

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.010

凹版印刷机收卷张力系统稳定性控制研究

邵明月¹, 武吉梅^{1,2}, 刘善慧², 王 砚³, 房 凯²

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048; 3. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 机组式凹版印刷机的张力控制技术十分重要,恒定的印刷张力是保证印品套印质量的关键因素,因此控制系统的建模理论和控制技术成为制约机组式凹印机技术发展的重要问题。本文以陕西北人机组式凹版印刷机 FR400ELS 的收卷系统为研究对象,建立了张力系统模型,得到了张力系统在速度模式下的动力学方程。针对张力系统存在非线性、强耦合、强干扰及参数时变等问题,论文基于 PID 控制技术,提出了收卷张力系统在速度模式下的非线性控制策略。通过仿真分析和实验测试研究,证明了 PID 控制器在速度模式下具有很好的鲁棒性和抗干扰能力,能够实现恒定的张力控制。此研究为机组式凹版印刷机张力稳定控制提供了理论依据。

关键词: 收卷张力系统;PID 控制器;鲁棒性**中图分类号:** TS835**文献标志码:** A**文章编号:** 1006-4710(2017)03-0310-06

Stability control of winding tension system of gravure printing machine

SHAO Mingyue¹, WU Jimei^{1,2}, LIU Shanhui², WANG Yan³, FANG Kai²

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The tension control technology of unit-type gravure printing machine is important, and the constant printing tension is the key factor for ensuring the overprinting quality. So, the modeling theory and control technology of control system lead to important problems for which to restrict the technology development of unit-type gravure printing machine. In this paper, the winding tension system of Shaanxi Beiren FR400ELS unit type of gravure printing machine is taken as the research object, and the model of tension system is established. The dynamic equation of the winding tension system in speed mode is deduced. To solve the problem of nonlinear, strong coupling, strong disturbance and time varying of the tension system, the nonlinear control strategy of the winding tension system in the speed mode is put forward based on the PID control technology. It is proven that the PID controller has good robustness and anti-jamming ability in speed mode and can achieve constant tension control by the simulation analysis and experimental test. This study provides a theoretical basis for the tension stability control of the unit-type gravure printing machine.

Key words: winding tension system; PID controller; robustness

凹版印刷机是印刷包装行业的重要设备,印刷材料以卷料的形式输送至印刷,印刷完成后,由收卷

装置将卷料重新卷起,以备后用^[1]。凹版印刷机收卷装置是卷取印刷成品的生产机械设备,是印刷生

收稿日期: 2016-10-26**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11272253,11202159)**作者简介:** 邵明月,女,博士生,研究方向为机械结构动力学。E-mail:shaomingyue_xaut@163.com**通讯作者:** 武吉梅,女,教授,博导,研究方向为机械结构动力学及印刷设备动态特性与仿真。E-mail:wujimei@xaut.edu.cn

产线的最后一道工序。在收卷过程中,料卷卷径的不断变化、料卷不圆、料卷重心与旋转轴中心线不重合等因素都有可能引起卷材张力的变化,由此可能造成走料不稳,印品皱褶、重影,甚至发生卷材断裂等严重问题,影响印品的质量。因此,正确选择收卷张力控制方案至关重要,特别是由于产品质量方面的要求,必须实施控制使得生产中的料膜张力恒定^[2]。

