

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.04.008

卷筒料精密涂布机张力系统耦合建模与分析

刘善慧¹, 王子煜¹, 习大润², 丁好迪¹, 薛志成²

(1. 西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西北人印刷机械有限责任公司, 陕西 渭南 714000)

摘要: 张力控制精度是卷筒料精密涂布机高质量生产涂布产品的前提和保证,然而,张力系统的复杂性使其耦合建模问题一直未得到解决,已成为制约精密涂布机张力控制精度提高的瓶颈问题。为此,本文以卷筒料精密涂布机为研究对象,分析了基材张力变化的机理,建立了摆辊机构、涂布、放卷、收卷子系统张力模型,并在此基础上建立了涂布机张力系统全局耦合机理模型,描述了张力系统多物理量非线性耦合关系,最后通过 MATLAB 仿真对所建立的张力系统模型进行分析。结果表明,本文所建立的卷筒料精密涂布机张力系统模型能够准确反映张力系统特点,为高精度张力控制器设计奠定了基础。

关键词: 精密涂布机; 张力系统; 耦合建模; 仿真分析

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)04-0526-07

Coupling modeling and analysis of tension system for roll-to-roll precision coating machine

LIU Shanhui¹, WANG Ziyu¹, XI Darun², DING Haodi¹, XUE Zhicheng²

(1. Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Beiren Printing Machinery Co., Ltd, Weinan 714000, China)

Abstract: The high precision control of substrate tension is the premise and guarantee for producing high-quality products in roll-to-roll precision coating machines. However, the complex relationships in tension system make it difficult to solve the problems of coupling model, which has become a bottleneck problem in improving the tension control accuracy of the precision coating machines. To solve the problem, this paper takes roll-to-roll precision coating machine as the research object and analyzes the mechanism for substrate tension change. The tension models of dancer roll and subsystems including coating unit, unwinding unit and rewinding unit are established. Based on these, the global coupling mechanism model is established for the tension system of the precision coating machine. The nonlinear coupling relation of multiple physical quantities in tension system is described in the model. Finally, the model is simulated and analyzed by MATLAB. The results show that the tension system model established in this paper can accurately indicate the characteristics of tension system, providing a foundation for designing high precision tension controller.

Key words: precision coating machine; tension system; coupling modeling; simulation analysis

涂布加工技术作为完善材料物化特性和以涂层为特征新产品开发的重要手段,已被广泛应用于塑料薄膜深加工、信息材料、显示器件生产等工业领域^[1]。作为应用最为广泛的精密涂布装备,卷筒料精密涂布机具有机构简单、可大面积涂布、生产效率高显著优点,在大批量生产印刷电子产品领域具

有良好前景,已被尝试用于柔性电路板^[2]、薄膜晶体管^[3]、太阳能电池^[4]、记忆电阻^[5]等高端电子制造领域。张力控制精度是卷筒料精密涂布机高质量生产电子产品的前提和保证,然而,张力系统具有参数时变、非线性、强耦合等特点^[6],其耦合建模问题一直未得到解决,已成为制约精密涂布机张力控制精度

收稿日期: 2021-12-30; **网络出版日期:** 2022-04-15

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220414.1503.002.html>

基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2020ZDLGY14-06);陕西省技术创新引导专项(2020QFY03-08)

通信作者: 刘善慧,男,博士,副教授,研究方向为先进印刷包装技术与设备。E-mail: shanhuiliu@xaut.edu.cn

提高的瓶颈问题。

目前,国内外对卷筒料印刷设备张力系统的建模主要集中在机组式凹版印刷机领域。Kang等^[7]建立了凹版印刷机多输入多输出张力系统模型。Park等^[8]对凹印机收放卷段张力变化进行了详细分析。Jeon等^[9]对两辊筒间张力产生机理进行了分析。Kim等^[10]对摆辊机构进行了分析与建模研究。Jeong等^[11]建立了柔性印刷电子设备的全局耦合模型。Huang等^[12]研究了基材移动速度与张力之间的关系。Branca等^[13]研究了辊筒的形状对张力的影响。近年来,温度对基材张力的影响也引起了一些学者的关注。例如,Torres等^[14]对基材移动过程中热辐射引起的温度分布进行了建模分析。Lu等^[15]对基材温度传热过程进行了建模分析。Jabbar等^[16]建立了含有温度变量的张力动力学模型。作者团队研究了机组式凹版印刷装备中烘干温度^[17]、环境温度^[18]影响张力波动的机理,并建立了含有温度变量的两辊筒张力系统模型。

