

凹印机套色系统的自抗扰解耦控制

陈义君[†], 陈智华, 邓忠华

(华中科技大学 自动化学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 无轴凹印机套色系统的运行过程中存在各种形式的扰动, 且各色组的套色误差通过张力传递相互耦合, 严重影响系统的套准精度, 必须进行解耦和抗扰控制. 本文在建立了凹印机套色系统的近似数学模型的基础上, 将扩张状态观测器与前馈相结合, 提出了一种新的自抗扰控制策略. 把一个强耦合、大扰动、模型不确定的复杂非线性系统动态补偿为近似的二阶线性系统, 降低了系统的控制难度, 改善了系统的动态性能, 并使系统具有自抗扰的能力. 仿真结果表明, 与传统的前馈控制和非线性控制相比, 该算法使系统控制误差的收敛速度加快, 动态响应性能更优越, 实现了色组间的解耦并使系统具有良好的抗扰性能.

关键词: 凹印机; 建模; 前馈; 扩张状态观测器; 自抗扰控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Active disturbance rejection and decoupling control of gravure press register system

CHEN Yi-jun[†], CHEN Zhi-hua, DENG Zhong-hua

(College of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In the running process of non-shaft gravure press, there exist various forms of disturbances; the register error of each unit couples with that of other units through tension propagates which seriously affects the system registration accuracy. Therefore, decoupling and disturbance rejection control is required. The approximate mathematical model for printing press is established, and a new decoupling and disturbance rejection control strategy which combines extended state observer with feedforward is proposed. It turns the complicated nonlinear system with strong coupling, large disturbance and model uncertainty into an approximate second-order linear system through dynamic compensation, thus, reducing the control difficulty of the system and improving the system dynamic performance and active disturbance rejection ability. Simulation results show that compared with traditional feedforward control and nonlinear control, the proposed method brings higher convergence speed for the control error and improves the dynamic response performance, decouples between units and provides good disturbance rejection performance.

Key words: gravure printing press; modelling; feedforward; extended state observer; active disturbance rejection control

1 引言(Introduction)

无轴凹版印刷系统因其印刷色差小、色彩丰富、质量稳定、自动化程度高等优点成为了目前印刷行业的主导. 如图1所示, 无轴系统每个印刷单元由各自的伺服电机独立驱动, 通过调整版辊相位来纠正当前色组的套印偏差. 前段的纠偏控制引起张力波动^[1-2], 会导致后段的套印偏差受到干扰, 且印刷色组越多, 耦合情况就越复杂. 同时印刷过程不确定因素多、干扰也很复杂.

针对这样的多变量、强耦合、大时滞、扰动复杂的非线性系统, 一些学者首先尝试建立了套印过程的数学模型. 文献[1-2]根据质量守恒建立了凹印机的近

似模型, 模型准确度较高, 在实际应用中取得了一定效果. 其中文献[1]建立了机械轴凹印机的数学模型, 文献[2]建立了电子轴凹印机的数学模型. 本文对文献[2]中的模型做了进一步改进, 把模型转化为以版辊速度为控制量的实际可用的离散模型. 凹印机的套准受印刷材料、色组间距、干燥箱温度等因素影响, 套色误差受外界因素的干扰很大, 且材料的形变规律复杂^[3], 无法建立一个适用于所有承印材料的数学模型. 因此还需要找到一种有效的补偿控制方法, 在模型不能精准匹配的情况下实现解耦, 同时使系统具备一定的抗扰能力.

文献[2]采用了基于前馈补偿的PD控制器, 算法简

单易行, 在模型精确时能取得较好的解耦控制效果. 在文献[4]中, 作者采用了文献[2]中的数学模型, 同时提出了一种非线性控制律, 在某些情况下改善了系统的解耦性能. 文献[5]提出了一种模糊PID控制方案, 不依赖精确的数学模型, 控制性能较好, 然而控制表的制定、论域的选择、量化因子的选取等都依赖于专家知识和经验. 文献[6-7]提出将自抗扰控制(auto-automatic disturbance rejection control, ADRC)与神经网络相结合的控制方法, 该方法也不依赖于系统的精确模型, 具有较好的抗扰性能, 但实现复杂, 需要整定的参数过多, 实用性不强. 文献[8-9]分别将扩张状态观测器(extended state observer, ESO)应用于同样具备强

耦合、复杂非线性特点的电力系统和航天器姿态控制中, 都取得了良好的控制效果, 验证了ESO的现实可行性.

本文提出了一种将ESO和前馈补偿相结合的控制方法, 即用前馈实现基本解耦, 把模型参数的不确定当作内扰、前馈补偿的偏差和其他未知扰动当作外扰, 共同构成系统的总扰动, 再利用ESO观测扰动并进行补偿. 在后面的章节中, 首先建立了凹印机的数学模型, 然后论述了本文提出的控制算法, 最后在仿真中验证了算法的解耦和抗扰性能, 并与其他方法进行了对比.

