

卷筒料印刷装备收卷张力系统解耦控制研究

何奎¹, 刘善慧², 史文亮², 焦飞强³, 薛志成³, 李健¹

(1.河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003; 2.西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 西安 710048; 3.陕西西北人印刷机械有限责任公司, 陕西 渭南 714000)

摘要: **目的** 为了保证卷筒料印刷装备收卷张力系统的性能, 提出一种适用于收卷张力系统的自抗扰(ADRC)解耦控制器。**方法** 在收卷张力系统数学模型基础上, 结合卷筒料收卷系统的工作原理, 基于ADRC控制技术设计收卷张力系统的ADRC解耦控制器, 并利用Simulink软件对所提出的控制策略进行仿真研究。**结果** 在相同的阶跃输入下, 研究表明, PID控制器调整时间为2.4 s, 而ADRC解耦控制器调整时间为0.7 s; 在PID控制下, 收卷基材张力出现超调和震荡, 而在ADRC解耦控制下, 基材张力无超调和震荡现象; 采用PID控制器, 收卷牵引跨度张力变化引起收卷跨度张力波动, 而采用ADRC控制器则没有波动。**结论** 提出的卷筒料印刷装备收卷张力系统ADRC解耦控制器实现了高精度张力控制, 具有比传统PID控制器更好的控制性能。

关键词: 卷筒料; 印刷装备; 收卷张力系统; 解耦控制; 自抗扰控制

中图分类号: TS835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)19-0209-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.19.030

Decoupling Control for Rewinding Tension System of the Roll to Roll Printing Equipment

HE Kui¹, LIU Shan-hui², SHI Wen-liang², JIAO Fei-qiang³, XUE Zhi-cheng³, LI Jian¹

(1.School of Mechanical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;
2.Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, China; 3.Shaanxi Beiren Printing Machinery Co., Ltd., Weinan 714000, China)

ABSTRACT: The paper aims to propose a decoupling controller based on active disturbance rejection control (ADRC) for rewinding tension system to ensure the performance of the rewinding tension system in roll to roll printing equipment. Based on the mathematical model and the working principle of the rewinding tension system, the ADRC decoupling controller of the rewinding tension system was designed, and then the proposed controller was simulated in Simulink. Under the same step input, the results showed that the adjusting time of the PID controller was 2.4 seconds, while that of the ADRC decoupling controller was 0.7 seconds. The tension of the rewinding substrate had overshoot and oscillation in the PID controller, but there was no overshoot and oscillation in the ADRC decoupling controller. With the PID controller, the tension fluctuation of the rewinding span was caused by the tension change of the rewinding traction span, while there was no fluctuation in the ADRC decoupling controller. The proposed ADRC decoupling controller is able to realize high precision control of the rewinding tension system and is endowed with better control performance than PID controller.

KEY WORDS: roll to roll; printing equipment; rewinding tension system; decoupling control; ADRC

收稿日期: 2019-12-13

基金项目: 陕西省重点研发计划(2020ZDLGY14-06); 陕西省技术创新引导专项(2020QFY03-03); 陕西省自然科学基金研究计划(2019JM-059)

作者简介: 何奎(1981—), 男, 博士, 河南科技大学讲师, 主要研究方向为印刷装备系统建模与解耦控制。

卷筒料印刷装备收卷系统的目的是将印刷后的基材重新复卷,收卷系统的张力精度直接与复卷质量相关。如果收卷张力控制不好,会产生“菜心”、料卷边沿不齐等缺陷,导致印品报废,使得整个印刷过程功亏一篑。根据实际生产工艺,收卷牵引跨度的基材张力要进行恒张力控制,而收卷跨度的基材张力要进行锥度张力控制。卷筒料印刷装备的收卷张力系统结构复杂、工况多变、影响因素众多,使得张力系统呈现出非线性、强耦合、强干扰等特点。

在卷筒料印刷装备的收卷系统中,由于转动惯量和料卷半径随着收卷的进行而不断变化,加上摆辊机构、换料装置的使用,造成张力的波动较明显,是国内外张力研究的热点之一。Shao 等^[1]对收卷张力系统的模型进行研究,分别为区间基材、收卷机构、摆辊机构等收卷张力系统中的组件建立数学模型。Kang 和 Gassmann 等^[2-3]对张力系统中常用的摆辊机构进行了建模分析。Park 等^[4]对收放卷过程张力变化进行了详细的分析。周春雷等^[5]对非连续放卷张力系统特性进行研究,建立了非连续放卷张力系统模型。张海燕等^[6]对收卷系统中的料卷、摆辊机构等部件进行了建模。这些研究中往往是对张力系统中的某个部件或单跨度张力系统进行建模研究,没有研究多跨度张力系统之间的关系,这样所建立的模型相对简单,但割裂了各跨度张力系统间动态过程的耦合关系。一些学者也针对机械精度、材料几何参数等因素对张力的影响展开了研究。如 Branca 等^[7]研究了辊筒的形状对张力的影响;Brighenti 等^[8]研究了基板上孔洞形状及受力对基板屈曲系数的影响。在卷筒料印刷装备的印刷部分,烘箱的烘干温度远高于烘箱外部的环境温度,烘干温度与环境温度作用于运动基材,使得基材温度在空间上呈不均匀分布状态。温度对基材张力的影响已经开始引起一部分学者的注意,如 Torres 等^[9-10]对于基材移动过程中由加热面板热辐射引起的温度

