

# 印刷机套准系统耦合建模与控制器设计

李健<sup>1</sup>, 刘善慧<sup>2</sup>

(1.河南科技大学, 洛阳 471003; 2.西安理工大学, 西安 710048)

**摘要:** **目的** 研究印刷机套准系统耦合建模及精密控制策略以减小套准误差。**方法** 根据印刷机套准系统工作机理建立多色套准系统的非线性耦合数学模型, 并进行线性化改造, 在所建立数学模型基础上设计基于 PID 的前馈套准误差控制策略, 并将该策略控制效果与传统 PID 控制效果进行仿真对比。**结果** 在张力干扰下, 套准误差由 $\pm 20 \mu\text{m}$ 减小到 $\pm 0.8 \mu\text{m}$ ; 速度波动下, 套准误差由 $\pm 30 \mu\text{m}$ 减小到 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 。**结论** PID 前馈控制策略能够显著减小套准误差, 提高套准控制的精度。

**关键词:** 套准系统; 套准控制; 前馈; PID

**中图分类号:** TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0222-06

## Coupling Modelling and Controller Design for Register System of Printing Press

LI Jian<sup>1</sup>, LIU Shan-hui<sup>2</sup>

(1.Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2.Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**ABSTRACT:** The work aims to research the coupling modeling and precision control strategy for register system of printing press, so as to reduce register errors. The nonlinear coupling mathematical model of multi-color register system was established according to the register system's working principle, and the linear transformation was carried out. Based on the linear model, a PID-based feedforward register error control strategy was designed, and the control effect was compared with that of the traditional PID control. Results showed that the register error caused by tension disturbance was reduced from  $\pm 20 \mu\text{m}$  to  $\pm 0.8 \mu\text{m}$ , and the register error caused by velocity disturbance was reduced from  $\pm 30 \mu\text{m}$  to  $\pm 1.5 \mu\text{m}$ . It is concluded that the feedforward PID control strategy can significantly reduce the register error and improve the accuracy of register control

**KEY WORDS:** register system; register control; feedforward; PID

套准精度是反映印刷品质量最直接的性能指标, 套准控制技术是印刷机控制系统的关键技术之一。印刷机的套准误差包括横向套准误差和纵向套准误差 2 类, 其中, 纵向套准误差主要取决于各版辊的速度、色组间的料带张力、料带特性等因素, 同时还受到制造和安装误差的影响, 是套准系统控制的重点和难点所在。特别对于现代高速印刷机, 由于采用了无轴传动方式, 如何对套准系统进行建模和精密控制, 已经成为相关领域的研究热点和难点课题。针对套准系统建模, Brandenburg<sup>[1]</sup>针对传统机械长轴传动模式下的

套准系统建立了纵向套准误差模型; Yoshida 提出了无轴传动方式下的套准误差简化模型, 但由于做了过多的简化, 使得模型准确性大为降低<sup>[2-4]</sup>。在套准控制策略设计上, 由于缺少套准模型的支持, 普遍采用的是传统 PID 控制算法。Kang 等<sup>[5-7]</sup>将相邻前级版辊速度波动作为已知干扰设计了前馈 PID 控制器, 但忽略了牵引段张力对套准误差的影响。Yoshida 等<sup>[4]</sup>根据所建模型设计了非线性控制策略。Li<sup>[8]</sup>虽然对套准模型做了详细的推导并针对张力和速度干扰设计了前馈控制器, 但仅仅局限于两色套准系统。近年来,

收稿日期: 2016-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(51505376); 河南科技大学博士启动基金(4001-13480061)

作者简介: 李健(1972—), 男, 博士, 河南科技大学讲师, 主要研究方向为印刷机控制系统。

一些学者尝试用现代控制理论应用于套准控制之中。吴庆奇将一种带有闭值模糊控制的 PID 控制策略用于套准系统<sup>[9]</sup>；徐刚采用带有死区的 PID 控制策略设计套准控制系统<sup>[10]</sup>；孙国超将遗传融合的蚁群算法和 PID 控制相结合用于套准系统控制<sup>[11]</sup>。Liu<sup>[12-13]</sup>设计了套准系统自抗扰解耦控。陈义君等<sup>[14]</sup>利用扩张状态观测器与前馈控制相结合提出了一种多色套准系统解耦控制策略。Seshadri 等<sup>[15]</sup>设计了套准系统的分散状态反馈控制器。如何寻找一种易于工业应用的高精度套准控制策略，仍需进一步探索。