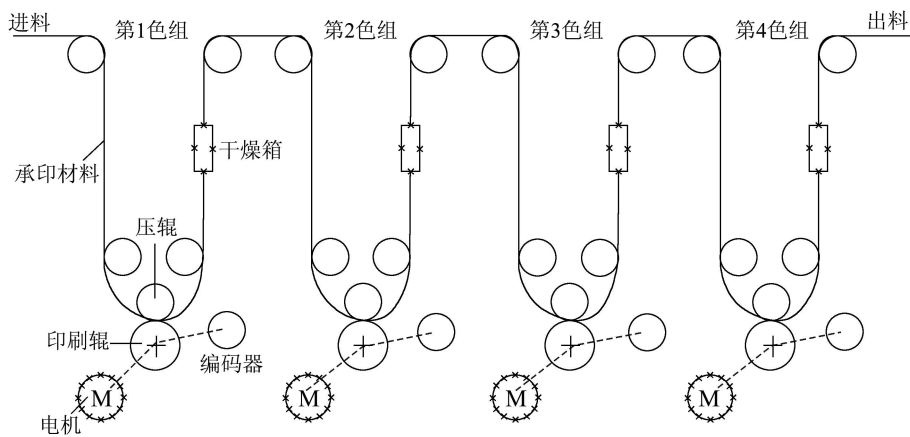


图 1 电子轴凹印机结构图

Fig. 1 Structure chart of shaftless gravure press

2 凹印机的数学模型(The mathematical model of gravure printing press)

2.1 连续模型(Continuous model)

文献[2]中描述的 i th和 $(i + 1)$ th色之间误差模型结构图如图2所示.

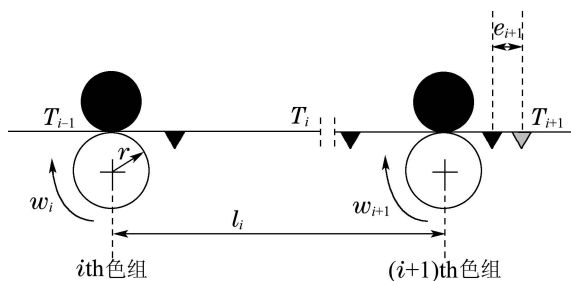


图 2 套色误差

Fig. 2 Register error

图2中, 黑色和灰色三角形分别是 i th和 $(i + 1)$ th色组的印刷图案. e_{i+1} 为第 i 色和第 $i + 1$ 色图案之间的偏差; T_i 为第 i 色和第 $i + 1$ 色间卷纸的张力; l_i 为第 i 色和第 $i + 1$ 色版辊轴线之间的距离; w_i 为第 i 色版辊的角速度; r 表示版辊半径.

文献[2]提出的凹印机模型表达式如下:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta T_i(t)}{dt} = a(\Delta T_{i-1}(t) - \Delta T_i(t)) + b(\Delta \omega_{i+1}(t) - \Delta \omega_i(t)), \\ \frac{de_{i+1}(t)}{dt} = c(\Delta T_i(t) - \Delta T_{i-1}(t - t_L)), \end{cases} \quad (1)$$

式中 $a = \frac{r\omega^*}{l_i}$, $b = \frac{r(1+KT^*)}{Kl_i}$, $c = \frac{Kr\omega^*}{(1+KT^*)^2}$. 其中 $\omega_i(t) = \omega^* + \Delta\omega_i(t)$, $T_i(t) = T^* + \Delta T_i(t)$, ω^* , T^* 为稳态值, $\Delta\omega_i(t)$, $\Delta T_i(t)$ 为 t 时刻的瞬态变化值; K 是与材料密切相关的系数, 对于一般的承印材料其数量级为 10^{-4} , 单位为 N^{-1} ; t_L 为第 $i - 1$ 色张力传递到第 i 色的滞后时间. 模型的详细推导见文献[2].

2.2 离散模型(Discrete model)

式(1)是一个基于版辊角速度控制的模型, 但实际中电子轴凹印机的套色系统是基于线速度控制的, 因此还需要在该式基础上做进一步转化.

