

基于自抗扰控制的放卷系统张力控制器设计

徐晶¹, 李健², 丁颂¹, 张霖¹

(1. 长春师范大学, 长春 130031; 2. 河南科技大学, 洛阳 471003)

摘要: **目的** 在印刷机放卷系统中, 利用自抗扰控制(ADRC)技术, 提出一种张力控制的新方法。**方法** 根据放卷系统的工作机理, 首先建立放卷张力系统的非线性数学模型, 推导了系统阶数和输入系数。然后针对所建立的放卷张力系统数学模型, 利用 ADRC 技术设计放卷系统的张力观测器和张力控制器。最后通过仿真和实验验证所设计的张力控制器的内部鲁棒性和抗干扰性能。**结果** 在 ADRC 控制下, 张力 T_2 不受辊筒 1 半径 R_1 和辊筒 2 角速度 ω_2 变化的影响, 能够快速无超调地达到稳定值 60 N; 随着 R_1 的减小和 ω_2 的增大, ADRC 控制下产生的误差无论从数值上还是持续时间上都比 PID 控制下产生的误差小得多。**结论** 仿真和实验的结果表明, 所设计的 ADRC 控制器较传统 PID 控制器具有更好的鲁棒性和抗干扰性。

关键词: 放卷系统; 张力控制; 自抗扰控制

中图分类号: TS803 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)15-0150-06

Design of Tension Controller of Unwinding System Based on Active Disturbance Rejection Control

XU Jing¹, LI Jian², DING Song¹, ZHANG Lin¹

(1. Changchun Normal University, Changchun 130031, China;

2. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

ABSTRACT: It aims to put forward a new method of tension control for unwinding process of printing machine based on active disturbance rejection control (ADRC) strategy. Firstly, according to the working mechanism of unwinding system, a nonlinear mathematical model was established for the unwinding system to derive system orders and input coefficients. Then tension controller and tension observer were designed based on the model and the ADRC technology. Finally the internal robustness and disturbance rejection of the tension controller were demonstrated by simulating and experimental study. Under the control of ADRC, the tension T_2 was not affected by the change of R_1 and ω_2 , and the stability of the 60 N was achieved quickly without overshoot; with the decrease of R_1 and the increase of ω_2 , the error generated by ADRC control was much smaller than that of PID. According to the results of simulation and experiments, the proposed ADRC controller has better internal robustness and disturbance rejection than traditional proportional-integral-derivative (PID) controller.

KEY WORDS: unwinding system; tension control; active disturbance rejection control

印刷过程中, 系统张力的稳定是保证印刷质量的重要前提。放卷部分是产生印刷张力的最主要部件, 其张力的控制精度对印刷系统的张力稳定性有

着至关重要的影响。印刷机在放卷过程中, 料卷的卷径和转动惯量等参数均会随时间变化, 同时放卷系统普遍采用的摆辊机构也会使料带长度产生实

收稿日期: 2015-11-12

作者简介: 徐晶 (1982—), 女, 吉林人, 硕士, 长春师范大学助教, 主要研究方向为凹印机关键技术。

时变化, 这些因素都使得放卷系统呈现出典型的非线性、时变性的特性, 增加了控制的难度。同时, 作用于放卷系统的外部扰动以及模型不确定等因素, 都对高精度的放卷系统张力控制器的设计提出了更高的要求。