文中以四色机组式无轴传动凹印机套准系统为研究对象，根据纵向套准误差的工作原理建立了四色套准系统非线性耦合数学模型，并详细推导了四色凹

印机套准系统的线性模型。在线性模型的基础上，针对张力和速度干扰设计了前馈 PID 套准控制器，实现对套准误差的高精度控制。通过仿真，验证了所提出的控制器比 PID 控制器具有更好的控制性能。

### 1 套准系统的建模及线性化

四色凹印机套准系统结构见图 1，主要由印色单元、烘干机构及相关检测部件组成。印辊均由伺服电机直接驱动，且印色电机在速度模式下工作。图 1 中  $L^*$  为色组间料带名义长度； $v_1, v_2, v_3, v_4$  为印辊的线速度； $T_0, T_1, T_2, T_3$  为印辊间料带的张力； $e_{12}, e_{23}, e_{34}$  为各色组相对于前一色组的套准误差。

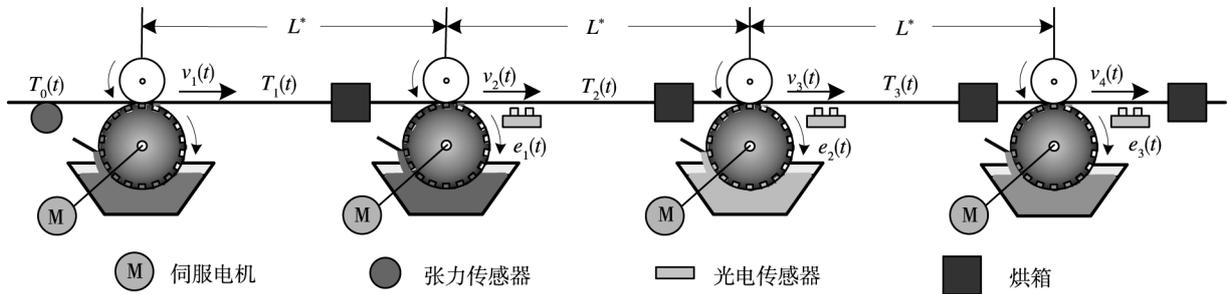


图 1 四色套准系统结构

Fig.1 Structure of four color register system

文献<sup>[8]</sup>中建立了双色非线性耦合套准系统模型，但是该模型中应变在实际应用中无法直接测量，因此，文中利用张力和应变的关系重新推导双色套准系统模型见式(1)。

$$\begin{cases} AE \frac{de_{i(i+1)}(t)}{dt} = T_{i-1}(t-t_T)v_i(t-t_T) - T_i(t)v_i(t) + \\ AE(v_{i+1}(t) - v_i(t-t_T)) \\ L^* \frac{dT_i(t)}{dt} = T_{i-1}(t)v_i(t) - T_i(t)v_{i+1}(t) + \\ AE(v_{i+1}(t) - v_i(t)) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $A$  为料带的横截面积； $E$  为料带的弹性模量； $t_T$  为料带传递的延时时间。

将式(1)进行推广，可建立四色套准系统的非线性耦合模型见式(2)。

$$\begin{cases} AE \frac{de_{12}(t)}{dt} = T_0(t-t_T)v_1(t-t_T) - T_1(t)v_1(t) + \\ AE(v_2(t) - v_1(t-t_T)) \\ AE \frac{de_{23}(t)}{dt} = T_1(t-t_T)v_2(t-t_T) - T_2(t)v_2(t) + \\ AE(v_3(t) - v_2(t-t_T)) \\ AE \frac{de_{34}(t)}{dt} = T_2(t-t_T)v_3(t-t_T) - T_3(t)v_3(t) + \\ AE(v_4(t) - v_3(t-t_T)) \\ L^* \frac{dT_1(t)}{dt} = T_0(t)v_1(t) - T_1(t)v_2(t) + AE(v_2(t) - v_1(t)) \\ L^* \frac{dT_2(t)}{dt} = T_1(t)v_2(t) - T_2(t)v_3(t) + AE(v_3(t) - v_2(t)) \\ L^* \frac{dT_3(t)}{dt} = T_2(t)v_3(t) - T_3(t)v_4(t) + AE(v_4(t) - v_3(t)) \end{cases} \quad (2)$$