近年,随着现代控制理论的发展,特别是模糊控制、鲁棒控制、人工神经网络等智能技术的出现,为张力系统控制提供了多种途径。Knittel等^[3]针对在工业环境中的卷绕轴、开卷轴转动惯量的变化,提出了一种鲁棒非线性控制的设计方法,完成了二自由度的 H_∞ 控制算法。Chung等^[4]将模糊逻辑控制应用于高速分裂机张力控制,研究表明:模糊控制对张力系统所具有的非线性特性表现出优良的鲁棒性和动态特性。王传香等^[5]介绍了一种带有反向传播训练算法的人工神经网络,此方法有效地减弱了张力控制系统中速度和张力之间的耦合作用。张殿华^[6]运用模糊控制理论提出了板带热连轧机活套的高度和张力控制的多变量解耦控制测量。Li等^[7-9]设计了放卷张力系统神经网络 PID 控制器。肖超^[10]和钟亮^[11]以凹印机张力控制系统为研究对象设计了模糊自适应 PID 控制策略。王瑞超^[12]将模糊神经网络和 PID 控制结合在一起设计了薄膜收卷锥度张力控制系统的模糊神经 PID 控制器。张永芳^[13]应用模糊自抗扰控制研究凹版印刷机张力系统。Song^[14]根据实际平均转子速度和参考张力设计 PID 前馈补偿器,实现解耦控制。

以上的很多算法还只是在张力系统控制的仿真研究阶段,能否真正用于机组式凹印机工业实践还有待进一步验证。因此,寻求一种既具有 PID 控制优点,又依赖少量模型信息就可以实现张力系统解耦控制的控制策略成为机组式凹印机张力系统控制策略研究的迫切需求。本文主要运用动力学理论,建立了收卷机构的数学模型,提出了收卷张力系统在速度工作模式下的非线性控制策略。通过仿真和实验研究,证明 PID 控制器在速度模式下的鲁棒性和抗干扰能力。

1 收卷张力系统建模

图 1 是凹版印刷机收卷装置张力闭环控制系统模型。

根据图 1 中收卷部分的受力关系,建立收卷机构的力矩平衡方程:

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = M_p - \frac{TR}{i} - M_f \quad (1)$$

式中: M_p 为收卷机构的动力力矩; M_f 为阻力力矩; R 为收卷实时卷径; ω 为料卷旋转角速度; J 为单轴等效转动惯量; i 为传动比(对于本课题电机直接驱动料卷轴时 $i=1$); T 为料膜张力。

其中 J 的表达式为^[15]:

$$J = J_m + \frac{J_z}{i^2} = J_m + \frac{J_{n_0} + J_n}{i^2} \quad (2)$$

$$J_n = \int_{R_0}^R d(mR^2) = \int_{R_0}^R R^2 [\rho gb (2\pi dR)] = \frac{1}{2} \pi \rho gb (R^4 - R_0^4) \quad (3)$$

式(2)~(3)中: ρ 为薄膜的密度; g 为重力加速度; b 为薄膜宽度; R_0 为收卷筒的芯轴半径; J_m 为电机轴的转动惯量; J_z 为料卷轴等效转动惯量; J_{n_0} 为料卷空轴转动惯量; J_n 为料卷转动惯量。

又有:

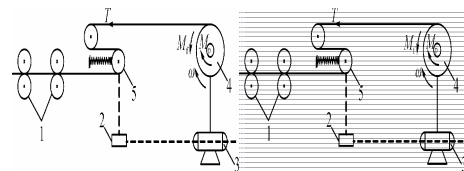
$$\omega = 2\pi n \quad (4)$$

式中 n 为收卷转速。

将式(2)~(4)带入式(1)有:

$$T = \frac{iM_p}{R} - \frac{iM_f}{R} - 2\pi n \frac{2\pi \rho gb R^2}{i} \frac{dR}{dt} - \frac{2\pi i}{R} \frac{dn}{dt} \left[J_m + \frac{J_{n_0} + \frac{1}{2} \pi \rho gb (R^4 - R_0^4)}{i^2} \right] \quad (5)$$

