

文章编号: 1008-1542(2024)01-0026-09

## 基于柱形容器缠绕特性的控制稳定性分析

王康<sup>1</sup>, 路永婕<sup>2</sup>, 郭子腾<sup>3</sup>, 王加富<sup>1</sup>, 张海东<sup>1</sup>, 王君哲<sup>1</sup>, 陈丰雨<sup>1</sup>

- 中国兵器工业集团山东北方现代化学工业有限公司, 山东济南 250031;
- 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北石家庄 050043;
- 河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018)

**摘要:** 针对玻璃纤维缠绕机在工作中由于张力不稳定导致的线型变化, 以及在高速缠绕模式下的张力调节不稳定的问题, 设计了自适应模糊PID控制策略以及适用于高速缠绕工况的滑模控制策略。首先, 针对缠绕工况建立缠绕动力学模型、张力控制模型; 其次, 引入模糊PID控制策略和滑模控制策略分别对不同工况下的缠绕特性进行MATLAB-Simulink仿真, 寻找最优控制策略; 最后, 基于被验证的最优控制策略进行实验。结果表明, 在模糊PID控制的调节下, 不同速度变化下的缠绕张力相对于无控制得到较好改善, 提高了柱形容器在缠绕时的线性稳定性和张力稳定性。模糊PID控制对缠绕时的张力调节精度优于滑模控制, 为大型管道缠绕设备提供了新的研究思路。

**关键词:** 自动控制理论; 纤维缠绕; MATLAB-Simulink 仿真; 模糊PID控制; 滑模控制; 硬件实验

中图分类号: TH162 文献标识码: A DOI: 10.7535/hbkd.2024yx01003

## Analysis of control stability based on winding characteristics of cylindrical vessels

WANG Kang<sup>1</sup>, LU Yongjie<sup>2</sup>, GUO Ziteng<sup>3</sup>, WANG Jiafu<sup>1</sup>, ZHANG Haidong<sup>1</sup>,  
WANG Junzhe<sup>1</sup>, CHEN Fengyu<sup>1</sup>

- Shandong North Modern Chemical Industry Company Limited, China Weapons Industry Group, Jinan, Shandong 250031, China;
- The State Key Laboratory of Structural Mechanics Behavior and System Safety of Traffic Engineering, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;
- School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

**Abstract:** Aiming at the linear change caused by tension instability in the work of glass fiber winding machine and the instability of tension adjustment in high-speed winding mode, an adaptive fuzzy PID control strategy and a sliding mode control strategy suitable for high-speed winding conditions were designed. Firstly, the winding dynamic model and tension control

收稿日期: 2023-09-06; 修回日期: 2023-12-10; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 国家自然科学基金(12072204, 11572207); 河北省自然科学基金(A2020210039)

第一作者简介: 王康(1993—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事兵器工程类机械动力学控制方面的研究。

通信作者: 路永婕, 教授。E-mail: 548282566@qq.com

王康, 路永婕, 郭子腾, 等. 基于柱形容器缠绕特性的控制稳定性分析[J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(1): 26-34.

WANG Kang, LU Yongjie, GUO Ziteng, et al. Analysis of control stability based on winding characteristics of cylindrical vessels[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(1): 26-34.

model were established for the winding condition. Secondly, the fuzzy PID control strategy and sliding mode control strategy were introduced to simulate the winding characteristics under different working conditions by MATLAB-Simulink, and the optimal control strategy was found. Finally, the experiment was carried out based on the verified optimal control strategy. The results show that under the regulation of fuzzy PID control, the winding tension is better improved than that without control under different speed changes, and the linear stability and tension stability of the cylindrical container are improved. The tension adjustment accuracy of fuzzy PID control is better than that of sliding mode control, which provides a new research idea for large pipeline winding equipment.

**Keywords:** automatic control theory; filament winding; MATLAB-Simulink simulation; fuzzy PID control; sliding mode control; hardware experiment

玻璃纤维复合材料因具有良好的绝缘性、耐热性、抗腐蚀性以及机械强度高优异性能被广泛应用<sup>[1]</sup>,尤其在军用火箭弹壳领域,玻璃纤维产品因轻量化的性能正在逐步替代金属火箭弹壳<sup>[2]</sup>。玻璃纤维缠绕机是一种可实现对称成型的工艺设备,其工作原理是将多线束纤维在丝嘴上排成一定宽度缠绕在芯模上,缠绕时的张力是可控范围内的动态变化值。在实际工作中,一是压线滚在滚动中会滞留一些残余玻璃纤维丝,增大了玻璃纤维丝的输送摩擦力;二是缠绕速度的增加,使得缠绕机的张力调节不及时,这都会改变玻璃纤维产品的强度<sup>[3-4]</sup>,因此引入控制策略对张力误差控制和速度自适应调节具有重要的意义。

