

DOI: 10.7652/xjtuxb201812021

凹版印刷基材烘干温度对张力的影响机理分析

何奎^{1,3}, 陶涛¹, 刘善慧²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安理工大学印刷包装与数字媒体学院, 710048, 西安;
3. 河南科技大学机电工程学院, 471003, 河南洛阳)

摘要: 为了提高凹版印刷中料带张力的控制精度,需要对凹版印刷中的张力模型进行深入研究,建立更加精确的张力模型,重点研究电子轴凹版印刷烘干温度对印刷部分张力系统的影响。首先根据质量守恒定律建立了包含温度因素的印刷部分张力模型,该数学模型首次考虑了干燥系统造成的料带温度不均匀分布状态;然后从系统输入和输出关系出发,采用 MATLAB/Simulink 软件对张力模型进行数值仿真,并在电子轴凹版印刷设备上实验研究,验证张力模型和数值仿真的正确性;最后分析了烘干温度对张力系统特性的影响规律。研究表明:烘干温度对张力系统稳态性能没有影响,而对系统的瞬态特性影响显著,瞬态过渡过程时间随着烘干温度增高而增长;在电子轴凹版印刷机工作条件下,烘干温度为 60~80℃ 时,瞬态过渡过程时间相比于无干燥系统增长了 41%~82%。该研究成果为电子轴凹版印刷张力系统和套准系统的理论研究提供了重要基础,有利于提高电子轴凹版印刷产品质量。

关键词: 电子轴;凹版印刷;烘干温度;料带张力

中图分类号: TS835 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)12-0145-07

Analysis for Effects of Drying Temperature on Web Tension in Gravure Printing Machine

HE Kui^{1,3}, TAO Tao¹, LIU Shanhui²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
3. School of Mechanical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: To improve the control accuracy of web tension in gravure printing, it is necessary to construct a more accurate mathematical tension model, where the effects of the drying temperature on web tension in shaft-less drive gravure printing process are considered. The tension model of printing section including temperature is derived following the law of mass conservation, in which the non-uniform distribution of the web temperature caused by the drying system is considered. Then, simulations with MATLAB/Simulink and experiments are carried out, and the effects of the drying temperature on the characteristics of web tension are obtained. The results show that the drying temperature exerts significant influences on transient web tension in printing section rather than on steady responses. In the transient responses, the settling time increases with the rising drying temperature. As the drying temperature is 60-80℃, the settling time in transient responses is about 41%-82% more than that without drying system

under normal working condition.

Keywords: shaft-less drive; gravure printing; drying temperature; web tension

社会发展对印刷品的质量要求越来越高,同时,电子轴技术的发展为印刷质量的提高提供了基础。凹版印刷是一种重要的印刷工艺,以其优秀的印刷品质而广泛应用。凹版印刷基材即印刷行业俗称的承印物料带。在电子轴凹版印刷中,料带张力控制精度是一个重要的技术指标,是印刷质量的基础。为了提高张力控制精度,需要对张力系统模型进行深入的研究。

电子轴凹版印刷的张力系统主要分为3个部分:放卷、印刷和收卷。不同部分对料带张力有不同的要求,很多学者把研究重点放在放卷和收卷部分。在这些研究中,首先建立放卷或收卷的张力模型,然后采用不同控制算法控制料带张力。Li等针对放卷系统分别设计了基于神经网络的张力控制器和 H_∞ 鲁棒控制器^[1-2]。Liu等采用自抗扰解耦控制算法控制放卷系统张力^[3-4]。Gassmann等在料带处理系统的放卷部分中采用了固定阶 H_∞ 张力控制算法^[5]。Yang等为料带张力控制系统设计了模糊自适应PID控制器^[6]。Park在收卷系统张力控制中也采用了自适应增益PID控制方法^[7]。Abjadi等在料带收卷系统中采用滑模控制方法控制收卷张力^[8]。尹周平课题组对放卷部分的非连续开卷张力控制进行研究^[9]。张永芳等在凹版印刷机放卷张力控制中采用了模糊自抗扰控制方法^[10]。Wu课题组对放卷张力系统的建模方法进行了研究^[11]。这些研究较好地解决了放卷和收卷部分的张力稳定性问题,使得印刷部分的张力稳定性也得到了一定的提高,但印刷部分的张力还与版辊运动等因素有关,印刷部分张力稳定性问题没有得到根本解决。

