

基于模糊PID控制的轮式移动机器人系统性能研究

刘 韬, 聂 岭, 杨流松

盐城工学院汽车工程学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2025年6月22日; 录用日期: 2025年7月12日; 发布日期: 2025年7月23日

摘 要

随着科技的高速发展, 麦克纳姆轮式移动机器人在众多领域得到了广泛应用。运动控制系统精度是衡量轮式机器人性能的重要指标之一。本文聚焦于使用模糊PID控制算法优化两轮差分驱动的非线性控制系统。通过对语言变量的确定、隶属度函数的选取、控制规则的建立和模糊推理, 建立了基本的模糊控制器。同时, 运用Simulink模块搭建模糊控制系统。搭建试验台并结合多种不同工况进行实验验证, 记录数据并结合RMSE分析此模糊控制系统的性能, 进一步分析误差产生的原因。通过试验测试数据表明, 麦克纳姆轮式机器人使用模糊PID控制相较于传统PID控制精度更高。

关键词

模糊PID, 两轮差分驱动, 麦克纳姆轮, Simulink仿真

Research on Wheeled Mobile Robots System Performance Based on Fuzzy PID Control

Tao Liu, Ling Nie, Liusong Yang

School of Automotive Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Jun. 22nd, 2025; accepted: Jul. 12th, 2025; published: Jul. 23rd, 2025

Abstract

With the rapid development of technology, Mecanum-wheeled mobile robots have been widely applied in various fields. The precision of the motion control system is one of the important indicators

文章引用: 刘韬, 聂岭, 杨流松. 基于模糊 PID 控制的轮式移动机器人系统性能研究[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(3): 292-301. DOI: 10.12677/dsc.2025.143029

for measuring the performance of wheeled robots. This paper focuses on optimizing the nonlinear control system of a¹ two-wheel differential-drive using the fuzzy PID control algorithm. By determining the linguistic variables, selecting the membership functions, establishing the control rules, and conducting fuzzy reasoning, a basic fuzzy controller is established. Meanwhile, the fuzzy control system is built using Simulink modules. An experimental platform is set up and experiments are conducted under various working conditions to verify the system. Data are recorded and the performance of the fuzzy control system is analyzed using RMSE, while the causes of errors are further investigated. The experimental test data shows that the Mecanum-wheeled robot using fuzzy PID control achieves higher precision compared to traditional PID control.

Keywords

Fuzzy PID, Two-Wheel Differential-Drive, Mecanum-Wheel, 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

近年来, 自动化技术、智能控制技术、无线通信技术和互联网技术都取得了长足的发展和进步, 在上述各种技术的共同推动下机器人的智能化水平显著提高。这其中, 轮式移动机器人由于其结构相对简单、运动灵活、能耗较低等优势, 在工业生产、物流配送、家庭服务、军事侦察等诸多领域展现出巨大的应用潜力。目前常用的轮式机器人驱动方式为: 麦克纳姆轮式机器人、全轮偏转式移动机器人和球轮式移动机器人。麦轮式移动机器人相对于传统带有转向装置的移动平台更加灵活, 四个麦克纳姆轮均由电机单独控制, 通过控制各个轮系的转速和方向可以组合出任意方向的移动, 其三维模型如图 1 所示。轮式移动机器人控制系统作为整个机器人的核心, 对其移动稳定性和定位精确度至关重要。对于轨迹跟踪控制方法的研究, 目前在国内外都取得较显著的成果, 如郭建明、田献军、刘清来自武汉理工大学自动化学院, 他们发表的论文探讨了基于模糊神经网络的移动机器人轨迹实时跟踪技术[1]。提出了一种结合模糊逻辑和神经网络的新型控制器, 通过合理设计神经网络结构和参数学习算法, 使控制器能够实时调整机器人的运动以紧密跟踪预设轨迹, 并在 DrRobot 公司的 WiRobotX80 机器人实验平台上得到了验证。此外, 北京农学院智能科学与工程学院的邱权教授团队, 发表的论文中提出了一种模糊 PID 控制策略, 用于大型高地隙移动机器人系统。该策略使控制器能够自适应地调整 PID 参数[2], 减少了环境干扰引起的偏差, 现场实验结果验证了其有效性。以及天津大学任超提出的基于模糊控制理论研究全方位移动机械手轨迹跟踪控制系统的参数在线自整定方法, 旨在提高其在不确定性和时滞条件下轨迹跟踪的性能和鲁棒性[3]。在国外, 由日本芝浦理工学院工程学院副教授 Ngoc-Tam BUI 和河内大学的 Quy-Thinh Dao 博士领导的研究团队, 针对气动人工肌肉(PAM)系统的非线性特性导致的运动轨迹控制挑战, 提出了自适应模糊滑模控制器(AFSMC) [4]方法, 利用 Takagi-Sugeno 模糊算法来估计扰动并自动更新输出值, 实现了更好的运动跟踪和适应性。

