

基于模糊控制的印刷电子装备套准系统控制策略

刘善慧, 史文亮, 尹秉政, 赵庆海, 胡兵兵
(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 西安 710048)

摘要: **目的** 为了提高凹版印刷电子装备的制造精度和一致性, 提出一种将模糊控制与 PID (Proportion-Integral-Differential) 控制有机融合的多层套准系统控制策略。**方法** 在 2 层套准系统模型基础上, 结合多层套准系统的套印工艺, 建立 4 层套准系统非线性耦合数学模型, 有机结合模糊控制和 PID 控制设计 4 层套准系统模糊 PID 控制策略, 并利用 Simulink 软件对所提出的控制策略进行仿真研究。**结果** 仿真结果表明, 提出的套准系统模糊 PID 控制策略很好地抑制了张力波动、速度干扰、料带性能变化引起的套准误差。**结论** 提出的多层套准系统控制策略实现了高精度套准控制, 具有比 PID 控制器更好的控制性能。

关键词: 印刷电子; 套准系统; 模糊控制; PID

中图分类号: TS83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)07-0201-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.07.031

Register System Control Strategy Based on Fuzzy Control for Printed Electronic Equipment

LIU Shan-hui, SHI Wen-liang, YIN Bing-zheng, ZHAO Qing-hai, HU Bing-bing

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

ABSTRACT: The paper aims to propose a multi-layer register control system that integrates fuzzy control and PID (Proportion-Integral-Differential) control to improve the printing accuracy and consistency of gravure printed electronic equipment. A four-layer nonlinear and coupling model was established according to the multi-layer register system working principle and the two-layer register system model to effectively integrate fuzzy control and PID control to design a fuzzy PID control controller for the four-layer register system, and then, the simulation study of the controller was executed in the Simulink. The results of computer simulation showed that the proposed control methodology well restrained the register errors caused by tension fluctuation, speed interference and web characteristic change. The proposed multi-layer register controller is able to realize a high precision control for the multi-layer register system. It has better control performance than PID controller.

KEY WORDS: printed electronics; register system; fuzzy control; PID

机组式凹版印刷电子装备与喷墨、丝网、涂布等印刷电子装备相比, 在印刷电子产品制造方面具有印刷面积大、工艺稳定、油墨兼容性好、耐印力高、生

产效率高的优点^[1], 已初步应用于柔性电路板^[2]、薄膜晶体管^[3]、柔性传感器^[4]等高端电子制造领域。在多层套准系统中, 一方面各印组之间存在多物理量耦

收稿日期: 2018-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51505376); 中国博士后科学基金(2016M602844)

作者简介: 刘善慧(1982—), 男, 博士, 西安理工大学副教授, 主要研究方向为先进印刷包装技术与设备。

合过程,使其具有强耦合、非线性的特点;另一方面烘箱系统、检测系统等又使其具有大干扰、变参数、时滞性的特点,这些特点使得传统PID控制策略无法满足印刷电子产品高质量的要求。可见,根据多层套准系统套准工艺和数学模型,设计出满足印刷电子产品要求的控制策略,是提高多层凹版印刷电子装备制造精度和一致性的关键。

套准误差分为纵向和横向2类套准误差^[5],是反映多层印刷电子器件制造精度的直接指标,而纵向套准误差的影响因素众多,是影响印刷制造精度的主要因素,也是套准系统控制的难点所在。Lee等^[6]利用统计方法研究了引起印刷缺陷的工况,指出套准测量误差是影响印刷质量的重要因素。为抑制放卷牵引段张力波动和前级版辊速度波动引起的套准误差,Li等^[7]设计了双层套准系统的前馈PID控制器,获得了较好的控制效果。Kim^[8]等将检测到套准误差时刻与控制器实际控制电机时刻之间的延时时间纳入控制器的设计过程,随后,Kim^[9]等通过在版辊周向设计多个色标的办法增加了套准误差的采样点数,减小了套准系统的实时调整时间,提高了套准系统的控制精度。Yang等^[10]设计了滑模变结构控制策略,仿真条件下获得了良好的鲁棒性。朱功章^[11]建立了加速过程中料带张力和套准误差间的数学模型,提出了基于回声状态网络模型的模型预测控制策略。将前馈控制与扩张状态观测器相融合,陈义君等^[12]设计了一种多层套准系统解耦控制策略。为了抑制相邻印组间的耦合套准误差,Chen等提出一种基于模型的前馈PD控制方法^[13]和优化前馈解耦PD控制方法^[14]。Seshadri等^[15]建立了补偿辊模式套准误差模型,设计了分散状态反馈控制器。在建立套准系统模型的基础上,李健等^[16]推导了前馈控制器的表达式,设计了套准系统的前馈PID控制器,但其难度会随印层数的增加而增大。Liu等^[17]以自抗扰控制和前馈控

制为核心设计了多层套准系统的解耦控制器,但存在控制参数多且调整难度大的问题。王世辉^[18]设计了印刷品套印精度自动视觉检测系统,建立了横向套准误差模型,并设计横向套准系统的传统PID控制方法。

