

基于模糊 PID 的无人驾驶车辆横向控制方法^{*}

王毅, 马臣斌

(天府新区信息职业学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为提高无人驾驶车辆的横向控制精度,并解决常规横向控制中存在的响应速度慢、振荡频率高与鲁棒性差等问题,提出一种基于模糊 PID(比例-积分-微分)的无人驾驶车辆横向控制方法。通过忽略车辆的滚动、反弹与俯仰,得到具有二自由度的车辆运动学模型;在此基础上提出一种提高车辆横向控制精度、克服横向控制下常规问题的方法,最后通过 MATLAB/Simulink 仿真试验测试模糊 PID 算法的性能,并与模型预测控制算法(MPC)、比例导数算法(PD)进行对比。结果表明,相对于 MPC、PD 算法,模糊 PID 算法具有较高的横向控制精度,可克服横向控制中存在的响应速度慢、振荡频率高与鲁棒性差等问题。

关键词: 汽车;无人驾驶车辆;横向控制;模糊 PID

中图分类号: U463.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0011-04

无人驾驶车辆具有高度的自动化和智能化能力,能够实时感知周围环境、分析交通情况,并做出快速、准确的决策,从而大幅度降低交通事故风险^[1]。

横向控制系统可以通过精确的转向控制,增强车辆在道路上的稳定性与准确性,并自动适应不同的交通环境和路况,减少人为驾驶错误和事故的发生概率,提高行车安全性^[2]。但横向控制需要实现精确的转向控制,并具备良好的鲁棒性,能够处理各种异常情况与突发事件,以确保车辆在转弯时的稳定与安全。文献[3]对无人驾驶车辆横向运动学模型进行适当简化,采用零极点对消的方法将其简化为线性定长模型;文献[4]通过引入魔术公式对车辆侧向动力学进行分析,设计了一种线性时变模型预测控制器;文献[5]提出了一种无模型强化学习最优控制方法,采用无模型强化学习方法自学习系统模型知识,求得了系统最优控制策略;文献[6]针对模型预测控制计算量大的问题,在目标函数中引入指数衰减权重矩阵,通过重新分配预测时域内权重,降低误差和控制量的权重,以提高系统的跟踪性能。鉴于少有文献对控制算法精度与常规横向控制问题进行统一研究,且存在控制器响应速度与稳定性的矛盾无法解决、算法在极限工况下的适应性缺乏验证等问题,本文借鉴以上横向控制策略,提出基于模糊 PID(比例-积分-微分)的无人驾驶车辆横向控制算法。

1 无人驾驶车辆横向控制模型

1.1 车辆横向运动学方程

车辆横向运动学模型可以通过数学方程和状态空间表示来描述车辆的运动状态和行为,是横向控制系统设计与路径规划的基础。通过对车辆横向运动进行建模,可以预测车辆的行驶轨迹、转向角度与横向加速度等参数,实现精确的横向控制和路径跟踪^[7]。

车辆运动学方程在数学上主要描述车辆的运动轨迹,通常不考虑作用在车辆上的力,一般用于化简以四轮车辆为代表的横向动力学模型。这种表述方式去除了车辆的滚动与俯仰状态,通过轮胎所产生力的线性系数相对应的小角度假设对系统进行线性化,可以极大地简化相关方程的导数形式。

1.2 车辆运动学方程建立

通过忽略车辆的滚动、反弹与俯仰,可简化车辆的横向动态,得到具有二自由度的车辆运动学模型^[8]。如图 1 所示,该模型的状态方程为一个单输入双输出系统,包括一个输入变量(横向误差)、两个输出变量(方向盘角度与转向角)。

以车辆重心为参考点,可得:

$$ma_y = F_{yf} + F_{yr} \quad (1)$$

式中: m 为车辆总质量; a_y 为 y 轴方向车辆质心处惯性加速度, $a_y = d^2 y / dt^2$; F_{yf} 、 F_{yr} 分别为车辆前后

^{*} 基金项目: 2022 年度甘肃省高等学校创新基金项目(2022B-252)