设 $\Delta u_i(t)$ 为第 i 色版辊的线速度增量, 即控制量, 有 $\Delta u_i(t) = r\Delta\omega_i(t)$, 代入式(1), 进行Laplace变换并迭代化简, 可得凹印机的复频域模型

$$\begin{cases} \Delta T_{i-1}(s) = \\ \frac{a}{s+a} \Delta T_{i-2}(s) + \frac{b/r}{s+a} (\Delta u_i(s) - \Delta u_{i-1}(s)), \\ \Delta e_i(s) = \\ \frac{bc/r}{s(s+a)} \Delta u_i(s) - \frac{bc/r}{s(s+a)} (e^{-t_L s} + \frac{s}{s+a}) \cdot \\ \Delta u_{i-1}(s) - \sum_{j=1}^{i-2} \frac{bc/r}{s(s+a)} (\frac{a}{s+a} - e^{-t_L s}) \frac{s}{s+a} \cdot \\ (\frac{a}{s+a})^{i-j-2} \Delta u_j(s) + \frac{c}{s} (e^{-t_L s} - \frac{a}{s+a}) \cdot \\ (\frac{a}{s+a})^{i-2} \Delta T_0(s), \end{cases} \quad (2)$$

式中 $i \geq 4$, 即套色色组数大于等于4, 且 $\Delta u_1(s) = 0$. 由于放卷张力 T_0 由独立的张力控制系统控制^[10], $\Delta T_0(s) \approx 0$.

对式(2)进行离散化, 便可得到凹印机套色误差离散模型

$$e_i(z) = G_p(z)u_i(z) + G_1(z)u_{i-1}(z) + \sum_{j=2}^{i-2} G_{i-j}(z)u_j(z) + G_T(z)T_0(z), \quad (3)$$

其中:

$$G_p(z) = Z\left\{\frac{bc/r}{s(s+a)}\right\} = \frac{bc}{ra} \frac{(1 - e^{-ats})z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - e^{-ats}z^{-1})}$$

为印刷色组的模型, t_s 为系统的采样周期; $G_1(z) =$

$Z\left\{\frac{bc/r}{s(s+a)}(e^{-t_L s} + \frac{s}{s+a})\right\}$ 为第 $i-1$ 色对第 i 色的耦合环节; $G_j(z) = Z\left\{\frac{bc/r}{s(s+a)}(\frac{a}{s+a} - e^{-t_L s})\frac{s}{s+a}(\frac{a}{s+a})^{j-2}\right\}$ 为第 $i-j$ 色控制量对第 i 色的耦合环节; $G_T(z) = Z\left\{\frac{c}{s}(e^{-t_L s} - \frac{a}{s+a})(\frac{a}{s+a})^{i-2}\right\}$ 为放卷张力对第 i 色的耦合环节, 可忽略不计, 本文将其作为外部扰动之一.

3 控制算法的设计 (Design of control algorithm)

上述模型是在理想条件下建立的, 隐含了几个假设条件: 承印材料与版辊接触严密, 无打滑; 承印材料是理想的弹性材料, 其特性不随温度、湿度等环境因素改变等^[11]. 实际系统运行中这些条件不一定能得到满足, 进而会导致模型参数的不准确. 此外, 由式(2)也可看出, 第 i 色的套印误差是一个与前面色组的控制量 $u_2 \sim u_{i-1}$ 和 ΔT_0 有关的量, 当色组较多时, 由张力传递引起的耦合将非常复杂.

本文的自抗扰控制器正是针对这些问题提出的, 结合式(3)可画出第 i 色的控制结构图, 如图3所示. 其中 $N(s)$ 为各种未知扰动的总和; $D(s)$ 为PD控制器的传递函数, $G_{c1}(s)$ 和 $G_{c2}(s)$ 为前馈补偿环节; 给定 $R_i(s) = 0$, 色组输出 $Y_i(s)$ 即为第 i 色与第 $i-1$ 色之间的误差 $E_i(s)$.

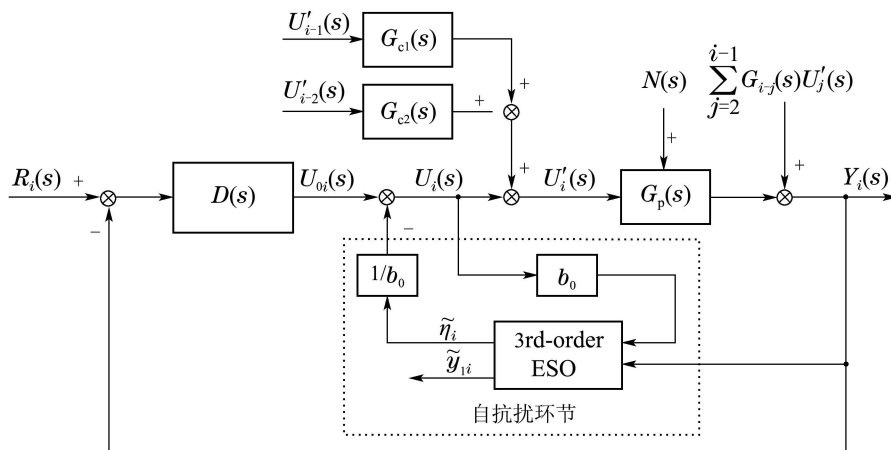


图3 第 i 色控制结构图

Fig. 3 Control structure chart of the i -th unit

3.1 前馈设计(Feedforward design)