目前, 最常使用的张力控制策略是传统的 PID 控制方法。单纯的 PID 控制因控制能力有限, 无法满足高速高精度印刷条件下对印刷张力控制的要求, 因此一些学者致力于研究现代控制理论在张力系统控制中的应用。Li^[1]将神经网络控制应用于张力控制之中, 设计了张力系统神经网络 PID 控制器, Okada 和 Chung 等人^[2-3]根据模糊控制理论设计了张力系统模糊逻辑控制器, 李健和 Knittel 等人^[4-5]将鲁棒控制算法应用于卷绕系统中的张力控制等。这些现代控制方法的一个缺点是都需要丰富的实践经验去人为地选定权函数或优化控制参数, 这影响了这些控制方法的实际应用。如何寻找一种既能很好解决张力系统非线性控制, 又不过分依赖系统准确模型的控制方法成为张力系统控制器设计的一个难点问题。自抗扰控制(ADRC)技术是韩京清^[6-7]于 20 世纪 90 年代提出的一种非线性鲁棒控制技术, 其精髓是通过状态观测器将系统的内外干扰进行估计并在非线性控制法则中实时剔除。ADRC 以其独特的控制思想和良好的控制品质在不确定性系统的估计及控制方面得到了广泛的应用, 如永磁同步电机控制^[8]、机器人视觉伺服控制^[9]等。ADRC 技术也是实现张力系统控制的一个理想选择, Hou 等人^[10-14]对 ADRC 在张力系统中的应用进行了一些研究, 虽然得到了很好的控制效果, 但仅仅处在仿真研究水平。

文中研究了 ADRC 技术在凹印机放卷张力系统中的应用。首先根据凹印机的工作原理建立了放卷系统非线性数学模型, 进而设计了 ADRC 张力观测器和张力控制器以实现对放卷系统的恒张力控制, 最后通过仿真和实验揭示了 ADRC 控制器在放卷系统张力控制中具有良好控制性能。

1 张力系统建模与模型解耦

凹印机放卷系统要完成恒张力控制, 其结构见图 1, 主要由放卷部分和放卷牵引部分组成。放卷电机 M₁ 和牵引电机 M₂ 均由伺服电机直接驱动, 其中, M₁ 工作在转矩模式下, 做变速控制, 而 M₂

工作在速度模式下, 做恒速控制。摆辊系统一方面用来检测张力 T_2 , 另一方面用来吸收张力波动。其中 L_1 为辊筒间料带长度; A_1 和 A_2 为料带横截面积; T_1 和 T_2 为料带张力; ω_1 和 ω_2 为辊筒角速度; V_1 和 V_2 为料带速度; L_{D1} 和 L_{D2} 为摆臂长度; θ 为摆辊转动角度; K 为摆辊等效弹簧的弹性模量; E 为料带弹性模量; T_{2re} 为张力参考输入; V_{re} 为速度参考输入。

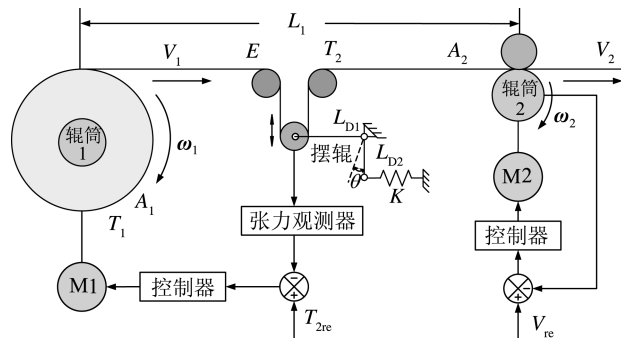


图 1 凹印机放卷系统结构

Fig.1 Structure of unwinding system on gravure press

根据文献[4], 辊筒和辊筒间料带动力学模型如下:

$$\begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} &= [T_2(t) - T_1] R_1 - C_1 u(t) - f \omega_1(t) \\ L_1(t) \frac{dT_2(t)}{dt} &= V_1(t) T_1 - V_2 T_2(t) + AE [V_2 - V_1(t)] + \\ &\quad \frac{dL_1(t)}{dt} [AE - T_2(t)] \end{aligned}$$

式中: J_1 为辊筒 1 的转动惯量; R_1 和 R_2 分别为辊筒 1, 2 的半径; $u(t)$ 为放卷电机的控制输入量; C_1 为放卷电机常数; f 为辊筒的摩擦阻尼系数; $A=A_1=A_2$ 为料带横截面积。

