

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.003

引用格式:黄益绍,袁朋涛.基于遗传算法的车辆纵向跟随模糊PID控制[J].公路与汽运,2025,41(1):12-17.

Citation: HUANG Yishao, YUAN Pengtao. Vehicle longitudinal following fuzzy PID control based on genetic algorithm[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(1): 12-17.

基于遗传算法的车辆纵向跟随模糊PID控制*

黄益绍,袁朋涛

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为提高智能车辆纵向跟随控制的精确性和稳定性,基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)设计智能车辆纵向跟随模糊控制系统。设计驱动和制动切换规则,根据期望速度计算期望加速度,实现驱动/制动的切换控制;提出在比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制器的基础上引入模糊控制(Fuzzy Control, FC)的方法,在线整定PID参数;考虑到模糊控制的隶属函数由专家经验获取的局限性,使用遗传算法对其进行优化。通过CarSim/Simlink建立仿真模型,对匀速行驶和变速行驶两种工况下车辆行驶状态进行分析,结果表明,优化后控制器能更快地稳定跟随前车行驶,智能车辆纵向跟随模糊控制系统具有良好的实用性,能提高车辆的驾乘舒适性。

关键词: 汽车;智能车辆;纵向控制;遗传算法(GA);模糊控制(FC);比例-积分-微分(PID)控制

中图分类号:U463.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)01-0012-06

随着交通拥堵、环境污染、资源浪费等问题的不断加剧,智能车辆成为世界各国汽车工业发展的重要方向。智能车辆技术研究的重要问题之一是车辆的运动控制^[1]。在纵向控制上,提高车辆跟随精度和稳定性至关重要。付建基于系统辨识方法构建车辆纵向动力学模型,并设计控制策略减小系统模型不准确和外界干扰的影响^[2]。张卫波等提出一种由期望横摆角速度生成器和模糊比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制器组成的位置误差控制器,通过联合跟踪仿真实现对双移线道路的目标跟踪,结果显示,车辆的跟踪精度较高且稳定性良好,但在直线道路与曲线道路连接处存在偏差^[3]。Ju F.等基于比例-积分与前馈控制提出一种车速和车距控制算法,实现车辆巡航控制^[4]。王浩然等针对铁路站场调车作业的复杂性,设计基于Smith预估器的模糊PID控制器,结果表明,该控制器的适应能力强,速度跟踪效果和停车精度都较高^[5]。李文昌等基于模糊控制(Fuzzy Control, FC)设计纵向车速控制器,仿真结果表明该控制器能较好地跟踪车速,满足车辆驾乘舒适性

要求^[6]。张佳奇等基于预瞄理论提出模糊自适应PID控制方法,该方法可改善控制器的动态性能并具有较好的自适应能力^[7]。江书真提出以前馈控制和模糊逻辑为基础的方法,控制油门开度和制动压力,结果显示该方法的鲁棒性较好^[8]。陈刚等提出以非线性干扰观测器为基础的模糊滑模车速控制方法,该方法通过模糊规则在线调节滑模控制的增益系数以减少系统抖振,结果显示,该方法能有效对模型的不确定性和外部干扰进行估计和补偿^[9]。朱晓宏等使用虚拟现实建模语言构造虚拟世界场景,通过Simulink的VR接口将跟车间距控制系统与该虚拟世界建立关联,利用车辆纵向运动跟车间距控制系统仿真模型产生的信号数据驱动虚拟世界中车辆的运动,实现车辆纵向运动跟车间距控制的虚拟现实仿真^[10]。庄迪等设计基于神经网络和非奇异快速终端滑模的车辆纵向速度跟踪控制器,利用神经网络对干扰进行逼近反馈补偿,降低滑模控制的切换增益,抑制系统的抖动,实现对车辆纵向速度的稳定跟踪^[11]。上述采用模糊控制方法设计的控制器的跟踪性能较好,但由于模糊控制中隶属度的确

* 基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ30619)