与此同时, 各类问题也接踵而至。首先, 在控制精度方面: 随着控制对象复杂度增加, 一型模糊控制和区间二型模糊控制在控制精度上可能难以达到期望, 而广义二型模糊控制[5]虽能增强解决不确定性问题的能力, 但会大大增加系统计算量和复杂性, 且合适的隶属函数难以设计。其次, 在系统复杂性方面: 模糊控制器与其他算法或技术结合时, 如模糊神经网络、模糊 PID 等, 虽然能提升性能, 但也可能

使系统结构变得复杂，增加了设计、调试和维护的难度。以及实时性方面：在处理复杂轨迹跟踪任务或存在大量不确定性因素的环境中，模糊控制器可能需要更多时间进行推理和决策，影响实时性，导致机器人不能及时准确地跟踪轨迹。

但对于简单的以两轮差分驱动的麦轮小车控制稳定性能研究来说，模糊 PID 控制较传统 PID 而言依然是误差最小，控制稳定，可控成本最优的选择。因此，为有效提升移动机器人的控制精度及运动稳定性，本文以 RMM3508 直流无刷减速电机为对象建立电机的数学模型，使用 MATLAB 中的 Simulink 模块进行模糊控制器的搭建与仿真，同时比对了使用传统 PID 控制下小车的轨迹精度，进而分析比对其控制效果。

2. 电机传递函数

由自动控制理论求得电机的传递函数为：

$$G(S)=\frac{K_t}{RJ_s+(RB+K_tK_e)} \quad (1)$$

其中 R (电枢电阻)、 L (电感)、 J (转动惯量)、 B (阻尼系数)、 K_e (反电动势常数)和 K_t (转矩常数)。

查阅 M3508 资料得出电机主要性能参数，见表 1 所示：

Table 1. M3508 motor main performance parameters

表 1. M3508 电机主要性能参数

主要性能参数	数据
电枢电阻 R	0.5Ω
电枢电感 L	0.002 H
电机转动惯量 J	$0.001 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
负载阻尼系数 B_L	$0.03 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$
转矩常数 K_t	$0.02 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$
反电动势常数 K_e	$0.02 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$
电机阻尼系数 B_m	$0.01 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
负载转动惯量 J_L	$0.005 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

经以上公式结合表中数据求得电机与负载的线性传递函数：

$$G(s)=\frac{1666.67}{s^2+256.67s+1700} \quad (2)$$

3. 模糊 PID 模型构建

3.1. PID 控制原理

在诸多控制算法中 PID 控制算法是一种最为经典、高效且具备独立参数调整优势的算法。PID 控制根据机器人运动过程中位置、速度等信息的实时反馈，对系统的输出值与目标值之间的差距进行动态调整，PID 控制的三个步骤是比例控制 K_p 、积分控制 K_i 和微分控制 K_d 通过三个连续的控制过程使移动机器人实际的运行轨迹逐步趋近于目标轨迹路径。然而，鉴于移动机器人控制过程较为复杂，属于一种非线性的时变控制系统，传统 PID 在参数控制和速度响应等方面无法满足需求，为此引入了模糊控制算法优化 PID 控制器的性能。

