

凹版印刷机放卷张力模糊自抗扰控制方法

李坤全, 文睿

(河南工程学院, 郑州 451191)

摘要: **目的** 提高凹版印刷机放卷系统张力控制的稳定性。**方法** 结合模糊控制和自抗扰控制提出一种放卷张力控制方法。根据放卷系统的工作原理, 分别建立料带张力、摆辊动力学、辊筒动力学的数学模型, 进而得到放卷系统的非线性数学模型。为了提高控制系统的解耦性能、抗干扰性和内部鲁棒性, 基于自抗扰控制的同时引入模糊控制, 设计一种模糊自抗扰控制器, 并进行相关仿真研究和分析。**结果** 与 PID 控制器相比, 该模糊自抗扰控制器较好地实现了系统解耦, 而且具有更好的抗干扰性和内部鲁棒性。**结论** 文中方法可以实现凹版印刷机放卷系统的恒张力控制。

关键词: 凹版印刷机; 放卷系统; 张力控制; 模糊自抗扰控制器

中图分类号: TS835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0119-05

Unwinding Tension Fuzzy-ADRC of Gravure Printing Machine

LI Kun-quan, WEN Rui

(Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the stability of tension control of the gravure press unwinding system. An unwinding tension control method was proposed combined with fuzzy control and active disturbance rejection control (ADRC). According to the working principle of unwinding systems, the mathematical models of strip tension, pendulum roller kinetics, roller kinetics were established respectively. Then, the nonlinear mathematical model of unwinding system was also obtained. In order to improve the decoupling performance, anti-interference performance and internal robustness of the control system, a fuzzy active disturbance rejection controller was designed when the fuzzy control was introduced based on the active disturbance rejection control, and related simulation research and analysis were carried out. The simulation results showed that, compared with the PID controller, the fuzzy-ADRC could well realize the system decoupling, and had better anti-interference performance and internal robustness. The method in the paper can realize the constant tension control of gravure press unwinding system.

KEY WORDS: gravure printing machine; unwinding system; tension control; fuzzy-ADRC

张力控制系统作为凹版印刷机的重要组成部分, 系统张力的稳定性、可靠性是保证凹版印刷高效、高速的前提^[1-3]。通常情况下, 张力控制系统涉及电机、自动化等诸多学科领域, 由于其元件众多、易受干扰, 另外其输入、输出之间关系十分复杂, 所以张力控制系统是一个比较典型的非线性、多输入输出、强耦合、参数时变的不确定系统^[4-6]。如何实现系统张力恒定控制对提高印刷质量至关重要。高速、高精度是凹版印刷机的主流发展方向, 然而传统 PID 控制很难满足

应用要求^[7-9], 因此针对张力控制算法, 国内外诸多学者进行了一系列原创和改进研究。例如, Choi 等以参考张力和实际转子速度平均值为基础, 设计了一种 PID 前馈补偿器, 进而实现了辊间张力的解耦控制, 不过无法解决控制参数整定的问题^[10]。Ponniah 和 Yoshida 等将模糊解耦应用于卷绕张力控制, 可以减少扰动在张力系统中的传播^[11-12]; Dou 等则结合神经网络和鲁棒控制实现了系统张力控制, 并取得了不错的控制效果, 不过神经网络训练过程需要大量的

收稿日期: 2016-11-24

基金项目: 河南省教育厅科学技术重点研究项目 (14B460012)

作者简介: 李坤全 (1976—), 男, 博士, 河南工程学院副教授, 主要研究方向为机械设计。

样本数据,势必影响控制精度;而且鲁棒控制算法相对复杂,会增加控制难度^[13-15]。Uororth等利用自抗扰控制算法实现了张力控制,并进行仿真研究,结果表明,基于自抗扰算法的张力控制系统具有很好的抗干扰性和鲁棒性,不过其参数较多,整定比较困难^[16]。在现有研究的基础上,基于模糊自抗扰控制设计一种凹印机放卷系统控制策略,并进行仿真研究,以提高张力控制系统的抗干扰性能、鲁棒性、解耦性能,实现放卷系统的恒张力控制。