从国内外研究现状可以看出,目前针对卷筒料精密涂布机张力系统建模的研究相对匮乏,且尚未出现结合具体涂布机型的张力建模研究,这已成为制约精密涂布机张力控制精度提高的瓶颈问题。为此,本文以卷筒料精密涂布机为研究对象,建立摆辊机构、涂布、放卷、收卷子系统张力模型,并在此基础上建立了涂布机张力系统全局耦合机理模型,旨在为高精度张力控制器设计奠定基础。

1 涂布机张力系统分析

根据在涂布机生产企业的实际调研,对卷筒料精密涂布机各功能单元、结构组成进行简化,得到其结构如图1所示。

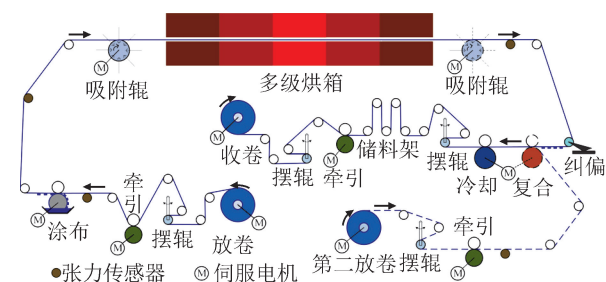


图1 卷筒料精密涂布机结构

Fig. 1 Structure of roll-to-roll precision coating machine

根据客户要求,当涂布机中设置复合功能单元时,须配置第二放卷单元将复合所用的基材按一定的速度稳定传递给复合单元,若不设置复合功能单元则无需配置第二放卷单元。多级烘箱两端各设一

个吸附辊,且两个吸附辊线速度和冷却辊线速度保持一致。实际涂布生产过程中,烘箱段的基材张力通过调整涂布机组的电机转速进行控制,因此在本文张力系统建模过程中忽略吸附辊,将从吸附辊到冷却辊的部分归结为涂布张力单元。同时,忽略复合单元及第二放卷单元,得到简化的卷筒料精密涂布机张力系统结构如图2所示。

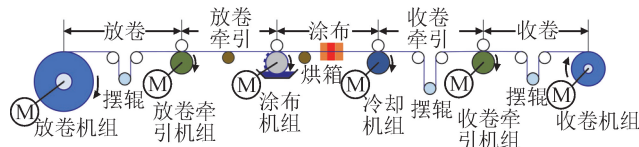


图2 张力系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tension system

卷筒料精密涂布机主要包括放卷机组、放卷牵引机组、涂布机组、冷却机组、收卷牵引机组和收卷机组,组成放卷、放卷牵引、涂布、收卷牵引和收卷5个张力单元,其中放卷、收卷牵引、收卷3个单元的基材张力用摆辊检测,其余2个单元的基材张力利用张力传感器检测。放卷机组和放卷牵引机组组成了放卷张力子系统,收卷机组和收卷牵引机组组成了收卷张力子系统,涂布机组和冷却机组组成了涂布张力子系统。基材依次通过各个张力子系统,从而将各部分连接成为一个整体。放卷机组是精密涂布机张力的起始部分,张力由此处产生,进而逐步传递给后续功能单元。收卷机组是张力系统的收尾部分,其张力控制精度直接影响着基材复卷质量。冷却机组的电机转速是整个张力系统的基准速度,通过对其它各机组电机速度的调整来实现张力控制。

2 涂布机张力系统建模

根据涂布机张力系统结构及功能组成,将张力系统划分为放卷张力子系统、涂布张力子系统和收卷张力子系统。由图2可以看出,卷筒料精密涂布机包括5段张力单元,放卷张力单元与放卷牵引张力单元组成了放卷张力子系统,收卷牵引张力单元和收卷张力单元组成了收卷张力子系统,涂布张力子系统仅有一段张力单元。

2.1 摆辊机构建模

摆辊机构作为张力检测部件,具有抑制张力波动的作用,其结构如图3所示,由两个导向辊、一个浮辊、连接浮辊的摆杆和一个气缸组成。

若当前张力单元的基材张力值稳定,则气缸输出推力的力矩与基材张力的力矩互相平衡,此时摆杆不发生偏转;若基材张力产生波动,则摆辊机构可通过角位移传感器来检测摆杆偏转角度。利用摆辊

