DOI: 10.7641/CTA.2014.30825

凹印机多色套准系统自抗扰解耦控制

刘善慧^{1†},梅雪松²,何 奎^{2,3},李 健³

(1. 西安理工大学 印刷包装工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对凹版印刷机对套准控制高精度和高稳定性的要求, 提出了一种利用自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)技术设计多色套准系统解耦控制器的方法. 首先, 根据无轴传动模式下多色套准系统的工作机理, 建立了多色套准系统的非线性耦合数学模型, 并根据ADRC解耦规则推导了套准系统的解耦模型, 得到了 套准系统的阶数和静态解耦模型. 其次, 在套准系统阶数和静态解耦模型的基础上, 利用ADRC策略对套准系统解 耦控制器进行了设计. 最后, 仿真结果表明, 所设计的ADRC解耦控制器能够很好地对各种系统干扰进行补偿, 实现 了多色套准系统的高精度控制, 具有比PID控制器更好的控制性能.

关键词: 凹印机; 套准系统; 解耦控制; 自抗扰控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Active disturbance rejection decoupling control for multi-color register system in gravure printing machine

LIU Shan-hui^{1†}, MEI Xue-song², HE Kui^{2,3}, LI Jian³

(1. School of Printing and Packaging Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;

3. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: Based on active disturbance rejection control (ADRC) technique, a decoupling controller is presented to strengthen precision and stability of multi-color register system in gravure printing machine. First, according to the register system working principle, a nonlinear and coupling model is established, and then, under the ADRC decoupling rules, a decoupling model is constructed to determine the register system order and static decoupling model. Then, following the order and static decoupling model, an ADRC decoupling controller is designed to enhance the speed and accuracy of register control. Finally, the simulation shows that the proposed register decoupling controller is able to realize a high precision control for the multi-color register system and endowed with better control performance than PID controller in register control.

Key words: gravure printing machine; register system; decoupling control; active disturbance rejection control

1 引言(Introduction)

机组式凹印机套准误差包括两类:横向套准误差 和纵向套准误差,即垂直料带运动方向误差和沿料带 运动方向误差.随着无轴传动技术在高速机组式凹印 机中的广泛应用,纵向套准误差补偿方式也发生了很 大的变化,由传统的补偿辊补偿方式转变为驱动版辊 的伺服电机直接补偿方式.然而,在无轴传动模式下, 多色套准系统建模和控制技术研究却相对滞后.如何 在模型不完善的基础上设计高性能的套准控制器已 成为提高凹印机性能的关键问题.

目前,常用的多色套准控制方式为PID控制以及前

馈PID控制. Yoshida等^[1-2]分别对机械长轴传动和无 轴传动下的纵向套准系统进行了建模,并设计了简单 的增益前馈控制器. Kang等^[3-6]对横向套准系统建 模、纵向套准系统建模及两系统联合建模做了初步探 索,同时针对速度干扰设计了前馈PID控制器且取得 了良好的控制效果. Li等^[7]对双色纵向套准系统模型 做了详细的推导并针对张力和速度干扰设计了前 馈PID控制器. 随着现代控制理论的发展,一些智能算 法开始引入机组式印刷机的套准控制系统. 党澎湃 等^[8]采用神经元自适应PSD控制策略设计了多色套准 控制系统. 谢志萍^[9]针对无轴传动胶印机套准系统控

收稿日期: 2013-08-06; 录用日期: 2014-05-16.

[†]通信作者. E-mail: shanhuiliu820404@163.com; Tel.: +86 29-82312467. 基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAF13B06, 2013BAF04B01).

制问题,提出了单神经元自适应PID套准误差主从控 制策略.万鹏飞等^[10]以凹印机套准系统的多电机同步 问题为研究对象,提出了基于补偿原理的模糊PID的 同步控制算法.然而,随着凹印机印刷速度的提高, PID及以其为核心的前馈控制已不能满足套准系统的 精度要求,而智能控制方法的实时性和实用性还有待 进一步验证.

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)不但可以方便的实现多输入、多输出、强耦合 系统的解耦,而且可以主动估计系统内外干扰并在控 制法则中实时对其进行补偿^[11-13],同时也已成功的应 用在多种工业实践中^[14-16].因此,本文以无轴传动 4色凹印机纵向套准系统为研究对象,在建立多色套 准系统非线性耦合模型的基础上,设计了多色套准系 统的ADRC解耦控制器.仿真结果表明,所设计的控 制器具有良好的抗干扰能力,实现了对套准系统的高 精度控制.