1 放卷系统建模

放卷系统主要由放卷和放卷牵引组成,主要实现恒张力控制,具体结构见图1。其中放卷、牵引、印色电机均选用伺服电机;放卷部分安装摆辊,不仅可以减小张力波动,而且还具有张力检测的作用。放卷牵引部分可利用张力传感器来测量该部分的张力。图1中 L_1 、 L_2 为辊筒间料带长度; A_1 、 A_2 、 A_3 为料带横截面积; T_1 、 T_2 、 T_3 为料带张力; ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 为料带密度; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为料带应变; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为辊筒角速度; v_1 、 v_2 、 v_3 为料带速度; L_{D1} 、 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。

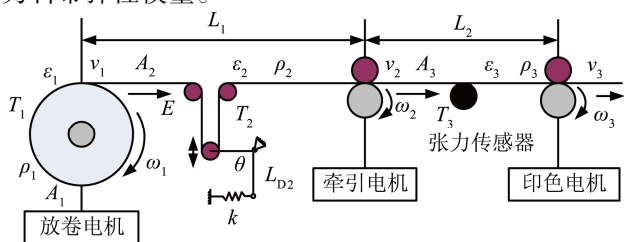


图1 放卷系统结构

Fig.1 Structure of unwinding system

1.1 料带张力数学模型

为便于建模,可作如下假设:辊子和料带之间为纯滚动;料带仅出现纯弹性变形,料带特性不受湿度和温度的影响;各机组间的料带满足质量守恒定律。则有:

$$\frac{d}{dt} \left[\int_0^{L_{i-1}} \rho_i(x,t) A_i(x,t) dx \right] = \rho_{i-1}(x,t) A_{i-1}(x,t) v_{i-1} - \rho_i(x,t) A_i(x,t) v_i \quad i=2,3 \quad (1)$$

式中: x 为运动方向料带位置; L_i 为辊筒间料带长度; ρ_i 为料带密度; A_i 为料带横截面积; V_i 为料带速度。可假定未拉伸状态下,料带各部分均匀一致,即密度、横截面积相同,应变保持一致。基于应变定义,拉伸前后料带满足以下关系:

$$\frac{\rho_i A_i}{\rho_{ui} A_{ui}} = \frac{1}{1 + \varepsilon_i}, \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

式中: ρ_{ui} 为拉伸后的料带密度; A_{ui} 为拉伸后的

料带横截面积; ε_i 为料带应变。结合式(1)——(2)可得:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{L_{i-1}(t)}{1 + \varepsilon_i(t)} \right] = \frac{v_{i-1}}{1 + \varepsilon_{i-1}(t)} - \frac{v_i}{1 + \varepsilon_i(t)}, \quad i=2,3, \quad (3)$$

$$\varepsilon_i \ll 1, \quad (1 + \varepsilon_i)^{-1} \cong 1 - \varepsilon_i \quad (4)$$

根据胡克定律,简化式(3)可得机组间料带张力模型:

$$L_{i-1}(t) \frac{dT_i}{dt} = v_{i-1} T_{i-1} - \left[v_i + \frac{dL_{i-1}(t)}{dt} \right] T_i + A_i E \left[v_i - v_{i-1} + \frac{dL_{i-1}(t)}{dt} \right] \quad i=2,3 \quad (4)$$

式中: T_i 为料带张力; E 为料带弹性模量。

1.2 摆辊动力学模型

摆辊机构能够吸收张力变化的波峰,是一种张力检测装置,可用于印刷机的收卷、放卷部分。工作过程中,摆辊会造成放卷部分料带长度变化并符合如下规律:

$$L_1(t) = L_1^* + 2L_{D1}\theta(t); \quad \frac{dL_1}{dt} = 2L_{D1} \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

式中: L_{D1} 为摆臂长度; θ 为摆辊转动角; L_1^* 为放卷部分料带初始长度。基于牛顿运动定律可得张力、摆角的关系为:

$$T_2(t) = \frac{1}{2L_{D1}} (-J_{Da} \ddot{\theta}(t) - f_D \dot{\theta}(t) + kL_{D2}^2 \theta(t)) \quad (6)$$