在放卷系统中, 摆辊机构是一种张力检测装置, 结构见图 1。摆辊在工作过程中会造成料带长度的变化, 其变化规律如下:

$$\begin{aligned} L_1(t) &= L_{01} - 2L_{D1}\theta(t) \\ \frac{dL_1(t)}{dt} &= -2L_{D1} \frac{d\theta(t)}{dt} \end{aligned}$$

式中: L_{01} 为放卷部分料带的初始长度。

忽略摆辊和惰辊的摩擦力, 不考虑摆辊自身的质量, 根据牛顿运动定律所建立的摆辊臂动力学方程, 获得张力与摆角的关系为:

$$2L_{D1}T_2(t) = J_{Da} \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + f_D \frac{d\theta(t)}{dt} + KL_{D2}^2\theta(t)$$

式中: f_D 为摆辊的摩擦阻尼系数; J_{Da} 为摆辊的转动惯量。

综合上式, 可以得出放卷系统的非线性模型:

$$\begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} &= [T_2(t) - T_1] R_1 - C_1 u(t) - f \omega_1(t) \\ 2L_{D1} T_2(t) &= J_{Da} \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + f_D \frac{d\theta(t)}{dt} + KL_{D2}^2 \theta(t) \\ L_{01} \frac{dT_2(t)}{dt} &= R_1 \omega_1(t) T_1 - R_2 \omega_2 T_2(t) + \\ &AE [R_2 \omega_2 - R_1 \omega_1(t)] - 2L_{D1} \frac{d\theta(t)}{dt} [AE - T_2(t)] \end{aligned}$$

实际中由摆辊运动引起的波动 $2L_{D1}\theta(t)$ 相对 L_1 可以忽略不计, 因此上式忽略了 $2L_{D1}\theta(t)$ 。对 $T_2(t)$ 求二阶导数, 化简可得:

$$\begin{aligned} 2L_{D1} T_2(t) &= J_{Da} \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + f_D \frac{d\theta(t)}{dt} + KL_{D2}^2 \theta(t) \\ \frac{d^2 T_2(t)}{dt^2} &= \frac{2L_{D1} \frac{d\theta(t)}{dt} - R_2 \omega_2}{L_{01}} \frac{dT_2(t)}{dt} + \\ &\frac{2L_{D1} \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}}{L_{01}} T_2(t) + \frac{C_1 R_1 (AE - T_1)}{J_1 L_{01}} u(t) - \\ &\frac{2J_1 L_{D1} AE \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}}{J_1 L_{01}} + \\ &\frac{R_1 (T_1 - AE) [R_1 (T_2(t) - T_1) - f \omega_1(t)]}{J_1 L_{01}} \end{aligned}$$

式中: $u(t)$ 是系统输入, $T_2(t)$ 是系统输出。可见放卷系统是一个二阶非线性系统, 取

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{2L_{D1} \frac{d\theta(t)}{dt} - R_2 \omega_2}{L_{01}} \frac{dT_2(t)}{dt} + \frac{2L_{D1} \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}}{L_{01}} T_2(t) + \\ &\frac{R_1 (T_1 - AE) [R_1 (T_2(t) - T_1) - f \omega_1(t)]}{J_1 L_{01}} - \\ &\frac{2J_1 L_{D1} AE \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}}{J_1 L_{01}} \\ b &= \frac{C_1 R_1 (AE - T_1)}{J_1 L_{01}} \end{aligned}$$

2 ADRC 控制器设计

根据放卷系统的阶数和摆辊模型, 文中设计了 ADRC 张力控制器, 其结构见图 2, 其中 $w(t)$ 是放卷系统外部干扰。整个控制器包括两部分: ADRC 控制器和 T_2 张力观测器, 其中 ADRC 控制器用于放卷系统的恒张力控制, T_2 张力观测器用于实时求取放卷系统的张力输出 $T_2(t)$ 的值。