2 系统建模及静态解耦模型(System modeling and static decoupling model)

无轴传动机组式4色凹印机套准系统结构如图1所 示,主要由印刷单元、烘干机构及相关传感部件组成, 其中烘箱会对印刷过程中的料带带来大量未知干扰. 各印刷单元均由独立的伺服电机直接驱动,且电机工 作在速度模式下.第1色印刷辊速度始终保持恒定,后 续色印辊根据检测到的套准误差相应的调整各自速 度.印刷过程中,多色套准系统呈现出强耦合、强干 扰、不确定等特点,这对多色套准系统控制器的稳定 性、抗干扰性设计提出了较高的要求.



Fig. 1 Schematic diagram of the four-color register system

图中: L为色组间料带名义长度; $\omega_1-\omega_4$ 为印辊的 角速度; T_1-T_3 为印辊间料带的张力; $e_{12}-e_{34}$ 为各色 组相对于前一色组的套准误差.

根据文献[7],可以得到双色组非线性套准系统模型如下:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}e_{12}(t)}{\mathrm{d}t} = V_2(t) - V_1(t - t_{\mathrm{T}}) - \varepsilon_1(t) V_1(t) + \\ \varepsilon_0(t - t_{\mathrm{T}}) V_1(t - t_{\mathrm{T}}) , \\ L \frac{\mathrm{d}\varepsilon_1(t)}{\mathrm{d}t} = V_2(t) - V_1(t) + \varepsilon_0(t) V_1(t) - \\ \varepsilon_1(t) V_2(t) , \end{cases}$$
(1)

式中: ε_0 , ε_1 分别为对应于张力 T_0 和 T_1 的应变; V_1 , V_2 分别为印辊1和2的线速度; t_T 为延时时间. 由速度和角速度及张力和应变的关系可得

$$\begin{cases} V_i(t) = R\omega_i(t), \\ \varepsilon_i(t) = \frac{T_i(t)}{AE}, \end{cases}$$
(2)

式中: *R*为印辊的半径; *A*为料带的横截面积; *E*为料带的弹性模量.

将式(2)代入式(1)化简后可得

$$\begin{cases}
AE \frac{de_{12}(t)}{dt} = AER \left(\omega_2(t) - \omega_1(t - t_T) \right) - \\
RT_1(t)\omega_1(t) + RT_0(t - t_T)\omega_1(t - t_T), \\
L \frac{dT_1(t)}{dt} = AER \left(\omega_2(t) - \omega_1(t) \right) + RT_0(t)\omega_1(t) - \\
RT_1(t)\omega_2(t).
\end{cases}$$
(3)

由式(3)可以看出,双色组套准系统模型由套准误差方 程和张力辅助方程两部分组成.根据图1,将式(3)进行 推广可建立4色套准系统的套准误差方程和张力辅助 方程分别如下:

$$\begin{cases} \frac{de_{12}(t)}{dt} = R\omega_2(t) - \phi T_1(t)\omega_1(t) - R\omega_1(t - t_{\rm T}) + \\ \phi T_0(t - t_{\rm T})\omega_1(t - t_{\rm T}), \\ \frac{de_{23}(t)}{dt} = R\omega_3(t) - \phi T_2(t)\omega_2(t) - R\omega_2(t - t_{\rm T}) + \\ \phi T_1(t - t_{\rm T})\omega_2(t - t_{\rm T}), \\ \frac{de_{34}(t)}{dt} = R\omega_4(t) - \phi T_3(t)\omega_3(t) - R\omega_3(t - t_{\rm T}) + \\ \phi T_2(t - t_{\rm T})\omega_3(t - t_{\rm T}), \end{cases}$$
(4)