式中: f_D 为摆辊摩擦阻尼系数; J_{Da} 为摆辊转动惯量。

1.3 辊筒动力学模型

根据上述假定条件,辊子和料带之间为纯滚动,根据牛顿运动定律,所有辊子均满足如下动力学规律:

$$\frac{d}{dt} (J_i \omega_i) = (T_{i+1} - T_i) R_i + C_i U_i - f \omega_i, \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

式中: J_i 为各辊转动惯量; R_i 为各辊半径; U_i 为伺服电机输入量; C_i 为伺服电机常数; f 为各辊摩擦阻尼系数。另外,放料辊筒的半径和转动惯量随着时间的增长而减小,均为时变参数,且满足:

$$\frac{d}{dt} (J_1 \omega_1) = \dot{J}_1 \omega_1 + J_1 \dot{\omega}_1 \quad (8)$$

鉴于生产过程中 R_1 变化十分缓慢,并且 $\dot{J}_1 \omega_1 \ll 1$,因此可将放卷辊的转动惯量看作常数,即:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = (T_2 - T_1) R_1 + C_1 U_1 - f \omega_1 \quad (9)$$

结合式(4)——(7)以及式(9)可建立放卷系统的非线性数学模型:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = (T_2 - T_1) R_1(t) - C_1 U_1 - f \omega_1 \\ L_1 \frac{dT_2}{dt} = R_1 \omega_1 T_1 - (R_2 \omega_2 + 2L_{D1} \dot{\theta}) T_2 + \\ A_2 E (R_2 \omega_2 - R_1 \omega_1 + 2L_{D1} \dot{\theta}) \\ 2L_{D1} T_2 = -J_{Da} \ddot{\theta} - f_D \dot{\theta} + kL_{D2} \theta \\ L_2 \frac{dT_3}{dt} = R_2 \omega_2 T_2 - R_3 \omega_3 T_3 + \\ A_3 E (R_3 \omega_3 - R_2 \omega_2) \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = (T_3 - T_2) R_2(t) + C_2 U_2 - f \omega_2 \end{cases} \quad (10)$$

定义状态变量:

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [\omega_1, T_2, \theta, \dot{\theta}, \omega_2, T_3]^T \quad (11)$$

综上所述, 放卷系统的非线性仿射模型为:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} (R_1 x_2 - f x_1 - C_1 U_1 - R_1 T_1) \\ \frac{1}{L_1} (R_1 x_1 T_1 - R_2 x_5 x_2 - 2L_{D1} x_4 x_2 + A_2 E (R_2 x_5 - R_1 x_1 + 2L_{D1} x_4)) \\ x_4 \\ \frac{1}{J_{Da}} (-2L_{D1} x_2 - f_D x_4 + kL_{D2}^2 x_3) \\ \frac{1}{J_2} (x_6 R_2 - x_2 R_2 - f x_5 + C_2 U_2) \\ \frac{1}{L_2} (R_2 x_5 x_2 - R_3 \omega_3 x_6 + A_3 E (R_3 \omega_3 - R_2 x_5)) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y} = f_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [x_2, x_6]^T \quad (12)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为系统输入向量。

2 张力控制器

针对放卷张力控制设计了一种模糊自抗扰控制器, 具体结构见图 2, 其中 V_{11} , V_{12} 分别为料带张力 T_2 和 T_3 的预设值; z_{11} , z_{21} 分别为料带张力 T_2 , T_3 的

