

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.006

基于柱形容器缠绕稳定性分析

王康¹, 胡学朝¹, 耿昊鹏¹, 石泽洋¹, 王君哲¹, 邓建鹏¹, 穆清林¹, 张兴宇¹, 任舒²

(1. 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;

2. 山东知识产权司法鉴定中心, 山东 济南 250101)

摘 要: 玻璃纤维缠绕柱形容器要求满足线型稳定和张力稳定两个条件, 主动控制策略是缠绕机速度控制和张力控制的重要部分。为了提高柱形容器在缠绕时的稳定性, 基于整机缠绕动力学模型, 设计可以调节缠绕行程和张力变化的模糊 PID 和滑模控制策略, 通过 MATLAB 软件仿真分析, 在滑模控制和模糊控制之间寻找最优控制策略。实验结果表明: 在模糊 PID 控制的调节下, 柱形容器在缠绕时的稳定性得到了良好的改善。

关键词: 主动控制; 张力控制; 模糊 PID 控制; 滑模控制

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)05-0031-04

Winding Stability Analysis Based on Cylindrical Container

WANG Kang¹, HU Xuechao¹, GENG Haopeng¹, SHI Zeyang¹, WANG Junzhe¹, DENG Jianpeng¹,
MU Qinglin¹, ZHANG Xingyu¹, REN Shu²

(1. Shandong North Modern Chemical Industry Co., Ltd., China Ordnance Industry Group, Jinan 250031, China;

2. Shandong Intellectual Property Judicial Identification Center, Jinan 250101, China)

Abstract: Since the glass fiber winding cylindrical container is required to meet the two conditions of linear stability and tension stability, the active control strategy becomes an important part of the speed control and tension control of the winding machine. To improve the stability of the cylindrical container during winding, a fuzzy PID and sliding mode control strategy adjusting the winding stroke and tension change is designed based on the dynamic model of the whole machine. With the simulation analysis of MATLAB software, the optimal control strategy is searched between sliding mode control and fuzzy control. The experiment results show that the regulation of fuzzy PID control well improves the winding stability of cylindrical container.

Keywords: active control; tension control; fuzzy PID control; sliding mode control

0 引言

近年来,随着非金属材料的大力发展,玻璃纤维缠绕工艺的发展已经相当成熟^[1]。

缠绕机大多以玻璃纱、玻璃布为主要材料,放置在张力控制器中。文献[2-3]主要针对缠绕过程中芯模拉出符合结构的线类型和满足纤维张力进行研究和改善。文献[4-5]引入磁流变制动结构提供一种反向张力,优化了张力控制系统和延长了零件寿命。文献[6-7]将纤维纱输送系统进行分级调节,设计了一种自适应优化的 PID 控制器,解决了缠绕速度和张力之间的强耦合问题,保证了缠绕张力和缠绕速度之间的稳定性。文献[8-9]将模糊 PID 控制与神经网络控制相结合,对系统的运行参数进行在线修改和调整,以适应不确定系统的动态特性。文献[10]对缠绕机

机械结构进行了优化改进,在张力控制中初步实现了模糊 PID 控制并通过伺服电机对主压辊的力矩制动控制。文献[11]针对缠绕机纱线张力控制的不稳定性,在 PID 控制器的基础上引入了一种编码器形式的张力控制系统,有效提高了张力的稳定性。文献[12-13]分析了滑模控制的鲁棒性优点,利用滑模控制具有响应时间快的特点,解决了硬件设备的迟滞问题。文献[14-17]针对数控纤维缠绕机的机械机构设计展开分析,提出了一种面向时间最优的四轴缠绕轨迹全局平滑方法。文献[18-19]通过采用永磁同步伺服电机驱动、高精度分布式控制系统,显著提升了回转台的速度控制精度、动态响应特性。文献[20-21]基于测地线缠绕的等张力模型、缠绕技术的连续成型,将缠绕技术应用于橡胶挠性接管缠绕成型。

