

基于模糊PID的颈椎康复机器人运动控制研究

刘辰旭, 王晴晴, 石 萍*

上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月29日

摘 要

为克服传统颈椎牵引康复方法个体差异适应能力弱、控制精度不足及难以动态调控等问题, 文章基于自研的6-UPS并联结构颈椎康复机器人, 提出了一种模糊PID位置控制方案。该机器人通过六个电动推杆实现多自由度牵引与姿态调节, 为不同颈部节段和肌肉群提供多角度、多模式的康复训练。首先, 在分析直流电机与丝杠传动的非线性耦合基础上, 建立了单电动推杆系统的数学模型并推导出其传递函数; 随后, 将模糊逻辑嵌入PID框架中, 通过在线自整定PID参数, 有效应对因患者生理差异及时变负载等带来的不确定性与非线性; 最后, 利用Simulink与Fuzzy工具进行仿真验证, 结果显示模糊PID控制器相比传统PID可明显缩短上升时间(0.141 s)与调整时间(0.236 s), 且几乎无超调, 有助于确保多自由度并联牵引在复杂工况下的快速性与稳定性。该研究为新型颈椎康复机器人的高精度与高适应性控制提供了有效的技术支撑, 并为后续实现多自由度力位耦合及临床应用奠定了良好基础。

关键词

颈椎康复机器人, 并联结构, 模糊PID, Simulink仿真

Research on Motion Control of Cervical Rehabilitation Robot Based on Fuzzy PID

Chenxu Liu, Qingqing Wang, Ping Shi*

School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

To address the limitations of traditional cervical traction rehabilitation methods, including poor adaptability to individual differences, insufficient control accuracy, and difficulty in dynamic regulation, this paper proposes a fuzzy PID position control scheme based on a self-developed 6-UPS

*通讯作者。

文章引用: 刘辰旭, 王晴晴, 石萍. 基于模糊PID的颈椎康复机器人运动控制研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 868-878.
DOI: 10.12677/mos.2025.145440

parallel-structure cervical rehabilitation robot. This robot utilizes six electric linear actuators to achieve multi-degree-of-freedom traction and posture adjustment, providing multi-angle and multi-mode rehabilitation training for different cervical segments and muscle groups. First, a mathematical model of a single electric actuator system is established, and its transfer function is derived based on an analysis of the nonlinear coupling between the DC motor and the lead screw transmission. Then, fuzzy logic is embedded within the PID framework to enable online self-tuning of PID parameters, effectively addressing uncertainties and nonlinearities caused by patient-specific physiological differences and time-varying loads. Finally, simulations are conducted using Simulink and the Fuzzy tool. The results demonstrate that, compared with conventional PID control, the fuzzy PID controller significantly reduces the rise time (0.141 s) and settling time (0.236 s) while exhibiting almost no overshoot. This improvement enhances the speed and stability of multi-degree-of-freedom parallel traction under complex working conditions. This study provides an effective technical foundation for high-precision and highly adaptive control of next-generation cervical rehabilitation robots, laying the groundwork for future multi-degree-of-freedom force-position coupling control and clinical applications.

Keywords

Cervical Rehabilitation Robot, Parallel Structure, Fuzzy PID, Simulink Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代工作与生活方式的改变导致颈椎病发病率持续上升,易造成颈肩疼痛、头晕和上肢麻木等病症,从而影响正常生活与工作,后期可能导致神经压迫性行动障碍甚至失能[1]。牵引治疗作为颈椎病初、中期常用辅助治疗手段,其通过仪器外力拉伸颈椎,有助于减轻椎间盘压力与缓解神经根压迫[2]。然而,传统人工或辅以悬挂式、气动式治疗设备的治疗方法,仅能提供单一轴向的线性拉伸,运动自由度极低,难以实现针对特定节段或病理状态的复杂多维牵引,治疗特异性和靶向性不足[3];传统治疗设备多需患者模糊反馈来手动粗调,单自由度挡位调节存在较大步进差(挡位余量大),难以实现高精度最佳牵引力控制[4]。可量化控制的颈椎牵引机器人凭借其可按需控制、多动力维持姿态调节等优势,以及可执行复杂、个性化治疗方案的潜力,已成为颈椎康复领域的研究热点[5][6]。