定通常是基于专家经验,存在很强的主观性。针对这一问题,本文采用模糊控制和 PID 控制相结合的方法,对智能车辆纵向跟随控制系统进行研究,并利用遗传算法(Genetic Algorithm,GA)对隶属函数进行优化,以提高控制器的精度,提高车辆行驶的安全性和平稳性。

1 模型建立

1.1 建模假设

车辆纵向运动受到很多非线性因素的影响,难以用数学模型精确表达,须对车辆进行简化,获得简洁、准确的车辆纵向动力学模型。假设如下:1)道路满足车辆附着系数要求;2)忽略轮胎与地面的相对滑移;3)车辆只受纵向力的影响;4)车辆模型简化为两轮模型。

车辆所受的力包括驱动力 F_t 、行驶过程中的滚动阻力 F_f 和空气阻力 F_w 、坡道上行驶时的坡度阻力 F_i 及制动力 F_b ,根据牛顿第二定律,车辆纵向动力学表达式为:

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j + F_b \quad (1)$$

式中: F_j 为加速惯性阻力。

1.2 驱动/制动切换逻辑

为避免车辆驱动和制动踏板同时工作,并使驱动和制动控制之间能更平滑地切换,设计驱动和制动切换逻辑。由期望车速计算期望加速度,如果期望加速度为正值,则驱动控制系统将发挥作用;否则,制动控制系统将发挥作用。只有在计算出期望加/减速度后,车辆才会进行加/减速度动作。因此,期望加/减速度不频繁变动,即可减少油门和刹车的频繁切换及机构磨损,提高驾乘舒适度。驱动/制动切换逻辑见表 1。

表 1 驱动/制动切换逻辑

$a_{des} > 0$	驱动
$a_{des} = 0, v_{des} \neq 0$	
$a_{des} < 0$	制动
$a_{des} = 0, v_{des} = 0$	

注: a_{des} 为车辆的期望加速度; v_{des} 为车辆的期望车速。

(1) $a_{des} > 0$ 时,产生驱动力,进行加速控制。

(2) $a_{des} < 0$ 时,只输出制动力,使车辆减速行驶。

(3) $a_{des} = 0, v_{des} \neq 0$ 时,只输出油门控制量,平衡行驶阻力,进行匀速行驶。

(4) $a_{des} = 0, v_{des} = 0$ 时,只输出制动控制量,使车辆停下来。

1.3 驱动控制

经切换逻辑判断,如果期望加速度处于驱动控制范围,则对车辆进行加速操作。利用期望加速度计算车辆所需驱动力,根据驱动力计算发动机期望转矩,最后通过包含发动机转矩、发动机转速和节气门开度的逆发动机模型 MAP 图得到期望节气门开度 α_{des} 。根据式(1),车辆纵向运动方程为:

$$ma_{des} = \frac{T_{tq} i_g i_o \eta_t}{r} - \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 - mgf \quad (2)$$

式中: m 为车辆质量; T_{tq} 为发动机转矩; i_g 为变速器传动比; i_o 为主减速器传动比; η_t 为传动系统传递效率; r 为车轮半径; C_D 为空气阻力系数; ρ 为空气密度; A 为车辆迎风面积; v 为车辆运动的纵向速度; f 为车辆轮胎的滚动阻力系数。

发动机期望转矩 $T_{tq,des}$ 为:

$$T_{tq,des} = \frac{(ma_{des} + 1/2 C_D \rho A v^2 + mgf)r}{\eta_t i_g i_o} \quad (3)$$

与 $T_{tq,des}$ 相对应的期望节气门开度 α_{des} 为:

$$\alpha_{des} = f(T_{tq,des}, \omega_e) \quad (4)$$

式中: $f(T_{tq,des}, \omega_e)$ 为逆发动机转矩特性函数; ω_e 为发动机转速。

1.4 制动控制

当期期望加速度处于制动控制范围时,对车辆进行制动操作。根据期望加速度求出期望制动压力,运动学方程表示为:

$$K_b P_b = -ma_{des} - \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 - mgf \quad (5)$$