机构角度与基材张力的动力学关系可计算此处的张力值,实现张力的检测。

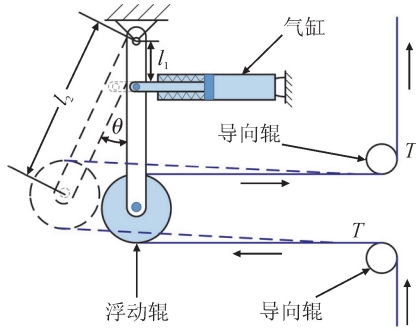


图 3 摆辊机构结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of dancer roll

忽略导向辊及浮动辊和基材之间、摆辊机构各旋转部位的摩擦力,且偏转角 θ 较小,则基材张力的计算方法为:

$$T(t) = \frac{1}{2L_2} \{-J_{eq}\ddot{\theta}(t) - b_{eq}\dot{\theta}(t) + l_1 [F_P - kl_1\theta(t)]\} \quad (1)$$

式中: $T(t)$ 为经过摆辊的基材张力; J_{eq} 为摆臂的等效转动惯量; $\theta(t)$ 为摆杆偏离平衡位置的角度; l_1 为摆杆转动中心距离气缸与摆杆连接点处的长度; l_2 为摆杆转动中心距离摆辊转动中心的长度; F_P 为气缸推力; k 为气缸内弹簧的弹力系数; b_{eq} 为摩擦系数。

在精密涂布机工作过程中,摆辊机构气缸为定气压工作模式,因此气缸推力为固定值,气缸推力设定值的计算方法为:

$$F_P = \frac{2l_2 T^*}{l_1} \quad (2)$$

式中: T^* 为稳态张力。

当涂布过程中张力产生波动,摆辊发生偏转时,本张力单元内的基材长度会随着摆辊的偏转发生变化,假设在张力处于平衡状态时,基材长度为 L_0 ,则摆辊发生偏转时的基材长度为:

$$L(t) = L_0 - 2l_2\theta(t) \quad (3)$$

2.2 涂布张力子系统建模

涂布张力子系统包括涂布机组和冷却机组,其结构如图 4 所示,是典型的两辊筒张力系统,且其中包括一个多级烘箱系统。图中, L_c 是涂布张力单元的基材长度, $L_{o1}, L_{o2}, \dots, L_{on}$ 分别为第 1, 2, \dots, n 级烘箱长度, $T_{u2}(t)$ 是放卷牵引张力单元的基材张力, $T_c(t)$ 是涂布张力子系统的基材张力, $\omega_c(t)$ 和 $\omega_L(t)$ 分别为涂布机组和冷却机组的角速度。

根据两辊筒系统基材张力的产生机理^[18],其数学模型为:

$$L_i(t)\dot{T}_i(t) = [AE - T_i(t)]V_i(t) - [AE - T_{i-1}(t)]V_{i-1}(t) + [AE - T_i(t)]L_i(t) \quad (4)$$

式中: A 为基材横截面积; E 为基材弹性模量; V_i 为第 i 机组的线速度。

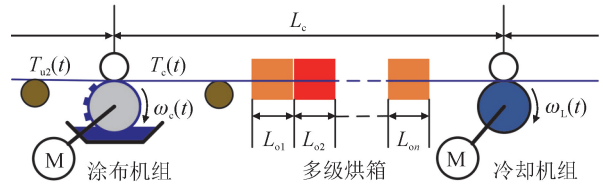


图 4 涂布张力子系统结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of coating tension subsystem

卷筒料精密涂布机在涂布张力子系统中设置了多级烘箱,用于将涂布后的基材快速烘干。多级烘箱的设置使得烘箱内基材张力变化十分复杂,在张力建模时需要考虑不同温度下基材的杨氏弹性模量变化。

根据凹版印刷装备烘箱单元张力模型相关研究^[17-18],并结合精密涂布机多级烘箱系统结构,得到包含多级烘箱的涂布张力子系统模型为:

$$\left(L_c - L_o + L_{o1} \frac{E}{E_{o1}} + \dots + L_{on} \frac{E}{E_{on}} \right) \dot{T}_c(t) = [AE - T_c(t)]R_L\omega_L(t) - [AE - T_{u2}(t)]R_c\omega_c(t) \quad (5)$$

式中: L_o 为烘箱总长度; E_{o1}, \dots, E_{on} 分别为第 1 到第 n 级烘箱内基材的杨氏弹性模量; R_c 和 R_L 分别为涂布辊筒和冷却辊筒的半径。