式(5)为收卷张力方程。由式(5)可知,收卷张力 T 与实时卷径 R 以及收卷转速 n 有关,实时卷径通常已知,从而可以通过调节收卷转速来控制张力。



1. 牵引辊; 2. 张力控制器; 3. 收料交流电机; 4. 收料辊; 5. 摆辊

图 1 收卷机构受力模型

Fig. 1 The force model of winding mechanism

摆辊机构主要进行张力检测。令摆辊机构中张力为 $F(t)$, 不考虑导向辊及浮动辊与料带之间的摩擦力,同时忽略浮动辊重力对摆辊动态性能的影响,建立摆辊动力学方程:

$$F(t) = \frac{1}{2d_1} \left[J_1 \frac{d^2\beta(t)}{dt^2} + f_1 \frac{d\beta(t)}{dt} + K_n d_2^2 \beta(t) \right] \quad (6)$$

式中: J_1 为摆臂的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); f_1 为摆辊摩擦阻尼系数 ($\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})$); d_1 和 d_2 为摆臂的力

臂长; K_n 为弹簧的刚度系数; β 为摆臂绕中心旋转的角位移。

2 收卷张力系统控制策略研究

2.1 张力系统控制器设计

在张力系统控制器设计时,不仅要考虑系统参数时变性和控制量耦合等因素的影响,还必须考虑各种干扰因素对系统的影响。因此,所设计的控制器不但要有良好的解耦性能,还必须具有较强的鲁棒性和抗干扰能力。由于 PID 控制器具有结构简单、容易实现、鲁棒性好、适用范围广等优点,许多文献^[9-11]在张力控制系统的控制器设计上都选择了 PID 控制器。在本文的凹印机张力系统输出反馈的闭环控制器设计中,优先考虑的是 PID 控制。

图 2 是在 Simulink 环境中建立的收卷张力系统的 PID 控制仿真框图。

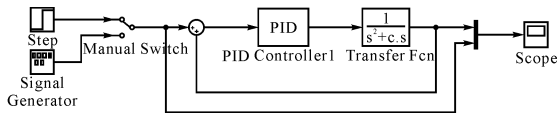


图 2 收卷张力系统的 PID 控制仿真框图
Fig. 2 The PID control simulation diagram of winding tension system

下面将对 PID 控制器进行参数的调节,由于控制对象中具有一个积分器,所以采用齐格勒-尼柯尔斯第二法则。设 $T_i = \infty$ 和 $T_d = 0$,令 PID 控制器的传递函数为:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (7)$$

则得到系统闭环传递函数:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p}{s(s+20) + K_p} \quad (8)$$

由闭环系统的特征方程:

$$s^2 + 20s + K_p = 0 \quad (9)$$

根据临界阻尼比 $\xi = 0.7$ 可以求得,无阻尼自然频率 $\omega_n = 14.286$,增益 $K_p = 0.6K_{cr} = 204.082$,振荡周期 $P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega_n} = 0.44$;根据柯尔斯第二调整法则,确定 T_i 和 T_d 即 $T_i = 0.5P_{cr} = 0.22$, $T_d = 0.125P_{cr} = 0.055$ 。

故 PID 控制器的传递函数为:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = \frac{11.2245(s+9.0909)^2}{s} \quad (10)$$

PID 控制器具有一个位于零点的极点和两个位于 $s = -9.0909$ 的零点,则系统的闭环传递函

数为:

$$G(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} = \frac{11.2245(s+9.0909)^2}{s^3 + 31.2245s^2 + 204.0816s + 927.6428} \quad (11)$$

其中 $G_p(s)$ 为反馈回路传递函数,其表达式为 $G_p(s) = \frac{1}{s^2 + 20s}$ 。

2.2 速度模式 PID 控制器仿真研究

为了验证速度模式下收卷张力系统 PID 控制器的控制性能,在 Simulink 下对所设计的张力系统 PID 控制器进行了仿真研究。仿真采用固定步长的模式,采样周期为 10 ms。PID 控制器参数均是在 $R_1 = 0.05$ m 且 $\omega_{cl} = 200$ r/min 的条件下调整得到,且不随仿真条件的变化而变化。调整好的速度模式下收卷张力系统 PID 控制器参数为 $K_p = 6$; $K_i = 43$, $K_D = 0.1$ 。其它张力系统参数见表 1。