从式(2)可知, 前一色对当前色的耦合作用最强, 再往前每多间隔一个色组, $G_i(s)$ 中会增加一个惯性环节. 由 $G_1(s) = \frac{bc/r}{s(s+a)}(e^{-t_L s} + 1 - \frac{a}{s+a})$ 可知, 前一色控制量对当前色的影响可分为3部分: 直接作用部分; 延时作用部分; 经惯性环节作用部分. 由

于这样的耦合存在, 仅依靠PD主控制器难以取得满意的控制效果, 根据数学模型引入前馈是最简单可行的解耦方法. 为了兼顾控制性能和算法的易操作性, 对于每一色, 只做前两个色组的前馈补偿.

在图3中, 断开ESO补偿, 将已知模型部分写成闭环表达式:

$$\begin{aligned}
 Y_i(s) = E_i(s) = & \frac{D(s)G_p(s)}{1 + D(s)G_p(s)}R_i(s) + \\
 & \frac{G_1(s) + G_{c1}(s)G_p(s)}{1 + D(s)G_p(s)}U'_{i-1}(s) + \\
 & \frac{G_2(s) + G_{c2}(s)G_p(s)}{1 + D(s)G_p(s)}U'_{i-2}(s) + \\
 & \sum_{j=2}^{i-3} \frac{G_{i-j}(s)}{1 + D(s)G_p(s)}U'_j(s) + \\
 & \frac{G_p(s)}{1 + D(s)G_p(s)}N(s), \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中倒数第2项只在 $i \geq 5$ 时存在, 令

$$G_{c1}(s) = -\frac{G_1(s)}{G_p(s)} = e^{-t_L s} + \frac{s}{s+a}, \quad (5)$$

$$G_{c2}(z) = -\frac{G_2(s)}{G_p(s)} = \left(\frac{a}{s+a} - e^{-t_L s}\right) \frac{s}{s+a}, \quad (6)$$

其中 t_L 为滞后时间. 通过式(5)–(6)便能基本解除第 $i-1$ 色和第 $i-2$ 色对第 i 色的耦合作用, 此时有

$$\begin{aligned}
 U'_i(s) = U_i(s) + G_{c1}(s)U'_{i-1}(s) + \\
 G_{c2}(s)U'_{i-2}(s). \quad (7)
 \end{aligned}$$

3.2 ESO设计和扰动补偿(Design of ESO and disturbance compensation)

当系统模型参数不准确时, 前馈解耦效果会变差, 出现欠补偿或过补偿的情况. 此外, 当色组过多时, 若对各色组所有耦合一一解耦, 会大大增加算法的复杂度; 且色组越多, 受到未知扰动影响的风险也越大. 若能找到一种方法, 把未做前馈补偿的耦合量、前馈补偿的误差和未知扰动都观测出来, 并补偿到控制量中, 将显著改善系统的控制效果. 本文的思路是将这3种影响整体当作扰动, 引入ESO根据输入 $u_i(t)$ 和输出 $y_i(t)$ 对总扰动进行估计.

首先断开图3中的ESO补偿, 将式(2)中的套色误差模型写成微分方程形式

$$\begin{aligned}
 \ddot{y}_i(t) = -a\dot{y}_i(t) + \frac{bc}{r}u_i(t) + \\
 f(\dot{y}_i(t), y_i(t), u_i(t), w(t), t), \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中 $w(t) = L^{-1}\{(G_{c1}U'_{i-1} + G_{c2}U'_{i-2})G_p + \sum_{j=2}^{i-1} (G_{i-j}U'_j) + N(s)G_p\}$ 为系统的外扰, 包括未知扰动 $n(t)$ 、前馈补偿的偏差, 当 $i \geq 5$ 时, 对大于5的色组来说, 还包括来自第2到 $i-3$ 色的总耦合量 $\sum_{j=2}^{i-3} (G_{i-j}U'_j)$; 定义 $\eta(t) = f(\dot{y}_i(t), y_i(t), u_i(t), w(t), t)$ 为系统的总扰动, 是一非线性函数, 包括建模、未建模动态和外扰 $w(t)$.