为了提高多层印刷电子器件制造精度,突破制约多层印刷电子产品质量提升的瓶颈,文中以4层套准系统为研究对象,根据多层套准印刷工艺建立纵向套准误差非线性耦合数学模型,有机融合模糊控制和PID控制策略,设计多层套准系统模糊PID控制器,以根据印刷条件变化实现对PID参数的自整定,并在Matlab/Simulink中从张力、速度和料带性能等变化3种工况下对所提出的控制策略进行了仿真研究。

1 多层套准系统建模

放卷系统、多层印刷系统和收卷系统3个子系统共同构成了机组式凹版印刷电子装备的整体^[5]。其中,在放卷子系统和收卷子系统中进行张力控制,以保证料带稳定的进入印刷区间和平稳、整齐的收起;在多层印刷系统中进行套准控制,以保证高质量的印刷。4层套准系统的结构见图1,由印刷机组、张力检测元件、套准误差检测元件、烘箱系统等组成,各组成部分通过料带有机的连成一体,各级套准误差通过版辊速度和料带张力等变量耦合在一起形成复杂的多物理过程耦合机制,是典型的复杂机电一体化系统。各印组均由伺服电机驱动,电机均工作在速度模式下,且将印组1的角速度作为4层套准系统的基准角速度,后级印组依据光电传感器检测到的误差相应的调整自身角速度。根据套印工艺,印刷完一层都必须经烘箱烘干后再进入下一层印刷,烘箱会使料带弹性模量等参数改变,同时为印刷制造带来多种未知干扰,因此,套准系统在印刷电子器件制造过程中表现出非线性、强耦合、强干扰等特点。

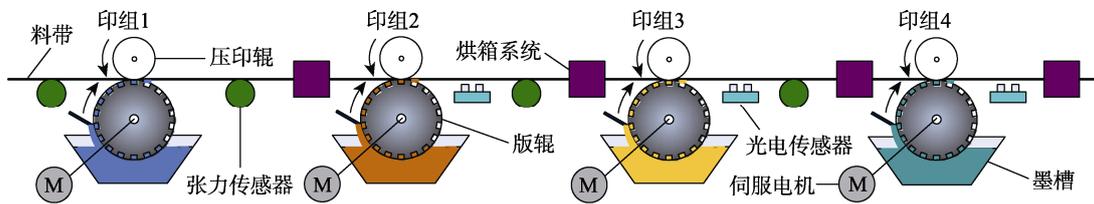


图1 套准系统结构
Fig.1 Structure of register system

结合图1和文献[19]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:

$$\frac{de_{i(i+1)}(t)}{dt} = V_{i+1}(t) - \varepsilon_i(t)V_i(t) - V_i(t-t_T) + \varepsilon_{i-1}(t-t_T)V_i(t-t_T) \quad (1)$$

式中: $e_{i(i+1)}$ 为印组*i*和印组*i*+1之间的套准误差; V_i, V_{i+1} 分别为印组*i*和印组*i*+1的线速度; ε_i 为印组

*i*和印组*i*+1之间的应变; t_T 为料带从印组*i*传递到印组*i*+1所需的延时时间。

根据印组速度和角速度的关系、料带张力和应变的关系可得:

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

式中： ω_i 为印组 i 的角速度； E 为料带的弹性模量，且假设不随时间等因素变化； A 为料带的横截面积，且假设不随时间等因素变化； R_i 为印组版辊 i 的半径； T_i 为印组 i 和印组 $i+1$ 之间的料带张力。

由于版辊间的级差相对于版辊半径而言是微小的，所以忽略版辊级差，将式 (2) 带入式 (1) 化简可得：

$$AE \frac{de_{i(i+1)}(t)}{dt} = AER\omega_{i+1}(t) - T_i(t)R\omega_i(t) - AER\omega_i(t - t_T) + T_{i-1}(t - t_T)R\omega_i(t - t_T) \quad (3)$$

多层印刷的套准工艺主要有 2 种：一种是以前一印层为基准进行印刷，即套准误差由当前印层的色标和相邻前一印层的色标做差求得；另一种是以第 1 印层为基准进行印刷，即套准误差由当前印层的色标和

第 1 印层的色标做差求得，见图 2。由于 4 层印刷可以满足大多数电子元器件的印刷制造，文中多层印刷套准工艺采用第 1 种套准工艺进行印刷，则通过式 (3) 在多层套准系统中推广可得 4 层套准系统的非线性数学模型如下：

$$\begin{cases} AE \frac{de_{12}(t)}{dt} = AER\omega_2(t) - T_1(t)R\omega_1(t) - AER\omega_1(t - t_T) + T_0(t - t_T)R\omega_1(t - t_T) \\ AE \frac{de_{23}(t)}{dt} = AER\omega_3(t) - T_2(t)R\omega_2(t) - AER\omega_2(t - t_T) + T_1(t - t_T)R\omega_2(t - t_T) \\ AE \frac{de_{34}(t)}{dt} = AER\omega_4(t) - T_3(t)R\omega_3(t) - AER\omega_3(t - t_T) + T_2(t - t_T)R\omega_3(t - t_T) \end{cases} \quad (4)$$