式中：印辊速度  $v_2(t) \sim v_4(t)$  为系统输入，套准误差  $e_{12}(t) \sim e_{34}(t)$  为系统输出。由式(2)可以看出，模型由误差方程和张力辅助方程 2 部分组成，表明四色非线性耦合套准系统是一阶多输入、多输出、非线性、强耦合的时滞系统。利用一阶泰勒展开式对四色非线性耦合套准模型进行线性化处理。假设模型各个参数均在稳定点附近变化，令：

$$\begin{cases} e_{i(i+1)}(t) = e^* + \Delta e_{i(i+1)}(t) \\ v_i(t) = v^* + \Delta v_i(t) \\ T_i(t) = T^* + \Delta T_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $e^*$  为套准误差稳态值； $v^*$  为印辊的名义速度； $T^*$  为印辊间料带的名义张力； $\Delta e_{i(i+1)}(t), \Delta v_i(t)$  和  $\Delta T_i(t)$  为在参数稳态值附近变化的微小波动量。将式(3)代入式(2)，省略掉符号“ $\Delta$ ”、忽略高阶小量且化简后可得：

$$\begin{cases} \frac{de_{12}(t)}{dt} = \frac{v^*}{AE}(T_0(t-t_T) - T_1(t)) - \frac{T^*}{AE}v_1(t) + v_2(t) - \\ v_1(t-t_T) \\ \frac{de_{23}(t)}{dt} = \frac{v^*}{AE}(T_1(t-t_T) - T_2(t)) - \frac{T^*}{AE}v_2(t) + v_3(t) - \\ v_2(t-t_T) \\ \frac{de_{34}(t)}{dt} = \frac{v^*}{AE}(T_2(t-t_T) - T_3(t)) - \frac{T^*}{AE}v_3(t) + v_4(t) - \\ v_3(t-t_T) \\ \frac{dT_1(t)}{dt} = \frac{AE}{L^*}(v_2(t) - v_1(t)) + \frac{v^*}{L^*}(T_0(t) - T_1(t)) \\ \frac{dT_2(t)}{dt} = \frac{AE}{L^*}(v_3(t) - v_2(t)) + \frac{v^*}{L^*}(T_1(t) - T_2(t)) \\ \frac{dT_3(t)}{dt} = \frac{AE}{L^*}(v_4(t) - v_3(t)) + \frac{v^*}{L^*}(T_2(t) - T_3(t)) \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)进行拉氏变换,且用张力辅助方程代替误差方程中的张力变量,可得四色线性套准模型见式(5)。

$$\begin{cases} E_{12}(s) = G_A(s)v_2(s) + G_{D1}(s)v_1(s) + G_{E1}(s)T_0(s) \\ E_{23}(s) = G_A(s)v_3(s) + G_B(s)v_2(s) + G_{D2}(s)v_1(s) + G_{E2}(s)T_0(s) \\ E_{34}(s) = G_A(s)v_4(s) + G_B(s)v_3(s) + G_C(s)v_2(s) + G_{D3}(s)v_1(s) + G_{E3}(s)T_0(s) \end{cases} \quad (5)$$

其中,系统输入量对各色误差的传递函数  $G_A(s)$ ,  $G_B(s)$ ,  $G_C(s)$ 的表达式见式(6)。

$$\begin{cases} G_A(s) = \frac{v^*}{L^*s + v^*} \\ G_B(s) = \frac{L^*}{L^*s + v^*} \left( \frac{v^*}{L^*s + v^*} - e^{-t_1s} \right) - \frac{T^*}{AEs} \\ G_C(s) = \frac{L^*v^*}{(L^*s + v^*)^2} \left( \frac{v^*}{L^*s + v^*} - e^{-t_1s} \right) \end{cases} \quad (6)$$

干扰量  $v_1(t)$ 对各色误差的传递函数  $G_{D1}(s)$ ,  $G_{D2}(s)$ ,  $G_{D3}(s)$ 的表达式见式(7)。

$$\begin{cases} G_{D1}(s) = \frac{1}{s} \left( \frac{v^*}{L^*s + v^*} - e^{-t_1s} - \frac{T^*}{AE} \right) \\ G_{D2}(s) = \frac{v^*}{s(L^*s + v^*)} \left( \frac{v^*}{L^*s + v^*} - e^{-t_1s} \right) \\ G_{D3}(s) = \frac{(v^*)^2}{s(L^*s + v^*)^2} \left( \frac{v^*}{L^*s + v^*} - e^{-t_1s} \right) \end{cases} \quad (7)$$

