

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.008

印刷电子装备套准系统解耦控制策略

刘善慧, 尹秉政, 赵庆海, 马利娥, 朱阁顺

(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对多层凹版印刷电子装备套准系统存在强耦合、强干扰和显著时滞性的问题,提出了一种基于前馈控制和自抗扰控制(ADRC)设计套准系统解耦控制器的方法。根据多层凹版印刷的套准机理,建立了套准系统非线性耦合数学模型,并利用小偏差法对该模型进行了线性化。以得到的线性模型为基础,将前馈控制和ADRC有机结合,设计了多层套准系统解耦控制器,其中,前馈控制对已建模干扰引起的套准误差进行控制,而ADRC则控制套准系统主回路并对未建模干扰进行主动估计和补偿。仿真研究表明,所提出的多层套准系统解耦控制策略很好的抑制了各印组之间存在的耦合和干扰,实现了高精度的多层套准控制。

关键词: 印刷电子;套准系统;解耦控制;自抗扰控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2017)03-0297-07

Decoupling control algorithm design for register system of printed electronic equipment

LIU Shanhui, YIN Bingzheng, ZHAO Qinghai, MA Li'e, ZHU Geshun

(School of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the feedforward control and active disturbance rejection control (ADRC), a decoupling control algorithm is presented to solve the strong coupling, strong interference and large delay problems in the register system of multi-layer gravure printed electronic equipment. According to the multi-layer register working principle in gravure printing, a coupling and nonlinear model is established, with a linear model of the register system derived based on the minimum deviation method. According to the linear model, a decoupling control algorithm is presented based on the feedforward control and ADRC for the multi-layer register system. The algorithm uses feedforward control to compensate the modeled interference, and uses the ADRC to adjust the inputs of the register system and actively estimate and compensate the un-modeled disturbances in real time. The results of computer simulation show that the proposed control algorithm can realize a decoupling control and has a good control performance for multi-layer register system.

Key words: printed electronics; register system; decoupling control; active disturbance rejection control

机组式凹版印刷电子装备具有层厚可控、工艺稳定、耐印力高等特点,是连续大批量生产印刷电子产品的理想设备之一^[1]。然而,其多层套准系统具有非线性、强耦合、大干扰、时滞性等特点,制约着多层套印精度的提高,严重影响多层印刷电子产品的质量。因此,在建立多层套准系统耦合模型的基础上,如何设计高性能的套准控制策略已成为凹版印

刷装备向多层印刷电子产品推广的核心问题。

反映套印精度的直接指标是套准误差,含纵向和横向两类^[2]。其中,纵向套准误差是多层套准系统控制的重点和难点所在,也是本文的研究对象。Kang等^[3]建立了套准系统的数学模型,设计了前馈PID控制器以抑制版辊速度波动产生的套准误差,但忽略了牵引段张力波动对套准误差的影响。Li

收稿日期: 2016-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51505376);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2016JQ5038);中国博士后科学基金资助项目(2016M602844)

作者简介: 刘善慧,男,博士,讲师,研究方向为印刷电子技术与装备。E-mail:shanhuiliu@xaut.edu.cn

等^[4]通过沿印刷方向引入移动坐标系的方法建立了两层套准误差模型,且利用前馈 PID 控制器实现了对前级张力和速度干扰的抑制。Lee 等^[5]以引起套准误差的主要因素为出发点设计了以 PID 为核心的控制策略。Yoshida 等^[6]以料带质量守恒为出发点建立了套准误差模型,并利用 Lyapunov 稳定性理论设计了非线性控制策略。Chen 等^[7]提出了一种优化前馈解耦 PD 套准控制方法。陈义君等^[8]利用扩张状态观测器与前馈控制相结合提出了一种多层套准系统解耦控制策略。Seshadri 等^[9]设计了套准系统的分散状态反馈控制器。Yang 等^[10]针对套准系统设计了滑模变结构控制器。Kim 等^[11-12]先后通过将延时时间纳入控制器设计过程和增加套准误差采样点数的办法提高套准系统的控制精度。文献^[13-14]虽然以 ADRC 为核心设计了套准系统的控制器,但是随着层数增加,其设计难度迅速增大。

为了解决凹版印刷电子装备套准系统存在强耦合、强干扰和显著时滞性的问题,本文以凹版印刷电子装备套准系统纵向套准误差为研究对象,推导四层套准系统的线性模型,有机结合前馈控制和 ADRC 的优点设计了多层套准系统解耦控制器,并在 Simulink 中对所提出的解耦控制策略进行了仿真研究。

1 多层套准系统建模

凹版印刷电子装备结构示意图见图 1,主要包括放卷系统、 n 层印刷系统和收卷系统三个子系统。其中,在放卷和收卷系统中进行张力控制,在 n 层印刷系统中进行套准控制。装备采用无轴传动的驱动形式,即各机组均由伺服电机直接驱动。