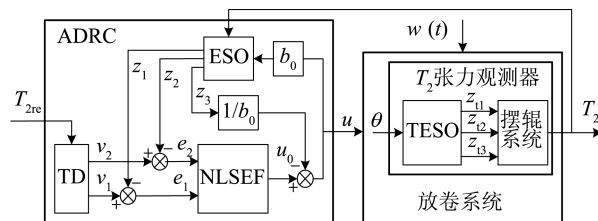


图 2 ADRC 控制器结构

Fig.2 Structure of ADRC controller

2.1 ADRC 控制器

由图 2 可以看出, ADRC 控制器由 1 个二阶跟踪微分器(TD), 1 个三阶扩张状态观测器(ESO), 1 个非线性状态误差反馈控制率(NLSEF)构成。

TD 是一种信号处理环节, 用来安排过渡过程, 产生参考输入信号的跟踪信号 v_1 和微分信号 v_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之间的矛盾。二阶 TD 的离散形式如下:

$$\begin{aligned} fh &= fhan[v_1(k) - T_{2re}(k), v_2(k), r, h_0] \\ v_1(k+1) &= v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) &= v_2(k) + hf \end{aligned}$$

式中: h 是积分步长, r 是速度因子, h_0 是滤波因子, $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 为最速控制综合函数。 $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 的算法公式如下:

$$\begin{aligned} d &= rh; \quad d_0 = hd; \quad y = x_1 + hx_2; \\ a_0 &= (d^2 + 8r|y|)^{\frac{1}{2}} \\ a &= \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sign}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ fhan(x_1, x_2, r, h) &= - \begin{cases} r \text{sign}(a), & |a| > d \\ r \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \end{aligned}$$

ESO 是 ADRC 的核心, 能够估计出系统输出 T_2 的跟踪信号 z_1 、微分信号 z_2 , 并能通过 z_3 主动估计出 $f(t)$ 和 $w(t)$ 的“总扰动”, 目的在于抑制噪声信号, 得到算法需要的反馈变量, 为实现主动补偿总干扰奠定基础, 三阶 ESO 的离散算法实现如下:

$$\begin{aligned} e(k) &= z_1(k) - T_2(k) \\ z_1(k+1) &= z_1(k) + h[z_2(k) - \beta_{01} \cdot e(k)] \\ z_2(k+1) &= z_2(k) + \\ &h\{z_3(k) - \beta_{02} \cdot \text{fal}[e(k), 0.5, \delta] + b_0 u\} \\ z_3(k+1) &= z_3(k) - h\beta_{03} \cdot \text{fal}[e(k), 0.25, \delta] \end{aligned}$$

式中: β_{0i} 是 ESO 增益系数, δ 是线性段的区间长度, b_0 是补偿因子, 也是 b 的估计值。其中 $\text{fal}(e,$

α, δ) 算法公式为:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \end{cases}$$

NLSEF 是一种通过对状态误差“非线性配置”而实现“非线性状态误差反馈”的控制器, 主要由 v_1 和 z_1 形成误差 e_1 , v_2 和 z_2 形成误差 e_2 的非线性组合构成。同时, 在反馈中, 总误差估计变量 z_3 被主动地补偿掉。NLSEF 的离散算法实现如下:

$$\begin{aligned} e_1 &= v_1(k) - z_1(k) \\ e_1 &= v_1(k) - z_1(k) \\ u_0 &= k_p \text{fal}(e_1, 0.5, \delta) + k_d \text{fal}(e_2, 1.5, \delta) \\ u &= u_0 - z_3(k) / b_0 \end{aligned}$$