在印刷部分,张力系统和套准系统耦合在一起。一些学者对套准模型及其控制算法进行研究,但主要都是基于传统的R2R(Roll-to-Roll)张力模型,并没有考虑凹版印刷工艺中的一个极其重要的环节即烘干。Martz等对印刷部分的基材进行了有限元建模,以便于进一步实现解耦控制^[12-13]。Tran等采用回推控制方法对多跨度料带传动系统进行控制^[14]。Chen等印刷套准控制中采用了优化的前馈PD解耦控制方法^[15-16]。Liu等针对印刷部分进行了套准建模和前馈自抗扰控制器设计^[17-18]。刘成等对印刷部分的同步控制进行了研究^[19]。

在电子轴凹版印刷设备的印刷部分,每一个印

刷单元后面都设有烘箱,用于烘干料带上的油墨。烘箱内部的料带温度远高于烘箱外部的料带温度。料带材料为双向拉伸聚丙烯(BOPP)塑料薄膜时,烘干温度一般在60~80℃。烘箱外部温度,即生产车间的室温,一般在20℃左右。干燥系统会对料带张力特性产生影响,进而影响张力控制精度。塑料薄膜材料对温度比较敏感,受温度的影响主要体现在两个方面:杨氏弹性模量和热膨胀系数。实际上,烘干温度对张力系统和套准系统的影响是非常显著的,已经开始引起一部分学者的注意。Pagilla团队建立了数学模型用于确定运动料的温度分布状态^[20-21],但缺乏干燥系统对张力影响的相关研究。He等在印刷张力建模中开始考虑干燥系统,但未分析干燥系统对基材张力的影响^[22]。

目前,在电子轴凹版印刷系统中,仍然缺乏干燥系统对印刷部分料带张力影响的相关研究。随着印刷质量要求的提高,烘干温度对张力的影响将无法忽视。因此,本文首先建立了包含干燥系统的印刷部分张力模型,然后通过模型仿真分析烘干温度对张力的影响规律。

1 包含烘干的印刷系统张力建模

图1所示为电子轴传动凹版印刷机系统组成示意图,主要分3部分:放卷、印刷和收卷。放卷部分采用两段张力结构,分别设置一个摆辊机构和张力传感器,摆辊机构用于抑制张力波动并测量料带张力,张力传感器仅用于测量料带张力。收卷部分与放卷部分类似。多色印刷部分的每一个料带区间设置一个张力传感器,用于测量料带张力。从第2色印刷单元开始,每个印刷单元后设置一个光电眼,用于检测套准误差。在每一色印刷单元之后设置一个烘箱,用于烘干印刷油墨。

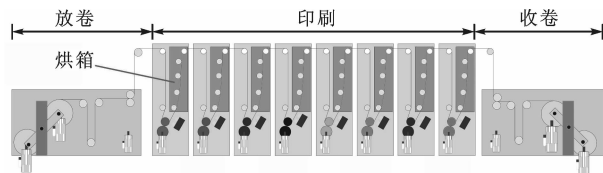
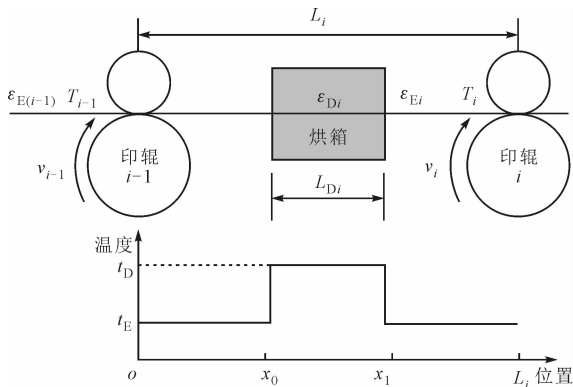