2.3 放卷张力子系统建模

放卷张力子系统包括放卷单元和放卷牵引单元,其结构如图 5 所示,其作用是将基材按一定的速度和张力要求展开,并逐渐传递给后续单元,是整个系统运行的基础。图中, $L_{u1}(t)$ 是放卷张力单元的基材长度, L_{u2} 是放卷牵引张力单元的基材长度, $T_{u1}(t)$ 是放卷张力单元的基材张力, $T_{u2}(t)$ 是放卷牵引张力单元的基材张力, $\omega_{u1}(t)$ 、 $\omega_{u2}(t)$ 和 $\omega_c(t)$ 分别为放卷机组、放卷牵引机组和涂布机组的角速度。

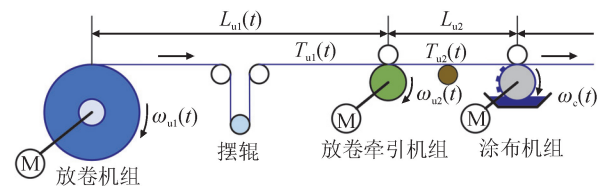


图 5 放卷张力子系统结构示意图
Fig. 5 Schematic diagram of unwinding tension subsystem

放卷机组结构如图 6 所示,其中, $R_u(t)$ 为放卷机组的料卷半径, L_D 为放卷机组与摆辊机构第一个导向辊的中心距, r 为摆辊机构第一个导向辊的半径, $L_u(t)$ 为放卷机组到摆辊机构第一个导向辊之间料带的长度。

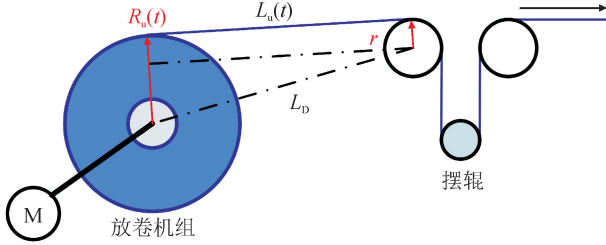


图 6 放卷机组结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of unwinding unit

根据图 6 所示的放卷机组结构各组成部分的几何关系,可以得出 $L_u(t)$ 的计算方法:

$$L_u(t) = \sqrt{L_D^2 - [R_u(t) - r]^2} \quad (6)$$

结合式(3)和式(6),可以得到放卷张力单元基材长度 $L_{u1}(t)$ 的计算方法为:

$$L_{u1}(t) = L_{u1}^* + \sqrt{L_D^2 - [R_u(t) - r]^2} - 2l_2\theta_u(t) \quad (7)$$

式中: $\theta_u(t)$ 为放卷张力单元摆辊摆杆偏离平衡位置的角度; L_{u1}^* 为放卷张力单元内其余基材的固定长度。

放卷张力子系统可看作两个两辊筒张力系统的串联,由于忽略制造误差等因素带来的影响,放卷牵引张力单元的料带长度 L_{u2} 取为常量。综合式(1)、式(4)、式(7)和图 5,可得放卷张力子系统数学模型为:

$$\begin{cases} L_{u1}(t)\dot{T}_{u1}(t) = [AE - T_{u1}(t)]R_{u2}\omega_{u2}(t) - \\ [AE - T_u]R_{u1}(t)\omega_{u1}(t) + [AE - T_{u1}(t)]\dot{L}_{u1}(t) \\ L_{u1}(t) = L_{u1}^* + \sqrt{L_D^2 - [R_u(t) - r]^2} - 2l_2\theta_u(t) \\ T_{u1}(t) = \frac{1}{2l_2} \{-J_{eq}\ddot{\theta}_u(t) - b_{eq}\dot{\theta}_u(t) + l_1[F_{P1} - \\ kl_1\theta_u(t)]\} \\ L_{u2}\dot{T}_{u2}(t) = [AE - T_{u2}(t)]R_c\omega_c(t) - \\ [AE - T_{u1}(t)]R_{u2}\omega_{u2}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: T_u 为放卷料卷内残余应力; F_{P1} 为放卷单元气缸推力。

2.4 收卷张力子系统建模

收卷张力子系统包括收卷牵引张力单元和收卷张力单元,其结构如图 7 所示,其中, $L_{r1}(t)$ 、 $L_{r2}(t)$

分别为收卷牵引张力单元、收卷张力单元的基材长度, $T_{r1}(t)$ 、 $T_{r2}(t)$ 分别为收卷牵引张力单元、收卷张力单元的基材张力, $\omega_{r1}(t)$ 、 $\omega_{r2}(t)$ 分别为收卷牵引机组、收卷机组的角速度。