令 $b_0 = bc/r$, 将等式(8)写成状态方程形式, 如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = -ax_1(t) + b_0u_i(t) + \eta_i(t), \\ y_i(t) = x_1(t). \end{cases} \quad (9)$$

根据ESO的设计原理^[12-13], 对系统(9)设计三阶扩张状态观测器

$$\begin{cases} \xi_{ei} = \tilde{y}_{1i}(t) - y_i(t), \\ \dot{\tilde{y}}_{1i}(t) = \tilde{y}_{2i}(t) - \beta_1\xi_{ei}, \\ \dot{\tilde{y}}_{2i}(t) = \tilde{\eta}_i(t) - \beta_2\text{fal}(\xi_{ei}, \frac{1}{2}, h) - \\ \quad a\dot{\tilde{y}}_{1i}(t) + b_0u_i(t), \\ \dot{\tilde{\eta}}_i(t) = -\beta_3\text{fal}(\xi_{ei}, \frac{1}{4}, h), \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\tilde{y}_{1i}(t)$, $\tilde{\eta}_i(t)$ 分别为输出 $y_i(t)$ 和总扰动 $\eta_i(t)$ 的观测值; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为待整定的参数; $\text{fal}(x, \alpha, \delta)$ 是一个非线性函数, 可以弥补线性组合方式的缺陷, 减小 $\eta_i(t)$ 对系统的影响^[13], 表达式如下

$$\text{fal}(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{x}{\delta^{1-\alpha}}, & |x| \leq \delta, \\ \text{sgn } x |x|^\alpha, & |x| > \delta, \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\text{sgn } x$ 为符号函数. 通过ESO观测出扰动后补偿到系统中, 如图3所示, 令

$$u_i(t) = u_{0i}(t) - \frac{\tilde{\eta}_i(t)}{b_0}, \quad (12)$$

其中 $u_{0i}(t) = K_p(r_i(t) - y_i(t)) + K_d \frac{d}{dt}(r_i(t) - y_i(t))$ 为PD控制器的输出.

将式(12)代入方程式(9)并重写等式(8)得

$$\ddot{y}_i(t) = -ay_i(t) + b_0u_{0i}(t) + \eta_i(t) - \tilde{\eta}_i(t). \quad (13)$$

定义 $\xi_{\eta_i}(t) = \eta_i(t) - \tilde{\eta}_i(t)$ 为扰动的观测误差. 大量文献表明, 只要观测器增益选取适当, 就能使观测误差有界且足够小^[8]. 若忽略观测误差, 则根据等式(13), 可知系统的总扰动得到补偿, 变成了一个简单二阶线性系统. 在PD控制器下, 系统是一个具有闭环零点的二阶系统, PD控制器能改善系统的动态性能, 当系统给定值 $R_i(s) = 0$ 时, 能使控制误差以更快的速度收敛到0, 达到良好的控制效果.

4 仿真(Simulation)

在无轴凹印机套色系统中, 除第一色外, 其他每个色组单元都有独立的套准系统, 理想状态下, 所有色组的版辊相位严格一致, 不会出现套色误差, 但实际上各种干扰一直存在, 各个色组的套印偏差一直处在动态调整中. 实际工程中, 套印偏差的允许范围一般为 $\pm 0.1\text{mm}$.

为了验证提出的控制方案, 本文以4色凹印机为

例,根据离散模型在MATLAB下进行仿真实验,分两种情况讨论了系统的抗扰性能和解耦效果,并将本文的控制算法与PD前馈算法和文献[4]中的非线性控制算法进行仿真比较.仿真所用的凹印机参数如表1所示.

表1 凹印机机械参数

Table 1 Mechanical parameters of gravure printing press

项目	参数值
承印材料	BOPP薄膜
材料张力比率 K/N^{-1}	2.3×10^{-4}
放卷到第1色组之间的张力 T^*/N	100
印刷速度 $v^*/(m \cdot s^{-1})$	1.67
版辊半径 r/m	0.1030
印刷色组间距 l_i/m	7.12

由表1中的机械参数可计算出系统的模型参数:

$$a = r\omega^*/l_i = 0.2346,$$

$$b = r(1 + KT^*)/Kl_i = 64.3436,$$

$$c = Kr\omega^*/(1 + KT^*)^2 = 3.6702 \times 10^{-4};$$

滞后时间 $t_L = l_i/r\omega^* = 4.2635$ s, 采样时间 $t_s = 2\pi/\omega^* = 0.3875$ s.

加入零阶保持器后,控制对象的离散模型为

$$G_p(z) = Z\left(\frac{1 - e^{-t_s s}}{s} \frac{bc/r}{s(s+a)}\right) = \frac{0.01669z^{-1} + 0.01619z^{-2}}{1 - 1.913z^{-1} + 0.9132z^{-2}},$$

前馈补偿环节为:

$$G_{c1}(z) = z^{-11} + \frac{1 - z^{-1}}{1 - 0.9132z^{-1}},$$

$$G_{c2}(z) = \frac{0.083z^{-1} - 0.083z^{-2}}{1 - 1.825z^{-1} + 0.8339z^{-2}} - \frac{(1 - z^{-1})z^{-11}}{1 - 0.9132z^{-1}}.$$