3.2. 模糊控制理论基础

模糊控制基于模糊集合和模糊逻辑。它将输入的精确量通过模糊化处理, 转化为模糊语言变量, 如“大”“中”“小”。然后依据事先制定好的模糊控制规则进行推理, 这些规则通常以“如果……那么…….”的形式[6]呈现。最后通过去模糊化, 将推理得到的模糊结果转换为精确的控制量输出。

3.3. 模糊控制算法原理

模糊 PID 控制算法把误差(Error, 简称 E)和误差变化率(Error Change Rate, 简称 EC)作为模糊控制器的输入, 将 PID 控制器的三个参数 k_p (比例系数)、 k_i (积分系数)、 k_d (微分系数)作为输出。首先, 把输入的 E 和 EC 进行模糊化, 得到对应的模糊变量。然后, 依据模糊控制规则对 k_p 、 k_i 、 k_d 进行调整。例如, 当误差 E 较大时, 应增大 k_p 使系统响应加快; 当误差变化率 EC 较大时, 应适当调整 k_d 以抑制超调。最后, 将模糊推理得到的 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊值去模糊化, 得到精确的参数值, 用于 PID 控制器进行控制。通过不断地实时调整 PID 参数, 使系统能在不同的工作条件下都保持较好的控制性能。

模糊控制过程也包括 3 个环节, 即模糊化过程: 用于将输入的精确值映射为模糊集合中的隶属度。高斯隶属函数, 对于输入变量 x , 其属于模糊集合 A 的隶属度:

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

其中, c 是隶属度函数的中心, σ 是标准差, 决定了函数的宽度。

其次, 制定模糊规则: 给定输入 A' , 通过模糊关系 R 进行推理得到输出 B' , 其隶属度函数

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in X} \{ \mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y) \} \quad (4)$$

其中 $\sup$ 表示取上确界(最大值)运算, $\wedge$ 表示取最小值计算。

最后是解模糊过程, 本文使用重心法实现去模糊化, 将模糊集合的重心作为去模糊化后的精确值 y^* ,

$$\text{计算公式为: } y^* = \frac{\int_{y \in Y} y \mu_{B'}(y) dy}{\int_{y \in Y} \mu_{B'}(y) dy}$$

其中, 模糊推理式算法的核心过程, 模糊推理依赖于专家经验和选择最合适的模糊隶属度函数。引入模糊控制算法的 PID 控制流程, 见图 1 所示:

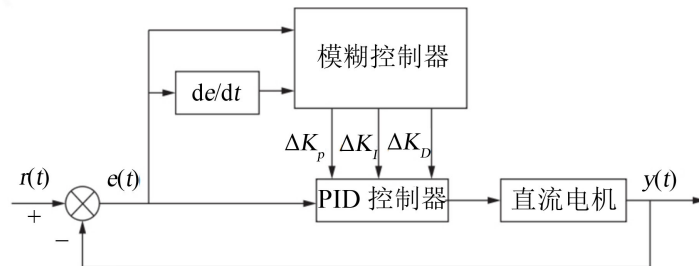


Figure 1. Fuzzy PID controller workflow
图 1. 模糊 PID 控制器的工作流程

模糊 PID 控制算法的优势在于, 在每个控制环节中引入了增量量化因子 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d , 决定的 PID 控制器参数的因素除了包括传统的 K_p 、 K_i 和 K_d 之外, 还包括了增量因子。本文采用二输入三输出的模糊控制器搭建模糊控制系统, 使用输入偏差 e 和偏差变化率 e_c 作为模糊控制器的输入变量, 定义 7

个模糊函数子集，记作： $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ，此外，根据 e 、 e_c 和增量量化因子的不同特性，选择了不同模糊隶属度函数，其中 e 和 e_c 选择精确度更高的高斯隶属度函数，见图2；而针对增量量化因子则选择了三角隶属度函数，并对论域设定进行了优化在设定论域区间 $[-6, 6]$ 内实现了自由变化和调整，见图3：