为突破传统线性牵引设备单自由度、调节粗略的局限[3]-[6],并联结构康复机器人因其多维运动与精确控制潜力成为研究热点[5][6]。Zhang 等[6]-[9]提出了基于 3-RRS (3-Rotation-Rotation-Slide)机构的 Neck Brace 头颈部康复机器人,通过操作杆与 PID 控制初步实现多自由度运动辅助,但其主要依赖单一轴向的牵引,难以满足复杂节段及个性化治疗的要求;Ibrahim 等[10]设计 3-RPS 并联外骨骼则利用 PD 位置控制实现一定的牵引及康复功能,但在控制精度与多自由度调节方面仍存在局限;戚世家等[11]针对头部运动障碍设计了 3-RRS 并联机构,使用 PID 控制辅助完成核心姿态训练,但颈椎可活动角度不能全维度支持。总体来看,并联结构具有刚度高、定位精度与灵活度较好的优势,能够为个性化牵引方案提供丰富的运动自由度。然而,这些现有系统多偏重位置调节,对具体节段的针对性、多源扰动下的牵引稳定性与实时力控精细度尚显不足,且由于颈椎病患者的康复过程具有动态变化特征,患者疼痛阈值、肌力和神经压迫程度等都在不断波动,仅依赖固定增益 PID 或简单 PD 控制难以及时自适应复杂工况。

传统并联机构因其固有的运动学耦合与电机-丝杠传动非线性,也进一步加剧了传统控制在快速性

与鲁棒性兼顾方面的不足[12]-[14],限制了传统固定增益 PID 控制器的性能。因此,模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Control, FLC)凭借其不依赖于精确的系统数学模型的优势,利用基于专家知识或经验的模糊规则来处理非线性和不确定性[15]-[17],但其规则库设计往往依赖专家经验,缺乏系统化的设计理论,且可能难以完全消除稳态误差。可见,亟需设计更适合不同患者需求和多角度姿态调节治疗的新型并联机器人,并结合可适应非线性牵引力变化与高精度控制,以满足差异化与较好效果的自动化治疗需求。

基于上述分析,本文针对自研新型六维动力并联 6-UPS 颈椎康复机器人,为发挥机器人创新结构对多维度牵引与适应性可调的结构优势,以及保证斜方肌、肩胛区肌等受力协力下的精确控制,解决机器人自身非线性动力学特性对控制效果的影响,以兼顾不同颈部节段和肌肉群的牵引需求,实现在复杂非线性耦合及个体差异显著的情境下,依然保证高精度、低超调和良好鲁棒性,本文借助模糊逻辑在线调节 PID 增益系数,使控制器既保持了 PID 结构简洁、易于实现和稳态误差小等优点,又以模糊规则对不同患者动态变化进行参数自整定,从而在多维并联拉伸过程中兼顾快速响应与力位耦合的精确度。基于此,本文先建立电动推杆传动的数学模型并推导传递函数,随后将模糊规则嵌入传统 PID 框架,实现并联机器人各执行轴的精准位置控制与柔性牵引力分配。通过仿真测试结果表明,该方法在响应时间、超调抑制及调节精度方面均得到有效提升,为后续进一步实现多自由度力位同步控制及临床应用奠定了良好基础。

2. 建立电动推杆数学模型

本研究设计的 6-UPS 并联颈椎康复机器人具体结构如图 1 所示,主要运动部分由动平台(与头部接触的颈托)、定平台(固定在上半身的肩垫)、六个万向节、六个球形关节和六个电动推杆组成。在运动过程中,通过六个电动推杆的伸缩运动来实现动平台位姿的变化,从而辅助头颈部康复训练。