在国内外文献中,缠绕机大多以多轴缠绕、缠绕张力控制研究为主。文献[5-8]主要针对缠绕过程中芯模缠绕的线型排布和满足纤维张力条件进行改善,虽然这是影响纤维制品强度的关键因素,但是张力与线速度之间存在耦合现象。文献[9-12]引入了磁流变制动结构,提供了一种反向张力,优化了张力控制系统和延长了零件寿命,但是张力反制动系统在断纱时会产生连续的反向制动力。国内外对缠绕机的张力控制多以模糊控制或者模糊 PID 控制为主,对缠绕机滑模控制策略研究较少。文献[13-17]对缠绕机结构进行了建模分析,在控制系统中初步实现了模糊 PID 控制速率对主速辊的转速控制,结合生产过程中的实际需求,通过仿真实验验证了不同张力控制目标的可行性,但是缺少硬件实验验证。文献[18-20]针对缠绕机纱线张力的随机性和不稳定性,在 PID 控制器的基础上设计了一种纱线张力控制系统,采用模糊 PID 控制算法对纱线张力系统进行控制,通过仿真表明,采用模糊 PID 控制系统具有较好的张力响应,消除了系统的非线性和不确定性。文献[21-26]分析了滑模控制得到广泛应用的主要原因。

基于上述研究现状,本文结合生产线在机械结构和控制系统方面的需求,明确自动缠绕机主要技术指标要求,选择了合适的机械结构方案和控制系统方案,通过建立运动模型、控制模型对缠绕张力和速度进行调节,提高控制稳定性。

## 1 缠绕机运动特性分析

对缠绕机进行整车缠绕运动分析,包括伸臂、丝嘴角度、原点位置等;对张力控制进行建模分析。

### 1.1 缠绕机整车缠绕运动分析

本文以计算机数控缠绕机为研究对象,其主要由芯模、卡盘、床体台架、丝嘴等组成,如图 1 所示。

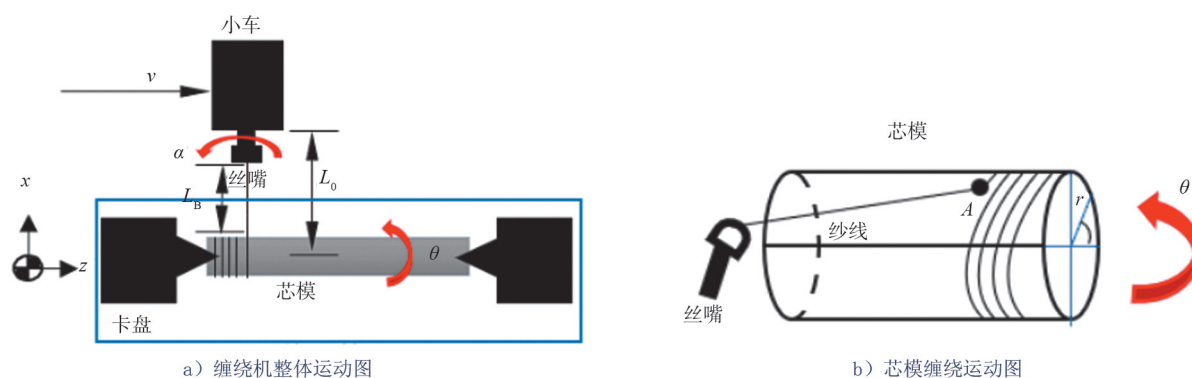


图 1 缠绕机运动模型图

Fig. 1 Motion model of winding machine

根据缠绕原理得到整机缠绕运动方程:

小车伸臂运动方程:

$$L_0 - L_B = L_x + r / \cos \theta. \quad (1)$$

小车行程运动方程:

$$Z_v = Z_A + r / (\cot \theta^* \tan \alpha). \quad (2)$$

芯模转角运动方程:

$$\omega = \dot{\theta} + (\theta^* - \theta_0^*). \quad (3)$$

式(1)一式(3)中:落纱点坐标  $A(r \cos \theta^*, r \sin \theta^*, Z_A)$ ;  $\theta$  为芯模转动角度, rad;  $L_B$  为丝嘴到芯模的距离;  $\theta_0^*$  为初始落纱点  $A_0$  的相位角, rad;  $\theta^*$  为缠绕时下一个落纱点  $A_i$  的相位角, rad;  $\alpha$  为丝嘴缠绕角度, rad;  $L_x$  为小车伸臂长度, m;  $Z_v$  为轴向缠绕距离;  $\omega$  为芯模转角;  $L_0$  为伸臂总长度, m;  $Z_A$  为图中 A 点落纱点坐标。

## 1.2 缠绕机张力运动分析

玻璃纤维的缠绕张力是通过伺服电机的制动作用来控制,并通过芯模的转动而施加给玻璃纤维的作用力,如图2所示。由于玻璃纤维在生产过程中存在绕线运动和缠绕线型等复杂的工艺性问题,因此在进行玻璃纤维缠绕机张力控制系统设计时需考虑更多因素。

对放卷辊取矩,力矩平衡方程如式(4)所示。

$$M(t) = F_2(t)R(t) + M_{f1} + \dot{J}(t)\omega(t) + J(t)\dot{\omega}(t) + M_{f2}, \quad (4)$$