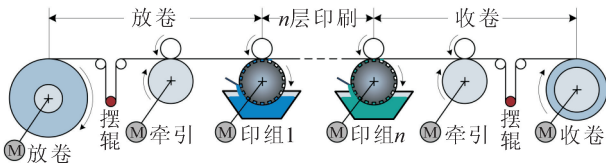


图 1 凹版印刷电子装备结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of gravure printed electronic equipment

以四层套准系统为研究对象,其结构见图 2,主要由印刷机组、烘箱系统、张力传感器、光电传感器等组成。以印组 1 的速度为基准,后续印组根据检测到的套准误差控制各自速度,各印组电机均工作在速度模式下。每印制完一层都会经烘箱烘干后进入下一层印刷,一方面张力波动、速度波动、套准误差等会随着料带传递到下一印组,另一方面烘箱会使料带性能发生变化,也为套印过程带来大量未知

干扰。

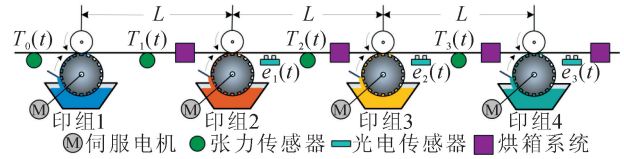


图 2 四层套准系统结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of four-layer register system

图 2 中, L 为相邻印组间料带的名义长度; T_0 为牵引段料带张力; T_1 、 T_2 、 T_3 为相邻印组间料带的张力; e_1 、 e_2 、 e_3 为各印组相对于前级印组的套准误差。

根据文献^[15]可得,第 $i+1$ 印组相对于第 i 印组的非线性套准误差模型为:

$$AE \frac{de_i(t)}{dt} = AER\omega_{i+1}(t) - T_i(t)R\omega_i(t) - AER\omega_i(t - t_T) + T_{i-1}(t - t_T)R\omega_i(t - t_T) \quad (1)$$

式中: A 为料带的横截面积; E 为料带的弹性模量; R 为版辊半径; ω_i 、 ω_{i+1} 分别为印组 i 和印组 $i+1$ 的角速度; t_T 为料带从印组 i 传递到印组 $i+1$ 所需的延时时间。

多层印刷套准方法采用以前一印层为基准进行印刷,即套准误差由料带上当前印组的层标位置和相邻前一印组的层标位置做差求得,则根据式(1)建立的四层套准系统耦合模型如下:

$$\begin{cases} AE \frac{de_1(t)}{dt} = AER\omega_2(t) - T_1(t)R\omega_1(t) - AER\omega_1(t - t_T) + T_0(t - t_T)R\omega_1(t - t_T) \\ AE \frac{de_2(t)}{dt} = AER\omega_3(t) - T_2(t)R\omega_2(t) - AER\omega_2(t - t_T) + T_1(t - t_T)R\omega_2(t - t_T) \\ AE \frac{de_3(t)}{dt} = AER\omega_4(t) - T_3(t)R\omega_3(t) - AER\omega_3(t - t_T) + T_2(t - t_T)R\omega_3(t - t_T) \end{cases} \quad (2)$$

根据多层印刷工艺和图 2 可知: $\omega_2(t)$ 、 $\omega_3(t)$ 和 $\omega_4(t)$ 是四层套准系统的输入, $e_1(t)$ 、 $e_2(t)$ 和 $e_3(t)$ 是四层套准系统的输出, $T_0 \sim T_3$ 均可通过张力传感器测得。由于各印组版辊半径相等且相邻印组间的料带长度相等,所以在各印组角速度围绕基准角速度微调的情况下,各级套准误差对应的延时时间近似相等,均为 t_T 。

由式(2)可以看出,四层套准系统是一阶多输入、多输出、强耦合、非线性、强干扰的时滞系统。在印刷过程中,各变量均在稳定点附近微小波动,所以可利用小偏差法对式(2)进行线性化。在稳定点附

近,各变量可表达为:

$$\begin{cases} e_i(t) = e^* + \Delta e_i(t) \\ \omega_i(t) = \omega^* + \Delta \omega_i(t) \\ T_i(t) = T^* + \Delta T_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: e^* 是套准误差稳态值,实际值为0; ω^* 是印组的稳态角速度; T^* 是印组间料带的稳态张力; $\Delta e_i(t)$ 、 $\Delta \omega_i(t)$ 和 $\Delta T_i(t)$ 分别是套准误差、印组角速度和料带张力在稳态值附近的微小波动量。