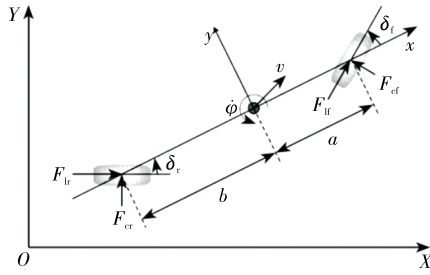


图 1 车辆运动学模型示意图

轮所受 y 方向的力。

a_y 由沿 y 轴的运动加速度 \ddot{y} 与向心加速度 $v_x \dot{\varphi}$ 组成:

$$a_y = \ddot{y} + v_x \dot{\varphi} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得:

$$m(\ddot{y} + v_x \dot{\varphi}) = F_{yf} + F_{yr} \quad (3)$$

由模型围绕 z 轴平衡可得:

$$I_z \ddot{\varphi} = aF_{yf} + bF_{yr} \quad (4)$$

式中: I_z 为车辆转动惯量; $\ddot{\varphi}$ 为车辆横摆角 φ 的二阶倒数。

将轮胎的侧偏角定义为轮胎平面方向与轮胎矢量方向的夹角,则有:

$$\alpha_f = \delta_f - \theta_{vf} \quad (5)$$

式中: α_f 为轮胎侧偏角; δ_f 为前轮转角; θ_{vf} 为前轮速度角。

后轮侧偏角可表示为:

$$\alpha_r = -\theta_{vr} \quad (6)$$

式中: θ_{vr} 为后轮速度角。

车辆前后轮的侧向力分别为:

$$F_{yf} = C_{\alpha_f} (\delta_f - \theta_{vf}) \quad (7)$$

$$F_{yr} = C_{\alpha_r} (-\theta_{vr}) \quad (8)$$

式中: C_{α_f} 、 C_{α_r} 分别为前后轮侧偏刚度。

利用式(7)~(8)可计算 θ_{vf} 与 θ_{vr} , 公式如下:

$$\tan(\theta_{vf}) = \frac{v_y + a\dot{\varphi}}{v_x} \quad (9)$$

$$\tan(\theta_{vr}) = \frac{v_y - b\dot{\varphi}}{v_x} \quad (10)$$

由小角度假设可得:

$$\theta_{vf} = \frac{v_y + a\dot{\varphi}}{v_x} \quad (11)$$

$$\theta_{vr} = \frac{v_y - b\dot{\varphi}}{v_x} \quad (12)$$

将式(4)、式(9)~(10)代入式(3),得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_{\alpha_f} + C_{\alpha_r}}{mv_x} & -\frac{aC_{\alpha_f} + bC_{\alpha_r}}{mv_x} \\ \frac{aC_{\alpha_f} - bC_{\alpha_r}}{I_z v_x} & \frac{a^2 C_{\alpha_f} + b^2 C_{\alpha_r}}{I_z v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_{\alpha_f}}{m} \\ \frac{aC_{\alpha_f}}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} v_y \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \mathbf{B} \delta \quad (14)$$

式中: \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 分别为车辆的状态转移矩阵与输入控制矩阵。

2 模糊 PID 控制算法

2.1 PID 算法

PID 算法是一种经典的反馈控制算法,用于调节和控制系统的动态过程,它基于系统当前误差、历史误差和预测误差的组合来生成系统输出,并根据系统输出与期望值之间的差异进行调整,使系统输出尽可能接近期望值。该算法由三部分构成:

比例(Proportional):比例控制通过将误差乘以一个比例常数来产生系统输出,这意味着系统输出与误差成正比。比例增益决定系统对误差的敏感程度,较高的增益将导致更快的响应,但可能带来过度调整和振荡。

积分(Integral):积分控制通过对误差随时间的累积进行系统输出修正,它消除了比例控制中的稳态误差,并使系统更好地适应变化的负载和干扰。积分常数控制积分作用的强度,较高的积分常数将导致更快的稳态误差消除,但可能导致更慢的响应和振荡。

微分(Derivative):微分控制通过对误差变化率的调节进行系统输出修正,它预测系统未来的动态行为,并减小响应中的超调和振荡。微分常数控制微分作用的强度,较高的微分常数将导致更快的响应和抑制振荡,但微分常数过高可能导致过度放大高频噪声。

图 2 为传统 PID 控制框图。

2.2 模糊 PID 算法

传统的 PID 控制器使用固定的增益常数,对于复杂的非线性系统,可能导致控制性能不佳。模糊 PID 的核心思想是将 PID 控制器的增益常数从确

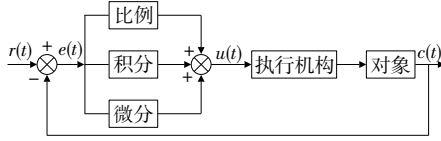


图 2 传统 PID 控制框图

定性的值改为模糊的值,使其能够根据系统的实际运行情况进行自适应调整。模糊 PID 通过模糊化输入,定义模糊规则,并使用模糊推理和解模糊化来生成相应的系统输出。模糊规则是根据经验和知识定义的,描述在不同误差和误差变化率下应采取的控制动作。