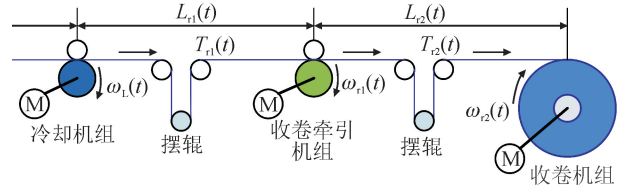


图 7 收卷张力子系统结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of rewinding tension subsystem

据式(3)可得收卷牵引张力单元基材长度为:

$$L_{r1}(t) = L_{r1}^* - 2l_2\theta_{r1}(t) \quad (9)$$

式中: L_{r1}^* 为张力稳定状态下收卷牵引张力单元内的基材长度; $\theta_{r1}(t)$ 为收卷牵引张力单元摆辊摆杆偏离平衡位置的角度。

根据式(7)得到收卷张力单元基材长度为:

$$L_{r2}(t) = L_{r2}^* + \sqrt{L_{Dr}^2 - [R_r(t) - r]^2} - 2l_2\theta_{r2}(t) \quad (10)$$

式中: $\theta_{r2}(t)$ 为收卷张力单元摆辊摆杆偏离平衡位置的角度; L_{r2}^* 为收卷张力单元内其余基材的固定长度; L_{Dr} 为收卷张力单元摆辊的第二个导向辊与收卷机组的中心距; $R_r(t)$ 为收卷机组的料卷半径。

与放卷张力子系统类似,收卷张力子系统也可看作两个两辊筒张力系统的串联。综合式(1)、式(4)、式(9)、式(10)和图 6,可得收卷张力子系统数学模型为:

$$\begin{cases} L_{r1}(t)\dot{T}_{r1}(t) = [AE - T_{r1}(t)]R_{r1}\omega_{r1}(t) - \\ [AE - T_c(t)]R_{r1}\omega_{r1}(t) + [AE - T_{r1}(t)]\dot{L}_{r1}(t) \\ L_{r1}(t) = L_{r1}^* - 2l_2\theta_{r1}(t) \\ T_{r1}(t) = \frac{1}{2l_2} \{-J_{eq}\ddot{\theta}_{r1}(t) - b_{eq}\dot{\theta}_{r1}(t) + \\ l_1[F_{P2} - kl_1\theta_{r1}(t)]\} \\ L_{r2}(t)\dot{T}_{r2}(t) = [AE - T_{r2}(t)]R_{r2}(t)\omega_{r2}(t) - \\ [AE - T_{r1}(t)]R_{r1}\omega_{r1}(t) + [AE - T_{r2}(t)]\dot{L}_{r2}(t) \\ L_{r2}(t) = L_{r2}^* + \sqrt{L_{Dr}^2 - [R_r(t) - r]^2} - 2l_2\theta_{r2}(t) \\ T_{r2}(t) = \frac{1}{2l_2} \{-J_{eq}\ddot{\theta}_{r2}(t) - b_{eq}\dot{\theta}_{r2}(t) + \\ l_1[F_{P3} - kl_1\theta_{r2}(t)]\} \end{cases} \quad (11)$$

式中: F_{P2} 为收卷牵引单元气缸推力; F_{P3} 为收卷单元气缸推力。

2.5 张力系统耦合模型

卷筒料精密涂布机张力系统包含放卷张力子系统、涂布张力子系统、收卷张力子系统三个子系统。综合式(5)、式(8)、式(11)可得张力系统全局耦合模型为:

$$\begin{cases}
 L_{u1}(t)\dot{T}_{u1}(t) = [AE - T_{u1}(t)]R_{u2}\omega_{u2}(t) - \\
 [AE - T_u]R_{u1}(t)\omega_{u1}(t) + [AE - T_{u1}(t)]\dot{L}_{u1}(t) \\
 L_{u2}\dot{T}_{u2}(t) = [AE - T_{u2}(t)]R_c\omega_c(t) - \\
 [AE - T_{u1}(t)]R_{u2}\omega_{u2}(t) \\
 \left(L_c - L_o + L_{o1}\frac{E}{E_{o1}} + \dots + L_{on}\frac{E}{E_{on}}\right)\dot{T}_c(t) = \\
 [AE - T_c(t)]R_l\omega_l(t) - \\
 [AE - T_{u2}(t)]R_c\omega_c(t) \\
 L_{r1}(t)\dot{T}_{r1}(t) = [AE - T_{r1}(t)]R_{r1}\omega_{r1}(t) - \\
 [AE - T_c(t)]R_l\omega_l(t) + [AE - T_{r1}(t)]\dot{L}_{r1}(t) \\
 L_{r2}(t)\dot{T}_{r2}(t) = [AE - T_{r2}(t)]R_{r2}(t)\omega_{r2}(t) - \\
 [AE - T_{r1}(t)]R_{r1}\omega_{r1}(t) + [AE - T_{r2}(t)]\dot{L}_{r2}(t)
 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可见,卷筒料精密涂布机张力系统是由放卷、放卷牵引、涂布、收卷牵引和收卷 5 个张力单元串联组成的 5 段张力系统,其输入量是各张力单元的机组电机角速度,输出量是各张力单元料带的张力值;各张力单元通过基材张力和机组角速度形成多重耦合关系,各单元内部的基材张力和机组速度之间也同样存在着耦合作用。由此可见,该数学模型准确揭示了卷筒料精密涂布机中存在的多物理量耦合、非线性、多干扰等特点。式(12)中含摆辊的张力单元相关量需要用辅助方程计算,具体的计算方法为:

$$\begin{cases}
 L_o = L_{o1} + L_{o2} + \dots + L_{on} \\
 L_{u1}(t) = L_{u1}^* + \sqrt{L_{D1}^2 - [R_u(t) - r]^2} - 2l_2\theta_u(t) \\
 T_{u1}(t) = \frac{1}{2L_2}\{-J_{eq}\ddot{\theta}_u(t) - b_{eq}\dot{\theta}_u(t) + \\
 l_1[F_{P1} - kl_1\theta_u(t)]\} \\
 L_{r1}(t) = L_{r1}^* - 2l_2\theta_{r1}(t) \\
 T_{r1}(t) = \frac{1}{2L_2}\{-J_{eq}\ddot{\theta}_{r1}(t) - b_{eq}\dot{\theta}_{r1}(t) + \\
 l_1[F_{P2} - kl_1\theta_{r1}(t)]\} \\
 L_{r2}(t) = L_{r2}^* + \sqrt{L_{Dr}^2 - [R_r(t) - r]^2} - 2l_2\theta_{r2}(t) \\
 T_{r2}(t) = \frac{1}{2L_2}\{-J_{eq}\ddot{\theta}_{r2}(t) - b_{eq}\dot{\theta}_{r2}(t) + \\
 l_1[F_{P3} - kl_1\theta_{r2}(t)]\}
 \end{cases} \quad (13)$$

3 模型仿真分析

为了分析和验证本文所建立的卷筒料精密涂布机张力系统模型的正确性,利用 MATLAB 软件对其进行仿真分析。首先针对涂布张力子系统进行仿真,从而分析多级烘箱的设置对本段张力的影响;然后对张力系统全局耦合模型进行仿真分析,以验证本文所建立的精密涂布机张力系统全局耦合模型的正确性。

3.1 涂布张力子系统模型仿真

多级烘箱是卷筒料精密涂布机的重要组成部分,其多级烘箱最多可达十级,长度为 60m,导致涂布张力子系统的基材长度远远高于其他张力单元。因此,本部分仿真旨在研究与分析不同长度的烘箱设置对涂布张力子系统基材张力的影响。仿真所选择的系统参数如表 1 所示。

表 1 涂布张力子系统模型仿真参数

参数	单位	数值
A	m ²	2.7 × 10 ⁻⁵
E	Pa	4.89 × 10 ⁹
R _c	m	0.930
R _l	m	0.300

在涂布机系统的同步速度为 100 m/min,稳态张力为 50N,多级烘箱温度均设置为 120℃ 的情况下,在第 60 s 令涂布张力子系统的输入张力 T_{u2} 产生大小为 4 N、持续时间为 2 s 的张力脉冲,并且分别在不设置烘箱、设置一级烘箱、设置五级烘箱以及设置十级烘箱的条件下对涂布张力子系统进行仿真,其张力响应曲线如图 8 所示。接着,在同等系统稳定条件下令 T_{u2} 产生大小为 4N、角频率为 5 rad/s 的正弦波动,其张力响应曲线如图 9 所示。