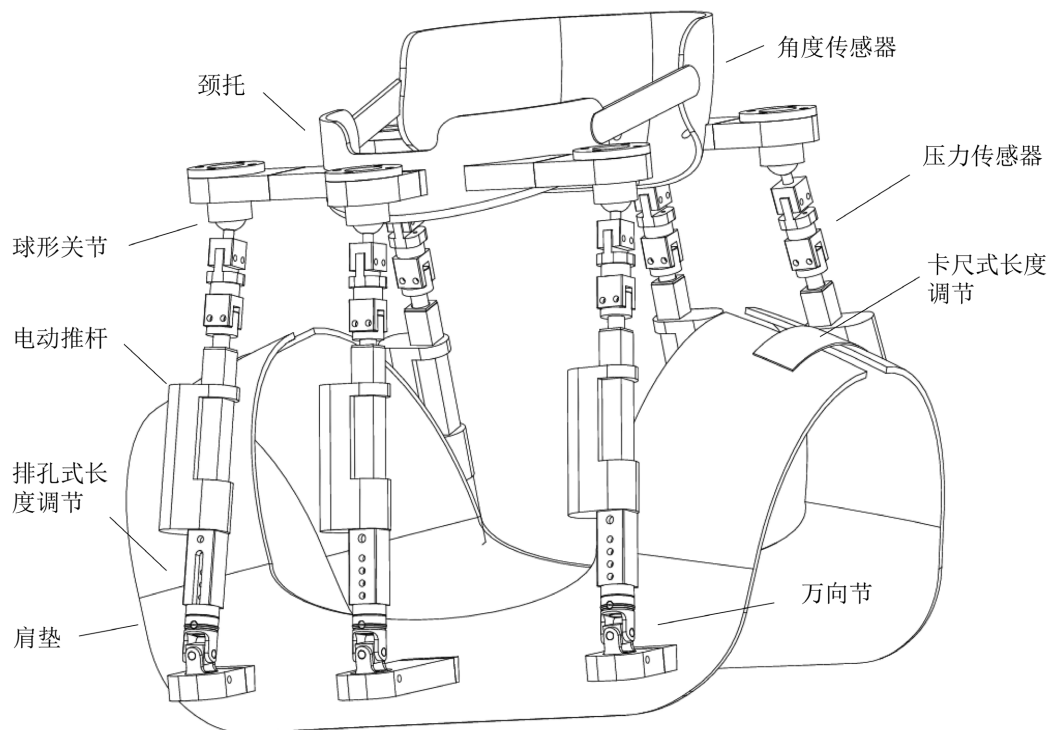


Figure 1. Structural diagram of cervical spine rehabilitation robot

图 1. 颈椎康复机器人结构图

该六自由度颈椎康复机器人采用分布式运动控制，每个电动推杆可看成一个独立的子系统，并且它们的硬件参数一致。电动推杆由 12 V 直流电机、柔性联轴器、丝杠和导向机构组成，其核心作用为将直流电机的旋转运动通过丝杠转换为直线位移。其中直流电机控制模型以下列形式存在：

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{mi}(t) \\ \ddot{\theta}_{mi}(t) \\ \dot{i}_{ai}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-b}{J} & \frac{k_m}{J} \\ 0 & \frac{-k_b}{L_a} & \frac{-R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{mi}(t) \\ \dot{\theta}_{mi}(t) \\ i_{ai}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} [v_{ai}(t)] + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} [T_{Li}(t)] \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{mi}(t) \\ \dot{\theta}_{mi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{mi}(t) \\ \dot{\theta}_{mi}(t) \\ i_{ai}(t) \end{bmatrix} + [0][v_{ai}(t)] \quad (2)$$

其中， $\theta_{mi}(t)$ 是直流电机角坐标， $\dot{\theta}_{mi}(t)$ 是直流电机角速度， $\ddot{\theta}_{mi}(t)$ 是直流电机角加速度， $i_{ai}(t)$ 是电枢电流， $\dot{i}_{ai}(t)$ 是电枢电流相对于时间的变化率， $v_{ai}(t)$ 是施加到电枢的输入电压， T_{Li} 是负载转矩， J 是影响直流电机的总有效惯量，包括直流电机电枢的惯量 J_a 和负载惯量 J_L 。

$$J = J_a + J_L \quad (3)$$

R_a 为电枢绕组电阻， L_a 为电枢绕组电感， K_m 为直流电动转矩常数， K_b 为反电动势电压常数， B 为粘性阻尼系数。对于导螺杆，导程 P 的螺距可以计算如下：

$$P = \frac{L}{2\pi} \quad (4)$$

其中 L 是每转一圈的导程位移步进螺杆。电动推杆的位移 $D_i(t)$ 和速度 $v_i(t)$ 计算如下：

$$D_i(t) = P\theta_{mi}(t) \quad (5)$$

$$v_i(t) = P\dot{\theta}_{mi}(t) \quad (6)$$

负载扭矩可以推导为：

$$T_{Li}(t) = \frac{F(t) \times L \times \eta}{2\pi} \quad (7)$$

其中 $F(t)$ 是作用在电动推杆上的载荷力， η 是丝杠的效率。通过将等式(3)~(6)代入等式(1)和(2)，电动推杆的数学模型将具有以下形式：

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{mi}(t) \\ \ddot{\theta}_{mi}(t) \\ \dot{i}_{ai}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-b}{J_a + J_L} & \frac{k_m}{J_a + J_L} \\ 0 & \frac{-k_b}{L_a} & \frac{-R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{mi}(t) \\ \dot{\theta}_{mi}(t) \\ i_{ai}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} [v_{ai}(t)] + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-L_\eta}{2\pi(J_a + J_L)} \\ 0 \end{bmatrix} [F(t)] \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} D_i(t) \\ v_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{mi}(t) \\ \dot{\theta}_{mi}(t) \\ i_{ai}(t) \end{bmatrix} + [0][v_{ai}(t)] \quad (9)$$

表示空载情况下输入电压和行程位移之间关系的模型传递函数为以下形式：

$$\frac{D_i}{v_{ai}} = \frac{\frac{PK_m}{JL_a}}{s^3 + \left(\frac{JR_a + bL_a}{JL_a}\right)s^2 + \left(\frac{bR_a + K_bK_m}{JL_a}\right)s} \quad (10)$$