将式(3)代入式(2),忽略其中高阶小量,则化简后可得系统模型如下:

$$\begin{cases} AE \frac{d\Delta e_1(t)}{dt} = AER\Delta\omega_2(t) - RT^* \Delta\omega_1(t) - R\omega^* \Delta T_1(t) + \\ R(T^* - AE)\Delta\omega_1(t - t_T) + R\omega^* \Delta T_0(t - t_T) \\ AE \frac{d\Delta e_2(t)}{dt} = AER\Delta\omega_3(t) - RT^* \Delta\omega_2(t) - R\omega^* \Delta T_2(t) + \\ R(T^* - AE)\Delta\omega_2(t - t_T) + R\omega^* \Delta T_1(t - t_T) \\ AE \frac{d\Delta e_3(t)}{dt} = AER\Delta\omega_4(t) - RT^* \Delta\omega_3(t) - R\omega^* \Delta T_3(t) + \\ R(T^* - AE)\Delta\omega_3(t - t_T) + R\omega^* \Delta T_2(t - t_T) \end{cases} \quad (4)$$

省略式(4)中的微变量符号“ Δ ”,且考虑印刷中料带的应变变量是微小的(即 T^* 远远小于 AE),则式(4)可简化为:

$$\begin{cases} \frac{de_1(t)}{dt} = R\omega_2(t) - \frac{RT^*}{AE}\omega_1(t) - \frac{R\omega^*}{AE}T_1(t) - \\ R\omega_1(t - t_T) + \frac{R\omega^*}{AE}T_0(t - t_T) \\ \frac{de_2(t)}{dt} = R\omega_3(t) - \frac{RT^*}{AE}\omega_2(t) - \frac{R\omega^*}{AE}T_2(t) - \\ R\omega_2(t - t_T) + \frac{R\omega^*}{AE}T_1(t - t_T) \\ \frac{de_3(t)}{dt} = R\omega_4(t) - \frac{RT^*}{AE}\omega_3(t) - \frac{R\omega^*}{AE}T_3(t) - \\ R\omega_3(t - t_T) + \frac{R\omega^*}{AE}T_2(t - t_T) \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)所表示的四层套准系统线性模型进行拉氏变换,化简后可得其传递函数表达式为:

$$\begin{cases} E_1(s) = G_A(s)W_2(s) + G_B(s)W_1(s) + \\ G_C(s)T_0(s) + G_D(s)T_1(s) \\ E_2(s) = G_A(s)W_3(s) + G_B(s)W_2(s) + \\ G_C(s)T_1(s) + G_D(s)T_2(s) \\ E_3(s) = G_A(s)W_4(s) + G_B(s)W_3(s) + \\ G_C(s)T_2(s) + G_D(s)T_3(s) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $G_A(s)$ 、 $G_B(s)$ 、 $G_C(s)$ 和 $G_D(s)$ 的表达式如下:

$$\begin{cases} G_A(s) = \frac{R}{s}, G_B(s) = -\frac{R}{s} \left(\frac{T^*}{AE} + e^{-t_T s} \right) \\ G_C(s) = \frac{R\omega^*}{AEs} e^{-t_T s}, G_D(s) = -\frac{R\omega^*}{AEs} \end{cases} \quad (7)$$

由式(5)~(6)可知,若多层套准方法采用以前一印层为基准进行印刷,则任意印组 $i+1$ 和其相邻前一印组 i 的套准误差线性模型均可表达为:

$$E_i(s) = G_A(s)W_{i+1}(s) + G_B(s)W_i(s) + G_C(s)T_{i-1}(s) + G_D(s)T_i(s) \quad (8)$$

从式(8)可以看出,影响套准误差 e_i 的除了系统输入 ω_{i+1} 外,还有前级印辊角速度 ω_i 、进入印刷区间前的料带张力 T_{i-1} 和印刷区间的料带张力 T_i 。

2 解耦控制器设计

由前文可知,多层套准印刷过程中,通过调整后一印组的角速度实现对套准误差的控制,即对式(8)所表示的任意相邻两层套准系统而言,套准误差 e_i 的控制是通过调整印组 $i+1$ 的角速度 ω_{i+1} 来实现的。所以 ω_{i+1} 是系统的输入,而印组 i 的角速度 ω_i 是前级速度耦合干扰,料带张力 T_{i-1} 和 T_i 是随料带传播的张力耦合干扰。据此,本文以前馈控制和ADRC技术为核心,设计了任意相邻两层套准系统的解耦控制器,其结构见图3。其中 e_{ri} 为套准误差的参考输入。