本研究模糊控制采用单输入双输出形式,输入为当前系统误差 e_t ,输出为:

$$u_t = k_P \left[e_t + \frac{1}{T_I} \int_0^t e_t dt + T_D \frac{de_t}{dt} \right] \quad (15)$$

式中: k_P 为比例系数; T_I 、 T_D 分别为积分时间常数与微分时间常数。

实际控制中将式(15)离散化为:

$$u_t = k_P e_t + k_I \sum_{j=0}^k e_j + k_D (e_t - e_{t-1}) \quad (16)$$

将模糊控制技术与 PID 算法相结合,在模糊 PID 算法中输入当前系统误差 e_t 与误差变化率 e_{tc} ,输出为 Δk_P 、 Δk_I 、 Δk_D (k_I 、 k_D 分别为积分系数、微分系数; Δk_P 、 Δk_I 、 Δk_D 分别为比例系数、积分系数、微分系数的变化量)。由于在输入过程中当前系统误差与误差变化率会实时改变,使用模糊关系对输出参数进行实时调整。方法如下:1) 确定输入为 e_t 与 e_{tc} ,输出为 Δk_P 、 Δk_I 、 Δk_D 。2) 将输入、输出转化为 7 个等级,分别为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB), e_t 的论域为 $[-1, 20]$, e_{tc} 的论域为 $[-15, 2]$, Δk_P 的论域为 $[-1.5, 1.5]$, Δk_I 的论域为 $[-0.1, 0.5]$, Δk_D 的论域为 $[-0.1, 0.1]$ 。3) 输入的隶属度函数选择 Gaussian 函数,输出的隶属度函数为 Triangle,根据车辆横向控制的特性建立表 1 所示模糊规则。

4) 输出变量 Δk_P 、 Δk_I 、 Δk_D 随着误差与误差变化率的变化按式(17)进行自我调整。图 3 为模糊 PID 的控制框图。5) 按上述步骤在控制过程中循环进行,实现对车辆横向运动的持续控制与调整。

$$\begin{cases} k_P = k_{P0} + \Delta k_P \\ k_I = k_{I0} + \Delta k_I \\ k_D = k_{D0} + \Delta k_D \end{cases} \quad (17)$$

式中: k_{P0} 、 k_{I0} 与 k_{D0} 分别为比例系数、积分系数与微分系数的初始值。

表 1 模糊规则

$\Delta k_{\text{P}}/\Delta k_{\text{I}}/$		e_{tc}						
Δk_{D}		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_t	NB	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PB	PM	PM	ZO	ZO
	NS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NM	NM	NM	NB
	PM	ZO	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB
	PB	ZO	NS	NB	NB	NB	NB	NB

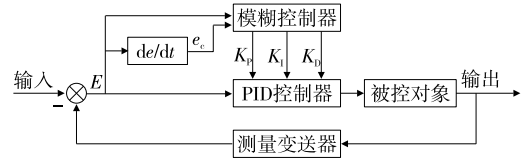


图 3 模糊 PID 控制框图

3 仿真模型建立与结果分析

3.1 仿真模型

为验证基于模糊 PID 的无人驾驶车辆横向控制策略的有效性,使用 MATLAB/Simulink 构建无人驾驶车辆横向控制总体模型,并与 MPC(模型预测控制算法)与 PD(比例导数算法)方法进行对比。基于模糊 PID 的无人驾驶车辆横向控制策略见图 4。

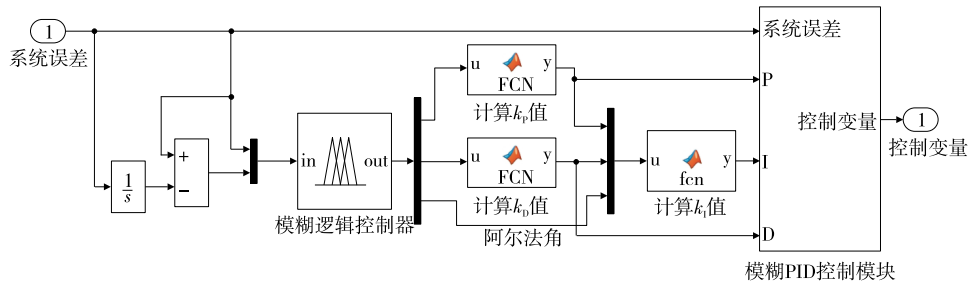


图 4 基于模糊 PID 的无人驾驶车辆横向控制策略

3.2 仿真结果分析

在输入 10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s 的恒定纵向速度下对无人驾驶车辆进行性能分析,仿真结果见图 5。