图1 电子轴传动凹版印刷机系统组成

在印刷部分,每个印刷单元都由独立的伺服电机驱动,即所谓的电子轴传动或无轴传动,取代传统的机械长轴结构。该变化使得机械结构复杂程度降

低,但对控制系统提出了较高的要求。

图 2 所示为两色印刷子系统及料带温度分布示意图,该子系统由两个印刷单元、料带以及烘箱组成,是多色印刷系统的基本张力单元。在该料带张力子系统中, T_{i-1} 、 v_{i-1} 和 v_i 分别为输入量, T_i 为输出量,其他参数可看作是系统结构参数,故该系统是一个典型的多输入-单输出系统。



T_{i-1} 为前一区间的料带张力; T_i 为当前区间的料带张力; v_{i-1} 和 v_i 分别为两个印刷版辊的线速度; L_i 为当前区间内的料带长度; L_{Di} 为当前区间烘箱内的料带长度; $\epsilon_{E(i-1)}$ 为前一区间烘箱外部的料带应变; ϵ_{Ei} 为当前区间烘箱外部的料带应变; ϵ_{Di} 为当前区间烘箱内部料带的料带应变

图 2 两色印刷子系统及料带温度分布示意图

由于烘箱的存在,区间内料带所处的环境温度将呈不均匀分布状态。由于料带非常薄,一般为 20~100 μm ,传热过程非常短暂,时间近乎于 0。因此,可以认为烘箱内部料带温度等于烘箱的烘干温度,烘箱外部的料带温度等于车间环境温度。故料带的温度分布可近似为如图 2 所示的状态。

在当前区间,单位时间内料带质量的变化量等于进入该区间的料带质量与流出该区间的料带质量之差,即质量守恒,用公式表示为

$$\Delta m_i = m_{i,\text{in}} - m_{i,\text{out}} \quad (1)$$

将质量、密度和体积的关系表达式 $m = \rho V$ 代入式(1),得到详细的质量守恒公式

$$\frac{d}{dt} \left[\int_0^{L_i} \rho_i(x,t) A_i(x,t) dx \right] = \rho_{i-1}(L_{i-1},t) A_{i-1}(L_{i-1},t) v_{i-1}(t) - \rho_i(L_i,t) A_i(L_i,t) v_i(t) \quad (2)$$

式中: ρ 为料带密度; A 为料带横截面积; x 为沿料带运动方向区间内的位置。

假设料带材料是纯弹性体,则料带微单元的质量不随拉伸状态改变,即

$$\rho A dx = \rho_u A_u dx_u \quad (3)$$

式中:下标 u 表示料带的未拉伸状态。根据应变定义,式(3)可以写成

$$\frac{\rho A}{\rho_u A_u} = \frac{dx_u}{dx} = \frac{1}{1 + \epsilon} \quad (4)$$

式中: ϵ 是料带在运动方向的应变。结合式(2)和式(4),可以得到

$$\frac{d}{dt} \left[\int_0^{L_i} \frac{\rho_{ui}(x,t) A_{ui}(x,t)}{1 + \epsilon_i(x,t)} dx \right] = \frac{\rho_{u(i-1)}(L_{i-1},t) A_{u(i-1)}(L_{i-1},t) v_{i-1}(t)}{1 + \epsilon_{i-1}(L_{i-1},t)} - \frac{\rho_{ui}(L_i,t) A_{ui}(L_i,t) v_i(t)}{1 + \epsilon_i(L_i,t)} \quad (5)$$

处于未拉伸状态的料带不随位置和时间而变化,故

$$\rho_{ui}(x,t) A_{ui}(x,t) = \rho_{u(i-1)}(L_{i-1},t) A_{u(i-1)}(L_{i-1},t) = \rho_{ui}(L_i,t) A_{ui}(L_i,t) \quad (6)$$

根据式(6),式(5)可以写成

$$\frac{d}{dt} \left[\int_0^{L_i} \frac{1}{1 + \epsilon_i(x,t)} dx \right] = \frac{v_{i-1}(t)}{1 + \epsilon_{i-1}(L_{i-1},t)} - \frac{v_i(t)}{1 + \epsilon_i(L_i,t)} \quad (7)$$