式中: k_p 和 k_d 是增益系数。

综合以上算法可得出 ADRC 控制器的离散算法为:

$$\begin{aligned} fh &= \text{fhan}[v_1(k) - T_{2\text{re}}(k), v_2(k), r, h] \\ v_1(k+1) &= v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) &= v_2(k) + hf \\ e &= z_1(k) - T_2(k) \\ fe &= \text{fal}(e, 0.5, h), fe_1 = \text{fal}(e, 0.25, h) \\ z_1(k+1) &= z_1(k) + h[z_2(k) - \beta_{01}e] \\ z_2(k+1) &= z_2(k) + h[z_3(k) - \beta_{02}fe + b_0u] \\ z_3(k+1) &= z_3(k) + h(-\beta_{03}fe_1) \\ e_1(k+1) &= v_1(k+1) - z_1(k+1) \\ e_2(k+1) &= v_2(k+1) - z_2(k+1) \\ u &= k_p \text{fal}(e_1, 0.5, \delta) + k_d \text{fal}(e_2, 1.5, \delta) - z_3(k+1) / b_0 \end{aligned}$$

2.2 T_2 张力观测器

作为放卷系统中张力检测设备, 摆辊无法直接测出张力 T_2 的值, 只能将 T_2 的大小变化表现为摆角 θ 的变化, 因此, 文中设计了张力观测器用来实现 T_2 的实时计算, 其核心是张力扩张状态观测器 (TESO), 其离散算法为:

$$\begin{aligned} e_t(k) &= z_{t1}(k) - \theta(k) \\ fe_{t0} &= \text{fal}(e_t(k), 0.5, h), fe_{t1} = \text{fal}(e_t(k), 0.25, h) \\ z_{t1}(k+1) &= z_{t1}(k) + h(z_{t2}(k) - \beta_{t1}e_t(k)) \\ z_{t2}(k+1) &= z_{t2}(k) + h(z_{t3}(k) - \beta_{t2}fe_{t0}) \\ z_{t3}(k+1) &= z_{t3}(k) + h(-\beta_{t3}fe_{t1}) \\ T_2(k+1) &= \frac{J_{\text{Da}}z_{t3}(k+1) + f_{\text{D}}z_{t2}(k+1) + KL_{\text{D2}}^2z_{t1}(k+1)}{2L_{\text{D1}}} \end{aligned}$$

式中: z_i 是张力观测器的参数。为了比较 ADRC 与传统 PID 控制性能的差异, 文中针对放卷系统设计 PID 控制器, 其结构见图 3。

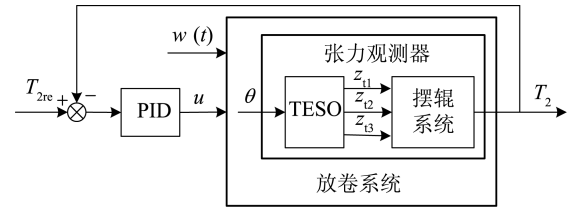


图 3 PID 控制器结构

Fig.3 Structure of PID controller

比较图 2 和图 3 可以看出: ADRC 控制器可以主动估计并补偿系统的动态变化 $f(t)$ 和外部干扰 $w(t)$, 而 PID 控制器只能通过被动地调节 PID 参数做到这一点; ADRC 通过 TD 安排过渡过程, 有效地缓解了 PID 控制中存在的快速性和超调的矛盾; ADRC 通过 TD 和 ESO 求取微分信号, 有效地抑制了噪声干扰, 而 PID 取微分的过程放大了噪声干扰; ADRC 采用了非线性组合模式, 得到了比 PID 更好的控制性能, 同时也避免了积分环节带来的负面影响。