干扰量  $T_0(t)$ 对各色误差的传递函数  $G_{E1}(s)$ ,  $G_{E2}(s)$ ,  $G_{E3}(s)$ 的表达式见式(8)。

$$\begin{cases} G_{E1}(s) = -\frac{v^*}{AEs} \left( \frac{v^*}{L^*s + v^*} - e^{-t_1s} \right) \\ G_{E2}(s) = -\frac{(v^*)^2}{AEs(L^*s + v^*)} \left( \frac{v^*}{L^*s + v^*} - e^{-t_1s} \right) \\ G_{E3}(s) = -\frac{(v^*)^3}{AEs(L^*s + v^*)^2} \left( \frac{v^*}{L^*s + v^*} - e^{-t_1s} \right) \end{cases} \quad (8)$$

从式(5)可以看出,影响套准误差  $e_{12}$ ,  $e_{23}$ ,  $e_{34}$  的除了对应印辊速度  $v_2$ ,  $v_3$ ,  $v_4$  外,还有牵引辊的张力  $T_0$  和第1色印辊的速度  $v_1$  等干扰因素。可见,影响套准误差的因素众多,这也给套准控制器的设计提出了更高的要求。

## 2 前馈 PID 控制器设计

在前馈 PID 控制器设计中,套准误差的控制是通过调整后一色印辊的速度来实现的,即通过调整  $v_2$ ,  $v_3$ ,  $v_4$  来分别改变  $e_{12}$ ,  $e_{23}$ ,  $e_{34}$  的大小,因此相应的传递函数  $G_A(s)$ 就代表了各色套准误差调整系统的特性,而其他影响因素都作为系统干扰。在前馈 PID 控制器中, PID 是针对传递函数  $G_A(s)$ 来设计的,其他系统影响因素都采用前馈控制的方式来进行补偿。因为  $T_0$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  在凹版印刷机中可以实时测量到,所以根据不变性原理,可以利用  $T_0$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  来

设计前馈控制器,且理论上前馈控制可做到完全消除  $T_0$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  对系统套准误差的影响。前馈 PID 控制器结构见图2。

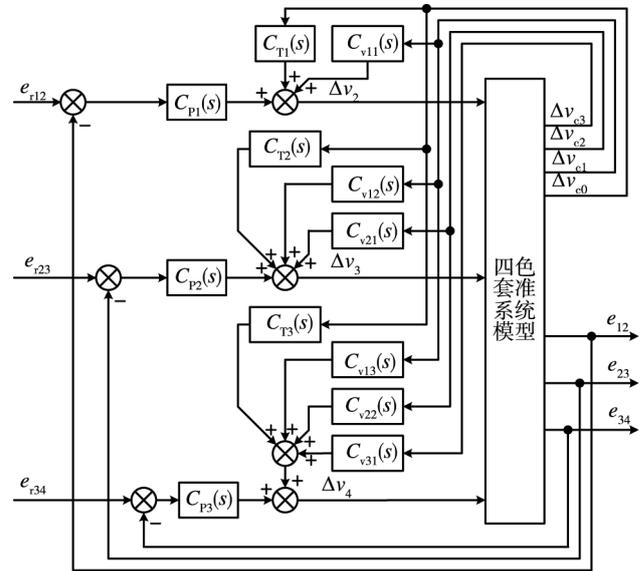


图2 四色套准系统前馈 PID 控制器方块  
Fig.2 Block diagram of feedforward PID controller for four color register system

图2中,  $e_{r12}$ ,  $e_{r23}$ ,  $e_{r34}$  是套准系统误差的参考输入,  $\Delta v_{C1}$ ,  $\Delta v_{C2}$ ,  $\Delta v_{C3}$  是实测各印辊线速度的变化量,  $\Delta T_{C0}$  是实测牵引部分的张力。对  $E_{12}$  回路而言,  $T_0$  和  $v_1$  都是干扰,所以它具有2个前馈控制器,分别是根据  $T_0$  设计的前馈控制器  $C_{T1}(s)$  和根据  $v_1$  设计的前馈控制器  $C_{v11}(s)$ ; 同理,  $E_{23}$  回路具有3个前馈控制器,分别是  $C_{T2}(s)$ ,  $C_{v12}(s)$  和  $C_{v21}(s)$ ;  $E_{34}$  回路具有4个前馈控制器,分别是  $C_{T3}(s)$ ,  $C_{v13}(s)$ ,  $C_{v22}(s)$  和  $C_{v31}(s)$ 。  $C_{p1}(s)$ ,  $C_{p2}(s)$ ,  $C_{p3}(s)$  是各回路的 PID 控制器。