在自抗扰控制器中,要整定的参数有 K_p , K_d , β_1 , β_2 , β_3 , b_0 . 经过ESO扰动补偿后,系统是一个近似的线性系统,故 K_p , K_d 可按照传统PID调节规律设置. β_1 , β_2 和 β_3 与系统的积分步长 h 有关. 增大 β_1 能加快观测器对系统输出的跟踪速度,但会引起振荡,过小则会导致观测器跟踪不上系统输出;减小 β_2 会使观测器对系统输出的跟踪有较大滞后,但过大又会引起系统发散;减小 β_3 可以提高系统的稳态精度,但会加大对扰动的估计滞后,3个参数需协调调整. 取 $\beta_1 = \frac{1}{h}$, 再在仿真中反复试验,找到 β_2 , β_3 的最佳参数组合,在离散系统里 $h = t_s$, b_0 是控制量作用于系统时的放大系数的估计值^[13],对系统的

稳定性有重要影响,由于对象模型中的放大系数已知,故直接令 $b_0 = bc/r$. 控制器参数的具体取值如表2所示.

表2 控制参数

Table 2 Control parameters

项目	参数值
比例系数 K_p	3
微分系数 K_d	6
观测器增益 β_1	2.58
观测器增益 β_2	5.5
观测器增益 β_3	3.5
控制量的放大系数 b_0	0.23
积分步长 h	0.3875
非线性控制参数 λ	0.4
非线性控制参数 μ	0.9

4.1 外部扰动(External disturbance)

实际中系统受到持续的扰动影响. 假设系统初始状态稳定运行,在 $t = 12.8$ s时加入幅值为0.4 mm的阶跃信号,持续11.6 s后撤销扰动. 以第2色组为例考查系统的抗扰性能. 在第2色组中,没有前面通道的耦合作用和前馈补偿,输出误差由外扰 $w(t) = n(t)$ 引起. 仿真结果如图4所示.

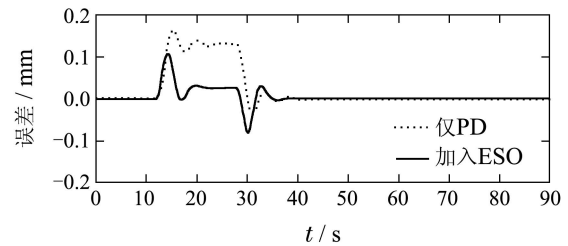
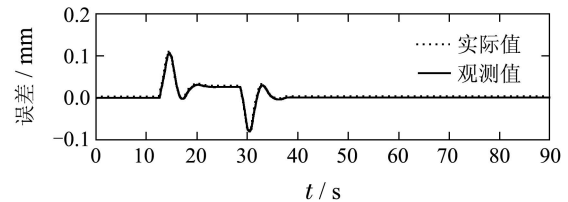
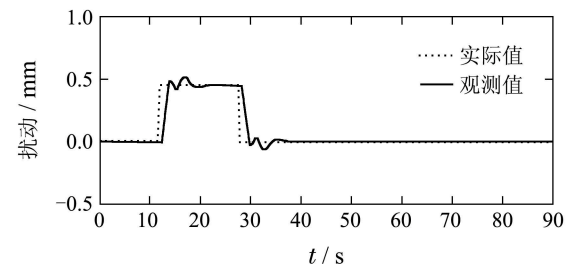
(a) 第2色误差输出 y_2 (b) \tilde{y}_{12} 对 y_2 的跟踪(c) $\tilde{\eta}_2$ 对 η_2 的跟踪

图4 加扰动时的仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform of adding periodicity large disturbance

从图4(a)中可知, 在扰动的作用时间内, 相当于加入了一个阶跃扰动, 由于存在稳态误差, 单纯的PD控制器无法使误差收敛到0, 当扰动作用消失后, 再经过2 s才恢复到稳态. 而引入ESO补偿后, 阶跃扰动得到动态补偿, 输出误差完全控制在±0.1mm内, 并最终收敛到0, 没有稳态误差, 如图4(a)所示. 从图4(b)和4(c)中可看到ESO的跟踪性能良好, 对系统输出的跟踪基本与实际输出曲线重合, 对扰动的跟踪只在扰动信号的跳变沿有些波动, 系统扰动补偿的准确度较高.

4.2 模型参数不确定(Model parameters are uncertain)

假设系统初始为稳定运行状态, 无套印误差, 即 $y_i(t) = 0, u_i(t) = 0$. 当系统受到外界干扰导致第2色和第1色之间产生套色误差, 即 $e_2 \neq 0$ 时, 由于张力的传递, 第2色的纠偏控制量会耦合到后面的色组. 理论上, 当模型精确时, 引入前馈能完全抵消前面色组的影响, 套色误差基本不会变动. 但由于模型参数不确定, 有时还会在实时控制中发生波动, 导致前馈环节产生过补偿或欠补偿, 使 e_3, e_4 及其之后色组的套色误差均发生波动.

