

# 基于前馈型变论域模糊PID控制的智能小车 轨迹跟踪方法

陆钰, 李丹, 赵文杰

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽马鞍山 243032)

**摘要:**为提高智能小车轨迹跟踪的精度及抗干扰能力, 提出1种基于前馈型变论域模糊控制方法。以自动导向小车(automated guided vehicle, AGV)为研究对象, 建立小车运动学模型对其进行动力学分析; 在保持主控制参数不变的情况下, 将前馈控制加入变论域模糊控制, 搭建前馈型变论域模糊PID(proportional-integral-derivative)控制系统, 通过变论域模糊PID控制调整参数使系统获得较好的稳定性, 再通过调整前馈控制参数使系统的目标跟踪性能达到最佳; 设定S形曲线跟踪路线, 在Matlab/Simulink平台下搭建传统PID、模糊PID、变论域模糊PID及前馈型变论域模糊PID等4种控制模型进行仿真实验, 比较验证本文方法的控制性能。结果表明: 无干扰情况下, 4种控制方法的车辆转弯最大横向偏差分别为0.258 0, 0.198 8, 0.179 2和0.112 5 m, 本文方法的偏差最小, 轨迹跟踪精度最高; 模拟真实路况下, 4种控制方法的车辆转弯最大横向偏差分别为0.891 7, 0.820 9, 0.791 7, 0.683 3 m, 本文方法的偏差依然最小, 抗干扰能力最强, 验证了本文所提控制方法兼具跟踪高精度和良好稳定性的优点。

**关键词:**智能小车; 前馈控制; 轨迹跟踪控制; 变论域模糊控制; 抗干扰能力; 自主导航

**中图分类号:** TP 242; TP 273.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23150



## Intelligent Car Trajectory Tracking Method Based on Feedforward Variable Domain Fuzzy PID Control

LU Yu, LI Dan, ZHAO Wenjie

(School of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy and anti-interference ability of intelligent car trajectory tracking, a fuzzy control method based on feedforward variable domain was proposed. Taking the automated guided vehicle (AGV) as the research object, the kinematic model of the car was established to conduct the dynamic analysis on it. Under the condition of keeping the main control parameters unchanged, the feedforward control was added into the variable-theoretic domain fuzzy control to build the feedforward variable-theoretic domain fuzzy PID control system, and the parameters were adjusted through the variable domain fuzzy PID control to achieve better stability. Then the system achieved optimal target tracking performance by the adjusting the feedforward control parameters. An S-shaped curve tracking route was set up and the simulation experiments on four control models, including traditional PID, fuzzy PID, variable universe fuzzy PID, and feedforward variable domain fuzzy PID were conducted on the Matlab/Simulink platform to compare and verify the control performance of the proposed method. The results show

收稿日期: 2023-01-08

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(2108085MF225)

作者简介: 陆钰(2000—), 女, 安徽安庆人, 硕士生, 主要研究方向为运动控制等。

通信作者: 李丹(1976—), 女, 安徽马鞍山人, 博士, 教授, 主要研究方向为图像处理与机器人视觉、自主导航等。

引文格式: 陆钰, 李丹, 赵文杰. 基于前馈型变论域模糊PID控制的智能小车轨迹跟踪方法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(5):499-506.

that under the condition of no interference, the maximum lateral deviation of vehicle turning of the four control methods is 0.258 0, 0.198 8, 0.179 2 and 0.112 5 m, respectively, and the method proposed in this paper has the smallest deviation and the highest trajectory tracking accuracy. Under the simulated real road conditions, the maximum lateral deviation of vehicle turning of the four control methods is 0.891 7, 0.820 9, 0.791 7, 0.683 3 m, respectively. The deviation of the proposed method is still the smallest, and the anti-interference ability is the strongest, which confirms that the control method proposed in this paper has the advantages of high tracking precision and excellent stability.

**Keywords:** intelligent cart; feedforward control; trajectory tracking control; variable domain fuzzy control; anti-interference ability; self-contained navigation

随着人工智能技术的快速发展,无人驾驶技术已成为智能车辆领域关注的热点话题。自主导航是智能车辆实现无人驾驶的核心能力之一,路径跟踪控制是实现自主导航的关键<sup>[1-2]</sup>。智能车辆在行驶过程中所处环境复杂,且易受外部干扰的影响,这就要求控制算法具备更高的精度和更强的鲁棒性和抗干扰特性。目前,主流控制算法包括模糊控制<sup>[3]</sup>、神经网络控制<sup>[4]</sup>、滑模控制<sup>[5]</sup>等。其中模糊控制主要依赖专家经验,不具有普适性<sup>[6]</sup>;神经网络控制的计算成本高<sup>[7-8]</sup>;滑模控制在实际应用中输出会产生抖动<sup>[9]</sup>。因此,进一步开展智能车辆轨迹跟踪控制研究,对于实现智能车辆的自主导航、提高道路交通安全、优化运输效率以及推动自动驾驶技术的商业化应用等方面都具有深远的意义。