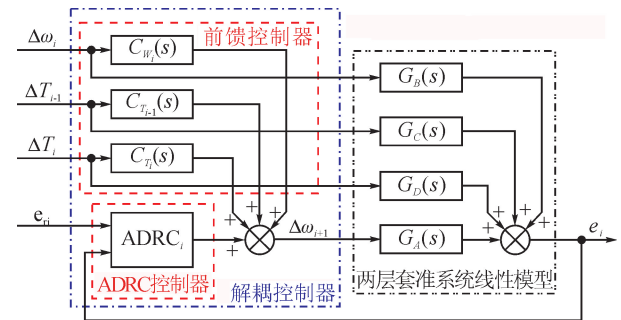


图3 解耦控制器结构图

Fig. 3 Block diagram of the decoupling control strategy

由图3可见,解耦控制器包括前馈控制器和ADRC控制器两部。其中,前馈控制器由 $C_{W_i}(s)$ 、 $C_{T_{i-1}}(s)$ 和 $C_{T_i}(s)$ 组成,分别实现对已建模耦合干扰量 ω_i 、 T_{i-1} 和 T_i 的解耦控制;而ADRC控制器则一方面控制套准系统的主回路 ω_{i+1} ,另一方面对套准系统的未建模干扰进行主动估计和实时补偿。前馈控制器和ADRC控制器的输出之和组成了系统输入 ω_{i+1} 的调整量。随着套准层数的增加,只需针对输入量增加该解耦控制器的个数即可。

2.1 系统前馈控制器设计

由图 2 可知,系统干扰量 ω_i 、 T_{i-1} 和 T_i 均可通过相应的传感器测得。因此,根据不变性原理,可利用 ω_i 、 T_{i-1} 、 T_i 和 e_i 之间的传递函数来设计前馈控制器,以控制由 ω_i 、 T_{i-1} 和 T_i 波动引起的套准误差。由图 3 和线性系统的叠加原理可以得到 $E_i(s)$ 的表达式如下:

$$E_i(s) = \frac{G_A(s)C_i(s)}{1 + G_A(s)C_i(s)}E_{ri}(s) + \frac{G_B(s) + C_{W_i}(s)G_A(s)}{1 + G_A(s)C_i(s)}W_i(s) + \frac{G_C(s) + C_{T_{i-1}}(s)G_A(s)}{1 + G_A(s)C_i(s)}T_{i-1}(s) + \frac{G_D(s) + C_{T_i}(s)G_A(s)}{1 + G_A(s)C_i(s)}T_i(s) \quad (9)$$

式中: $C_i(s)$ 为控制器 $ADRC_i$ 的等效传递函数。

根据不变性原理中的完全不变性,针对可测耦合干扰量 ω_i 、 T_{i-1} 和 T_i 设计前馈控制器,则有:

$$\begin{cases} G_B(s) + C_{W_i}(s)G_A(s) = 0 \\ G_C(s) + C_{T_{i-1}}(s)G_A(s) = 0 \\ G_D(s) + C_{T_i}(s)G_A(s) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

则由式(10)和(7)可设计出前馈控制器 $C_{W_i}(s)$ 、 $C_{T_{i-1}}(s)$ 和 $C_{T_i}(s)$,其表达式如下:

$$\begin{cases} C_{W_i}(s) = -\frac{G_B(s)}{G_A(s)} = \frac{T^*}{AE} + e^{-T^*s} \\ C_{T_{i-1}}(s) = -\frac{G_C(s)}{G_A(s)} = -\frac{\omega^*}{AE}e^{-T^*s} \\ C_{T_i}(s) = -\frac{G_D(s)}{G_A(s)} = \frac{\omega^*}{AE} \end{cases} \quad (11)$$

2.2 系统 ADRC 控制器设计

根据前文可知:以角速度为输入、套准误差为输出建立起来的套准系统模型为一阶系统。结合 ADRC 理论,本文针对输入-输出主回路设计的 ADRC 控制器结构见图 4。

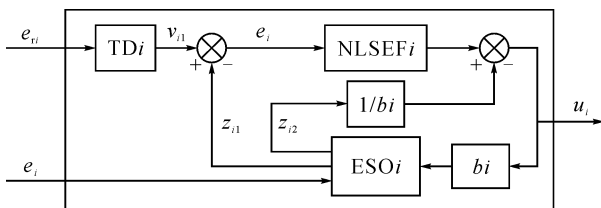


图 4 $ADRC_i$ 控制器的结构图

Fig. 4 Block diagram of the $ADRC_i$ controller

由图 4 可以看出,ADRC 控制器主要由一个二阶跟踪微分器(TD)、一个二阶扩张状态观测器(ESO)和一个非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)三部分构成。TD 针对参考输入安排过渡

过程,即用 v_{i1} 来实现对参考输入 e_{ri} 的跟踪。ADRC 的核心是 ESO,其用 z_{i1} 来跟踪系统输出变量 e_i ,用 z_{i2} 来估计系统的未建模干扰,即实现对套准系统输出变量的跟踪和对未建模干扰的估计。ADRC 的控制法则为 NLSEF,其本质是非线性比例控制器,和内反馈一起主动补偿系统的未建模干扰。