式中: K_b 为制动系数; P_b 为车辆制动主缸压力。

期望制动压力 $P_{b,des}$ 为:

$$P_{b,des} = \left| \frac{-ma_{des} - 1/2 C_D \rho A v^2 - mgf}{K_b} \right| \quad (6)$$

2 模糊 PID 控制器设计

参数整定是获得较好控制效果的关键。将模糊控制与 PID 控制相结合进行参数整定是一种有效方法,能解决传统 PID 控制器在使用固定参数时动态性能和静态性能之间的矛盾。

2.1 PID 控制器

根据上述分析,切换逻辑进入驱动控制时应得到的期望节气门开度为 α_{des} ,利用 PID 控制对期望加速度 a_{des} 和自车加速度 a_f 进行调节,即可得到最

终的自车期望节气门开度 α_{f_des} :

$$\alpha_{f_des} = \alpha_{des} + K_p e_a + K_i \int_0^t e_a dt + K_d \frac{de_a}{dt} \quad (7)$$

式中: e_a 为期望加速度 a_{des} 与自车加速度 a_f 的差值, $e_a = a_{des} - a_f$; K_p 、 K_i 、 K_d 为 PID 控制器中参数, 分别为比例调节系数、积分调节系数、微分调节系数。

同理, 切换逻辑进入制动控制时, 最终的自车期望制动压力 P_{bf_des} 为:

$$P_{bf_des} = P_{b_des} + K_p e_a + K_i \int_0^t e_a dt + K_d \frac{de_a}{dt} \quad (8)$$

2.2 模糊 PID 控制器的建立

2.2.1 隶属函数

基于模糊控制规则建立双输入、三输出模糊控制结构。以期望加速度 a_{des} 和由车辆传感器获得的实际加速度 a_{real} 之间的差值 e 及其变化率 R_{ec} 作为模糊控制器的输入, 输出为 PID 控制器中参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的校正值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。公式如下:

$$K_p = K'_p + \Delta K_p \quad (9)$$

$$K_i = K'_i + \Delta K_i \quad (10)$$

$$K_d = K'_d + \Delta K_d \quad (11)$$

式中: K'_p 、 K'_i 、 K'_d 为校正前的控制参数; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为控制参数的校正值。

输入和输出变量的模糊集合均为 7 个, 模糊变量的语言划分为 PB、PM、PS、ZO、NS、NM、NB, 分别表示为正大、正中、正小、零、负小、负中、负大。模糊集合的隶属度函数采用 Triangle 函数分布形式^[12]。 e 和 R_{ec} 的论域范围均为 $[-8, 10]$, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的论域范围分别为 $[-8, 10]$ 、 $[-20, 20]$ 、 $[-10, 20]$ 。利用重心法对系统输出量进行去模糊化。

2.2.2 模糊控制规则

根据 PID 的工程整定经验, 结合驾驶员实际操作经验, 制定如下模糊控制规则: 1) 自车起动或停止时, 误差 e 偏大, 为加快响应速度, 增大 K_p 的值; 为避免超调量较大, 适当减小 K_i 的值; 为防止 R_{ec} 增长过快, 适当减小 K_d 的值。 2) 自车速度逐渐接近目标速度时, e 和 R_{ec} 为中等大小, 略调大 K_i 的值, 减小 K_p 的值, 防止系统超调量过大。 3) 自车速度将要达到目标速度时, 误差 e 偏小, 为使系统更加稳定, 增大 K_p 和 K_i 的值; 为防止系统出现振荡, 充分考虑 R_{ec} 的影响确定最终 K_d 的值。

根据参数调节经验, 运用仿真软件进行多次调

试, 得到表 2~4 所示模糊控制规则。

表 2 K_p 模糊控制规则

R_{ec}	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	NB	NB	NM	NS
NM	PB	PB	PM	PM	ZO	PS	PM
NS	PB	PM	PM	NS	PM	PB	PB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PB	PB	PM	NS	PM	PM	PB
PM	PM	PS	ZO	NM	PM	PB	PB
PB	NS	NM	NB	NB	PB	PB	PB