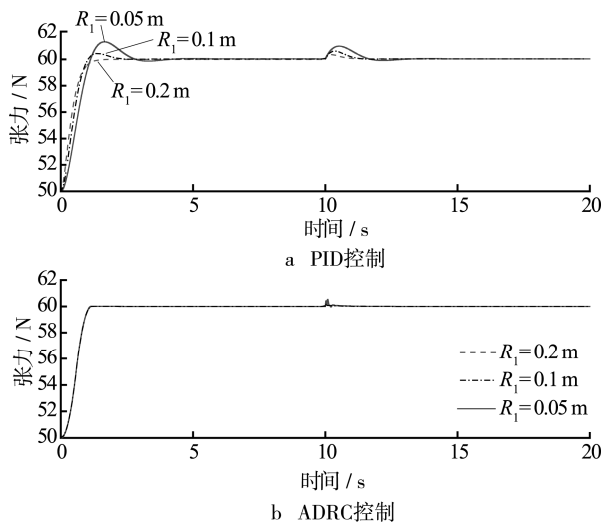
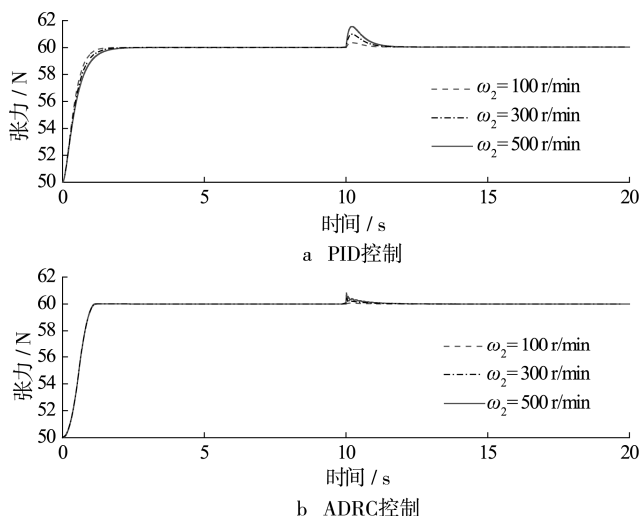
3 仿真与实验验证

为验证所设计 ADRC 控制器的性能, 文中分别对 ADRC 和 PID 控制器进行了仿真实验和实验研究。仿真和实验过程中, 控制器采用的相关模型参数为 $L_{01}=1 \text{ m}$, $A_1=A_2=5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, $Z_1=0.128 \text{ m}$, $L_{D2}=0.064 \text{ m}$, $R_2=0.03 \text{ m}$, $E=1.6 \times 10^8 \text{ Pa}$, $K=1 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$, $C_1=0.218 \text{ N}\cdot\text{m/V}$, $f_1=f_D=0.01 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad/s})$, $J_{\text{Da}}=0.019 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。控制器自身参数均是在 $\omega_2=100 \text{ r/min}$ 和 $R_1=0.2 \text{ m}$ 的条件下调得, 且不随工况的变化而变化。