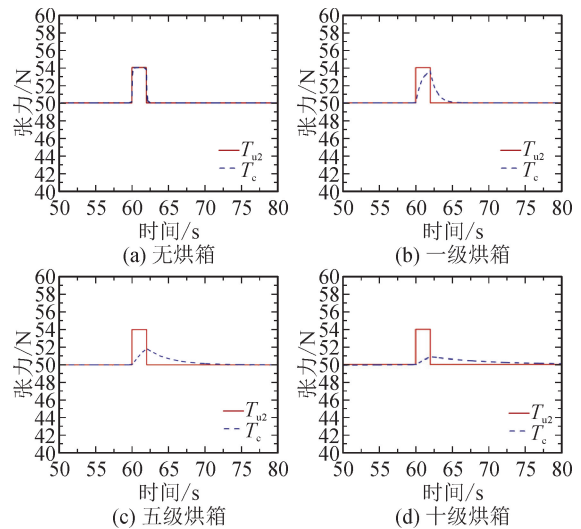
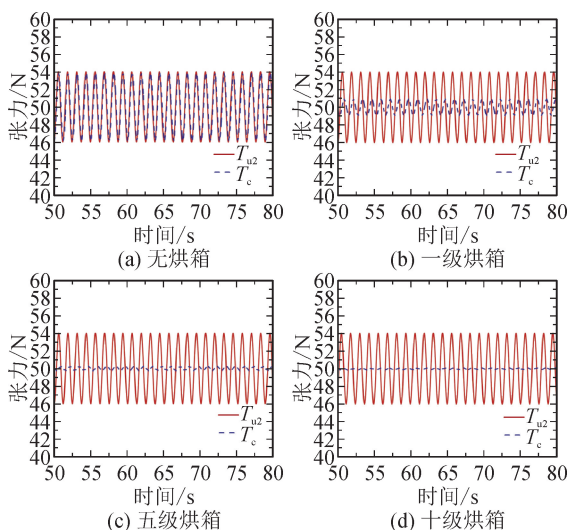


图 8 T_{u2} 产生脉冲的仿真曲线

Fig. 8 Simulation curve of T_{u2} generating pulse

图9 T_{u2} 产生正弦波动的仿真曲线Fig. 9 Simulation curve of T_{u2} generating sine wave

通过对两组仿真曲线的观察与分析可以看出,随着涂布张力子系统中烘箱级数的增加,放卷牵引单元基材张力 T_{u2} 的波动对涂布张力子系统基材张力 T_c 的影响越来越小,而在十级烘箱设置下的涂布张力子系统基材的张力波动小于精密涂布机基材张力控制精度 $\pm 1\text{N}$ 的要求,可以忽略不计。因此,在研究人员对卷筒料精密涂布机进行张力系统的控制器设计时,对安装十级烘箱的涂布张力子系统的基材张力变化可以不进行控制,从而可减少系统的计算量,节约系统资源。

3.2 张力系统全局耦合模型仿真

为了验证本文所建立的卷筒料精密涂布机张力系统全局耦合模型能否准确反映涂布机张力系统强耦合性、向后传播的特点,本节在四种条件下对本文所建立的全局耦合模型进行仿真分析,仿真所选择的系统参数如表2所示。

首先,令放卷张力 T_{u1} 产生大小为 4N 、持续时间为 2s 的张力脉冲;接着,令 T_{u1} 在 $[-4, 4]$ 区间内产生随机波动;然后,令冷却机组电机转速产生 0.02 r/min 的速度阶跃;最后,令放卷机组电机转速产生 0.02 r/min 的速度阶跃。四种工况下的张力系统全局耦合模型仿真曲线如图10所示。

根据四组仿真结果可知,对于卷筒料精密涂布机,前段张力的变化会导致后续张力单元的张力波动,说明张力具有耦合性和传播性的特点。同时,通过对比涂布张力子系统前后部分的张力曲线可知,十级烘箱的设置使得该段之前的张力波动很难对该段之后的张力产生影响,说明随着料带长度的变化,张力波动的传递速率也随之变化,而对于卷筒料精密涂布机来说,在进行张力控制器设计时,完全可以忽略烘箱段的张力波动,不对该段进行张力控制。

表2 全局耦合张力模型仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters of global coupling model

参数	单位	数值
A	m^2	2.70×10^{-5}
E	Pa	4.89×10^9
R_{u1}, R_{r2}	m	0.500
R_{u2}, R_{r1}	m	0.093
R_c	m	0.930
R_L	m	0.300
L_{u1}^*	m	4.628
L_{u2}	m	2.650
L_c	m	1.200
L_{r1}	m	2.300
L_{r2}	m	1.391
l_1	m	0.154
l_2	m	0.350
T^*	N	50