PID(proportional-integral-derivative)是1种经典的控制算法,因其控制结构简单、理论成熟被广泛应用于各种工业场景,包括路径跟踪。标准的PID算法在某些情况下可能无法达到最佳的路径跟踪性能,很多学者在此基础上进行改进优化。孙志伟等<sup>[10]</sup>提出1种基于径向基函数神经网络自适应PID算法的车辆轨迹跟踪控制方法,提高了无人驾驶车辆的稳定性和鲁棒性;王雪闯等<sup>[11]</sup>设计1种基于积分终端滑模和滑模观测器的轨迹跟踪控制方法,可使移动机器人获得高精度和快速收敛的跟踪性能;Omer等<sup>[12]</sup>提出1种模糊自适应PID控制方法,可有效减轻白噪声引起的振荡;Song等<sup>[13]</sup>提出1种基于深度强化学习的PID参数整定与优化方法对无人水面艇航向进行控制,可满足制导控制对PID参数的时变需求;Chen等<sup>[14]</sup>提出1种基于模型预测控制框架的新型横向和纵向耦合控制方法,对参考路径有更好的跟踪效果。现有控制方法多是基于控制参数进行优化,一定程度提高了路径跟踪的精度和抗干扰能力,但给定的干扰过于简单,且没有通过实车验证能否满足外界多变的环境与道路工况

的要求。现实情况下外界环境复杂,车辆行驶过程中会受到空气阻力、加速阻力、坡度阻力等外界的影响,路径跟踪控制面临更多的挑战,对车辆的控制性能提出了更严格的要求。研究<sup>[15]</sup>表明,车辆实际控制过程中,单一的智能控制方法会导致系统的控制精度降低、系统动态性能变差,将传统控制方法与智能方法结合是提高车辆控制水平的有效途径。鉴于此,以Car-like底盘自主导向车(automated guided vehicle, AGV)<sup>[16]</sup>为控制对象,提出1种将传统前馈控制与变论域模糊控制相结合的复合型模糊控制方法,在Matlab/Simulink环境下建立模型且模拟真实路况进行实验,验证所提方法的控制性能,以期进一步提高智能车辆系统的跟踪特性和抗干扰特性。

## 1 小车道行驶模型的建立

以AGV为研究对象建立小车运动学模型,且对其进行运动学分析。

### 1.1 运动学模型

通过改向机构改变小车两前轮的偏转角度实现转向,假设轮胎与地面不产生横向力且轮胎不产生偏移角,由直流电机通过减速齿轮带动驱动后轮旋转,舵机驱动前轮转向<sup>[17]</sup>;根据底盘后轮驱动前轮转向的特点,将其转向模型表示成如图1所示形式。

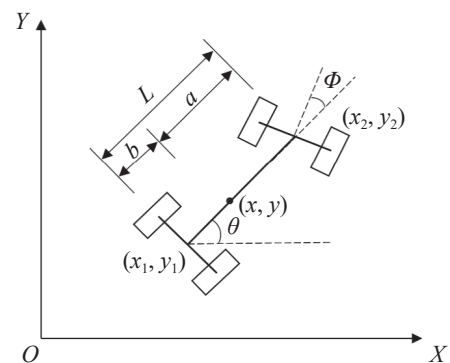


图1 AGV转向模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AGV steering model

定义小车的中轴线为从后轮中心到前轮中心的轴线, 假设小车重心在中轴线上, 如图 1 所示; 中轴线与  $X$  轴的夹角  $\theta$  为小车的方位角, 小车前轮方向与中轴线的夹角  $\phi$  为小车的转向角,  $L$  为车长,  $b$  为小车重心到后轮中心的距离,  $a$  为小车重心到前轮中心的距离。假设小车重心坐标为  $(x, y)$ , 后轮中心坐标为  $(x_1, y_1)$ , 前轮中心坐标为  $(x_2, y_2)$ , 可得到后轮位置关系为:

$$x_1 = x - b \cos \theta \quad (1)$$

$$y_1 = y - b \sin \theta \quad (2)$$

后轮速度关系为:

$$\dot{x}_1 = \dot{x} + b\dot{\theta} \sin \theta \quad (3)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{y} - b\dot{\theta} \cos \theta \quad (4)$$

由轮子运动特性可知后轮没有侧滑, 则有

$$\frac{\dot{y}_1}{\dot{x}_1} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (5)$$

将式 (3), (4) 代入式 (5) 可得重心运动约束公式

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta + b\dot{\theta} = 0 \quad (6)$$

根据前轮没有侧滑, 可得

$$\frac{\dot{y}_2}{\dot{x}_2} = \frac{\sin(\theta + \phi)}{\cos(\theta + \phi)} \quad (7)$$

同理可得重心运动约束公式为

$$\dot{x} \sin(\theta + \phi) - \dot{y} \cos(\theta + \phi) - a\dot{\theta} \cos \theta = 0 \quad (8)$$