根据图2和式(5),可以得到  $E_{12}(s)$  的表达式见式(9)。

$$\begin{aligned} E_{12}(s) &= \frac{G_A(s)C_{p1}(s)}{1 + G_A(s)C_{p1}(s)} E_{r12}(s) + \\ &\frac{G_{D1}(s) + C_{v11}(s)G_A(s)}{1 + G_A(s)C_{p1}(s)} V_{C1}(s) + \frac{G_{E1}(s) + C_{T1}(s)G_A(s)}{1 + G_A(s)C_{p1}(s)} T_{C0}(s) \end{aligned} \quad (9)$$

根据不变性原理,针对  $E_{12}$  控制回路中的干扰  $T_0$  和  $v_1$  设计前馈控制器,令:

$$\begin{cases} G_{E1}(s) + C_{T1}(s)G_A(s) = 0 \\ G_{D1}(s) + C_{v11}(s)G_A(s) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

则可设计出前馈控制器  $C_{T1}(s)$  和  $C_{v11}(s)$ , 其结果见式(11)。

$$\begin{cases} C_{T1}(s) = -\frac{G_{E1}(s)}{G_A(s)} = \frac{v^*}{AEL^*s} (v^* - L^*s + v^* e^{-t_1s}) \\ C_{v11}(s) = -\frac{G_{D1}(s)}{G_A(s)} = \frac{1}{L^*s} \left( \frac{T^*(L^*s + v^*)}{AE} + (L^*s + v^*) e^{-t_1s} - v^* \right) \end{cases} \quad (11)$$

同理，根据图 2 和式(5)，则可设计出前馈控制器  $C_{T2}(s)$ ,  $C_{v12}(s)$ 和  $C_{v21}(s)$ ，其结果见式(12)。

$$\begin{cases} C_{T2}(s) = -\frac{G_{E2}(s)}{G_A(s)} = \frac{(v^*)^2}{AEL^*s} \left( \frac{v^*}{L^*s+v^*} - e^{-t_r s} \right) \\ C_{v12}(s) = -\frac{G_{D2}(s)}{G_A(s)} = -\frac{v^*}{L^*s} \left( \frac{v^*}{L^*s+v^*} - e^{-t_r s} \right) \\ C_{v21}(s) = -\frac{G_B(s)}{G_A(s)} = e^{-t_r s} - \frac{v^*}{L^*s+v^*} + \frac{T^*(L^*s+v^*)}{AEL^*s} \end{cases} \quad (12)$$

同理，根据图 2 和式(5)，则可设计出前馈控制器  $C_{T3}(s)$ ,  $C_{v13}(s)$ ,  $C_{v22}(s)$ 和  $C_{v31}(s)$ ，其结果见式(13)。

$$\begin{cases} C_{T3}(s) = -\frac{G_{E3}(s)}{G_A(s)} = \frac{(v^*)^3}{AEL^*s(L^*s+v^*)} \left( \frac{v^*}{L^*s+v^*} - e^{-t_r s} \right) \\ C_{v3}(s) = -\frac{G_{D3}(s)}{G_A(s)} = -\frac{(v^*)^2}{L^*s(L^*s+v^*)} \left( \frac{v^*}{L^*s+v^*} - e^{-t_r s} \right) \\ C_{v22}(s) = -\frac{G_C(s)}{G_A(s)} = -\frac{v^*}{L^*s+v^*} \left( \frac{v^*}{L^*s+v^*} - e^{-t_r s} \right) \\ C_{v31}(s) = -\frac{G_B(s)}{G_A(s)} = e^{-t_r s} - \frac{v^*}{L^*s+v^*} + \frac{T^*(L^*s+v^*)}{AEL^*s} \end{cases} \quad (13)$$