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}T_{1}(t)}{\mathrm{d}t} = AE\varphi\left(\omega_{2}(t) - \omega_{1}(t)\right) + \varphi T_{0}(t)\omega_{1}(t) - \varphi T_{1}(t)\omega_{2}(t), \\ \frac{\mathrm{d}T_{2}(t)}{\mathrm{d}t} = AE\varphi\left(\omega_{3}(t) - \omega_{2}(t)\right) + \varphi T_{1}(t)\omega_{2}(t) - \varphi T_{2}(t)\omega_{3}(t), \\ \frac{\mathrm{d}T_{3}(t)}{\mathrm{d}t} = AE\varphi\left(\omega_{4}(t) - \omega_{3}(t)\right) + \varphi T_{2}(t)\omega_{3}(t) - \varphi T_{3}(t)\omega_{4}(t), \end{cases}$$

$$(5)$$

其中: $\omega_1 - \omega_4$ 是系统输入; $e_{12} - e_{34}$ 是系统输出; $\phi = R/(AE)$; $\varphi = R/L$. 式(4)可以写为状态方程的形式如下:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{e}(t)}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{f}(t) + \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{\omega}(t), \qquad (6)$$

式中: **f**(t)称为动态耦合部分, **B**(t)称为静态耦合部分, 相关表达式如下:

$$\boldsymbol{f}(t) = [f_{1}(t) \ f_{2}(t) \ f_{3}(t)]^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \phi(T_{0}(t-t_{\mathrm{T}})\omega_{1}(t-t_{\mathrm{T}}) - T_{1}(t)\omega_{1}(t)) - R\omega_{1}(t-t_{\mathrm{T}}) \\ \phi T_{1}(t-t_{\mathrm{T}})\omega_{2}(t-t_{\mathrm{T}}) - R\omega_{2}(t-t_{\mathrm{T}}) \\ \phi T_{2}(t-t_{\mathrm{T}})\omega_{3}(t-t_{\mathrm{T}}) - R\omega_{3}(t-t_{\mathrm{T}}) \end{bmatrix},$$

$$(7)$$

$$\boldsymbol{e}(t) = [e_{12}(t) \ e_{23}(t) \ e_{34}(t)]^{\mathrm{T}}, \tag{8}$$
$$\boldsymbol{B}(t) = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ -\phi T_{2}(t) & R & 0 \end{bmatrix}, \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{12}(t) & 1 & 0 \\ 0 & -\phi T_3(t) & R \end{bmatrix}, \qquad (5)$$

 $\boldsymbol{\omega}(t) = [\omega_2(t) \ \omega_3(t) \ \omega_4(t)]^{\mathrm{T}}.$ (10)

引入虚拟控制量 $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ u_3(t)]^{\mathrm{T}}$,并且定义如下:

$$\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{\omega}(t), \qquad (11)$$

将式(11)代入式(6)可得

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{e}(t)}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{f}(t) + \boldsymbol{u}(t). \tag{12}$$

可见, 在引入虚拟控制量**u**(t)之后套准系统在每个通路上都是一个单输入单输出的一阶系统, 即系统实现了解耦. 因为

$$|\boldsymbol{B}(t)| = \begin{vmatrix} R & 0 & 0 \\ -\phi T_2(t) & R & 0 \\ 0 & -\phi T_3(t) & R \end{vmatrix} | = R^3 \neq 0, \quad (13)$$

所以矩阵B(t)是可逆的,有

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \boldsymbol{B}^{-1}(t)\boldsymbol{u}(t), \qquad (14)$$

其中B⁻¹(t)称为静态解耦模型,其表达式如下:

$$\boldsymbol{B}^{-1}(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 & 0\\ \frac{T_2(t)}{RAE} & \frac{1}{R} & 0\\ \frac{T_2(t)T_3(t)}{RA^2E^2} & \frac{T_3(t)}{RAE} & \frac{1}{R} \end{bmatrix}.$$
 (15)

可见,可以针对虚拟控制量*u*(*t*)来设计ADRC控制器,然后通过公式(14)计算出实际的控制量,从而实现对多色套准系统的解耦控制.

3 ADRC解耦控制器设计(Design ADRC decoupling controller)

根据多色套准系统的阶数和静态解耦模型,设计 了ADRC解耦控制器,其结构如图2所示.