分布情况进行了建模分析;Lu 等^[11]对传热辊产生的基材温度传热过程进行了建模分析;Lee 等^[12]在研究卷对卷印刷电子的基材张力特性过程中考虑了热效应,并研究了卷对卷多层套准系统的动态热特性;He 等^[13]建立了包含烘干温度的基材张力模型;Jabbar^[14]在基材张力建模研究中考虑了热和粘弹特性的影响。由于对张力系统的耦合机制缺乏充分的研究,所以实际工业中的张力系统控制策略多为以 PID 控制为核心构建的控制方法。随着现代控制、智能控制等控制理论的成熟与发展,诸如鲁棒控制、模糊控制、神经网络等控制方法在张力系统控制中得到广泛研究。如 Ponniah 等^[15]提出一种基材张力自适应模糊控制算法,根据系统稳定性自动调整控制参数以适应系统参数变化和结构不确定性。

为了保证卷筒料印刷装备在收卷过程中基材张力按照一定规律(如锥度张力)变化,进而保证收卷质量,避免卷料出现“菜心”、褶皱等缺陷,文中以卷筒料印刷装备收卷张力系统为研究对象,根据卷筒料印刷装备收卷系统的组成和功能,将收卷张力系统进一步划分为收卷跨度和收卷牵引跨度,在已建立的收卷张力系统数学模型基础上,设计出适用于卷筒料印刷装备收卷张力系统的 ADRC 解耦控制器,并在 Simulink 软件中进行仿真分析,验证所设计解耦控制器的性能。

1 收卷张力系统控制分析

收卷张力系统是由印刷单元 n 、收卷牵引单元和收卷单元等 3 个功能单元组成的双跨度耦合系统,其控制结构见图 1。按照基材传动方向,印刷单元 n 和收卷牵引单元组成收卷牵引跨度,收卷牵引单元和收卷单元组成收卷跨度。收卷牵引跨度和收卷跨度通过收卷牵引单元和基材串联起来,构成耦合系统。

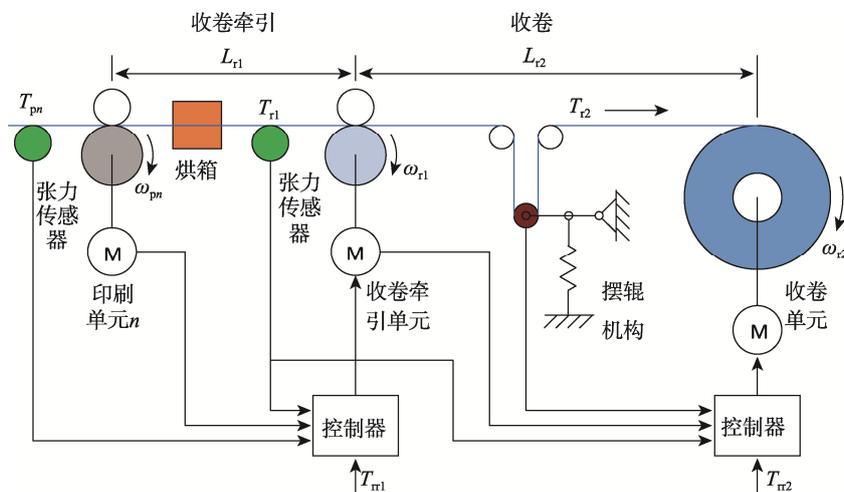


图 1 收卷张力系统控制结构

Fig.1 Control structure of the rewinding tension system

对于双跨度收卷张力系统, 输出量为收卷牵引跨度基材张力 T_{r1} 和收卷跨度基材张力 T_{r2} , 输入控制量为印刷单元 n 电动机转速 ω_{pn} 、收卷牵引单元电动机转速 ω_{r1} 和收卷单元电动机转速 ω_{r2} 。通常印刷单元 n 的电动机转速 ω_{pn} 是实现套印控制或印刷段张力控制时的输入控制量, 不作为收卷张力系统的输入控制量, 因此, 收卷双跨度系统的实际输入控制量为电动机转速 ω_{r1} 和 ω_{r2} , 输出量为基材张力 T_{r1} 和 T_{r2} 。

收卷牵引跨度的输入量为前一印刷跨度的基材张力 T_{pn} 、印刷单元 n 的转速 ω_{pn} 和收卷牵引单元的转速 ω_{r1} , 输出量为收卷牵引跨度的基材张力 T_{r1} 。收卷跨度的输入量为收卷牵引跨度的基材张力 T_{r1} 、收卷牵引单元的转速 ω_{r1} 和收卷单元的转速 ω_{r2} , 输出量为收卷跨度的基材张力 T_{r2} 。可以看出收卷牵引跨度和收卷跨度通过收卷牵引跨度的基材张力 T_{r1} 和收卷牵引单元的转速 ω_{r1} 建立了耦合关系, 因此, 设计收卷张力控制器时需要对此种耦合关系进行解耦处理。

收卷跨度的时变参数为收卷跨度的基材长度 L_{r2} 和收卷料卷的半径 R_{r2} 。收卷料卷的半径是随时间逐渐增大, 收卷轴等效转动惯量也逐渐增大, 同时收卷料卷半径的逐渐增大会进一步引起收卷料卷转动惯量和收卷跨度基材长度的变化。收卷跨度的基材长度受到摆辊机构的摆角变化和收卷料卷半径变化的影响, 因此, 设计收卷张力控制器时也应当考虑时变参数, 应具有较强的鲁棒性能。