本研究所用的电动推杆为 Actuonix 的 P16 电动推杆，其具备最大 90 N 的推力，直流电机和导线参数见表 1。

Table 1. DC motor and wire parameters

表 1. 直流电机和导线参数

Parameter	Value
R_a	2.1 Ω
L_a	0.34 H
K_m	2.174×10^{-3} N·m/A
K_b	3.048×10^{-3} V/ms ⁻¹
b	2.3511×10^{-5} N·ms
J_a	4×10^{-8} Kg·m ²
J_L	2.5×10^{-7} Kg·m ²
L	0.006 m

将上表的参数代入公式(10)可得电动推杆传递函数 $G(s)$ 如下：

$$G(s) = \frac{D_i}{v_{ai}} = \frac{21}{s^3 + 77s^2 + 568s} \quad (11)$$

3. 模糊 PID 控制器设计

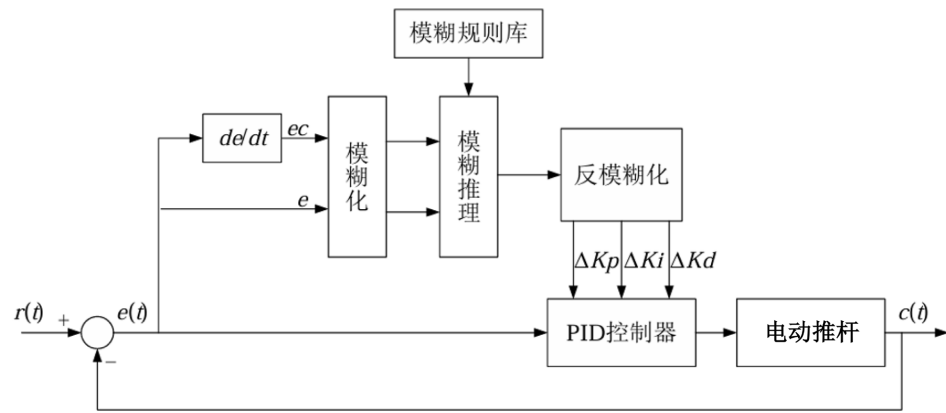


Figure 2. Fuzzy PID controller system block diagram

图 2. 模糊 PID 控制器系统框图

为进一步提升并联机器人在差异化治疗需求下的控制精度与自调节性能，本文在传统 PID 控制结构的基础上引入模糊逻辑调节机制，以实现 PID 增益参数的实时自适应整定。该方法既保留了 PID 结构

简洁、参数可调与稳态误差易于抑制的优势，又借助模糊逻辑的在线推理能力，对受力反馈非线性与患者个体差异影响下的控制参数自整定，从而在多自由度牵引环境中获得更好的综合控制性能。其具体控制框图如图 2 所示。

模糊化过程是将精确输入转化为模糊集合中各隶属度的过程。本文对输入偏差 e 、偏差变化率 ec 和输出 PID 参数修正量 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 论域归一化为 $[-3, 3]$ 。并采用七级模糊子集表示，其语言变量为：NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。考虑到相邻模糊区域所产生交集的最大隶属度的大小，各子集采用标准三角形隶属函数设计，可以获得较好的灵敏度，确保相邻模糊集之间具有适当重叠，从而实现输入信号的平滑模糊化，隶属函数如图 3 所示。