表 3 K_i 模糊控制规则

R_{ec}	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PS	ZO	NS
NM	PB	PB	PM	PM	ZO	NS	NM
NS	PB	PM	PM	PS	NS	NM	NB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	NB	NM	NS	PS	PM	PM	PB
PM	NM	NS	ZO	PM	PB	PB	PB
PB	NS	ZO	PS	PB	PB	PB	PB

表 4 K_d 模糊控制规则

R_{ec}	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	NS	NM	NB
NM	PB	PB	PM	PM	PM	NB	NB
NS	PB	PM	PS	PS	NB	NB	NB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	NB	NB	NB	PS	PS	PM	PB
PM	NB	NB	NM	PM	PM	PB	PB
PB	NB	NM	NS	PB	PB	PB	PB

2.3 控制器的优化

在模糊控制器设计中, 隶属函数的确定主要依赖专家经验或采用反复试验的方法, 从本质上讲, 它是寻求最佳方案的过程。遗传算法是一种模仿自然界中适者生存的生物演化规律的自学习优化算法^[13], 对复杂问题具有独特的优越性, 适用于模糊控制系统的优化。图 1 为基于遗传算法的模糊 PID 控制参数优化流程。

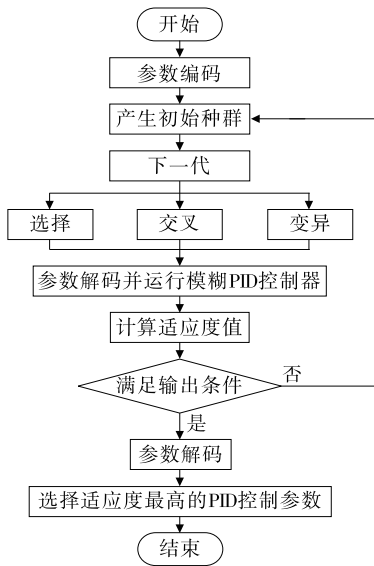


图 1 基于遗传算法的模糊 PID 控制参数优化流程

2.3.1 遗传编码

编码是将需要优化的参数按照一定规则映射到编码空间中形成一个“基因”，所有参数对应的基因串联在一起构成一个“染色体”。遗传操作的目标是通过遗传操作获取最优“染色体”，然后将其解码为原参数空间的数值。解码和编码是相互逆向的操作。

模糊控制器设计中隶属度函数采用 Triangle 函数分布,由于其为等腰三角形,只需选定三角形函数中一个底边端点和顶点的横坐标作为优化参数,即可对隶属函数进行编码,另一个底边端点横坐标为 $2t-s$ 。每个模糊集合的范围由参数 s, t 决定(见图 2)。采用二进制编码,隶属函数的编码长度为 70(见图 3)。

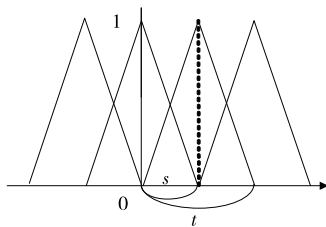
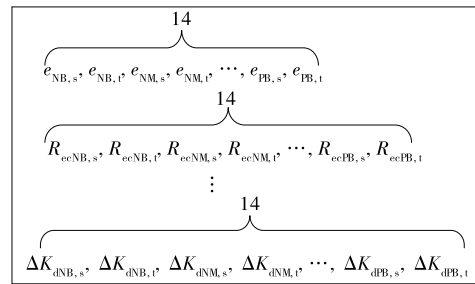


图 2 模糊论域的划分

2.3.2 适应度函数

在全局寻优过程中,利用适应度函数对个体的优劣程度进行评价,适应度值高的个体被保留,适应度值低的个体被淘汰。考虑系统的动态特性和稳态特性,使用 IAE(绝对误差积分)性能指标 J 评价系统的性能,表达式如下:



$e_{NB,s}, e_{NB,t}, e_{NM,s}, e_{NM,t}, \dots, e_{PB,s}, e_{PB,t}$ 为对误差 e 的隶属函数编码; $R_{ecNB,s}, R_{ecNB,t}, R_{ecNM,s}, R_{ecNM,t}, \dots, R_{ecPB,s}, R_{ecPB,t}$ 为对误差变化率 R_{ec} 的隶属函数编码; $\Delta K_{dNB,s}, \Delta K_{dNB,t}, \Delta K_{dNM,s}, \Delta K_{dNM,t}, \dots, \Delta K_{dPB,s}, \Delta K_{dPB,t}$ 为对 ΔK_d 的隶属函数编码

图 3 隶属函数编码

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \tag{12}$$

遗传算法需要计算个体的适应度,将函数转换成最值的问题,转换后函数为:

$$F = \frac{1}{1+J} \tag{13}$$

2.4 优化后的隶属度函数

利用 MATLAB 软件进行优化计算,遗传算法的初始种群设为 50,交叉率设为 0.9,变异率设为 0.1。经过 76 代迭代,得到最佳结果。图 4~8 为遗传算法优化后隶属函数。

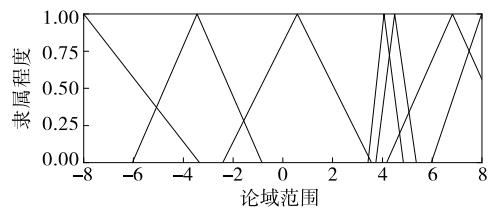


图 4 e 的隶属函数

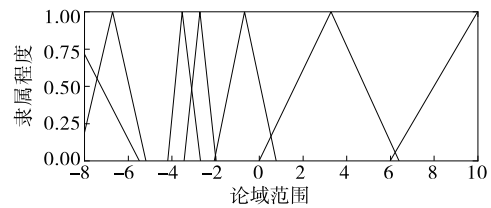


图 5 R_{ec} 的隶属函数

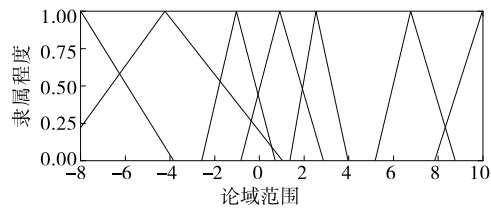


图 6 delta K_p 的隶属函数

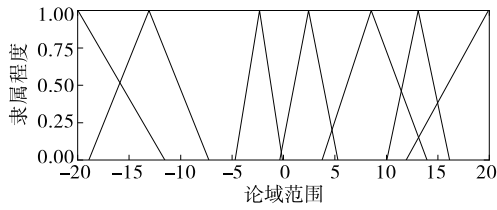


图 7 ΔK_i 的隶属函数

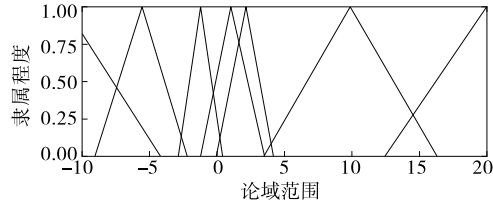


图 8 ΔK_d 的隶属函数

3 仿真分析

为验证上述控制算法的可行性,运用 CarSim/Simulink 软件搭建智能车辆纵向跟随仿真模型,对匀速行驶和变速行驶两种工况下车辆行驶状况进行联合仿真。车辆的基本参数见表 5。

表 5 车辆的基本参数

参数名称	参数值
车辆质量 m/kg	1 270
空气阻力系数 C_D	3.2
车辆迎风面积 A/m^2	2.2
滚动阻力系数 f	0.02
空气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.206
动力传递效率 η_t	9.5
制动系数 K_b	2 450
车轮滚动半径 r/m	0.334

3.1 工况设置

(1) 匀速行驶工况。参考速度设置为 60 km/h, 自车初始速度设置为零。在速度控制器的控制下, 自车加速到 60 km/h 后保持匀速行驶, 仿真时间为 25 s。