定义小车中轴线为  $u$  轴、法向为  $w$  轴, 则小车质心法向速度为  $v_w$ 、轴向速度为  $v_u$ , 如图 2。

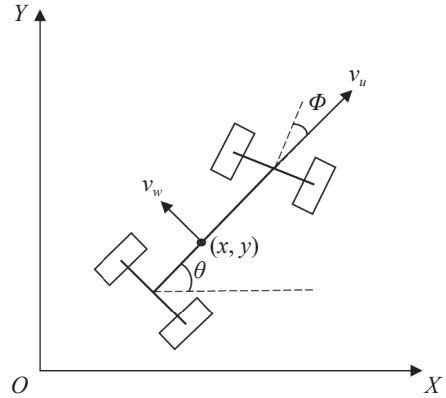


图2 AGV 质心运动学模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of AGV center-of-mass kinematics model

则  $X$  轴和  $Y$  轴方向的速度分别表示为:

$$\dot{x} = v_u \cos \theta - v_w \sin \theta \quad (9)$$

$$\dot{y} = v_u \sin \theta + v_w \cos \theta \quad (10)$$

将式 (9), (10) 代入式 (6), (8) 可得小车质心运动学模型:

$$\dot{x} = v_u \cos \theta - b\dot{\theta} \sin \theta \quad (11)$$

$$\dot{y} = v_u \sin \theta + b\dot{\theta} \cos \theta \quad (12)$$

则小车运动学模型可表示为:

$$\dot{x} = v \cos \theta \quad (13)$$

$$\dot{y} = v \sin \theta \quad (14)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \phi \quad (15)$$

图 3 所示为 Simulink 下 AGV 小车运动学模型。

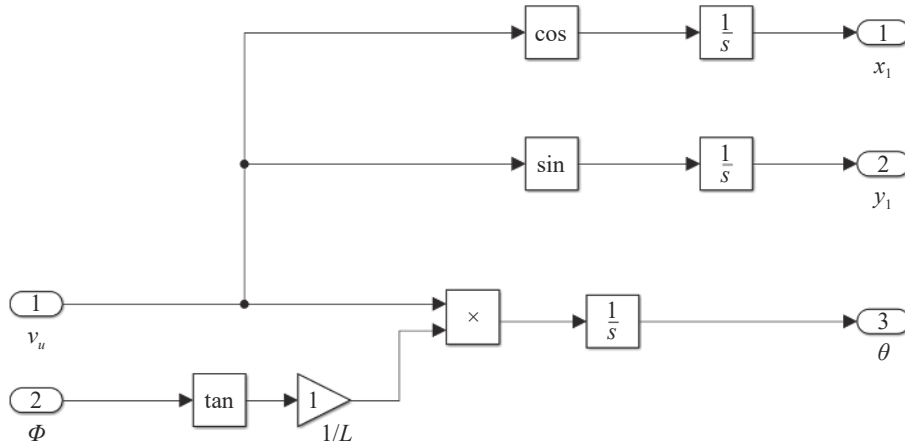


图3 Simulink 下 AGV 运动学模型

Fig. 3 Kinematics model of AGV in Simulink

### 1.2 动力学分析

小车在行进过程中受到各方面的行驶阻力, 在水平笔直道路上匀速行驶时需克服轮胎和地面之间的滚动阻力  $F_1$  和空气阻力  $F_2$ ; 在加速或爬坡时需额外克服加速阻力  $F_3$  和坡度阻力  $F_4$ <sup>[18-19]</sup>。因此, 小车行驶的总阻力为

$$\sum F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (16)$$

小车行驶时, 滚动阻力  $F_1$  等于汽车总重力  $G$  和滚动阻力系数  $f$  的乘积, 即

$$F_1 = Gf \quad (17)$$

其中滚动阻力系数  $f$  与路面种类、行驶车速及轮胎

的构造、材料、气压等有关。空气阻力  $F_2$  为汽车前进过程中空气对其产生的反向作用力,计算公式为

$$F_2 = \frac{CAv^2}{21.15} \quad (18)$$

其中:  $C$ 为空气阻力系数;  $A$ 为迎风面积;  $v$ 为车速,为方便计算,将速度单位 km/h 换算成 m/s,故空气阻力计算公式为

$$F_2 = \frac{CA(3.6v)^2}{21.15} = 0.6128CAv^2 \quad (19)$$

为便于计算,一般加速阻力的表达式为

$$F_3 = \delta m \frac{dv}{dt} \quad (20)$$

其中:  $\delta$ 为旋转质量换算系数,  $\delta > 1$ ;  $\frac{dv}{dt}$ 为小车速度变化率,即加速度;  $m$ 为车体质量。

坡度阻力  $F_4$  为小车在上下坡过程中由于克服重力而产生的外力,表达式为

$$F_4 = G \sin \varphi \quad (21)$$

其中  $\varphi$ 为坡度角。结合式 (16), 根据牛顿第二定律可得到小车的动力学行驶方程式:

$$m\dot{v} = F_5 - \sum F = F_5 - \left( Gf + 0.6128CAv^2 + \delta m \frac{dv}{dt} + G \sin \varphi \right) \quad (22)$$