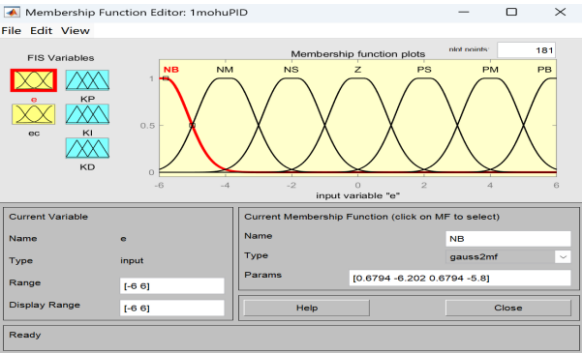


Figure 2. Gaussian membership function
图2. 高斯隶属度函数

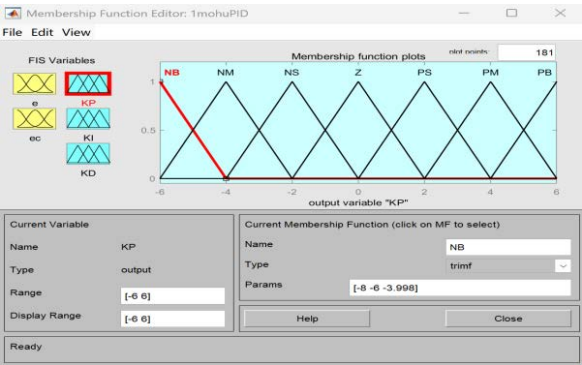


Figure 3. Triangular membership function
图3. 三角隶属度函数

增量因子 K_p 、 K_i 和 K_d 的模糊推理规则见表2~4：

Table 2. Rule base for incremental factor K_p structure

表2. 增量因子 K_p 的规则表

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	NS	NM	Z	NS
NM	PB	NS	PB	NM	NS	NM	NS
NS	NM	PB	PS	NM	NM	Z	NS
Z	PM	PM	NS	Z	PS	PS	NM
PS	PM	NS	Z	PS	PS	NB	NM
PM	NS	Z	NS	NM	NM	PS	NB
PB	Z	Z	NS	NB	PS	NB	PS

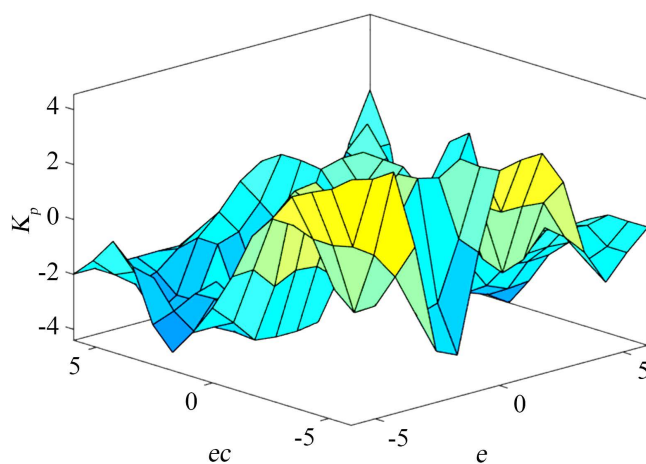
Table 3. Rule base for incremental factor K_i structure**表 3.** 增量因子 K_i 的规则表