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

第一作者简介: 王康(1993—),男,山东菏泽人,工程师,硕士,研究方向为缠绕机设备,233766250@qq.com。

1 缠绕机运动特性分析

1.1 缠绕运动分析

本文以数控缠绕机为例,玻纤缠绕机主要由伺服电机、张力控制器、浸胶槽、缠绕台组成。缠绕机运动模型如图 1 所示。

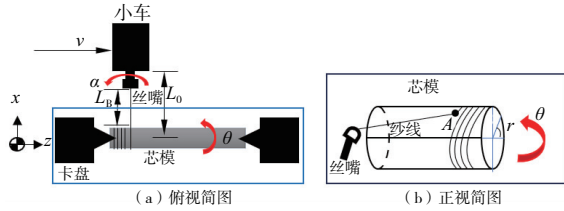


图 1 缠绕机运动模型

设定落纱点坐标为 $A(r \cos \theta^*, r \sin \theta^*, Z_A)$, 根据缠绕动力学建立运动方程。

伸臂运动方程为

$$x = L_0 - r / \cos \theta - L_x \quad (1)$$

缠绕运动方程为

$$Z_v = r / (\operatorname{ctg} \theta^* \operatorname{tg} \alpha) + Z_A \quad (2)$$

缠绕角运动方程为

$$\omega = (\theta^* - \theta_0^*) + \theta \quad (3)$$

式中: θ 为缠绕转动角度, rad; θ_0^* 为落纱点 A_0 的相位角, rad; θ^* 为 A_i 的动态相位角, rad; α 为丝嘴转角, rad; L_x 为丝嘴伸臂距离, m; L_0 为丝嘴伸臂总距离, m。

1.2 张力运动分析

缠绕张力是通过 Trio 硬件系统进行控制,也是目前缠绕设备的主流控制方式。张力系统受力如图 2 所示。

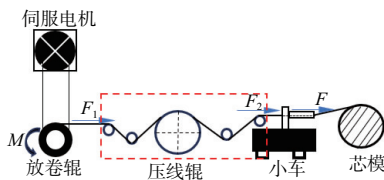


图 2 张力系统受力示意图

放卷辊力矩方程如下:

$$M(t) = F_2(t)R(t) + J(t)\omega(t) + J(t)\dot{\omega}(t) + M_f \quad (4)$$

$$J(t) = J_s + J_{st} \quad (5)$$

$$J_{sj} = J_s + J_j \quad (6)$$

式中: F_2 为张力, N; $R(t)$ 为纱团半径, m; $M(t)$ 为阻力矩, Nm; M_f 为摩擦力矩, Nm; $\omega(t)$ 为角速度,

rad/s; $J(t)$ 为转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; J_s 为电机转动惯量; J_j 为卷轴惯量; J_{st} 为纱团转动惯量。

2 控制策略分析

2.1 模糊 PID 控制策略分析

通过模糊域对控制器进行调节,张力补偿、速度补偿和输出变量补偿均采用高斯隶属函数,如图 3—图 6 所示。

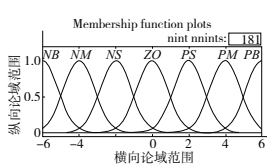


图 3 输入 ΔF 隶属函数

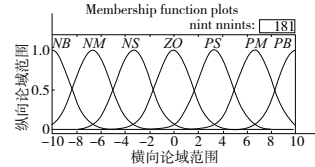


图 4 输入 $\Delta \theta$ 隶属函数

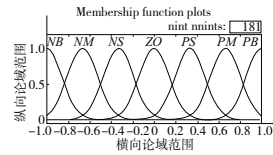


图 5 输出 U 隶属函数

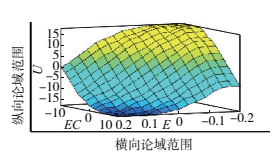


图 6 模糊控制关系

对于本文控制器中的误差 E 输入 ΔF 、误差 EC 输入 $\Delta \theta$ 和控制量 U 输出 U 的坐标解释,论域的选择对控制器的性能至关重要。横坐标是 E 的论域范围 $[-6, 6]$ 、 EC 的论域范围 $[-10, 10]$;纵坐标是 U 的论域范围 $[-1.0, 1.0]$,基于 MATLAB-Simulink 的模糊 PID 控制(A)策略模型如图 7 所示。