式中:  $F_2$  是纤维张力, N;  $R(t)$  是纱团旋转半径, m;  $M(t)$

是伺服电机阻力矩,  $N \cdot m$ ;  $M_{f1}$  是黏性摩擦力矩,  $N \cdot m$ ;  $\omega(t)$  是旋转角速度, rad/s;  $J(t)$  是卷辊和纱团的转动惯量,  $kg \cdot m^2$ ;  $M_{f2}$  是干性摩擦力矩,  $N \cdot m$ 。

忽略压辊间的摩擦,纤维的张力不变,使得  $F_1 = F_2$ 。缠绕机做加速或减速缠绕时,使得玻璃纤维产生的张力也处于动态变化过程中。设纤维的线密度为  $\rho$ , 纤维的长度为  $L$ , 压辊的转动惯量为  $J_g$ , 方程如式(5)所示。

$$F_1(t) - F_2(t) = \rho L \dot{\omega}(t) + J_g \dot{\omega}(t) / R^2. \quad (5)$$

对式(5)进行拉氏变换,得到式(6)。

$$T_1(S) = 1/R(S)M(S) + W(S), \quad (6)$$

式中:  $W(S) = [\rho L + J_g / R^2] \dot{\omega}(t) - J / R \omega(t)$ ;  $R(S) \approx R$ 。

## 2 缠绕机控制策略分析

在 MATLAB-Simulink 中建立模糊 PID 控制模型和滑模控制模型进行分析和优化。

### 2.1 模糊 PID 控制策略分析

将 PID 控制器与模糊控制器相结合,通过建立的模糊规则对 PID 控制器进行调整以达到对被控对象最大的控制效果,根据模糊控制器的设计进行定义,输入变量偏差  $E$  和偏差变化率  $E_c$  以及输出变量  $U$  的模糊集均为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ , 分别表示负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。论域数值范围的选择是仿真结果得出的。 $E$  的论域范围是  $[-6, 6]$ ,  $E_c$  的论域范围是  $[-10, 10]$ ,  $U$  的论域范围是  $[-1, 1]$ , 模糊规则如表1所示。

表1 模糊控制规则

Tab.1 Fuzzy control rules

$E/U/E_c$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NS
NM	PB	PB	PB	PM	NS	ZO	NS
NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

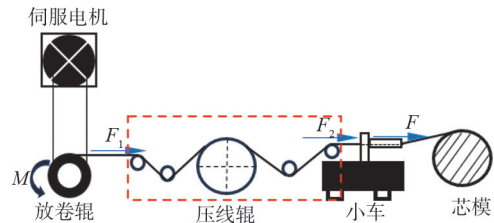


图2 张力系统受力示意图

Fig.2 Force diagram of tension system

本文中输入变量张力误差、速度误差和输出变量补偿误差均采用高斯隶属函数,基于文中设定的模糊子集和基本论域,图 3、图 4 为输入变量隶属函数图,图 5 为输出变量隶属函数图,图 6 为模糊控制关系示意图。