此外, 在收卷牵引段有烘箱, 用于烘干油墨, 会对该跨度的基材张力产生影响。设计收卷牵引跨度的控制器时需要采用包含烘干因素的数学模型。

根据上述收卷张力系统的耦合、参数时变等具体特点, 设计了收卷系统双跨度张力控制结构, 见图 1。双跨度收卷系统的张力控制器由 2 个子控制器构成。收卷牵引跨度的张力控制器输入为设定张力 T_{rr1} , 通过控制收卷牵引单元的电动机转速 ω_{r1} 实现收卷牵引跨度基材张力 T_{r1} 的恒张力控制, 收卷牵引跨度的实际基材张力 T_{r1} 反馈给控制器形成闭环控制, 同时将前一印刷跨度的基材张力 T_{pn} 和印刷单元 n 的转速 ω_{pn} 作为干扰量输入控制器参与运算。收卷跨度的张力控制器输入为设定张力 T_{rr2} , 通过控制收卷单元的电动机转速 ω_{r2} 实现收卷跨度基材张力的 T_{r2} 的锥度张力控制, 收卷跨度实际基材张力 T_{r2} 反馈给控制器形成闭环控制, 同时将收卷牵引跨度基材张力 T_{r1} 和收卷牵引单元的电动机转速 ω_{r1} 作为干扰量输入控制器参与运算。收卷系统 2 个跨度的控制器均采用 ADRC 控制技术, 结合收卷张力系统解耦模型, 实现双跨度收卷张力系统的 ADRC 解耦控制。

2 收卷张力系统 ADRC 解耦控制器设计

2.1 模型解耦

收卷张力系统通过控制收卷牵引单元电动机速度 ω_{r1} 和收卷单元的电动机速度 ω_{r2} 来控制 2 个跨度区间的基材张力 T_{r1} 和 T_{r2} , 即 ω_{r1} 和 ω_{r2} 为系统输入, T_{r1} 和 T_{r2} 为系统输出。基材张力 T_{r1} 的值可直接通过张力传感器检测, 而基材张力 T_{r2} 需要通过检测摆辊机构的摆角后, 再经过进一步计算获得。印刷单元 n 的转速在稳态运行时变化非常小, 仅在调整套准误差时进行微调。

结合图 1 和文献[16]可以得到收卷张力系统数学模型为:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[L_{r1} + L_{Dr1} \left(\frac{E_E}{E_D} - 1 \right) \right] \frac{dT_{r1}(t)}{dt} = \\ & \quad [AE_E - T_{r1}(t)]R_{r1}\omega_{r1}(t) - [AE_E - T_{pn}(t)]R_{pn}\omega_{pn}(t) \\ J_{r1} \frac{d\omega_{r1}(t)}{dt} &= C_{r1}U_{r1}(t) + [T_{r2}(t) - T_{r1}(t)]R_{r1} - M_{fr1}(t) \\ L_{r2}(t) \frac{dT_{r2}(t)}{dt} &= [AE - T_{r2}(t)]R_{r2}(t)\omega_{r2}(t) - \\ & \quad [AE - T_{r1}(t)]R_{r1}\omega_{r1}(t) + [AE - T_{r2}(t)] \frac{dL_{r2}(t)}{dt} \\ L_{r2}(t) &= L_{r2}^* + \sqrt{L_{AD}^2 - [R_{r2}(t) - r_i]^2} - 2d_D\theta_r(t) \\ T_{r2}(t) &= \frac{1}{2d_D} \left[J_D \frac{d^2\theta_r(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta_r(t)}{dt} + Kd_K^2\theta_r(t) \right] \\ J_{r2}(t) \frac{d\omega_{r2}(t)}{dt} &= C_{r2}U_{r2}(t) - T_{r2}(t)R_{r2}(t) - M_{fr2}(t) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

收卷张力系统是一个多输入多输出的耦合系统, 需要对模型进行解耦。该数学模型可进一步改写为式 (2) 和式 (3)。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT_{r1}(t)}{dt} &= - \frac{E_D [AE_E - T_{pn}(t)]R_{pn}\omega_{pn}(t)}{L_{r1}E_D + L_{Dr1}(E_E - E_D)} + \\ & \quad \frac{E_D [AE_E - T_{r1}(t)]R_{r1}}{L_{r1}E_D + L_{Dr1}(E_E - E_D)} \omega_{r1}(t) \\ \frac{dT_{r2}(t)}{dt} &= \frac{[AE_E - T_{r2}(t)]}{L_{r2}(t)} \frac{dL_{r2}(t)}{dt} - \\ & \quad \frac{[AE_E - T_{r1}(t)]R_{r1}}{L_{r2}(t)} \omega_{r1}(t) + \frac{[AE_E - T_{r2}(t)]R_{r2}(t)}{L_{r2}(t)} \omega_{r2}(t) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} L_{r2}(t) &= L_{r2}^* + \sqrt{L_{AD}^2 - [R_{r2}(t) - r_i]^2} - 2d_D\theta_r(t) \\ T_{r2}(t) &= \frac{1}{2d_D} \left[J_D \frac{d^2\theta_r(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta_r(t)}{dt} + Kd_K^2\theta_r(t) \right] \\ J_{r1} \frac{d\omega_{r1}(t)}{dt} &= C_{r1}U_{r1}(t) + [T_{r2}(t) - T_{r1}(t)]R_{r1} - M_{fr1}(t) \\ J_{r2}(t) \frac{d\omega_{r2}(t)}{dt} &= C_{r2}U_{r2}(t) - T_{r2}(t)R_{r2}(t) - M_{fr2}(t) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式(3)为辅助方程,可以求解收卷跨度基材长度和基材张力,并反映了伺服传动系统的动态特性。其中收卷跨度的基材长度受料卷半径和摆辊机构摆角影响,基材张力通过摆辊机构的摆角计算出来。