TD、ESO 和 NLSEF 的算法公式在文献[16]中已有详细的介绍,本文直接给出 $ADRC_i$ ($i=1,2,3,\dots$)的算法公式为:

$$\begin{cases} fh_i(k) = fhan(v_{i1}(k) - e_{ri}(k), v_{i2}(k), r_i, h) \\ v_{i1}(k+1) = v_{i1}(k) + hv_{i2}(k) \\ v_{i2}(k+1) = v_{i2}(k) + hfh_i(k) \\ q_i(k) = z_{i1}(k) - e_i(k) \\ z_{i1}(k+1) = z_{i1}(k) + h(z_{i2}(k) - \beta_{i1}q_i(k) + b_i u_i(k)) \\ z_{i2}(k+1) = z_{i2}(k) + h(-\beta_{i2}fal(q_i(k), 0.5, h)) \\ e_i(k+1) = v_{i1}(k+1) - z_{i1}(k+1) \\ u_i(k+1) = k_{pi}fal(e_{i1}(k+1), 0.5, \delta) - z_{i2}(k+1)/b_i \end{cases} \quad (12)$$

式中: r_i 为速度因子; h 为积分步长; β_{ij} 为 ESO 的增益系数,其中 j 取 1,2; k_{pi} 为 NLSEF 的增益系数; δ 为线性段的区间长度; b_i 为补偿因子; k 为离散数,取 0,1,2,3, \dots ; $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 是最速控制综合函数,其算法如下:

$$\begin{cases} d = rh; d_0 = hd \\ y = x_1 + hx_2; a_0 = (d^2 + 8r|y|)^{\frac{1}{2}} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2}sgn(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ fhan(x_1, x_2, r, h) = - \begin{cases} rsgn(a), & |a| > d \\ r\frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

$fal(e, \alpha, \delta)$ 为幂次函数,其算法公式为:

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha sgn(e), & |e| > \delta \end{cases} \quad (14)$$

3 仿真与分析

为了验证所设计解耦控制器的性能,本文以四层套准系统为对象,从张力干扰、速度干扰、料带性能变化三方面对 PID 控制器和解耦控制器进行了对比仿真研究,其中四层套准系统解耦控制器结构见图 5。

在 Simulink 中进行仿真,采用步长为 10 ms 的

固定步长仿真模,采用模型参数具体为: $E=2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$; $A=2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$; $L=6.28 \text{ m}$; $R^*=0.2 \text{ m}$; $T^*=100 \text{ N}$ 。PID 控制器中参数和解耦控制器中参数均是在 $\omega^*=500 \text{ rad/min}$ 时调得,且各控制器参数不随仿真条件的改变而改变。PID 控制器调整好的参数为: $K_{p1}=70, K_{i1}=30, K_{d1}=1.2$; $K_{p2}=75, K_{i2}=32, K_{d2}=1.3$; $K_{p3}=80, K_{i3}=35, K_{d3}=1.3$ 。ADRC 控制器调整好的参数为: $r_1=r_2=r_3=700$; $\beta_{11}=\beta_{21}=\beta_{31}=100$; $\beta_{12}=895, k_{p1}=1.35$; $\beta_{22}=928, k_{p2}=3.26$; $\beta_{33}=956, k_{p3}=4.31$ 。

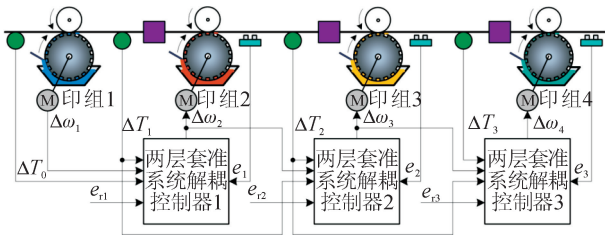


图 5 四层套准系统解耦控制结构图

Fig. 5 Structure of decoupling control strategy for four-layer register system

3.1 解耦控制器抗张力干扰的性能

令牵引段料带张力 T_0 在 5 s 时产生一个阶跃干扰,由 100 N 阶跃上升到 130 N,则 PID 控制和解耦控制下各级套准误差在 $\omega^*=500 \text{ rad/min}$ 和 1000 rad/min 时的仿真结果分别见图 6 和图 7。