Fig. 2 Structure of the ADRC decoupling control methodology

由图2可以看出整个解耦控制器主要有3部分组成:1) ADRC控制器,主要由3个独立的ADRC控制器。组成,完成对虚拟控制量**u**(t)的求解,其中ADRC1, ADRC2, ADRC3分别针对*e*₁₂,*e*₂₃,*e*₃₄回

路设计; 2)静态解耦模型, 负责将虚拟控制量u(t)转 化为实际控制量 $\omega(t)$; 3) 张力辅助方程, 通过采集 到的角速度信号 ω_{c1} , ω_{c2} 和 ω_{c3} 求出静态解耦模型所 需要的张力信号 T_2 和 T_3 . 因为多色套准系统为一阶系统,所以每个ADRC 控制器均由一个二阶跟踪微分器(tracking differentiator, TD)、一个二阶扩张状态观测器(extended state observer, ESO)和一个非线性状态误差反馈控制律 (nonlinear state error feedback, NLSEF)构成. TD用 来安排过渡过程: v_{i1} 用来跟踪参考输入 $e_{ri(i+1)}$; ESO 是ADRC的核心,用来实现对输出变量的跟踪 和对动态耦合f(t)、未知模型及外部干扰的估计: z_{i1} 用来跟踪系统输出变量 $e_{i(i+1)}$, z_{i2} 用来主动估计 系统的动态耦合 $f_i(t)$ 、未知模型及外部干扰; NLSEF是控制法则,用来实现对误差及微分误差合 理组合,并和反馈一起主动补偿系统的动态耦 合、未知模型及外部干扰.

文献[11–12]中对TD, ESO和NLSEF的表达式做 了详细的介绍,这里给出完整的ADRCi(*i* = 1, 2, 3) 算法公式如下:

$$\begin{cases} \operatorname{fh}_{i}(k) = \operatorname{fhan}(v_{i1}(k) - e_{\operatorname{ri}(i+1)}(k), v_{i2}(k), r_{i}, h), \\ v_{i1}(k+1) = v_{i1}(k) + hv_{i2}(k), \\ v_{i2}(k+1) = v_{i2}(k) + h\operatorname{fh}_{i}(k), \\ q_{i}(k) = z_{i1}(k) - e_{i(i+1)}(k), \\ z_{i1}(k+1) = z_{i1}(k) + h(z_{i2}(k) - \beta_{i1}q_{i}(k) + b_{i}u_{i}(k)), \\ z_{i2}(k+1) = z_{i2}(k) + h(-\beta_{i2}\operatorname{fal}(q_{i}(k), 0.5, h)), \\ e_{i}(k+1) = v_{i1}(k+1) - z_{i1}(k+1), \\ u_{i}(k+1) = k_{\operatorname{pi}}\operatorname{fal}(e_{i1}(k+1), 0.5, \delta) - \frac{z_{i2}(k+1)}{b_{i}}, \end{cases}$$
(16)

式中: k 为离散数 ($k = 0, 1, 2, \cdots$); h 为积分步长; r_i 为速度因子; β_{i1} 和 β_{i2} 为ESO增益系数; k_{pi} 为 NLSEF增益系数; b_i 为补偿因子; fhan(x_1, x_2, r, h) 为最速控制综合函数, 其算法如下:

$$\begin{cases} d = rh; \ d_0 = hd, \\ y = x_1 + hx_2; \ a_0 = \left(d^2 + 8r |y|\right)^{\frac{1}{2}}, \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \operatorname{sgn} y, \ |y| > d_0, \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leqslant d_0, \end{cases}$$

$$fhan(x_1, x_2, r, h) = -\begin{cases} r \operatorname{sgn} a, \ |a| > d, \\ r \frac{a}{d}, & |a| \leqslant d, \end{cases}$$
(17)

 $fal(e, \alpha, \delta)$ 算法公式为

$$\operatorname{fal}(e,\alpha,\delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta, \\ |e|^{\alpha} \operatorname{sgn} e, & |e| > \delta. \end{cases}$$
(18)

为了验证 ADRC 解耦控制器的性能,本文对 ADRC解耦控制器和PID控制器进行了对比仿真研

究. 仿真在Simulink中进行, 采用固定步长且步长为 10 ms, 所采用模型参数如表1所示. 在相同的数学 模型和模型参数的基础上, ADRC解耦控制器 和PID控制器的参数均是在 $\omega_1 = 100$ r/min的条件 下调整得到的, 且各参数不随仿真条件的变化而变 化. 经调整, PID控制器参数为: $K_{Pi} = 63$; $K_{Ii} = 30$; $K_{Di} = 1.5$ (i = 1, 2, 3). ADRC 解 耦 控 制 器 中 各 ADRC控制器参数如表2所示.