其中  $F_5$ 为车辆牵引力。后续小车道路行驶状况模拟研究以式 (22) 为基础。

## 2 小车路径跟踪控制方法的设计

### 2.1 变论域模糊控制方法

模糊控制是在传统 PID 的基础上引进模糊逻辑控制,以解决传统 PID 控制无法实现实时调整 PID 参数问题的 1 种控制方法。模糊 PID 控制适用范围较广,在速度环控制中能够满足系统的快速响应需求,实现小车路径跟踪过程中的精确控制。固定的变量基本论域会直接影响模糊控制的控制性能,在

模糊控制中,事先设置模糊规则、比例因子和变量基本论域。因此,在该基础上结合变论域理论改进变论域模糊控制,通过选择合适的论域伸缩因子调整论域误差和论域,使被控系统能满足多种控制参数的范围和精度要求<sup>[19-20]</sup>,取得响应速度和稳态精度的最佳平衡。

变论域模糊 PID 控制的关键在于输入、输出伸缩因子的选取,假定系统输入变量的初始论域为  $[-E, E]$ 、输出变量的初始论域为  $[-Q, Q]$ ,  $\alpha$ 和  $\beta$ 为设定的输入、输出伸缩因子,则经伸缩因子影响后的输入论域为  $[-\alpha E, \alpha E]$ 、输出论域为  $[-\beta Q, \beta Q]$ ,图 4 为经伸缩因子伸缩后的论域变化图。

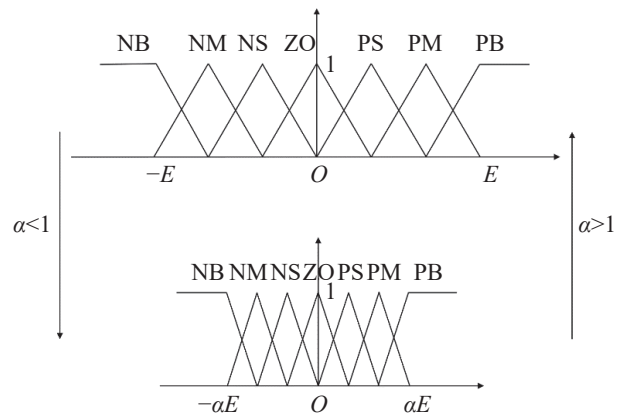


图4 论域变化图

Fig. 4 Domain change diagram

常用的变论域模糊伸缩因子有比例型伸缩因子和指数型伸缩因子<sup>[20]</sup>,具体公式如下:

$$\alpha(x_i) = 1 - \lambda \exp(-kx_i^2), \quad \lambda > 0, k > 0 \quad (23)$$

$$\alpha(x_i) = \varepsilon + \left( \frac{\|x_i\|}{E_i} \right)^\tau, \quad \varepsilon > 0, \tau > 0 \quad (24)$$

式中:  $x_i$ 为第  $i$ 个输入变量;  $\varepsilon$ 为非常小的常数;  $\lambda$ 为接近于 1 的常数。文中选用式 (23) 作为变论域的伸缩因子数学模型,变论域模糊控制方法设计如图 5。

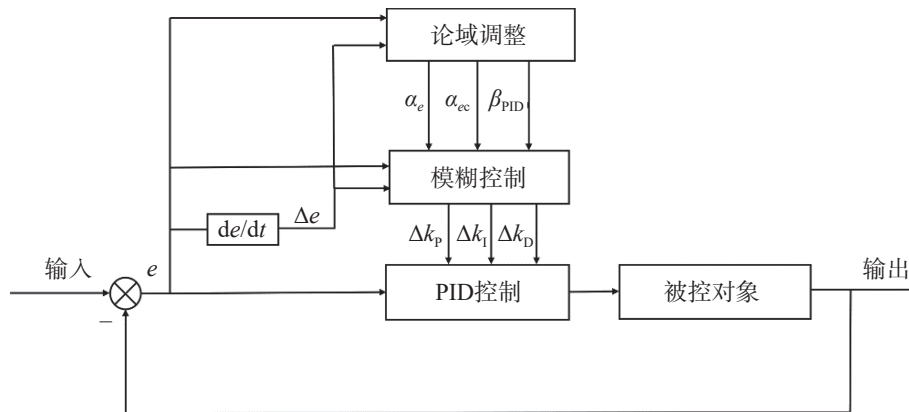


图5 变论域模糊 PID 控制框图

Fig. 5 Block diagram of variable domain fuzzy PID control

图 5 中的变论域模糊 PID 控制是基于误差  $e$  和误差变化量  $\Delta e$  的 PID 增益调整型控制方法, 误差  $e$  和误差变化量  $\Delta e$  经伸缩因子  $\alpha$  变论域调整后得到新的输入论域, 输出变量  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  经过伸缩因子  $\beta$  变论域调整后得到新的输出论域, 取  $\lambda=0.6, k=0.5$  代入式 (23) 可得到输入量  $e, \Delta e$  的伸缩因子为:

$$\alpha_e = 1 - 0.6e^{-0.5e^2} \quad (25)$$

$$\alpha_{\Delta e} = 1 - 0.6e^{-0.5\Delta e^2} \quad (26)$$

对于输出变量  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ , 变论域伸缩因子的要求  $\Delta k_p, \Delta k_d$  较大而  $\Delta k_i$  较小的输出结果, 所以将  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  的伸缩因子设置成:

$$\beta_p = 0.7|e| \quad (27)$$

$$\beta_D = 0.7|e| \quad (28)$$

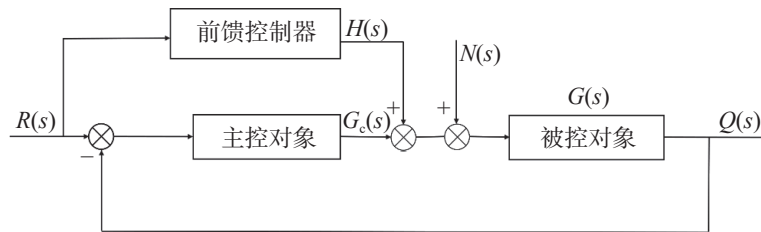


图 6 前馈控制系统框图

Fig. 6 Block diagram of feedforward control system

图 6 中:  $s$  为时间  $t$  的复频域变换量;  $R(s)$  为输入值;  $Y(s)$  为输出值;  $G(s)$  为被控对象传递函数;  $G_c(s)$  为控制传递函数;  $H(s)$  为前馈控制传递函数;  $N(s)$  为扰动输入传递函数。由此可得输出  $Q(s)$  到输入  $R(s)$  的传递函数为

$$\frac{Q(s)}{R(s)} = \frac{[H(s) + G_c(s)]G(s)}{1 + G(s)G_c(s)} \quad (30)$$

扰动  $N(s)$  到输入  $R(s)$  的传递函数为

$$\frac{N(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)G_c(s)} \quad (31)$$

其中

$$H(s) = -k_p (\alpha + \beta k_D s) \quad (32)$$

式中:  $k_p$  和  $k_D$  为比例和微分参数; 伸缩因子  $\alpha$  和  $\beta$  为可调的前馈控制参数。

由式 (30)~(32) 可知, 在保持主控制参数不变的情况下, 通过调整前馈控制参数  $\alpha, \beta$  使跟随性能达到最优。将图 6 所示的前馈控制加入变论域模糊控制, 搭建图 7 所示的前馈型变论域模糊 PID 控制系统, 通过变论域模糊 PID 控制调整参数使系统获得较好的稳定性, 再通过调整前馈控制参数使系统的目标跟踪性能达到最佳。通过前馈型变论域模糊 PID 控制复合控制使系统兼顾跟踪性能和稳定性。

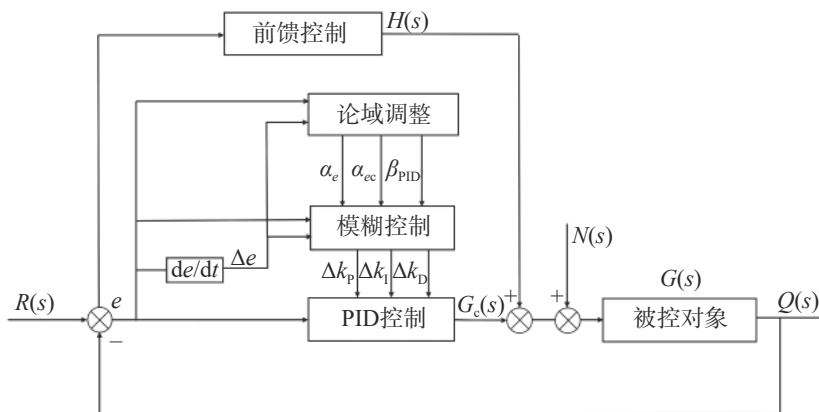


图 7 前馈型变论域模糊 PID 控制系统框图

Fig. 7 Block diagram of feedforward variable domain fuzzy PID control system

### 3 实验与结果分析

为更好地验证 AGV 的路径跟踪效果,根据 1.2 节所述规划 AGV 的运动轨迹,使用双半椭圆形曲线的类 S 形参考轨迹为 AGV 跟踪仿真的参考轨迹,选择三次 B 样条曲线<sup>[21-22]</sup>拟合轨迹规划的曲线(如图 8 所示)。