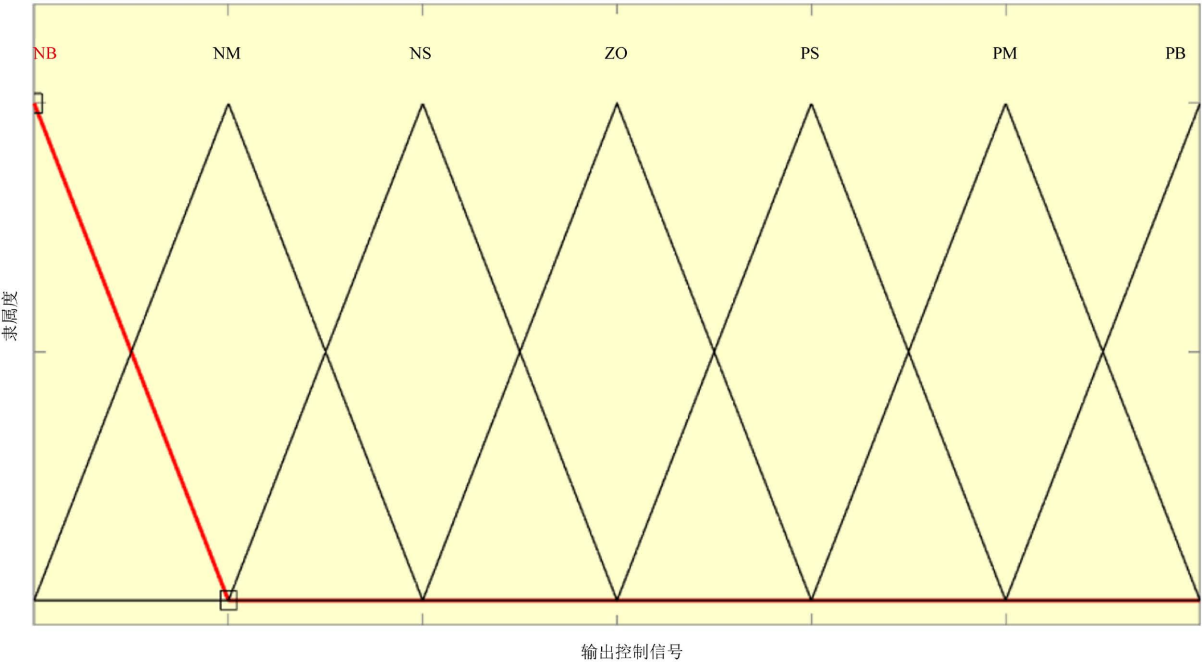


Figure 3. e , ec , ΔK_p , ΔK_I , ΔK_D membership functions

图 3. e 、 ec 、 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 隶属函数

Table 2. Fuzzy control rules of ΔK_p

表 2. ΔK_p 模糊控制规则

ΔK_p		ec						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NM
	NS	PM	PM	PS	PS	NS	NM	NS
	ZO	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NS
	PS	NS	ZO	NS	NS	NM	NM	NM
	PM	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	NB
	PB	NS	NS	NM	NM	NM	NB	NB

Table 3. Fuzzy control rules of ΔK_I

表 3. ΔK_I 模糊控制规则

ΔK_I		ec						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NB	NS	NS	NS	ZO
	NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

Table 4. Fuzzy control rules of ΔK_D

表 4. ΔK_D 模糊控制规则

ΔK_D		ec						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PS	PS	NB	NM	NM	NB	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NS	NS	PS
	NS	NS		NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	NS	NS	NS	NS	ZO	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PS
	PM	PB	PM	PM	PS	PS	PS	PB
	PB	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB

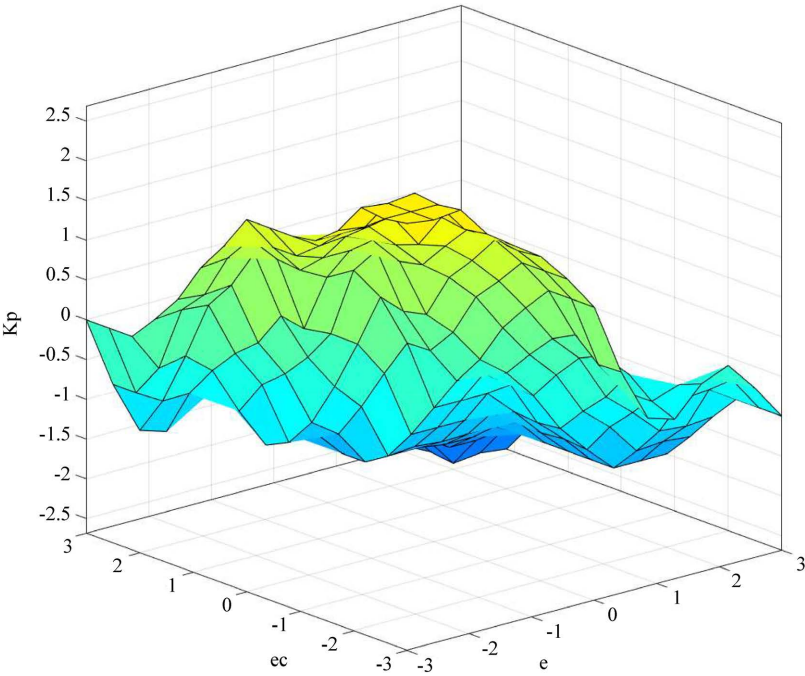


Figure 4. ΔK_p feature surface diagram

图 4. ΔK_p 特征曲面图

模糊控制规则库是模糊 PID 设计的核心。本文采用 Mamdani 模糊推理方法，构建了一个 7×7 的规则库，共 49 条规则，模糊规则表如表 2~4 所示。

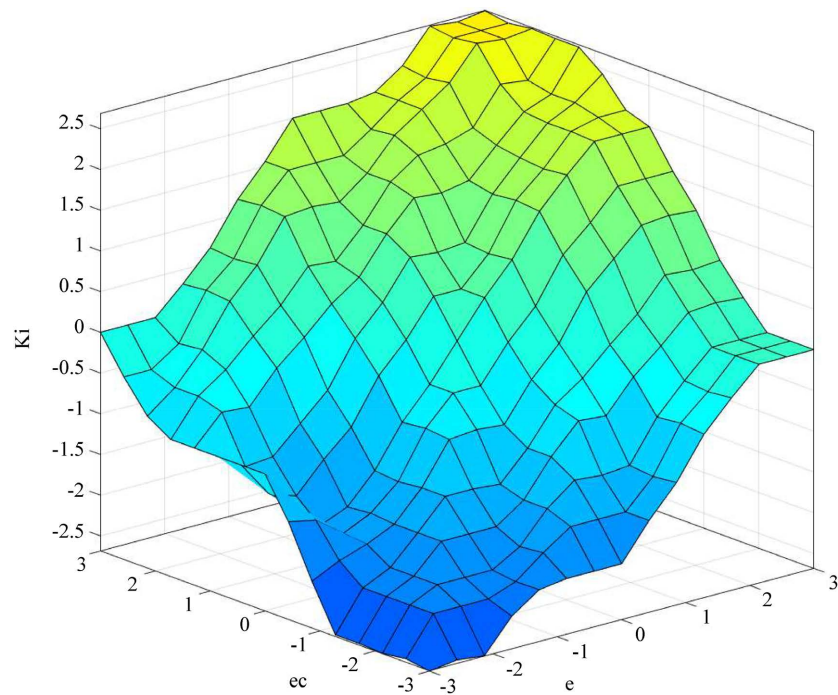


Figure 5. ΔK_i feature surface diagram

图 5. ΔK_i 特征曲面图

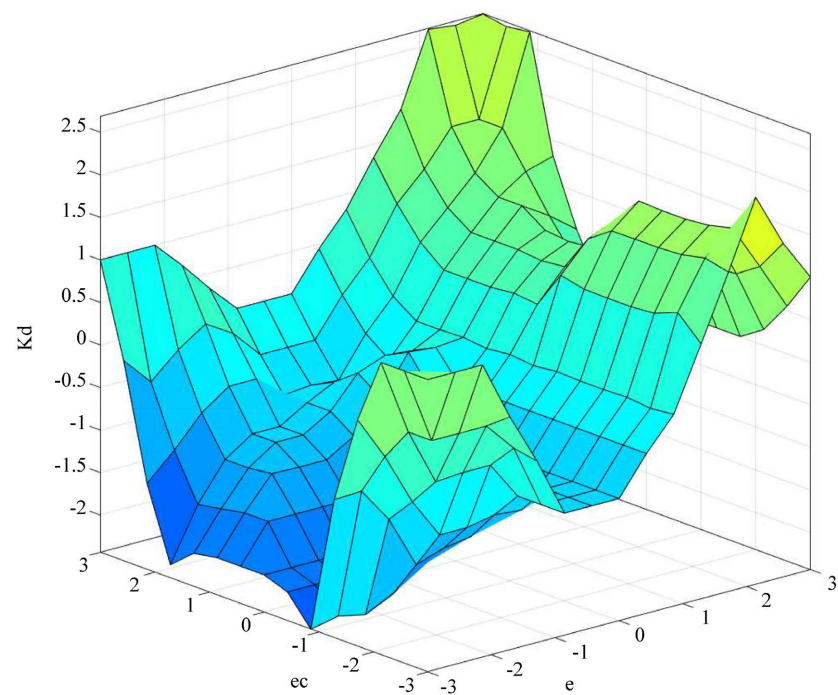


Figure 6. ΔK_d feature surface diagram

图 6. ΔK_d 特征曲面图

通过执行 Mamdani 推理机和重心去模糊化方法[18], 输出控制信号的模糊规则的表面图如图 4~6 所示。输出特征曲面总结了输出比例系数、积分系数和微分系数对输入 e 和 ec 的响应, 输出比例系数和积分系数的取值均随输入 e 和 ec 的增大而增大, 而输出微分系数的取值在输入 ec 位于范围两端时, 输入 e 对其取值影响并不大, 而当输入 ec 趋近于 0 的时候, 为保证系统具有良好的跟踪性能取较大的微分系数。

模糊 PID 的 K_p 、 K_I 、 K_D 由初始设定的 PID 参数 K_{p0} 、 K_{I0} 、 K_{D0} 和模糊控制器输出的修正量 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 叠加得到, 实现 PID 参数的在线自适应调整, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} K_P = \Delta K_P + K_{P0} \\ K_I = \Delta K_I + K_{I0} \\ K_D = \Delta K_D + K_{D0} \end{cases} \quad (12)$$