表 1 张力系统参数表
Tab. 1 Tension system parameters table

参数	数值	单位
A	5.0×10^{-6}	m ²
E	2.1×10^9	Pa
K	1.0×10^4	N/m
f_b	0.01	N·m/(rad/s)
d_b	0.128	m
d_{K1}	0.0064	m
R	0.03	m

1) PID 控制器的鲁棒性能

在 $\omega = 200$ r/min 且 R 分别为 0.05 m、0.1 m 和 0.2 m 时,考察 PID 控制器下各段张力对阶跃输入的控制性能,仿真结果见图 3。

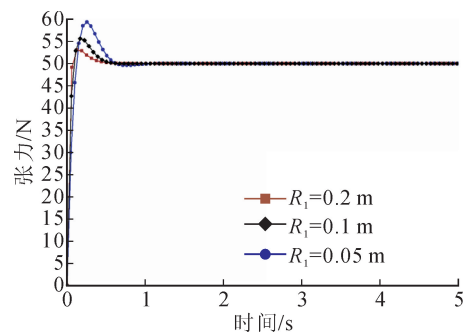


图 3 速度模式下 PID 控制器鲁棒性能仿真曲线
Fig. 3 The simulation curves of robust performance of controller PID in speed mode

从图 3 可以看出:随着 R 的减小,速度模式下收卷张力控制性能都发生了不同程度的变化。例如

在 R 为 0.2 m 和 0.05 m 时, T 的超调量分别为 6.4% 和 18.7%, 且 T 到达稳态值的时间分别为 0.7 s 和 1 s。

2) PID 控制器的抗干扰性能

在 $\omega=200$ r/min 且 R_1 分别为 0.2 m、0.1 m 和 0.05 m 时, 收卷段张力达到稳定值 50 N 后的 1 s 和 2 s 分别受到 10 N 和 2 N 的阶跃干扰。在 PID 控制下的收卷张力曲线见图 4。由图 4 可以得出: 在 PID 控制中, 收卷张力产生了波动, 例如在 R_1 为 0.05 m 时, T 的波动量为 4.3%, 波动持续时间为 0.6 s, 收卷张力误差随 R 的减小而变化。

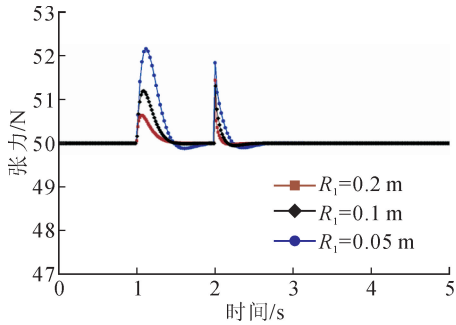


图 4 速度模式下 PID 控制器抗干扰性能仿真曲线
Fig. 4 The simulation curves of anti jamming performance of PID controller in speed mode

3 收卷张力系统控制器实验研究

在陕西北人的 FR400ELS 机组式凹版印刷机上进行收卷部分张力实验测试, 通过实验研究在速度模式下, 对实验的结论与理论分析的结论进行比较, 验证理论分析的正确性。

3.1 实验设备及测试仪器

实验设备为 FR400ELS 机组式凹版印刷机。实验仪器为阻值 5 k Ω 的精密电阻式角度传感器(见图 5), 其生产厂家为上海新跃仪表厂, 型号为 WDD35D-4。凹印机收卷实验现场图见图 6。