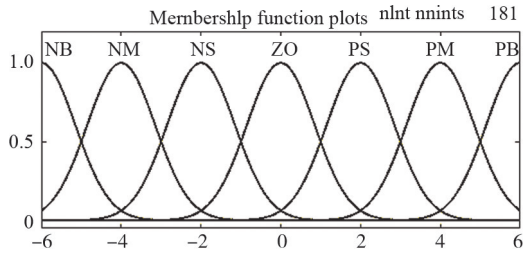


图 3 输入  $\Delta F$  隶属函数图  
Fig. 3 Input  $\Delta F$  membership function

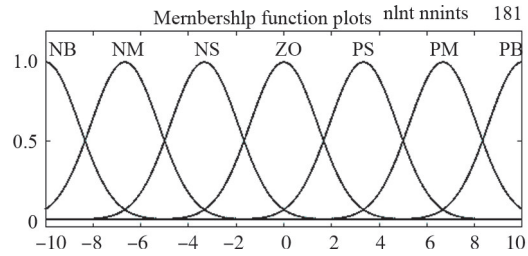


图 4 输入  $\Delta v$  隶属函数图  
Fig. 4 Input  $\Delta v$  membership function

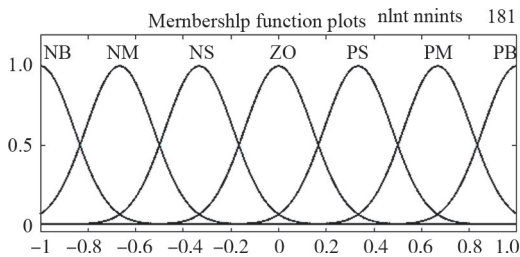


图 5 输出  $U$  隶属函数图  
Fig. 5 Output  $U$  membership function

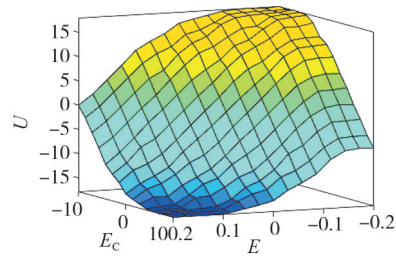


图 6 模糊控制关系图  
Fig. 6 Fuzzy control relationship

基于 MATLAB-Simulink 的模糊 PID 控制策略模型结构如图 7 所示。

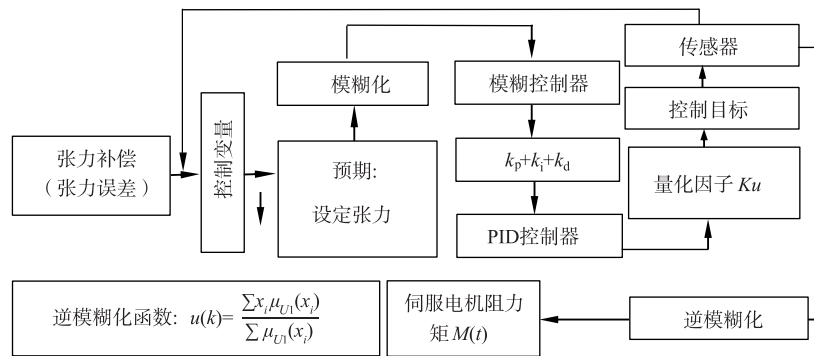


图 7 模糊 PID 控制器结构图  
Fig. 7 Fuzzy PID controller structure

### 2.2 滑模控制策略分析

滑模控制的优点是能够克服系统产生的不确定性因素,对于某些干扰和未建模的动态数据具有很强的优化稳定性,系统的特性和参数只取决于设计的超平面而与外界干扰没有关系,所以滑模变结构控制具有很强的鲁棒性。滑模控制相较于 PID 模糊控制反应时间快且对参数变化扰动不灵敏,无需系统在线辨识,所以适用于直线方向制动,其工作原理如式(7)和图 8 所示,其中  $A, c, \epsilon, k$  都是增益系数。

$$i_q = \frac{1}{A} \int (cx_2 + \epsilon \cdot \sin s + ks) dt \quad (7)$$

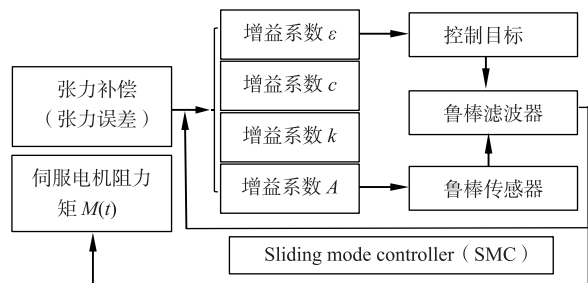


图 8 滑模控制器结构图  
Fig. 8 Sliding mode controller structure

在 Simulink 滑模控制器中,同时设置了 4 个增益系数用于调整滑模控制器。

### 2.3 控制策略仿真分析

为了验证模糊 PID 控制器和滑模控制器的控制效果,结合缠绕机张力控制系统的数学模型,利用 MATLAB-Simulink 工具对张力控制、缠绕走车进行了仿真研究。在仿真控制中,设定 3 组缠绕机的缠绕速度分别为 0.4、0.7 和 0.9 m/s,3 组仿真的恒定张力为 40 N,如图 9—图 11 所示。

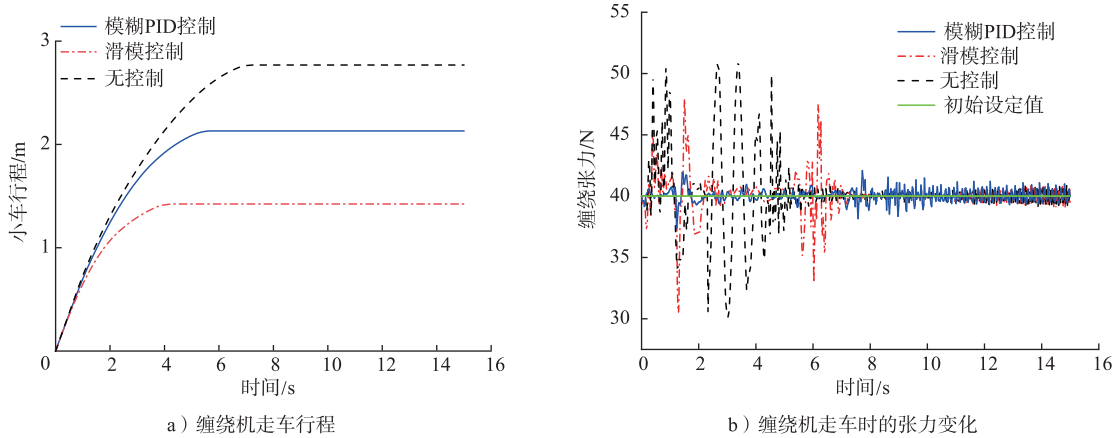


图 9  $v=0.4$  m/s 时小车行程和张力  $F=40$  N 时的控制效果图

Fig. 9 Curve of trolley travel when  $v=0.4$  m/s and the control effect at tension  $F=40$  N