式(2)写成矩阵形式:

$$\frac{dT_r(t)}{dt} = f_r(t) + B_r(t)\omega_r(t) \quad (4)$$

其中:

$$T_r(t) = [T_{r1}(t) \quad T_{r2}(t)]^T \quad (5)$$

$$\omega_r(t) = [\omega_{r1}(t) \quad \omega_{r2}(t)]^T \quad (6)$$

$$f_r(t) = \begin{bmatrix} f_{r1}(t) \\ f_{r2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_D[AE_E - T_{pn}(t)]R_{pn}\omega_{pn}(t)}{L_{r1}E_D + L_{Dr1}(E_E - E_D)} \\ \frac{[AE_E - T_{r2}(t)]dL_{r2}(t)}{L_{r2}(t)dt} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B_r(t) = \begin{bmatrix} \frac{E_D[AE_E - T_{r1}(t)]R_{r1}}{L_{r1}E_D + L_{Dr1}(E_E - E_D)} & 0 \\ \frac{[AE_E - T_{r1}(t)]R_{r1}}{L_{r2}(t)} & \frac{[AE_E - T_{r2}(t)]R_{r2}(t)}{L_{r2}(t)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $T_r(t)$ 为系统输出量; $\omega_r(t)$ 为系统输入量; $f_r(t)$ 为系统控制量之外的部分,即为“动态耦合”部分; $B_r(t)$ 为系统的“静态耦合”部分。

引入虚拟控制变量 $u_r(t)=[u_{r1}(t) \quad u_{r2}(t)]^T$, 令:

$$u_r(t) = B_r(t)\omega_r(t) \quad (9)$$

式(4)变为:

$$\frac{dT_r(t)}{dt} = f_r(t) + u_r(t) \quad (10)$$

这样虚拟控制量 $u_r(t)$ 的每个通道与张力输出 $T_r(t)$ 的每个通道形成了单输入单输出的关系,即虚拟控制量 $u_{r1}(t)$ 和输出张力 $T_{r1}(t)$ 、虚拟控制量 $u_{r2}(t)$ 和输出张力 $T_{r2}(t)$ 实现完全解耦。其中 $f_r(t)$ 的元素 $f_{r1}(t)$ 和 $f_{r2}(t)$ 可看作各通道上的“扰动总和”。

$$|B_r(t)| = \frac{E_D[AE_E - T_{r1}(t)][AE_E - T_{r2}(t)]R_{r1}R_{r2}(t)}{[L_{r1}E_D + L_{Dr1}(E_E - E_D)]L_{r2}(t)} \quad (11)$$

由于基材横截面积与弹性模量的乘积远远大于收卷牵引跨度和收卷跨度的基材张力,因此, $|B_r(t)| \neq 0$, 即 $B_r(t)$ 是可逆的, 所以有:

$$\omega_r(t) = B_r^{-1}(t)u_r(t) \quad (12)$$

其中 $B^{-1}(t)$ 表达式为:

$$B_r^{-1}(t) = \begin{bmatrix} \frac{L_{r1}E_D + L_{Dr1}(E_E - E_D)}{E_D[AE_E - T_{r1}(t)]R_{r1}} & 0 \\ \frac{L_{r1}E_D + L_{Dr1}(E_E - E_D)}{E_D[AE_E - T_{r2}(t)]R_{r2}(t)} & \frac{L_{r2}(t)}{[AE_E - T_{r2}(t)]R_{r2}(t)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据式(10),在虚拟控制量 $u_r(t)$ 和输出张力 $T_r(t)$ 之间设计2个ADRC控制器,再通过式(12)计算出实际控制量 $\omega_r(t)$,就能实现多变量系统的解耦控制。式(13)为收卷张力系统的静态解耦模型。

2.2 控制器设计

针对双跨度收卷张力系统的耦合模型,设计了收卷张力系统的ADRC解耦控制器,见图2。该解耦控制器主要由3部分组成:ADRC控制器、静态解耦模型和收卷张力系统。设计了2个一阶ADRC控制器ADRCr1和ADRCr2,分别控制收卷牵引跨度基材张力 T_{r1} 和收卷跨度基材张力 T_{r2} 。ADRCr1和ADRCr2控制器的输入为设定张力 T_{rr1} 和 T_{rr2} 、检测张力 T_{r1} 和 T_{r2} ,输出为虚拟控制量 u_{r1} 和 u_{r2} 。虚拟控制量经过收卷系统的静态解耦模型进行解耦,得到实际控制量 ω_{r1} 和 ω_{r2} 。实际控制量作用于收卷张力系统,实现收卷系统的双跨度张力控制,其中,收卷牵引跨度为恒张力控制,收卷跨度为变张力控制。需要对张力系统的实际输出张力 T_{r1} 和 T_{r2} 进行检测,并反馈给控制器ADRCr1和ADRCr2。输出张力 T_{r1} 直接由张力传感器检测获取,而输出张力 T_{r2} 则通过检测摆辊机构摆角,再用式(3)进一步计算获得。

一阶自抗扰控制器ADRCr1和ADRCr2的结构相同,主要由二阶扩张状态观测器ESO和非线性误差状态控制律NLSEF构成。在收卷张力控制系统中,张力设定值 T_{rr1} 和 T_{rr2} 由软件设定,不存在信号噪声和异常突变,并且对于一阶ADRC控制器,跟踪微分器的输出不含微分环节,仅对参考值起到滤波作用,因此,该一阶ADRC控制器取消了跟踪微分器TD,降低了计算负荷。二阶扩张状态观测器ESO是ADRC控制器的核心,一方面对输出张力进行跟踪,另一方面对系统内部干扰和外部干扰进行估计。非线性误差状态控制律NLSEF用来对误差和误差微分进行非线性组合。在设计的一阶ADRC控制器中,不存在误差微分项,因此只需要对误差项进行比例调节,也降低了计算负荷。NLSEF1和NLSEF2的输出控制量 u_{01} 和 u_{02} 用总扰动估计量 z_{12} 和 z_{22} 进行补偿,得到 u_{r1} 和 u_{r2} 作为最终的虚拟控制量,“补偿因子” b_{01} 和 b_{02} 是与ADRC中唯一与模型有关的参数,其数值大小与补偿强弱有关。