图 5 印刷机收卷摆辊角度传感器
Fig. 5 Angle sensor for winding roller of printing press

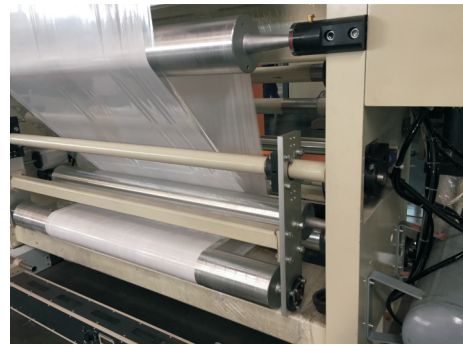


图 6 凹印机收卷部分实验现场
Fig. 6 The test site of winding part of gravure printing machine

3.2 实验数据分析

1) PID 控制器的鲁棒性能

在 $\omega=200$ r/min 且 R_1 分别为 0.05 m、0.1 m、0.20 m 时, 令收卷张力由 80 N 阶跃上升到 120 N, 实验采用采集精度为 10 ms, 则在 PID 控制下的实验结果见图 7。

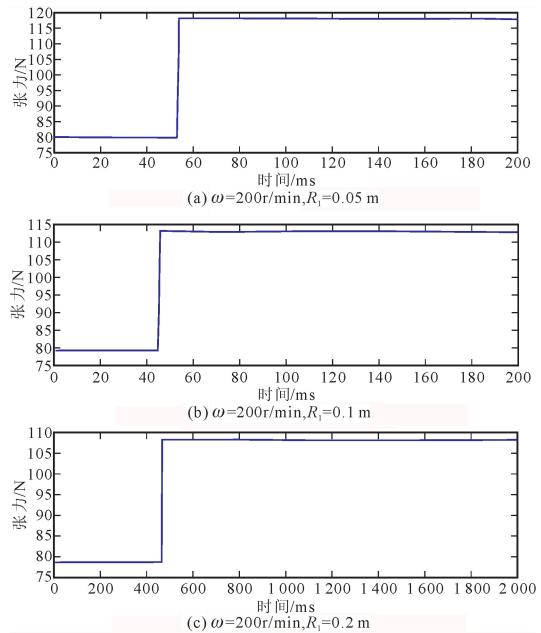


图 7 速度模式下 PID 控制器鲁棒性能实验曲线
Fig. 7 The test curves of robust performance controller for PID in speed mode

从图 7 可以看出: 在速度模式下收卷张力实验结果和仿真结果基本吻合。由于实验条件原因在图中并不能看到超调现象。卷径 $R_1=0.05$ m 时, 在 PID 控制下, 张力稳定的实验值为 119.35 N; 卷径 $R_1=0.1$ m 时, 张力稳定的实验值为 113.96 N; 卷径 $R_1=0.2$ m 时, 张力稳定的实验值为 109.07 N。由此可知收卷速度相同时, PID 控制效果理想, 在最终达到稳定情况下张力基本恒定。

2) PID控制器的稳态性能

在稳态运行时,各段张力的波动范围是衡量张力控制器的重要指标。因此,令各段张力在 $R_1 = 0.05\text{ m}$ 且 $\omega = 100\text{ r/min}$ 、 $R = 0.1\text{ m}$ 且 $\omega = 100\text{ r/min}$ 和 $R = 0.1\text{ m}$ 且 $\omega = 200\text{ r/min}$ 三种不同条件下稳定运行 10 s ,机器正常运行设定张力值为 120 N ,其实验数据见表2。

表2 稳定运行时PID控制下的收卷张力实验测试值
Tab.2 The experimental test values of winding tension under PID control in steady-state operation

时间 t/s	三种条件下的张力值/ N		
	$R=0.05\text{ m}$ $\omega=100\text{ r/min}$	$R=0.1\text{ m}$ $\omega=100\text{ r/min}$	$R=0.1\text{ m}$ $\omega=200\text{ r/min}$
1	119.900 116	117.995 987	113.408 981
2	119.800 430	117.944 847	113.271 910
3	119.700 737	117.801 346	113.106 134
4	119.630 168	117.056 196	113.025 009
5	119.400 708	117.004 312	112.906 134
6	119.100 641	116.791 226	112.799 626
7	118.877 960	116.643 190	112.583 029
8	118.400 581	116.563 291	112.383 694
9	118.934 122	116.446 512	112.099 519
10	117.914 613	116.429 492	111.854 659
稳定值	119.156 039	117.067 640	112.743 870
张力 稳态误差	1.58%	1.34%	1.39%