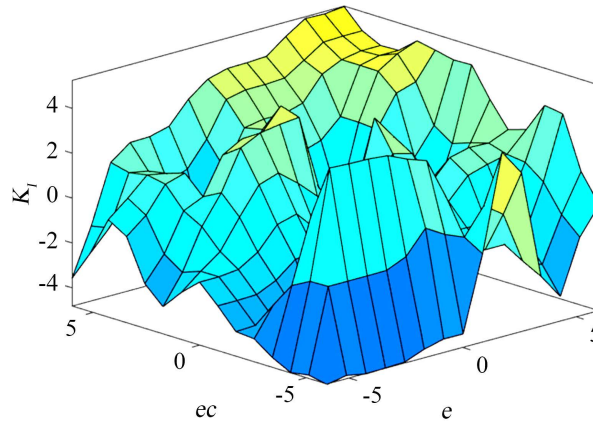
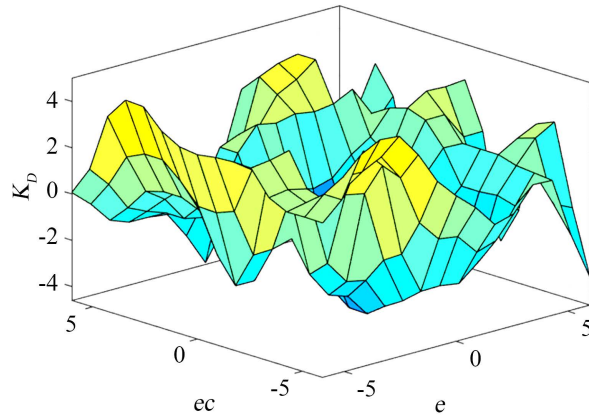
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NS	NM	Z	NM
NM	NB	PB	NM	NS	Z	PS	PS
NS	NB	PB	NB	Z	PM	NB	PS
Z	NB	PM	NS	NS	PB	PS	PM
PS	PB	NS	Z	PB	NM	PS	PM
PM	NB	NS	PS	NS	PM	PM	PB
PB	Z	PB	PS	PB	PB	PM	PB

Table 4. Rule base for incremental factor K_d structure**表 4.** 增量因子 K_d 的规则表

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	PS	PM	PM	PB	PB	Z
NM	PB	PS	PB	NM	Z	Z	NS
NS	PB	PB	NM	Z	PB	NS	NS
Z	PS	NM	NB	NB	PM	PB	NB
PS	Z	NM	Z	Z	PB	PB	NS
PM	PS	PS	PS	PM	PS	NS	PS
PB	NM	PM	NB	PM	NM	PM	NB

图 4~6 为输出语言变量对应输入语言变量的曲面关系图，可以直观的观察模糊控制器输入对输出的影响。

**Figure 4.** K_p control surface**图 4.** K_p 控制曲面

Figure 5. K_i control surface图 5. K_i 控制曲面Figure 6. K_d control surface图 6. K_d 控制曲面

4. 算例分析

4.1. 实验设置

搭建一个基于两轮差分驱动(轮径 $D = 0.1$ m, 轴距 $L = 0.3$ m)的轮式移动机器人实验平台, 装备高精度编码器(100 Hz)、陀螺仪、激光雷达等传感器, 控制器选用工业级单片机。在实验场地布置预设路径, 包含直线段、圆弧段、折线等典型轨迹, 模拟实际应用场景。分别使用传统 PID 控制及模糊 PID, 传统 PID 参数 $K_p = 1.2$, $K_i = 0.05$, $K_d = 0.02$; 模糊 PID 转速偏差 e 、偏差变化率 ec (量化等级均为 $[-6, 6]$), 让机器人在各情形下多次重复沿预设路径运动, 记录运行数据。

4.2. 性能指标量化

路径跟踪精度: 本文采用均方根误差(RMSE)衡量机器人实际轨迹与预设轨迹的偏差程度, RMSE 值越小, 路径跟踪精度越高。计算公式为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}, \text{ 其中 } (x_i, y_i) \text{ 为实际轨迹点坐标, } (\hat{x}_i, \hat{y}_i) \text{ 为对应预设轨迹点坐标, } N \text{ 为轨迹点总数。}$$

- 速度稳定性：通过计算速度波动标准差 σ_v 评估， $\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (v_j - v)^2}$ ， v_j 为采样时刻速度， v 为平均速度， M 为采样点数。较小的 σ_v 表明速度稳定性良好。
- 抗干扰能力：在机器人运行过程中人为施加外部干扰，本实验在 $t = 10\text{ s}$ 时分别施加单侧负载 10 N (模拟地面摩擦差异)、脉冲力矩 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 及持续风扰 5 m/s ，观察机器人偏离预设轨迹的最大偏差值 $\Delta_{\max}$ 及恢复到正常轨迹所需时间 T ，用以衡量抗干扰性能。