式(11), (12)和(13)共同组成了四色套准系统的前馈控制器,同时它们和 PID 控制器一起构成了整个套准控制器，即前馈 PID 控制器。

### 3 仿真实验

为了验证前馈 PID 控制器的控制性能,对所设计的控制器进行仿真研究,并与传统的 PID 控制器进行对比。仿真中所采用的相关模型参数具体为： $E=2.1$  GPa,  $A=0.2$  mm<sup>2</sup>,  $L^*=9.1$  m,  $R^*=0.2$  m,  $T^*=100$  N。在相同的数学模型和模型参数的基础上，PID 控制器和前馈 PID 控制器的参数均是在第 1 色印刷版辊的角速度  $\omega^*=100$  r/min 的条件下调整得到的,且各参数不随工况的变化而变化。PID 控制时,  $C_{P1}(s)$ ,  $C_{P2}(s)$ ,  $C_{P3}(s)$  的参数为： $K_{P1}=K_{P2}=K_{P3}=63$ ,  $K_{I1}=K_{I2}=K_{I3}=30$ ,  $K_{D1}=K_{D2}=K_{D3}=1.5$ 。前馈 PID 控制时,  $C_{P1}(s)$ ,  $C_{P2}(s)$ ,  $C_{P3}(s)$  的参数为： $K_{P1}=150$ ,  $K_{I1}=280$ ,  $K_{D1}=0.5$ ;  $K_{P2}=190$ ,  $K_{I2}=320$ ,  $K_{D2}=0.5$ ;  $K_{P3}=200$ ,  $K_{I3}=330$ ,  $K_{D3}=0.5$ 。

#### 3.1 张力干扰下 PID 与前馈 PID 控制器的性能对比

在系统稳定运行 5 s 后，使张力干扰  $T_0$  从 100 N 阶跃上升到 120 N，套准误差在 PID 控制和前馈 PID 控制下的仿真曲线分别见图 3—4。

由图 3—4 可看出，在前馈 PID 控制下，套准误差显现出和 PID 控制下类似的变化趋势,即随着速度的增加而增大,到达峰值的时间和系统的延时时间有关。在同样的仿真条件下，前馈 PID 控制下的套准误

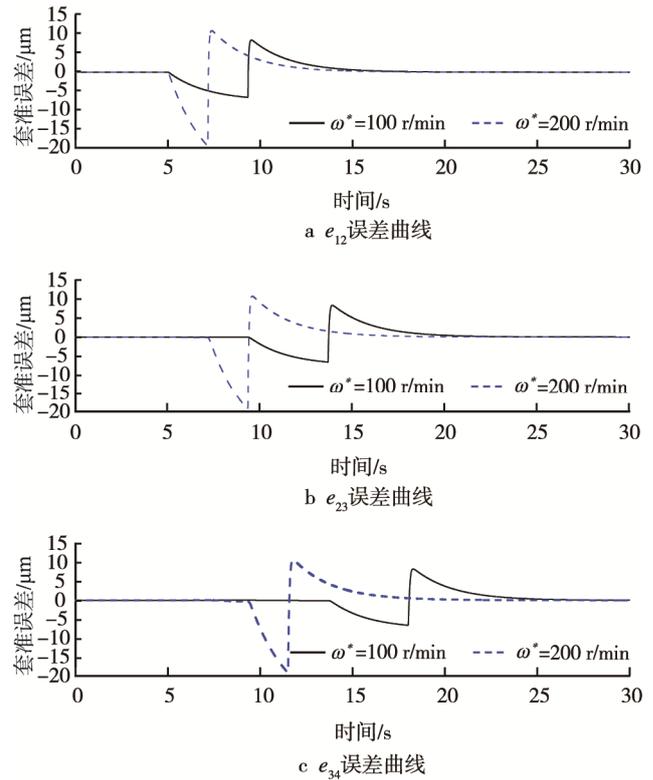


图 3 PID 控制器在张力干扰下的套准误差仿真曲线  
Fig.3 Simulation curve of register error of PID controller with tension disturbance