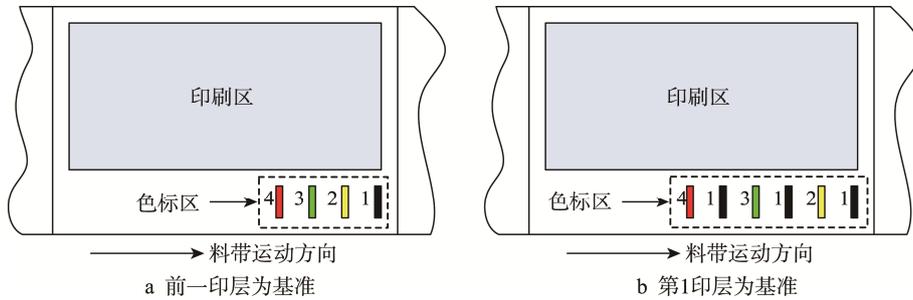


图 2 多层印刷的 2 种套准工艺

Fig.2 Two register processes for multilayer printing

根据图 2 和多层套准工艺可得：在机组式凹版印刷电子设备的 4 层套准系统中， $\omega_2(t) - \omega_4(t)$ 是其输入，可通过伺服电机编码器测得； $e_{12}(t) - e_{34}(t)$ 是其输出，可通过光电传感器测得； $T_0(t) - T_3(t)$ 可通过张力传感器测得。在实践中，印组角速度 $\omega_i(t)$ 由 2 部分组成：一部分是基准角速度 ω^* ，另一部分是套准控制器根据检测套准误差求得的速度补偿量 $\Delta\omega_i(t)$ ，因此，4 层套准系统中各印组角速度可表达为：

$$\begin{cases} \omega_1(t) = \omega^* \\ \omega_2(t) = \omega^* + \Delta\omega_2(t) \\ \omega_3(t) = \omega^* + \Delta\omega_3(t) \\ \omega_4(t) = \omega^* + \Delta\omega_4(t) \end{cases} \quad (5)$$

由于各印组版辊半径级差、制造安装误差都很小，相对于印组间料带长度可以忽略，所以取相邻印组间的料带长度同为 L 。除设备启动和加减速阶段外，驱动各印组伺服电机的角速度均以基准角速度为中心微小波动，可认为各级延时时间都为 t_T ，其表达式为：

$$t_T = \frac{L}{R\omega^*} \quad (6)$$

2 模糊 PID 控制器设计

根据式 (2) 可知，多层套准系统是一个参数

时变的耦合复杂非线性系统，传统定参数 PID 控制器无法满足控制需求。为此，文中根据印刷电子产品生产需求，设计了 4 层套准系统模糊 PID 控制策略，其结构见图 3。根据印刷电子产品制造工况，该控制策略通过模糊推理可实现对 PID 参数的在线自动整定，以满足印刷电子产品高精度的要求。

如图 3 所示，根据 4 层套准工艺，设计的套准系统模糊 PID 控制策略共包含有 3 个结构一致模糊 PID 控制器，设置在印组 1 和印组 2 中间、印组 2 和印组 3 中间、印组 3 和印组 4 中间。系统同步转速 ω^* 由同步控制系统提供，模糊 PID 控制器根据检测到的套准误差 $e_{i(i+1)}$ 计算各印组补偿量 $\Delta\omega_i$ 。3 个模糊 PID 控制器中的模糊推理模块均采用两输入-三输出模式，参数设置也都相同，其结构见图 4。模糊推理模块的输入端有 2 个输入量，一个是系统期望套准误差值 $e_{ri(i+1)}$ 与光电传感器检测的系统输出套准误差值 $e_{i(i+1)}$ 之差 e_i ，另一个为 e_i 的变化率 Δe_i 。在模糊推理模块的输出端，3 个输出量 ΔP_i ， ΔI_i 和 ΔD_i 分别为 PID 参数 P_i ， I_i 和 D_i 的修正量，关系表达式为：

$$\begin{cases} P_i = p_i + \{e_i, \Delta e_i\} P_i = p_i + \Delta P_i \\ I_i = i_i + \{e_i, \Delta e_i\} I_i = i_i + \Delta I_i \\ D_i = d_i + \{e_i, \Delta e_i\} D_i = d_i + \Delta D_i \end{cases} \quad (7)$$