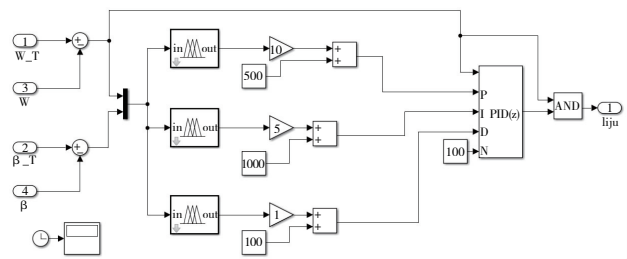


图 7 模糊 PID 控制器结构

2.2 滑模控制策略分析

滑模控制(B)的优点是能够克服系统产生的不确定性,对于某些干扰和不稳定的动态数据具有很强的鲁棒性调节。滑模控制器结构如图 8 所示。

在滑模控制器结构中分别设置了 4 个增益系数 a, b, c, d ,通过调整增益系数进行调控。

$$\dot{i}_q = \frac{1}{a} \int (b x_2 + c s + d \cdot \sin s) dt \quad (7)$$

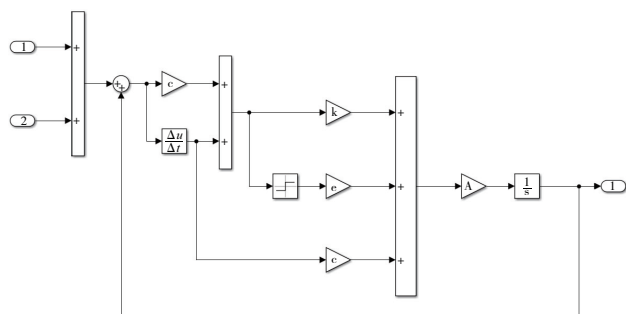
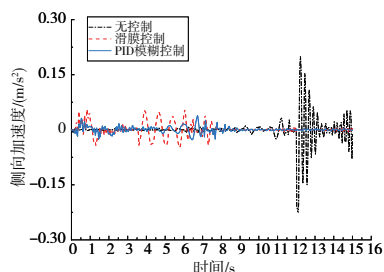
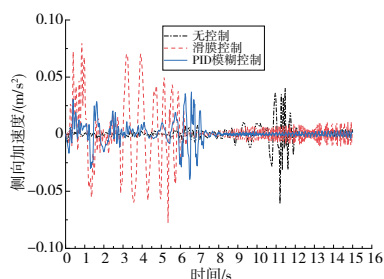
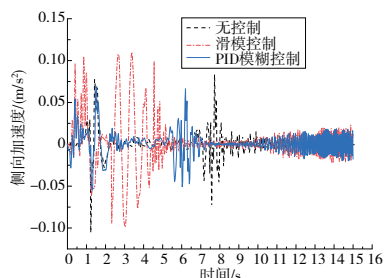


图8 滑模控制器结构

2.3 控制策略仿真分析

为了验证两种控制效果,更确切地得到数据曲线,将 MATLAB-Simulink 导入 Carsim 仿真软件,路程控制数据、侧向控制数据如图9—图11所示。

图9 $v=0.4 \text{ m/s}$ 时小车控制效果图10 $v=0.7 \text{ m/s}$ 时小车侧向控制效果图11 $v=0.9 \text{ m/s}$ 时小车侧向控制效果

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;在侧向控制中,滑模控制

的最大误差超过了 $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$,调节差于模糊PID控制,如表1所示。

表1 缠绕机在不同速度和张力控制下的最大值

项目	控制器					
	A	B	A	B	A	B
车速/(m/s)	0.4		0.7		0.9	
侧向加速度/(m/s^2)	0.22	0.03	0.35	0.35	0.10	0.06

表1数据表明,在滑模控制和模糊PID控制作用下的小车行程相对于无控制模式都得到改善,滑模控制的调节相对于模糊PID改善较小。

3 最优控制策略的验证

基于Carsim控制的仿真数据进行综合分析,选择模糊PID控制作为最优控制策略进行下一步的硬件实验。

3.1 硬件设备分析

该硬件平台由缠绕行程车、台架、伺服电机和张力控制柜、计算机操作平台等组成,如图12—图17所示。上位机与下位机的传输通过Trio系统链连接。



图12 操作平台



图13 台架



图14 缠绕车



图15 张力控制柜

名称	参考值	实际值	差值	报警输出	反馈输出
全调整				444	444
速度1	6.00	1.11	-38.89	0	0
速度2	6.05	3.41	-2.58	0	0
速度3	6.05	0.87	-5.18	0	0
速度4	6.05	0.80	-6.67	0	0
速度5	6.05	14.28	7.91	0	0
速度6	6.05	11.23	4.66	0	0
速度7	6.05	4.36	-2.39	0	0