仿真中令 a 增大50%, 即 $a' = 1.5a = 0.3518$, 并用参数 a 做前馈补偿. 以第3和第4色组为例, 考察当 $e_2 = 0.3 \text{ mm}$ 时 e_3, e_4 在本文算法控制下的收敛情况, 并将仿真结果与单纯的PD前馈控制和文献[4]中的非线性控制进行比较.

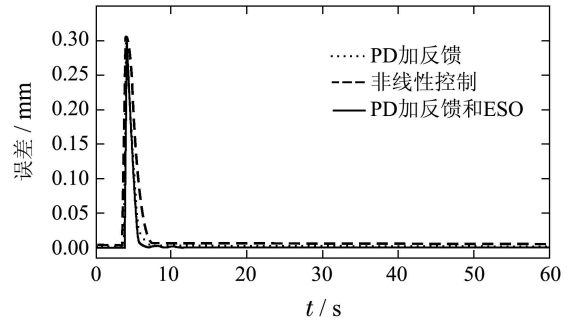
文献[4]是以版辊角速度为控制量的非线性控制器, 直接从模型中推导而来, 其控制器算法为

$$\Delta w_i(t) = \frac{1}{ab\phi_{i-1}} [(1 + \lambda\mu)e_i(t) - ab(w^* + \Delta w_{i-2}(t - t_L))\phi_{i-3}(t - t_L) - b(\lambda + \mu - a(w^* + \Delta w_{i-1}(t - t_L))) \cdot \phi_{i-2}(t - t_L) + ab(w^* + \Delta w_{i-1}(t))\phi_{i-2}(t) + b(\lambda + \mu - aw^*)\phi_{i-1}(t)],$$

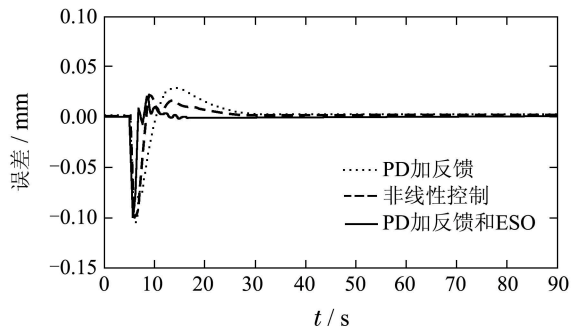
其中 $\phi_i(t) = \frac{1}{1 + KT_i(t)}$, 是文献[4]中作者做的非线性变换; Δw_i 为第 i 色的控制量; w^* 为版辊角速度的稳态值; λ, μ 是待整定的控制参数, 具体取值如表2所示; 其他变量的定义与文中一致. 控制器的详细推导见文献[4].

比较波形如图5所示. 从图5(a)(b)(c)可知, 对于第2, 3, 4三个色组, 采用本文算法的系统误差收敛速度更快, e_3, e_4 完全被控制在±0.1mm的误差范围内, 控制效果好于其他两种方法. 对第3, 4两色组来说, 前馈补偿的偏差就是系统的扰动, 从图5(d)和(e)

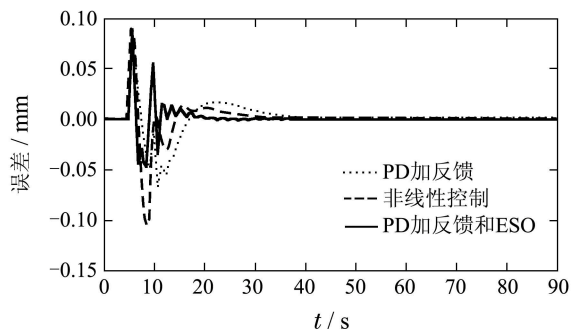
中可以看到, 扰动出现后, 分别经过3.5 s和4.8 s, ESO对扰动的估计与实际扰动曲线已基本重合. 这表明在参数不确定的情况下, ESO能对由前馈带来的补偿误差进行实时估计和动态补偿, 实现了色组间的解耦, 使 e_3, e_4 快速收敛到0.