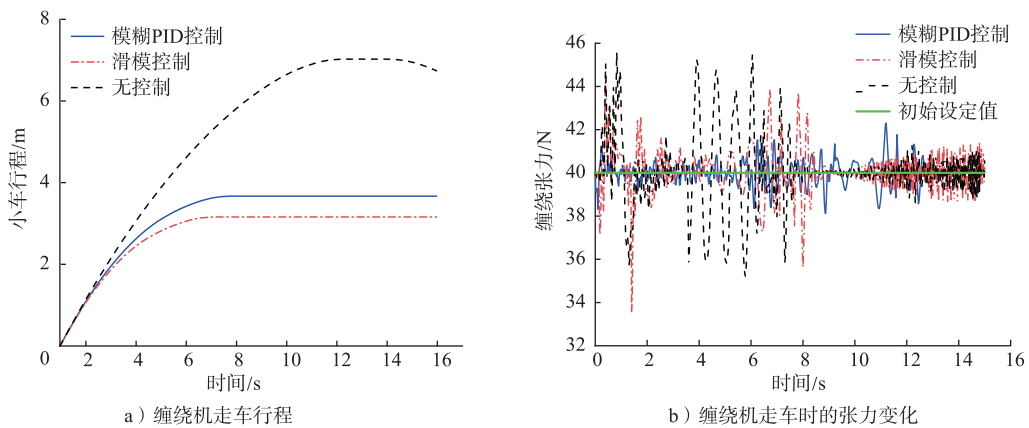


图 10  $v=0.7$  m/s 时小车行程和张力  $F=40$  N 时的控制效果图

Fig. 10 Curve of trolley travel when  $v=0.7$  m/s and the control effect at tension  $F=40$  N

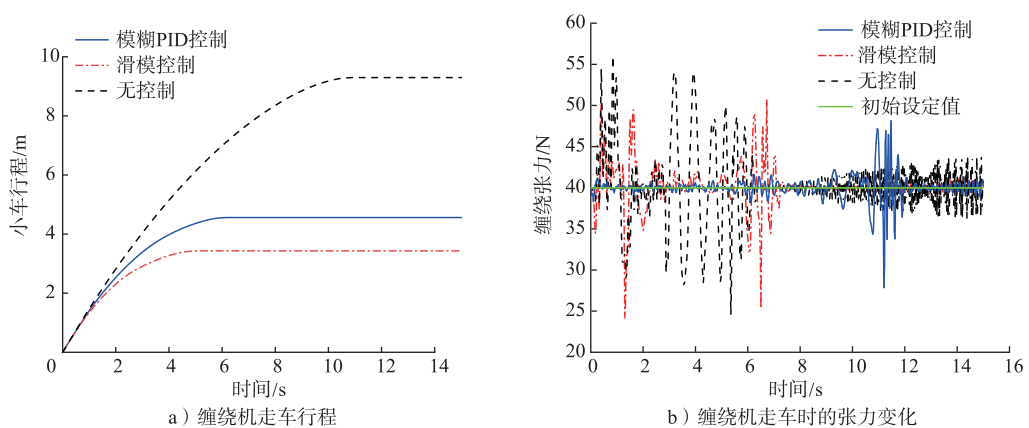


图 11  $v=0.9$  m/s 时小车行程和张力  $F=40$  N 时的控制效果图

Fig. 11 Curve of trolley travel when  $v=0.9$  m/s and the control effect at tension  $F=40$  N

由图 9 可知,在张力控制中,模糊 PID 控制在缠绕时的控制优于滑模控制,张力跳动误差以 40 N 为基准范围,保持在±5 N 内;在进行小车(行程)加速、恒速、减速控制优化中,滑膜控制依靠其自身控制的灵敏性,优化效果优于模糊 PID 控制;但相较于无控制的缠绕机,使用这两种控制方法都可以明显改善缠绕机缠绕张力误差大的问题。

由图 10 可知,在  $v=0.7\text{ m/s}$  的小车行程缠绕控制中,滑模控制和模糊 PID 控制改善相较于无控制都得到了较好的优化;模糊 PID 控制对张力的改善调节维持在±5 N 内,滑模控制对张力的调节在 1.3 s 时降到了 34 N 以下,超过了无控制,对张力调节较差。

模糊 PID 控制小车行程时的加速、恒速、减速控制的优化中虽然相较于无控制得到较大改善,但是不如滑模控制灵敏;在缠绕时的张力控制中,滑模控制的最大误差超过了±10 N,张力的调节差于模糊 PID 控制。对于上述 3 组实验对照的数据,选择仿真数据跳动的最大值为参照点如表 2 所示。

表 2 缠绕机在不同速度和张力控制下的最优值

Tab. 2 Maximum and minimum values of winding machine under different speed and tension control

参 数	小车速度/(m/s)					
	0.4		0.7		0.9	
	Fuzzy PID	Sliding-mode	Fuzzy PID	Sliding-mode	Fuzzy PID	Sliding-mode
小车最大行程/m	2.1	1.4	3.6	3.1	4.5	3.4
缠绕最大张力/N	37	30	42.2	33.5	27.8	24.1

以上数据表明,在滑模控制和模糊 PID 控制器作用下的小车行程和缠绕张力相对于无控制模式都得到改善,在缠绕张力调节方面滑膜控制相对于模糊 PID 改善较小。滑模控制使得小车行程改善最为明显,仿真时最短响应时间为 2 s。