ADRCr1和ADRCr2的离散算法分别见式(14—15)。

$$\begin{cases} e_1(k) = z_{11}(k) - T_{u1}(k) \\ z_{11}(k+1) = z_{11}(k) + h(z_{12}(k) - \beta_{11}e_1(k) + b_{01}u_{r1}(k)) \\ z_{12}(k+1) = z_{12}(k) + h(-\beta_{12}fal(e_1(k), 0.5, h)) \\ e_{11}(k+1) = T_{rr1}(k+1) - z_{11}(k+1) \\ u_{r1}(k+1) = k_{1p}fal(e_{11}(k+1), 0.5, h) - z_{12}(k+1) / b_{01} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} e_2(k) = z_{21}(k) - T_{u2}(k) \\ z_{21}(k+1) = z_{21}(k) + h(z_{22}(k) - \beta_{21}e_2(k) + b_{02}u_{r2}(k)) \\ z_{22}(k+1) = z_{22}(k) + h(-\beta_{22}fal(e_2(k), 0.5, h)) \\ e_{21}(k+1) = T_{rr2}(k+1) - z_{21}(k+1) \\ u_{r2}(k+1) = k_{2p}fal(e_{21}(k+1), 0.5, h) - z_{22}(k+1) / b_{02} \end{cases} \quad (15)$$

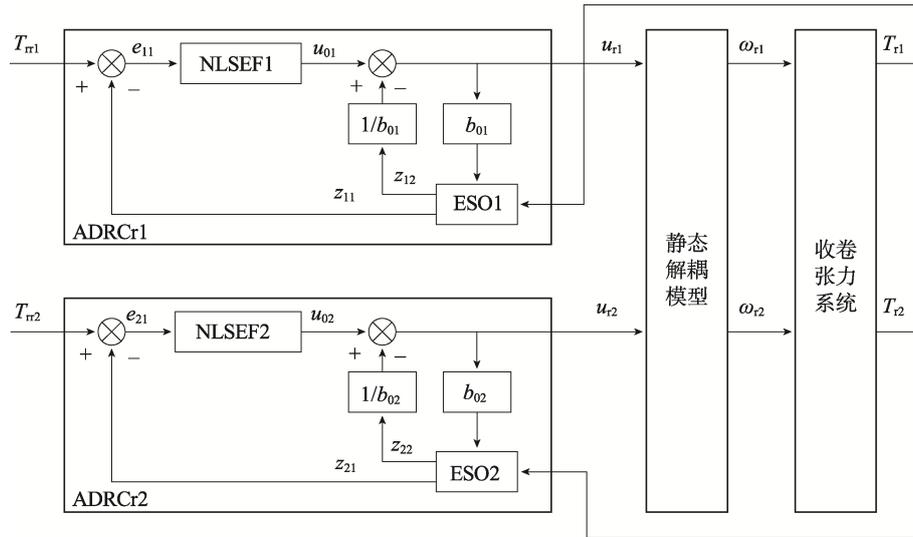


图 2 ADRC 解耦控制器结构
Fig.2 Structure of the ADRC decoupling controller

式中： k 为离散数 ($k=0, 1, 2, \dots$)； h 为积分步长； $\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}$ 和 β_{22} 为 ESO 增益系数； k_{1p} 和 k_{2p} 为 NLSEF 的增益系数。用式 (14) 和 (15) 求解出虚拟控制量 u_{r1} 和 u_{r2} ，再进一步根据式 (12) 求解得到实际控制量 ω_{r1} 和 ω_{r2} ，就可以实现对收卷张力系统的解耦控制。

可以看出，利用 ADRC 技术进行解耦时，系统动态耦合部分 $f_i(t)=[f_{r1}(t) \ f_{r2}(t)]^T$ 作为扰动量被 ADRC 估计并及时进行补偿，不用考虑动态耦合部分的影响，只用考虑静态耦合部分，降低了收卷系统的解耦难度。

3 仿真与分析

为了验证收卷张力系统 ADRC 解耦控制器的性能，利用 Matlab/Simulink 软件对 ADRC 解耦控制器进行了仿真研究，并与传统的 PID 控制器进行比较。其中 PID 控制器的结构见图 3，控制器 PID1 输出控制量 ω_{r1} ，控制收卷牵引跨度基材张力 T_{r1} ，PID2 输出控制量 ω_{r2} 控制收卷跨度基材张力 T_{r2} 。

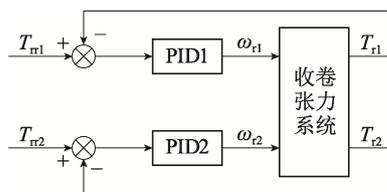


图 3 PID 控制器结构
Fig.3 Structure of the PID controller

PID 控制器和 ADRC 控制器参数均是在收卷半径为 0.15 m 且稳态印刷速度为 100 r/min 的条件下调整得到，在运行中不变。收卷张力系统的 PID 控制器

参数和 ADRC 解耦控制器参数分别见表 1 和表 2。仿真采用固定步长模式，控制周期为 10 ms。

表 1 PID 控制器参数
Tab.1 Parameters of the PID controller

控制器	参数
PID1	$K_{P1}=15; K_{I1}=200; K_{D1}=0.15$
PID2	$K_{P2}=7; K_{I2}=200; K_{D2}=0.12$

表 2 ADRC 解耦控制器参数
Tab.2 Parameters of the ADRC decoupling controller

控制器	参数
ADRCr1	$\beta_{11}=100; \beta_{12}=6 \times 10^5; k_{1p}=30; b_{01}=488$
ADRCr2	$\beta_{21}=100; \beta_{22}=6 \times 10^5; k_{2p}=3; b_{02}=1628$