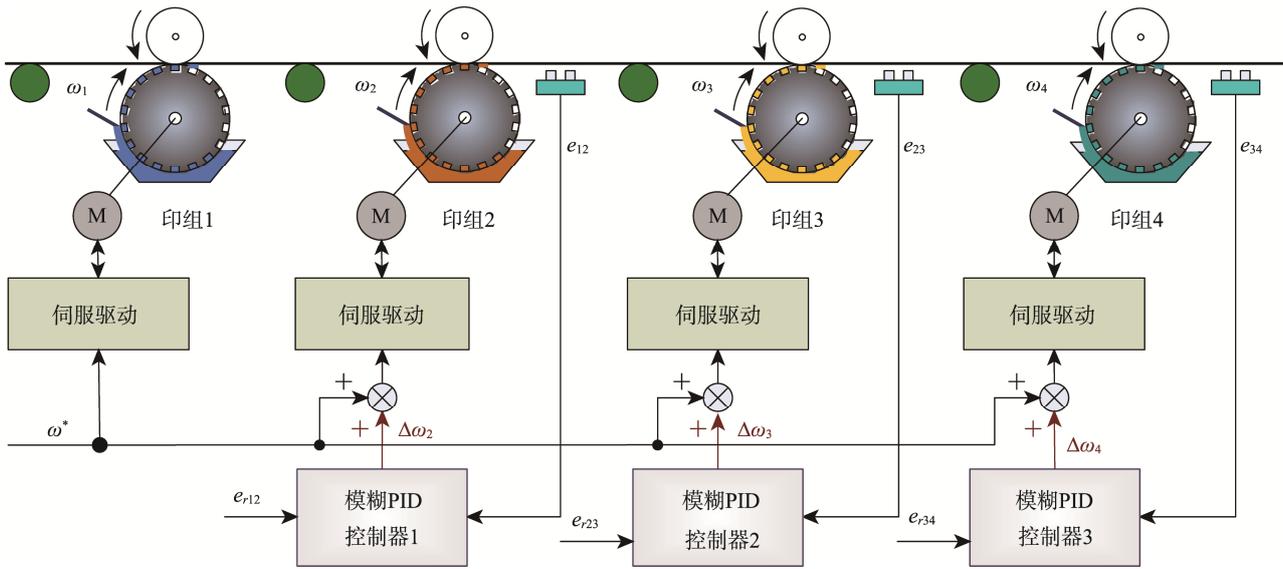


图3 套准系统模糊PID控制结构
Fig.3 Fuzzy PID control structure of register system

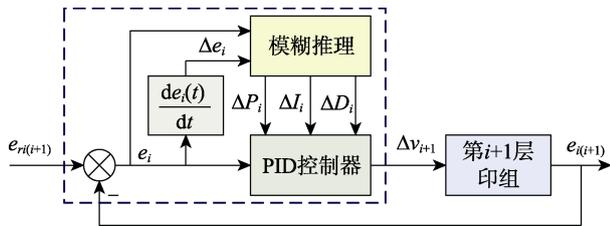


图4 模糊PID控制系统
Fig.4 Block diagram of fuzzy PID control system

式中： p_i 、 i_i 和 d_i 为对应PID控制器的初始参数； $i=1, 2, 3$ 。

在设计模糊控制器中，输入变量 e_i 和 Δe_i 的论域为 $\{-6, -4, -2, 0, +2, +4, +6\}$ ，输出变量 ΔP_i 、 ΔI_i 和 ΔD_i 的论域为 $\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ ，各变量对应的语言值均为 $\{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$ ，记为 $\{\text{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$ 。输入、输出变量的隶属度函数均使用三角形隶属函数，其表达式为^[20]：

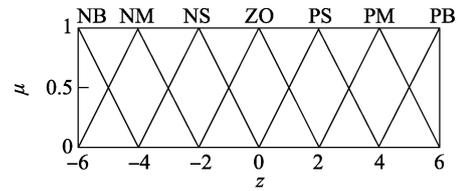
$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (8)$$

式中： a 、 b 、 c 为三角形的3个顶点位置，且满足 $a < b < c$ 。

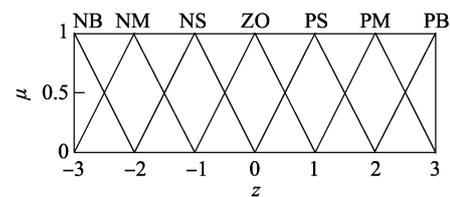
结合输入、输出变量的论域，则模糊控制中输入、输出变量的隶属度函数图分别见图5a和图5b。

将印刷实践的经验加以总结，并结合印刷套准系统的控制特点，将这些控制规则汇总，就分别得到了 ΔP_i 、 ΔI_i 和 ΔD_i 的模糊控制规则表，其中 ΔP_i

的模糊控制规则见表1，其他两表保持一致。套准系统模糊控制器采用二维的Mamdani控制器，模糊推理合成规则遵循Max-Min规则，选用重心法作为解模糊方法。



a e_i 和 Δe_i 的隶属度函数



b ΔP_i 、 ΔI_i 和 ΔD_i 的隶属度函数

图5 模糊控制中的隶属度函数
Fig.5 Membership function of fuzzy control

表1 ΔP_i 的模糊控制规则
Tab.1 Rules of ΔP_i fuzzy control

e_i	对应于各 Δe_i 的 ΔP_i 值						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

3 仿真与分析

为验证 4 层套准系统模糊 PID 控制器的性能,文中设计了张力干扰、速度干扰和料带弹性模量降低 3 种工况下的 PID 和模糊 PID 控制器仿真验证。利用 Matlab/Simulink 软件进行仿真研究,采用 Fixed-step 仿真模式,固定步长设置为 1 ms,采用的套准系统模型参数具体为: $L=9.1\text{ m}$, $R^*=0.2\text{ m}$, $T^*=100\text{ N}$, $A=0.2\text{ cm}^2$, $E=2.1\text{ GPa}$ 。仿真中调整好的 PID 控制器参数为:

$$\begin{cases} p_1 = p_2 = p_3 = 63 \\ i_1 = i_2 = i_3 = 40 \\ d_1 = d_2 = d_3 = 1.5 \end{cases} \quad (9)$$

3.1 张力干扰下模糊 PID 控制器的性能

令牵引段料带张力 T_0 在 4 层套准系统运行 5 s 后产生一个 20 N 的阶跃变化,由 100 N 上升到 120 N,则在印刷线速度为 200 m/min 和 400 m/min 时,2 种控制下 4 层套准系统的仿真结果见图 6—7。