料带温度在区间内为不均匀分布状态,结合图 2 的料带温度分布状态,对积分部分进行计算

$$\int_0^{L_i} \frac{1}{1 + \epsilon_i(x,t)} dx = \int_0^{x_0} \frac{1}{1 + \epsilon_i(x,t)} dx + \int_{x_0}^{x_1} \frac{1}{1 + \epsilon_i(x,t)} dx + \int_{x_1}^{L_i} \frac{1}{1 + \epsilon_i(x,t)} dx \quad (8)$$

在烘箱内部的料带应变处处相同,即 $\epsilon_i(x,t) = \epsilon_{Di}(t)$ 。同理,烘箱外部的料带应变 $\epsilon_i(x,t) = \epsilon_{Ei}(t)$,计算式(8)得到

$$\int_0^{L_i} \frac{1}{1 + \epsilon_i(x,t)} dx = \frac{L_i(t) - L_{Di}(t)}{1 + \epsilon_{Ei}(t)} + \frac{L_{Di}(t)}{1 + \epsilon_{Di}(t)} \quad (9)$$

式中: $\epsilon_{i-1}(L_{i-1},t)$ 和 $\epsilon_i(L_i,t)$ 均为辊子位置的料带应变,处于烘箱外部,所以

$$\epsilon_{i-1}(L_{i-1},t) = \epsilon_{E(i-1)}(t) \quad (10)$$

$$\epsilon_i(L_i,t) = \epsilon_{Ei}(t) \quad (11)$$

结合式(9)~式(11),式(7)可化简为

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{L_i(t) - L_{Di}(t)}{1 + \epsilon_{Ei}(t)} + \frac{L_{Di}(t)}{1 + \epsilon_{Di}(t)} \right] = \frac{v_{i-1}(t)}{1 + \epsilon_{E(i-1)}(t)} - \frac{v_i(t)}{1 + \epsilon_{Ei}(t)} \quad (12)$$

由于应变 ϵ 非常小,故

$$\frac{1}{1 + \epsilon} \approx 1 - \epsilon \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),得到

$$\frac{d}{dt}\{[L_i(t) - L_{Di}(t)][1 - \epsilon_{Ei}(t)] + L_{Di}(t)[1 - \epsilon_{Di}(t)]\} = [1 - \epsilon_{E(i-1)}(t)]v_{i-1}(t) - [1 - \epsilon_{Ei}(t)]v_i(t) \tag{14}$$

机械结构和料带的路径是固定不变的,故可忽略料带长度 L_i 和 L_{Di} 的变化,则式(14)可以写成

$$-(L_i - L_{Di}) \frac{d}{dt}[\epsilon_{Ei}(t)] - L_{Di} \frac{d}{dt}[\epsilon_{Di}(t)] = [1 - \epsilon_{E(i-1)}(t)]v_{i-1}(t) - [1 - \epsilon_{Ei}(t)]v_i(t) \tag{15}$$

温度从两个方面对料带材料产生影响:材料的弹性模量和热膨胀系数。料带在区间内移动时存在膨胀和收缩现象,但对于整个料带区间来说,温度分布状态是固定的,由此引起的热应变也是个常数。热应变可以看作是一个结构参数,在系统初始化的时候可进行补偿,由温度引起的热应变不会对料带张力产生影响,因此可以认为料带张力只与料带的弹性应变有关。根据胡克定律 $T=AE\epsilon$,可以得到

$$-\frac{L_i - L_{Di}}{A_{Ei}E_{Ei}} \frac{dT_i(t)}{dt} - \frac{L_{Di}}{A_{Di}E_{Di}} \frac{dT_i(t)}{dt} = \left[1 - \frac{T_{i-1}(t)}{A_{E(i-1)}E_{E(i-1)}}\right]v_{i-1}(t) - \left[1 - \frac{T_i(t)}{A_{Ei}E_{Ei}}\right]v_i(t) \tag{16}$$