4. 仿真分析

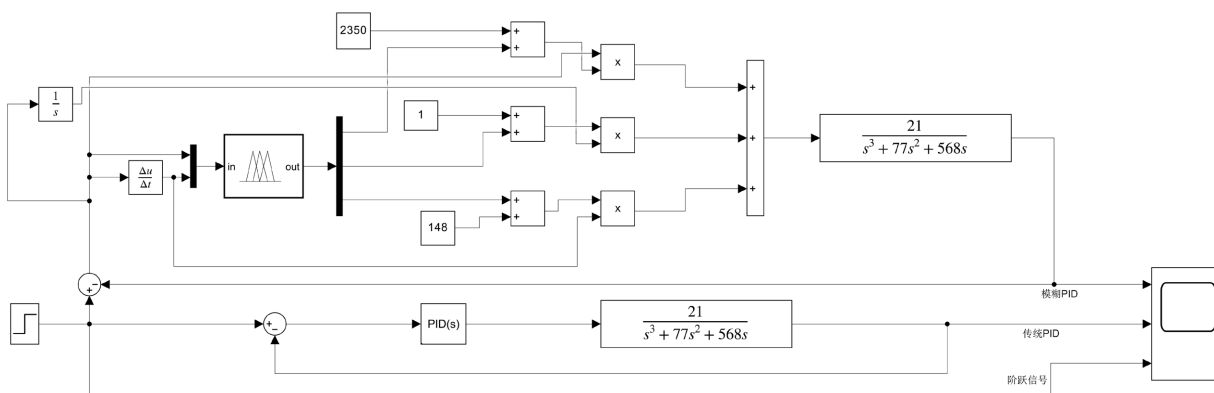


Figure 7. Fuzzy PID motion control simulation

图 7. 模糊 PID 运动控制仿真

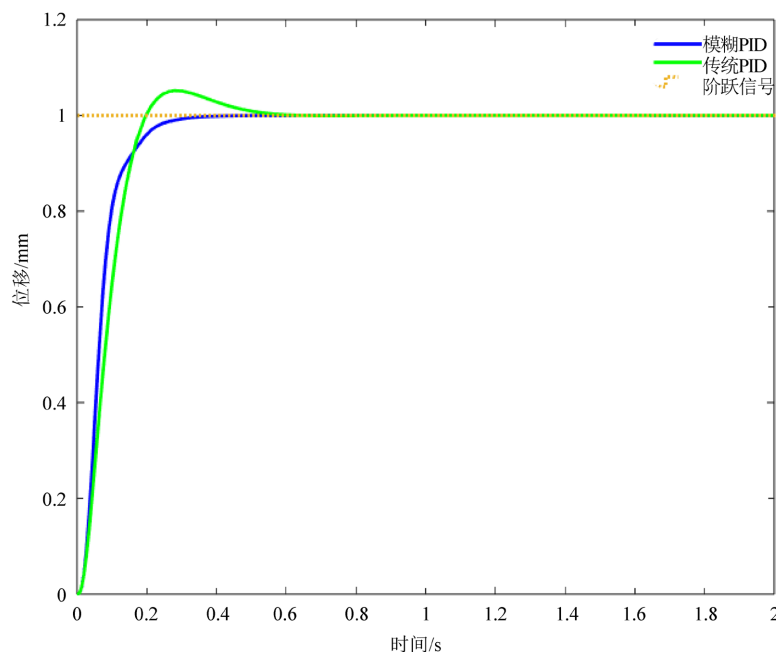


Figure 8. Step response curve

图 8. 阶跃响应曲线

本章采用 Simulink 仿真及 Fuzzy 工具对所设计的模糊 PID 控制系统进行了仿真验证, 并与传统 PID 控制进行比较, 以验证系统性能的提升。颈椎康复机器人单个电动推杆模糊 PID 运动控制仿真如图 7 所示。

在模糊 PID 控制器的运动控制仿真中, 根据经验试凑可得初始的 PID 控制器 3 个参数分别为 $K_{p0} = 357$ 、 $K_{i0} = 1$ 、 $K_{d0} = 28$, 随后进行多次运动控制仿真确定模糊 PID 参数为 $K_p = 2350$ 、 $K_i = 1$ 、 $K_d = 148$, 两种控制算法仿真跟踪响应如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 传统 PID 控制器的上升时间为 0.154 s, 调整时间为 0.435 s, 超调量为 5.16%。而采用模糊 PID 控制器后, 由于在线调整了比例、积分和微分参数, 上升时间为 0.141 s, 调整时间为 0.236 s, 保持了较快的稳态响应, 并且几乎没有超调, 可以保护颈椎康复机器人的并联结构不会因位置过冲遭到破坏。