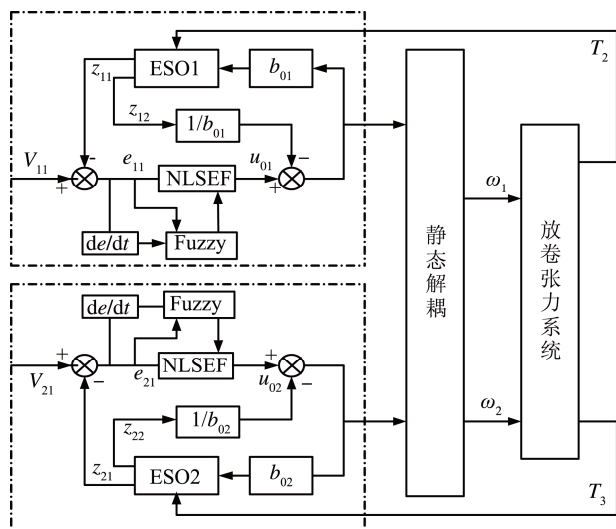


图 2 模糊自抗扰张力控制器

Fig. 2 Fuzzy active disturbance rejection controller

实时跟踪数值; z_{12} , z_{22} 为扰动观测值, 可用于估计系统的未知扰动和动态耦合; b_{0i} 为补偿因子; u_{0i} 为模糊控制器输出量。其中扩张状态观测器(ESO)可将模型未知扰动、张力和速度耦合部分以及张力动态变化看作系统总扰动, 并在估计的同时主动施加补偿; 模糊控制器则通过模糊推理、查询模糊规则表格, 实现非线性误差反馈相关参数的在线自调整, 进而提高自抗扰控制器性能。

定义跟踪误差为 $e_{i1} = V_{i1} - z_{i1}$, 其变化率为 e_{ci} 。那么模糊控制器的输入量分别为误差 e_{i1} 和变化率 e_{ci} , 设定其论域为 $[-6, 6]$; 输出量为参数 k_p , 设定其论域为 $[-1, 1]$ 。 e_{i1} , e_{ci} , k_p 的隶属度函数满足正态分布, 而且模糊语言集为 {NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}, 分别对应负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。为减少系统超调, 同时加快系统响应速度, 基于 Madam 模糊推理方法可得模糊规则, 见表 1。

表 1 模糊规则

Tab.1 Fuzzy rules

e_{i1}	对应各 e_{ci} 的 k_p 值						
	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NM	NM	NM	Z	Z
PM	NB	NM	NM	NM	NS	Z	PS
PS	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
NS	NS	NS	Z	PS	PM	PM	PM
NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB	PB
NB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

由表 1 可知, 如果偏差 e_{i1} 较小, k_p 取值应稍小, 否则超调过大容易引起振荡; 如果偏差 e_{i1} 较大, k_p 取值应适当大些, 以提高响应速度; 如果偏差很小或被消除, k_p 取值应继续减小, 可使系统快速稳定。另外, 如果 e_{i1} , e_{ci} 同号, 此时输出量具有偏离稳定值的趋势, 故应该增大 k_p 数值; 如果 e_{i1} , e_{ci} 异号, 此时输出量具有偏向稳定值的趋势, 故应该减小 k_p 数值。利用 ADRC 控制器, 可得参数 k_p 的修正值, 其表达式为:

$$k_p = k_{p0} + \{e_{i1}, e_{ci}\}_p \quad (13)$$

那么一阶模糊自抗扰控制器算法可描述为以下几个公式。

1) 扩张状态观测器(ESO):

$$\begin{cases} e_i(k+1) = z_{i1}(k) - T_j(k) \\ z_{i1}(k+1) = z_{i1}(k) + h(z_{i2}(k) - \beta_{i1} \cdot e_{i1}(k+1) + b_{0i} u_i(k)) \\ z_{i2}(k+1) = z_{i2}(k) + h(-\beta_{i2} \cdot \text{fal}(e_i(k+1), 0.5, \delta)) \end{cases} \quad (14)$$

2) 非线性误差反馈控制规律(NLSEF):

$$\begin{cases} e_{i1}(k+1) = V_{i1}(k+1) - z_{i1}(k+1) \\ u_{0i}(k+1) = k_{pi} \{e_{i1}, e_{ci}\}_p \end{cases} \quad (15)$$

3) 补偿量:

$$u_i(k+1) = u_{0i}(k+1) - \frac{1}{b_{0i}} z_{i2}(k+1) \quad (16)$$

式中: $i=1$ 时, $j=2$; $i=2$ 时, $j=3$; β_{i1} , β_{i2} 为 ESO 的非线性增益参数, 其大小由控制器离散控制周期决定; $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 为饱和函数, 其可以抑制信号抖动, 避免高频振荡, 使 ESO 快速光滑收敛。 $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 的具体算法可描述为:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{\alpha-1}} & |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha \text{sign}(e) & |e| > \delta \end{cases} \quad (17)$$