张力稳态误差=(最大值-最小值)/稳定值,由表2可以得出:在同样的实验条件下,PID控制下的收卷张力稳态误差会随着卷径大小和收卷速度大小的变化而变化,例如当 $\omega = 100\text{ r/min}$ 时,误差会随着卷径的变大而变小;当 $R = 0.1\text{ m}$ 时误差会随着速度的增大而增大。由表2中的数据可知,同一状态下,张力波动很微小,因此PID控制具有较好的抗干扰性能。

4 结 论

本文根据机组式凹版印刷机收卷张力系统的原理,建立了张力系统模型,并对收卷张力系统的控制问题进行了仿真和实验研究。通过仿真分析和实验研究,证明了PID控制器在速度模式下具有很好的鲁棒性和抗干扰能力,能够实现恒定的张力控制。论文所建立的张力系统模型以及提出的收卷张力系统PID控制策略,为机组式凹版印刷机张力稳定控制提供了理论依据。

1) 实验结果表明,在速度模式下的收卷张力控制效果与仿真结果一致。由于实验条件原因在图中并不能看到超调现象,在PID控制下,收卷速度相

同时,在最终达到稳定情况下张力恒定。卷径 R_1 为 0.05 m , 0.1 m , 0.2 m 时,张力稳定的实验值分别为 119.35 N , 113.96 N , 109.07 N 。通过仿真和实验可以得出:PID控制效果理想,且PID控制具有较好的鲁棒性。

2) 在速度模式下,收卷张力系统稳定工作时,PID控制下的收卷张力稳态误差会随着卷径大小和收卷速度大小的变化而变化:当 $\omega = 100\text{ r/min}$ 时,卷径越大,误差越小;当 $R = 0.1\text{ m}$ 时,速度越大,误差越大。并且同一条件下,每组实验的张力稳定值基本一致,波动小,说明PID控制的稳定性好。

参考文献:

- [1] 胡更生,李小东,龚修端.凹版印刷技术问答[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 张海燕,郑君君,杨蕾,等.卷筒纸开卷张力控制系统[J].轻工机械,2009,27(5):52-55.
ZHANG Haiyan, ZHENG Junjun, YANG Lei, et al. Web tension control system for paper roller[J]. Light Industry Machinery, 2009, 27(5): 52-55.
- [3] KNITTEL D, LAROCHE E, GIGAN D, et al. Tension control for winding systems with two-degrees-of-freedom H_∞ controller[J]. IEEE Transactions Industry Applications, 2003, 39(1): 113-120.
- [4] CHUNG B, LEE Sung, CHO C. Active tension control of high speed splitting machines using fuzzy PID[C]// IEEE International Conference on Mechatronics, 2005: 72-77.
- [5] 王传香,付云中,王永章,等.基于神经网络的张力控制系统[J].中国机械工程,2001,12(8):873-875.
WANG Chuanxiang, FU Yunzhong, WANG Yongzhang, et al. The Tension control system based on neural network[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(8): 873-875.
- [6] 张殿华,郑芳,王国栋.板带热连轧机活套高度和张力系统的解耦控制[J].控制与决策,2000,15(2):158-160.
ZHANG Dianhua, ZHENG Fang, WANG Guodong. Strip tandem hot rolling mill loopers' height and tension decoupling control[J]. Control and Decision, 2000, 15(2): 158-160.
- [7] LI JIAN, MEI Xuesong, TAO Tao, et al. Design tension controller of unwinding system based on BP neural network[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(6-7): 2222-2226.
- [8] 李健,梅雪松,陶涛,等.放卷张力系统 H_∞ 鲁棒控制器的设计[J].西安交通大学学报,2012,46(1):86-90.
LI JIAN, MEI Xuesong, TAO Tao, et al. H_∞ robust control design for unwinding tension system[J]. Jour-