在收卷张力系统各跨度张力为 50 N 时，令收卷牵引张力在 8 s 时刻产生 10 N 阶跃变化、收卷张力在 12 s 时刻产生 10 N 阶跃变化。在 R_2 分别为 0.05 m, 0.15 m 和 0.25 m 情况下，采用 PID 控制器的各跨度的基材张力阶跃响应分别见图 4—6，采用 ADRC 解耦控制器的各跨度的基材张力阶跃响应分别见图 7—9。

从图 4—9 可以看出，采用 PID 控制时收卷跨度基材张力 T_{r2} 出现较大的超调和震荡，采用 ADRC 解耦控制的收卷张力系统阶跃响应中，收卷跨度基材张力没有出现震荡和超调，且调整时间相比采用 PID 控制器小，采用 PID 控制时约为 2.4 s，而采用 ADRC 解耦控制时只有 0.7 s。说明 ADRC 解耦控制器具有较好的快速性。

在收卷跨度基材阶跃响应中，采用 PID 控制情况

下, 振幅随着收卷半径的改变而明显变化, 在 R_{r2} 为 0.05 m 时, 超调量为 38%, 料卷半径增大到 0.15 m 时, 阶跃响应的超调量为 25%, 当 R_{r2} 增大至 0.25 m 时, 超调量为 41%。若在收卷半径为 0.05 m 时调整 PID 参数减小超调量, 则随着料卷半径的增大, 调整

时间会大大延长, 出现长时间的张力波动。可见, 固定参数的 PID 控制器无法适应参数时变系统工况变化, 鲁棒性较差。采用 ADRC 控制时, 料卷半径的变化对基材张力几乎不产生影响, 说明 ADRC 解耦控制算法具有较好的鲁棒性能。

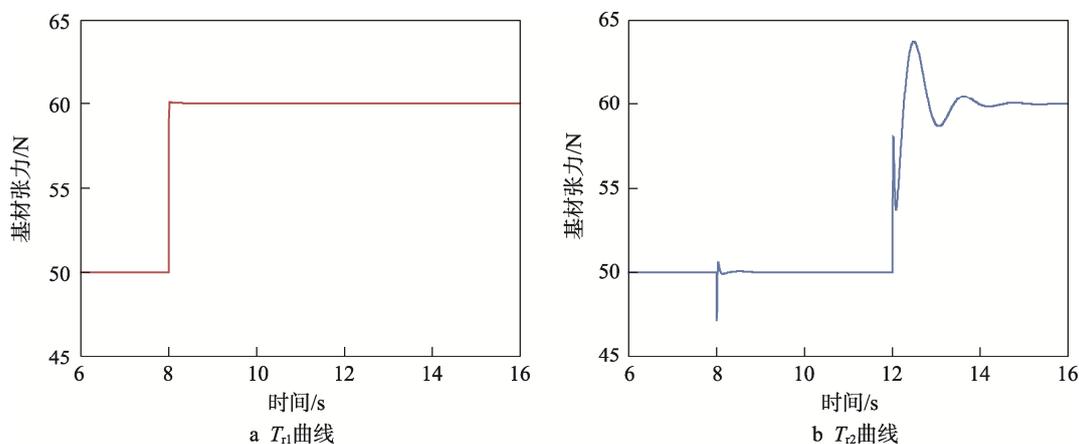


图 4 在 $R_{r2}=0.05$ m 时 PID 控制器仿真结果
Fig.4 Simulation results of the PID controller at $R_{r2}=0.05$ m

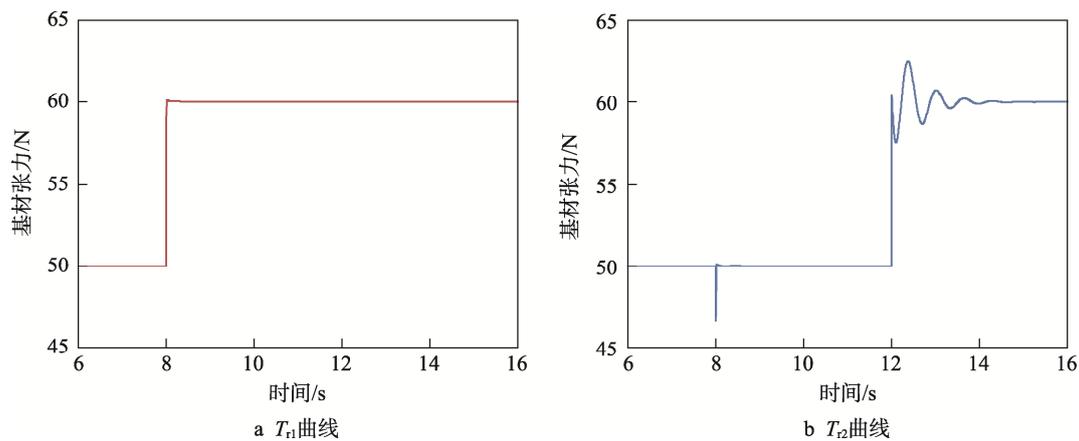


图 5 在 $R_{r2}=0.15$ m 时 PID 控制器仿真结果
Fig.5 Simulation results of the PID controller at $R_{r2}=0.15$ m