式中: δ 为线性区间长度; 若要保证扩张观测器对模型不确定性和未知扰动的良好适用性, 参数 α 越小越好。

3 仿真和分析

为验证所述模糊自抗扰控制器(F-ADRC)具有较好的解耦性能、抗干扰性能和内部鲁棒性。与常用 PID 控制器进行比较, 采用相同的数学模型, 针对放卷张力系统分别设计了模糊自抗扰控制器和 PID 控制器, 并进行仿真实验。放卷张力系统具体参数为: $L_1=1$ m; $L_2=0.35$ m; $A=7.5$ mm²; $L_{D1}=0.122$ m; $L_{D2}=0.064$ m; $R_2=R_3=0.03$ m; $k=1 \times 10^4$ kg/m²; $E=160$ MPa。

首先, 设定 $\omega_3=100$ r/min, $R_1=0.2$ m; 当 $t=5$ s 时, T_2 由 30 N 突变为 40 N; 当 $t=10$ s 时, T_2 由 60 N 突变为 50 N。PID 控制器和 F-ADRC 控制器的仿真结果见图 3, 可知, 在 PID 控制下, T_2 变化的同时 T_3 会出现大约 0.5 N 的波动, 表明仅仅依靠静态解耦 PID 控制并不具有良好的解耦特性。在 F-ADRC 控制下, T_2 的变化并没有影响到 T_3 , 表明即使仅仅依靠静态解耦 F-ADRC 控制也可实现系统解耦。在相同条件

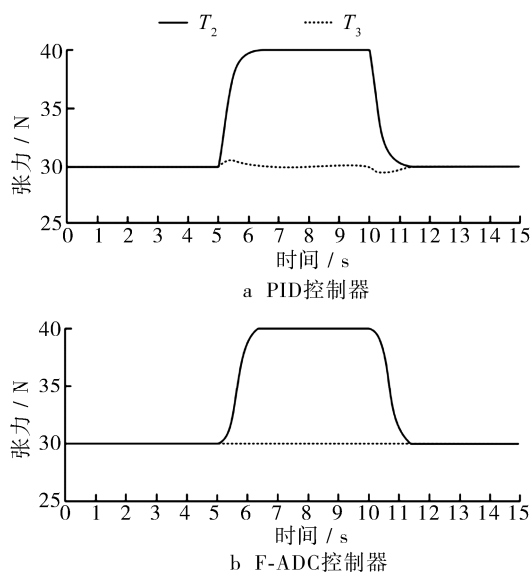


图3 解耦性能仿真曲线

Fig.3 Decoupling performance simulation curves

下, F-ADRC 比 PID 控制具有更好的解耦性能。

保持 $\omega_3=100$ r/min 不变, R_1 分别为 0.05, 0.1, 0.2 m 时, PID 控制和 F-ADRC 控制下, T_2 阶跃响应仿真结果见图 4。同理, 保持 $R_1=0.2$ m 不变, ω_3 分别为 100, 300, 500 r/min 时, PID 控制和 F-ADRC 控制下 T_3 阶跃响应仿真结果见图 5。