4.3. 实验数据与 RMSE 计算

4.3.1. 传统 PID 控制器

转速偏差波形特征
动态阶段(0~10 s)：启动时最大偏差 $e_{\max} = 4.5\text{ rpm}$ ，超调量 $\sigma = 28\%$ ，调节时间 $t = 6\text{ s}$ (误差 < 5%)。
干扰阶段(10~20 s)：负载加入后(单侧负载 10 N)偏差骤升至 3.8 rpm ，稳态误差维持在 $\pm 1.2\text{ rpm}$ 。

4.3.2. 模糊 PID 控制器

转速偏差波形特征
动态阶段(0~10 s)：启动时最大偏差 $e_{\max} = 1.8\text{ rpm}$ ，无明显超调(见图 7)，调节时间 $t = 2.5\text{ s}$ 。
干扰阶段(10~20 s)：负载加入后(单侧负载 10 N)偏差仅波动至 1.1 rpm ，稳态误差迅速收敛至 $\pm 0.3\text{ rpm}$ 。

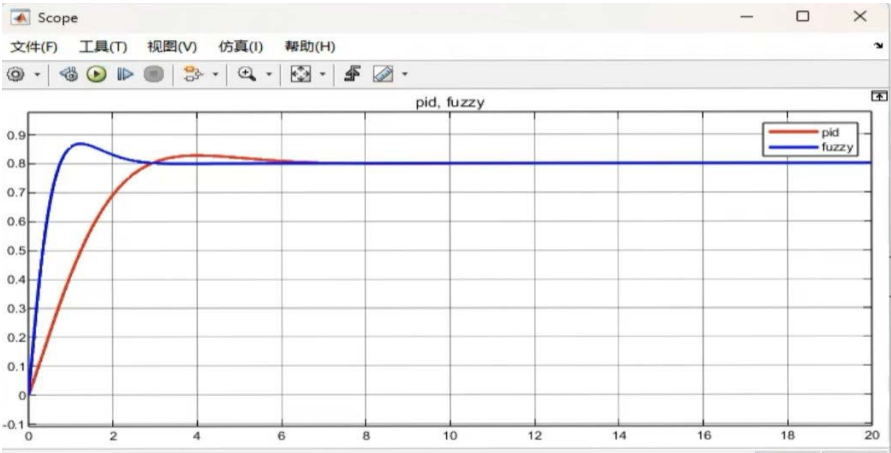


Figure 7. Speed error waveform characteristics
图 7. 转速偏差波形特征

4.4. 结果分析

4.4.1. 定量对比

Table 5. Data comparison
表 5. 数据对比

干扰类型	干扰强度	预设轨迹坐标	传统 PID			模糊 PID			轨迹点总数 N
			δ (m)	T (s)	RMSE	δ (m)	T (s)	RMSE	
力干扰	10 N	直线轨迹：起点(0, 0)，终点(10, 0)	1.08	6.2	2.34	0.35	2.5	0.94	5
脉冲力矩	15 N·m	圆形轨迹：中心点(0, 0)，R = 2 m	1.02	5.9	2.26	0.28	2.3	0.86	3
持续风扰	5 m/s	正弦曲线：y = 1.5 sin (0.5 x)	1.21	7.1	2.52	0.42	2.8	0.96	10

通过实验测量与计算(数据见表5),从RMSE、最大偏差及调节时间这三个指标分析,得出阶段性结论:模糊PID较传统PID在这三个对应指标分别提升了59%、60%及58%。

4.4.2. 定性分析

① 传统PID的局限性

参数固定缺陷:固定 $K_p/K_i/K_d$ 无法兼顾动态响应与稳态精度。例如,高 K_p 虽加快响应,但易导致超调;低 K_p 则使抗干扰能力下降(如加入负载后误差回升明显)。