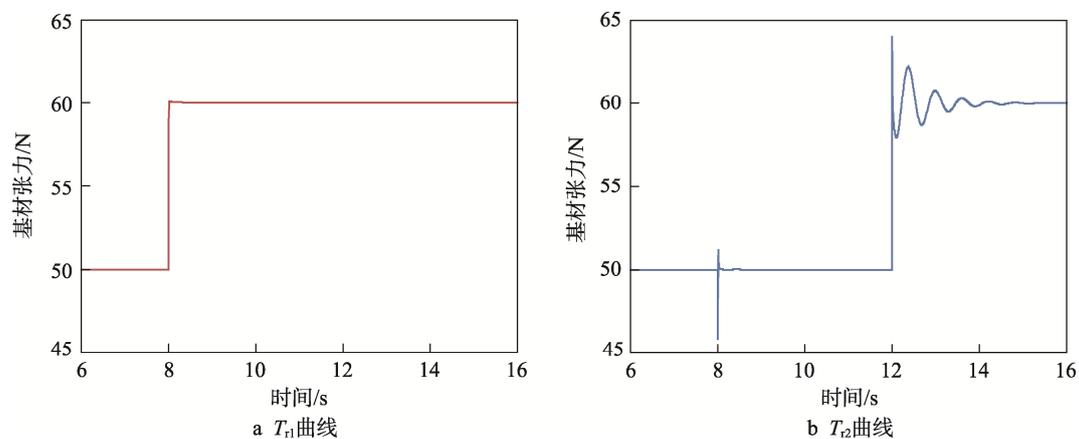


图 6 在 $R_{r2}=0.25$ m 时 PID 控制器仿真结果
Fig.6 Simulation results of the PID controller at $R_{r2}=0.25$ m

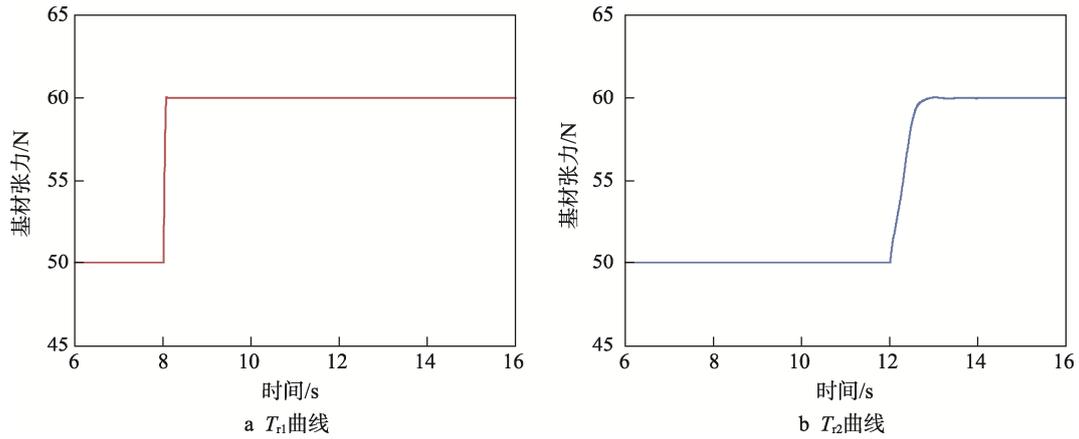


图 7 在 $R_{r2}=0.05\text{ m}$ 时 ADRC 解耦控制器仿真结果
Fig.7 Simulation results of the ADRC decoupling controller at $R_{r2}=0.05\text{ m}$

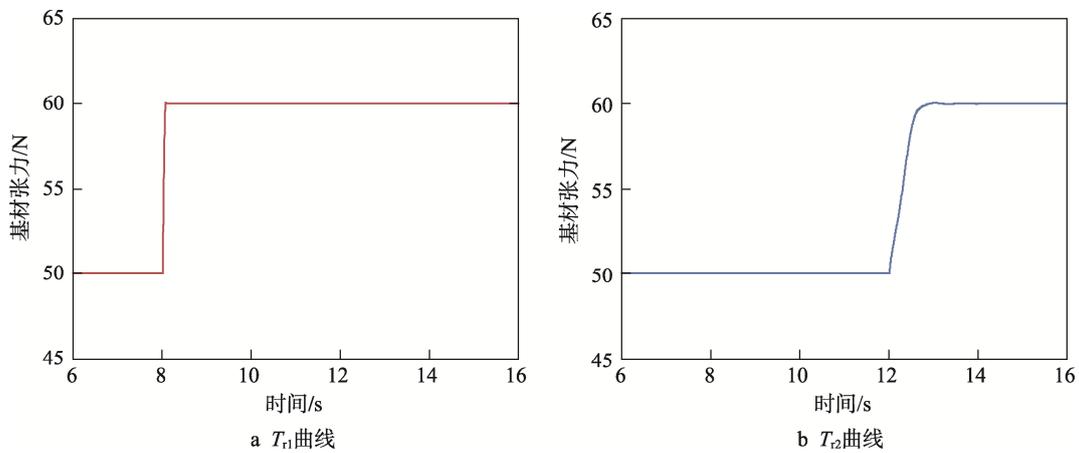


图 8 在 $R_{r2}=0.15\text{ m}$ 时 ADRC 解耦控制器仿真结果
Fig.8 Simulation results of the ADRC decoupling controller at $R_{r2}=0.15\text{ m}$