图16 控制系统数据

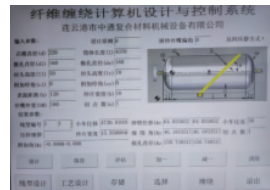


图17 控制系统参数

硬件实验主要是建立操作上位机与控制下位机之间的联系,将控制策略模型导入到PC操作平台。

3.2 硬件实验分析

在硬件实验中,设定缠绕时的恒定张力为 40 N,缠绕速度为 PC 软件系统的 30%、35%、40%,如图 18—图 20 所示。缠绕时的芯模长度模拟为单向 5 m 的路程。

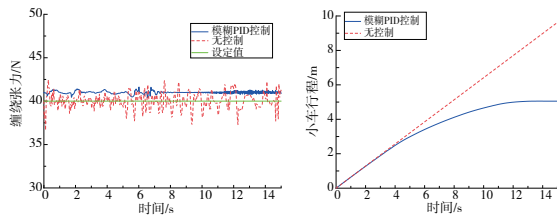


图 18 30%速度,张力 $F=40$ N 时的缠绕控制

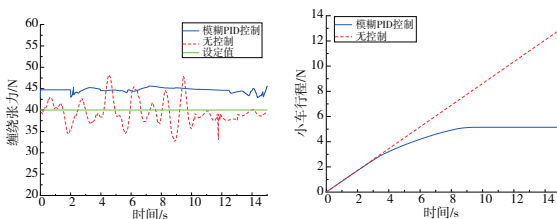


图 19 35%速度时小车行程

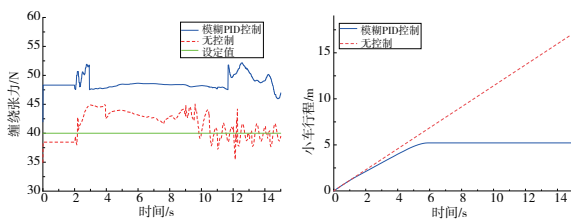


图 20 40%速度时小车行程

硬件实验数据表明,缠绕行程车在无控制模式下处于无制动状态;通过模糊 PID 控制(A)策略的调节,小车在 40%速度时会超过 5 m 缠绕长度,调节不太理想;缠绕张力在 30%速度的误差调节保持在 5 N 内,在 40%的控制中相较于无控制实现较好调节。最大数据值如表 2 所示。

表 2 缠绕机在不同速度和张力控制下的最大值

项目	30%速度		35%速度		40%速度	
	A	B	A	B	A	B
行程/m	5.1	9.6	5.2	12.9	5.3	17.1
张力/N	41.6	36.6	45.6	48.2	52.0	45.0

4 结语

本文以缠绕速度及张力控制精度为研究方

向。1)建立了缠绕车在运动时的动力学模型。2)分别设计了滑模控制器和模糊 PID 控制器对缠绕速度和缠绕张力进行动态调节,利用 MATLAB-Simulink 建模,将模型导入 Carsim 验证控制效果。3)模糊 PID 控制为最优控制策略并进行下一步硬件实验,在硬件调试中基本实现了控制效果。

参考文献:

- [1] KOMBAROV V, KRYZHIVETS Y, BILETSKYI I, et al. Numerical control of fiberglass pipe bends manufacturing[C]//2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv, Ukraine: IEEE, 2021: 357-362.
- [2] 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.
- [3] 王琪, 吴少斌, 高进可, 等. 基于 PLC 的多层玻纤缠绕机控制系统的设计[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(6): 182-185.
- [4] XU JZ, YOU B, JIA D L, et al. Motion synchronization system of filament winding machine [C]//First International Conference on Innovative Computing, Information and Control - Volume I (ICICIC '06). Beijing, China: IEEE, 2006: 105-108.
- [5] WEN L W, ZHU T F, QIN L H, 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.
- [6] 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(1): 671-679.
- [7] WU Q, LIU Z D, ZHANG B, et al. Experimental research on tension balance control of reciprocating winding diamond wire saw [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 423-431.
- [8] SUN Z P, KANG W H, WAN G C, 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, China: IEEE, 2019: 2646-2651.
- [9] DING H D, LIU S H, ZHANG H, et al. Design decoupling controller based on feedforward and improved PID for tension system [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2023, 67(2): 1-10.

(下转第 83 页)

- 收稿日期:2025-02-18

Electrotechnique et Energetique, 2017, 62 (1): 109-113.

- 收稿日期:2023-11-03