仿真结果分析表明:在相同的仿真条件下,各级误差在模糊 PID 控制下的最大值显著小于 PID 控制下的对应误差最大值。根据印刷线速度为 200 m/min 时的仿真结果可知, e_{12} 在模糊 PID 控制下的最大值为 $7.28\text{ }\mu\text{m}$,但是用 PID 控制器仿真时, e_{12} 的最大值为 $12.3\text{ }\mu\text{m}$,即模糊 PID 控制下套准精度提高了约 40.8%。在模糊 PID 控制和传统 PID 控制 2 种控制策略中,张力干扰引起的多层套准系统各级误差表现出随印刷速度增大而增加的趋势,但是模糊 PID 控制下的各级误差增大幅度要小得多。

3.2 速度干扰下模糊 PID 控制器的性能

令 ω_1 在 4 层套准系统运行 5 s 后增加一个角频率为 0.5 rad/s 、幅值为 0.5 rad/min 的正弦干扰,分别得到在印刷线速度为 200, 400 m/min 2 种情况下的仿真结果见图 8 和图 9。

仿真结果分析表明:在相同的仿真条件下,模糊 PID 控制在仿真时间段内的套准误差振荡幅度要比 PID 控制下对应套准误差振荡幅度小,例如,印刷线速度为 400 m/min 时,模糊 PID 控制下 e_{12} 的最大值为 $22.9\text{ }\mu\text{m}$,但是用 PID 控制器仿真时, e_{12} 的最大值却为 $37.7\text{ }\mu\text{m}$,即模糊 PID 控制下套准精度提高了约 39%;对于模糊 PID 控制和传统 PID 控制 2 种控制策略,速度干扰引起的多层套准系统各级误差随着印刷速度的增大反而会减小,分析认为印刷速度越大,速度干扰相对印刷速度就越小,导致同样速度干扰下各级误差随着印刷速度的增大而减小。

3.3 料带弹性模量降低时模糊 PID 控制器的性能

印刷电子产品的烘干温度通常高于 $100\text{ }^\circ\text{C}$,而传统印刷产品的烘干温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 左右且持续时间较短,因此更高烘干温度和更长烘干时间必然引起料带弹性模量的变化,从而引起套准误差。在印刷线速度为 400 m/min、 T_0 波动如 3.1 节的工况下,仿真研究弹性模量不变以及下降 20% 情况下, PID 控制器和模糊 PID 控制器性能的结果见图 10 和图 11。

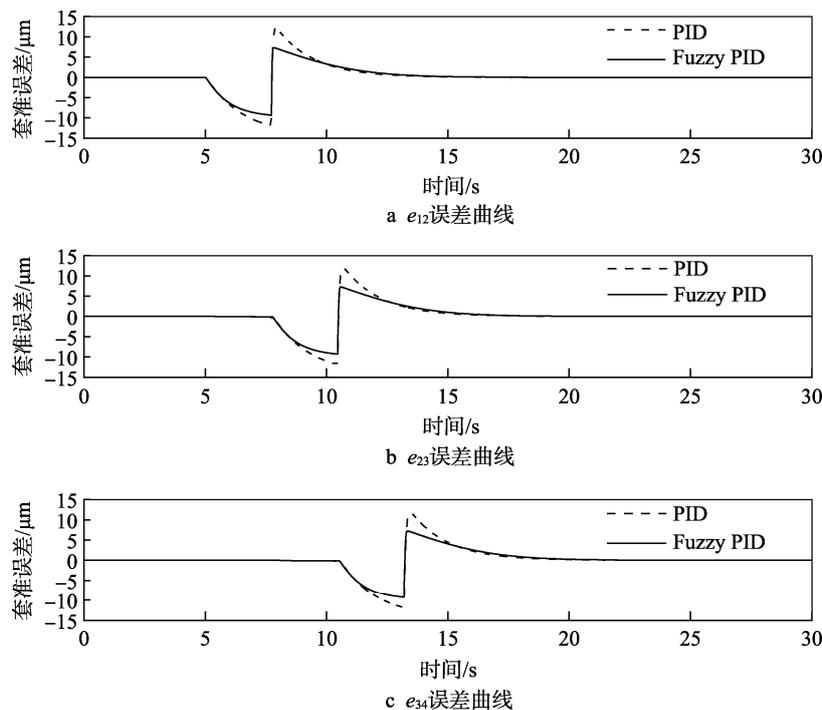


图 6 印刷线速度为 200 m/min 时张力干扰下套准系统仿真结果

Fig.6 Simulation results of register system under tension interference at 200 m/min