式中: E_E 是车间环境温度下的杨氏弹性模量; E_D 是烘干温度下的杨氏弹性模量。由于车间环境温度处处相等,则 $E_E = E_{E(i-1)} = E_{Ei}$ 。假设所有烘箱的烘干温度相同,则 $E_D = E_{D(i-1)} = E_{Di}$ 。忽略料带横截面积的变化,即 $A = A_{Di} = A_{E(i-1)} = A_{Ei}$,则式(16)可以表示为

$$-\frac{L_i - L_{Di}}{AE_E} \frac{dT_i(t)}{dt} - \frac{L_{Di}}{AE_D} \frac{dT_i(t)}{dt} = \left[1 - \frac{T_{i-1}(t)}{AE_E}\right]v_{i-1}(t) - \left[1 - \frac{T_i(t)}{AE_E}\right]v_i(t) \tag{17}$$

进而简化为

$$\left[L_i + L_{Di} \left(\frac{E_E}{E_D} - 1\right)\right] \frac{dT_i(t)}{dt} = [AE_E - T_i(t)]v_i(t) - [AE_E - T_{i-1}(t)]v_{i-1}(t) \tag{18}$$

式(18)即为电子轴传动凹印机印刷张力系统的数学模型,其中包含了干燥系统的影响。从数学模型可以看出,干燥系统主要通过两个方面对料带张力产生影响,即烘干温度下的杨氏弹性模量 E_D 和烘箱内的料带长度 L_{Di} 。烘箱内的料带长度 L_{Di} 属于结构参数,在系统运行中是常数,因此本文不做深

入研究。烘干温度对料带张力特性的影响是本文的研究重点。

2 烘干温度对张力的影响

为了进一步分析电子轴凹版印刷系统中烘干温度对印刷段张力的影响,利用 MATLAB/Simulink 对数学模型进行数值仿真分析,并在电子轴凹版印刷实验装置上进行实验验证。

图 3 所示为电子轴凹版印刷实验装置,包括放卷、印刷和收卷 3 个部分。印刷部分的每个色组都由独立伺服电机 YASKAWA SGMGH-44 驱动,通过伺服电机上的编码器信息获得印辊速度,通过张力传感器 MITSUBISHI LX-030TD 获取料带张力信号,并进一步由张力放大器 MITSUBISHI LM-10TA 进行放大处理。控制系统采用的多轴运动控制器 GOOGOLTECH T8VME(固高科技(深圳)有限公司)。料带材料为 BOPP。为了验证模型,实验装置采用开环控制系统,对区间的料带张力不进行控制。



图 3 电子轴凹版印刷实验装置

在图 2 中,令 $i=2$,则印刷张力系统的数学模型可以写成

$$\left[L_2 + L_{D2} \left(\frac{E_E}{E_D} - 1\right)\right] \frac{dT_2(t)}{dt} = [AE_E - T_2(t)]v_2(t) - [AE_E - T_1(t)]v_1(t) \tag{19}$$

仿真所用的设备机械参数与实际电子轴凹版印刷机相同,如表 1 所示。

表 1 电子轴凹版印刷机械参数

参数	数值
区间料带总长度 L_2/m	9.1
烘箱内料带长度 L_{D2}/m	3.5
料带横截面积 A/m^2	2.5×10^{-5}

车间环境温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,烘箱的烘干温度通常在 $60\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 。BOPP 塑料薄膜的杨氏弹性模量在 20、

60 和 80 ℃时分别为 2.24、1.04 和 0.69 GPa。运行参数如下:前一区间的料带张力稳态值 $T_1^*=100$ N,印刷速度的稳态值 $v_1^*=v_2^*=100$ m/min。根据系统输入输出关系,分以下 3 种情况进行分析。

2.1 输入为 $T_1(t)$ 时的张力阶跃响应

前一区间的料带张力 $T_1(t)$ 产生一个幅值为 10 N 的阶跃信号,当前区间的料带张力 $T_2(t)$ 在不同烘干温度条件下的阶跃响应仿真和实验结果如图 4 所示。其中, $t_D=20$ ℃表示烘干温度与室温相同,即无干燥系统时的响应。 $t_D=60$ ℃和 $t_D=80$ ℃表示两个不同的烘干温度时系统的阶跃响应。从图 4 可以看出:在输入为 $T_1(t)$ 时,不同烘干温度下 $T_2(t)$ 的阶跃响应都表现为正向阶跃输出;干燥系统的存在对系统特性有显著的影响;烘干温度只影响瞬态响应部分,不影响稳态响应。