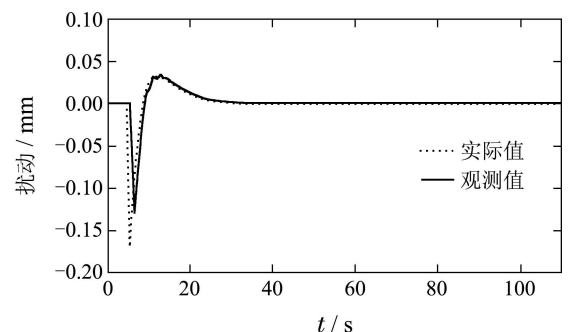
(a) 第2色误差输出 y_2



(b) 第3色误差输出 y_3



(c) 第4色误差输出 y_4



(d) $\hat{\eta}_3$ 对 η_3 的跟踪

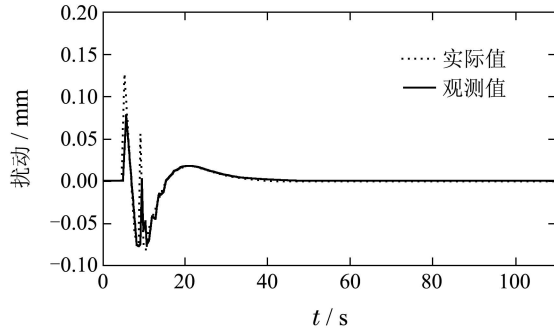
(e) $\tilde{\eta}_4$ 对 η_4 的跟踪

图5 模型参数不确定时的解耦性能比较

Fig. 5 Comparison of decoupling performance when model parameter is uncertain

5 结论(Conclusion)

无轴凹印套色系统是一个耦合复杂的非线性系统,控制难度较大.本文在研究传统控制方案和理想模型的基础上提出了一种新的控制方法,即将ESO与前馈相结合进行整体设计,通过动态反馈将系统转化为一个近似的二阶线性系统,使其更易于控制.文章通过MATLAB仿真,将本文方法与传统的PD加前馈和文献[4]中的非线性控制方法进行了对比,验证了本文方法的优越性.仿真结果表明,引入ESO后,系统的抗扰能力提高,解耦效果更好,误差的收敛速度加快,并能容忍更大的参数不确定.该算法简单易行,需要整定的参数少,可操作性强,并且套色组越多,算法的优势越明显.

参考文献(References):

- [1] YOSHIDA T, TAKAGI S, SHEN T, et al. Modeling and cooperative register control of gravure printing press [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, 2008, 74(2): 339 – 345.
- [2] YOSHIDA T, TAKAGI S, MUTO Y, et al. Modeling and register control of sectional drive gravure printing press [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, 2008, 74(6): 1438 – 1444.
- [3] NOH J, YEOM D, CHAEMIN L, et al. Scalability of roll-to-roll gravure-printed electrodes on plastic foils [J]. *IEEE Transaction on Electronics Packaging Manufacturing*, 2010, 33(4): 275 – 283.
- [4] YOSHIDA T, TAKAGI S, MUTO Y, et al. Register control of rotogravure printing press register control of rotogravure printing press. Application of nonlinear control theory to sectional drive printing press [J]. *Electronic and Communications in Japan*, 2011, 94(1): 17 – 24.

- [5] 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.
(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.)
- [6] ZHANG E, XUE B. Study on active disturbance rejection controller based on neural network in press overprint system [C] // *Proceedings of the 2009 International Conference on Mechatronics and Automation*. Changchun: IEEE, 2009: 2701 – 2706.
- [7] 杨苹, 周少雄, 胡斌, 等. 双馈风力发电机系统的自抗扰神经网络的励磁控制 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(2): 251 – 256.
(YANG Ping, ZHOU Shaoxiong, HU Bin, et al. Active disturbance-rejection neural networks excitation-control of double-fed induction generator [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(2): 251 – 256.)
- [8] 余涛, 朱守真, 沈善德, 等. 基于扩张状态观测器的电力系统非线性鲁棒协调控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(4): 5 – 9.
(YU Tao, ZHU Shouzheng, SHEN Shande, et al. Extended state observer based nonlinear robust coordinated control of power systems [J]. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2004, 24(4): 5 – 9.)
- [9] 赖爱芳, 郭毓, 郑立君. 航天器姿态机动及稳定的自抗扰控制 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(3): 401 – 406.
(LAI Aifang, GUO Yu, ZHENG Lijun. Active disturbance rejection control for spacecraft attitude maneuver and stability [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(3): 401 – 406.)
- [10] PAGILLA P R, SIRASKAR N B, DWIVEDULA R V. Decentralized control of web processing lines [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(1): 106 – 117.
- [11] LI J, MEI X, TAO T, et al. Research on the register system modelling 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.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19 – 23.
(HAN Jingqing. Active disturbance rejection controller and application [J]. *Control & Decision*, 1998, 13(1): 19 – 23.)
- [13] 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 for Estimating and Compensating the Uncertainties* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)

作者简介:

陈义君 (1989–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为套印系统智能控制, E-mail: m201171882@hust.edu.cn;

陈智华 (1976–), 女, 副教授, 主要研究方向为控制系统建模与仿真、智能算法和生物计算, E-mail: chenzhichua@hust.edu.cn;

邓忠华 (1962–), 男, 教授, 主要研究方向为套印智能控制、电气传动系统数字化控制、复杂非线性系统建模与控制等, E-mail: zhonghua.deng@mail.hust.edu.cn.