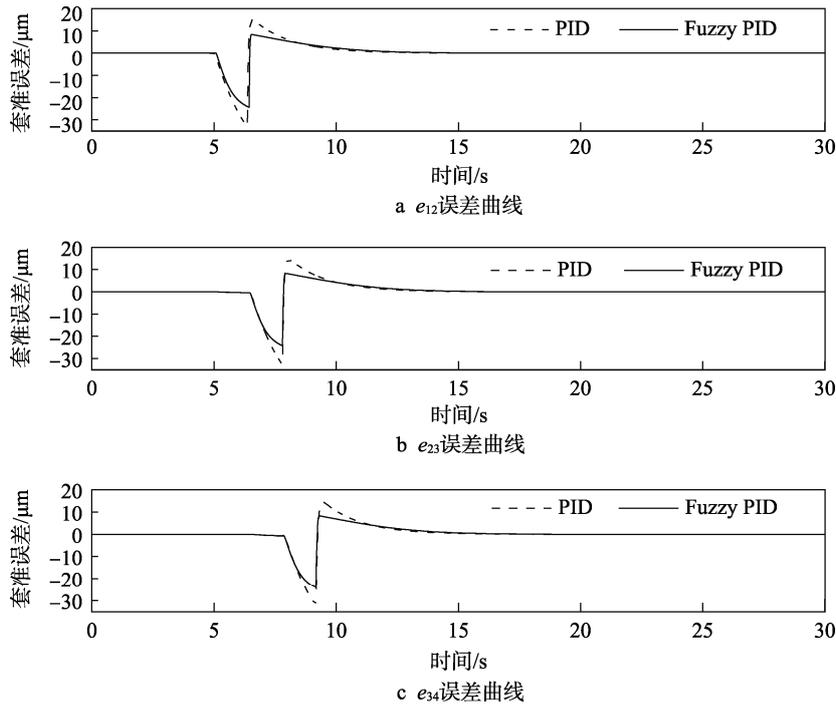


图7 印刷线速度为 400 m/min 时张力干扰下套准系统仿真结果
 Fig.7 Simulation results of register system under tension interference at 400 m/min

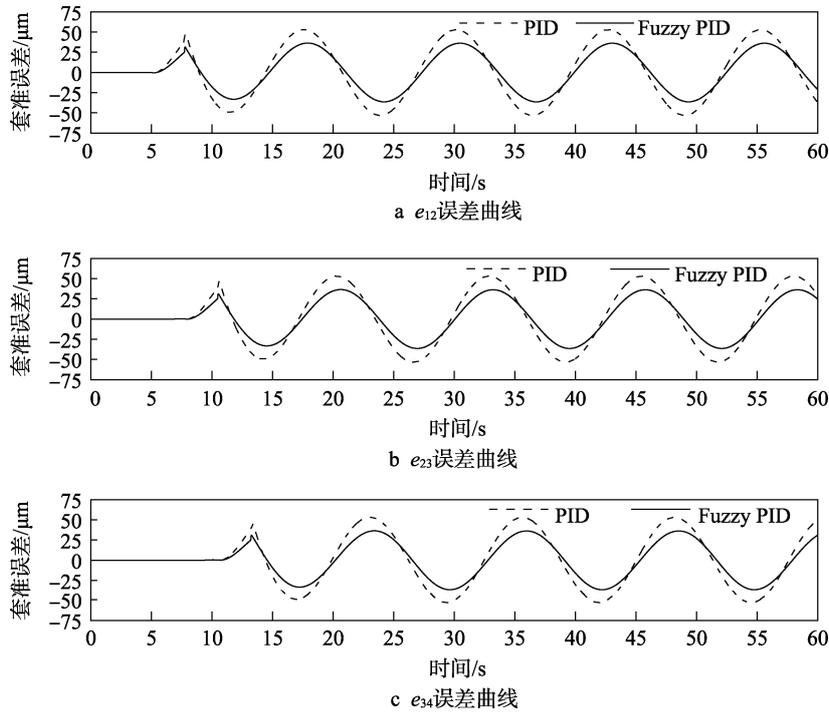


图8 印刷线速度为 200m/min 时速度干扰下套准系统仿真结果
 Fig.8 Simulation results of register system under velocity interference at 200 m/min

仿真结果分析表明,随着 E 减小到原来的 80%,PID 控制、模糊 PID 控制下的套准误差均出现了不同程度的增加,即控制器性能下降。由图 11 可知,当 E 降低 20%后,在 PID 控制下套准误差 e_{12} 则由 33.3 μm 变为了 41.6 μm ,即 PID 控制下 e_{12} 增长比例

约为 25%。由图 12 可见,当 E 降低 20%后,在模糊 PID 控制下套准误差 e_{12} 则由 24.7 μm 变为了 28.9 μm ,即模糊 PID 控制下 e_{12} 增长比例约为 17%。可见,在料带弹性模量降低时,模糊 PID 对于套准误差的控制具有更好的效果。