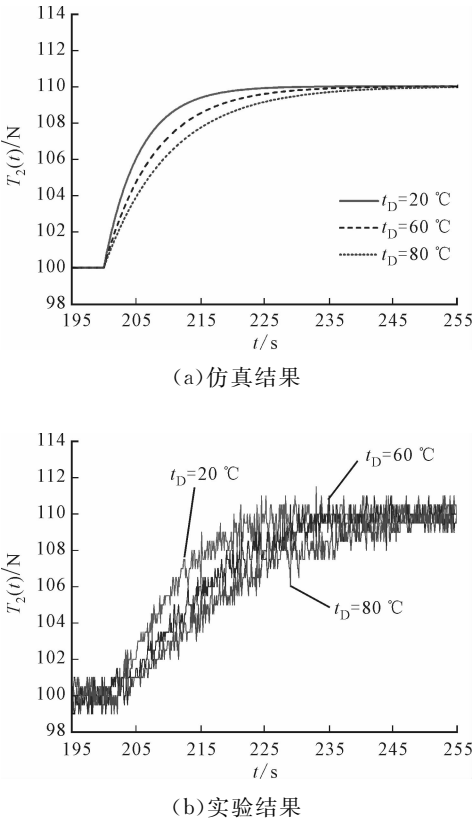


图 4 输入为 $T_1(t)$ 时 $T_2(t)$ 在不同烘干温度下的阶跃响应

在图 4a 中,对于稳态响应部分,无论烘干温度为多少,稳态值都增大了 10 N,与输入量 $T_1(t)$ 的增量相等,即烘干温度不影响由 $T_1(t)$ 引起的稳态响应。对于瞬态响应部分,在 20、60 和 80 ℃情况下的过渡过程时间分别为 22、31 和 40 s。相对于没有干燥系统情况下,烘干温度分别为 60 ℃和 80 ℃时,过渡过程时间分别增大了 41% 和 82%。可以看出,烘

干温度越高,瞬态响应的过渡过程时间越长。干燥系统对瞬态响应的影响较大,因此实际应用中不能忽略烘干温度对张力特性的影响。

图 4b 所示为实验结果,采样周期为 100 ms。实验曲线的过渡时间长度较仿真曲线长,其原因在于实验中输入的料带张力 $T_1(t)$ 不是直接获得,而是通过调整前级辊子转速获得的。此外,整个实验过程(阶跃响应前后)都有一定的张力波动,这与机械系统的振动和采集系统的噪声有关,属于正常的系统干扰。实验结果的整体趋势与仿真结果吻合,说明所建模型的正确性。

2.2 输入为 $v_1(t)$ 时的张力阶跃响应

当前区间版辊的线速度 $v_1(t)$ 产生一个幅值为 0.02 m/min 的阶跃信号,当前区间的料带张力 $T_2(t)$ 在不同烘干温度条件下的阶跃响应仿真和实验结果如图 5 所示。可以看出,在输入为 $v_1(t)$ 时,不同烘干温度下 $T_2(t)$ 的阶跃响应都表现为负向阶跃输出;干燥系统对系统特性有显著的影响;烘干温度只影响瞬态响应部分,不影响稳态响应。