(2) 变速行驶工况。参考速度初始值设置为 60 km/h。0~5 s 车辆匀速行驶; 5~10 s 匀减速到 45 km/h, 10~15 s 保持 45 km/h 匀速行驶; 15~20 s 匀加速到 60 km/h, 20~25 s 保持 60 km/h 匀速行驶; 25~30 s 匀减速到 45 km/h, 30~35 s 保持 45 km/h 匀速行驶; 35~40 s 匀加速到 60 km/h。

3.2 仿真结果与分析

匀速行驶工况下仿真结果见图 9, 变速行驶工况下仿真结果见图 10。

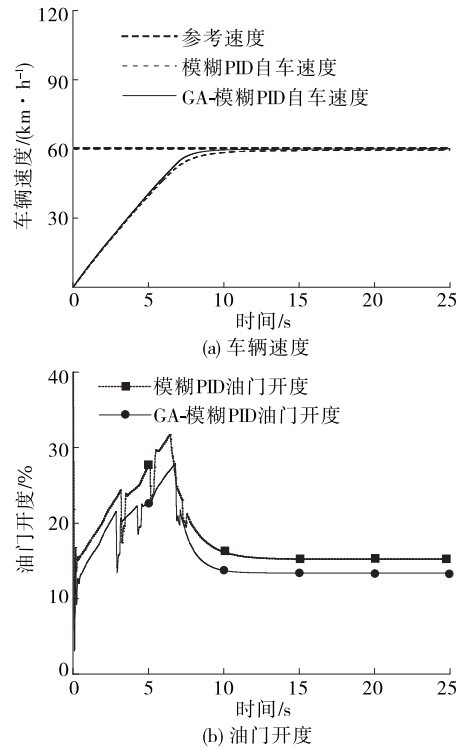


图 9 匀速行驶工况下仿真结果

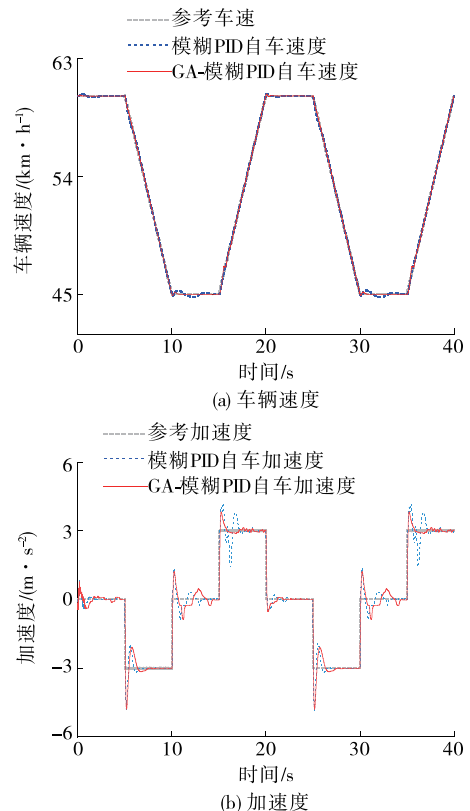


图 10 变速行驶工况下仿真结果

由图 9 可知:匀速行驶工况下,相比模糊 PID 方法,采用 GA-模糊 PID 控制方法,车辆速度能更快贴近参考速度 60 km/h,节气门开度曲线更平缓;两种控制方法下期望节气门开度出现振荡现象,这是由变速器换挡所致,属于正常现象,当自车保持 60 km/h 匀速行驶时,节气门开度保持不变,符合实际情况。总体而言,GA-模糊 PID 方法的控制效果更好。

由图 10 可知:变速行驶工况下,GA-模糊 PID 控制方法对参考速度的跟踪效果更精准,没有出现明显的超调现象,而采用模糊 PID 控制,第 11 s 和 31 s 的速度切换过程中出现明显的超调现象,不能精准跟踪参考速度;GA-模糊 PID 方法的跟踪性能更优,加速度跟踪效果更好。