3.1 仿真研究

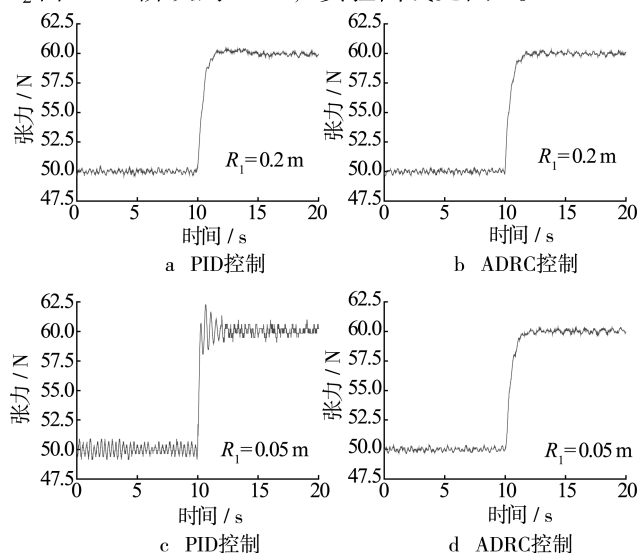
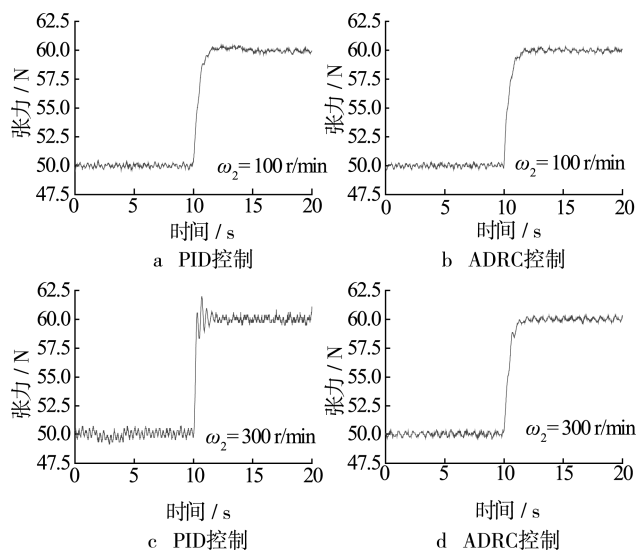
仿真在 simulink 中进行, 采用固定步长模式。仿真步长和实验采样周期保持一致, 为 10 ms 。仿真过程中, 调整好的 ADRC 参数为 $\beta_{01}=100$, $\beta_{02}=5000$, $\beta_{03}=8 \text{ } 1000$, $k_p=900$, $k_d=750$, $r=20$; 调整好的 PID 控制器参数为 $K_p=50$, $K_i=0.5$, $K_d=20$ 。仿真过程: 在 $R_1=0.2 \text{ m}$, $R_1=0.1 \text{ m}$ 和 $R_1=0.05 \text{ m}$ 时, 保持 $\omega_2=100 \text{ r/min}$ 不变, 分别使得 T_2 由 50 N 阶跃到 60 N , 且在第 10 s 时对 T_1 施加 10 N 的干扰; 在低速 $\omega_2=100 \text{ r/min}$ 、中速 $\omega_2=300 \text{ r/min}$ 和高速 $\omega_2=500 \text{ r/min}$ 时, 保持 $R_1=0.2 \text{ m}$ 不变, 分别使得 T_2 由 50 N 阶跃到 60 N , 且在第 10 s 时对 T_1 施加 10 N 的干扰。仿真曲线见图 4—5。

可以得出,在ADRC控制下,张力 T_2 不受 R_1 和 ω_2 变化的影响,能够快速无超调地达到稳定值60 N,而在PID控制下, T_2 的控制性能会随着 R_1 的减小和 ω_2 的增大逐渐变差,特别当 $R_1=0.05$ m时, T_2 产生了1.4 N的超调,这说明ADRC控制对系统参数变化不敏感,具有比PID更好的内部鲁棒性;随着 R_1 的减小和 ω_2 的增大,ADRC控制和PID控制下 T_1 干扰对 T_2 产生的误差都在呈现增大的趋势,但是同一条件下ADRC控制下产生的误差无论从数值上还是持续时间上都比PID控制下产生的误差小得多,如在 $R_1=0.05$ m时,ADRC控制下产生的误差和持续时间分别为0.4 N和1 s,而在PID控制下产生的误差和持续时间分别为1 N和3 s。这说明ADRC控制器具有比PID控制器更好的抗干扰性。

图4 R_1 改变时的仿真响应曲线Fig.4 Simulation curve of R_1 changed controller图5 ω_2 改变时的仿真响应曲线Fig.5 Simulation curve of ω_2 changed controller

3.2 实验研究

文中实验研究在四色凹印机实验平台上完成,其中伺服电机均为三菱电机,其中 M_1 型号为HF-SP102, M_2 型号为HF-SE52JW1-S100,控制系统采用固高科技的T8VME控制平台,具体型号为GV-800-TPV-V02。调整好的ADRC控制器参数为: $\beta_{01}=100, \beta_{02}=6500, \beta_{03}=78500, k_p=450, k_d=200, r=20, \beta_{t1}=100, \beta_{t2}=320, \beta_{t3}=1350$;调整好的PID控制器参数为 $K_p=72, K_i=3, K_d=10$ 。实验过程:在 $\omega_2=100$ r/min的条件下,当 R_1 为0.2, 0.05 m时,分别使得系统稳定运行10 s后 T_2 由50 N阶跃到60 N,实验曲线见图6;在 $R_1=0.2$ m的条件下,当 ω_2 为100, 300 r/min时,分别使得系统稳定运行10 s后 T_2 由50 N阶跃到60 N,实验曲线见图7。