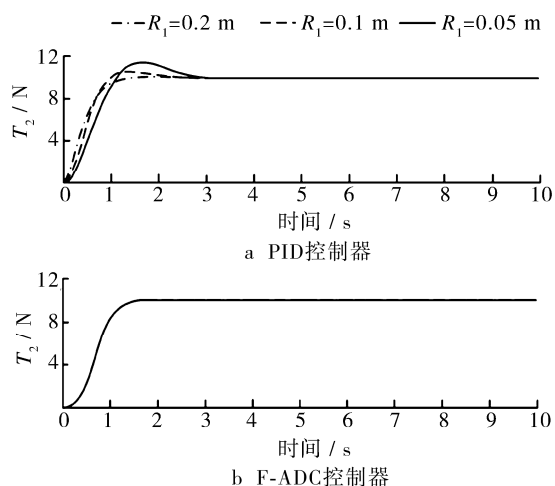


图4 T_2 阶跃响应仿真结果

Fig.4 The step response simulation results of T_2

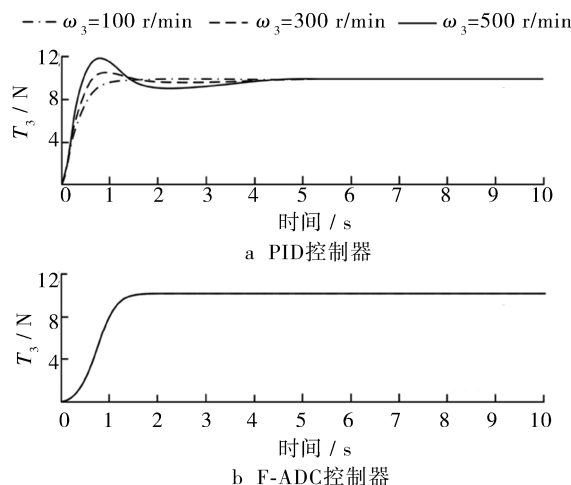


图5 T_3 阶跃响应仿真结果

Fig.5 The step response simulation results of T_3

由图 4—5 可以看出, 在 F-ADRC 控制下, 即使 R_1 和 ω_3 发生变化, T_2 和 T_3 均可在 1.5 s 的时间内稳定到 10 N, 但是, 在 PID 控制下, 随着 R_1 和 ω_3 的变化, T_2 和 T_3 的控制效果会出现一些变化。由图 4a 可知, 当 $R_1=0.2$ m 时, T_2 可在 1.5 s 内稳定于 10 N; 当 $R_1=0.05$ m 时, T_2 则需要 3 s 才能趋于稳定, 而且还可能会出现 15.5% 的超调量。当 $\omega_3=100$ r/min 时, T_3 可在 1.5 s 内稳定到 10 N, 但当 $\omega_3=500$ r/min 时, T_3 则需要 4.5 s 才能趋于稳定, 而且还可能会出现 19% 的超调量。这表明与 PID 控制器相比, F-ADRC 控制器对参数变化并不敏感, 因而具有更好的内部鲁棒性。

设定 $\omega_3=100$ r/min, $R_1=0.2$ m, 当 $t=5$ s 时, T_1 产生 10 N 的阶跃干扰; 当 $t=10$ s 时, T_2 产生 2 N 的阶跃干扰; PID 和 F-ADRC 控制下, 仿真响应曲线见图 6。由仿真结果可知, 基于 PID 控制, T_1 的扰动造成 T_2 出现 0.5 N 持续了 1.2 s 的波动, 对 T_3 的影响较小; 基于 F-ADRC 控制, T_1 的扰动对 T_2 和 T_3 的影响均很小。另外, PID 控制下 T_2 受到扰动, 其恢复所需时间约为 1.5 s, 而且对 T_3 的影响比较明显; 相对而言, F-ADRC 控制下 T_2 受到扰动, 其恢复所需时间约为 0.8 s, 而且对 T_3 的影响很小, 可以忽略不计。经分析可知, 在干扰影响时间和幅度等方面, 与 PID 控制器相比, F-ADRC 控制器均要小很多, 表明 F-ADRC 控制器具有更好的抗干扰能力。