4 结语

为提高智能车辆纵向跟随控制系统的精确性和稳定性,本文设计驱动/制动切换策略,不再需要缓冲区间,防止油门制动踏板的频繁切换,速度跟踪精度也得到提高;将模糊控制引入 PID 控制中,在线修正 PID 参数,并利用遗传算法对其进行优化,得到优化后隶属函数图。通过 CarSim/Simulink 建立仿真模型,在匀速行驶和变速行驶两种工况下对优化前后车辆纵向跟随模糊控制系统进行对比分析,结果显示,优化后车辆纵向跟随模糊控制系统能使自车速度跟踪更加迅速,加速度更加平稳,既能确保行车安全,又能满足驾乘舒适性要求。本文研究成果有助于提升模糊控制系统的性能,为实现智能车辆无人驾驶技术奠定基础。

参考文献:

[1] GUO J H, HU P, LI L H, et al. Design of automatic steering controller for trajectory tracking of unmanned

vehicles using genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2913-2924.

- [2] 付建.智能驾驶汽车横纵向协同控制方法研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2023.
- [3] 张卫波,张麒麟,马宁,等.基于模糊 PID 的智能车辆路径跟踪控制技术研究[J].机械制造与自动化,2018, 47(2):167-170+174.
- [4] JU F, MURGOVSKI N, ZHUANG W C, et al. Integrated propulsion and cabin-cooling management for electric vehicles[J]. Actuators, 2022, 11(12): 356.
- [5] 王浩然,王兴有,盛玉,等.基于 Smith 预估器的模糊 PID 调车自动驾驶系统速度控制研究[J].中国铁路, 2024(2):93-100.
- [6] 李文昌,郭景华,王进.分层架构下智能电动汽车纵向运动自适应模糊滑模控制[J].厦门大学学报(自然科学版),2019, 58(3):422-428.
- [7] 张佳奇,张涛,杨佳龙,等.基于模糊自适应 PID 的无人驾驶车辆路径跟踪控制[J].大连民族大学学报,2021, 23(3):218-222.
- [8] 江书真.智能汽车轨迹跟踪横纵向综合控制策略研究[D].西安:长安大学,2021.
- [9] 陈刚,吴俊.无人驾驶机器人车辆非线性模糊滑模车速控制[J].中国公路学报,2019, 32(6):114-123.
- [10] 朱晓宏,丁卫东,钟炳迪,等.车辆纵向运动跟车间距控制虚拟现实仿真[J].公路与汽运,2006(3):32-33.
- [11] 庄迪,黄益绍.基于神经网络与终端滑模的车辆纵向速度控制[J/OL].交通科学与工程,1-8[2024-12-27]. <https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20230424002>.
- [12] 段亚军,杨有龙,白旭英.基于模糊规则的随机缺失属性值数据分类算法[J].吉林大学学报(理学版), 2019, 57(1):89-96.
- [13] 刘洪玮,石红瑞.基于遗传算法优化的汽车巡航模糊控制策略[J].计算机仿真,2010, 27(7):285-287.

收稿日期:2024-09-04

(上接第 11 页)

- [18] 张志俊,王盼盼.基于 Kruskal-Wallis 检验的公路货车车辆满载率差异分析[J].交通运输系统工程与信息, 2014, 14(5):216-220+241.
- [19] 曾知法,宋波,李天斌,等.隧道涌突水危险度的模糊综合评价方法[J].中外公路,2011, 31(4):213-216.
- [20] SHEN N Z, GUO X Y, CUI J W, et al. Assessment of urban community emergency preparedness and response capacity using entropy weight method and

multilayer fuzzy comprehensive model[J]. Tehnički Vjesnik, 2024, 31(3): 843-850.

- [21] 刘学军,蒋明锋.高速公路出入口衔接路网适应性分析[J].公路与汽运,2018(6):19-21+27.
- [22] 陈熙源,戈明明,姚志婷,等.雨雪天气下的激光雷达滤波算法研究[J].仪器仪表学报,2023, 44(7): 172-181.

收稿日期:2024-07-16