### 3 最优控制策略的硬件验证

本文选择模糊 PID 控制作为最优控制策略进行硬件实验。

#### 3.1 硬件设备

在计算机缠绕机上进行硬件实验,该硬件平台由缠绕车、底盘台架、伺服电机、玻纤张力电器柜、计算机操作平台等组成,上位机与下位机的传输通过电器柜连接到实车,实验平台信号传输原理见图 12。

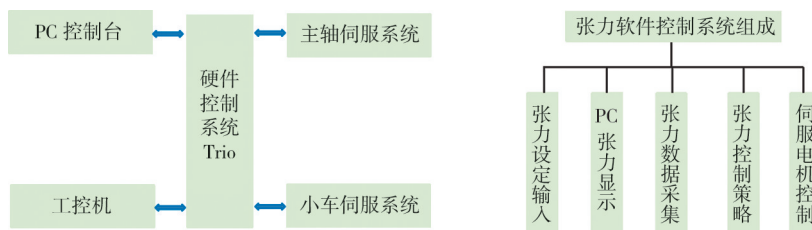


图 12 实验平台信号传输原理

Fig. 12 Signal transmission principle of the experimental platform

#### 3.2 硬件实验

设定缠绕张力为 40 N,缠绕速度设置成 PC 平台的 20%,40%,60%。20%,40%,60%代表了缠绕机的速度比例,是一个相对变化量,设备中可调速度比例区间为 0~120%,缠绕平台的速度和张力调试如图 13—图 15 所示。缠绕长度模拟为 5 m,缠绕机工作路径为一个单向缠绕模式。由于硬件实验本身存在迟滞因素,要根据实际情况进行验证。

硬件实验数据表明,缠绕车在无控制模式下不会停止缠绕,会发生小车撞击床体台架的事故;使用模糊 PID 控制策略的调节,小车在 60%速度时会超过 5 m 缠绕长度,调节不太理想;在 20%速度时缠绕张力的误差调节保持在 5 N 内,在 60%的速度中张力调节维持在 12 N 内,相较于无控制没有实现较好调节。对硬件实验点取数据跳动的最大值为参照点如表 3 所示。

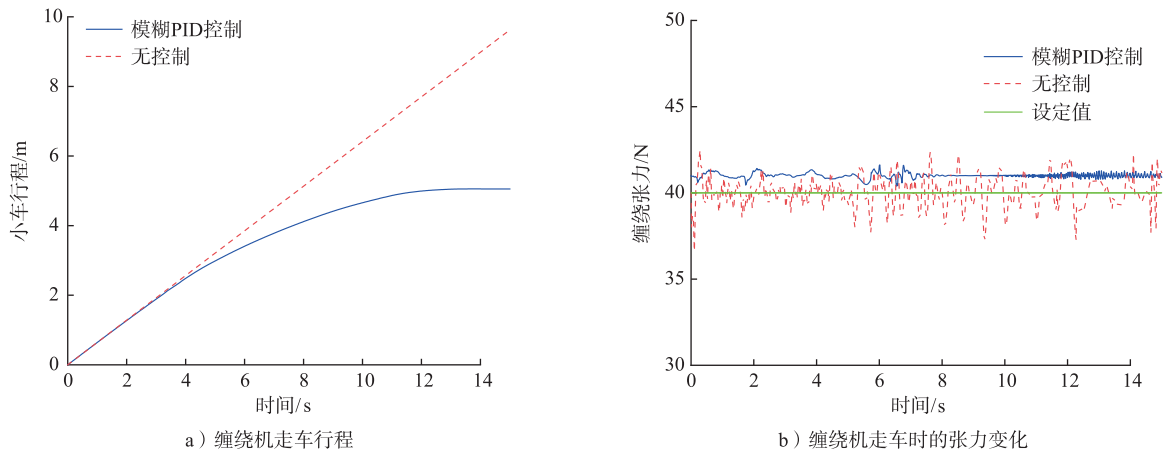


图 13 速度比例  $v=20\%$  时小车行程和张力  $F=40\text{ N}$  时的控制效果图

Fig. 13 Curve of trolley travel when  $v=20\%$  and the control effect at tension  $F=40\text{ N}$