- nal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(1): 86-90.
- [9] 刘善慧,梅雪松,杜喆,等. 放卷张力系统解耦控制器的设计 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(9): 55-59.
LIU Shanhui, MEI Xuesong, DU Zhe, et al. Decoupling controller design for unwinding tension system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(9): 55-59.
- [10] 肖超. 凹版印刷机张力控制系统的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
XIAO Chao. Tension control system of gravure printing machine [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [11] 钟亮,包能胜,于文平. 模糊自适应 PID 控制在凹版印刷机收卷张力控制中的应用 [J]. 轻工机械, 2012, 30(4): 65-68.
ZHONG Liang, BAO Nengsheng, YU Wenping. Application of fuzzy self-adaptive PID control for winding tension process control in gravure printing machine [J]. Light Industry Machinery, 2012, 30(4): 65-68.
- [12] 王瑞超,孙宇,胥小勇. 基于模糊神经网络的薄膜收卷锥度张力控制系统 [J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(3): 316-320.
WANG Ruichao, SUN Yu, XU Xiaoyong. Research of cone tension control system in film winding based on fuzzy-neural network [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2013, 40(3): 316-320.
- [13] 张永芳,畅亚利,高阳阳,等. 模糊自抗扰控制在凹印机放卷张力中的应用 [J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 144-149.
ZHANG Yongfang, CHANG Yali, GAO Yangyang, et al. Fuzzy ADRC applied in gravure press tension control system [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(2): 144-149.
- [14] SONG S, SUL S. A new tension control for continuous strip processing line [J]. IEEC Transactions on Industry Applications, 2000, 36(2): 633-639.
- [15] 张海燕,徐金苓. 凹印机变频收卷张力控制系统建模研究 [J]. 轻工机械, 2010, 28(4): 60-63.
ZHANG Haiyan, XU Jinling. Research on modeling frequency conversion winding tension control system in gravure press [J]. Light Industry Machinery, 2010, 28(4): 60-63.
- (责任编辑 王绪迪)

(上接第 289 页)

- [28] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Look-up table (LUT) method for inverse halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1566-1578.
- [29] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Template selection for LUT inverse halftoning and application to color halftones [C]//2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (2000 ICASSP), 2000: 2290-2293.
- [30] CHUNG K L, WU S T. Inverse halftoning algorithm using edge-based lookup table approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(10): 1583-1589.
- [31] HUANG Y H, CHUNG K L, DAI B R. Improved inverse halftoning using vector and texture-lookup table-based learning approach [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(12): 15573-15581.
- [32] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Tree-structured method for LUT inverse halftoning and for image halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6): 644-655.
- [33] 孔月萍,曾平,何波,等. LUT 与 Elman 网络相结合的图像逆半调算法 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(11): 1988-1991.
KONG Yueping, ZENG Ping, HE Bo, et al. Inverse halftoning algorithm based on look up table and Elman network [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(11): 1988-1991.
- [34] JIMENEZ F P, ROLDAN L R, MIYATAKE M N, et al. Inverse halftoning using a multilayer perceptron neural network [C]//2012 22nd International Conference on Electrical Communications and Computers, 2012: 202-206.
- [35] SON C H. Inverse halftoning based on sparse representation [J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2352-2354.
- [36] SON C H, CHOO H. Local learned dictionaries optimized to edge orientation for inverse halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(6): 2542-2556.
- [37] MESE M, VAIDYANATHAN P P. More example images [DB/OL]. <http://www.systems.caltech.edu/mese/halftone/>, 2002, 11.
- [38] WANG Zhou, LU Ligang, BOVIK A C. Video quality assessment based on structural distortion measurement [J]. Signal Processing: Image Communication, 2004, 19(2): 121-132.
- (责任编辑 王绪迪)