在图 5a 中,对于稳态响应部分,无论烘干温度为多少,稳态值都减小了 11.2 N,即烘干温度不影响由 $v_1(t)$ 引起的稳态响应。对于瞬态响应部分,在

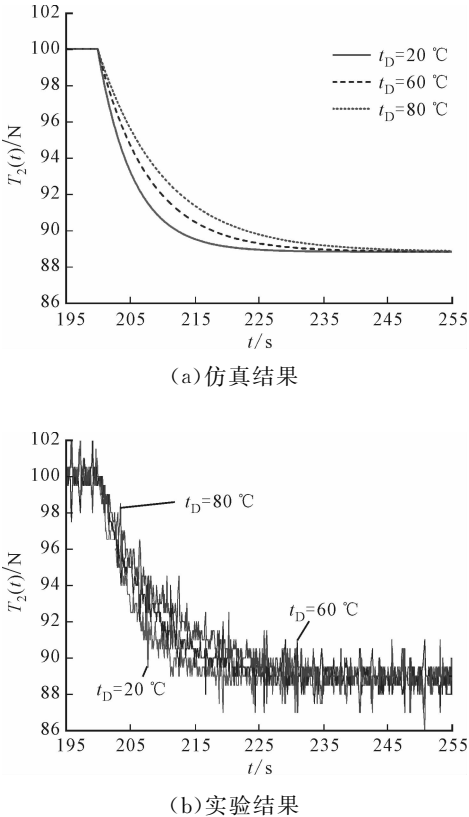
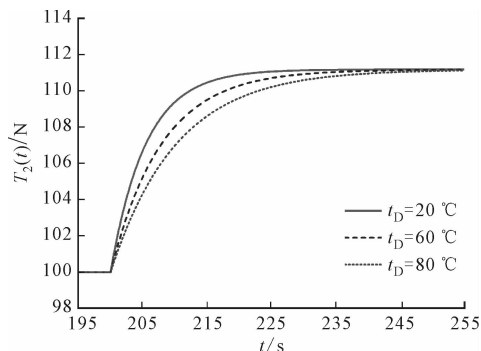


图 5 输入为 $v_1(t)$ 时 $T_2(t)$ 在不同烘干温度下的阶跃响应

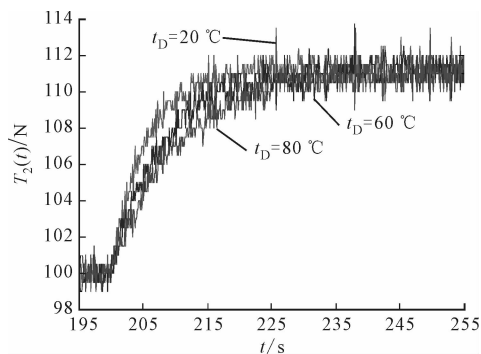
20、60 和 80 °C 情况下的过渡过程时间分别为 22、31 和 40 s, 与输入为 $T_1(t)$ 时的结果相同。与 2.1 节类似, 烘干温度越高, 瞬态响应的过渡过程时间越长, 干燥系统对瞬态响应的影响显著。图 5b 的实验结果整体趋势与仿真结果吻合。

2.3 输入为 $v_2(t)$ 时的张力阶跃响应

当前区间版辊的线速度 $v_2(t)$ 产生一个幅值为 0.02 m/min 的阶跃信号, 当前区间的料带张力 $T_2(t)$ 在不同烘干温度条件下的阶跃响应仿真和实验结果如图 6 所示。从中可以看出: 在输入为 $v_2(t)$ 时, 不同烘干温度下 $T_2(t)$ 的阶跃响应都表现为正向阶跃输出; 干燥系统对系统特性有显著的影响; 烘干温度只影响瞬态响应部分, 不影响稳态响应。



(a) 仿真结果



(b) 实验结果

图 6 输入为 $v_2(t)$ 时 $T_2(t)$ 在不同烘干温度下的阶跃响应

图 6a 中对于稳态响应部分, 稳态值在不同烘干温度下均增大了 11.2 N, 即烘干温度不影响由 $v_2(t)$ 引起的稳态响应。对于瞬态响应部分, 在 20、60 和 80 °C 情况下的过渡过程时间分别为 22、31 和 40 s, 与输入为 $T_1(t)$ 和 $v_1(t)$ 时的数值相同。与 2.1 节和 2.2 节类似, 烘干温度越高, 瞬态响应的过渡过程时间越长, 干燥系统对瞬态响应的影响显著。图 6b 的实验结果整体趋势与仿真结果吻合。