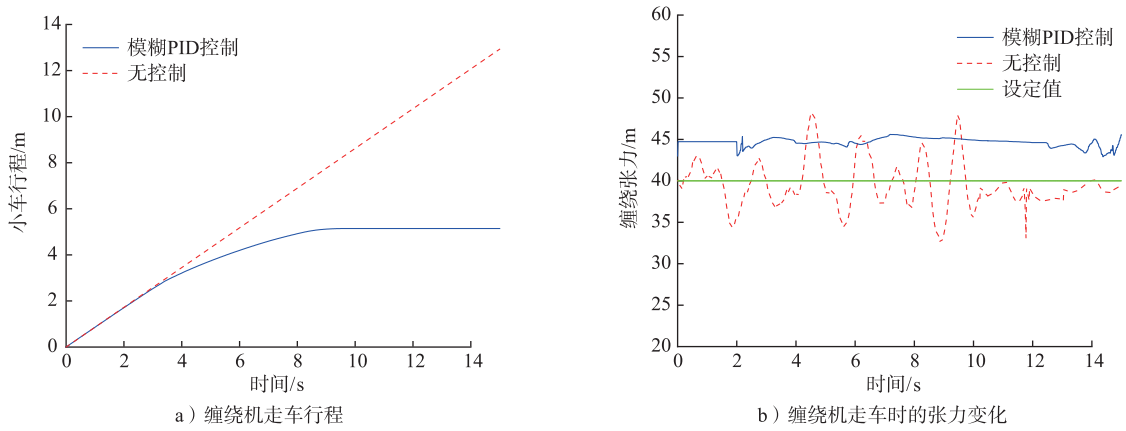


图 14 速度比例  $v=40\%$  时小车行程和张力  $F=40\text{ N}$  时的控制效果图

Fig. 14 Curve of trolley travel when  $v=40\%$  and the control effect at tension  $F=40\text{ N}$

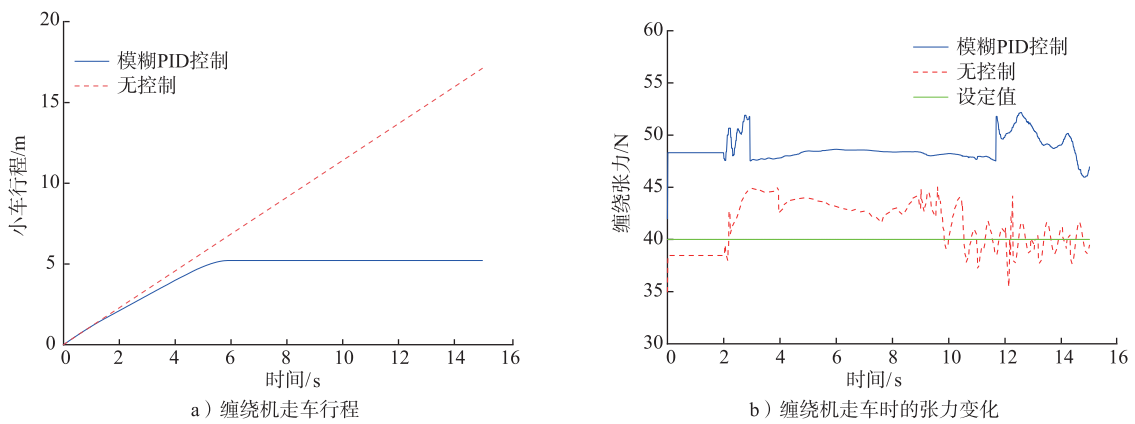


图 15 速度比例  $v=60\%$  时小车行程和张力  $F=40\text{ N}$  时的控制效果图

Fig. 15 Curve of trolley travel when  $v=60\%$  and the control effect at tension  $F=40\text{ N}$

表 3 缠绕机在不同速度比例和张力控制下的最值

Tab. 3 Maximum and minimum values of winding machine under different speed ratio and tension control

参 数	小车速度/(m/s)					
	0.4		0.7		0.9	
	Fuzzy PID	Sliding-mode	Fuzzy PID	Sliding-mode	Fuzzy PID	Sliding-mode
小车最大行程/m	2.1	1.4	3.6	3.1	4.5	3.4
缠绕最大张力/N	37	30	42.2	33.5	27.8	24.1

## 4 结 语

本文以计算机控制缠绕机为研究对象,引入了基于张力误差、缠绕速度误差的补偿策略,通过 MATLAB-Simulink 建模仿真验证最优控制策略,并进一步进行硬件实验,主要结论如下。

1)通过引入的控制策略,在仿真中使得缠绕机设备的张力误差、速度误差得到一定的调节,模糊 PID 控制器在  $v=0.4$  m/s 时的缠绕过程中使得张力误差控制在  $\pm 5$  N 内,相对于滑模控制改善了 42.8%,验证了控制策略相对于无控制模式的有效性。

2)模糊 PID 控制在硬件实验中优化了缠绕机在运动过程中产生的张力跳动和速度耦合误差,在速度比例为  $v=40\%$  的缠绕过程中相对于无控制模式改善了 31.7%,验证了模糊 PID 控制对被控对象具有更好的可调节性,在实际应用中对于设计复材设备具有一定的参考价值。

本文不足之处在于缠绕工况相对简单,高速缠绕模式调节较差。下一步拟将滑模结构和模糊 PID 结构结合用于缠绕机中,研究在有效控制缠绕行程的同时还可以稳定调节缠绕张力的可行性。