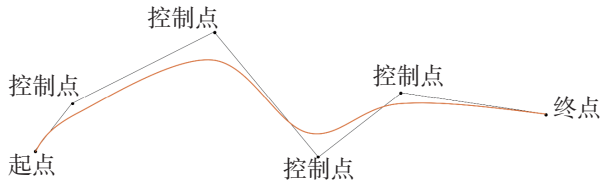


图8 B样条曲线

Fig. 8 B spline curve

设定起点(0, 0)、终点(0, 5.0 m), 4个控制点分别为(-2 m, 0.5 m), (-2 m, 2.5 m), (2 m, 2.5 m), (2 m, 4.5 m), 在 Matlab 下绘制生成轨迹规划曲线, 如图 9。

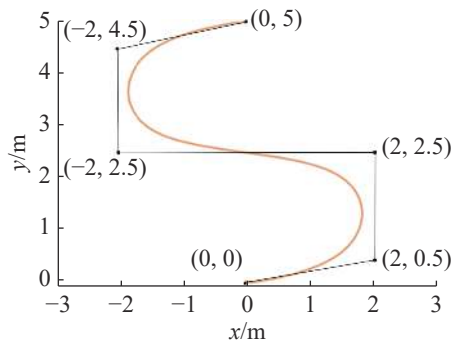


图9 轨迹规划曲线

Fig. 9 Trajectory planning curve

#### 3.1 仿真实验

为验证提出的前馈型变论域模糊 PID 控制方法的控制性能,在 Matlab/Simulink 平台搭建 AGV 运动学模型,同时搭建传统 PID、模糊 PID、变论域模糊 PID 及前馈型变论域模糊 PID 控制(本文方法) 4 种模型进行仿真实验。给定小车初始运行速度为 1 m/s, 无负载条件下实验仿真时间为 10 s, 当外界无干扰时, 4 种控制方法的速度响应曲线如图 10, 性能指标结果如表 1。

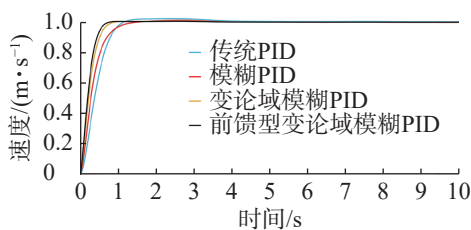


图10 无干扰下4种控制方法的速度响应曲线

Fig. 10 Speed response curves of four control methods without interference

表 1 无干扰下 4 种控制方法的性能指标

Tab. 1 Performance indexes of four control methods without interference

控制方法	超调量/ %	上升 时间/s	稳态误差/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
传统PID	2.043 9	1.001 7	0.003 0
模糊PID	0.947 5	0.975 5	0.001 1
变论域模糊PID	0.769 4	0.892 5	0.000 8
前馈型变论域模糊PID	0.599 7	0.783 6	0.000 5

由图 10 和表 1 可看出: 相较于传统 PID、模糊 PID 和变论域模糊 PID 控制 3 种方法, 本文方法的系统超调量分别降低了 144.42%, 34.78%, 16.97%, 上升时间分别缩短了 0.218 1, 0.191 9, 0.108 9 s, 稳态误差分别降低了 0.002 1, 0.000 6, 0.000 3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 系统的控制精度、动态性能和稳态性能均有明显的提升。系统运行至第 7 s 时分别加入宽度均为 1、幅值均为 0.5 的正脉冲干扰信号和负脉冲干扰信号, 4 种方法控制下系统运行响应结果如图 11, 12。

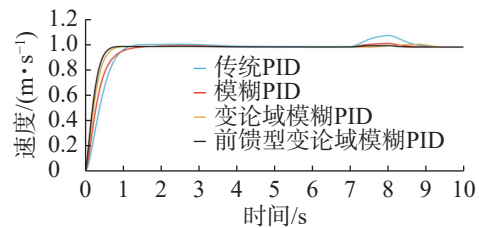


图11 正脉冲干扰下4种控制方法的速度响应曲线

Fig. 11 Speed response curves of four control methods under positive pulse interference

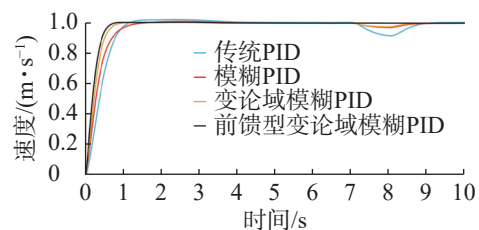


图12 负脉冲干扰下4种控制方法的速度响应曲线

Fig. 12 Speed response curves of four control methods under negative pulse interference

由图 11, 12 可看出: 相较于传统 PID、模糊 PID 和变论域模糊 PID 控制 3 种方法, 本文方法控制的系统在正负脉冲干扰下均能对外界干扰产生明显的抑制和消除作用, 可达到理想的稳定状态。为进一步验证本文方法的跟踪能力, 根据给定的 S 形期望路径进行路径跟踪实验, 得到无干扰下 4 种控制方法的小车路径跟踪轨迹, 结果如图 13; 4 种控制方法的跟踪性能指标如表 2。