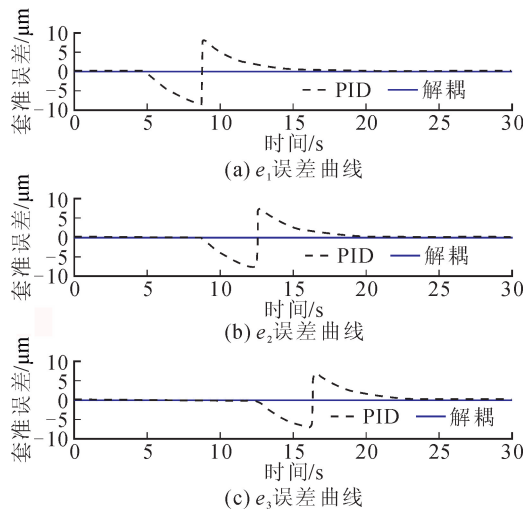


图 6 在 ω^* 为 500 rad/min 时,张力干扰下套准误差仿真结果
Fig. 6 Performance against tension interference when $\omega^*=500 \text{ rad/min}$

由仿真结果可以看出,仿真条件相同时,PID 控制下的各级套准误差峰值远大于解耦控制下的对应各级套准误差峰值,例如在 ω^* 为 1000 rad/min 时, e_1 在解耦控制下的峰值仅为 18.9 nm ,而在 PID 控

制下, e_1 的峰值却高达 $22.9 \mu\text{m}$ 。此外,对比图 6 和图 7 可以发现,在 PID 控制下,张力干扰引起的各级套准误差展现出随速度的增加而增大的趋势,但在解耦控制下,这种增大的趋势要小很多。

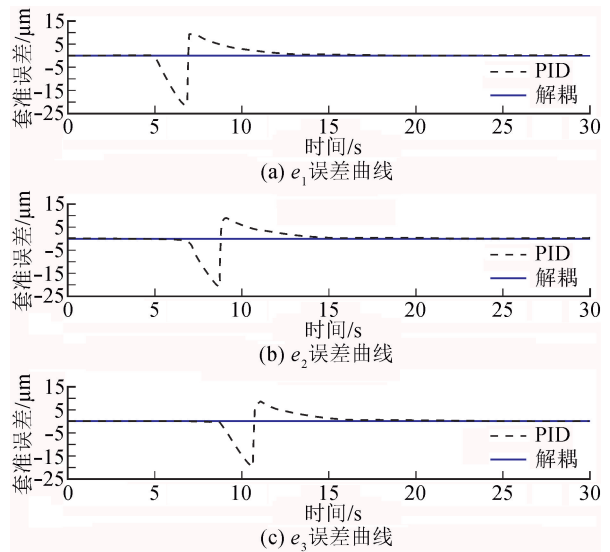


图 7 在 ω^* 为 1000 rad/min 时,张力干扰下套准误差仿真结果

Fig. 7 Performance against tension interference when $\omega^*=1000 \text{ rad/min}$

3.2 解耦控制器抗速度干扰的性能

令角速度 ω_1 在 5 s 时叠加一个幅值为 1 rad/min 、角频率为 1 rad/s 的正弦干扰,则 PID 控制和解耦控制下各级套准误差在 $\omega^*=500 \text{ rad/min}$ 和 1000 rad/min 时的仿真结果分别见图 8 和图 9。

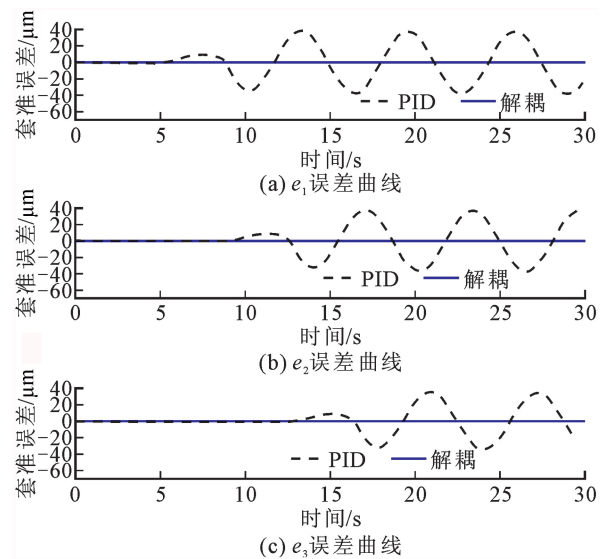


图 8 在 ω^* 为 500 rad/min 时,速度干扰下套准误差仿真结果

Fig. 8 Performance against speed interference when $\omega^*=500 \text{ rad/min}$