## 参考文献/References:

- [1] KOMBAROV V, KRYZHYVETS Y, BILETSKYI I, et al. Numerical control of fiberglass pipe bends manufacturing[C]//2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology(KhPIWeek). Ukraine:IEEE,2021:357-362.
- [2] ASTASHKIN V M, MISHNEV M V. On the development of the manufacturing technology of fiberglass cylindrical shells of gas exhaust trunks by buildup winding[J]. Procedia Engineering,2016,150:1636-1642.
- [3] XU Xiaoming, ZHANG Wuxiang, DING Xilun, et al. Design and analysis of a novel tension control method for winding machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2018,31(6). DOI: 10.1186/s10033-018-0304-8.
- [4] ZHAO Hang, LIU Chunhua, SONG Zaixin, et al. Analysis and design considerations of a dual-rotor multiple-winding machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2022,69(9):8727-8738.
- [5] MERTINY P, ELLYIN F. Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,2002,33(12):1615-1622.
- [6] XU Jiazhong, YOU Bo, JIA Deli, et al. Motion synchronization system of filament winding machine[C]//First International Conference on Innovative Computing, Information and Control-Volume I(ICICIC'06). Beijing:IEEE,2006:105-108.
- [7] LEE J H, YUN Y W, HONG H W, et al. Tension control of wire rope in winch spooler using magneto rheological brake[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,2016,17(2):157-162.
- [8] WEN Liwei, ZHU Tengfei, QIN Lihua, et al. Deviation-rectifying control of carbon fiber prepreg slitting and winding machine[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2018,35(3):547-555.
- [9] NISHIDA T, SAKAMOTO T, GIANNOCARO N I. Self-tuning PI control using adaptive PSO of a web transport system with overlapping decentralized control[J]. Electrical Engineering in Japan,2013,184(1):56-65.
- [10] TOPTAŞ E, AKKUŞ N. Damage detection of carbon fibers in filament winding machines using an electrical resistance method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2017,93:671-679.
- [11] HAZRA T. A Low Cost 2-Axis Plc Controlled Filament Winding Machine with Simplified Fiber Winding Angle and Tension Control System[D]. Halifax: Dalhousie University,2011.
- [12] WU Qin, LIU Zhidong, ZHANG Bin, et al. Experimental research on tension balance control of reciprocating winding diamond wire saw [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2017,91:423-431.
- [13] SUN Zhiping, KANG Wenhao, WAN Guochun, et al. A fuzzy PID controller with neural network algorithm for freight trains' braking system[C]//2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall(PIERS-Fall). Xiamen:IEEE,2019:2646-2651.
- [14] DING Haodi, LIU Shanhui, ZHANG Han, et al. Design decoupling controller based on feedforward and improved PID for tension system

- [J]. *Journal of Imaging Science & Technology*, 2023, 67(2). DOI: 10.2352/j. imagingsci. technol. 2023. 67. 2. 020411.
- [15] KEWEI Song, ZHANG Ze, WANG Hu, et al. Online self-adaptive proportional-integral-derivative control for brushless DC motor based on variable universe fuzzy inference system optimized by genetic algorithm[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(10): 5127-5142.
- [16] DENG Liwei, SUO Hongfei, REN Haonan. Research on tension control system of winding machine based on fuzzy PID algorithm[C]// 2021 40th Chinese Control Conference (CCC). Shanghai: IEEE, 2021: 2442-2447.
- [17] 杨健. 基于 Fuzzy-PID 的纤维缠绕张力控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.  
YANG Jian. Design of Fiber Winding Tension Control System Based on Fuzzy-PID[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [18] 何晓东, 史耀耀, 段继豪, 等. 复合材料布带缠绕成型柔性压辊自适应偏航控制技术[J]. *机械工程学报*, 2014(17): 165-170.  
HE Xiaodong, SHI Yaoyao, DUAN Jihao, et al. Adaptive yaw control of the flexible pressure roller for composite tape winding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(17): 165-170.
- [19] ZHAO Haixia, CHANG Degong. Application of fuzzy PID control in yarn tension control system[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 321/324: 1748-1752.
- [20] 孟子为. 西门子数控系统在数控缠绕机中的应用[J]. *世界制造技术与装备市场*, 2023(3): 69-70.
- [21] LU JS, CHENG Mingyang, SU Kehan, et al. Wire tension control of an automatic motor winding machine-an iterative learning sliding mode control approach[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 50: 50-62.
- [22] BOUCHIBA B, BOUSSERHANE I K, FELLAH M K, et al. Artificial neural network sliding mode control for multi-machine web winding system[J]. *Revue Roumaine Des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergétique*, 2017, 62(1): 109-113.
- [23] LEE J, CHANG P H, JIN Maolin. Adaptive integral sliding mode control with time-delay estimation for robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(8): 6796-6804.
- [24] 邵振福, 吴吉祥, 郑明华. 基于改进指数趋近律的 PMSM 滑模控制研究[J]. *自动化与仪表*, 2023, 38(6): 100-104.  
KUAI Zhenfu, WU Jixiang, ZHENG Minghua. Research on compound control of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode variable control[J]. *Automation & Instrumentation*, 2023, 38(6): 100-104.
- [25] 金鸿雁, 王磊, 赵希梅. 基于摩擦补偿的两轴直驱伺服进给系统自适应非线性滑模轮廓控制[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(11): 1335-1342.  
JIN Hongyan, WANG Lei, ZHAO Ximei. Adaptive nonlinear sliding mode contour control of two-axis direct drive servo feed systems based on friction compensation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(11): 1335-1342.
- [26] 彭熙伟, 刘育江, 陈涵煜, 等. 基于变死区补偿的模糊滑模电液比例伺服控制系统研究[J]. *北京理工大学学报*, 2022, 43(9): 971-978.