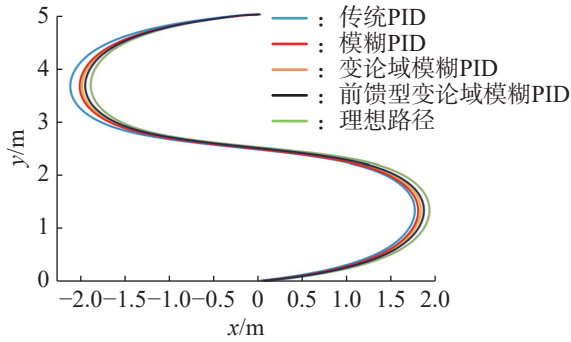


图13 无干扰下 4 种控制方法的路径跟踪轨迹

Fig. 13 Path tracking trajectories of four control methods without interference

表 2 无干扰下 4 种控制方法的性能指标

Tab. 2 Performance indexes of four control methods without interference

控制方法	最大横向误差/m	
	第一次转弯	第二次转弯
传统PID	0.258 3	0.120 8
模糊PID	0.198 8	0.095 6
变论域模糊PID	0.179 2	0.075 2
前馈型变论域模糊PID	0.112 5	0.025 1

由图 13 可看出: 相较于传统 PID、模糊 PID 和变论域模糊 PID 控制 3 种方法, 本文方法的小车轨迹跟踪路径误差更小, 更接近规划的理想路径, 跟踪效果最好。由表 2 可看出: 4 种控制方法中, 本文方法的小车 2 次转弯最大横向误差均最小, 分别在 0.112 5, 0.025 1 m 内, 且远小于其他 3 种控制方法, 路径跟踪精度显著提升。

### 3.2 模拟实验

根据式 (22), 假设小车在平直道路上匀速前进, 则小车在行驶状态下所受阻力为滚动阻力和空气阻力, 设定车辆加速度和坡度角均为 0, 在 Simulink 中建立小车动力学行驶方程, 运行得到模拟真实路况下小车路径跟踪轨迹, 结果如图 14。

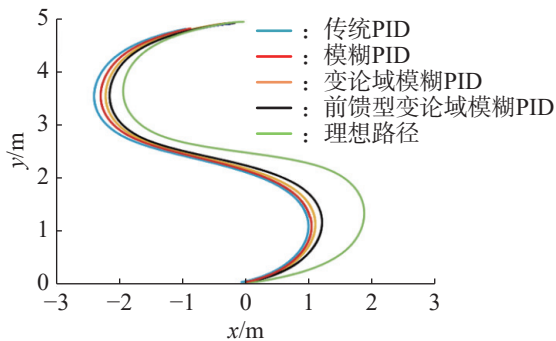


图14 模拟真实路况下 4 种控制方法的路径跟踪轨迹

Fig. 14 Path tracking trajectories of four control methods under simulated real road condition

4 种控制方法的跟踪性能指标如表 3, 速度响应

曲线如图 15。

表 3 模拟真实路况下 4 种控制方法的性能指标

Tab. 3 Performance indexes of four control methods under simulated real road condition

控制方法	最大横向误差/m	
	第一次转弯	第二次转弯
传统PID	0.891 7	0.291 7
模糊PID	0.820 9	0.287 6
变论域模糊PID	0.791 7	0.283 3
前馈型变论域模糊PID	0.683 3	0.216 6

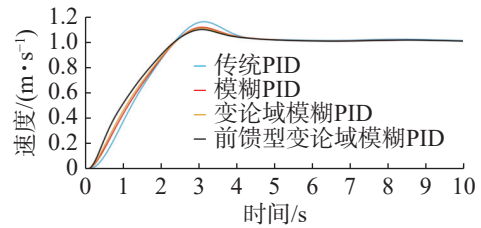


图15 模拟真实路况下 4 种控制方法速度响应曲线

Fig. 15 Speed response curves of four control methods under simulated real road condition

由图 14 可看出: 小车在模拟真实路况下, 由于滚动阻力和空气阻力的影响, 轨迹会产生一定程度的偏移, 尤其在第一次转弯的过程中, 轨迹受到的影响尤为明显。由表 3 可得出: 阻力对传统 PID、模糊 PID 和变论域模糊 PID 控制的跟踪精度影响较大, 最大横向误差达 0.891 7, 0.820 9, 0.791 7 m; 对本文方法的影响最小, 2 次转弯横向误差均最小, 分别为 0.683 3, 0.216 6 m, 远小于其他 3 种方法, 本文方法的轨迹跟踪效果最好。由图 15 可得出: 传统 PID、模糊 PID、变论域模糊 PID 控制和本文方法的速度响应最大误差分别为 0.154 6, 0.111 6, 0.104 5, 0.094 2 m/s, 本文方法控制下小车启动时的速度响应最大误差最小, 响应曲线更平稳, 系统具有优质的抗干扰能力。

综上可看出: 相较于传统 PID、模糊 PID 和变论域模糊控制, 无干扰情况下本文方法最大横向误差最小, 跟踪精度最高且改善明显; 模拟路况情况下, 本文方法速度响应曲线最大误差最小, 小车启动时的速度曲线更平稳, 稳定性能最好、抗干扰能力最强。由此表明, 本文提出的前馈型变论域模糊 PID 复合控制方法可兼顾跟踪性能和稳定性。