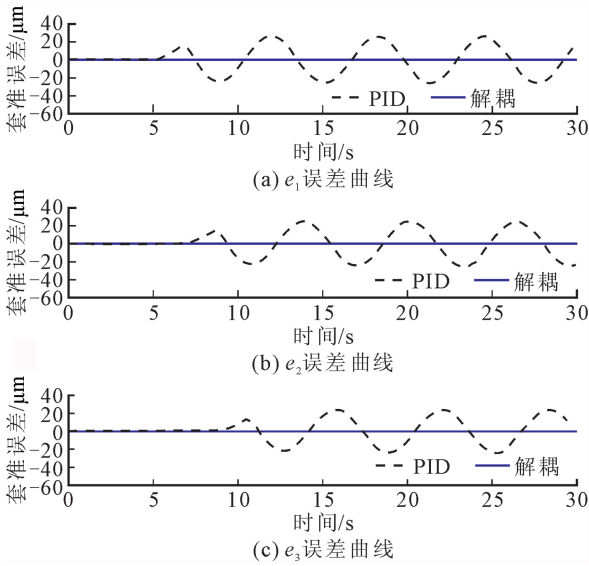


图 9 在 ω^* 为 1000 rad/min 时,速度干扰下套准误差仿真结果
Fig. 9 Performance against speed interference when $\omega^* = 1000 \text{ rad/min}$

从仿真结果可以得到,仿真条件一致时,解耦控制下的各级套准误差振幅明显小于 PID 控制下的同一套准误差的振幅,例如在 $\omega^* = 500 \text{ rad/min}$ 时, e_1 在 PID 控制下的振幅为 $39.4 \mu\text{m}$,而在解耦控制下, e_1 的振幅仅为 5.6 nm 。比较图 8 和图 9 还可以发现,正弦速度干扰引起的各级套准误差无论在 PID 控制还是解耦控制下振幅都随着稳态印刷速度的增大而减小。分析认为稳态速度越大,正弦速度干扰振幅相对稳态速度就越小,所以引起的各级套准误差振幅也越小。

3.3 解耦控制器抗料带特性变化的性能

烘干过程引起的料带特性变化是一个重要的未建模干扰,所以在 3.1 所述的张力扰动下,令 E 降低 20%,则 PID 控制和解耦控制下各级套准误差在 $\omega^* = 1000 \text{ r/min}$ 时的仿真结果分别见图 10 和图 11。

由图 10 可得到, PID 控制下的各级套准误差都随弹性模量 E 的减小而增大,比如在 E 从 $2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ 下降到 $1.68 \times 10^9 \text{ Pa}$ 时,套准误差 e_1 从 $22.9 \mu\text{m}$ 增大到 $29.4 \mu\text{m}$,即增大幅度为 28.4%。从图 11 可看出,在解耦控制下,各级套准误差展现出和 PID 控制下类似的变化趋势,都随弹性模量 E 的降低而增大,比如在 E 减小的过程中,套准误差 e_1 从 18.9 nm 增大到 21.2 nm ,即增大幅度为 12.2%。可见,随着 E 的减小, PID 控制下各级套准误差的峰值和增长幅度都明显大于解耦控制器下各级套准误差的峰值和增长幅度。

仿真结果表明,本文所提出的解耦控制器不但

通过前馈控制和 ADRC 控制回路有效控制了张力和速度等已建模耦合干扰产生的套准误差,而且通过 ADRC 控制回路对未建模干扰引起的套准误差进行了有效的估计和补偿,获得了明显优于 PID 控制器的控制性能。