图6 R_1 改变时的实验响应曲线Fig.6 Experiment curve of R_1 changed controller图7 ω_2 改变时控制器实验响应曲线Fig.7 Experiment curve of ω_2 changed controller

由图 6—7 可以看到: 在 PID 控制下, 随着 R_1 的减小和 ω_2 的增大, 控制器控制性能和抗干扰能力逐步下降; 而在 ADRC 控制下, 无论 R_1 和 ω_2 如何变化, 控制器都能获得良好的控制性能和抗干扰能力, 实验结果和仿真一致。

4 结语

文中针对凹版印刷机放卷张力系统的控制需要, 根据放卷张力系统的工作机理, 建立了放卷系统的非线性模型, 并推导了系统阶数和输入系数; 依据系统阶数和输入系数设计了 ADRC 张力控制器实现对放卷张力的恒张力控制, 且依据摆辊模型设计了张力观测器用来实时计算输出张力 T_2 的值。仿真和实验研究表明, 这里所设计的凹印机放卷张力系统 ADRC 控制器较传统 PID 控制器具有更好的内部鲁棒性和抗干扰能力, 更能适应张力系统精密控制的要求。

参考文献:

- [1] LI J, MEI X, TAO T, et al. Design Tension Controller of Unwinding System Based on BP Neural Network[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(6): 2222—2226.
- [2] OKADA K, SAKAMOTO T. An Adaptive Fuzzy Control for Web Tension Control System[C]// Industrial Electronics Society Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, 1998.
- [3] CHUNG B M, LEE S G, CHO C S. Active Tension Control of High Speed Splitting Machines Using Fuzzy PID[C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics, 2005.
- [4] 李健, 梅雪松, 陶涛, 等. 放卷张力系统 H_∞ 鲁棒控制器的设计[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(1): 86—90.
LI Jian, MEI Xue-song, TAO Tao, et al. Design of H_∞ Robust Controller Based on Unwinding Tension System[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2012, 46(1): 86—90.
- [5] KNITTEL D, LAROCHE E, GIGAN D, et al. Tension Control for Winding Systems with Two-Degrees-of-Freedom H_∞ Controllers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(1): 113—120.
- [6] HAN J Q. From PID to Active Disturbance Rejection Control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900—906.
- [7] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
HAN Jing-qing. Active Disturbance Rejection Control Technique: A Control Technique for Estimating and Compensating Uncertain Factors[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [8] SHI H, SI W. Simulation & Realization of PMSM Servo System Based on Fuzzy Active-Disturbance Rejection[C]// Proceedings of 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2009.
- [9] SU J, QIU W, MA H, et al. Calibration-free Robotic Eye-Hand Coordination Based on an Auto Disturbance-Rejection Controller[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(5): 899—907.
- [10] HOU Y, GAO Z, JIANG F, et al. Active Disturbance Rejection Control for Web Tension Regulation[C]// IEEE CDC Conference, 2001.
- [11] ZHOU W, GAO Z. An Active Disturbance Rejection Approach to Tension and Velocity Regulations in Web Processing Lines[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, 2007.
- [12] MOKHTARI F, SICARD P, HAZZAB A. Decentralized Nonlinear Control Strategies for Disturbance Rejection in Winding Systems[C]// IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2011.
- [13] BRANDENBURG G. New Mathematical Models for Web Tension and Register Error[C]// Proceedings of the 3rd International IFAC Conference on Instrumentation and Automation in the Paper, Rubber and Plastics Industry, 1977.
- [14] 刘善慧, 梅雪松, 杜喆, 等. 放卷张力系统解耦控制器的设计[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(9): 55—59.
LIU Shan-hui, MEI Xue-song, DU Zhe, et al. Design of Decoupling Controller for Unwinding Tension System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(9): 55—59.