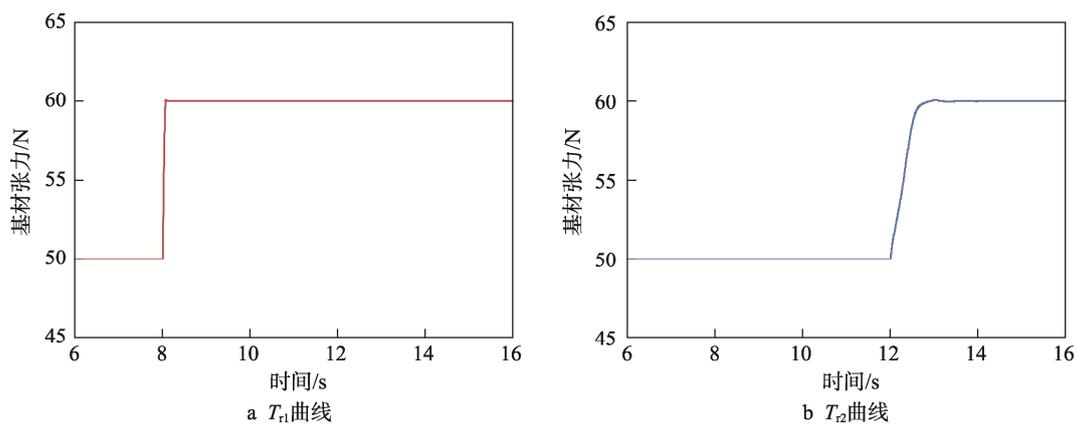


图 9 在 $R_{r2}=0.25\text{ m}$ 时 ADRC 解耦控制器仿真结果
Fig.9 Simulation results of the ADRC decoupling controller at $R_{r2}=0.25\text{ m}$

在双跨度收卷张力系统的阶跃响应中，采用 PID 控制时，收卷牵引跨度基材张力阶跃变化会对收卷跨度的基材张力产生影响，在收卷跨度基材中产生较大的张力脉冲波动，如在收卷半径为 0.05 m 的阶跃响应中，张力脉冲波动的幅值达到 -3 N ，即采用 PID 控

制无法实现对双跨度收卷张力系统的解耦控制。在采用 ADRC 解耦控制器进行收卷张力控制时很好地解决了耦合问题，从张力曲线可以看出收卷牵引跨基材的张力调整未对收卷跨度的基材张力产生影响，实现了解耦控制。

4 结语

为了保证卷筒料印刷设备在收卷过程中的收卷质量,使得整个印刷过程完美收官,文中在已有收卷张力系统数学模型基础上,结合 ADRC 控制技术设计了一种适合于卷筒料印刷设备收卷张力系统的 ADRC 解耦控制器,并在 Simulink 软件中对所设计的控制器进行了仿真研究。结果表明,相比传统的 PID 控制,所设计的 ADRC 解耦控制方法较好地解决了收卷张力系统的参数时变、耦合性等难题,有效抑制了因耦合干扰引起的张力波动,具有更好的快速性、鲁棒性和抗干扰能力,且未出现超调和震荡问题,具有较好的控制性能。

虽然文中所设计的 ADRC 解耦控制器具有很好的性能,但制约其控制性能的主要原因是 ADRC 控制器参数较多,参数调整不方便,且工作量较大,探索简单实用的 ADRC 控制器参数优化方法是一项很有必要的工作,后续将结合人工智能算法设计自整定参数 ADRC 解耦控制器。

参考文献:

- [1] SHAO M, WU J, WANG Y, 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, 2016: 110—114.
- [2] KANG H, LEE C, SHIN K, et al. Modeling and Matching Design of a Tension Controller Using Pendulum Dancer in Roll-to-roll Systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1558—1566.
- [3] GASSMANN V, KNITTEL D, PAGILLA P, 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.
- [4] PARK J, JEON S, NAM K, et al. Tension Control of Web of Winder Span Using Adaptive Gain Control Method[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(5): 1—7.
- [5] 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 Chun-lei, CHEN Jian-kui, YIN Zhou-ping. Modeling, Simulation and Experiment of Tension Control in Film Non-continuous Unwinding System[J]. Electrical Automation, 2013, 35(3): 9—11.
- [6] 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 Hai-yan, XU Jin-ling. Research on Modeling Frequency Conversion Winding Tension Control System in Gravure Press Machine[J]. Light Industry Machinery, 2010, 28(4): 60—63.
- [7] BRANCA C, PAGILLA P, REID K. Governing Equations for Web Tension and Web Velocity in the Presence of Nonideal Rollers[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2012, 135(1): 1—10.
- [8] BRIGHENTI R, CARPINTERI A. Buckling and Fracture Behaviour of Cracked Thin Plates under Shear Loading[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1347—1355.
- [9] TORRES E, PAGILLA P. A Governing Equation for Moving Web Temperature Heated by Radiative Panels[C]// Proceedings of the American Control Conference, 2016: 858—863.
- [10] TORRES E, PAGILLA P. 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.
- [11] LU Y, PAGILLA P. Modeling of Temperature Distribution in Moving Webs in Roll-to-roll Manufacturing[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2014, 6(4): 1—9.
- [12] LEE C, KANG H, SHIN K. A Study on Tension Behavior Considering Thermal Effects in Roll-to-roll E-printing[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2010, 24(5): 1097—1103.
- [13] HE K, LIU S, WANG K, MEI X. Thermal Characteristics of Plastic Film Tension in Roll-to-roll Gravure Printed Electronics[J]. Applied Sciences, 2018, 8(2): 1—15.
- [14] JABBAR K, PAGILLA P. Modeling and Analysis of Web Span Tension Dynamics Considering Thermal and Viscoelastic Effects in Roll-to-roll Manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140: 1—9.
- [15] PONNIAH G, ZUBAIR M, DOH Y, et al. Fuzzy Decoupling to Reduce Propagation of Tension Disturbances in Roll-to-roll System[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1): 153—163.
- [16] 何奎, 陶涛, 刘善慧. 凹版印刷基材烘干温度对张力的影响机理分析[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 150—156.
HE Kui, TAO Tao, LIU Shan-hui. Analysis for Effects of Drying Temperature on Web Tension in Gravure Printing Machine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 150—156.