表1 套准系统模型参数

Table 1 Model parameters of the register system

参数名称	参数符号	数值
料带弹性模量/Pa	E	2.1×10^{9}
料带横截面积 $/m^2$	A	2.0×10^{-5}
色组间料带名义长度/m	L^*	9.1
印辊半径/m	R^*	0.2
色组间料带名义张力/N	T^*	100

表 2 ADRC解耦控制器参数

Table 2 ADRC decoupling controller parameters

控制器	控制器参数
ADRC1	$r_1 = 900, \beta_{11} = 100, \beta_{12} = 875, k_{p1} = 0.125, b_1 = 1$
ADRC2	$r_2 = 900, \beta_{21} = 100, \beta_{22} = 880, k_{p2} = 0.161, b_2 = 1$
ADRC3	$r_3 = 900, \beta_{31} = 100, \beta_{32} = 882, k_{p3} = 0.105, b_3 = 1$

4.1 ADRC解耦控制器抗张力干扰性能(ADRC decoupling controller performance against tension interference)

在系统稳定运行5 s后,牵引段张力T₀从100 N 阶跃上升到120 N,此时,各套准误差在PID控制和 ADRC解耦控制下随印刷速度变化的仿真曲线如 图3-4所示.





由图3-4可见, 无论在PID控制下还是在ADRC 解耦控制下, 各套准误差都展现出随速度的增加而 增大的趋势, 且到达峰值的时间和系统的延时时间 有关; 但是, 在同样的仿真条件下, ADRC解耦控制 下各套准误差峰值远小于PID控制下对应的各套准 误差峰值, 且ADRC解耦控制下各套准误差曲线 变化更加平缓, 持续时间更短. 仿真结果表明, 在 ADRC解耦控制器中, 对张力干扰造成的各套准误 差进行了有效的估计和补偿量, 获得了远好于PID 控制器的抗张力干扰性能.





Fig. 4 Register errors in simulation when $\omega_1 = 200$ r/min

4.2 ADRC解耦控制器抗速度干扰性能(ADRC decoupling controller performance against speed interference)

系统稳定运行5 s后, 在ω₁上叠加一个幅值为 0.1 r/min, 频率为0.5 rad/s的正弦扰动. 各套准误差 在PID控制和ADRC解耦控制下随印刷速度变化的 仿真曲线如图5-6所示.









图 6 在 $\omega_1 = 200$ r/min时, 套准误差仿真曲线 Fig. 6 Register errors in simulation when $\omega_1 = 200$ r/min

对比图5和图6可知,首先,在ADRC解耦控制下, 各套准误差展现出和PID控制下类似的变化趋势, 即随着印刷速度的增大而变小,这主要是因为速度 越大,速度干扰相对就越小,所以引起的各套准误 差也越小;其次,无论在PID控制下还是在ADRC解 耦控制下,各套准回路都产生了与干扰速度相同频 率的周期误差,但在同样的仿真条件下,PID控制下 套准误差峰值远大于ADRC解耦控制下的同一套准 误差峰值.仿真结果表明,ADRC解耦控制器对速度 干扰产生的套准误差进行了有效的估计和补偿,具 有远强于PID控制器的抗速度干扰能力.

4.3 ADRC解耦控制器抗料带特性变化的性能 (ADRC decoupling controller performance against web characteristic change)

经过烘箱后料带特性的变化是一个重要的未知 干扰,因此,在 $\omega_1 = 200$ r/min且在前文所述张力和 速度干扰下,令料带弹性模量降低20%,此时,各套 准误差在PID控制和ADRC解耦控制下的仿真曲线 如图7-8所示.









对比图7和图4可见,在ADRC解耦控制和PID控制下,各套准误差均随着E的减小而增大,但是,在同样的仿真条件下,ADRC解耦控制下各套准误差峰值远小于PID控制下对应的各套准误差峰值,且各套准误差曲线变化趋势比PID控制下相应曲线更加平缓,持续时间也更短.比较图8和图6可知,在PID控制下,各套准误差随着E的减小只是在干扰起始阶段有所增加,其他部分基本保持不变,但是,ADRC解耦控制下,各套准误差均不随着E的减小而变化.仿真结果表明,ADRC解耦控制器可以有效地估计并补偿因料带性能变化引起的套准误差,具有远好于PID控制器的控制性能.