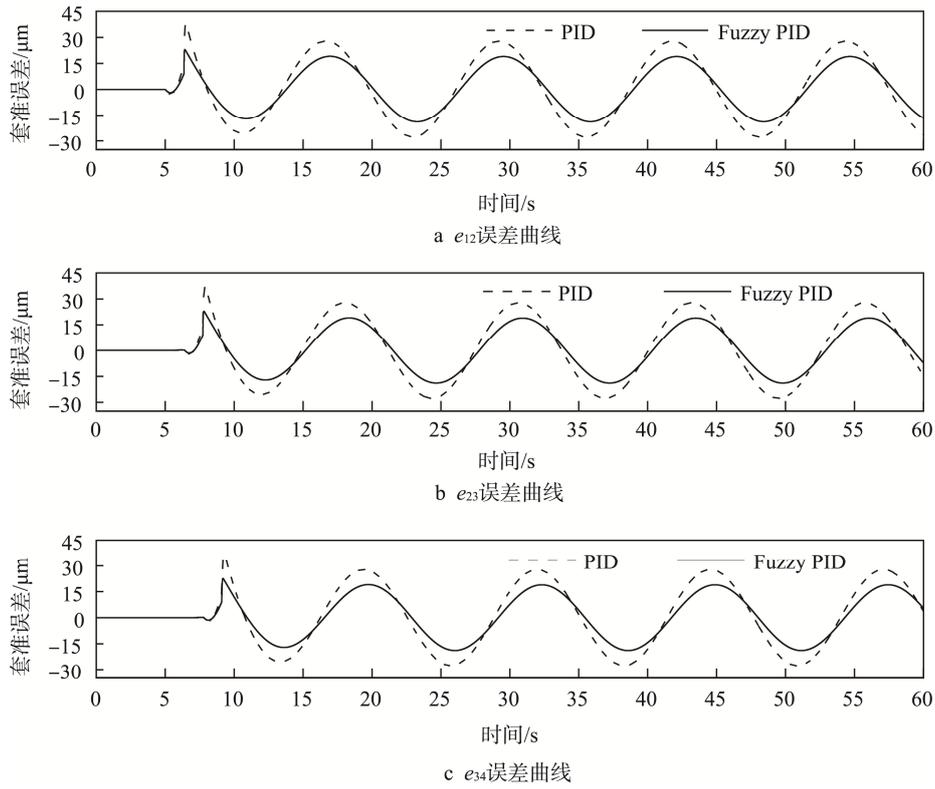


图 9 印刷线速度为 400 m/min 时速度干扰下套准系统仿真结果
Fig.9 Simulation results of register system under velocity interference at 400 m/min

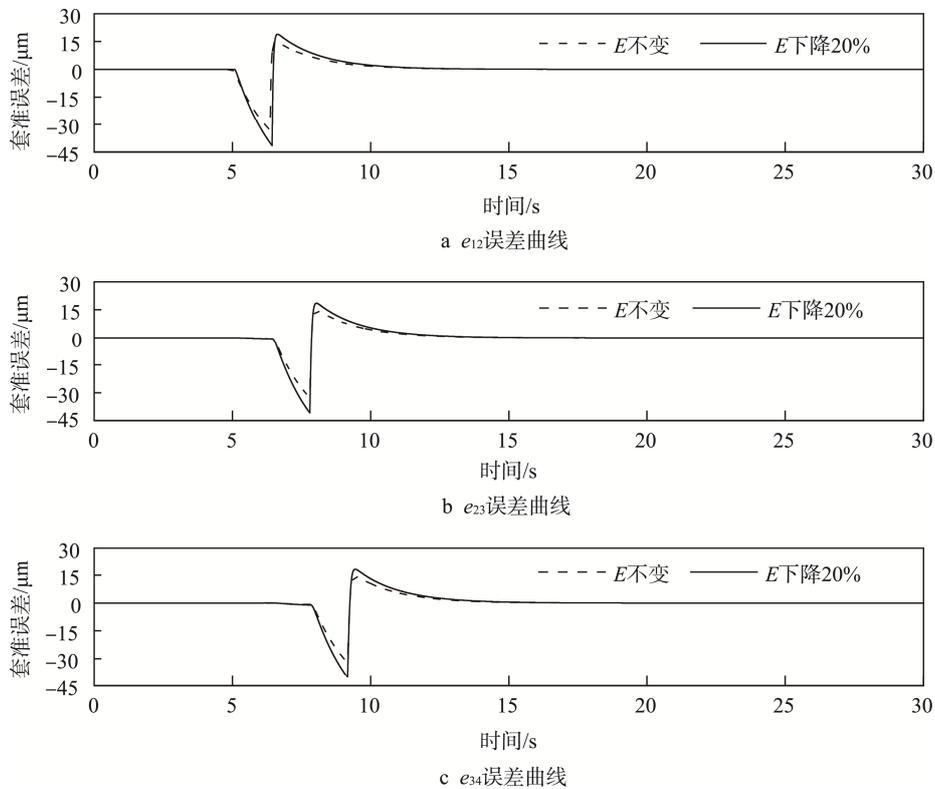
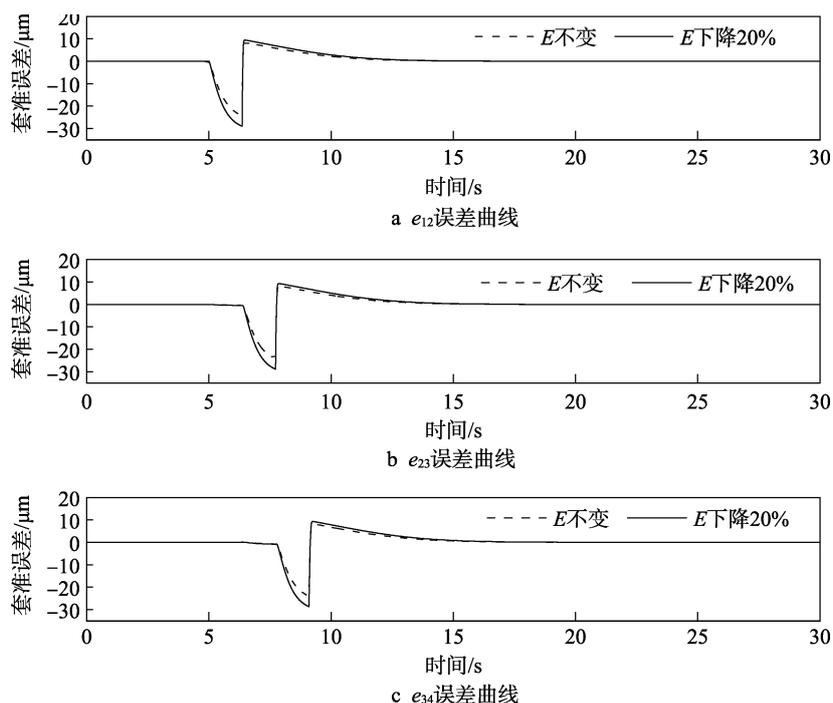