线性控制瓶颈:两轮驱动系统存在非线性(如轮胎打滑、齿轮间隙),传统PID的线性模型难以准确描述,导致误差波动较大。

② 模糊PID的优势机制

自适应调节:通过模糊规则实时调整 $K_p/K_i/K_d$ (如误差大时 K_p 加快响应,误差小时增大 K_i 消除稳态误差),可实现“动态阶段强响应、稳态阶段高精度”。

鲁棒性增强:模糊逻辑对模型不确定性具有天然耐受性,在负载干扰下(非线性干扰)仍能快速抑制偏差, RMSE仅为传统PID的40%,体现更强的抗干扰能力。

5. 结论

(1) 适配两轮驱动的非线性特征:两轮差分系统存在非线性因素(如非对称摩擦、齿轮间隙),传统PID基于线性模型设计,难以精确描述实际动态,导致控制效果波动。模糊PID通过非线性模糊规则表(输入为误差和误差变化率,输出为参数修正量),直接从系统层面优化控制,无需依赖精确数学模型,更贴合实际场景。

(2) 灵活应对多种工况需求:在不同运动模式下(如低速转向、高速行驶)模糊PID可自动调整参数;低速场景:增大 K_i 消除静差,避免“爬行”现象;高速场景:增大 K_d 抑制惯性超调,提升稳定性。且传统PID需手动重新修正参数,难以适应工况快速切换。

(3) 控制精度全面提升:模糊PID动态响应更快且平稳,在启动阶段,模糊PID的调节时间(误差<5%)可以从传统PID的6s缩短至2.5s,且无明显超调(传统PID超调量可达28%);其次,抗干扰能力更强,由于模糊PID对模型不确定性(如摩擦变化、机械误差)具有鲁棒性,能通过自适应参数调节快速消除干扰影响,当施加单侧负载时,传统PID的转速偏差骤升至3~4 rpm并维持较大稳态误差(如 ± 1.2 rpm),而模糊PID的偏差仅波动至1 rpm左右,且快速收敛至 ± 0.3 rpm以内。最后,均方根误差(RMSE)更低,实验数据显示,模糊PID的转速偏差RMSE为传统PID的40%~60%(如本实验测量传统PID为2.34 rpm时,模糊PID可降至0.94 rpm),稳态误差趋近于零,同步控制更精准。

(4) 总结

模糊PID通过自适应参数调节和非线性控制特性,从根本上解决了传统PID在两轮差分驱动中的精度不足与鲁棒性缺陷,尤其适合需要高频动态调整、强抗干扰能力的移动机器人场景。其核心优势可概括为:精度高、响应快、抗扰强、易适配,是提升机器人运动控制性能的有效方案。

参考文献

- [1] 赵旗,王培德,罗兰,等.路面激励Simulink模型的建立及其应用[J].科学技术与工程,2018,18(1):128-132.
- [2] 施云.基于模糊PID控制的直流电机控制算法仿真分析[J].电子制作,2020(13):6-9.
- [3] 徐亚茹,陆静平.步进电机驱动系统模糊PID仿真分析[J].机械设计与制造,2014(12):23-25,29.
- [4] 冯永保,常钰.基于Fuzzy-PID控制的调平支腿精确定位的仿真研究[J].液压气动与密封,2011,31(9):35-42.
- [5] 张燕.基于模糊控制的智能移动机器人最优避障路线生成系统[J].机械设计与制造工程,2022,51(4):86-90.

-
- [6] 谭辉. 移动机器人控制方法综述[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(20): 125-127.
 - [7] 付宜利, 李寒, 徐贺, 等. 轮式全方位移动机器人几种转向方式的研究[J]. 制造业自动化, 2005, 27(10): 36-40.
 - [8] M3508 P19 Brushless DC Gear Motor 使用说明[EB/OL].
<https://www.robomaster.com/zh-CN/products/components/general/M3508>, 2019-02-14.