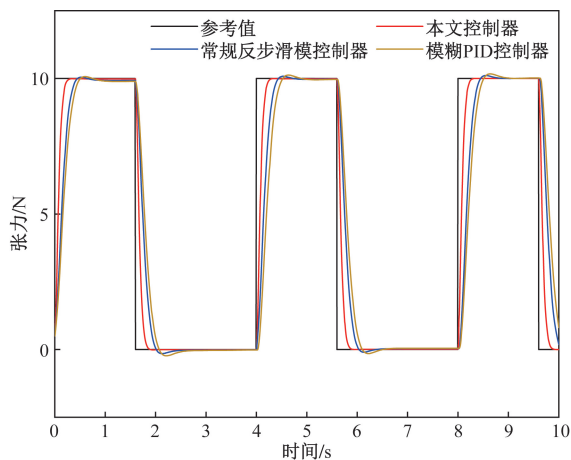


图 10 方波跟踪响应对比曲线

Fig. 10 Comparison curve of square wave tracking response

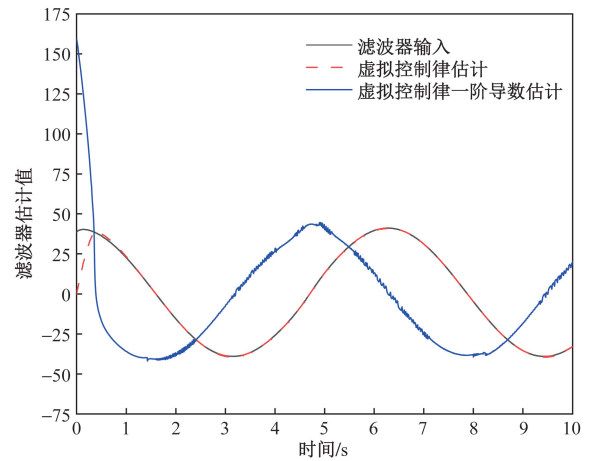


图 11 滤波器输入输出曲线

Fig. 11 Filter input-output curve

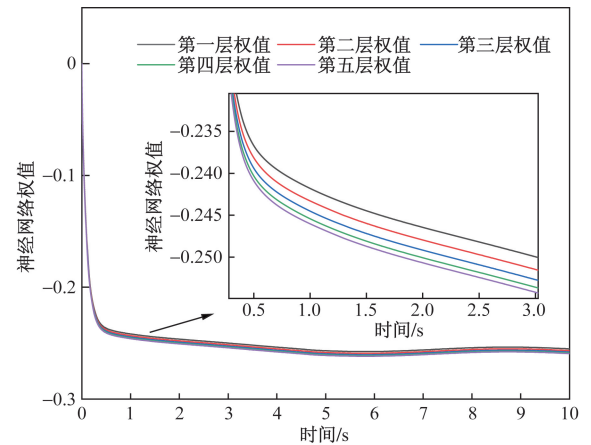


图 12 神经网络权值更新曲线

Fig. 12 Neural network weight update curve

4 结论

基于传统送经系统,结合打纬过程中经纱长度变化对经纱张力的影响规律,建立新的张力系统数学模型。同时创新使用五层径向基神经网络估计张力系统未建模动态,采用滤波反步滑模控制设计控制律,引入指令滤波器估计虚拟控制律的一阶导数,并通过 Lyapunov 函数验证了系统的渐进稳定性。结合仿真实验分析可得以下结论。

(1)考虑打纬影响的滤波反步滑模控制较传统反步滑模控制相比,系统稳定时间更短,超调量更小,前者可有效提升碳纤维织机张力系统的控制性能。

(2)同样建立考虑打纬影响的张力数学模型,所提的滤波反步滑模控制与模糊 PID 控制相比,控制精度更高,鲁棒性更好。

综上,考虑打纬影响的滤波反步滑模张力控制性能好,可有效减小打纬时经纱张力的波动,以降低断经概率,提高织造效率以及提升织物成型质量。

参 考 文 献

- [1] 李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-212.
Li Wei, Guo Quanfeng. Application of carbonfiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 201-212.
- [2] 樊星. 碳纤维复合材料的应用现状与发展趋势[J]. 化学工业, 2019, 37(4): 12-16, 25.
Fan Xing. Application status and development trend of carbon fiber reinforced plastic[J]. Chemical Industry, 2019, 37(4): 12-16, 25.
- [3] Xu G W, Zhou R X, Liu W, et al. The equivalent sliding mode tension control of carbon fiber multilayer diagonal loom[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(7): 1762-1769.
- [4] 张庆龙. 喷水织机的张力调节与控制系统设计[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
Zhang Qinlong. Tension regulation and control system design for water jet looms[D]. Qingdao: Qingdao University, 2023.
- [5] 孙哲, 吴震宇, 武传宇, 等. 织机经纱张力自适应滑模控制器的设计与仿真[J]. 机电工程, 2015, 32(8): 1124-1127.
Sun Zhe, Wu Zhenyu, Wu Chuanyu, et al. Design and simulation of an adaptive sliding mode controller for loom warp tension control [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(8): 1124-1127.
- [6] 汪林俊, 林富生, 宋志峰, 等. 基于自适应PID参数的织机纱线张力控制系统研究[J]. 棉纺织技术, 2023, 51(9): 56-59.
Wang, Linjun, Lin Fusheng, Song Zhifeng, et al. Research on yarn tension control system of loom based on adaptive PID parameter [J]. Cotton Textile Technology, 2023, 51(9): 56-59.
- [7] 夏鹏飞, 刘薇. 碳纤维角联织机经纱张力的 H_∞ 网络化控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8771-8780.
Xia Pengfei, Liu Wei. H_∞ networked control of warp tension for carbon fiber diagonal [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(20): 8771-8780.
- [8] Xiao Y J, Zhang Z P, Liu Z H, et al. Optimal analysis and application of the warp tenion control system for a rapier loom[J]. Textile Research Journal, 2022, 7-8(92): 1213-1225.
- [9] 弭俊波. 织造碳纤维的三维织机平行打纬机构设计及动态特性研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
Mi Junbo. Design and dynamic characterization of parallel tying mechanisms for three dimensional weaving machines for weaving carbon fibers[D]. Tianjin: Tiangong University, 2019.
- [10] 袁汝旺, 张鹏. 间隔织物用钢筘运动路径规划及驱动机构设计[J]. 纺织学报, 2023, 44(10): 172-180.
Yuan Ruwang, Zhang Peng. Motion path planning and driving mechanism design of reed for spacer fabrics[J]. Journal of Textile Research. 2023, 44(10): 172-180.
- [11] 余鹏举. 多综眼织机的设计及经纱张力控制研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2022.
Yu Jupeng. Design of multi-eye loom and stdy of warp tension control[D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2022.
- [12] 陈瑞. 碳纤维多层织机打纬机构可靠性分析与设计[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
Chen Rui. Reliability analysis and design of weft beating mechanism of carbon fiber multilayer loom[D]. Tianjin: Tiangong University, 2019.
- [13] Liu W, Wu X Y, Du X G, et al. Tension networked control strategy for carbon fiber multilayer diagonal loom[J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 2169-3536.
- [14] 钱志良, 倪俊芳, 苏桂生, 等. 打纬过程及织造变量的研究[J]. 纺织学报, 2009, 30(8): 34-38.
Qian Zhiliang, Ni Junfang, Su Guisheng, et al. Research on beating-up process and weaving variables[J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(8): 34-38.