图 10 E 降低 20% 时 PID 控制下套准系统仿真结果
Fig.10 Simulation results of register system under PID control when E is reduced by 20%

图 11 E 降低 20% 时模糊 PID 控制下套准误差仿真结果Fig.11 Simulation results of the register system under fuzzy PID control when the E is reduced by 20%

4 结语

印刷电子器件在制造过程中对凹版装备的多层套准精度和一致性提出了更高的要求,为此,在建立 4 层套准系统的非线性耦合数学模型的基础上,将模糊控制与 PID 控制相融合,提出了一种适合 4 层套准系统特点的模糊 PID 控制策略,实现了 PID 参数的在线自整定,并在 Simulink 中 3 种工况下对所设计的控制器进行了仿真研究。结果表明,在同样的张力干扰下,提出的套准系统模糊 PID 控制比传统 PID 控制中套准精度提高了 40% 以上;在同样的速度干扰下,提出的套准系统模糊 PID 控制比传统 PID 控制中套准精度提高了约 39%;在料带弹性模量降低时,提出的套准系统模糊 PID 控制策略对于套准误差的控制具有更好的效果。

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] SHIN K, NGUYEN H, PARK J, et al. Roll-to-roll Gravure Printing of Thick-film Silver Electrode Micropatterns for Flexible Printed Circuit Board[J]. Journal of Coatings Technology Research, 2017, 14(1): 95—106.
- [3] KIM J, CHAE D, LEE W, et al. Enhanced Performance and Reliability of Organic Thin Film Transistors Through Structural Scaling in Gravure Printing Process[J]. Organic Electronics: Physics, Materials, Applications, 2018, 59: 84—91.
- [4] JEONG H, NOH Y, LEE D. Highly Stable and Sensitive Resistive Flexible Humidity Sensors by Means of Roll-to-roll Printed Electrodes and Flower-like TiO_2 Nanostructures[J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 985—992.
- [5] 刘善慧, 尹秉政, 赵庆海, 等. 印刷电子装备套准系统解耦控制策略[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(3): 297—303.
LIU Shan-hui, YIN Bing-zheng, ZHAO Qing-hai, et al. Decoupling Control Algorithm Design for Register System of Printed Electronic Equipment[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(3): 297—303.
- [6] LEE J, PARK S, SHIN K, JUNG H. Smearing Defects: a Root Cause of Register Measurement Error in Roll-to-roll Additive Manufacturing System[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(9/10/11/12): 3155—3165.
- [7] LI J, MEI X, 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] KIM C, 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.
- [9] KIM C, YOU H, JO J. Register Control of Roll-to-roll Printing System Based on Statistical Approach[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(5): 5.
- [10] YANG M, ZHANG S. Simulation and Research of Register Control System Based on Sliding Mode Variable Structure[C]// The 25th Chinese Control and Decision Conference, Guiyang, China, May 25—27, 2013: 514—519.
- [11] 朱功章. 电子轴凹版印刷系统加速过程建模与控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- ZHU Gong-zhang. Modeling and Control of the Speed-up Phase in Gravure Printing Machine Electronic-shaft System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [12] 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 & Applications, 2014, 31(6): 814—820.
- [13] CHEN Y, ZHENG Y, ZHOU M, et al. Model-based Feedforward Register Control of Roll-to-roll Web Printing Systems[J]. Control Engineering Practice, 2016, 51: 58—68.
- [14] CHEN Z, HE J, ZHENG Y, 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.
- [15] SESHADRI A, PAGILLA P. Decentralized Control of Print Registration in Roll-to-roll Printing Presses[C]// ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference, 2013: 1—10.
- [16] 李健, 刘善慧. 印刷机套准系统耦合建模与控制器设计[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 222—257.
- LI Jian, LIU Shan-hui. Coupling Modelling and Controller Design for Register System of Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 222—257.
- [17] LIU S, YIN B, MA L, et al. A Decoupling Control Strategy for Multilayer Register System in Printed Electronic Equipment[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(6): 14.
- [18] 王世辉. 印刷品套印精度检测及控制技术研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2017.
- WANG Shi-hui. Research on Printing Register Accuracy Detection and Control Technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2017.
- [19] 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): 10.
- [20] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- LIU Jin-kun. Intelligent Control[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2015.