5. 结语

颈椎病作为一种常见的慢性退行性疾病, 其症状包括颈部疼痛、僵硬、头晕等, 严重影响患者的日常生活。本文提出的基于模糊 PID 的控制方案, 兼顾了 PID 控制器设计的简单性与模糊控制对非线性、时变特性良好的补偿能力, 能够适应康复训练过程中患者的个体差异和系统参数变化。仿真结果显示, 模糊 PID 控制器相比传统 PID 可明显缩短上升时间(0.141 s)与调整时间(0.236 s), 且几乎无超调, 有助于确保多自由度并联牵引在复杂工况下的快速性与稳定性, 从而减轻颈椎病症状, 改善患者的生活质量。未来的工作将进一步在实验平台上验证仿真结果, 并探讨颈椎康复机器人多自由度耦合控制及自适应调节策略的进一步优化。

参考文献

- [1] 王琳, 李文文, 贾瑞平. 疼痛护理在颈椎病患者中的应用效果及对睡眠质量的影响[J]. 临床医学工程, 2024, 31(12): 1559-1560.
- [2] 张芳芳. 颈椎牵引联合颈部康复操训练在颈椎病患者康复治疗中的应用效果评价[J]. 大家健康旬刊, 2016, 10(5): 114-115.
- [3] 李虹, 王庆峰, 王新宇, 等. 一种 3 自由度颈椎牵引康复机构的误差分析与补偿[J]. 机械传动, 2022, 46(7): 131-138.
- [4] 霍路遥, 符碧峰, 冯天笑, 等. 颈椎旋提手法教学机器人用于旋提手法规范化培训的自身对照研究[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2021, 29(5): 6-11.
- [5] 郎昭, 袁强, 范明星, 等. 机器人辅助 Magerl 螺钉内固定术治疗上颈椎疾病[J]. 北京生物医学工程, 2024, 43(3): 280-284.
- [6] Zhang, H. and Agrawal, S.K. (2018) An Active Neck Brace Controlled by a Joystick to Assist Head Motion. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3, 37-43. <https://doi.org/10.1109/lra.2017.2728858>
- [7] Zhang, H., Chang, B. and Agrawal, S.K. (2019) Using a Robotic Neck Brace for Movement Training of the Head-Neck. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4, 846-853. <https://doi.org/10.1109/lra.2019.2893415>
- [8] Zhang, H., Santamaria, V. and Agrawal, S. (2020) Applying Force Perturbations Using a Wearable Robotic Neck Brace. 2020 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, 24 October 2020-24 January 2021, 4197-4202. <https://doi.org/10.1109/iros45743.2020.9340638>
- [9] Zhang, H., Chang, B., Rue, Y. and Agrawal, S.K. (2019) Using the Motion of the Head-Neck as a Joystick for Orientation Control. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 27, 236-243. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2019.2894517>
- [10] Ibrahim, M.E., El-Wakad, M.T., El-Mohandes, M.S. and Sami, S.A. (2022) Implementation and Evaluation of a Dynamic Neck Brace Rehabilitation Device Prototype. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, Article 6887839. <https://doi.org/10.1155/2022/6887839>
- [11] 戚世家. 基于并联机构的颈椎康复机器人设计[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [12] 马慧欣, 许添旗, 叶凡, 等. 2PRU-PRUPc 并联机构的动力学分析[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(4): 7-11.

-
- [13] 郝文鑫. 基于变论域自适应模糊 PID 的高温超导直线电机控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2023.
- [14] 聂卓赞, 徐浩棋, 高志强, 等. 面向扰动抑制的参数调节机制与模糊抗扰 PID 控制方法[J/OL]. 控制理论与应用, 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20250312.1022.012.html>, 2025-03-23.
- [15] Shao, Z., Tang, X., Wang, L. and You, Z. (2013) A Fuzzy PID Approach for the Vibration Control of the FSPM. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **10**, 1-8. <https://doi.org/10.5772/53278>
- [16] Raju, S.S., Harish, P.V., Nikhila, G., Doondeswar, P. and Meghana, S. (2021) Design and Implementation of Fuzzy PID Controller for Controlling the Speed of Robotic Vehicle System in MATLAB. *SSRN Electronic Journal*.
- [17] 武训. 基于智能分数阶动态面的 H 型平台模糊非线性 PID 轮廓控制[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [18] Mohamed, M.R., Roshdy, A.A., Ali, A.A. and Fayed, M.A. (2023) Design and Simulation of Fuzzy-Adaptive-PID Controller for Positioning of Stewart Platform Using Electric Linear Actuators. *2023 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt)*, Alexandria, 18-20 July 2023, 742-747. <https://doi.org/10.1109/itc-egypt58155.2023.10206093>