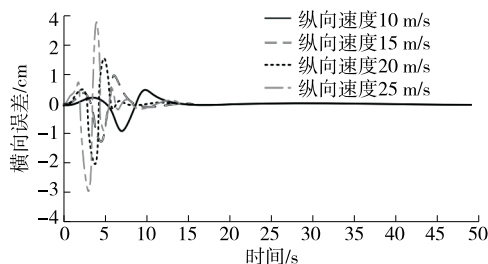


图 5 基于模糊 PID 的无人驾驶车辆在不同纵向速度下的性能

由图 5 可知:基于模糊 PID 的无人驾驶车辆在不同纵向速度下的性能良好。在 10 m/s 的速度下,车辆的横向误差为 $-1 \sim 0.5$ cm;纵向速度从 10 m/s 增加到 15 m/s 时,横向误差为 $-1.2 \sim 0.2$ cm,稳定时间为 7 s;进一步提高纵向速度,模糊 PID 控制器的稳定时间逐渐缩短,且横向误差仍保持在可接受范围内。

纵向速度取 25 m/s,分别采用模糊 PID 控制算法、MPC 算法和 PD 算法进行仿真,结果见图 6。

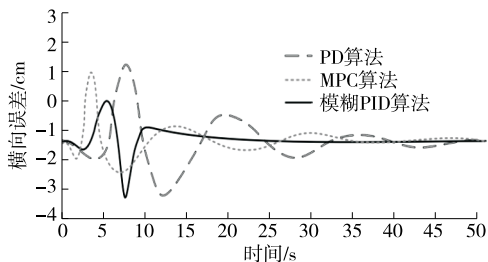


图 6 模糊 PID 与 MPC、PD 算法的对比

从图 7 可以看出:纵向速度为 25 m/s 时,PD 算法的最大横向误差绝对值约为 4 cm,系统稳定时间超过 50 s;MPC 算法的最大横向误差绝对值约为 3.8 cm,系统稳定时间约为 40 s;模糊 PID 算法的最大横向误差绝对值约为 2.5 cm,系统在 12 s 左右已稳定。

与其他两种算法相比,模糊 PID 算法通过实施模糊规则与模糊推理自适应地调整模糊规则与隶属度函数,以适应系统的变化和不确定性,使其能够更好地适应复杂、动态的控制环境,以最小的误差与最

快的速度将车辆引导至所需的参考轨迹,并保持较快的响应速度、较低的振荡频率与良好的稳定性。

4 结论

为提高无人驾驶车辆的横向控制精度,并解决常规横向控制中存在的响应速度慢、振荡频率高与鲁棒性差等问题,本文提出一种基于模糊 PID 的无人驾驶车辆横向控制方法,仿真结果表明:1) 模糊 PID 算法在较为极限的纵向速度下具有良好的适应性,与 MPC 与 PD 算法相比,模糊 PID 算法具有更小的横向误差与更高的轨迹跟踪精度,在保证控制精度的前提下,能有效提高系统的收敛速度、降低系统稳定时间。2) 加入模糊 PID 算法后,通过实施模糊规则与模糊推理自适应地调整模糊规则与隶属度函数,系统能够更好地适应复杂、动态的控制环境,解决常规横向控制中响应速度慢、振荡频率高与鲁棒性差低等问题。

参考文献:

- [1] 赵晨馨,方舟,郭君军,等.城市动态公交车道的研究现状及存在的问题分析[J].公路与汽运,2023(4):11-21.
- [2] 黄琦,黄珊,杨雷.无人驾驶车辆自动转向控制探究[J].时代汽车,2019(21):13-14.
- [3] 徐忠诚,汪世义,吴文强.几种乘用车典型独立前悬架 K&C 性能对比分析[J].公路与汽运,2023(4):8-10.
- [4] 朱林峰,杨家富,施杨洋,等.无人驾驶车辆横向控制策略研究进展[J].世界科技研究与发展,2018,40(5):506-518.
- [5] 王会鲜,李波,郑洪江,等.基于数据驱动的人机混驾多车协同控制算法[J].交通信息与安全,2021,39(1):76-86.
- [6] 赵剑桥,严天一,桂永建,等.基于模糊 PID 的半主动悬架控制策略研究[J].青岛大学学报(工程技术版),2023,38(3):54-58.
- [7] 吕迪,徐坤,李慧云,等.融合类人驾驶行为的无人驾驶深度强化学习方法[J].集成技术,2020,9(5):34-47.
- [8] 王毅,全志辉,尉庆国,等.基于离散 LQR 的无人驾驶车辆横向控制方法[C]//东北大学,中国自动化学会信息物理系统控制与决策专业委员会.第 34 届中国控制与决策会议论文集(1).沈阳:东北大学,2022:8.

收稿日期:2023-09-11