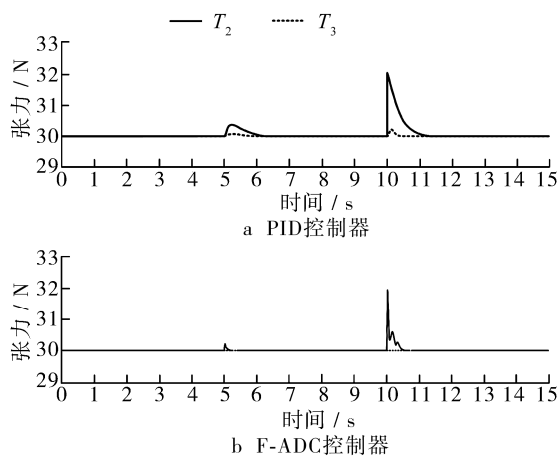


图 6 干扰下仿真响应曲线

Fig. 6 The simulation response curves under interference

4 结语

考虑到凹版印刷机恒张力控制对稳定性的要求, 根据张力产生原理以及摆辊、辊筒的动力学定律, 得到了放卷系统的非线性数学模型。利用模糊控制和自抗扰控制, 设计了一种张力控制器, 并给出了控制原理图。通过仿真研究可知, 文中方法具有很好的解耦性能以及抗干扰性、鲁棒性。模糊自抗扰控制器对放卷系统张力控制及相关电机控制具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 徐晶, 李健, 丁颂, 等. 基于自抗扰控制的放卷张力控制设计[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 150—155.
XU Jing, LI Jian, DING Song, et al. Design of Tension Controller of Unwinding System Based on Active Disturbance Rejection Control[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 150—155.
- [2] 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. H_∞ Robust Control Design for Unwinding Tension System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(1): 86—90.
- [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.
- HOU Hai-liang, NIAN Xiao-hong, PENG Zhi, et al. State Feedback Robust Control for Three-motor Winding System: LMI Approach[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(7): 111—118.
- [4] 张永芳, 畅亚利, 高阳阳, 等. 模糊自抗扰控制在凹印机放卷张力中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 144—149.
ZHANG Yong-fang, CHANG Ya-li, GAO Yang-yang, et al. Fuzzy ADRC Applied in Gravure Press Tension Control System[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(2): 144—149.
- [5] 钟亮, 包能胜, 于文平. 模糊自适应 PID 控制在凹版印刷机收卷张力控制中的应用[J]. 轻工机械, 2012, 30(4): 65—68.
ZHONG Liang, BAO Neng-sheng, YU Wen-ping. Application of Fuzzy Self-adaptive PID Control for Winding Tension Process Control in the Gravure Press Machine[J]. Light Industry Machinery, 2012, 30(4): 65—68.
- [6] 彭燕. 凹印机 PID 算法实现[J]. 包装工程, 2015, 36(17): 131—133.
PENG Yan. Implementation of Control Rule PID in Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(17): 131—133.
- [7] 赵庆海, 贾中华. 模糊自适应 PID 控制在张力控制中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 87—89.
ZHAO Qing-hai, JIA Zhong-hua. Application of Self-adaptive Fuzzy-PID in the Tension Control[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 87—89.
- [8] 刘飞. 凹印机印刷过程中张力计算与张力控制[J]. 北京印刷学院学报, 2007, 15(4): 50—53.
LIU Fei. The Tension Control and Calculation of the Tension on Gravure Press[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2007, 15(4): 50—53.
- [9] 卫宏, 周国平, 申冬琴. 凹印机电轴传动多电机同步控制策略[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 134—139.
WEI Hong, ZHOU Guo-ping, SHEN Dong-qin. Multi-motor Synchronous Control Strategy of Electronic Shaft Driving in Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 134—139.
- [10] CHOI K H, TRAN T T, KIM D S. Back-stepping Controller Based Web Tension Control for Roll-to-roll Web Printed Electronics System[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, System and Manufacturing, 2011, 5(1): 7—21.
- [11] PONNIAH U, ZUBAIR M. Fuzzy Decoupling to Reduce Propagation of Tension Disturbances in Roll-to-roll System[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 54(4): 1—11.
- [12] YOSHIDA T, TAKAGI S, MUTO Y, et al. Register Control of Sectional Drive Rotogravure Printing Press [M]. London: Springer, 2008.
- [13] DOU X J, WANG W. Robust Control of Multistage Printing Systems[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(3): 219—229.
- [14] OU C J, WU H L. Simulation of Tension Control Based on Fuzzy Neural Network[J]. Light Industry Machinery, 2006, 24(4): 102—105.
- [15] 史廷永, 王莉. H_∞ 鲁棒控制在张力控制系统中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2008, 15(6): 52—54.
SHI Ting-yong, WANG Li. The Application of H_∞ Robust Control in the Tension Control System[J]. Instrumentation Customer, 2008, 15(6): 52—54.
- [16] UORORTH F J, UAO Z Q. An Active Disturbance Rejection Control Solution for Hysteresis Compensation[C]// Seattle: American Control Conference, 2008.