5 结论(Conclusion)

针对无轴传动机组式凹印机多色套准系统强耦 合、强干扰、精确模型建模困难的特点,利用ADRC 技术设计了依赖模型信息少、结构简单且易于实现 的多色套准系统ADRC解耦控制器.仿真研究表明, 所设计的解耦控制器很好的抑制了张力、速度和料 带特性变化对套准误差产生的影响,大大提高了套 准系统的控制精度,比PID控制器更能适应凹印机 工作的恶劣环境.

参考文献(References):

- YOSHIDA T, TAKAGI S, SHEN T, et al. Modeling and cooperative resister control of gravure printing press [J]. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, 2008, 74(2): 339 – 345.
- [2] YOSHIDA T, TAKAGI S, MUTO Y, et al. Register control of rotogravure printing press. Application of nonlinear control theory to sectional drive printing press [J]. *Electronics and Communications in Japan*, 2011, 94(1): 17 – 24.
- KANG H K, LEE C W, SHIN K H. A novel cross directional register modeling and feedforward control in multi-layer roll-to-roll printing
 J. Journal of Process Control, 2010, 20(5): 643 – 652.
- [4] KANG H K, LEE C W, LEE J M, et al. Cross direction register modeling and control in a multi-layer gravure printing [J]. *Journal of mechanical science and technology*, 2010, 24(1): 391 – 397.

- [5] KANG H K, LEE C W, SHIN K H. Modeling and compensation of the machine directional register in roll-to-roll printing [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(5): 645 – 654.
- [6] KANG H K, LEE C W, SHIN K H. Novel modeling of correlation between two-dimensional registers in large-area multilayered rollto-roll printed electronics [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(1): 6701.
- [7] LI J, MEI X S, TAO T, et al. Research on the register system modeling and control of gravure printing press [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2012, 226(3): 626 – 635.
- [8] 党澎湃,田健,王华民,等. 全数字凹印机自动套准系统智能控制研究 [J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(3): 306 309.
 (DANG Pengpai, TIAN Jian, WANG Huamin, et al. Research of digitized gravure press auto-register accuration system [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(3): 306 309.)
- [9] 谢志萍. 无轴传动胶印机自适应套准控制系统的研究 [J]. 机械设计 与制造, 2012, 49(9): 87 – 89.
 (XIE Zhiping. Research on self-adaptive registration control system of shaftless driving offset press [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012, 49(9): 87 – 89.)
- [10] 万鹏飞, 王莉. 基于模糊PID的凹印机套准同步控制研究 [J]. 包装与 食品机械, 2008, 26(6): 12 – 14, 49.
 (WAN Pengfei, WANG Li. The research of gravure printer's registration synchronization control based on fuzzy-PID [J]. *Packaging and Food Machinery*, 2008, 26(6): 12 – 14, 49.)
- [11] 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 Jingqing. Active Disturbance Rejection Control Technique the Technique Forestimating and Compensating the Uncertainties [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.)
- [12] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [13] 高志强. 自抗扰控制思想探究 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498 – 1510.
 (GAO Zhiqiang. Decoupling controller design for unwinding tension system [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1498 –
- [14] LIU S H, MEI X S, KONG F F, et al. Tension controller design for unwinding tension system based on active disturbance rejection control [C] //Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Chengdu: IEEE, 2012: 1798 – 1803.
- [15] 王丽君, 童朝南, 李擎, 等. 热连轧板宽板厚的实用自抗扰解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(11): 1471 1478.
 (WANG Lijun, TONG Chaonan, LI Qing, et al. A practical decoupling control solution for hot strip width and gauge regulation based on active disturbance rejection [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(9): 1471 1478.)
- [16] 吴忠,黄丽雅,魏孔明,等. 航天器姿态自抗扰控制 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1617 1622.
 (WU Zhong, HUANG Liya, WEI Kongming, et al. Active disturbance rejection control of attitude for spacecraft [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1617 1622.)

作者简介:

1510.)

刘善慧 (1982-), 男, 讲师, 主要研究方向为伺服控制、凹版印刷 机关键控制技术, E-mail: shanhuiliu820404@163.com;

梅雪松 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为运动控制与数控系统、激光加工和精密测试技术, E-mail: xsmei@mail.xjtu. edu.cn;

何 奎 (1981–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为凹版印刷机关 键控制技术, E-mail: hemain@126.com;

李 健 (1972–), 男, 讲师, 主要研究方向为非线性控制、智能控制等, E-mail: ly-sword@163.com.