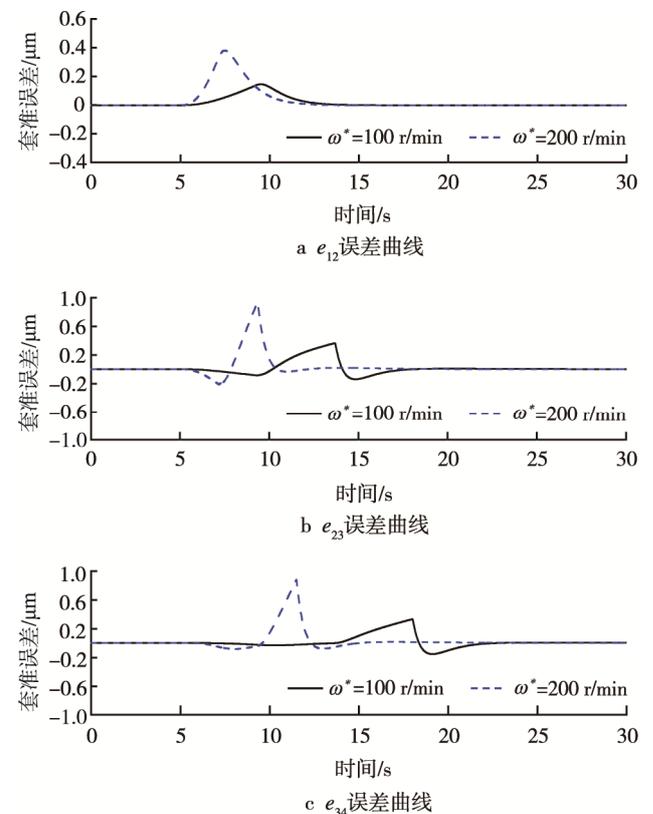


图 4 前馈 PID 控制器在张力干扰下的套准误差仿真曲线  
Fig.4 Simulation curve of register error of feedforward PID controller with tension disturbance

差峰值远小于PID控制下的套准误差峰值,且套准误差曲线变化更加平缓。这说明在前馈PID控制器中前馈环节对张力干扰造成的套准误差提前产生了控制补偿量,使得张力波动造成的套准误差得到了提前补偿,所设计的前馈PID控制器效果明显好于单纯的PID控制器。

### 3.2 速度干扰下PID与前馈PID控制器的性能对比

系统稳定运行5s后,在第1色印刷速度上叠加一个幅值为0.1 r/min、频率为0.5 rad/s的正弦扰动,套准误差在PID控制和前馈PID控制下的仿真曲线分别见图5—6。

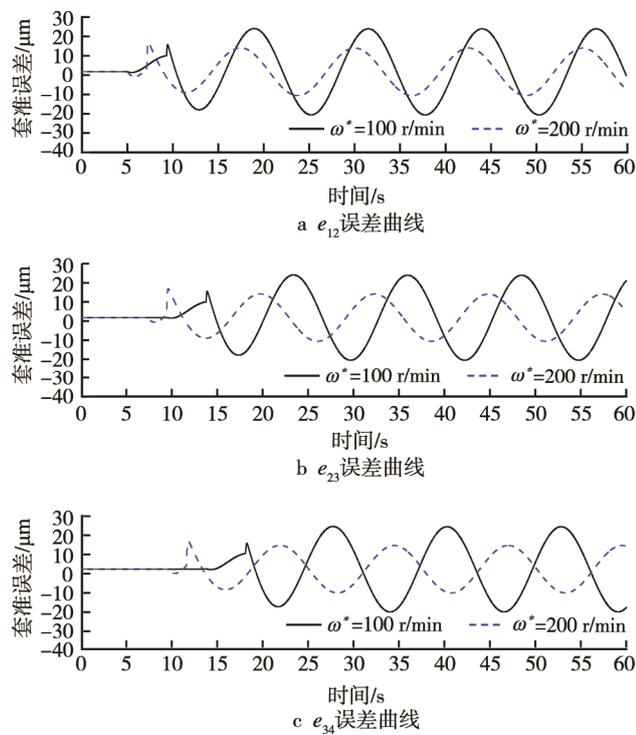


图5 PID控制器在速度干扰下的套准误差仿真曲线  
Fig.5 Simulation curve of register error of PID controller with speed disturbance

由图5—6可看出,无论在PID控制下还是在在前馈PID控制下,随着速度的增大,速度干扰引起的套准误差都在变小,这主要是因为速度越大,速度干扰相对就越小,所以引起的套准误差也就越小。其次,在同样的仿真条件下,前馈PID控制下的套准误差峰值远小于PID控制下的套准误差峰值。这说明在前馈PID控制器中,前馈环节对速度干扰产生的套准误差进行了提前补偿,所设计的前馈PID控制器具有比PID控制器更强的抗速度干扰能力。