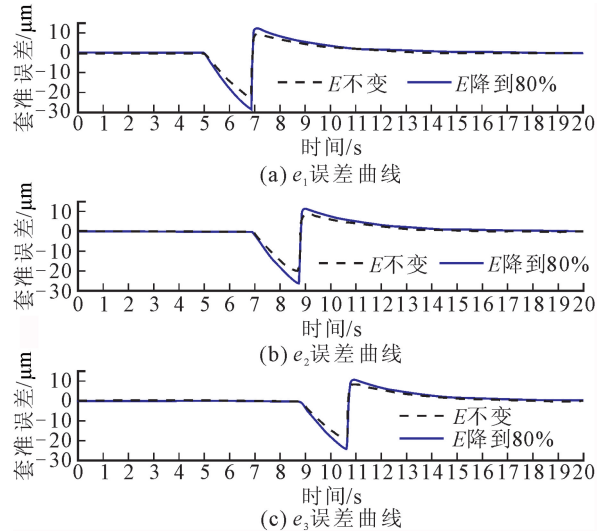


图 10 PID 控制下套准误差仿真结果
Fig. 10 Response curves of the PID control strategy

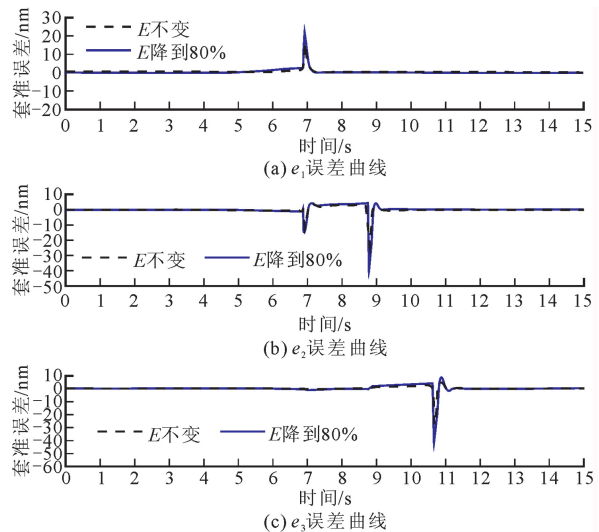


图 11 解耦控制下套准误差仿真结果
Fig. 11 Response curves of decoupling control strategy

4 结 语

本文针对多层凹版印刷电子装备对套准控制系统高精度和高稳定性的要求,建立了多层套准系统的非线性耦合数学模型,并利用小偏差法对其进行了线性化,得到了任意相邻印组间的套准误差线性模型;以套准误差线性模型为基础,利用前馈控制和 ADRC 技术设计了任意相邻印组间的解耦控制器,在采用前馈控制对已建模干扰进行前馈补偿的同

时,采用 ADRC 对套准误差主回路进行调节并对未建模干扰进行主动估计和补偿。仿真结果表明,所设计的解耦控制策略有效地抑制了各种耦合干扰引起的各级套准误差,大幅度提高了多层套准系统的控制精度和鲁棒性。

虽然本文提出的解耦控制策略具有很好的仿真性能,但其实际应用效果还有待后续实践工作的验证,影响其实际控制精度的原因有:①前馈控制器是基于套准系统模型设计的,然而模型是在忽略了料带塑性变形、环境干扰等因素的基础上建立的。实际工业生产过程中真实存在的这些因素势必会导致解耦控制器控制性能的下降。②仿真过程中忽略了套准误差检测、控制指令执行等过程中存在的时间延时,但在工业控制过程中,这些时间延时是存在的,并会导致重复补偿等现象的出现,影响解耦控制策略的控制精度。因此,虽然在仿真结果显示解耦控制策略可以将套准误差控制在纳米级,但在实际工业生产过程中,很难达到纳米级的套准控制。目前,国产机组式凹印机应用 PID 控制器可以将套准误差控制在 ± 0.1 mm 以内,我们对本文提出的解耦控制策略实现印刷套准精度小于 ± 10 μm 持乐观态度,后期将陆续发表我们的实验研究成果。

参考文献:

- [1] JUNG M, KIM J, KOO H, et al. Roll-to-roll gravure with nanomaterials for printing smart packaging [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, 14 (2): 1303-1317.
- [2] KANG H, LEE C, SHIN K. 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.
- [3] KANG H, LEE C, SHIN K. Modeling and compensation of the machine directional register in roll-to-roll printing [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21 (5): 645-654.
- [4] LI Jian, MEI Xuesong, TAO Tao, 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.
- [5] LEE J, SEONG J, PARK J, et al. Register control algorithm for high resolution multilayer printing in the roll-to-roll process [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60-61: 706-714.
- [6] 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.
- [7] CHEN Zhihua, HE Juanjuan, ZHENG Ying, et al. An optimized feedforward decoupling PD register control method of roll-to-roll web printing systems [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(1): 274-283.
- [8] 陈义君, 陈智华, 邓忠华. 凹印机套色系统的自抗扰解耦控制 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(6): 814-820. CHEN Yijun, CHEN Zhihua, DENG Zhonghua. Active disturbance rejection and decoupling control of gravure press register system [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(6): 814-820.
- [9] SESHADRI A, PAGILLA P R. Decentralized control of print registration in roll-to-roll printing presses [C]// *ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference*, 2013: 1-10.
- [10] YANG Mei, ZHANG Shaoru. Simulation and research of register control system based on sliding mode variable structure [C]// *2013 25th Chinese Control and Decision Conference*, 2013: 514-519.
- [11] KIM C H, YOU H, LEE S. Register control of roll-to-roll gravure-offset printing equipment considering time difference between measurement and actuation [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2012, 226(11): 2726-2738.
- [12] KIM C H, YOU H, JO J. Register control of roll-to-roll printing system based on statistical approach [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, 52 (5S1): 05DB08.
- [13] 刘善慧, 梅雪松, 何奎, 等. 凹印机多色套准系统自抗扰解耦控制 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(11): 1574-1579. LIU Shanhui, MEI Xuesong, HE Kui, et al. Active disturbance rejection decoupling control for multi-color register system in gravure printing machine [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1574-1579.
- [14] 刘善慧, 梅雪松, 李健, 等. 多色套准系统前馈自抗扰控制器设计 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(5): 143-150. LIU Shanhui, MEI Xuesong, LI Jian, et al. Design feedforward active disturbance rejection control controller for multi-color register system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(5): 143-150.
- [15] LIU Shanhui, MEI Xuesong, LI Jian, et al. Machine directional register system modeling for shaft-less drive gravure printing machines [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 251636.
- [16] 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: 255-262. (责任编辑 王绪迪)