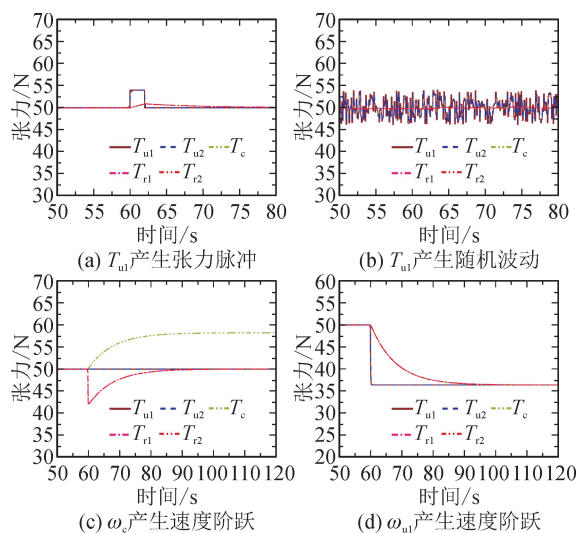


图10 全局耦合模型仿真曲线

Fig. 10 Simulation curve of global coupling model

4 结 语

针对制约卷筒料精密涂布机张力控制精度提升的瓶颈问题,本文以卷筒料精密涂布机为研究对象,建立了其张力系统耦合机理模型,较为准确地揭示了精密涂布机各张力单元之间存在的多物理量耦合机制,反映了涂布机张力系统的非线性、强耦合、强干扰等特点。然而,精密涂布机张力系统涉及机械、电气、液压、气动、摩擦等多个学科,涵盖放卷、放卷牵引、涂布、收卷牵引和收卷5个张力单元,是典型的多输入-多输出、非线性、强耦合、强干扰系统,其

建模工作不可能一蹴而就。我们将在后续的研究过程中继续对所建立的模型进行完善和验证。

参考文献:

- [1] 李路海, 方一. 涂布复合技术概论[M]. 北京: 文化发展出版社, 2017.
- [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] ABDULRAHMAN S, WANG C, CAO C, et al. Improvement of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ thin film using the additive 1,8-diiodooctane for planar heterojunction perovskite cells[J]. *Physica B-Condensed Matter*, 2017, 522: 43-47.
- [5] GRANT B, BANDERA Y, FOULGER S H, et al. Boolean and elementary algebra with a roll-to-roll printed electrochemical memristor[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021: 2101108.
- [6] 史文亮. 凹版印刷电子装备张力系统耦合与解耦控制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
SHI Wenliang. Research on coupling modeling and decoupling control of tension system for gravure printing electronic equipment[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [7] KANG C, LEE B. MIMO tension modelling and control for roll-to-roll converting machines[C]// Proceedings of the 17th World Congress, International Federation of Automatic Control, Korea: IFAC Secretariat, 2008: 11877-11882.
- [8] 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): 05HC11.
- [9] JEON S, KIM C, KIM C. Fast stabilization of web tension in drying process of roll-to-roll printing equipment for printed electronics[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(12): 5069-5074.
- [10] KIM C, JEON S W, KIM C H. Reduction of linearly varying term of register errors using a dancer system in roll-to-roll printing equipment for printed electronics[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(9): 1485-1493.
- [11] JEONG J, GAFUROV A N, PARK P, et al. Tension modeling and precise tension control of roll-to-roll system for flexible electronics[J]. *Flexible and Printed Electronics*, 2021, 6(1): 015005.
- [12] HUANG P Y, CHENG M Y, SU K H, et al. Control of roll-to-roll manufacturing based on sensorless tension estimation and disturbance compensation[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2021, 44(2): 89-103.
- [13] 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): 011018.
- [14] 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): 051003.
- [15] LU Y, PAGILLA P. Modeling of temperature distribution in moving webs in roll-to-roll manufacturing[J]. *Journal of Thermal Science & Engineering Applications*, 2014, 6(4): 041012.
- [16] 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-Transactions of the ASME*, 2018, 140(5): 051005.
- [17] 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): 145-151.
HE Kui, TAO Tao, LIU Shanhui. Analysis for effects of drying temperature on web tension in gravure printing machine[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(12): 145-151.
- [18] HE K, LIU S, WANG K, et al. Effect of environment temperature on web tension in shaft-less drive gravure printing system[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(2): 1-10.

(责任编辑 周 蓓)