3 结 论

为了提高电子轴凹版印刷精度, 需要对包含干燥系统的印刷部分的张力模型进行深入研究。本文首先根据质量守恒规律建立了包含温度因素的印刷部分张力模型, 该数学模型显示干燥系统可以通过料带的杨氏弹性模量对张力系统产生影响。通过系统的阶跃响应数值仿真和实验研究发现, 烘干温度对系统稳态响应没有影响, 而对系统瞬态响应影响较大。瞬态响应的过渡过程时间随着烘干温度的增高而增长, 在本文给定条件下, 烘干温度为 60~80 °C 时, 过渡过程时间相比于无干燥系统增长了 41%~82%。干燥系统对印刷部分的张力系统特性影响显著, 在印刷部分的张力系统和套准系统研究中成为不可忽略的重要因素。本文研究为电子轴凹版印刷的套准系统提供理论基础, 有利于进一步提高电子轴凹版印刷的产品质量。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(1): 86-90.
- [3] 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.
- [4] LIU Shanhui, MEI Xuesong, KONG Fanfeng, et al. A decoupling control algorithm for unwinding tension system based on active disturbance rejection control [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(6): 1798-1803.
- [5] GASSMANN V, KNITTEL D, PAGILLA P R, et al. Fixed-order H_∞ tension control in the unwinding section of a web handling system using a pendulum dancer [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 20(1): 173-180.

- [6] YANG Mei, ZHANG Shaoru. The research of tension control system in web press based on the fuzzy adaptive PID controller [C]// Proceedings of the 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1204-1208.
- [7] PARK J C, JEON S W, NAM K S, et al. Tension control of web of winder span using adaptive gain control method [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(5S3): 05HC11.
- [8] ABJADI N R, SOLTANI J, ASKARI J, et al. Non-linear sliding-mode control of a multi-motor web-winding system without tension sensor [J]. IET Control Theory & Applications, 2009, 3(4): 419-427.
- [9] 周春雷, 陈建魁, 尹周平. 薄膜非连续开卷张力控制建模、仿真与实验 [J]. 电气自动化, 2013, 35(3): 9-11.
ZHOU Chunlei, CHEN Jiankui, YIN Zhouping. Modeling, simulation and experiment of tension control in film non-continuous unwinding system [J]. Electrical Automation, 2013, 35(3): 9-11.
- [10] 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.
- [11] SHAO Mingyue, WU Jimei, WANG Yan, et al. Research on modeling method of winding tension system for gravure printing machine [C]// Proceedings of the 2016 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 110-114.
- [12] MARTZ Y, BA A, KNITTEL D. Robust industrial control with optimized decoupling in roll-to-roll systems; new approaches using finite element modeling of the Web [C] // IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 7301642.
- [13] MARTZ Y, KNITTEL D. Robust control in industrial roll-to-roll systems; new approaches using finite element modeling of the web [C]// IEEE International Conference on Industrial Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 464-469.
- [14] TRAN T T, CHOI K H. A backstepping-based control algorithm for multi-span roll-to-roll web system [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1/2/3/4): 45-61.
- [15] 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 & Engineering, 2016, 13(1): 274-283.
- [16] CHEN Zhihua, ZHENG Ying, ZHOU Minjing, et al. Model-based feedforward register control of roll-to-roll web printing systems [J]. Control Engineering Practice, 2016, 51: 58-68.
- [17] 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(2): 206-226.
- [18] 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.
- [19] 刘成, 吕延军, 张永芳, 等. 无轴传动凹版印刷机的相邻偏差耦合同步控制 [J]. 振动. 测试与诊断, 2017, 37(6): 1242-1249.
LIU Cheng, LÜ Yanjun, ZHAN Yongfang, et al. Adjacent error-coupling strategy for synchronization control of shaftless driven gravure printing machine [J]. Journal of Vibration, Measurement & diagnosis, 2017, 37(6): 1242-1249.
- [20] TORRES E O C, PAGILLA P R. Temperature distribution in moving webs heated by radiation panels; model development and experimental validation [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2017, 139(5): 1-8.
- [21] TORRES E O C, PAGILLA P R. A governing equation for moving web temperature heated by radiative panels [C] // Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 858-863.
- [22] HE Kui, WANG Kedian, ZHANG Dongsheng, et al. Modeling and analysis of web tension between two adjacent printing rollers in shaft-less drive gravure printing systems [C]// Proceedings of 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1761-1766.

(编辑 杜秀杰)