综上所述,无论在张力干扰的情况下,还是在速度干扰的情况下,前馈PID控制器都能大幅度地提高套准控制性能,其控制效果明显优于PID控制器。

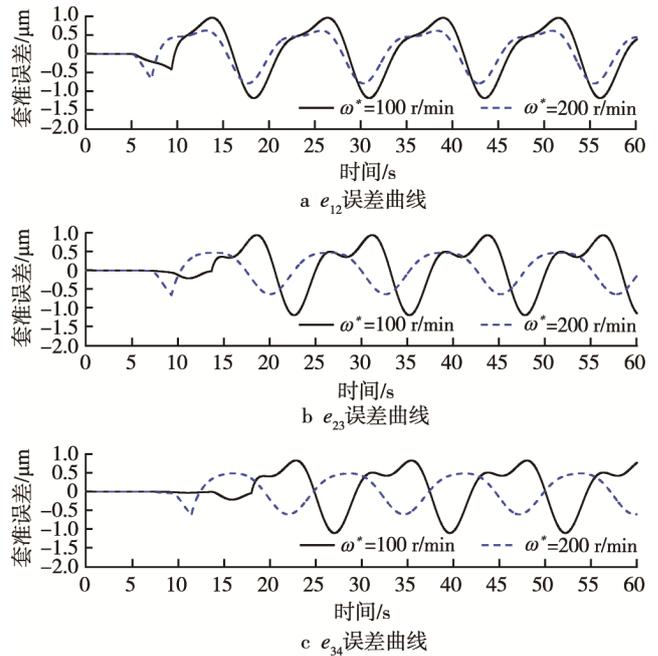


图6 前馈PID控制器在速度干扰下的套准误差仿真曲线  
Fig.6 Simulation curve of register error of feedforward PID controller with speed disturbance

## 4 结语

针对无轴传动下多色套准系统的控制要求,首先,在双色套准系统模型的基础上推导了四色套准系统非线性数学模型,并利用一阶泰勒展开式对其进行了线性化,得到了四色套准系统线性模型。其次,依据四色套准系统线性模型,结合不变性原理详细介绍了前馈PID套准控制器的设计过程。最后,通过仿真表明,所设计的前馈PID控制器很好地抑制了张力和速度干扰对套准误差的影响,比传统PID控制具有更好的控制性能。

### 参考文献:

- [1] BRANGDENBURG G. New Mathematical Models for Web Tension and Register Error[C]// Proc1, 3rd International IFAC Conf on Instrumentation and Automation in the paper, Rubber and Plastics Industries, Brussels, May, 1976: 24—26.
- [2] YOSHIDA T, TAKAGI S, SHEN T, et al. Modeling and Cooperative Resister Control of Gravure Printing Press[J]. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu C Hen (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part C), 2008, 74 (738): 339—345.
- [3] YOSHIDA T, TAKAGI S, MUTO Y, et al. Register Control of Sectional Drive Rotogravure Printing Press[J]. Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier, 2008: 417—420.
- [4] 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.
- [5] KANG H K, LEE C W, SHIN K H. Novel Modeling of Correlation Between Two-dimensional Registers in Large-Area Multilayered Roll-to-roll Printed Electronics[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(1): 6701.
- [6] KANG H K, LEE C W, SHIN K H. Compensation of Machine Directional Register in a Multi-Layer Roll-to-roll Printed Electronics[C]// *Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on IEEE*, 2010: 2494—2497.
- [7] 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.
- [8] LI Jian, MEI Xue-song, 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.
- [9] 吴庆奇. 凹版印刷自动套色系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
WU Qing-qi. Automatic Register System for Gravure Printing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [10] 徐刚. 凹版印刷自动套色分布式控制系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
XU Gang. Distributed Control System for Automatic Register[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [11] 孙国超. 基于改进的蚁群算法在无轴传动印刷机系统中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
SUN Guo-chao. Research on the Application of Improved Ant Colony Algorithm in Shaftless Drive Printing Machine System[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [12] LIU S, MEI X, LI J, et al. Machine Directional Register System Modeling for Shaft-less Drive Gravure Printing Machines[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013(2): 206—226.
- [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 Shan-hui, MEI Xue-song, HE Kui, et al. Active Disturbance Rejection Decoupling Control for Multi-color Register System in Gravure Printing Machine[J]. *Control Theory and Applications*, 2014, 31(11): 1574—1579.
- [14] 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 Yi-jun, CHEN Zhi-hua, DENG Zhong-hua. Active Disturbance Rejection and Decoupling Control of Gravure Press Register System[J]. *Control Theory and Applications*, 2014, 31(6): 814—820.
- [15] SESHADRI A, PAGILLA P. Decentralized Control of Print Registration in Roll-to-roll Printing Presses[C]// *ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference*, Palo Alto, CA, United states, 2013: 1—10.