## 4 结论

以 Car-like 底盘 AGV 为控制对象, 提出 1 种前馈型变论域模糊 PID 控制方法, 在 Matlab/Simulink

实验平台搭建传统 PID、模糊 PID、变论域模糊 PID 和前馈型变论域模糊 PID 控制 4 种模型进行仿真实验,比较验证所提方法的控制性能。结果表明:无干扰情况下,本文方法对系统控制的超调量、上升时间和稳态误差性能指标均优于其他 3 种方法,系统的控制精度、动态性能和稳态性能明显提升;阻力干扰情况下,与其他 3 种方法相比,本文方法的速度响应最大误差最小,小车启动时的速度曲线最平稳,表现出最好的抗干扰效果,提出的复合控制系统可兼顾跟踪精度和稳定性。但本文研究仅实现了复合控制方法对小车轨迹跟踪的仿真,后续研究中需实物验证复合控制方法的控制效果。

#### 参考文献:

- [1] 邓健贤, 查云飞. 自动驾驶汽车路径跟踪控制发展综述[J]. 汽车文摘, 2023(5):1-8.
- [2] LI Y Y, YANG W, ZHANG X R, et al. Research on automatic driving trajectory planning and tracking control based on improvement of the artificial potential field method[J]. *Sustainability*, 2022, 14(19):12131.
- [3] 毛竞航, 吕海宁, 杨建民, 等. 基于模糊PID的深海采矿机器人路径跟踪控制[J]. 海洋工程, 2021, 39(5):151-161.
- [4] 罗予东, 李振坤. 基于群智优化小波神经网络的机械臂路径控制研究(英文)[J]. 机床与液压, 2020, 48(24):168-173.
- [5] 刘畅, 宋桂英, 杨博伟, 等. PMSM调速系统的新型指数趋近率滑模控制[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2022, 46(6):57-66.
- [6] FAROOQ U, HASAN K M, HANIF A, et al. Fuzzy logic based path tracking controller for wheeled mobile robots[J]. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2014, 6(2):145-150.
- [7] 徐天运. 基于图神经网络的路况时空预测算法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2022.
- [8] PASIC M, BEGIC E, KADIC F, et al. Development of neural network models for prediction of the outcome of COVID-19 hospitalized patients based on initial laboratory findings, demographics, and comorbidities[J]. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 2022, 11(8):4488-4495.
- [9] 邓正万. 采用扰动转矩观测器的无刷直流电机的控制[J]. 山东工业技术, 2018(2):1-2.
- [10] 孙志伟, 李聪. 基于径向基函数神经网络PID与模型预测控制的车辆轨迹跟踪控制[J]. 上海工程技术大学学报, 2022, 36(2):148-158.
- [11] 王雪闯, 王会明, 赵振华. 基于改进型积分终端滑模控制方法的移动机器人轨迹跟踪设计与实验[J]. 控制与决策, 2023, 38(10):2881-2887.
- [12] OMER S, MOHSIN R, AGHA A Z, et al. Online adaptive PID tracking control of an aero-pendulum using PSO-scaled fuzzy gain adjustment mechanism[J]. *Soft Computing*, 2019, 24(prepublish):1-15.
- [13] SONG L F, XU C Y, HAO L, et al. Research on PID parameter tuning and optimization based on SAC-auto for USV path following[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(12):1847-1847.
- [14] CHEN S P, CHEN H Y. MPC-based path tracking with PID speed control for autonomous vehicles[J]. *IOP Conference Series:Materials Science and Engineering*, 2020, 892(1):012034.
- [15] ALEJANDROSANJINES U, MAISINCHOJIVAJA A, ASANZA V, et al. Adaptive PI controller based on a reinforcement learning algorithm for speed control of a DC motor[J]. *Biomimetics (Basel, Switzerland)*, 2023, 8(5):1-6.
- [16] OLIVEIRA D P D, REIS D N P W, JUNIOR M O. A qualitative analysis of a USB camera for AGV control[J]. *Sensors*, 2019, 19(19):4111.
- [17] SEBASTIAN B, ROMAN W, MAREK K, et al. Using resture recognition for AGV control: preliminary research[J]. *Sensors*, 2023, 23(6):3109-3109.
- [18] 刘振岗. 汽车行驶阻力在底盘测试功机上的实现及其计算机模拟分析[J]. 时代汽车, 2019(1):113-114.
- [19] 闫涵. 基于行驶阻力问题的整车经济性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [20] 孙志瑞. 单轴磁悬浮系统的变论域模糊PID控制[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [21] 宋涛, 祁继辉, 侯培国, 等. 基于B样条曲线的投影图像颜色校正方法[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(6):210-214,220.
- [22] 段爱玲. B样条曲线生成逼近及其数控编程加工[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.

责任编辑: 何莉